

# Curso Resumido de Eletrônica de Potência

Prof. Clovis Antonio Petry

[www.ProfessorPetry.com.br](http://www.ProfessorPetry.com.br)

---

# 1 Índice

Objetivo de aprendizagem 01 – Introdução à eletrônica de potência	3
Objetivo de aprendizagem 02 – Componentes eletrônicos	14
Objetivo de aprendizagem 03 – Conversores ca-cc	31
Objetivo de aprendizagem 04 – Conversores cc-cc	55
Objetivo de aprendizagem 05 – Conversores cc-ca	82
Objetivo de aprendizagem 06 – Conversores ca-ca	118
Objetivo de aprendizagem 07 – Projeto de elementos magnéticos	148
Objetivo de aprendizagem 08 – Operação de conversores em malha fechada	174
Objetivo de aprendizagem 09 – Circuitos integrados para conversores estáticos	192



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 - INTRODUÇÃO À ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, junho de 2020 (*revisado em novembro de 2020*).

---

## **INTRODUÇÃO À ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

### **Objetivo de Aprendizagem**

Conhecer os grupos de conversores estáticos, a área de eletrônica de potência e *softwares* aplicados à mesma.

### **Objetivos parciais**

- Conhecer o conceito de eletrônica de potência, suas aplicações e conhecimentos envolvidos;
- Conhecer os grupos de conversores estáticos;
- Utilizar *softwares* aplicados a eletrônica de potência.

### **Capítulos e aulas relacionadas**

Este objetivo de aprendizagem está relacionado aos capítulos de introdução e 01 da apostila e com as aulas 00 e 01 da disciplina.

### **Pré-requisitos**

Este objetivo de aprendizagem não tem pré-requisito.

### **Continuidade dos Estudos**

O próximo objetivo de aprendizagem será conhecer os componentes eletrônicos aplicados a conversores estáticos.

### **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 o capítulo 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 – 2020/2. 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 (apresentação 01);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (introdução e capítulo 01).

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 -  
INTRODUÇÃO À ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

## 1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina se refere aos conceitos iniciais sobre eletrônica de potência e conversores estáticos.

### 1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Conversão de energia;
- Conversores estáticos;
- Eletrônica de potência;
- Aplicações da eletrônica de potência;
- *Softwares* aplicados à eletrônica de potência.

### 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 que é a área de eletrônica de potência;
- Diferenciar conversores estáticos de conversores rotativos;
- Citar os quatro grupos de conversores estáticos;
- Citar *softwares* utilizados em eletrônica de potência.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para discorrer sobre a área de eletrônica de potência, o que se estuda nesta disciplina e onde os circuitos estudados são aplicados.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explique o que é eletrônica de potência.
2. Quais os quatro grupos de conversores estáticos?
3. Quais *softwares* de simulação são comumente utilizados em eletrônica de potência?
4. Quais *softwares* de cálculos matemáticos são comumente utilizados em eletrônica de potência?

## 2 Introdução à Eletrônica de Potência

### 2.1 Introdução

Esta parte do documento apresentará o conceito de eletrônica de potência, a conversão de energia elétrica e os conversores estáticos estudados em eletrônica de potência.

### 2.2 Conversão de energia

A conversão de energia é realizada com diferentes finalidades. A título de exemplo, a seguir são listadas algumas finalidades para a conversão de energia elétrica:

- Aplicações diferentes conforme a forma;
- Dificuldades de armazenamento;
- Dificuldades de transmissão;
- Alteração/adaptação de amplitudes, formas e quantidades;
- Reaproveitamento de energia.

Assim, em síntese, na eletrônica de potência estudamos os circuitos e equipamentos que convertem para outros níveis e formas a energia elétrica. Também é comum se estudar os elementos geradores de energia elétrica e as cargas que convertem esta energia em outras formas.

### 2.1 Conversores estáticos

Os conversores podem ser estáticos ou rotativos, sendo que:

- Conversor rotativo: aquele que converte energia usando mecanismos móveis (gerador-motor-gerador);
- Conversor estático: dispositivo eletrônico que converte energia sem usar componentes móveis (giratórios).



Figura 1 – Exemplos de conversores rotativos e estáticos.

Por sua vez, os conversores estáticos são divididos em:

- Conversores ca-cc: Denominados de retificadores: convertem a tensão alternada da rede de energia elétrica em uma tensão contínua.
- Conversores ca-ca: Denominados de *choppers* CA: convertem a tensão alternada da rede de energia elétrica em tensão alternada estabilizada, por exemplo.
- Conversores cc-cc: Denominados de *choppers*: convertem tensão contínua em tensão contínua.
- Conversores cc-ca: Denominados de inversores: convertem tensão contínua em alternada, muito usados em acionamento de motores elétricos.

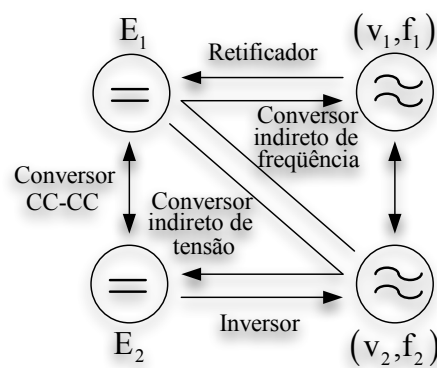


Figura 2 – Grupos de conversores estáticos.

## 2.1 Eletrônica de potência

A definição de eletrônica de potência não é consenso na literatura, citando-se a seguir algumas definições, sendo a última a mais objetiva e direta para explicar o que é esta área do conhecimento:

- Eletrônica de Potência é a tecnologia associada com conversão eficiente, controle e condicionamento de potência elétrica através de interruptores estáticos de uma fonte disponível na entrada numa saída desejada;
- Eletrônica de Potência pode ser definida como uma ciência aplicada dedicada ao estudo dos conversores estáticos de energia elétrica. Este último pode ser definido como um sistema, constituído por elementos passivos (resistores, capacitores e indutores) e elementos ativos (interruptores), tais como Diodos, Tiristores, Transistores, GTO's, Triacs, IGBT's e MOSFET's, associados segundo uma lei pré-estabelecida;
- Entende-se que Eletrônica de Potência é uma área da Engenharia Elétrica que tem a finalidade de estudar e construir conversores de potência visando o controle de energia elétrica.

---

## 2.2 Conversores lineares x não-lineares

Em eletrônica de potência se busca reduzir perdas, volume e peso dos equipamentos desenvolvidos, sendo que se utilizam os semicondutores operando no modo chave, isto é, transistores operando no corte e na saturação, e não no modo linear (região ativa). As diferenças e objetivos de fontes lineares e chaveadas (comutadas) são:

- As fontes lineares convertem a tensão alternada da rede em tensões contínuas, normalmente de baixa amplitude, sem o uso de componentes chaveados (comutados);
- Fontes chaveadas exercem a mesma função, mas utilizando componentes comutados (chaveados);
- Fontes lineares: são mais robustas, simples e fáceis de projetar, podem ser mais baratas ou não, são muito volumosas e pesadas;
- Fontes chaveadas: não são tão robustas, mais difíceis de projetar e consertar, podem ser mais baratas ou não, são pequenas e leves.

---

## 2.3 Aplicações de eletrônica de potência

A eletrônica de potência tem muitas aplicações, desde residenciais, comerciais e industriais, citando-se a seguir algumas delas:

- Fontes chaveadas;
- Controle de motores de corrente contínua e alternada;
- Conversores para soldagem;
- Alimentação de emergência;
- Carregadores de bateria;
- Retificadores para eletroquímica;
- Transmissão em corrente contínua;
- Reatores eletrônicos;
- Filtros ativos;
- Compensadores estáticos;
- Processamento de energias alternativas;
- Amplificadores de potência;
- Controles de temperatura;
- Entre outras.

## 3 Softwares para Eletrônica de Potência

### 3.1 Introdução

A seguir serão apresentados alguns exemplos de *softwares* úteis para eletrônica de potência, destacando-se os simuladores de circuitos eletrônicos, essenciais para o estudo e desenvolvimento de conversores estáticos.

### 3.2 Simuladores de circuitos eletrônicos

Existem inúmeros simuladores de circuitos eletrônicos, sendo preferidos para eletrônica de potência:

- Psim (<https://powersimtech.com>);
- Multisim (<https://www.multisim.com>);
- Orcad (<https://www.orcad.com>).

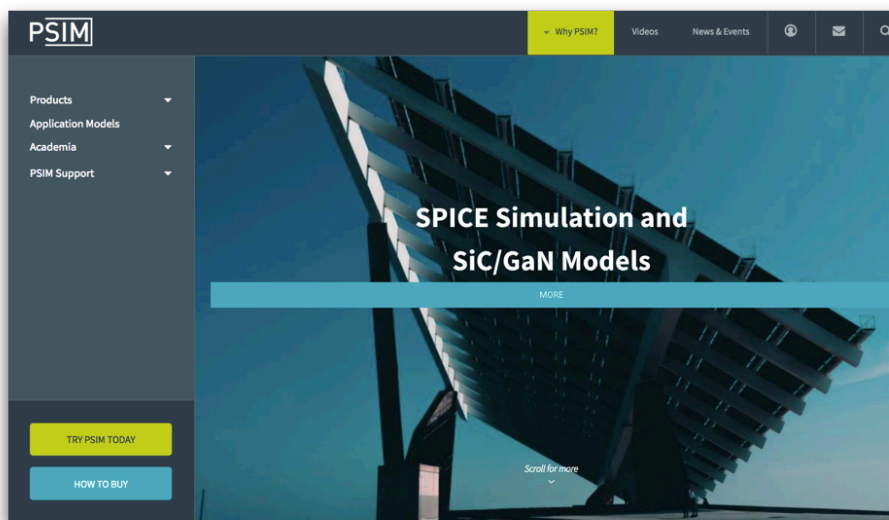


Figura 3 – Página do Psim.

Em virtude de sua facilidade de uso, versão demonstração funcional e gratuita e uso de pouco espaço em disco, será utilizado intensamente na disciplina o *software* Psim.

### 3.1 Cálculo de circuitos eletrônicos

Do mesmo modo que simuladores, existem diversos *softwares* para cálculos matemáticos, destacando-se alguns:

- Matchad (<https://www.mathcad.com>);
- Mathematica (<https://www.wolfram.com/mathematica>);

- Smath Studio (<https://en.smath.com>).

Ao longo da disciplina serão utilizados diferentes *softwares* para cálculos matemáticos, focando-se no Smath Studio, pois o mesmo é gratuito e possui inclusive versão online (*cloud*).

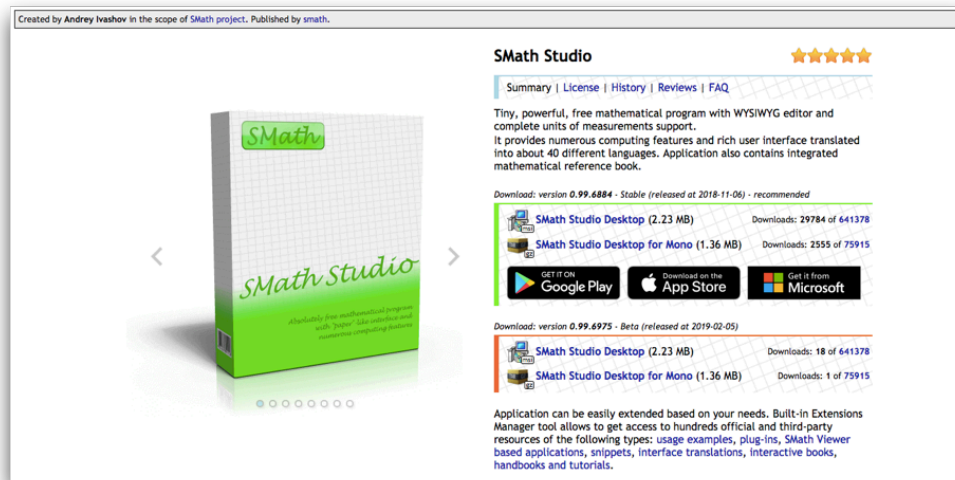


Figura 4 – Página do Smath Studio.

## 4 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

**ER 01.** Qual a diferença entre conversores estáticos e rotativos?

Os conversores estáticos utilizam semicondutores, sendo que não possuem partes móveis; enquanto os conversores rotativos se baseiam em máquinas elétricas (ca e cc), tendo partes girantes.

**ER 02.** Cite duas aplicações para eletrônica de potência?

Reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes e inversores de frequência para acionamento de motores.

**ER 03.** O que são conversores ca-cc?

São conversores que convertem a tensão alternada, normalmente da rede de energia elétrica, em tensão contínua.

**ER 04.** Cite um *software* para simulação de circuitos eletrônicos e um *software* para cálculos matemáticos.

Multisim e Mathematica.

## Exercícios Propostos

- EP 01.** Explique o que é eletrônica de potência.
- EP 02.** O que são conversores ca-ca?
- EP 03.** Cite duas aplicações de eletrônica de potência.
- EP 04.** Explique o que é conversão de energia elétrica.

## 5 Atividade Avaliativa

### 5.1 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.** Explique o que é eletrônica de potência.
- AA 02.** Quais os quatro grupos de conversores estáticos?
- AA 03.** Inversores de frequência são conversores estáticos ou rotativos?
- AA 04.** Cite duas diferenças entre fontes lineares e chaveadas.
- AA 05.** Cite duas aplicações de eletrônica de potência.

AA 01. É uma área da engenharia elétrica que estuda os conversores estáticos.  
AA 02. Conversores ca-cc, cc-cc, cc-ca e ca-ca.  
AA 03. Conversores estáticos.  
AA 04. Fontes lineares usam baixa frequência e tem grande volume. Fontes chaveadas usam alta frequência e os transistores operam como chaves (saturação e corte).  
AA 05. Amplificadores de áudio classe D e estabilizadores de tensão.



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 - COMPONENTES ELETRÔNICOS

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, julho de 2020 (*revisado em novembro de 2020*).

---

## **COMPONENTES ELETRÔNICOS**

### **Objetivo de Aprendizagem**

Conhecer os componentes passivos e semicondutores utilizados em eletrônica de potência, cálculo térmico e projeto de dissipadores de calor.

### **Objetivos parciais**

- Conhecer os principais componentes passivos utilizados em eletrônica de potência;
- Conhecer os semicondutores aplicados a eletrônica de potência;
- Realizar cálculo térmico e dimensionamento de dissipadores de calor.

### **Capítulos e aulas relacionadas**

Este objetivo de aprendizagem está relacionado aos capítulos 02, 03 e 04 da apostila e com as aulas 02, 03 e 04 da disciplina.

### **Pré-requisitos**

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 01 – Introdução à Eletrônica de Potência.

### **Continuidade dos Estudos**

O próximo objetivo de aprendizagem será estudar os conversores ca-cc (retificadores).

### **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 – 2020/2. 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 (apresentação 02);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulos 02, 03 e 04).

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 -  
COMPONENTES ELETRÔNICOS**

## 1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos componentes passivos (resistor, indutor e capacitor) e aos principais semicondutores utilizados em eletrônica de potência. Este conteúdo foi estudado, em parte, em outras disciplinas do curso, servindo este material como revisão e fixação da matéria.

### 1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Componentes passivos (resistor, indutor e capacitor);
- Diodos semicondutores;
- Tiristores;
- Transistores;
- Cálculo térmico e projeto de dissipadores de calor.

### 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 comportamento de resistores, indutores e capacitores;
- Entender o funcionamento de semicondutores (diodos, tiristores e transistores);
- Realizar o cálculo térmico de semicondutores;
- Dimensionar dissipadores de calor.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em apresentar ao estudante um circuito com semicondutores, diodos por exemplo, e solicitar que verifique se o componente utilizado está especificado corretamente para o circuito em questão.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Determinar a corrente em um circuito com diodo em corrente contínua.
2. Calcular a potência sobre um diodo ou transistor em corrente contínua.
3. Verificar se determinado modelo de diodo ou transistor irá operar corretamente em um circuito de corrente contínua específico.
4. Calcular a potência e escolher um dissipador para um semicondutor em cc.

## 2 Componentes Passivos

### 2.1 Introdução

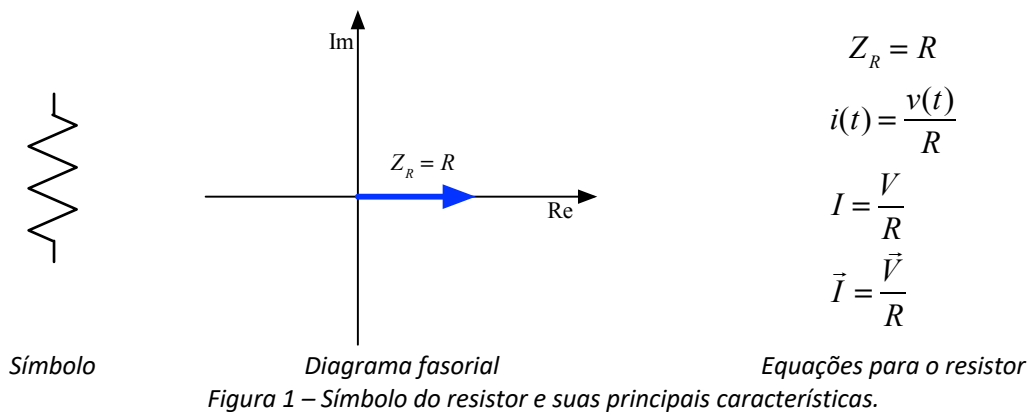
Os componentes passivos (resistores, indutores e capacitores) foram estudados ao longo de todo o curso de eletrônica. De todo modo, a título de revisão e destacando alguns pontos de interesse, apresentamos aqui uma breve revisão sobre estes componentes.

### 2.2 Resistores

Os resistores são componentes que se comportam, em geral, de maneira linear quando submetidos a uma tensão elétrica, que fará circular uma corrente elétrica pelos mesmos. Lembrando que os resistores tem a propriedade de se opor a passagem da corrente elétrica, dissipando energia na forma de calor (efeito Joule).

O símbolo do resistor fixo é mostrado na Figura 1, juntamente com a expressão da Lei de Ohm neste componente, mostrada para variação no tempo, em corrente contínua e em corrente alternada. A impedância de um resistor é igual a sua resistência, sem inserção de defasagem, como mostrado no diagrama fasorial da figura.

A tensão e a corrente em um resistor estão em fase, isto é, o resistor não altera a forma e nem a fase.



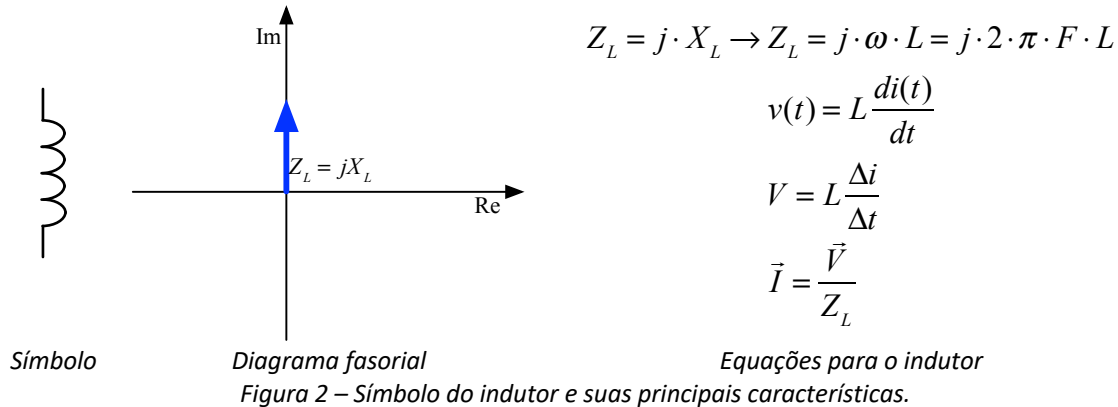
### 2.1 Indutores

Os indutores são componentes que se comportam, em geral, de maneira linear quando submetidos a uma tensão elétrica, que fará circular uma corrente elétrica pelos mesmos. No entanto, os indutores se opõem a variação da corrente elétrica, o que implica que os mesmos provocam defasagem da corrente em relação a tensão.

O símbolo do indutor é mostrado na Figura 2, juntamente com a expressão da Lei de Ohm neste componente, mostrada para variação no tempo, em corrente contínua e em corrente

alternada. A impedância de um indutor é igual a sua reatância indutiva, com a inserção do ângulo de defasagem, como mostrado no diagrama fasorial da figura.

A tensão e a corrente em um indutor não estão em fase, isto é, o indutor atrasa a corrente elétrica em 90° em relação a tensão elétrica.

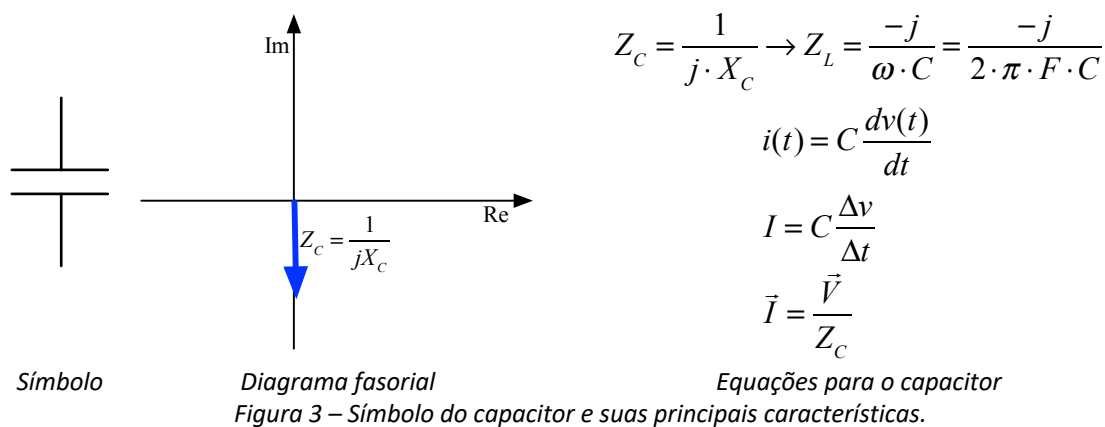


## 2.1 Capacitores

Os capacitores são componentes que se comportam, em geral, de maneira linear quando submetidos a uma tensão elétrica, que fará circular uma corrente elétrica pelos mesmos. No entanto, os capacitores se opõem a variação da tensão elétrica, o que implica que os mesmos provocam defasagem da tensão em relação a corrente.

O símbolo do capacitor é mostrado na Figura 3, juntamente com a expressão da Lei de Ohm neste componente, mostrada para variação no tempo, em corrente contínua e em corrente alternada. A impedância de um capacitor é igual a sua reatância capacitiva, com a inserção do ângulo de defasagem, como mostrado no diagrama fasorial da figura.

A tensão e a corrente em um capacitor não estão em fase, isto é, o capacitor adianta a corrente elétrica em 90° em relação a tensão elétrica.



## 3 Semicondutores

### 3.1 Introdução

Os semicondutores, de modo idêntico aos componentes passivos, também são estudados nos cursos de eletrônica. No entanto, alguns aspectos específicos dos componentes para eletrônica de potência não foram ressaltados naquelas disciplinas, por isso serão explicitados aqui.

### 3.2 Diodo Semicondutor

O diodo semicondutor, construído a partir de uma junção PN, é mostrado na Figura 4. A curva de resposta da corrente em função da tensão é mostrada na figura, onde se nota que um diodo tem a região de operação direta e reversa. Na região direta o diodo entra em condução quando a tensão direta for da ordem de 0,7 V. Já na região reversa o diodo não deve entrar em condução, a não ser que seja atingida a tensão reversa máxima ( $V_{RRM}$ ). Ao entrar em condução na região reversa, o diodo pode ser danificado por excesso de calor.

As principais características que devem ser observadas ao escolher um diodo são:

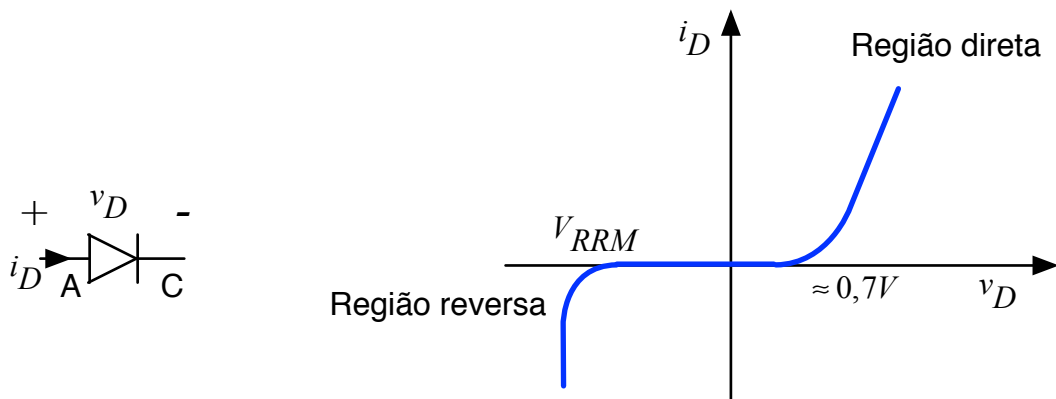
- Corrente direta média – é a corrente que o diodo suporta, em condução contínua (valor médio);
- Corrente direta máxima – é a corrente que o diodo suporta, por exemplo ao se ligar uma fonte, é muito superior à corrente média;
- Tensão direta – é a queda de tensão que o diodo provoca ao estar inserido no circuito e conduzindo;
- Tensão reversa máxima – é a máxima tensão que pode ser aplicada no sentido reverso, a partir da qual o diodo entra em condução também na região reversa.

É importante ressaltar que um diodo bloqueia apenas quando a corrente no mesmo for nula. Em outras palavras, um diodo entra em condução quando estiver polarizado diretamente; mas bloqueia (deixa de conduzir) apenas se a corrente no circuito se tornar zero.

Além disso, os semicondutores possuem atrasos para entrar em condução e para bloqueiar, representados pelos tempos de comutação dos mesmos. Em especial com relação ao bloqueio de um diodo, devido as características construtivas dos mesmos, no momento do bloqueio a barreira de potencial precisa ser reconfigurada, isto é, os portadores de carga irão circular pelo diodo e pelo circuito para aumentar e inverter a tensão da barreira de potencial, da tensão direta até a tensão reversa, em geral igual a tensão da fonte. Este fenômeno é conhecido como

recuperação reversa de um diodo, sendo representado pela corrente de recuperação reversa, que pode atingir centenas de ampères, conforme o modelo de diodo. Em resumo, em termos de recuperação reversa, os diodos podem ser classificados em:

- Recuperação padrão (*standard recovery*) – são os diodos convencionais, com recuperação reversa típica de diodos de silício;
- Recuperação suave (*soft recovery*) – são diodos que minimizam o efeito da recuperação reversa, implicando em aumento no tempo de comutação;
- Recuperação rápida (*fast recovery*) – são diodos com tempo de comutação pequeno, mas alto pico de corrente reversa;
- Sem recuperação reversa – são diodos de carbeto de silício (*silicon carbide*) que praticamente eliminam a recuperação reversa.



Símbolo

Curva I x V

Figura 4 – Símbolo do diodo semiconductor e suas principais características.

As perdas de condução de um diodo são calculadas por:

$$P_D = V_D \cdot I_D$$

### 3.3 Tiristor

Os diodos semicondutores são componentes sem terminal de controle, isto é, entram em condução quando polarizados diretamente e bloqueiam quando a corrente nos mesmos se torna nula.

Os tiristores são componentes construídos a partir dos diodos de junção PN, mas com terminal de controle, chamado de gatilho (*gate*).

Os principais tipos de tiristores são:

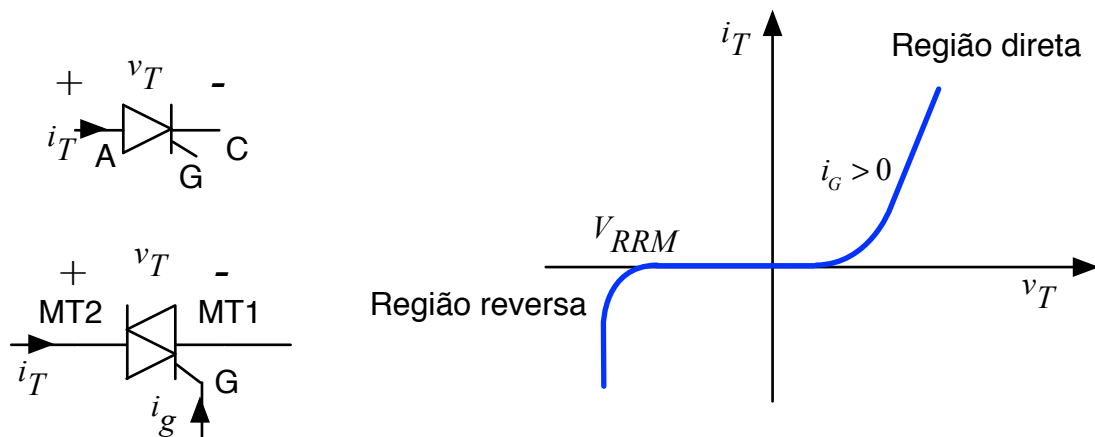
- SCR – diodo retificador de silício; é um diodo unidirecional em corrente com

terminal de controle (gatilho);

- TRIAC – é um tiristor bidirecional, mas com apenas um terminal de controle, usado em conversores para corrente alternada, pois pode conduzir no semiciclo positivo e negativo da tensão;
- DIAC ou SIDAC – são diodos para corrente alternada, utilizados nos circuitos de disparo de SCRs ou TRIACs.

Os tiristores do tipo SCR ou TRIAC entram em condução quando diretamente polarizados e com corrente no terminal de controle (gatilho); sendo que bloqueiam quando sua corrente se anula. Isso significa que um tiristor necessita apenas de um pulso de corrente no gatilho para entrar em condução, pois assim permanecerá até a corrente zerar.

As características técnicas dos tiristores são semelhantes as dos diodos.



Símbolo do SCR e do TRIAC

Curva I x V

Figura 5 – Símbolo do diodo semiconductor e suas principais características.

As perdas de condução de um tiristor são calculadas por:

$$P_T = V_T \cdot I_T.$$

### 3.4 Transistores

Os transistores foram os componentes que mais impactaram a área de eletrônica quando de sua invenção e comercialização, em virtude de permitirem construir equipamentos mais leves e com menor volume e operarem com baixas tensões e correntes, permitindo que fossem alimentados com baterias.

É importante destacar que os transistores possuem três regiões de operação:

- Corte – é a região em que o transistor não está conduzindo, sua corrente é nula

e a tensão sobre o mesmo, em geral, é igual a da fonte de alimentação. Nesta região de operação o transistor não tem perdas, isto é, não processa (dissipa) potência;

- Ativa – é a região de operação em que a corrente de saída varia linearmente com a corrente ou tensão de entrada, por isso é usada para amplificação. Nesta região se tem altas perdas, pois a potência no transistor é o produto da corrente pela queda de tensão no mesmo;
- Saturação – é a região onde o transistor está conduzindo plenamente, com alta corrente. Por outro lado, a queda de tensão é a menor possível, o que implica em perdas menores do que na região ativa.

Assim, em eletrônica de potência se utilizam os transistores nas regiões de corte e saturação, para minimizar as perdas e conseqüentemente a necessidade de uso de dissipador de calor.

Em eletrônica de potência se utilizam em maior escala três tecnologias de transistores, descritas a seguir:

- BJT – transistor bipolar de junção. São os transistores clássicos do tipo NPN ou PNP, acionados pela corrente de base, isto é, a corrente de coletor depende diretamente (ganho) da corrente na base do transistor;
- MOSFET – são transistores mais rápidos, com diferentes tecnologias de fabricação e que conduzem ou não pela aplicação de uma tensão no gatilho (*gate*), que por intermédio do campo elétrico, proporcionará a abertura ou fechamento do canal e, portanto, a condução ou não do transistor;
- IGBT – são componentes construídos a partir da tecnologia BJT e MOSFET, incorporando características de ambos. São acionados por tensão como os MOSFETs, mas possuem perdas semelhantes ao BJT.

Os transistores bipolares de junção ainda são utilizados em algumas aplicações, mas perderam muito mercado após o desenvolvimento dos transistores de efeito de campo. A desvantagem dos transistores bipolares de junção é o fato de sua corrente de coletor ser controlada pela corrente de base, o que implica em altas correntes na entrada quando forem circuitos de alta potência. Por isso estes transistores deixaram de ser utilizados em eletrônica de potência.

Assim, para os transistores bipolares se tem:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$P_{BJT} = V_{CE(sat)} \cdot I_C$$

A tensão de saturação do transistor é  $V_{CE(sat)}$  e varia muito pouco com o aumento da corrente. Assim, a perda em um BJT é diretamente proporcional a corrente de coletor.

O transistor de efeito de campo (FET) foi a base para o desenvolvimento da tecnologia MOSFET, sendo este acionado por tensão no gatilho. Em termos de comportamento na parte de potência, o MOSFET é representado por uma resistência entre os terminais de dreno e da fonte (*source*), denominada de  $R_{DS}$ . Esta resistência tenderá a infinito quando o transistor está na região de corte (não condução) e cairá rapidamente para alguns ohms ou miliohms quando se ultrapassar a tensão de limiar (*threshold voltage*). Assim, se tem:

$$I_D = K \cdot V_G$$

$$P_{MOSFET} = R_{DS(on)} \cdot I_D^2$$

Importante notar que a corrente no dreno depende da tensão de gatilho, independente de ser um transistor para baixa ou alta corrente. Esta é a principal vantagem do transistor MOSFET, pois simplifica o circuito de acionamento do mesmo. Já em termos de dissipação de potência, o MOSFET tem um comportamento ruim, visto que sua potência dependerá da corrente de dreno ao quadrado, ou seja, na medida que a corrente aumentar, a potência aumentará exponencialmente.

Em virtude disso foi desenvolvido o transistor IGBT, que é acionado por tensão e tem perdas determinadas de modo idêntico ao BJT:

$$I_C = K \cdot V_G$$

$$P_{IGBT} = V_{CE(sat)} \cdot I_D$$

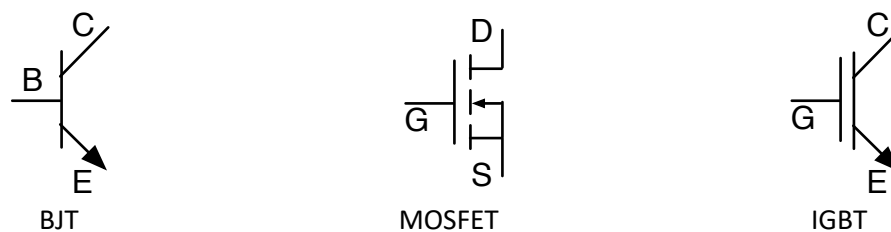


Figura 6 – Símbolo dos transistores.

Por fim, cabe comentar que em termos de velocidade de comutação, resultando na frequência de chaveamento do circuito, os transistores MOSFETs operam com valores muito superiores aos transistores IGBT e BJT, sendo portanto preferidos para desenvolvimento de equipamentos de baixo volume e peso. Por outro lado, na medida que a frequência de

chaveamento aumenta, também aumentam as perdas por comutação, necessitando de mais dissipadores, por exemplo.

## 4 Cálculo Térmico

### 4.1 Introdução

O cálculo térmico de semicondutores é fundamental para o correto e seguro funcionamento dos circuitos eletrônicos. Neste item do documento será apresentado, de maneira simplificada, o procedimento para verificar a necessidade de dissipador e seu dimensionamento.

### 4.2 Modelo Térmico

O modelo térmico utilizado para o cálculo térmico nos semicondutores está mostrado na Figura 7. As resistências mostradas são resistências térmicas, que representam a dificuldade de se retirar o calor da junção do componente. Os elementos deste modelo são:

- $T_j$  – temperatura na junção em graus Celsius;
- $T_c$  – temperatura na cápsula em graus Celsius;
- $T_d$  – temperatura no dissipador em graus Celsius;
- $T_a$  – temperatura ambiente em graus Celsius;
- $R_{jc}$  – resistência térmica entre junção e cápsula, em  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;
- $R_{cd}$  – resistência térmica entre cápsula e dissipador, em  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;
- $R_{da}$  – resistência térmica entre dissipador e ambiente, em  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ .

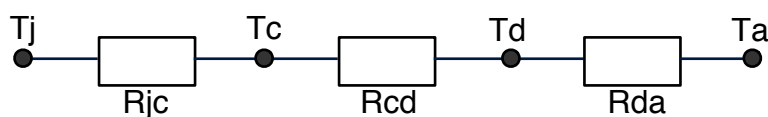


Figura 7 – Modelo térmico.

A principal expressão para o modelo apresentado na figura é:

$$T_j - T_a = R_{ja} \cdot P$$

Esta expressão mostra que a diferença de temperatura entre o ambiente e a junção é provocada pela potência processada no componente multiplicada pela resistência entre o ambiente e a junção.

## 4.1 Cálculo Térmico

A partir do modelo apresentado na Figura 7, pode-se calcular a temperatura na junção do semicondutor por:

$$T_j = T_a + R_{ja} \cdot P$$

Se o valor calculado for maior do que a temperatura suportada pelo componente, então será necessário empregar dissipador ou substituir o componente por outro.

Por exemplo, considerando um diodo 1N4007 com queda de tensão de 1,1 V, corrente de 0,9 A, temperatura ambiente de 30 °C; verifica-se que a temperatura na junção, para uma resistência térmica entre junção e ambiente de 50 °C/W será:

$$P_D = V_D \cdot I_D = 1,1 \cdot 0,9 = 0,99W$$
$$T_j = T_a + R_{ja} \cdot P = 30 + 50 \cdot 0,99 = 79,5^\circ C$$

Neste caso, como o componente suporta 175 °C em sua junção, estaria tudo certo com o funcionamento do circuito e do diodo.

Por outro lado, considere um transistor 2N3055, pelo qual está circulando uma corrente de 10 A, com tensão de saturação entre coletor e emissor de 1,1 V, temperatura ambiente de 50 °C; verifica-se que a temperatura na junção, para uma resistência térmica entre junção e cápsula de 1,52 °C/W, e considerando que a cápsula estará com a mesma temperatura que o ambiente, será:

$$P_{BJT} = V_{CE(sat)} \cdot I_C = 1,1 \cdot 10 = 11W$$
$$T_j = T_c + R_{jc} \cdot P = 50 + 1,52 \cdot 11 = 66,72^\circ C$$

Esta temperatura é inferior a suportada pelo componente, que é de 200 °C.

Já se este componente estivesse operando na região ativa, nas mesmas condições, mas agora com tensão entre coletor e emissor de 5 V, por exemplo, então:

$$P_{BJT} = V_{CE(sat)} \cdot I_C = 10 \cdot 10 = 100W$$
$$T_j = T_c + R_{jc} \cdot P = 50 + 1,52 \cdot 100 = 202^\circ C$$

Neste caso se precisa usar dissipador ou ventilação, pois a temperatura na junção é superior a suportada pelo componente.

Por fim, considere um MOSFET IRF540 conduzindo uma corrente de 20 A, em um ambiente com 40 °C de temperatura. A resistência térmica entre junção e ambiente deste MOSFET é 62 °C/W e sua resistência entre dreno e fonte é de 44 mΩ. Inicialmente verifica-se a necessidade de dissipador:

$$P_{MOSFET} = R_{DS(on)} \cdot I_D^2 = 44m \cdot 20^2 = 17,6W$$

$$T_j = T_a + R_{ja} \cdot P = 40 + 62 \cdot 17,6 = 1131,2^\circ C$$

Precisa-se usar dissipador, pois 1.131,2 °C é muito superior aos 175 °C suportados pelo componente. Assim, considerando a resistência entre junção e cápsula como 1,15 °C/W, se tem:

$$R_{ja(max)} = \frac{T_j - T_a}{P_{BJT}} = \frac{175 - 40}{17,6} = 7,67^\circ C / W$$

$$R_{ja(max)} = R_{jc} + R_{cd} + R_{da} \rightarrow R_{cd} = 1^\circ C / W$$

$$R_{da} = R_{ja(max)} - R_{jc} - R_{cd} = 7,67 - 1 = 6,67^\circ C / W$$

Esta será a resistência térmica máxima do dissipador, que deverá ser escolhido com apropriada para resultar em uma temperatura na junção inferior a 175 °C.

## 5 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

**ER 01.** Explique a diferença em termos de defasagem entre tensão e corrente para resistores, capacitores e indutores?

Os resistores não provocam defasagem entre a tensão e corrente elétrica. Os indutores atrasam a corrente em 90° em relação à tensão; já os capacitores adiantam a corrente em 90° em relação à tensão.

**ER 02.** Explique como um diodo entra em condução e como bloqueia.

Os diodos entram em condução quando diretamente polarizados e bloqueiam quando a corrente nos mesmos se anula.

**ER 03.** Qual a principal diferença de um tiristor para um diodo?

O tiristor tem um terminal de controle, sendo que o diodo não possui controle, entrando em condução quando estiver diretamente polarizado. Já o tiristor precisa estar diretamente polarizado

e ter corrente no gatilho.

**ER 04.** Em termos de velocidade de comutação, compare os transistores BJT, MOSFET e IGBT.

Os transistores com tecnologia MOSFET apresentam os menores tempos de chaveamento, então podem operar em altas velocidades, isto é, altas frequências. Após se tem o IGBT e por último o BJT, que é o componente mais lento dos transistores estudados.

**ER 05.** Qual a função de um dissipador de calor?

O dissipador de calor reduz a resistência térmica entre a junção (ponto mais quente) e o ambiente (ponto mais frio), fazendo com que a temperatura na junção fique dentro dos limites permitidos pelo componente.

---

## Exercícios Propostos

---

**EP 01.** O que é recuperação reversa de um diodo?

**EP 02.** Comente sobre a comutação dos tiristores, explicando como o mesmo entra em condução e como bloqueia.

**EP 03.** Qual a principal vantagem do MOSFET em relação ao BJT?

**EP 04.** Por que o IGBT e BJT são melhores que o MOSFET em termos de perdas?

**EP 05.** Explique como é escolhido um dissipador para um determinado semicondutor.

---

## 6 Atividade Avaliativa

---

### 6.1 Introdução – O que preciso saber

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

**AA 01.** Calcule a potência dissipada em um diodo com tensão direta de 1 V e pelo qual circula uma corrente de 1,5 A.

**AA 02.** O que são diodos de carbeto de silício (*silicon carbide*)?

**AA 03.** Por que os transistores BJT deixaram de ser usados em eletrônica de potência?

**AA 04.** Qual a diferença entre um SCR de um TRIAC?

**AA 05.** O que é resistência térmica?

AA 01. A potência será de  $1 \text{ V} \times 1,5 \text{ A} = 1,5 \text{ W}$ .  
AA 02. Diodos de carbeto de silício são diodos que praticamente não tem recuperação reversa.  
AA 03. Em virtude da corrente de coletor ser proporcional a corrente de base; então para altas potências, se tem correntes de base muito elevadas.  
AA 04. O SCR é unidirecional em corrente, enquanto o TRIAC pode operar em corrente alternada.  
AA 05. É a dificuldade para retirar o calor da junção para o ambiente.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO TÉCNICO INTEGRADO DE ELETRÔNICA

Eletrônica de Potência



---

# GUIA DE ESTUDO

---

## - OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -

### CONVERSORES CA-CC

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, julho de 2020 (*revisado em dezembro de 2020*).

---

## CONVERSORES CA-CC

### Objetivo de Aprendizagem

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

### Objetivos parciais

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

### Capítulos e aulas relacionadas

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

### Pré-requisitos

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

### Continuidade dos Estudos

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

### Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

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

### Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Eletrônica de Potência I – 2020/2. 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 05 até 10);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulos 05 até 10).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

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

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

---

# CONTEÚDO

---

## - OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - CONVERSORES CA-CC

## 1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conversores ca-cc, denominados de retificadores. Este conteúdo foi estudado, em parte, em outras disciplinas do curso, servindo este material como revisão e fixação da matéria, além de se apresentarem aspectos novos sobre o funcionamento e projeto de conversores ca-cc.

### 1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

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

### 1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

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

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

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

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

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

Exemplo de atividade avaliativa:

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

## 2 Formas de Onda e Parâmetros Principais

### 2.1 Introdução

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

### 2.2 Tensão senoidal

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

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

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

Importante lembrar que:

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

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

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

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

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

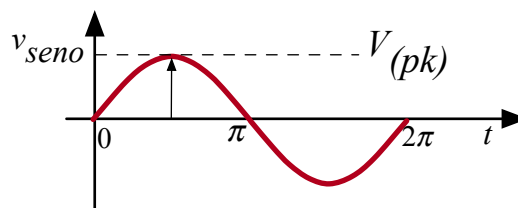


Figura 1 – Forma de onda senoidal.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2.1 Tensão senoidal retificada em meia onda

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

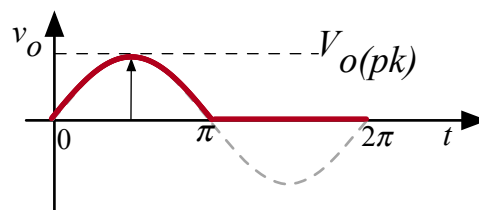


Figura 2 – Forma de onda senoidal retificada em meia onda.

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

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

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

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

## 2.1 Tensão senoidal retificada em onda completa

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

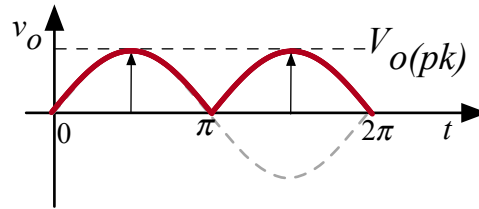


Figura 3 – Forma de onda senoidal retificada em onda completa.

Os parâmetros de tensão da forma de onda senoidal da Figura 3 serão:

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

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

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

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

## 2.1 Tensão quadrada

A tensão com forma de onda quadrada é mostrada na Figura 4. Por sua vez, a Figura 5 mostra a forma de onda para retificação em meia onda e onda completa.

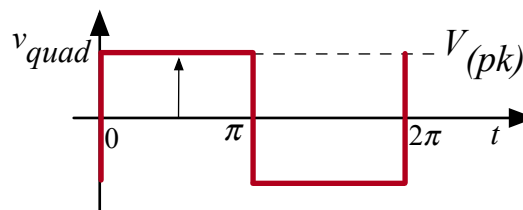


Figura 4 – Forma de onda quadrada.

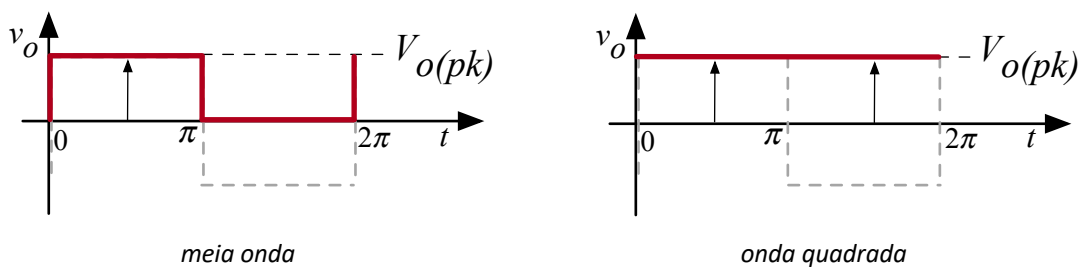


Figura 5 – Formas de onda quadrada com retificação.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 3 Retificadores de Meia Onda

### 3.1 Introdução

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

### 3.2 Retificador de meia onda com carga resistiva

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

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

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

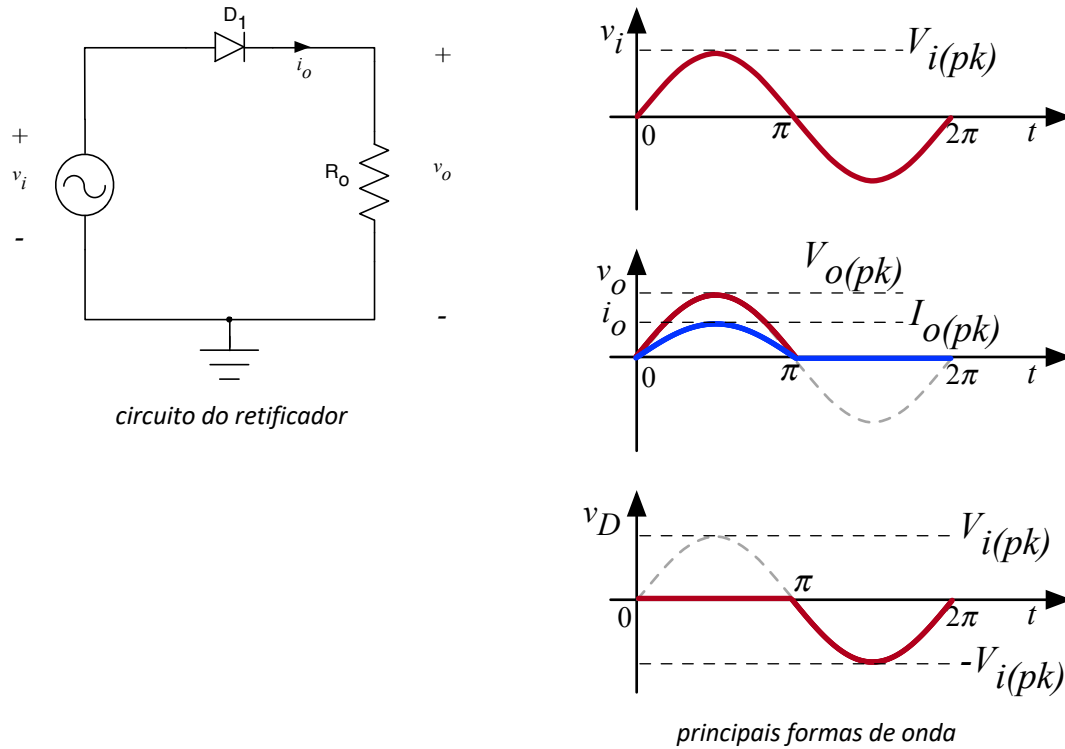


Figura 6 – Circuito retificador de meia onda e principais formas de onda.

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

$V_{i(pk)}$  = definido

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

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

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

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

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

### 3.3 Retificador de meia onda com carga resistiva-indutiva

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

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

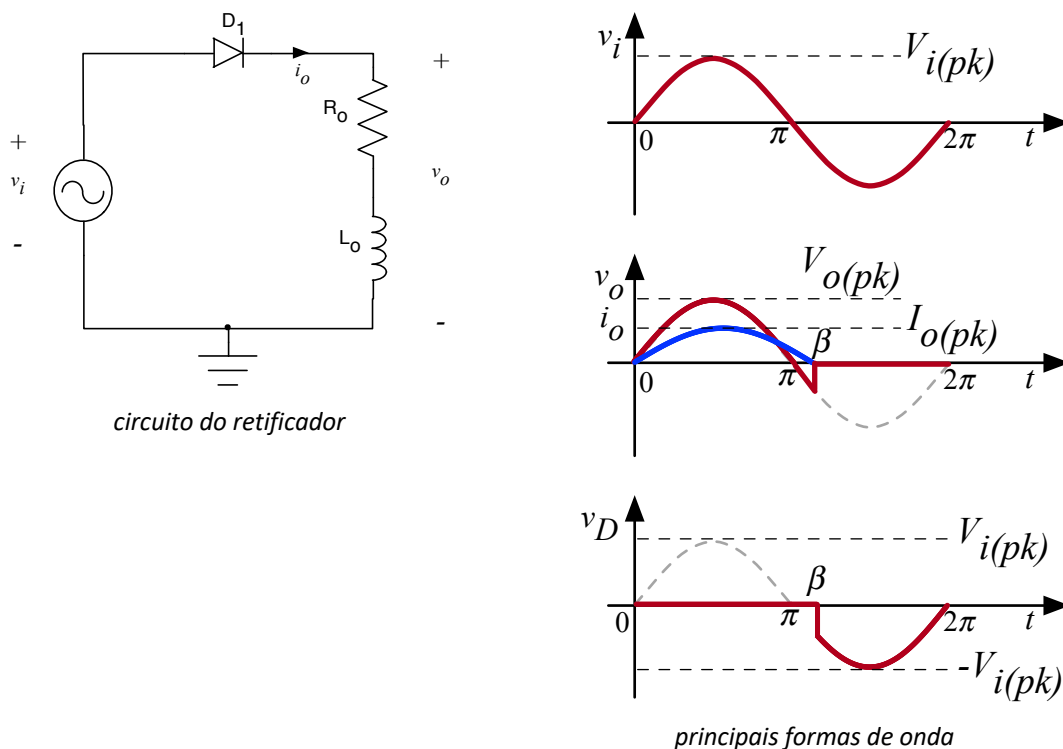


Figura 7 – Circuito retificador de meia onda com carga mista e principais formas de onda.

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

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

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

Adotando-se uma aproximação linear sobre o ábaco que determina o ângulo em que a corrente se torna zero ( $\beta$ ) a partir do ângulo da carga ( $\phi$ ), conforme ensinado no livro de Eletrônica de Potência do professor Ivo Barbi (<https://ivobarbi.com.br>), pode-se obter:

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

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

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

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

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

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

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

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

## 3.4 Retificadores de onda completa

### 3.4.1 Retificador de onda completa com ponto médio

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

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

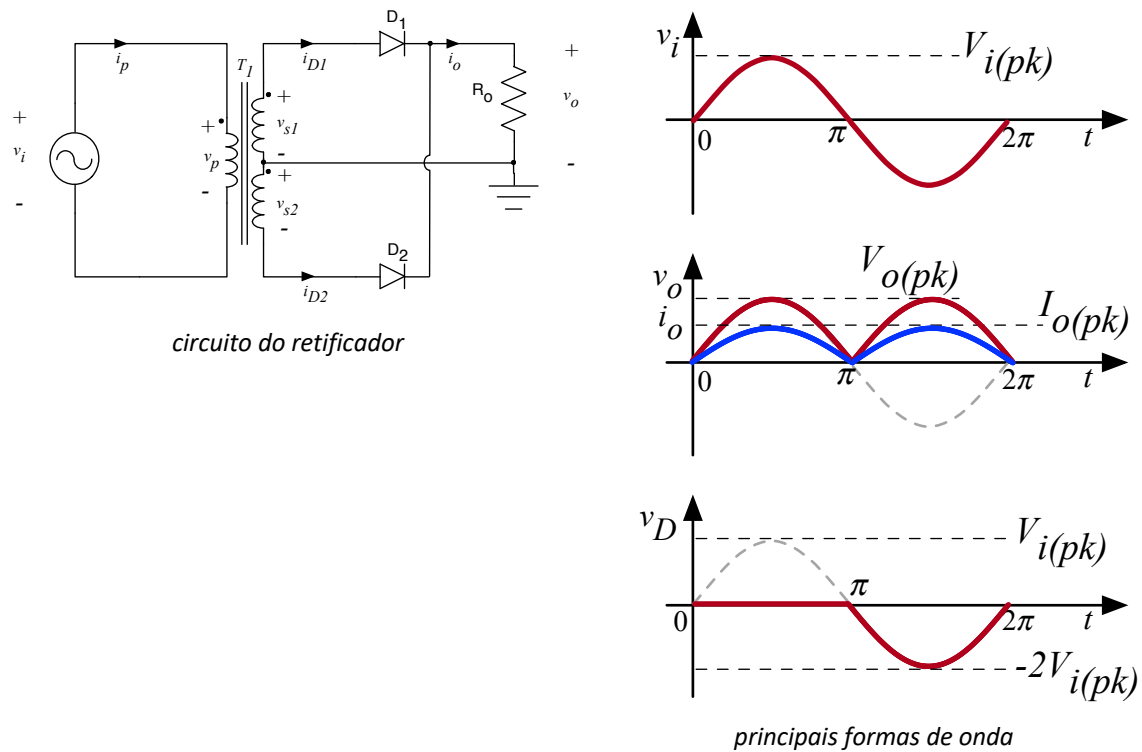


Figura 8 – Circuito retificador de onda completa em ponto médio e principais formas de onda.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

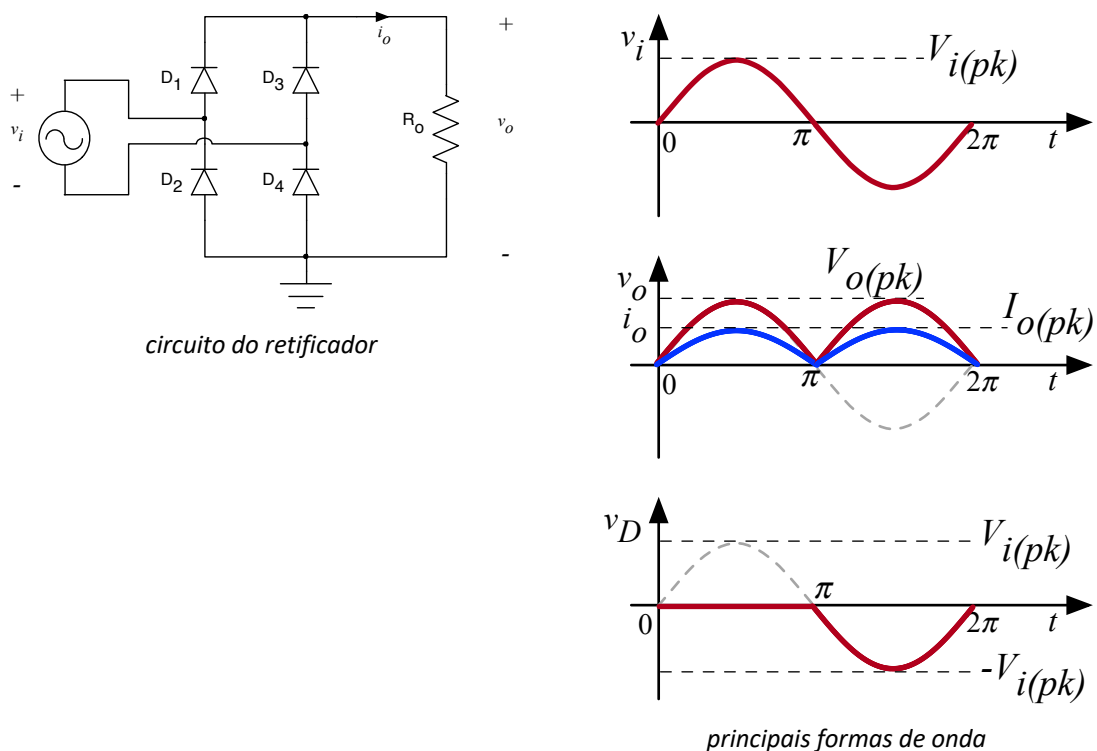


Figura 9 – Circuito retificador de onda completa em ponte completa e principais formas de onda.

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

por:

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

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

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

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

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

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

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

## 3.5 Retificadores com filtro capacitivo

### 3.5.1 Retificador de meia onda com filtro capacitivo

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

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

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

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

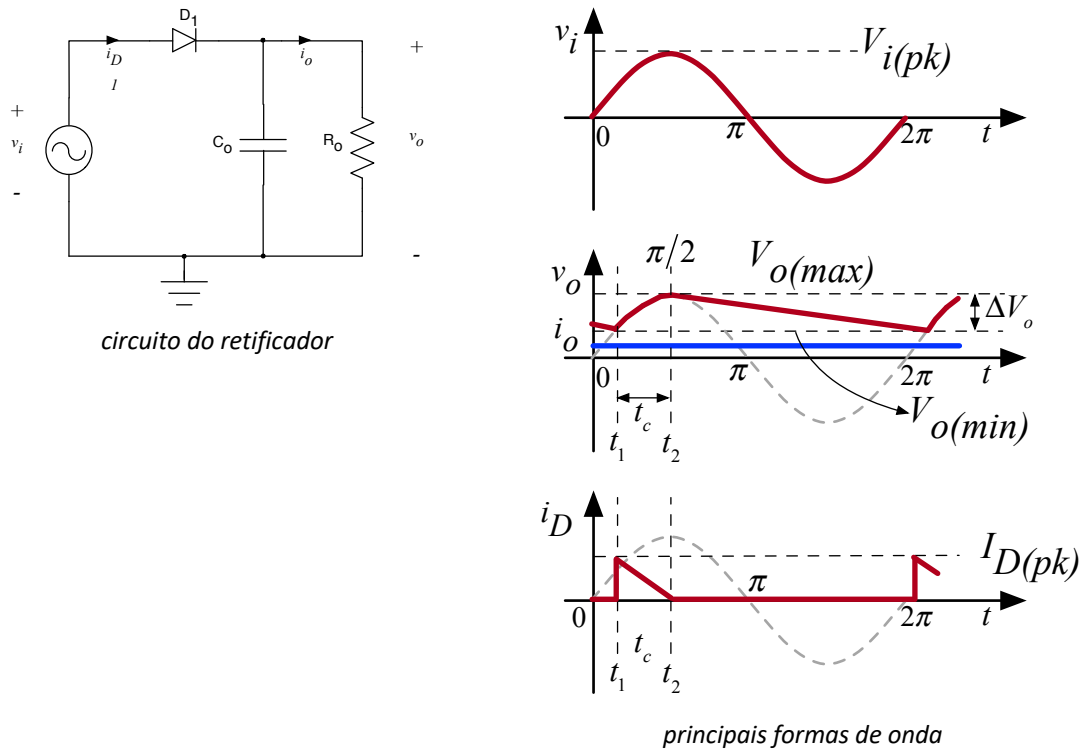


Figura 10 – Circuito retificador de meia onda com filtro capacitivo e principais formas de onda.

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

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

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

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

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

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

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

A potência na saída é dada por:

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

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

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

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

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

A tensão reversa no diodo será:

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

### 3.5.2 Retificador de onda completa com filtro capacitivo

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

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

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

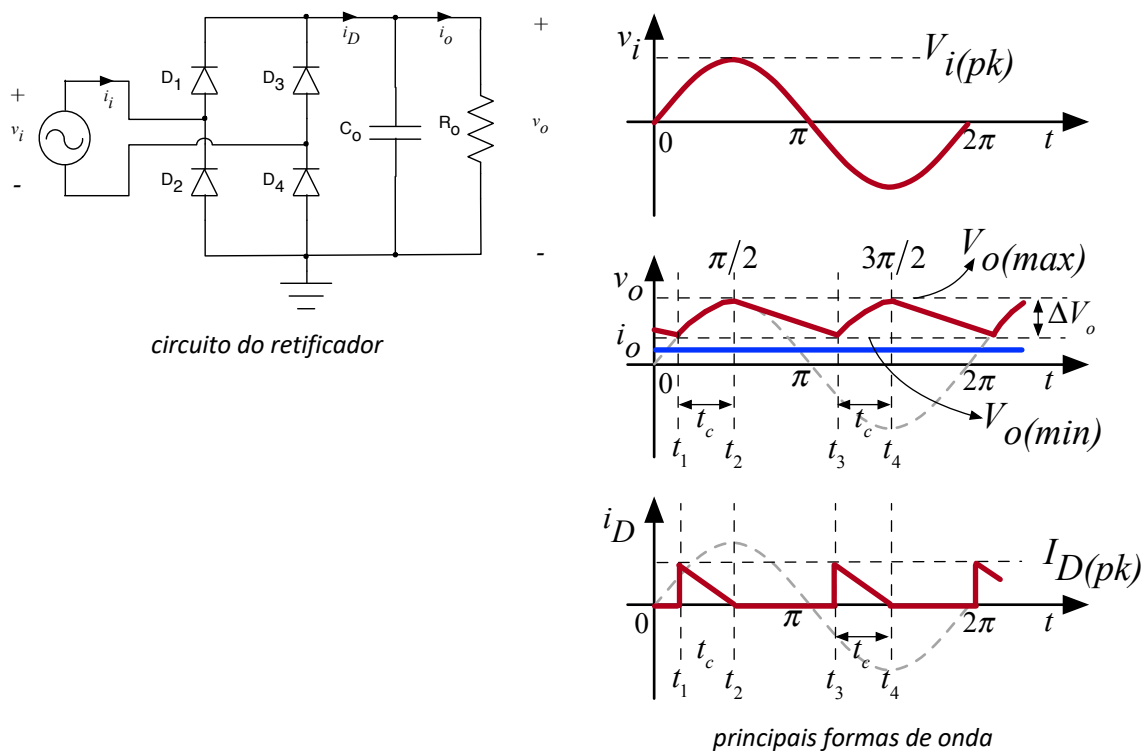


Figura 11 – Circuito retificador de onda completa com filtro capacitivo e principais formas de onda.

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

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

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

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

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

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

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

A potência na saída é dada por:

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

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

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

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

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

A tensão reversa no diodo será:

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

## 4 Retificadores Controlados

### 4.1 Introdução

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

## 4.2 Retificador controlado de meia onda com carga resistiva

A Figura 12 mostra o circuito do retificador controlado de meia onda com carga resistiva. Este retificador tem três etapas de funcionamento, que são:

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

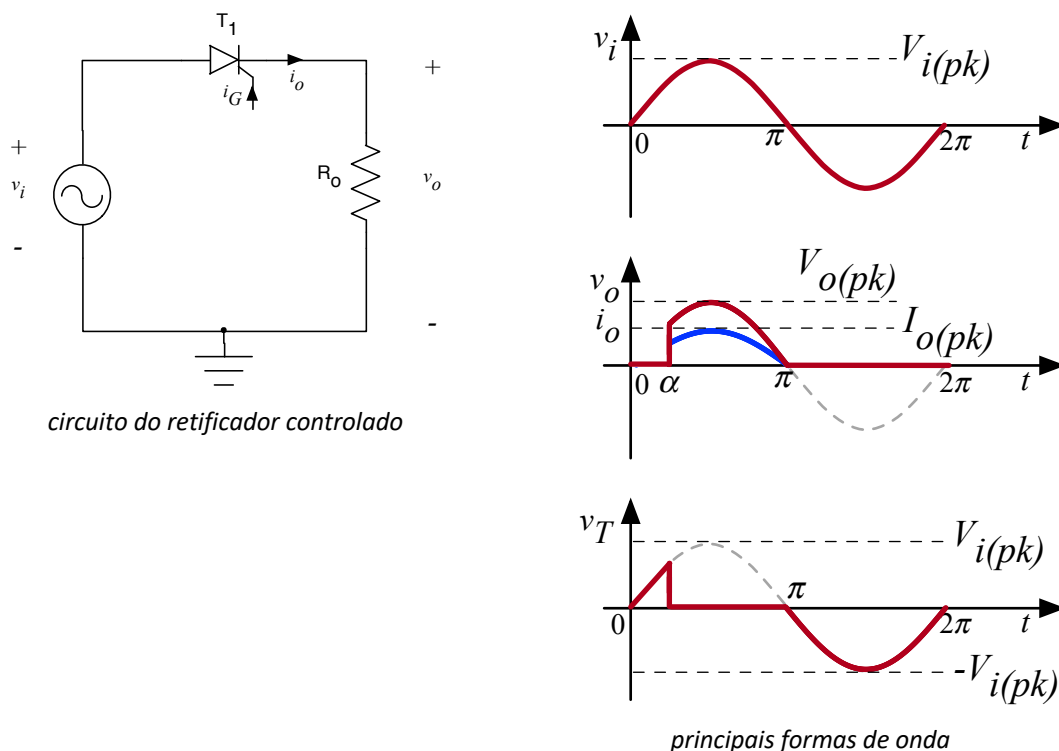


Figura 12 – Circuito do retificador controlado de meia onda e principais formas de onda.

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

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

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

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

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

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

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

### 4.3 Retificador controlado de onda completa com carga resistiva

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

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

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

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

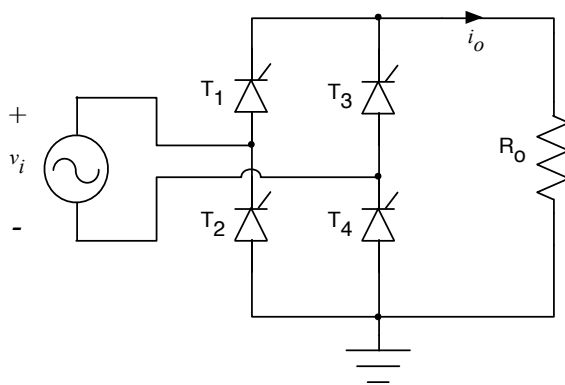
$$V_{o(pk)} = \begin{cases} V_{i(pk)} \rightarrow \alpha < 90^\circ \\ V_{i(pk)} \cdot \text{sen}(\alpha) \rightarrow 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases} \rightarrow I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o}$$

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

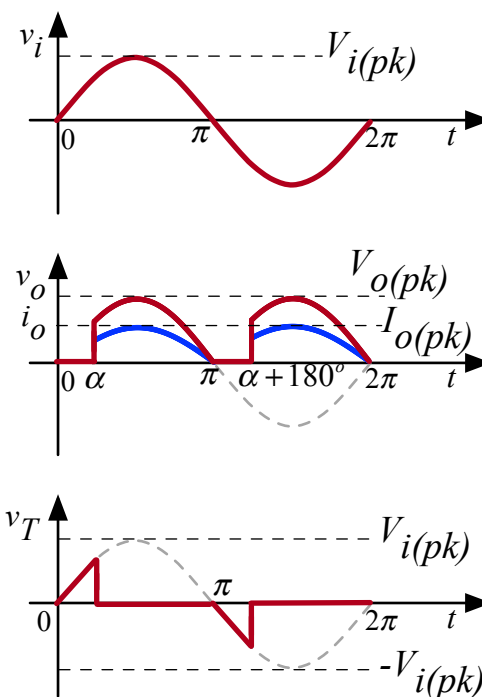
$$V_{\alpha(med)} = \frac{V_{\alpha(pk)}}{\pi} \cdot (1 + \cos(\beta)) \rightarrow I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o}$$

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

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



circuito do retificador controlado



principais formas de onda

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

## 5 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

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

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

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

A tensão de entrada de pico será de:

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

A tensão de saída será:

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

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

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

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

A tensão de entrada de pico será de:

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

A tensão de saída será:

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

**ER 05.** Qual a utilidade dos retificadores controlados?

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

## Exercícios Propostos

**EP 01.** Explique o que são retificadores de tensão?

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

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

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

que tem tensão eficaz na entrada de 12 V.

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

## 6 Atividade Avaliativa

### 6.1 Introdução – O que preciso saber

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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 CC-CC

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2020 (*revisado em fevereiro de 2021*).

---

## CONVERSORES CC-CC

### 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 cc-cc.

### Objetivos parciais

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

### Capítulos e aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado aos capítulos 11 até 19 da apostila e com as aulas 11 até 19 da disciplina.

### Pré-requisitos

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 03 – Conversores ca-cc.

### Continuidade dos Estudos

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

### 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 – 2020/2. 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 11 até 19);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulos 11 até 19).

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 CC-CC

## 1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conversores cc-cc, que podem ser abaixadores ou elevadores de tensão, isolados ou não-isolados. Este conteúdo ainda não foi estudado em outras disciplinas do curso, servindo este material como um curso introdutório e básico sobre o tema, e além disso, como conteúdo novo da disciplina de Eletrônica de Potência.

### 1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento dos conversores cc-cc;
- Conversores Buck, Boost e Buck-Boost;
- Conversores isolados.

### 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 cc-cc;
- Entender a modulação por largura de pulsos (PWM);
- Saber calcular a tensão de saída dos principais conversores cc-cc;
- Dimensionar conversores cc-cc.

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

## 2 Princípio de Funcionamento dos Conversores CC-CC

### 2.1 Introdução

Os conversores cc-cc que serão estudados neste curso utilizam a modulação por largura de pulsos (PWM) e os transistores operando como chaves. Assim, neste tópico será apresentado o princípio básico de funcionamento de um conversor simples, sem filtro na tensão de saída, mas que permitirá entender a modulação PWM e as principais características dos conversores cc-cc.

### 2.2 Modulação PWM

Os interruptores de um conversor cc-cc podem ser acionados alterando-se o seu tempo de condução e mantendo-se a frequência de comutação fixa; ou então, alterando-se a frequência de comutação e mantendo-se o tempo ligado ou o tempo desligado fixos. No primeiro caso se está aplicando a modulação por largura de pulsos (PWM - *Pulse Width Modulation*).

A frequência de comutação do conversor é chamada de  $F_s$ , sendo definida no projeto do circuito. Nas aplicações de Eletrônica de Potência, a frequência de operação pode variar desde algumas centenas de Hertz até milhões de Hertz, isto é, desde 500 Hz até 1 MHz, por exemplo. O período de comutação será:

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

O tempo que a chave (interruptor) fica ligada (fechada) é denominado de  $T_{on}$ , sendo calculado por:

$$T_{on} = D \cdot T_s$$

Por sua vez, o tempo que a chave fica desligada (aberta) é denominado de  $T_{off}$ , sendo dado por:

$$T_{off} = T_s - T_{on} = T_s - D \cdot T_s = (1 - D) \cdot T_s$$

A principal variável para o controle de um conversor é a razão cíclica ( $D$ ), que é a relação entre o tempo ligado e o tempo total (período de comutação) da chave do conversor. Esta relação é percentual, podendo variar de 0 até 100%, isto é, de 0 até 1.

$$D = \frac{T_{on}}{T_s}$$

Na Figura 1 mostra-se o sinal de comando a ser aplicado no interruptor de um conversor cc-cc, onde se notam os tempos de comutação e as relações apresentadas anteriormente.

O sinal de comando ( $v_g$ ) pode ser obtido diretamente em um microcontrolador ou por um circuito discreto, usando um comparador e um circuito oscilador, como mostrado na Figura 3. Neste caso, a largura dos pulsos de comando, ou seja, o tempo  $T_{on}$ , será dado pela relação entre a amplitude da tensão de controle ( $v_c$ ) e da tensão dente-de-serra ( $v_{tri}$ ), que é denominada de portadora no processo de modulação. Assim, a portadora (tensão dente-de-serra) define a frequência de comutação, enquanto a modulante (tensão de controle) define a largura do pulso de comando da chave, por conseguinte, a tensão de saída do conversor. Um circuito típico para realizar a modulação por largura de pulsos é mostrado na Figura 3.

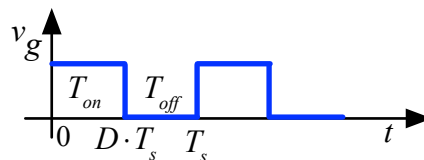


Figura 1 – Sinal de comando de um conversor cc-cc.

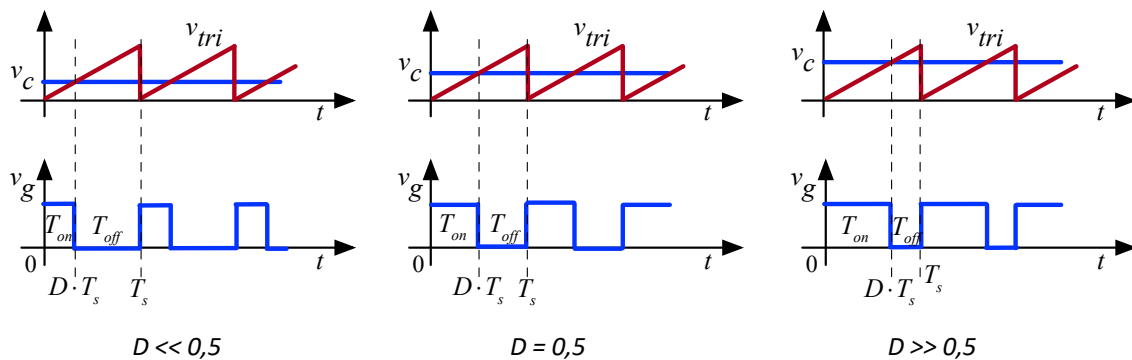


Figura 2 – Formas de onda para modulação por largura de pulsos (PWM).

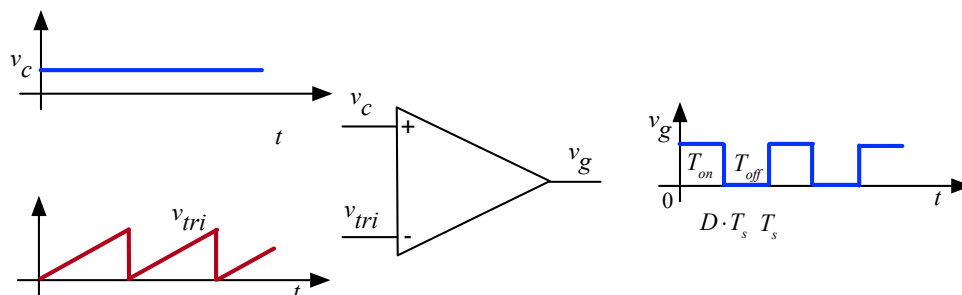


Figura 3 – Circuito discreto para modulação por largura de pulsos.

A partir do circuito da Figura 3, a razão cíclica (D) será:

$$D = \frac{V_c}{V_{tri}}$$

Por exemplo, se a amplitude máxima da dente-de-serra for de 1 V e a tensão de controle tiver amplitude de 0,3 V, então a razão cíclica será de 30%, pois  $D = V_c/V_{tri} = 0,3/1 = 0,3$ .

## 2.1 Princípio de Funcionamento dos Conversores CC-CC

O conversor cc-cc mais simples é formado por um interruptor conectado em série com a carga, conforme mostrado na Figura 4. Este conversor não possui filtro, ou seja, a tensão de saída não será contínua, mas sim pulsada.

O conversor cc-cc da Figura 4 tem duas etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até  $D \cdot T_s$ ) - 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 ( $D \cdot T_s$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, isto é, aberto. A tensão de saída ( $v_o$ ) e a corrente são iguais a zero.

As principais formas de onda do conversor são mostradas na Figura 5, onde se nota que a tensão de saída é pulsada, seguindo o formato da tensão de comando aplicada no interruptor  $S_1$ . A corrente na carga segue o mesmo formato da tensão.

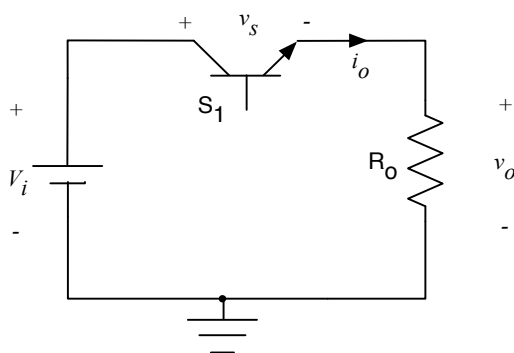


Figura 4 – Conversor cc-cc simples.

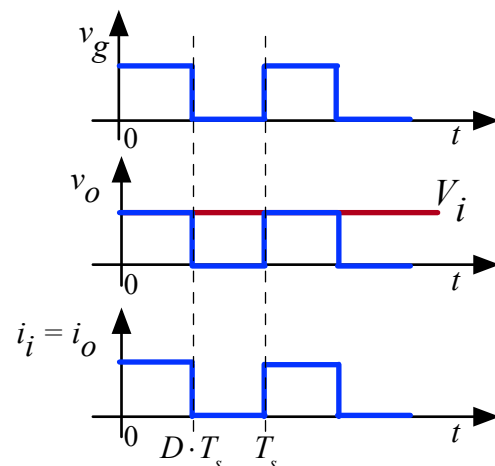


Figura 5 – Principais formas de onda do conversor cc-cc simples.

O interruptor dos conversores cc-cc pode ser implementado com transistores bipolares de junção ou transistores de efeito de campo. A Figura 6 mostra o mesmo conversor implementado com BJT, MOSFET e IGBT.

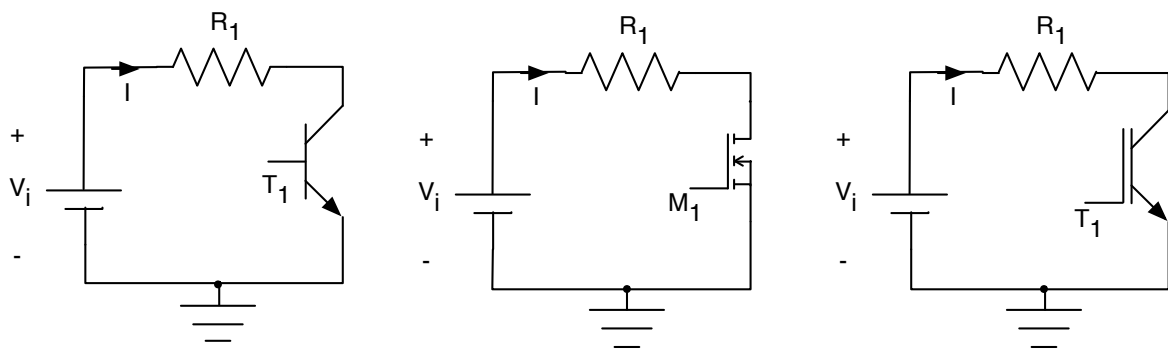


Figura 6 – Implementação de conversores cc-cc com diferentes tecnologias de semicondutores.

A tensão de entrada dos conversores cc-cc será definida, sendo:

$$V_i = \text{definido}$$

A tensão máxima na saída será igual a entrada:

$$V_{o(\max)} = V_i$$

Já a tensão média na saída será dada por:

$$V_o = \frac{1}{T_s} \cdot V_i \cdot D \cdot T_s \rightarrow V_o = D \cdot V_i$$

Tem-se assim que a tensão de saída é determinada pela razão cíclica. Deste modo, a tensão de saída é a variável controlada e a razão cíclica é a variável de controle.

Definindo as tensões de entrada e de saída, pode-se obter a razão cíclica:

$$D = \frac{V_o}{V_i}$$

As correntes serão:

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

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$I_i = I_o$$

As potências na saída e na entrada, considerando rendimento de 100%, ou seja,

componentes ideais (sem perdas), serão:

$$P_o = V_o \cdot I_o$$

$$P_i = P_o \rightarrow \eta = 1$$

## 3 Conversores CC-CC Básicos

### 3.1 Introdução

Os conversores cc-cc básicos são seis, a saber:

- Conversor Buck;
- Conversor Boost;
- Conversor Buck-Boost;
- Conversor Cuk;
- Conversor Sepic;
- Conversor Zeta.

Neste curso serão estudados os três conversores iniciais, pois estes sintetizam o funcionamento dos diversos conversores cc-cc, além de permitirem abaixar e elevar a tensão de saída em relação à tensão de entrada. Assim, serão apresentados a seguir os conversores Buck, Boost e Buck-Boost.

### 3.2 Conversor Buck

A Figura 7 mostra o conversor Buck. Este conversor é abaixador de tensão e tem duas etapas de funcionamento para operação em condução contínua, que são:

- Primeira etapa (0 até  $D \cdot T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  é comandado a conduzir, ou seja, está fechado; o diodo  $D_1$  está bloqueado. A tensão após o interruptor ( $v_{ab}$ ) é igual a da entrada ( $v_i$ ). A fonte fornece energia para a saída. A corrente no indutor  $L_1$  cresce linearmente, armazenando energia nesta etapa. Esta etapa é mostrada na Figura 8;
- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, isto é, aberto e o diodo  $D_1$  está conduzindo. A tensão após o interruptor ( $v_{ab}$ ) é zero (considerando o diodo ideal com  $V_D = 0$ ). A carga é alimentada pelo capacitor de saída  $C_o$ . A corrente no indutor  $L_1$  decresce, ou seja, a energia armazenada no mesmo é transferida para a saída ( $C_o$  e  $R_o$ ). Esta etapa é mostrada na Figura 9.

Se a condução for descontínua, então haverá uma terceira etapa. A primeira etapa não é alterada, sendo que a segunda e terceira serão:

- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_{iL=0}$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, isto é, aberto e o diodo  $D_1$  está conduzindo. A tensão após o interruptor ( $v_{ab}$ ) é zero (considerando o diodo ideal com  $V_D = 0$ ). A carga é alimentada pelo capacitor de saída  $C_o$ . A corrente no indutor  $L_1$  decresce até se tornar nula no instante  $T_{iL=0}$ ; quando toda a energia armazenada no mesmo foi transferida para a saída ( $C_o$  e  $R_o$ );
- Terceira etapa ( $T_{iL=0}$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  e o diodo  $D_1$  estão bloqueados. A carga é alimentada pelo capacitor de saída  $C_o$ . As correntes no indutor  $L_1$ , no interruptor  $S_1$  e no diodo  $D_1$  são iguais a zero. A tensão  $v_{ab}$  é igual a tensão de saída. Esta etapa é mostrada na Figura 10.

As principais formas de onda para o conversor Buck operando em condução contínua e descontínua, respectivamente, são mostradas na Figura 11.

Note na Figura 11 que para condução contínua, a corrente no indutor não se torna nula durante as etapas de funcionamento do conversor. Já para condução descontínua, a corrente cresce na primeira etapa de operação e decresce na segunda etapa, chegando ao valor zero antes da chave ser novamente fechada. Assim, tem-se um intervalo de tempo (terceira etapa) em que as correntes no indutor, na chave e no diodo serão zero.

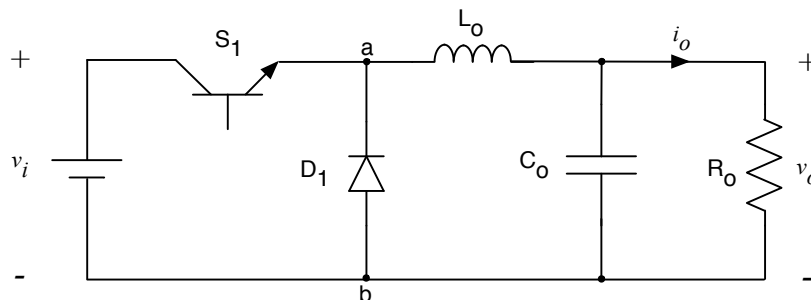


Figura 7 – Conversor Buck.

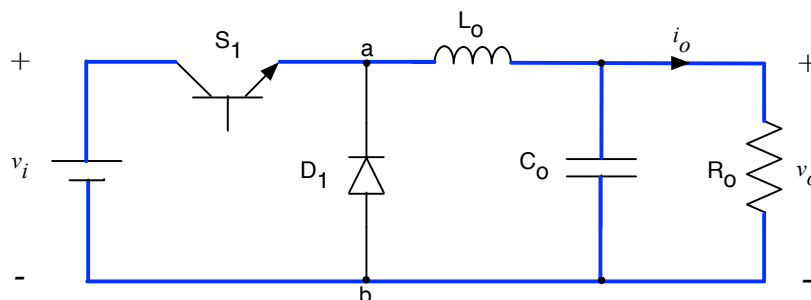


Figura 8 – Primeira etapa de operação do conversor Buck.

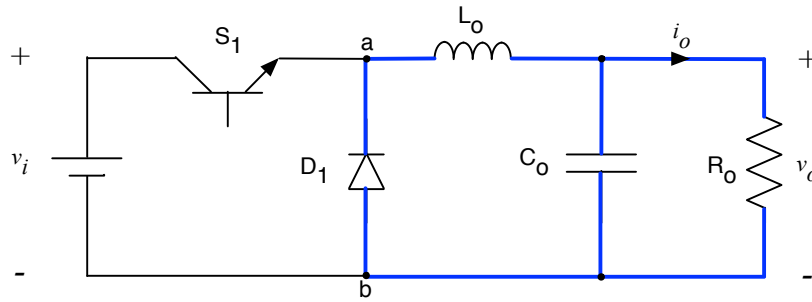


Figura 9 – Segunda etapa de operação do conversor Buck.

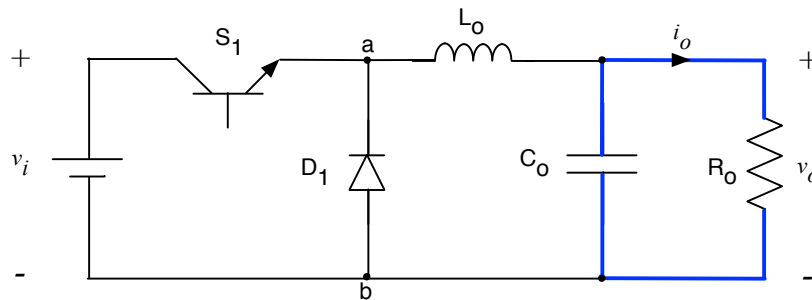
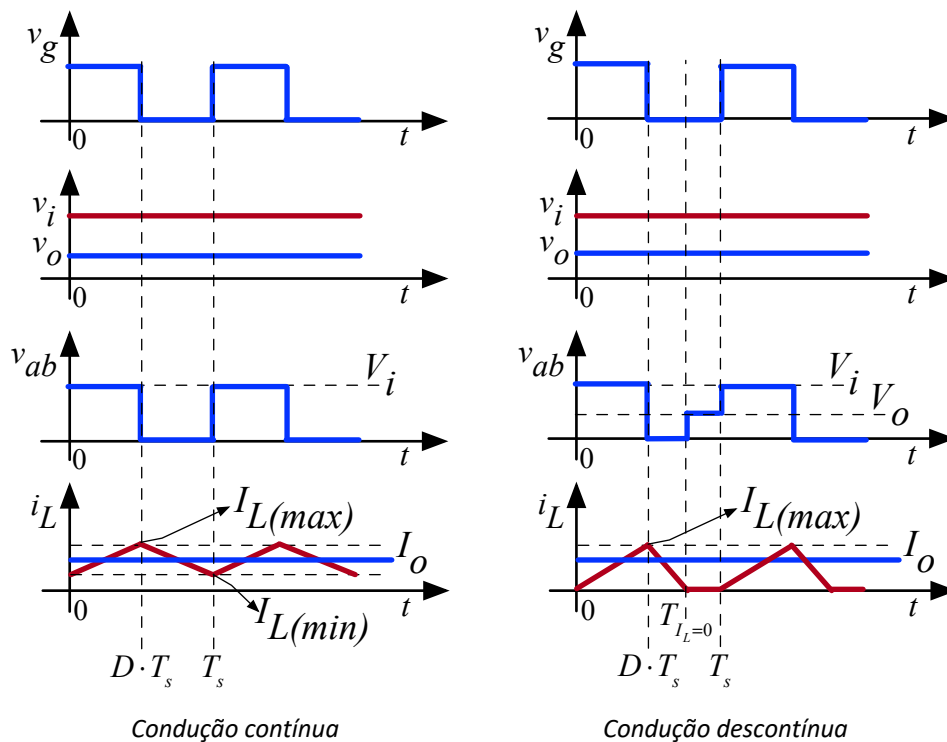


Figura 10 – Terceira etapa de operação do conversor Buck.



Condução contínua

Condução descontinua

Figura 11 – Principais formas de onda para o conversor Buck.

A tensão de entrada é definida. Então a tensão após o interruptor ( $v_{ab}$ ) será:

$$V_i = \text{definido}$$

$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \cdot V_i \cdot D \cdot T_s \rightarrow V_{ab} = D \cdot V_i$$

Como a tensão média no indutor deve ser zero, pois do contrário a corrente neste elemento cresceria indefinidamente, então se tem:

$$V_{Lo} = 0 \rightarrow V_o = V_i$$

$$V_o = D \cdot V_i$$

Se a condução for descontínua, então a tensão média na saída será:

$$V_o = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot L_o \cdot F_s}{R_o \cdot D^2}}}$$

As correntes serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$I_{Lo} = I_o$$

$$I_i = I_{S1} = D \cdot I_o$$

$$I_{D1} = (1 - D) \cdot I_o$$

$$I_{Lo(\max)} = I_{S1(\max)} = I_{D1(\max)} = I_o + \frac{\Delta i}{2}$$

A ondulação (*ripple*) de corrente no indutor é um parâmetro de projeto, sendo dada por um percentual da corrente de saída. Assim:

$$\Delta i = \% \cdot I_o [A]$$

Por sua vez, a ondulação (*ripple*) de tensão na saída também é determinada pelo projetista, como sendo um percentual da tensão de saída. Portanto:

$$\Delta v = \% \cdot V_o [V]$$

Finalmente, o indutor e o capacitor podem ser calculados por:

$$L_o = \frac{V_i}{\Delta i \cdot F_s} \cdot D \cdot (1 - D)$$

$$C_o = \frac{V_i}{31 \cdot \Delta v \cdot L_o \cdot F_s^2}$$

As tensões máximas sobre o interruptor e sobre o diodo são:

$$V_{S1(\max)} = V_{D1(\max)} = V_i$$

### 3.3 Conversor Boost

A Figura 12 mostra o conversor Boost. Este conversor é elevador de tensão e tem duas etapas de funcionamento para operação em condução contínua, que são:

- Primeira etapa (0 até  $D \cdot T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  é comandado a conduzir, ou seja, está fechado; o diodo  $D_1$  está bloqueado. A tensão após o interruptor ( $v_{ab}$ ) é zero (considerando interruptor ideal com  $V_{S1} = 0$ ). A carga é alimentada pelo capacitor de saída  $C_o$ . A corrente no indutor  $L_1$  cresce linearmente, armazenando a energia fornecida pela fonte. Esta etapa é mostrada na Figura 13;
- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, isto é, aberto e o diodo  $D_1$  está conduzindo. A tensão após o interruptor ( $v_{ab}$ ) é igual a tensão de saída  $v_o$ . A corrente no indutor  $L_1$  decresce, ou seja, a energia armazenada no mesmo é transferida para a saída ( $C_o$  e  $R_o$ ). Esta etapa é mostrada na Figura 14.

Se a condução for descontínua, então haverá uma terceira etapa. A primeira etapa não é alterada, sendo que a segunda e terceira serão:

- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_{IL=0}$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, isto é, aberto e o diodo  $D_1$  está conduzindo. A tensão sobre o interruptor ( $v_{ab}$ ) é igual a tensão de saída  $v_o$ . A corrente no indutor  $L_1$  decresce até se tornar nula no instante  $T_{IL=0}$ ; quando toda a energia armazenada no mesmo foi transferida para a saída ( $C_o$  e  $R_o$ );
- Terceira etapa ( $T_{IL=0}$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  e o diodo  $D_1$  estão bloqueados. A carga é alimentada pelo capacitor de saída  $C_o$ . As correntes no indutor  $L_1$ , no interruptor  $S_1$  e no diodo  $D_1$  são iguais a zero. A tensão  $v_{ab}$  é igual a tensão de entrada  $v_i$ . Esta etapa é mostrada na Figura 15.

As principais formas de onda para o conversor Boost operando em condução contínua e

descontínua, respectivamente, são mostradas na Figura 16.

Note na Figura 16 que para condução contínua, a corrente no indutor não se torna nula durante as etapas de funcionamento do conversor. Já para condução descontínua, a corrente cresce na primeira etapa de operação e decresce na segunda etapa, chegando ao valor zero antes da chave ser novamente fechada. Assim, tem-se um intervalo de tempo (terceira etapa) em que as correntes no indutor, na chave e no diodo serão zero.

A tensão de entrada é definida. Então a tensão sobre o interruptor ( $v_{ab}$ ) será:

$V_i =$  definido

$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \cdot V_o \cdot (T_s - D \cdot T_s) \rightarrow V_{ab} = V_o \cdot (1 - D)$$

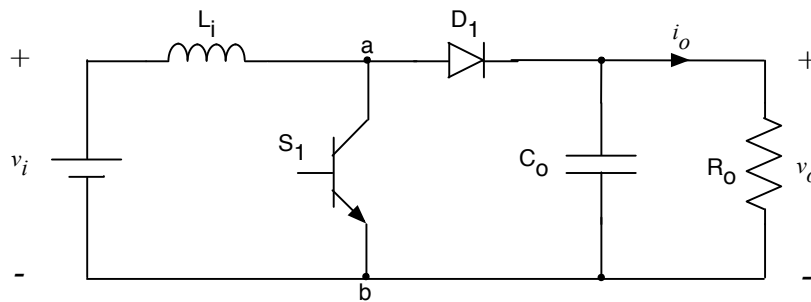


Figura 12 – Conversor Boost.

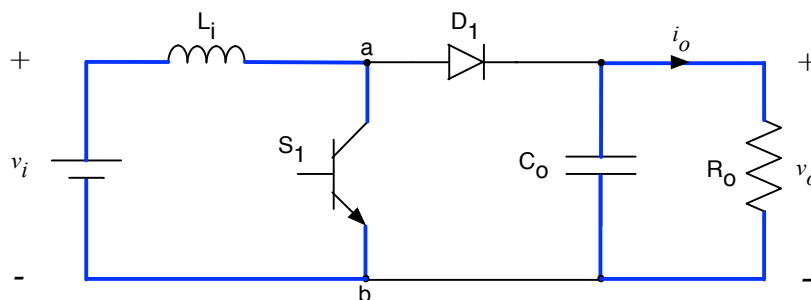


Figura 13 – Primeira etapa de operação do conversor Boost.

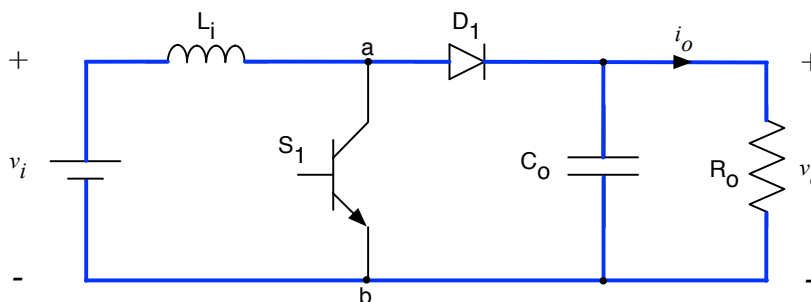


Figura 14 – Segunda etapa de operação do conversor Boost.

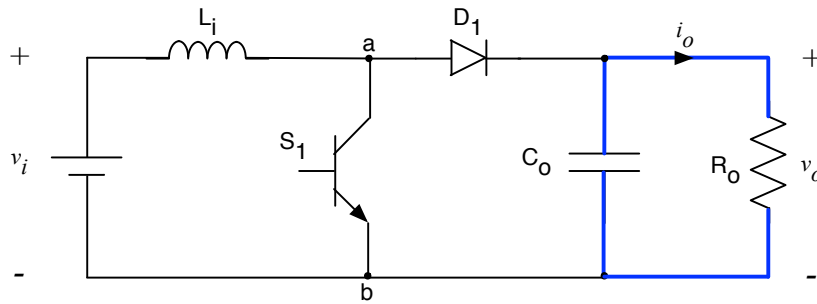


Figura 15 – Terceira etapa de operação do conversor Boost.

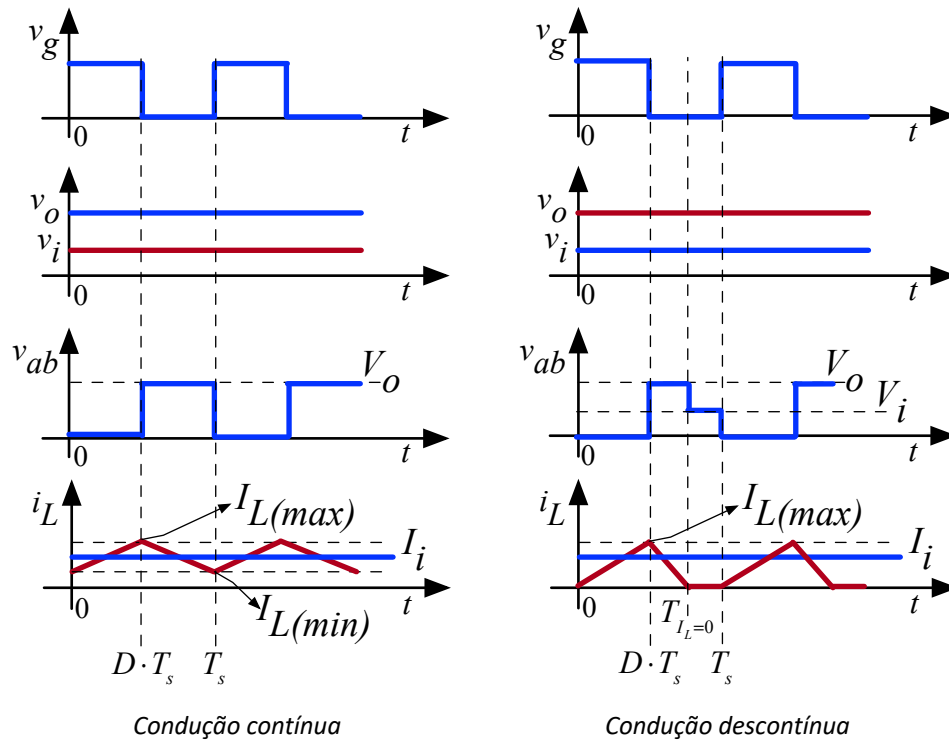


Figura 16 – Principais formas de onda para o conversor Boost.

Como a tensão média no indutor deve ser zero, pois do contrário a corrente neste elemento cresceria indefinidamente, então se tem:

$$V_{Lo} = 0 \rightarrow V_{ab} = V_i$$

$$V_i = V_o \cdot (1 - D)$$

$$V_o = \frac{V_i}{(1 - D)}$$

Se a condução for descontínua, então a tensão média na saída será:

$$V_o = V_i \cdot \left( 1 + \frac{V_i \cdot D^2}{2 \cdot F_s \cdot L_i \cdot I_o} \right)$$

Para o cálculo da tensão de saída deve-se substituir  $I_o$  por  $V_o/R_o$  e então isolar os termos e encontrar as raízes da equação de segundo grau, aplicando Bhaskara, por exemplo.

As correntes serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$I_{Li} = I_i = \frac{P_i}{V_i} \rightarrow P_i = P_o \rightarrow \eta = 1$$

$$I_{Li(\max)} = I_{S1(\max)} = I_{D1(\max)} = I_i + \frac{\Delta i}{2}$$

$$I_{S1} = D \cdot I_i$$

$$I_{D1} = (1 - D) \cdot I_i$$

A ondulação (*ripple*) de corrente no indutor é um parâmetro de projeto, sendo dada por um percentual da corrente de entrada. Assim:

$$\Delta i = \% \cdot I_i [A]$$

Por sua vez, a ondulação (*ripple*) de tensão na saída também é determinada pelo projetista, como sendo um percentual da tensão de saída. Portanto:

$$\Delta v = \% \cdot V_o [V]$$

Finalmente, o indutor e o capacitor podem ser calculados por:

$$L_i = \frac{V_i}{\Delta i \cdot F_s} \cdot D$$

$$C_o = \frac{I_o}{\Delta v \cdot F_s} \cdot \frac{V_o - V_i}{V_o}$$

As tensões máximas sobre o interruptor e sobre o diodo são:

$$V_{S1(\max)} = V_{D1(\max)} = V_o$$

### 3.4 Conversor Buck-Boost

A Figura 17 mostra o conversor Buck-Boost. Este conversor é abaixador e elevador de tensão e tem duas etapas de funcionamento para operação em condução contínua, que são:

- Primeira etapa (0 até  $D \cdot T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  é comandado a conduzir, ou seja,

está fechado; o diodo  $D_1$  está bloqueado. A tensão após o interruptor ( $v_{ab}$ ) é igual a tensão de entrada  $v_i$  (considerando que o interruptor é ideal, isto é,  $V_{S1} = 0$ ). A carga é alimentada pelo capacitor de saída  $C_o$ . A corrente no indutor  $L_1$  cresce linearmente, armazenando a energia fornecida pela fonte. Esta etapa é mostrada na Figura 18;

- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, isto é, aberto e o diodo  $D_1$  está conduzindo. A tensão após o interruptor ( $v_{ab}$ ) é igual a tensão de saída invertida ( $-v_o$ ). A corrente no indutor  $L_1$  desce, ou seja, a energia armazenada no mesmo é transferida para a saída ( $C_o$  e  $R_o$ ). Esta etapa é mostrada na Figura 19.

Se a condução for descontínua, então haverá uma terceira etapa. A primeira etapa não é alterada, sendo que a segunda e terceira serão:

- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_{IL=0}$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, isto é, aberto e o diodo  $D_1$  está conduzindo. A tensão sobre o indutor ( $v_{ab}$ ) é igual a tensão de saída invertida ( $-v_o$ ). A corrente no indutor  $L_1$  desce até se tornar nula no instante  $T_{IL=0}$ ; quando toda a energia armazenada no mesmo foi transferida para a saída ( $C_o$  e  $R_o$ );
- Terceira etapa ( $T_{IL=0}$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  e o diodo  $D_1$  estão bloqueados. A carga é alimentada pelo capacitor de saída  $C_o$ . As correntes no indutor  $L_1$ , no interruptor  $S_1$  e no diodo  $D_1$  são iguais a zero. A tensão  $v_{ab}$  é zero nesta etapa. Esta etapa é mostrada na Figura 20.

As principais formas de onda para o conversor Buck-Boost operando em condução contínua e descontínua, respectivamente, são mostradas na Figura 21.

Note na Figura 21 que para condução contínua, a corrente no indutor não se torna nula durante as etapas de funcionamento do conversor. Já para condução descontínua, a corrente cresce na primeira etapa de operação e desce na segunda etapa, chegando ao valor zero antes da chave ser novamente fechada. Assim, tem-se um intervalo de tempo (terceira etapa) em que as correntes no indutor, na chave e no diodo serão zero.

Importante destacar que o conversor Buck-Boost tem a saída com polaridade invertida em relação à entrada. Isso não significa que este conversor seja um inversor de tensão. A troca de polaridade ocorre pela configuração dos elementos do circuito e o sentido de circulação de corrente no indutor  $L_1$  e consequente carga do capacitor  $C_o$ . Em síntese, a referência da tensão de saída (-) não é a mesma da tensão de entrada.

A tensão de entrada é definida. Então a tensão após o interruptor ( $v_{ab}$ ) será:

$V_i =$  definido

$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \cdot \left[ (V_i \cdot D \cdot T_s) + (-V_o \cdot (T_s - D \cdot T_s)) \right] \rightarrow V_{ab} = V_i \cdot D - V_o \cdot (1 - D)$$

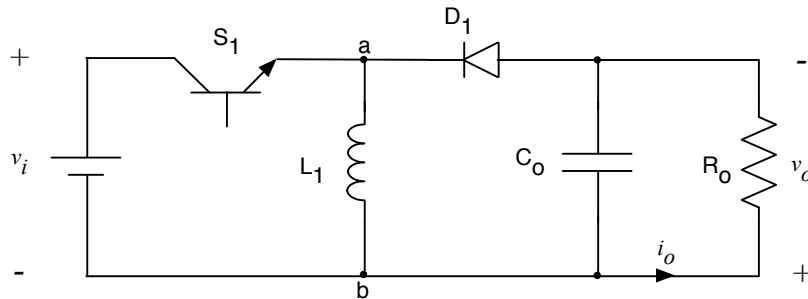


Figura 17 – Conversor Buck-Boost.

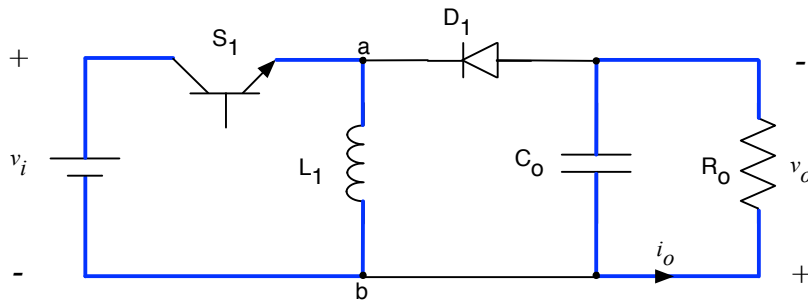


Figura 18 – Primeira etapa de operação do conversor Buck-Boost.

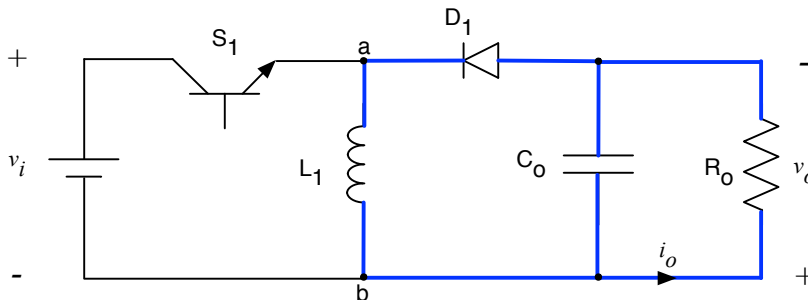


Figura 19 – Segunda etapa de operação do conversor Buck-Boost.

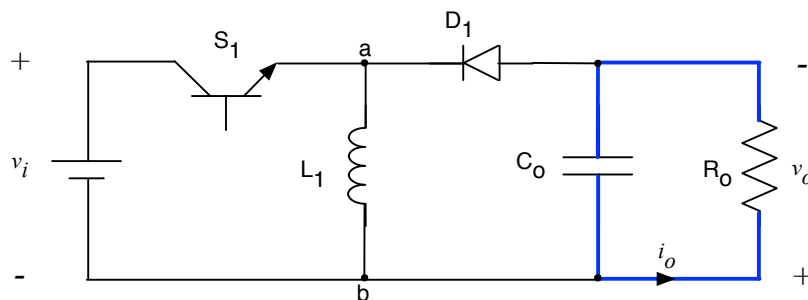


Figura 20 – Terceira etapa de operação do conversor Buck-Boost.

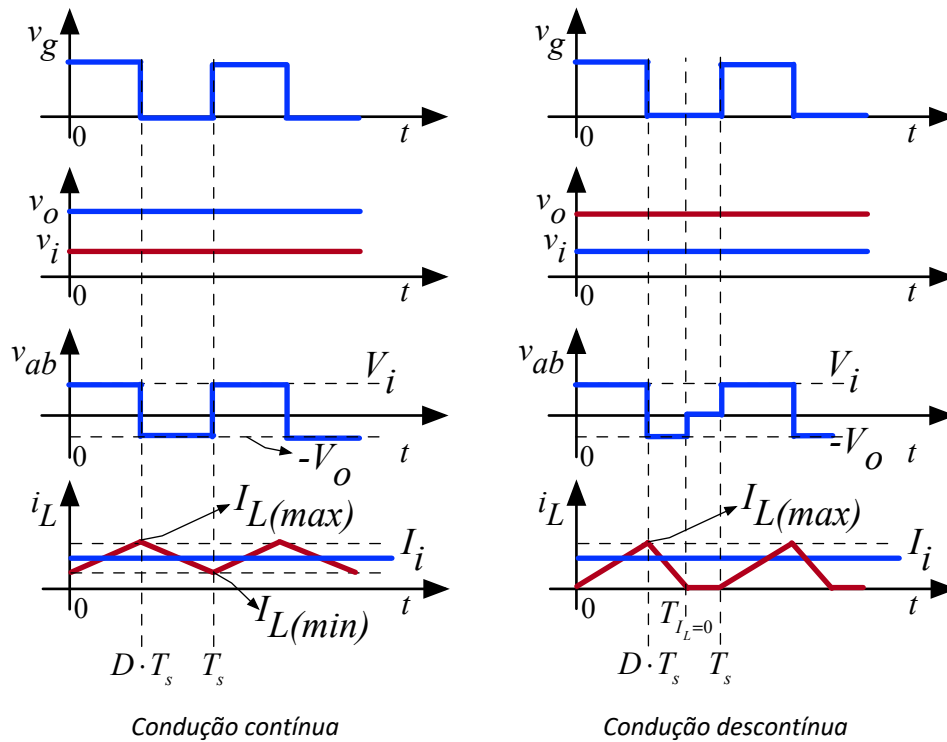


Figura 21 – Principais formas de onda para o conversor Buck-Boost.

Como a tensão média no indutor deve ser zero, pois do contrário a corrente neste elemento cresceria indefinidamente, então se tem:

$$V_{Lo} = 0 \rightarrow V_{ab} = 0 = V_i \cdot D - V_o \cdot (1 - D)$$

$$V_o = V_i \cdot \frac{D}{1 - D}$$

Se a condução for descontínua, então a tensão média na saída será:

$$V_o = V_i \cdot D \cdot \sqrt{\frac{R_o}{2 \cdot F_s \cdot L_i}}$$

As correntes serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$I_{D1} = I_o$$

$$I_{S1} = I_i = \frac{P_i}{V_i} \rightarrow P_i = P_o \rightarrow \eta = 1$$

$$I_{L1} = I_i + I_o$$

$$I_{L1(\max)} = I_{S1(\max)} = I_{D1(\max)} = I_{L1} + \frac{\Delta i}{2}$$

A ondulação (*ripple*) de corrente no indutor é um parâmetro de projeto, sendo dada por um percentual da corrente de entrada ou de saída, a critério do projetista. Assim:

$$\Delta i = \% \cdot I_i [A] \rightarrow \Delta i = \% \cdot I_o [A]$$

Por sua vez, a ondulação (*ripple*) de tensão na saída também é determinada pelo projetista, como sendo um percentual da tensão de saída. Portanto:

$$\Delta v = \% \cdot V_o [V]$$

Finalmente, o indutor e o capacitor podem ser calculados por:

$$L_1 = \frac{V_o}{\Delta i \cdot F_s} \cdot (1 - D)$$

$$C_o = \frac{D \cdot I_o}{\Delta v \cdot F_s}$$

As tensões máximas sobre o interruptor e sobre o diodo são:

$$V_{S1(\max)} = V_{D1(\max)} = V_i + V_o$$

## 4 Conversores CC-CC Isolados

### 4.1 Introdução

Os conversores cc-cc isolados são diversos, tendo-se entre os mais utilizados:

- Conversor Buck → Conversor Forward, Meia Ponte e Ponte Completa;
- Conversor Boost → Conversor Push-Pull;
- Conversor Buck-Boost → Conversor Flyback.

Assim, dentre as inúmeras topologias de conversores isolados, neste curso detalharemos o conversor Flyback pela sua simplicidade e por ser muito utilizado em fontes chaveadas.

ac

### 4.2 Conversor Flyback

A Figura 22 mostra o conversor Flyback, que é originado a partir do conversor Buck-Boost.

Em outras palavras, o conversor Flyback é o conversor Buck-Boost isolado. Este conversor é abaixador e elevador de tensão e tem três etapas de funcionamento para operação em condução descontínua, que é o modo de operação mais utilizado. Estas etapas são:

- Primeira etapa (0 até  $D \cdot T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  é comandado a conduzir, ou seja, está fechado; o diodo  $D_1$  está bloqueado. A tensão no primário do transformador ( $v_p$ ) é igual à entrada ( $v_i$ ). A fonte fornece energia que será armazenada na indutância magnetizante do transformador. A corrente no primário do transformador cresce linearmente. A carga é alimentada pelo capacitor de saída  $C_o$ . Esta etapa é mostrada na Figura 23;
- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_{T1=0}$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, isto é, aberto e o diodo  $D_1$  está conduzindo. A tensão no secundário é igual a tensão de saída  $v_o$ . A corrente no secundário do transformador decresce, ou seja, a energia armazenada no mesmo é transferida para a saída ( $C_o$  e  $R_o$ ). Esta etapa é mostrada na Figura 24;
- Terceira etapa ( $T_{T1=0}$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  e o diodo  $D_1$  estão bloqueados. A carga é alimentada pelo capacitor de saída  $C_o$ . As correntes no primário e secundário do transformador, no interruptor  $S_1$  e no diodo  $D_1$  são iguais a zero. Esta etapa é mostrada na Figura 25.

As principais formas de onda para o conversor Flyback operando em condução descontínua são mostradas na Figura 26.

A tensão de entrada é definida. Então a tensão no primário do transformador ( $v_p$ ) será:

$$V_i = \text{definido}$$

$$V_p = \frac{1}{T_s} \cdot \left[ (V_i \cdot D \cdot T_s) + (-n \cdot V_o \cdot (T_s - D \cdot T_s)) \right] \rightarrow n = \frac{V_p}{V_s} \rightarrow \frac{n \cdot V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D}$$

$$V_o' = n \cdot V_o \rightarrow V_o' = V_i \cdot \frac{D}{1-D}$$

Nota-se que a equação para calcular a tensão de saída é idêntica aquela do conversor Buck-Boost, com a diferença que agora se tem a relação de transformação ( $n$ ) do transformador. A relação de transformação do transformador é a relação entre o número de espiras do primário pelo secundário, ou então, da tensão do primário pela tensão do secundário.

Conforme for escolhida a relação de transformação ( $n$ ), o conversor Flyback poderá ser abaixador de tensão ou elevador de tensão.

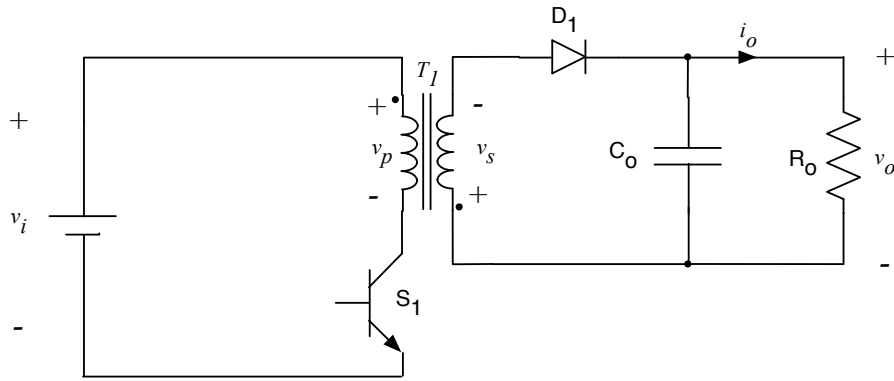


Figura 22 – Conversor Flyback.

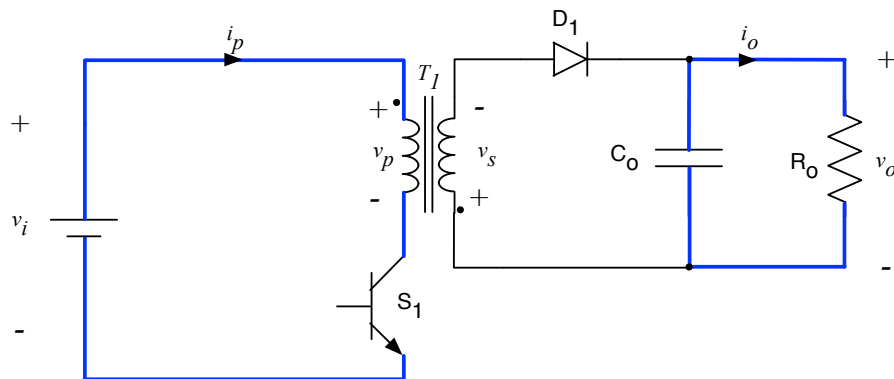


Figura 23 – Primeira etapa de operação do conversor Flyback.

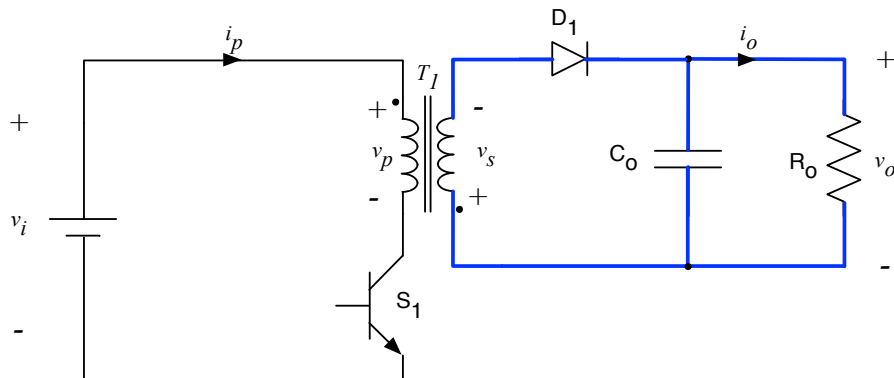


Figura 24 – Segunda etapa de operação do conversor Flyback.

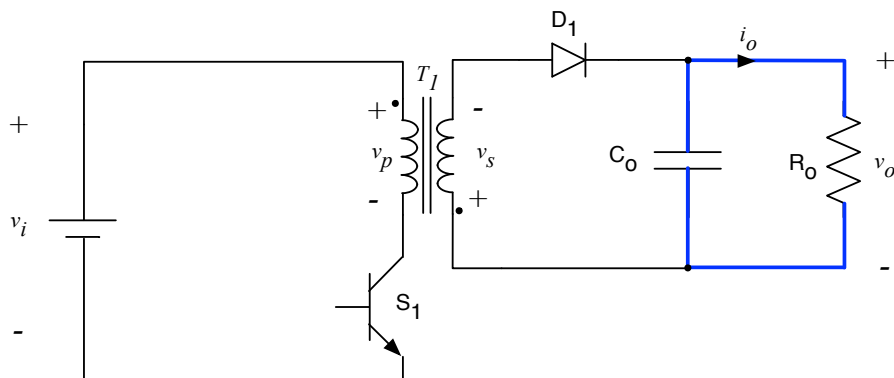


Figura 25 – Terceira etapa de operação do conversor Flyback.

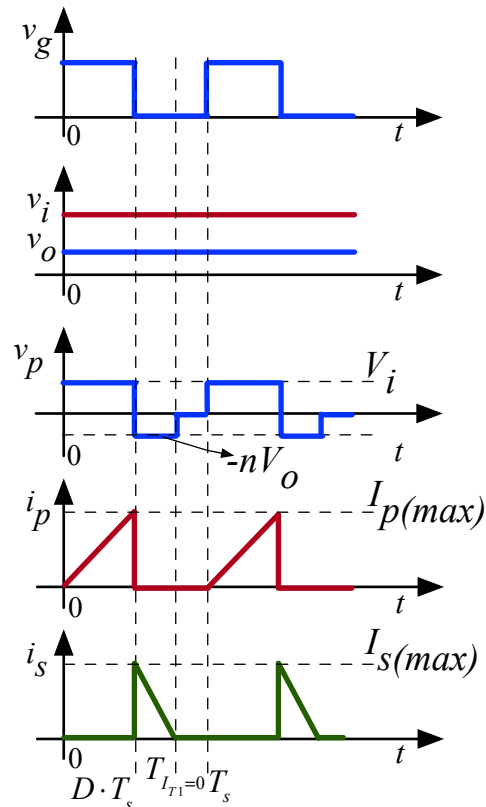


Figura 26 – Principais formas de onda para o conversor Flyback.

Em geral se escolhe uma razão cíclica para operação abaixo de 45%, para que se tenha o tempo necessário para a desmagnetização do transformador, e esta ocorrerá por completo, isto é, para que toda a energia armazenada na primeira etapa de operação seja transferida para a saída na segunda etapa de operação.

As correntes serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$I_{D1} = I_o$$

$$I_{p(max)} = I_{S1(max)} = \frac{V_i \cdot D}{L_1 \cdot F_s}$$

$$I_{S1} = I_i = \frac{P_i}{V_i} \rightarrow P_i = P_o \rightarrow \eta = 1$$

As tensões máximas sobre o interruptor e sobre o diodo são:

$$V_{S1(max)} = V_i + n \cdot V_o$$

$$V_{D1(\max)} = V_o + \frac{V_i}{n}$$

## 5 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

**ER 01.** Cite dois conversores cc-cc?

Conversor Buck e conversor Boost.

**ER 02.** Calcule a tensão de saída de um conversor Buck que está operando com razão cíclica de 50% e tensão de entrada de 12 V.

A tensão de saída será:

$$V_o = V_i \cdot D = 12 \cdot 0,5 = 6V$$

**ER 03.** Calcule a tensão de saída de um conversor Boost que está operando com razão cíclica de 30% e tensão de entrada de 9 V.

A tensão de saída será:

$$V_o = V_i \cdot \frac{1}{1-D} = 9 \cdot \frac{1}{1-0,3} = 12,9V$$

**ER 04.** Calcule a tensão de saída de um conversor Buck-Boost que está operando com razão cíclica de 80% e tensão de entrada de 5 V.

A tensão de saída será:

$$V_o = V_i \cdot \frac{D}{1-D} = 5 \cdot \frac{0,8}{1-0,8} = 20V$$

**ER 05.** Calcule a tensão de saída de um conversor Flyback que está operando com razão cíclica de 40%, tensão de entrada de 311 V e possui um transformador com relação de transformação de 10:1.

A tensão de saída será dada por:

$$V_o = \frac{V_i}{n} \cdot \frac{D}{1-D} = \frac{311}{10} \cdot \frac{0,4}{1-0,4} = 20,7V$$

---

## Exercícios Propostos

---

**EP 01.** Explique o que é operação em condução contínua em um conversor cc-cc.

**EP 02.** Calcule a tensão de saída de um conversor Buck que está operando com razão cíclica de 90% e tensão de entrada de 12 V.

**EP 03.** Calcule a tensão de saída de um conversor Boost que está operando com razão cíclica de 90% e tensão de entrada de 5 V.

**EP 04.** Calcule a tensão de saída de um conversor Buck-Boost que está operando com razão cíclica de 50% e tensão de entrada de 9 V.

**EP 05.** Calcule a tensão de saída de um conversor Flyback que está operando com razão cíclica de 25%, tensão de entrada de 311 V e possui um transformador com relação de transformação de 10:1.

---

## 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 significa PWM?

**AA 02.** Calcule a tensão de saída de um conversor Buck que está operando com razão cíclica de 40% e tensão de entrada de 24 V.

**AA 03.** Calcule a tensão de saída de um conversor Boost que está operando com razão cíclica de 90% e tensão de entrada de 12 V.

**AA 04.** Calcule a tensão de saída de um conversor Buck-Boost que está operando com razão cíclica de 70% e tensão de entrada de 5 V.

**AA 05.** Calcule a tensão de saída de um conversor Flyback que está operando com razão cíclica de 25%, tensão de entrada de 311 V e possui um transformador com relação de transformação de 10:1.

AA 05. A tensão de saída será  $V_o = \left(\frac{n}{V_i}\right) x \left(\frac{10}{311}\right) x \left(\frac{1}{0,25}\right) = 10,4V$ .

AA 04. A tensão de saída será  $V_o = V_i x \left(\frac{1}{D}\right) = 5 x \left(\frac{1}{0,7}\right) = 11,7V$ .

AA 03. A tensão de saída será  $V_o = V_i x \left(\frac{1}{1}\right) = 12 x \left(\frac{1}{0,9}\right) = 120V$ .

AA 02. A tensão de saída será  $V_o = V_i x D = 24 x 0,4 = 9,6V$ .

AA 01. PWM significa modulação por largura de pulsos.



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 CC-CA

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2020 (*revisado em março de 2021*).

---

## CONVERSORES CC-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 cc-ca.

### Objetivos parciais

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

### Capítulos e aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado aos capítulos 19 até 23 da apostila e com as aulas 19 até 21 da disciplina.

### Pré-requisitos

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 04 – Conversores cc-cc.

### Continuidade dos Estudos

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

### 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 – 2020/2. 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 19 até 21);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulos 19 até 23).

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 CC-CA

## 1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conversores cc-ca, que podem disponibilizar em sua saída formas de onda diversas, como quadrada, senoidal ou arbitrária. Este conteúdo está diretamente relacionado ao estudo dos conversores cc-cc, se empregando os mesmos princípios de funcionamento e a modulação PWM, agora modificada para operar com conversores cc-ca.

### 1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Modulação PWM senoidal;
- Princípio de funcionamento dos conversores cc-ca;
- Conversores Meia Ponte e Ponte Completa.

### 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 cc-ca;
- Entender a modulação por largura de pulsos (PWM) senoidal;
- Saber calcular a tensão de saída dos principais conversores cc-ca;
- Dimensionar conversores cc-ca.

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

## 2 Princípio de Funcionamento dos Conversores CC-CA

### 2.1 Introdução

Os conversores cc-ca que serão estudados neste curso utilizam a modulação do tipo onda quadrada ou por largura de pulsos senoidal e os transistores operando como chaves. Assim, neste tópico será apresentado o princípio básico de funcionamento de um conversor simples, sem filtro na tensão de saída, mas que permitirá entender a modulação PWM senoidal e as principais características dos conversores cc-ca.

Inicialmente serão apresentados os quadrantes de operação de uma máquina em corrente contínua, um motor cc, por exemplo; para se entender o fluxo de energia entre a fonte e as cargas e a necessidade do emprego de conversores bidirecionais em tensão e corrente.

### 2.1 Quadrantes de Operação

Um motor de corrente contínua pode operar em quatro quadrantes, conforme a polaridade da tensão em seus terminais e do sentido da corrente no mesmo. Pode-se ter:

- $V_m > 0$  e  $I_m > 0$  - a tensão e a corrente são positivas na máquina e a mesma está funcionando como motor. A potência é positiva, ou seja, a fonte está fornecendo energia e a máquina é a carga do circuito. O sentido de giro da máquina é escolhido como anti-horário. Este é o primeiro quadrante de operação mostrado na Figura 1;
- $V_m < 0$  e  $I_m > 0$  - a tensão é negativa e a corrente é positiva na máquina e a mesma está funcionando como gerador. A potência é negativa, ou seja, a máquina está fornecendo energia e a fonte é a carga do circuito. O sentido de giro da máquina é escolhido como horário. Este é o segundo quadrante de operação na Figura 1;
- $V_m < 0$  e  $I_m < 0$  - a tensão e a corrente são negativas na máquina e a mesma está funcionando como motor. A potência é positiva, ou seja, a fonte está fornecendo energia e a máquina é a carga do circuito. O sentido de giro da máquina é escolhido como horário. Este é o terceiro quadrante de operação na Figura 1;
- $V_m > 0$  e  $I_m < 0$  - a tensão é positiva e a corrente é negativa na máquina e a mesma está funcionando como gerador. A potência é negativa, ou seja, a máquina está fornecendo energia e a fonte é a carga do circuito. O sentido de giro da máquina é escolhido como anti-horário. O quarto quadrante está mostrado na Figura 1.

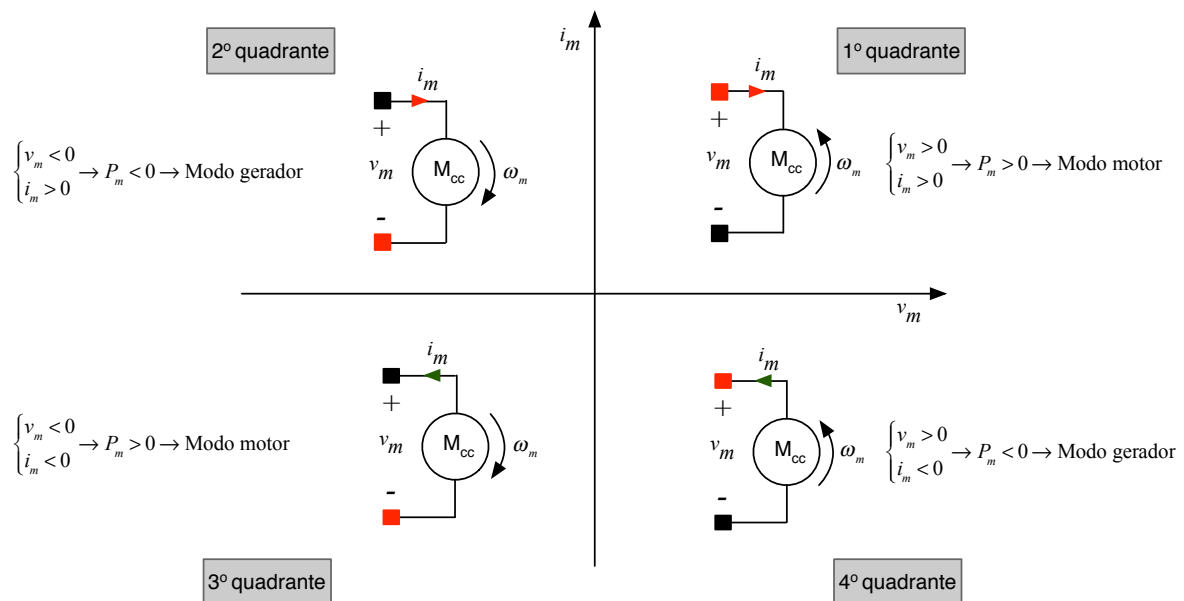


Figura 1 – Quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua.

O conversor utilizado para acionamento do motor de corrente contínua irá determinar se a máquina poderá operar em um ou mais quadrantes.

O circuito apresentado na Figura 2 é muito simples, contendo um interruptor e um diodo de roda-livre. O diodo é necessário pelo fato de a carga ter característica resistiva-indutiva, e no momento de abertura da chave, a corrente elétrica do motor deve ter um caminho para circular, do contrário serão geradas sobretensões nos elementos do circuito. Este circuito tem as seguintes características:

- Permite operação em um quadrante apenas, isto é, operação como motor;
- Pode-se ligar e desligar a máquina de corrente contínua;
- Não permite controle de velocidade;
- Não permite inversão no sentido de rotação;
- Não permite regeneração de energia (operação como gerador).

As etapas de operação do circuito mostrado na Figura 2 são mostradas na Figura 3, onde se tem a etapa onde o interruptor está fechado e o motor está alimentado pela fonte; e a outra etapa onde o interruptor está aberto e a corrente do motor está circulando pelo diodo de roda-livre. Após a energia armazenada no motor se anular, a corrente será nula e o diodo também estará bloqueado. Neste caso tem-se a terceira etapa de funcionamento, onde o circuito estará sem corrente circulando, o motor desligado e parado, como está mostrado na Figura 2.

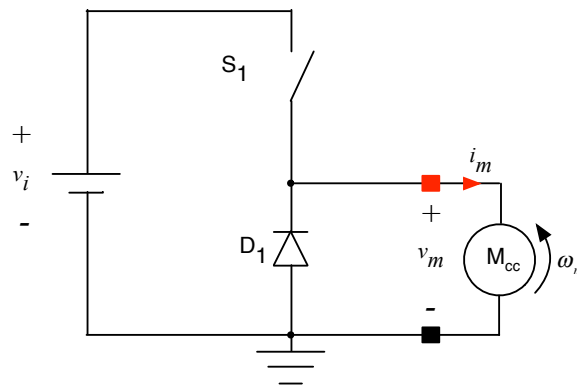


Figura 2 – Circuito simples para acionamento de um motor de corrente contínua.

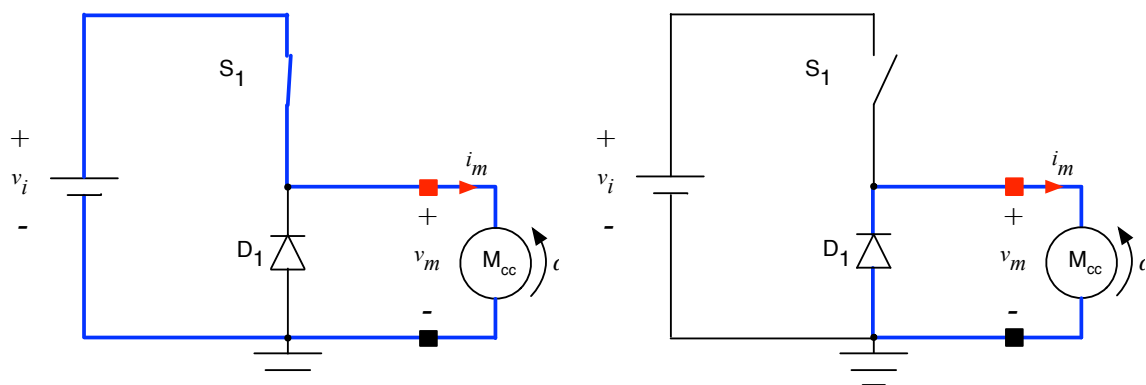


Figura 3 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com interruptor simples.

O circuito mostrado na Figura 4 utiliza um transistor no papel de interruptor. O diodo de roda-livre está presente no circuito, que tem as seguintes características:

- Permite operação em um quadrante apenas, isto é, operação como motor;
- Pode-se ligar e desligar a máquina de corrente contínua;
- Permite controle de velocidade;
- Não permite inversão no sentido de rotação;
- Não permite regeneração de energia (operação como gerador).

As etapas de operação do circuito mostrado na Figura 4 são mostradas na Figura 5, semelhantes aquelas descritas anteriormente para o circuito de acionamento com interruptor simples. A diferença deste circuito com transistor em relação aquele com interruptor simples é que agora pode-se fazer a variação da velocidade do motor de corrente contínua, utilizando modulação PWM, por exemplo.

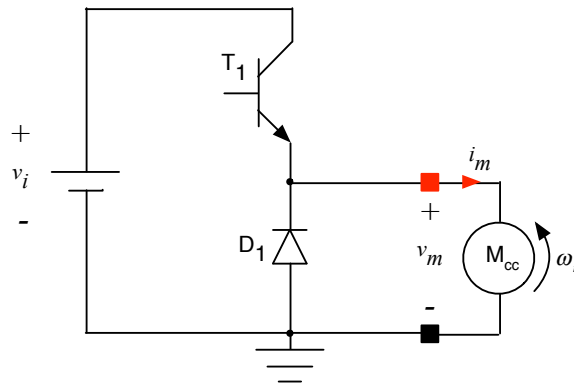


Figura 4 – Circuito com transistor para acionamento de um motor de corrente contínua.

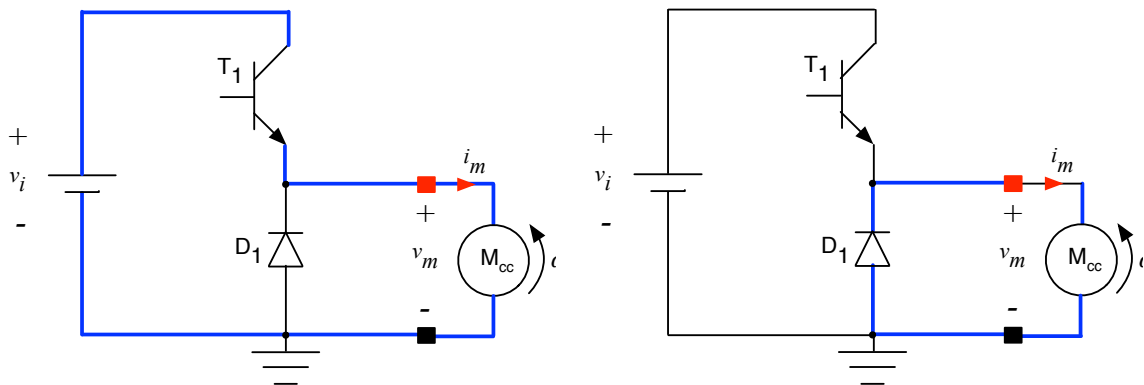


Figura 5 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com transistor.

O circuito mostrado na Figura 6 possui dois transistores e dois diodos de roda-livre, sendo conhecido como conversor meia ponte. Este circuito tem as seguintes características:

- Permite operação em dois quadrantes (motor e gerador em um sentido de rotação);
- Pode-se ligar e desligar a máquina de corrente contínua;
- Permite controle de velocidade;
- Não permite inversão no sentido de rotação;
- Permite regeneração de energia (operação como gerador).

As etapas de operação do circuito mostrado na Figura 6 são mostradas na Figura 7, para operação como motor, sendo semelhantes aquelas descritas anteriormente para o circuito de acionamento com transistor e diodo. Por outro lado, como este circuito permite a operação em dois quadrantes (primeiro quadrante e quarto quadrante), conforme a Figura 1, pode regenerar energia do motor para a fonte, durante frenagens, por exemplo, como está mostrado nas etapas de operação da Figura 8. Note na Figura 8 que agora a corrente sai do motor e circula até a fonte ou pelo interruptor  $T_2$ , que controla este modo de operação. O interruptor  $T_1$  controla o modo de

operação como motor.

É importante destacar que neste circuito, quando emprega dois interruptores conectados na forma de um braço, não pode ocorrer o acionamento simultâneo de  $T_1$  e  $T_2$ , pois neste caso se colocaria a fonte de alimentação em curto-circuito, o que é chamado de curto de braço. Assim, quando o interruptor  $T_1$  é acionado, obrigatoriamente o interruptor  $T_2$  deve estar aberto. Durante a comutação de  $T_1$  para  $T_2$  ou de  $T_2$  para  $T_1$ , deixa-se um intervalo de alguns nanosegundos ou microssegundos, conforme a tecnologia de interruptores que se está utilizando, para garantir que não ocorra acionamento simultâneo dos dois interruptores. Este intervalo de tempo é conhecido como tempo morto.

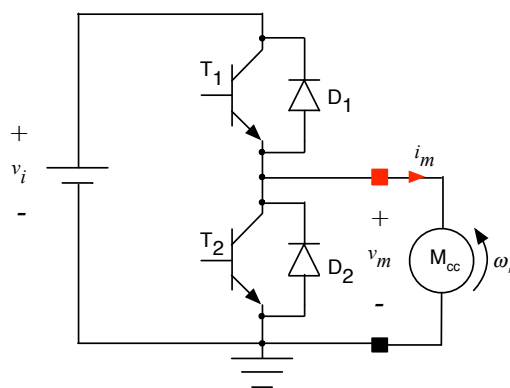


Figura 6 – Circuito para acionamento de um motor de corrente contínua e operação em dois quadrantes.

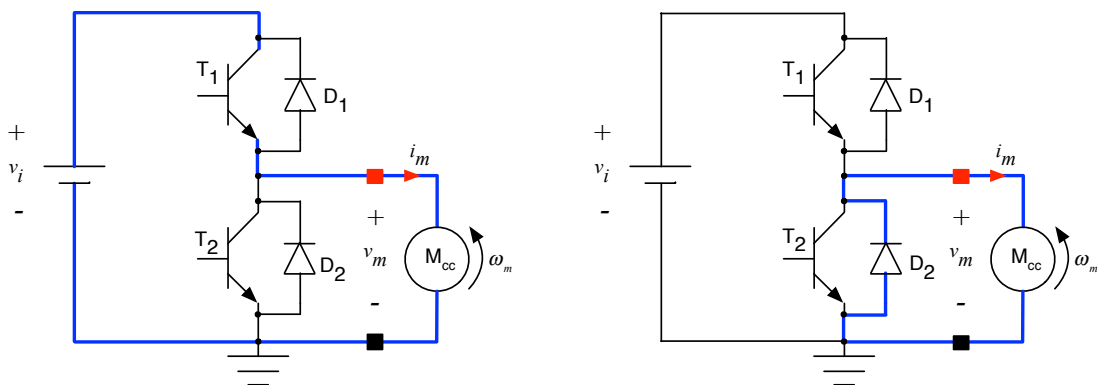


Figura 7 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com operação em dois quadrantes e funcionando como motor.

As formas de onda do circuito operando no modo motor e no modo gerador são mostradas na Figura 9. Importante notar que a tensão aplicada ao motor tem formato retangular (pulsada), mas a corrente no motor terá formato linear ou exponencial, a depender da relação entre a parte resistiva e parte indutiva do modelo equivalente do motor. O circuito estudado aqui somente permite uma polaridade para a tensão do motor, por isso a mesma será sempre positiva. Já a corrente do motor, no modo motor será positiva e no modo gerador será negativa, conforme

se pode observar na Figura 9.

Ademais, note também que as formas de onda mostram operação em condução contínua, conforme foi discutido no estudo dos conversores cc-cc. O modo de condução (contínua ou descontínua) dependerá da frequência de operação, da tensão de entrada e dos parâmetros do motor.

Por fim, o circuito mostrado na Figura 10 com quatro transistores e quatro diodos de roda-livre é um conversor ponte completa, também conhecido como ponte H. Este circuito tem as seguintes características:

- Permite operação em quatro quadrantes (motor e gerador nos dois sentidos de rotação);
- Pode-se ligar e desligar a máquina de corrente contínua;
- Permite controle de velocidade;
- Permite inversão no sentido de rotação;
- Permite regeneração de energia (operação como gerador).

Este circuito da Figura 10 é completo, permitindo o controle total da máquina de corrente contínua monofásica. Este circuito tem suas etapas mostradas na Figura 11, para operação como motor, em ambos os sentidos de rotação (horário e anti-horário), nos primeiro e terceiro quadrantes, conforme mostrado na Figura 1. Além disso, o circuito do conversor ponte completa possibilita também a operação como gerador, em ambos os sentidos de rotação, nos segundo e quarto quadrantes, conforme mostrado na Figura 1. As etapas de operação no modo gerador, de forma simplificada, estão mostradas na Figura 12. Não foram mostradas aqui as etapas de circulação de corrente em roda-livre, visando simplificar a apresentação.

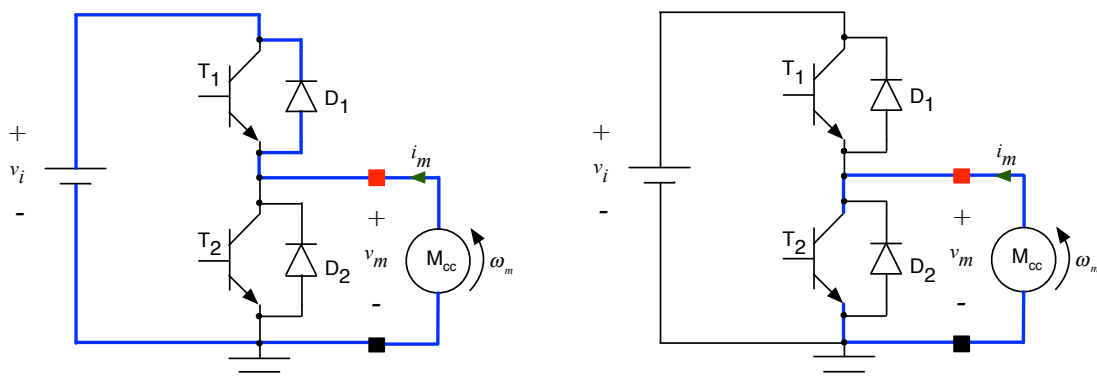


Figura 8 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com operação em dois quadrantes e funcionando como gerador.

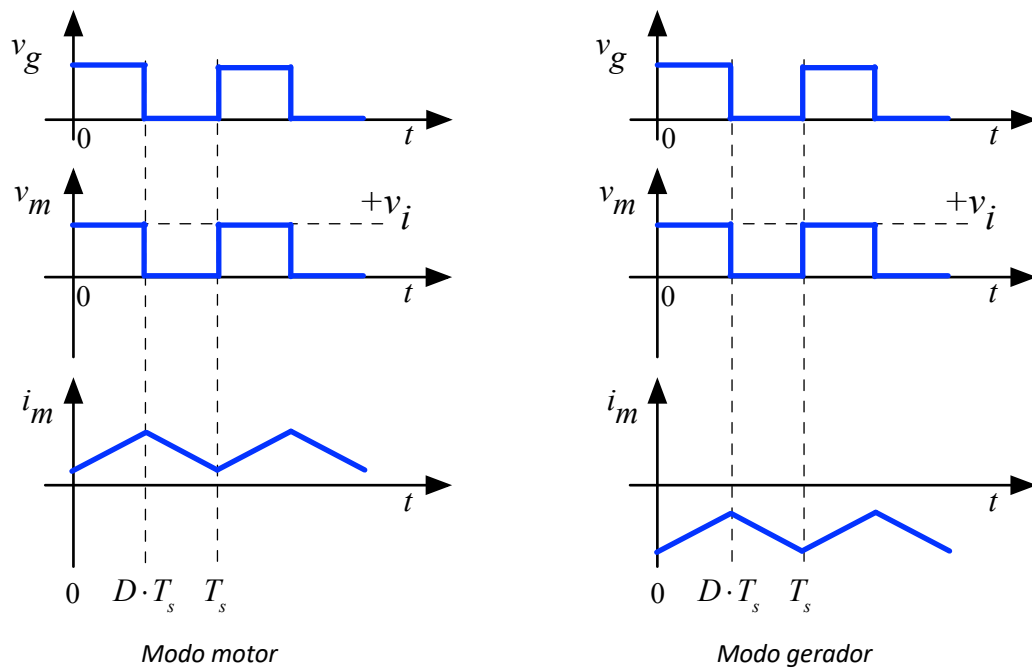


Figura 9 – Formas de onda do circuito de acionamento do motor com operação em dois quadrantes e funcionando como motor e gerador.

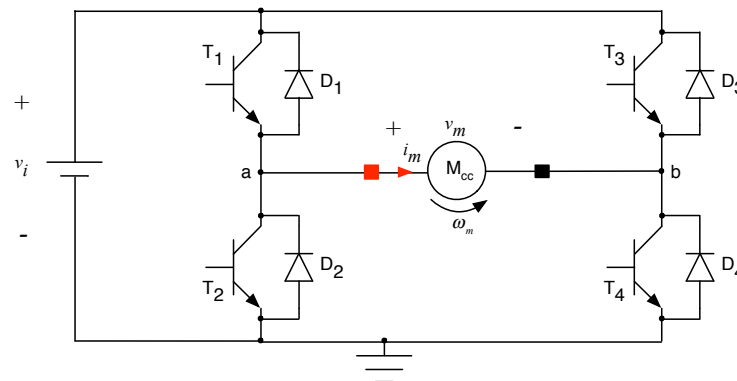


Figura 10 – Circuito para acionamento de um motor de corrente contínua e operação em quatro quadrantes.

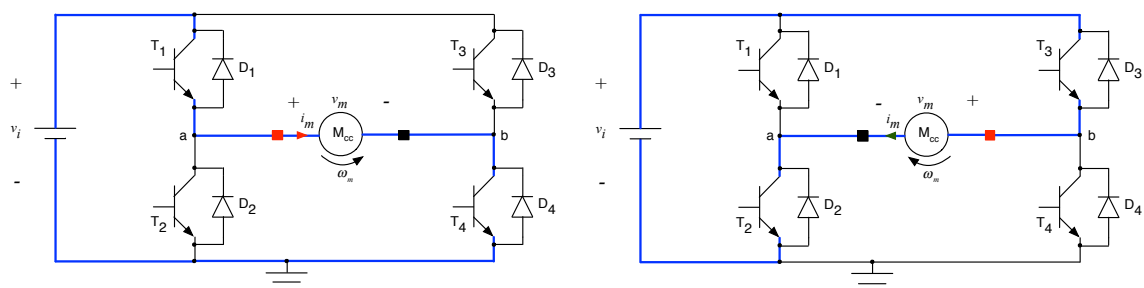


Figura 11 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com operação em quatro quadrantes e funcionando como motor nos dois sentidos de rotação.

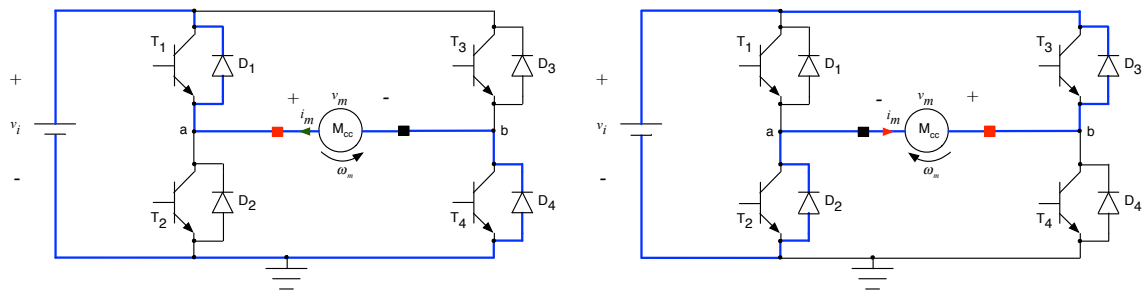


Figura 12 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com operação em quatro quadrantes e funcionando como gerador nos dois sentidos de rotação.

As formas de onda do circuito do conversor ponte completa operando no modo motor e no modo gerador são mostradas na Figura 13. Nota-se que agora a tensão no motor pode ter valores positivos e negativos, do mesmo modo que a corrente. Assim, o motor pode ter os dois sentidos de rotação e operar como motor ou gerador.

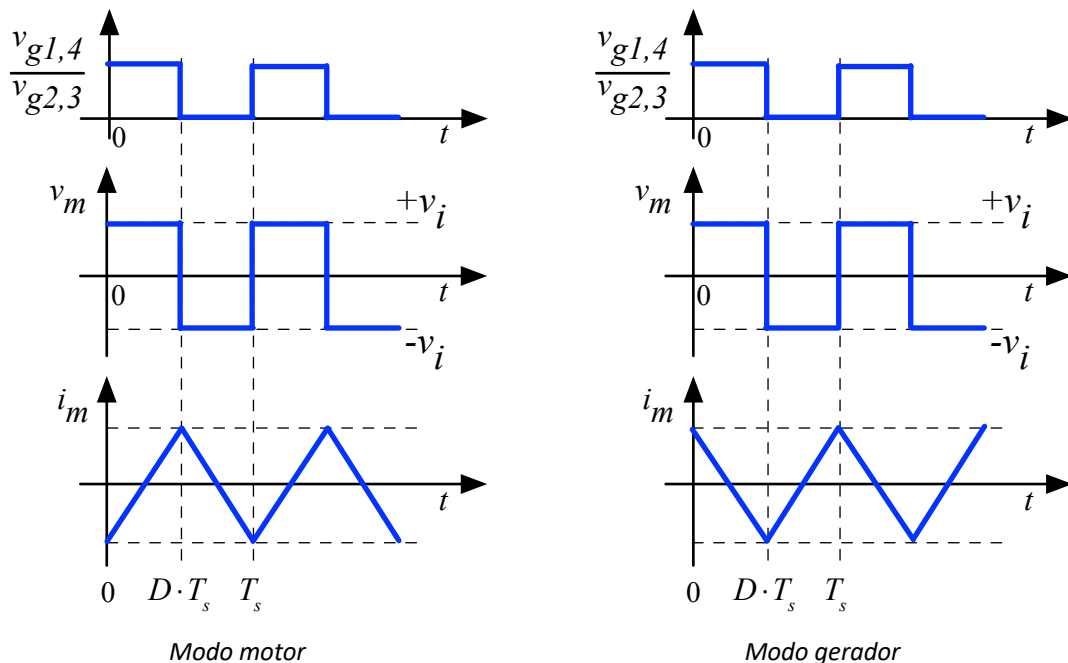


Figura 13 – Formas de onda do circuito de acionamento do motor com operação em quatro quadrantes e funcionando como motor e gerador.

## 2.2 Modulação PWM Senoidal

O capítulo anterior deste curso apresentou a modulação PWM e seus princípios. Esta mesma modulação pode ser modificada para ser utilizada em conversores cc-ca, conhecidos como inversores.

O período de comutação deve novamente ser definido em função da frequência de comutação escolhida pelo projetista, sendo dado por:

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

O tempo que a chave (interruptor) fica ligada (fechada) é denominado de  $T_{on}$ , sendo calculado por:

$$T_{on} = D \cdot T_s$$

Por sua vez, o tempo que a chave fica desligada (aberta) é denominado de  $T_{off}$ , sendo dado por:

$$T_{of} = T_s - T_{on} = T_s - D \cdot T_s = (1 - D) \cdot T_s$$

Os tempos dos demais interruptores, quando se trata de conversores meia ponte (2 interruptores) ou ponte completa (4 interruptores) são obtidos a partir da razão cíclica e do tempo de condução e bloqueio do interruptor de referência,  $T_1$  no circuito da Figura 10, por exemplo. É usual o sinal de comando do interruptor  $T_2$  ser complementar ao sinal de  $T_1$ , sendo o sinal de comando de  $T_3$  definido conforme a modulação empregada a partir do sinal de comando de  $T_1$ ; já o sinal de comando de  $T_4$  pode ser complementar ao sinal de comando de  $T_3$ .

A principal variável para o controle de um conversor é a razão cíclica ( $D$ ), que é a relação entre o tempo ligado e o tempo total (período de comutação) da chave do conversor. Esta relação é percentual, podendo variar de 0 até 100%, isto é, de 0 até 1.

$$D = \frac{T_{on}}{T_s}$$

A principal diferença da modulação PWM senoidal em relação a modulação PWM utilizada nos conversores cc-cc é que a razão cíclica será variável ao longo de um período da forma de onda fundamental de saída do conversor. Em outras palavras, se a modulação for PWM senoidal, então a razão cíclica irá variar ao longo do tempo segundo um padrão senoidal, onde em alguns instantes a largura será pequena e em outros instantes a largura será maior, próximo ao pico da senóide, por exemplo.

Na Figura 14 mostra-se o sinal de comando a ser aplicado no interruptor de um conversor cc-ca, onde se notam os tempos de comutação e as relações apresentadas anteriormente.

A Figura 15 mostra as formas de onda para modulação PWM senoidal denotando a variação da amplitude do sinal modulante ( $v_c$ ) em relação ao sinal triangular ou dente-de-serra ( $v_{tri}$ ). Note que neste caso a largura dos pulsos de comando tiveram variação de largura conforme a

amplitude de variação senoidal da modulante.

Ao se alterar a frequência do sinal modulante se altera o padrão do sinal de comando gerado, conforme é mostrado na Figura 16. Este princípio é utilizado em inversores de frequência, quando se faz o controle de velocidade de motores de corrente alternada variando a frequência da tensão de saída do conversor cc-ca.

O sinal de comando ( $v_g$ ) pode ser obtido diretamente em um microcontrolador ou por um circuito discreto, usando um comparador e um circuito oscilador, do mesmo modo que foi feito na modulação dos conversores cc-cc. Assim, a portadora (tensão dente-de-serra) define a frequência de comutação, enquanto a modulante (tensão de controle) define a largura do pulso de comando da chave, por conseguinte, a tensão de saída do conversor. Além disso, a modulante define a frequência da tensão de saída do conversor cc-ca, ou seja, da fundamental presente na carga. Um circuito típico para realizar a modulação por largura de pulsos é mostrado na Figura 17.

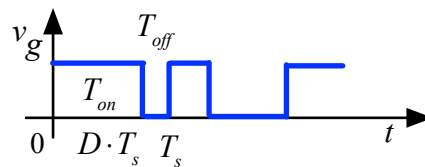


Figura 14 – Sinal de comando de um conversor cc-ca.

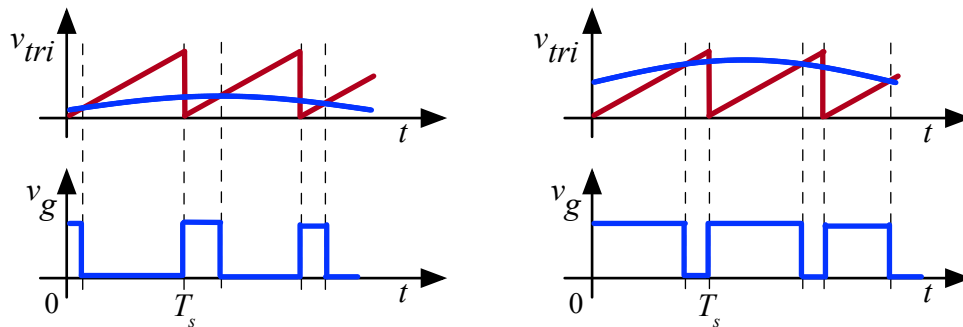


Figura 15 – Formas de onda para modulação por largura de pulsos (PWM) senoidal com diferentes amplitudes do sinal modulante.

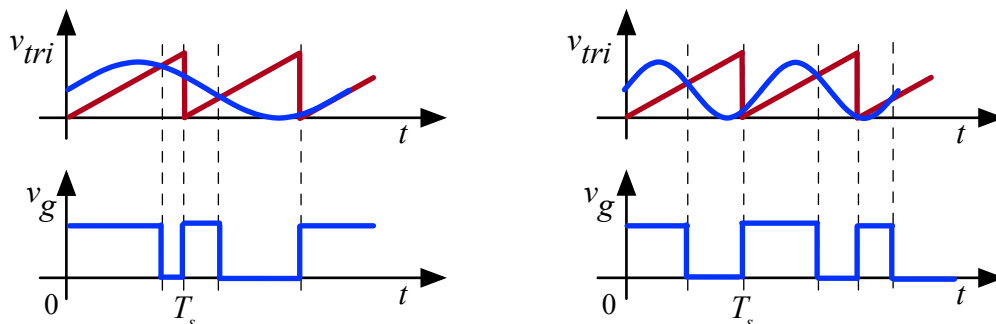


Figura 16 – Formas de onda para modulação por largura de pulsos (PWM) senoidal com diferentes frequências do sinal modulante.

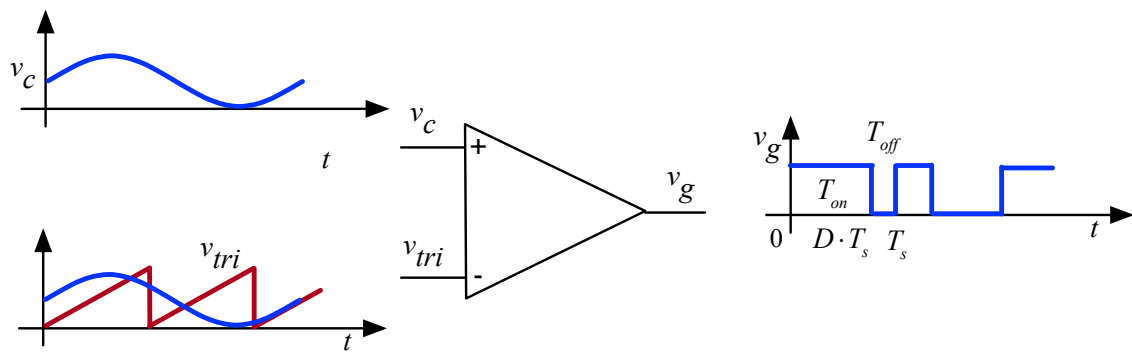


Figura 17 – Circuito discreto para modulação por largura de pulsos senoidal.

A partir do circuito da Figura 17, a razão cíclica ( $D$ ) será:

$$d(t) = \frac{v_c(t)}{v_{tri}(t)} = \frac{V_c \cdot \text{seno}(t)}{V_{tri}} = \frac{V_c}{V_{tri}} \cdot \text{seno}(t)$$

Neste caso, a razão cíclica tem um comportamento variável no tempo, com formato senoidal. Note que se terá uma variação senoidal, com amplitude dada pela relação entre os valores máximos da tensão de controle e da tensão triangular ( $V_c/V_{tri}$ ).

É comum em conversores cc-ca se definir esta relação entre as tensões de controle e triangular como índice de modulação, tendo-se então:

$$IM = \frac{V_c}{V_{tri}} \rightarrow d(t) = IM \cdot \text{seno}(t)$$

O índice de modulação é o equivalente à razão cíclica constante dos conversores cc-cc, podendo variar de zero (0) até um (1 = 100%).

Por exemplo, se a amplitude máxima da dente-de-serra for de 1 V e a tensão de controle tiver amplitude máxima de 0,3 V, então o índice de modulação será de 30%, pois  $IM = V_c/V_{tri} = 0,3/1 = 0,3$ .

A modulação dos conversores cc-ca, conforme a topologia do conversor, pode ser de dois níveis ou três níveis. Estes níveis são identificados na tensão de saída do conversor, antes da filtragem, como pode-se observar nos pontos “a” e “b” do circuito da Figura 10.

A Figura 18 mostra as formas de onda para modulação dois níveis e três níveis, onde se nota que a tensão de saída do conversor cc-ca ( $v_{ab}$ ) pode assumir os valores  $+v_i$ , zero,  $-v_i$ . Assim, na modulação dois níveis se tem apenas  $+v_i$  e  $-v_i$ ; enquanto na modulação três níveis se tem também o nível zero.

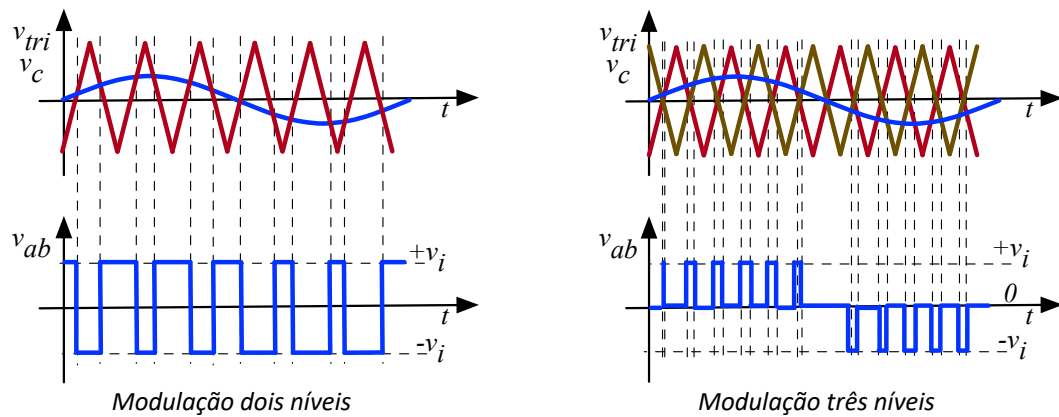


Figura 18 – Formas de onda para modulação dois níveis e três níveis.

A vantagem da modulação três níveis está relacionada com a diminuição dos elementos de filtragem utilizados na saída do conversor cc-ca, resultando em menores indutâncias e capacitâncias. Além disso, na modulação três níveis, a frequência resultante nos elementos do circuito é o dobro da frequência de comutação (da portadora).

A partir da modulação escolhida, após a filtragem, se terá a fundamental do sinal modulante, que será aplicado na carga, conforme mostrado na Figura 19, para modulação tanto de dois níveis como de três níveis.

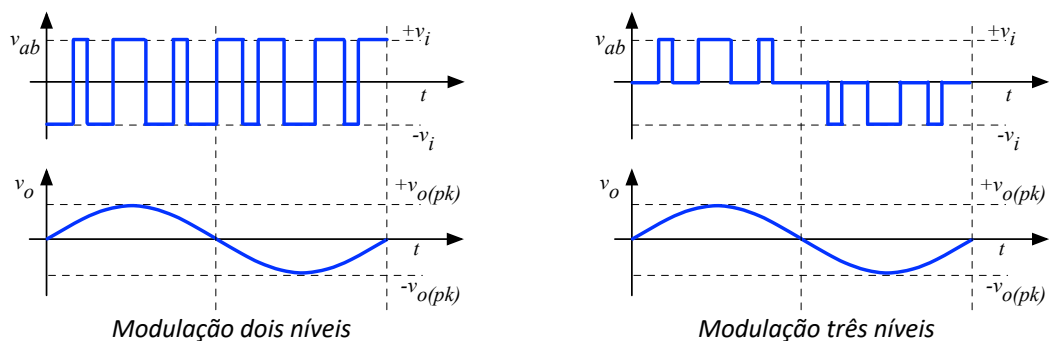


Figura 19 – Formas de onda para modulação dois níveis e três níveis.

## 2.1 Princípio de Funcionamento dos Conversores CC-CA

O conversor cc-ca mais simples é formado por um braço (com dois interruptores e dois diodos), uma carga e duas fontes de alimentação, denominado de conversor meia ponte, conforme mostrado na Figura 20. Este conversor não possui filtro, ou seja, a tensão de saída será pulsada, com forma de onda quadrada. Nesta primeira configuração deste conversor será utilizada como carga um resistor.

O conversor cc-ca da Figura 20, desconsiderando o tempo morto, tem duas etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até  $D \cdot T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  é comandado a conduzir, ou seja, está fechado. Por sua vez, o interruptor  $S_2$  está bloqueado. A tensão de saída ( $v_o$ ) é igual a da entrada positiva ( $+v_a$ ). A corrente na carga é sua tensão dividida pela resistência;
- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, isto é, aberto; enquanto o interruptor  $S_2$  está comandado a conduzir. A tensão de saída ( $v_o$ ) é igual a da entrada negativa ( $-v_b$ ). A corrente na carga é sua tensão dividida pela resistência, sendo também negativa nesta etapa.

As principais formas de onda do conversor são mostradas na Figura 21, onde se nota que a tensão de saída é pulsada, seguindo o formato da tensão de comando aplicada nos interruptores  $S_1$  e  $S_2$ , assumindo valores positivos e negativos, o que caracteriza o funcionamento como inversor de tensão, isto é, de um conversor com entrada em corrente contínua (cc) e saída em corrente alternada (ca). A corrente na carga segue o mesmo formato da tensão.

As tensões de entrada dos conversores, em geral, são definidas.

Assim:

$$\begin{cases} v_a = V_a \\ v_b = V_b \end{cases} \rightarrow \text{definidas}$$

A tensão máxima na saída será igual às amplitudes máximas das entradas:

$$+V_{o(\max)} = V_{a(\max)}$$

$$-V_{o(\max)} = V_{b(\max)}$$

Já a tensão média na saída será dada por:

$$V_o = \frac{1}{T_s} \cdot V_a \cdot D \cdot T_s + \frac{1}{T_s} \cdot (-V_b) \cdot (1 - D) \cdot T_s$$

$$V_o = V_a \cdot D - V_b \cdot (1 - D)$$

Considerando que as tensões são simétricas e com mesmo valor, mas que possuem a metade da amplitude de uma fonte única equivalente:

$$V_a = V_b = \frac{V_i}{2}$$

$$V_o = \frac{V_i}{2} \cdot (2 \cdot D - 1)$$

Assim, a tensão de saída, nos limites de operação, será:

$$V_o = \begin{cases} D = 0 \rightarrow -\frac{V_i}{2} \\ D = 0,5 \rightarrow 0 \\ D = 1 \rightarrow +\frac{V_i}{2} \end{cases}$$

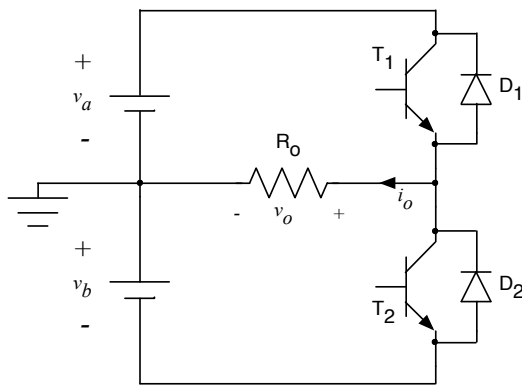


Figura 20 – Conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva.

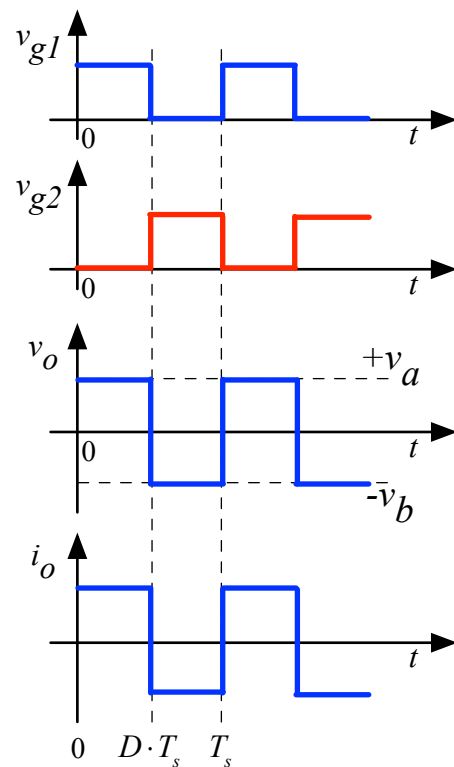


Figura 21 – Principais formas de onda do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva.

Note que se a razão cíclica for de 50%, a tensão de saída terá valor médio igual a zero, pois neste caso a tensão sobre a carga será alternada com formato quadrado.

Definindo as tensões de entrada e de saída, pode-se obter a razão cíclica:

$$D = \frac{1}{2} + \frac{V_o}{V_i}$$

As correntes serão:

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

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

A potência na saída e na entrada, considerando rendimento de 100%, ou seja, componentes ideais (sem perdas), será:

$$P_o = V_o \cdot I_o$$

$$P_i = P_o \rightarrow \eta = 1$$

O funcionamento do conversor cc-ca simples com carga mista (resistiva-indutiva) e por conseguinte, tendo a necessidade dos diodos de roda-livre, visto a carga ter característica indutiva, será detalhado a partir do circuito da Figura 22.

As etapas de operação do conversor da Figura 22 são semelhantes aquelas anteriormente descritas, com exceção que agora se tem duas etapas de tempo morto, onde nenhum dos interruptores está conduzindo. A primeira etapa onde a tensão na carga será positiva é mostrada na Figura 24; enquanto a terceira etapa, onde a tensão na carga é negativa é mostrada na Figura 26.

As etapas de tempo morto são mostradas nas Figura 25 e Figura 27 e estão descritas a seguir:

- Primeira etapa de tempo morto ( $D \cdot T_s$  até  $T_{1 \rightarrow 2}$ ) - o interruptor  $S_1$  estava conduzindo sendo comandado a bloquear. Por sua vez, o interruptor  $S_2$  estava bloqueado e assim permanece nesta etapa. A tensão de saída ( $v_o$ ) é igual a da entrada negativa ( $-v_b$ ). A corrente da carga circula em roda-livre pelo diodo  $D_2$  e pela fonte de alimentação  $v_b$ ;
- Segunda etapa ( $T_s - T_{2 \rightarrow 1}$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_2$  estava conduzindo sendo comandado a bloquear. Por sua vez, o interruptor  $S_1$  estava bloqueado e assim permanece nesta etapa. A tensão de saída ( $v_o$ ) é igual a da entrada positiva ( $+v_a$ ). A corrente da carga circula em roda-livre pelo diodo  $D_1$  e pela fonte de alimentação  $v_a$ .

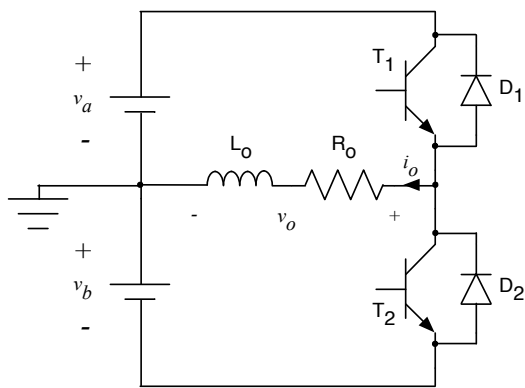


Figura 22 – Conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

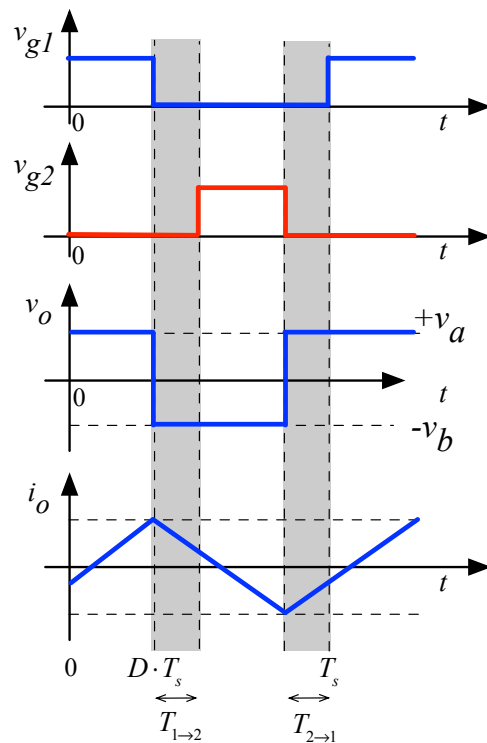


Figura 23 – Principais formas de onda do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

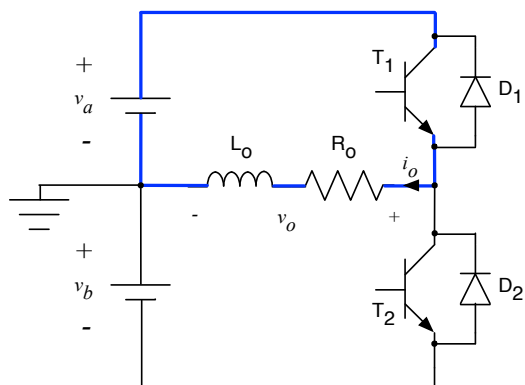


Figura 24 – Primeira etapa de operação do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

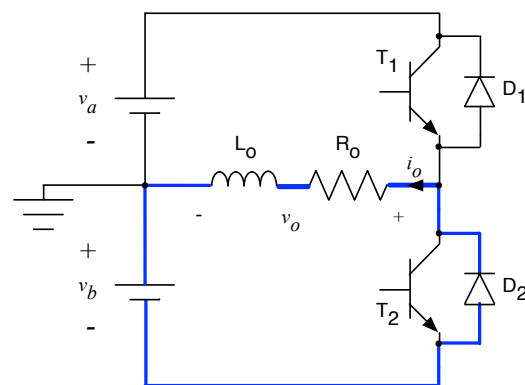


Figura 25 – Segunda etapa de operação do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

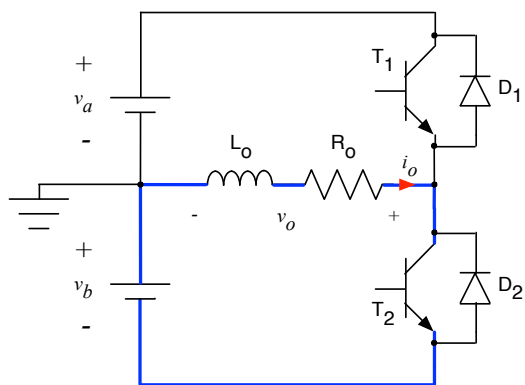


Figura 26 – Terceira etapa de operação do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

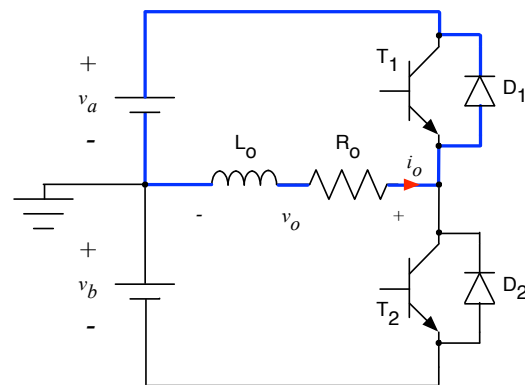


Figura 27 – Quarta etapa de operação do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

## 3 Conversores CC-CA Básicos

### 3.1 Introdução

Os conversores cc-ca básicos para um primeiro estudo:

- Conversor meia ponte (HB) onda quadrada;
- Conversor meia ponte (HB) PWM senoidal;
- Conversor ponte completa (FB) onda quadrada;
- Conversor ponte completa (FB) PWM senoidal.

Além destes, existem diversos outros conversores; mas, como o intuito deste curso é ser introdutório ao assunto, serão apresentados os conversores meia ponte e ponte completa operando com saída em onda quadrada ou senoidal.

### 3.2 Conversor Meia Ponte Onda Quadrada

A Figura 28 mostra o conversor meia ponte onda quadrada. Note que este conversor é exatamente aquele que foi estudado anteriormente com carga resistiva. Assim, as etapas de funcionamento não serão repetidas aqui.

As formas de onda do inversor meia ponte onda quadrada são mostradas na Figura 29. Note que a saída assume valores positivos e negativos, repetindo-se com período de  $2\pi$  radianos.

O inversor onda quadrada pode utilizar interruptores lentos, pois os interruptores não comutam em alta frequência, mas sim na frequência da forma de onda fundamental de saída, por exemplo em 60 Hz. As perdas por comutação deste conversor são pequenas, pois o número de comutações por período é reduzido.

Afora isso, este conversor não utiliza filtro de saída, então a tensão aplicada na carga é quadrada, por isso seu nome de inversor onda quadrada. Atente para o fato de que nem todas as cargas podem operar corretamente com esta forma de onda. Por exemplo, motores de corrente alternada e transformadores, apresentarão funcionamento inadequado com este formato de tensão, resultando em maiores perdas e aquecimento nos mesmos. Por sua vez, cargas resistivas podem ser alimentadas por este inversor.

A tensão eficaz de saída será dada por:

$$V_{o(ef)} = \frac{V_i}{2} \rightarrow V_a = V_b = \frac{V_i}{2}$$

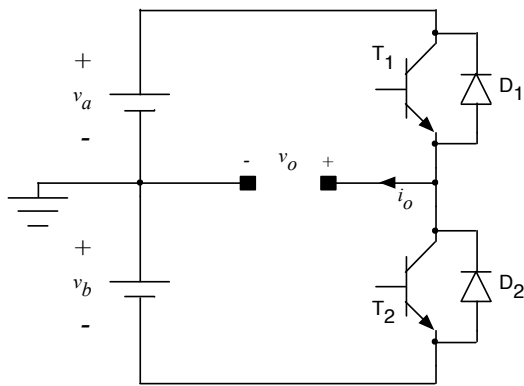


Figura 28 – Conversor cc-ca meia ponte onda quadrada.

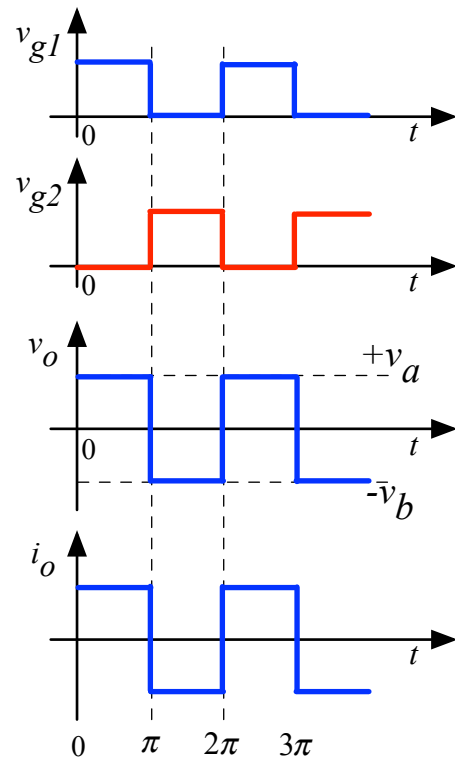


Figura 29 – Principais formas de onda do conversor meia ponte onda quadrada.

### 3.3 Conversor Meia Ponte PWM Senoidal

A Figura 30 mostra o conversor meia ponte PWM senoidal. O conversor é o mesmo estudado anteriormente, mas agora se tem a presença do filtro de saída, formado pelo indutor  $L_o$  e pelo capacitor  $C_o$ , do mesmo modo como foi estudado para o conversor cc-cc Buck.

O conversor meia ponte PWM senoidal tem duas etapas de operação, desconsiderando-se as etapas de morto:

- Primeira etapa ( $0$  até  $D \cdot T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  é comandado a conduzir, ou seja, está fechado; o interruptor  $S_2$  está bloqueado. A tensão antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é positiva e igual a  $+v_a$ . A corrente no indutor  $L_o$  irá crescer no sentido positivo. Esta etapa é mostrada na Figura 32;
- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_s$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, enquanto o interruptor  $S_2$  está conduzindo. A tensão antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é negativa e igual a  $-v_b$ . A corrente no indutor  $L_o$  irá crescer no sentido negativo. Esta etapa é mostrada na Figura 32.

As principais formas de onda para o conversor meia ponte PWM senoidal são mostradas na Figura 31.

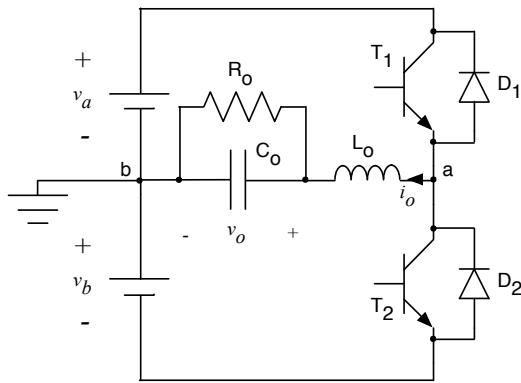


Figura 30 – Conversor cc-ca meia ponte PWM senoidal.

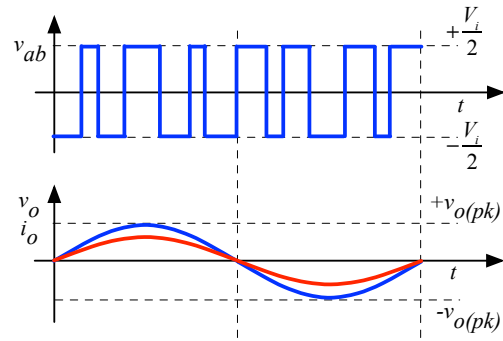


Figura 31 – Principais formas de onda do conversor meia ponte PWM senoidal.

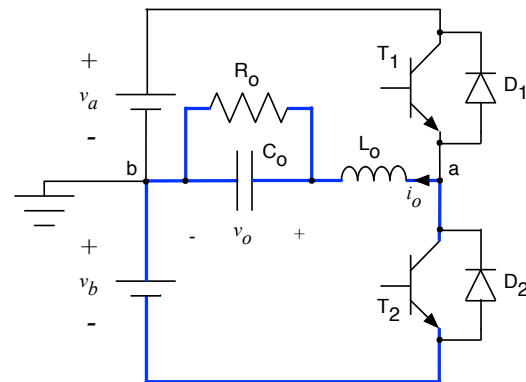
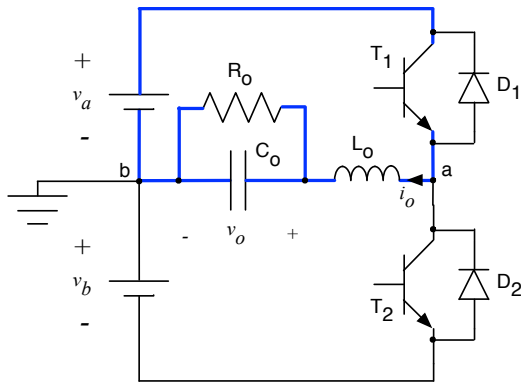


Figura 32 – Etapas de operação do conversor meia ponte PWM senoidal.

Definindo as tensões de entrada simetricamente e com amplitude de metade de uma tensão de entrada única:

$$V_a = V_b = \frac{V_i}{2}$$

Já a tensão média antes da filtragem será dada por:

$$V_o = \frac{1}{T_s} \cdot V_a \cdot D \cdot T_s + \frac{1}{T_s} \cdot (-V_b) \cdot (1-D) \cdot T_s$$

$$V_o = V_a \cdot D - V_b \cdot (1-D)$$

$$V_{ab} = \frac{V_i}{2} \cdot (2 \cdot D - 1)$$

Do mesmo modo que nos conversores cc-cc, a tensão média no indutor deve ser nula, então:

$$V_{L_o} = 0 \rightarrow V_o = V_{ab} \rightarrow V_o = \frac{V_i}{2} \cdot (2 \cdot D - 1)$$

A tensão calculada anteriormente representa o valor de pico da tensão na saída, após a filtragem, considerando componentes ideais, isto é, sem quedas de tensão. A tensão de saída terá formato senoidal, assim:

$$v_o(t) = V_{o(pk)} \cdot \text{seno}(t)$$

Assim:

$$V_o = \frac{V_i}{2} \cdot (2 \cdot D - 1) \rightarrow v_o(t) = \frac{V_i}{2} \cdot (2 \cdot d(t) - 1)$$

$$V_{o(pk)} \cdot \text{seno}(t) = \frac{V_i}{2} \cdot (2 \cdot d(t) - 1)$$

Portanto:

$$d(t) = \frac{1}{2} + \frac{V_{o(pk)} \cdot \text{seno}(t)}{V_i} \rightarrow d(t) = \frac{1}{2} + \frac{V_{o(pk)}}{V_i} \cdot \text{seno}(t)$$

Pode-se definir a relação entre o pico da tensão de saída e a tensão de entrada como sendo o índice de modulação, então:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} \rightarrow d(t) = \frac{1}{2} + IM \cdot \text{seno}(t)$$

Assim, nota-se que a razão cíclica deve variar senoidalmente, tendo 0,5 como valor médio, valor 0 como valor mínimo e 1 como valor máximo. A variação ao redor do valor médio será determinada pela relação entre a tensão de entrada e de saída desejadas.

A tensão eficaz na saída será:

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

As correntes são determinadas em função da tensão eficaz na carga.

A ondulação (*ripple*) de corrente no indutor é um parâmetro de projeto, sendo dada por um percentual da corrente de saída. Assim:

$$\Delta i = \% \cdot I_o [A]$$

Por sua vez, a ondulação (*ripple*) de tensão na saída também é determinada pelo

projetista, como sendo um percentual da tensão de saída. Portanto:

$$\Delta v = \% \cdot V_o [V]$$

Finalmente, o indutor e o capacitor podem ser calculados por:

$$L_o = \frac{V_i}{\Delta i \cdot F_s} \cdot D \cdot (1 - D)$$

$$C_o = \frac{V_i}{\pi^3 \cdot \Delta v \cdot L_o \cdot F_s^2}$$

As tensões máximas sobre o interruptor e sobre o diodo são:

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

### 3.1 Conversor Ponte Completa Onda Quadrada

A Figura 33 mostra o conversor ponte completa onda quadrada. O conversor está desenhado com carga resistiva, mas poderia ser descrito com outras cargas também. Agora se tem a presença de dois braços completos, formados por quatro interruptores e por quatro diodos de roda-livre. Destaca-se também que a fonte de entrada é simples, ou seja, utiliza-se apenas uma fonte de alimentação na entrada, diferente do conversor meia ponte, que necessita de duas fontes de alimentação na entrada.

As características do conversor ponte completa onda quadrada são semelhantes aquelas descritas para o conversor meia ponte onda quadrada.

A Figura 34 mostra as etapas de operação do conversor ponte completa onda quadrada, que são:

- Primeira etapa (0 até  $D \cdot T_s$ ) - os interruptores  $S_1$  e  $S_4$  são comandados a conduzir, ou seja, estão fechados. Por sua vez, os interruptores  $S_2$  e  $S_3$  estão bloqueados. A tensão de saída ( $v_o$ ) é igual a tensão de entrada com polaridade positiva ( $+v_i$ ). A corrente na carga é sua tensão dividida pela resistência;
- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_s$ ) - os interruptores  $S_2$  e  $S_3$  são comandados a conduzir, ou seja, estão fechados. Por sua vez, os interruptores  $S_1$  e  $S_4$  estão bloqueados. A tensão de saída ( $v_o$ ) é igual a tensão de entrada com polaridade negativa ( $-v_i$ ). A corrente na carga é sua tensão dividida pela resistência.

As principais formas de onda do conversor ponte completa operando com saída em onda

quadrada são mostradas na Figura 34. Note que os sinais de comando dos interruptores  $S_1$  e  $S_4$  são iguais, enquanto os sinais de comando de  $S_2$  e  $S_3$  são complementares a  $S_1$  e  $S_4$ .

A tensão eficaz de saída será dada por:

$$V_{o(ef)} = V_i$$

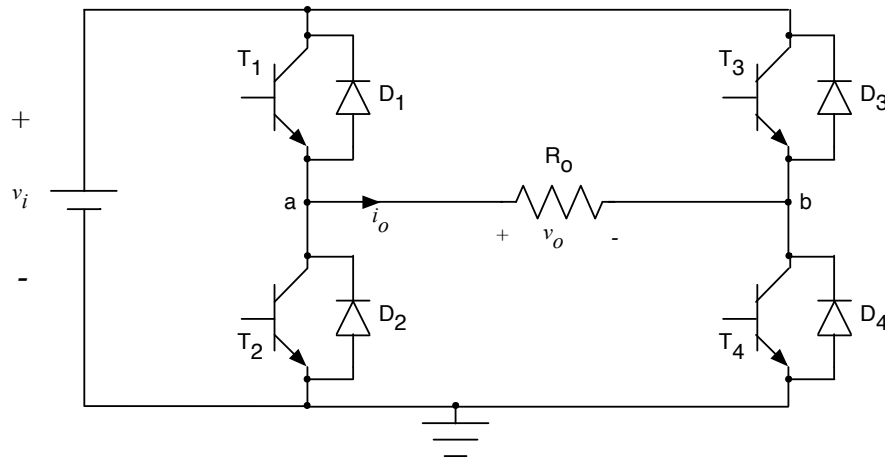


Figura 33 – Circuito do conversor cc-ca ponte completa onda quadrada.

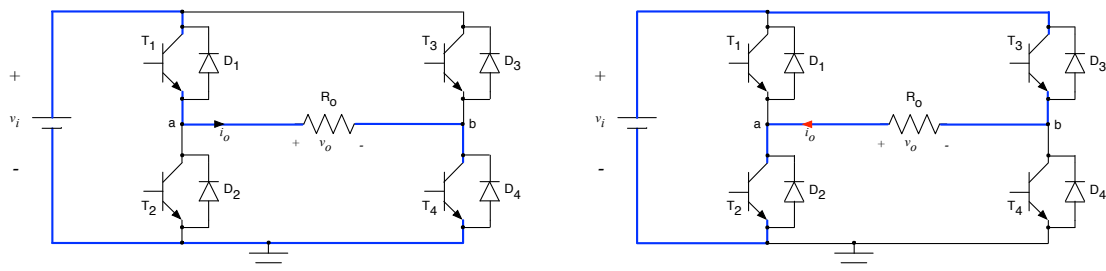


Figura 34 – Etapas de operação do conversor ponte completa onda quadrada.

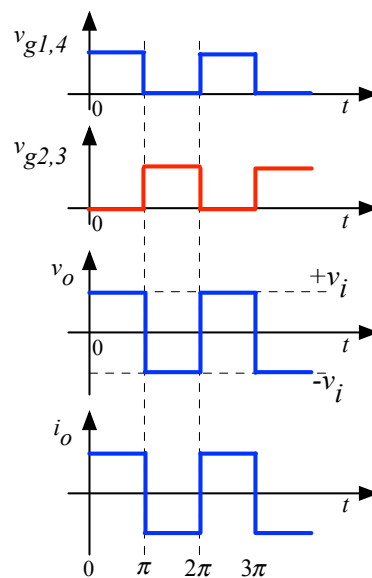


Figura 35 – Formas de onda do conversor ponte completa onda quadrada sem tempo morto.

A Figura 36 mostra o conversor ponte completa com carga mista (resistiva-indutiva). Neste caso ocorre a circulação de corrente pelos diodos de roda-livre. Além disso, para o conversor ponte completa a modulação pode ser de dois níveis ou três níveis. A descrição e formas de onda apresentadas anteriormente foram de dois níveis. Importante notar também que o conversor meia ponte somente pode operar com modulação dois níveis.

As etapas de operação do conversor ponte completa para modulação três níveis são mostradas nas Figura 37 e Figura 38, enquanto as principais formas de onda são mostradas na Figura 39.

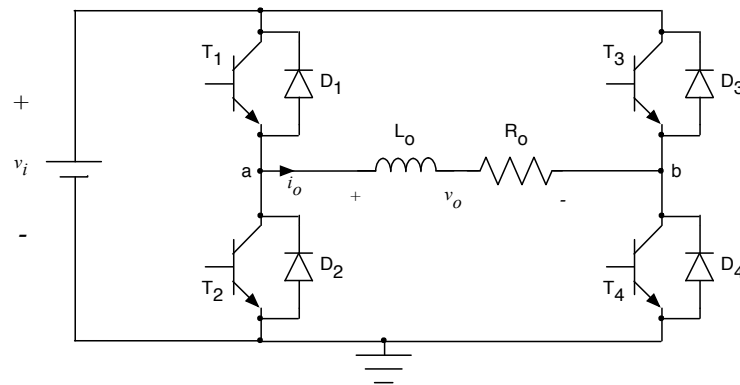


Figura 36 – Circuito do conversor cc-ca ponte completa onda quadrada com carga mista.

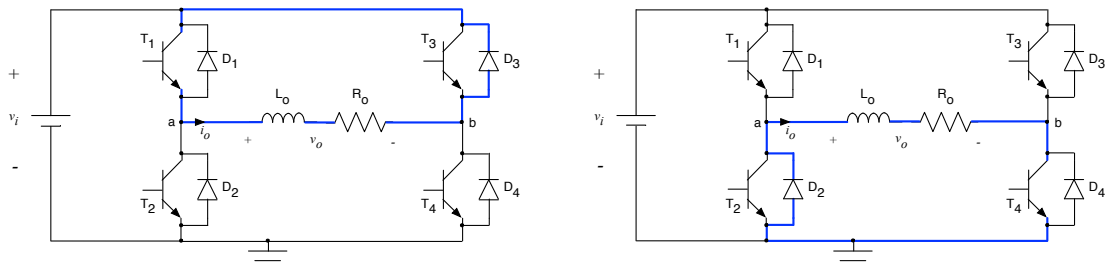


Figura 37 – Etapas de operação do conversor ponte completa onda quadrada com carga mista e corrente positiva na carga.

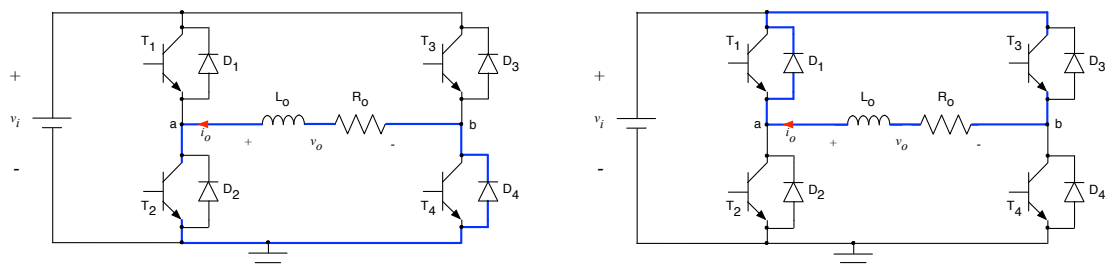


Figura 38 – Etapas de operação do conversor ponte completa onda quadrada com carga mista e corrente negativa na carga.

Na modulação três níveis se tem na tensão  $v_{ab}$  valores positivos, negativos e zero. Neste caso os interruptores são comandados de modo distinto daquele de dois níveis. Assim, o interruptor  $S_2$  é comandado com sinal complementar ao interruptor  $S_1$ . Por sua vez,  $S_3$  e  $S_4$  tem sinais de comando diferentes daqueles de  $S_1$  e  $S_2$ .

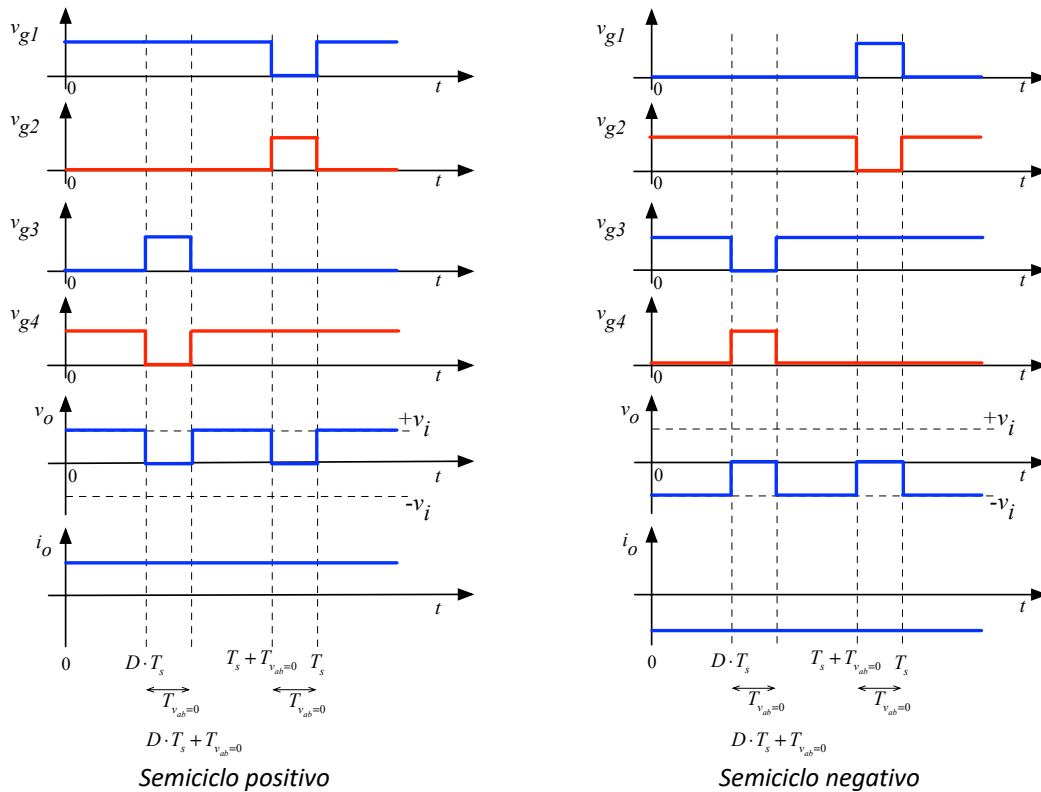


Figura 39 – Formas de onda do conversor ponte completa para operação com três níveis.

### 3.2 Conversor Ponte Completa PWM Senoidal

A Figura 40 mostra o conversor ponte completa PWM senoidal. O conversor é o mesmo estudado anteriormente, mas agora se tem a presença do filtro de saída, formado pelo indutor  $L_o$  e pelo capacitor  $C_o$ , do mesmo modo como foi estudado para o conversor cc-cc Buck e anteriormente para o conversor meia ponte PWM senoidal.

O conversor ponte completa PWM senoidal tem duas etapas de operação, desconsiderando-se as etapas de tempo morto, se a modulação for de dois níveis. Já para modulação três níveis o conversor terá quatro etapas de operação no semiciclo positivo (tensão de saída positiva) e outras quatro etapas no semiciclo negativo (tensão de saída negativa), desconsiderando-se o tempo morto.

As etapas no semiciclo positivo da tensão de saída serão:

- Primeira etapa (0 até  $D \cdot T_s$ ) - os interruptores  $S_1$  e  $S_4$  são comandados a conduzir,

ou seja, estão fechados; os interruptores  $S_2$  e  $S_3$  estão bloqueados. A tensão antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é positiva e igual a  $+v_i$ . A corrente no indutor  $L_o$  irá crescer no sentido positivo. Esta etapa é mostrada na Figura 41;

- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $D \cdot T_s + T_{vab=0}$ ) - os interruptores  $S_1$  e  $S_3$  são comandados a conduzir, ou seja, estão fechados; os interruptores  $S_2$  e  $S_4$  estão bloqueados. A tensão antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é zero. A corrente no indutor  $L_o$  é positiva e irá circular em roda-livre. Esta etapa é mostrada na Figura 42;
- Terceira etapa ( $D \cdot T_s + T_{vab=0}$  até  $T_s - T_{vab=0}$ ) - os interruptores  $S_1$  e  $S_4$  são comandados a conduzir, ou seja, estão fechados; os interruptores  $S_2$  e  $S_3$  estão bloqueados. A tensão antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é positiva e igual a  $+v_i$ . A corrente no indutor  $L_o$  irá crescer no sentido positivo. Esta etapa é mostrada na Figura 41;
- Quarta etapa ( $T_s - T_{vab=0}$  até  $T_s$ ) - os interruptores  $S_2$  e  $S_4$  são comandados a conduzir, ou seja, estão fechados; os interruptores  $S_1$  e  $S_3$  estão bloqueados. A tensão antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é zero. A corrente no indutor  $L_o$  é positiva e irá circular em roda-livre. Esta etapa é mostrada na Figura 42.

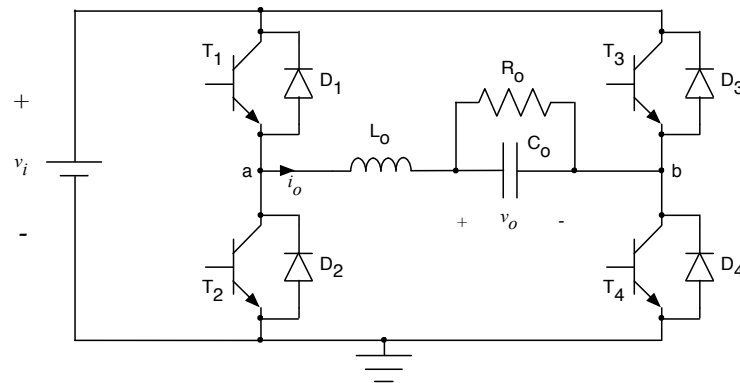


Figura 40 – Circuito do conversor cc-ca ponte completa PWM senoidal.

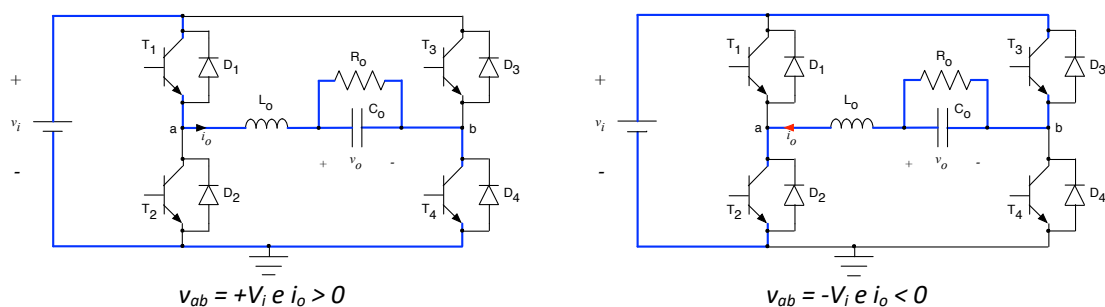


Figura 41 – Etapas de operação do conversor ponte completa PWM senoidal.

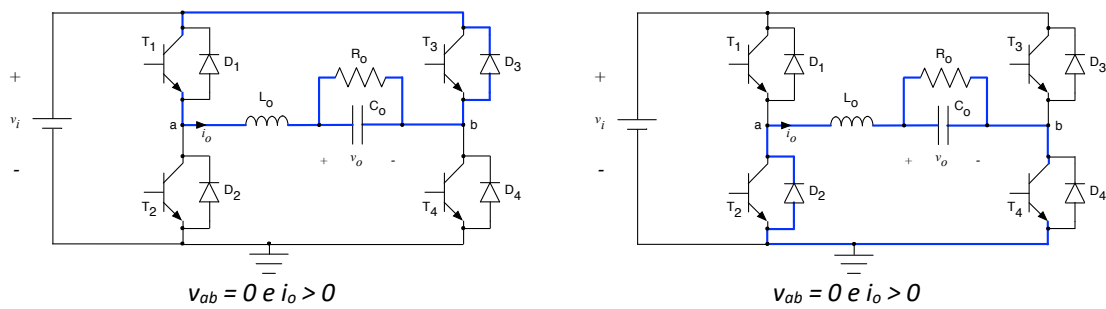


Figura 42 – Etapas de operação do conversor ponte completa PWM senoidal.

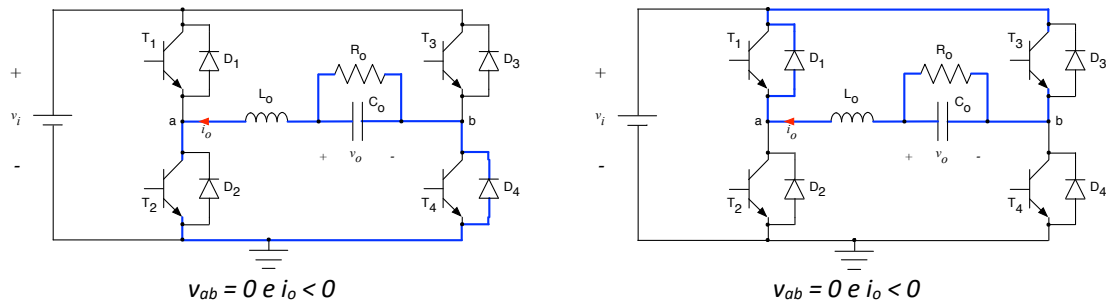


Figura 43 – Etapas de operação do conversor ponte completa PWM senoidal.

As etapas no semiciclo negativo da tensão de saída serão:

- Primeira etapa (0 até  $D \cdot T_s$ ) - os interruptores  $S_2$  e  $S_3$  são comandados a conduzir, ou seja, estão fechados; os interruptores  $S_1$  e  $S_4$  estão bloqueados. A tensão antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é negativa e igual a  $-v_i$ . A corrente no indutor  $L_o$  irá crescer no sentido negativo. Esta etapa é mostrada na Figura 41;
- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $D \cdot T_s + T_{vab=0}$ ) - os interruptores  $S_2$  e  $S_4$  são comandados a conduzir, ou seja, estão fechados; os interruptores  $S_1$  e  $S_3$  estão bloqueados. A tensão antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é zero. A corrente no indutor  $L_o$  é negativa e irá circular em roda-livre. Esta etapa é mostrada na Figura 43;
- Terceira etapa ( $D \cdot T_s + T_{vab=0}$  até  $T_s - T_{vab=0}$ ) - os interruptores  $S_2$  e  $S_3$  são comandados a conduzir, ou seja, estão fechados; os interruptores  $S_1$  e  $S_4$  estão bloqueados. A tensão antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é negativa e igual a  $-v_i$ . A corrente no indutor  $L_o$  irá crescer no sentido negativo. Esta etapa é mostrada na Figura 41;
- Quarta etapa ( $T_s - T_{vab=0}$  até  $T_s$ ) - os interruptores  $S_1$  e  $S_3$  são comandados a conduzir, ou seja, estão fechados; os interruptores  $S_2$  e  $S_4$  estão bloqueados. A tensão antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é zero. A corrente no indutor  $L_o$  é negativa e irá circular em roda-livre. Esta etapa é mostrada na Figura 43.

As principais formas de onda para o conversor ponte completa PWM senoidal são

mostradas na Figura 44, denotando a modulação três níveis e a tensão na carga após a filtragem, quando a mesma apresenta formato senoidal puro, desconsiderando-se a ondulação de alta frequência (*ripple*) presente na tensão sobre o capacitor de saída  $C_o$ .

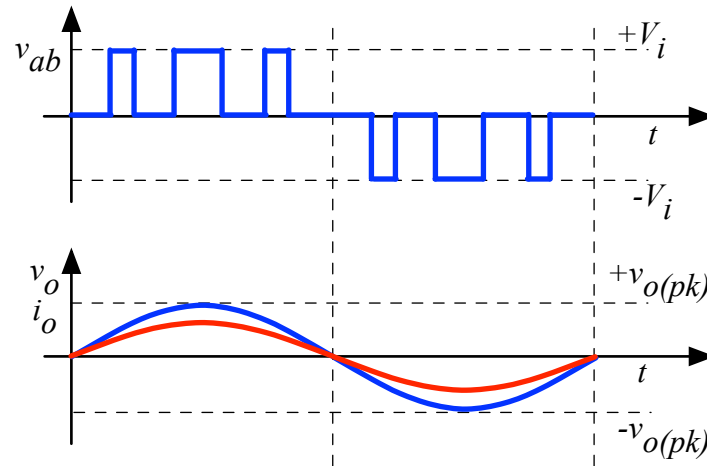


Figura 44 – Principais formas de onda para o conversor ponte completa PWM senoidal.

Definindo a tensão de entrada:

$$V_i = \text{definida}$$

Já a tensão média antes da filtragem, para modulação três níveis, será dada por:

$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \cdot V_i \cdot D \cdot T_s$$

$$V_{ab} = V_i \cdot D$$

Do mesmo modo que nos conversores cc-cc, a tensão média no indutor deve ser nula, então:

$$V_{L_o} = 0 \rightarrow V_o = V_{ab} \rightarrow V_o = V_i \cdot D$$

A tensão calculada anteriormente representa o valor de pico da tensão na saída, após a filtragem, considerando componentes ideais, isto é, sem quedas de tensão. A tensão de saída terá formato senoidal, assim:

$$v_o(t) = V_{o(pk)} \cdot \text{seno}(t)$$

Assim:

$$V_{o(pk)} \cdot \text{seno}(t) = V_i \cdot d(t)$$

Portanto:

$$d(t) = \frac{V_{o(pk)} \cdot \text{seno}(t)}{V_i} \rightarrow d(t) = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} \cdot \text{seno}(t)$$

Pode-se definir a relação entre o pico da tensão de saída e a tensão de entrada como sendo o índice de modulação, então:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} \rightarrow d(t) = IM \cdot \text{seno}(t)$$

Assim, nota-se que a razão cíclica deve variar senoidalmente, tendo zero como valor médio, valor -1 como valor mínimo e +1 como valor máximo. A amplitude de variação ao redor do valor médio será determinada pela relação entre a tensão de entrada e de saída desejadas.

A tensão eficaz na saída será:

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

As correntes são determinadas em função da tensão eficaz na carga.

A ondulação (*ripple*) de corrente no indutor é um parâmetro de projeto, sendo dada por um percentual da corrente de saída. Assim:

$$\Delta i = \% \cdot I_o [A]$$

Por sua vez, a ondulação (*ripple*) de tensão na saída também é determinada pelo projetista, como sendo um percentual da tensão de saída. Portanto:

$$\Delta v = \% \cdot V_o [V]$$

Finalmente, o indutor e o capacitor, para modulação três níveis, podem ser calculados por:

$$L_o = \frac{V_i}{2 \cdot \Delta i \cdot F_s} \cdot D \cdot (1 - D)$$

$$C_o = \frac{V_i}{4 \cdot \pi^3 \cdot \Delta v \cdot L_o \cdot F_s^2}$$

As tensões máximas sobre o interruptor e sobre o diodo são:

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

## 4 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

**ER 01.** Cite dois conversores cc-ca?

Conversor meia ponte e conversor ponte completa.

**ER 02.** Calcule a tensão de saída de um conversor meia ponte onda quadrada que está operando com razão cíclica de 50% e tensão de entrada de 50 V em cada fonte de alimentação.

Neste caso, a tensão de entrada total será o dobro da tensão em cada fonte:

$$V_i = 2 \cdot V_a = 2 \cdot V_b = 2 \cdot 50 = 100V$$

$$V_o = \frac{V_i}{2} \cdot (2 \cdot D - 1) = \frac{100}{2} \cdot (2 \cdot 0,5 - 1) = 0$$

**ER 03.** Calcule a tensão de pico de saída de um conversor ponte completa PWM senoidal que está operando com razão cíclica de 30% e tensão de entrada de 400 V.

A tensão de pico de saída será:

$$V_o = V_i \cdot D = 400 \cdot 0,3 = 120V$$

**ER 04.** Calcule a tensão eficaz na saída de um conversor ponte completa PWM senoidal que está operando com razão cíclica de 50% e tensão de entrada de 100 V.

A tensão de pico na saída será:

$$V_o = V_i \cdot D = 100 \cdot 0,5 = 50V$$

A tensão eficaz será:

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{50}{\sqrt{2}} = 35,4V$$

**ER 05.** Qual a diferença entre um inversor onda quadrada e um inversor PWM senoidal em termos

de tensão de saída.

O inversor onda quadrada disponibiliza na saída uma tensão com formato quadrado, enquanto um inversor PWM senoidal entrega na saída uma tensão senoidal.

## Exercícios Propostos

**EP 01.** Explique a diferença entre a modulação PWM de um conversor cc-cc e um conversor cc-ca.

**EP 02.** Calcule a tensão de saída de um conversor meia ponte onda quadrada que está operando com razão cíclica de 30% e tensão de entrada de 10 V em cada fonte de alimentação.

**EP 03.** Calcule a tensão de pico de saída de um conversor ponte completa PWM senoidal que está operando com razão cíclica de 70% e tensão de entrada de 400 V.

**EP 04.** Calcule a tensão eficaz na saída de um conversor ponte completa PWM senoidal que está operando com razão cíclica de 90% e tensão de entrada de 400 V.

**EP 05.** Explique com suas palavras o que é índice de modulação.

## 5 Atividade Avaliativa

### 5.1 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 significa modulação PWM senoidal?

**AA 02.** Cite uma vantagem de um inversor onda quadrada em relação a um inversor PWM senoidal.

**AA 03.** Calcule a tensão de pico na saída de um conversor meia ponte PWM senoidal que está operando com razão cíclica de 80% e tensão de entrada de 150 V em cada fonte de alimentação.

**AA 04.** Calcule a tensão eficaz na saída de um conversor ponte completa PWM senoidal que está operando com razão cíclica de 90% e tensão de entrada de 300 V.

**AA 05.** Como pode ser alterada a frequência da fundamental da tensão de saída na modulação PWM senoidal.

AA 01. Modulação PWM senoidal significa que a razão cíclica aplicada aos interruptores do conversor irá variar

senoidalmente, para que a tensão de saída do inversor seja senoidal.

AA 02. Uma vantagem do inversor onda quadrada é que os interruptores podem ser lentos, pois comutam na

frequência fundamental da tensão de saída, que em geral é baixa, da ordem de 60 Hz.

$$\text{AA 03. A tensão de pico na saída será } V_o = \frac{V_i}{2} (2D - 1) = \frac{300}{2} (2 \times 0,8 - 1) = 90 \text{ V.}$$

$$\text{AA 04. A tensão eficaz na saída será } V_o = \frac{V_o(pk)}{\sqrt{2}} = \frac{V_i x D}{\sqrt{2}} = \frac{300 \times 0,9}{\sqrt{2}} = 191 \text{ V.}$$

AA 05. Na modulação PWM senoidal se altera a frequência da fundamental da tensão de saída alterando a

frequência da tensão modulante.



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.

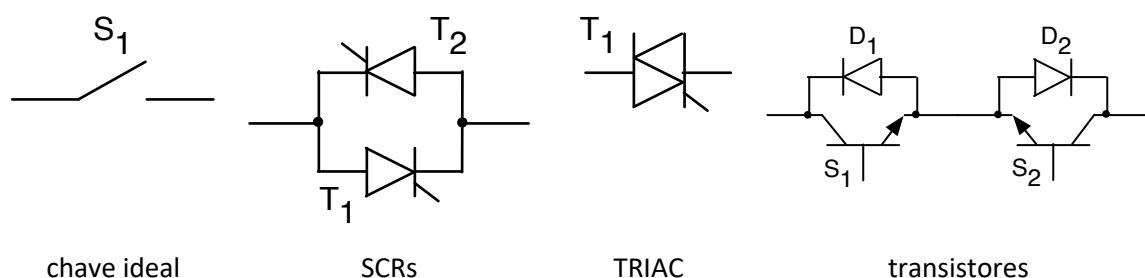


Figura 1 – Interruptores para conversores ca-ca.

### 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.

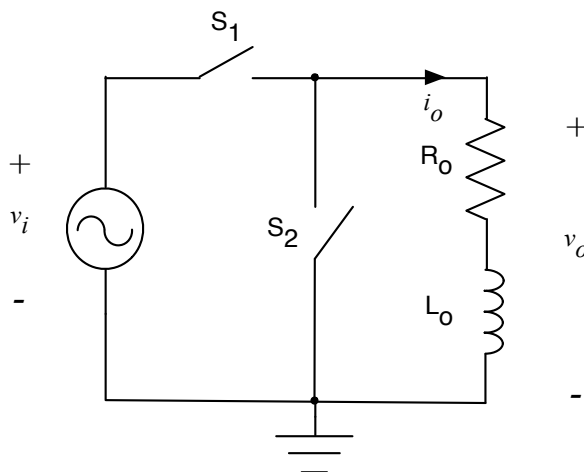


Figura 2 – Circuito exemplo para estudo da comutação de um conversor ca-ca.

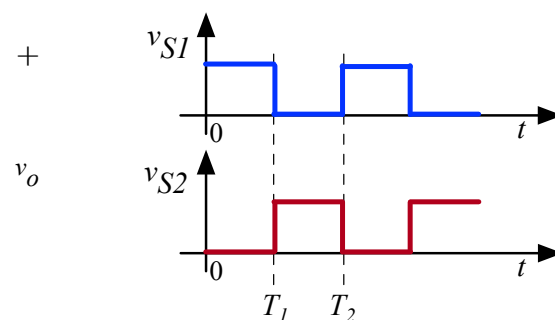


Figura 3 – Sinais de comando dos interruptores.

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.

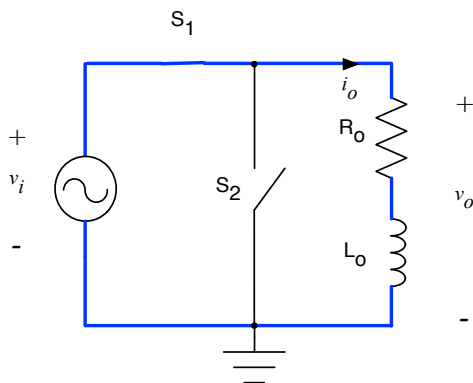


Figura 4 – Circuito exemplo com o interruptor  $S_1$  conduzindo.

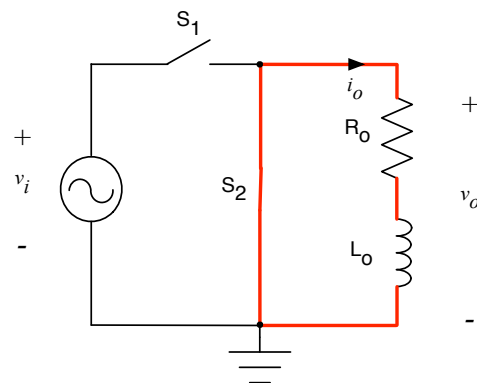


Figura 5 – Circuito exemplo com o interruptor  $S_2$  conduzindo.

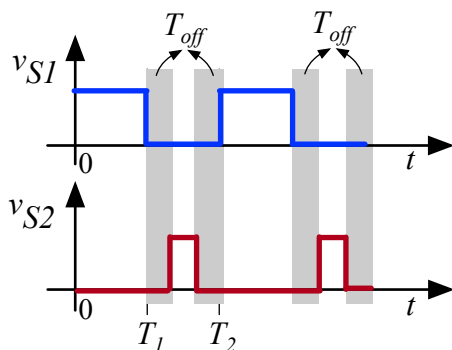


Figura 6 – Sinais de comando dos interruptores com tempo morto.

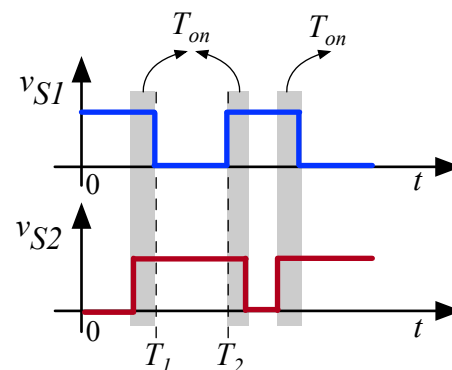


Figura 7 – Sinais de comando dos interruptores com sobreposição de tempos.

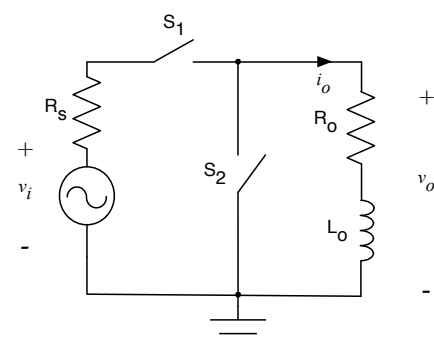
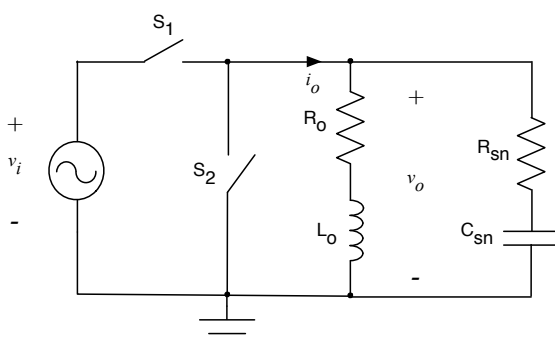


Figura 8 – Circuitos com limitação da corrente de curto-circuito e sobretensão nos interruptores.

## 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.

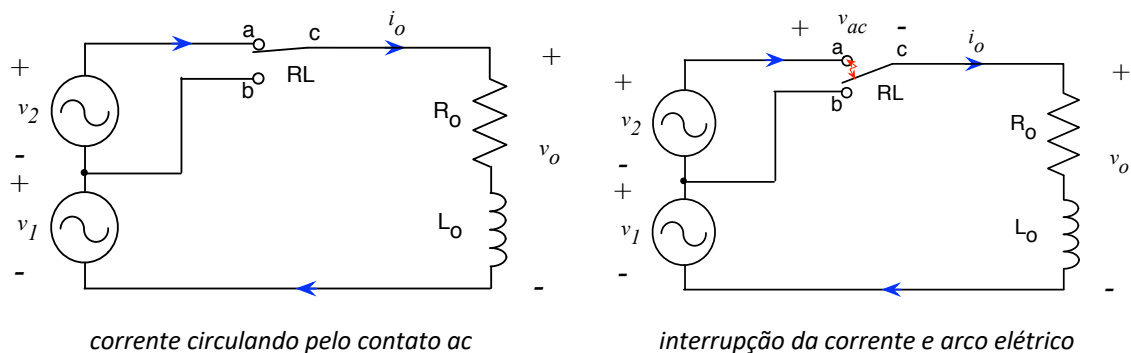


Figura 9 – Comutação de conversor ca-ca com relés.

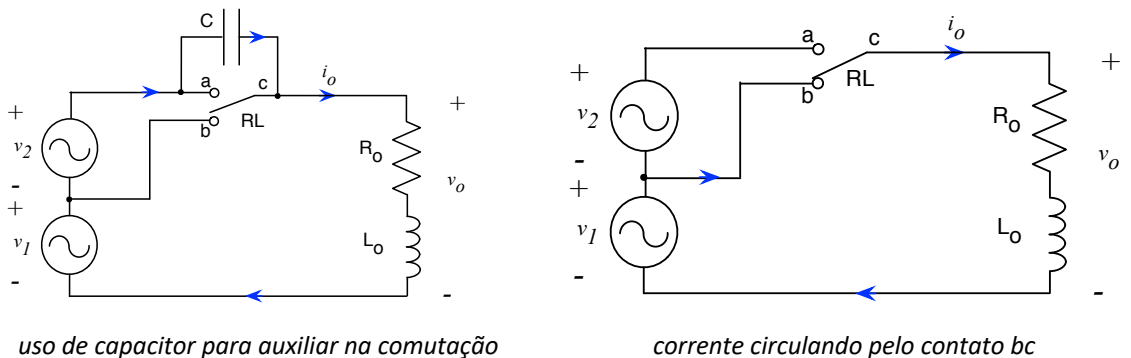


Figura 10 – Comutação de conversor ca-ca com relés.

## 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.

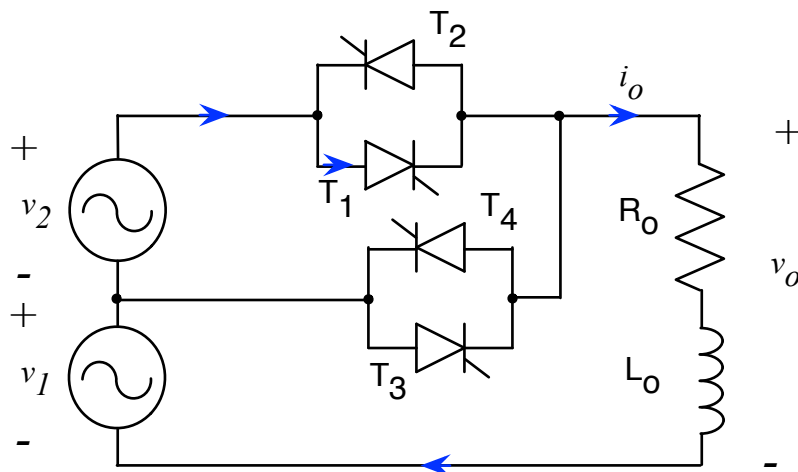
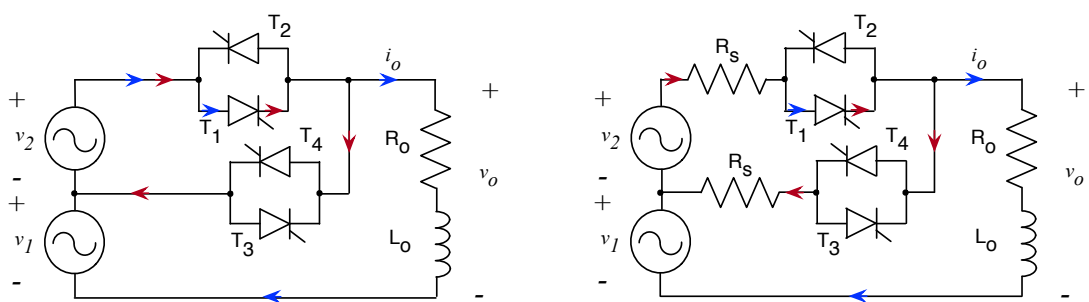


Figura 11 – Comutação de conversor ca-ca com tiristores.



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.

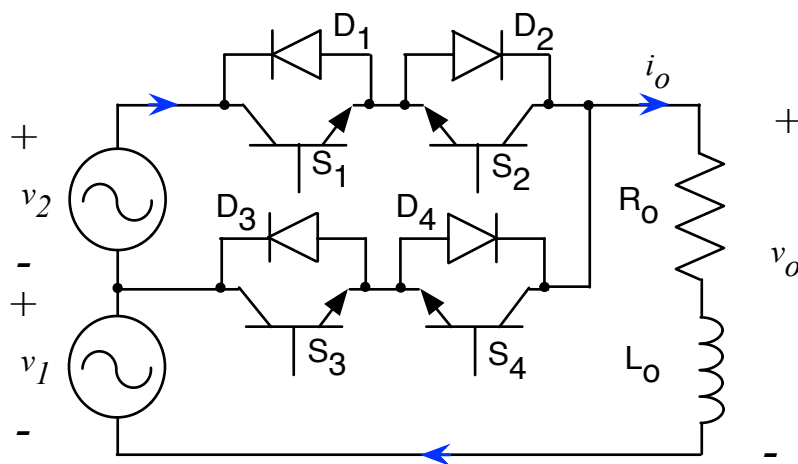


Figura 13 – Comutação de conversor ca-ca com transistores.

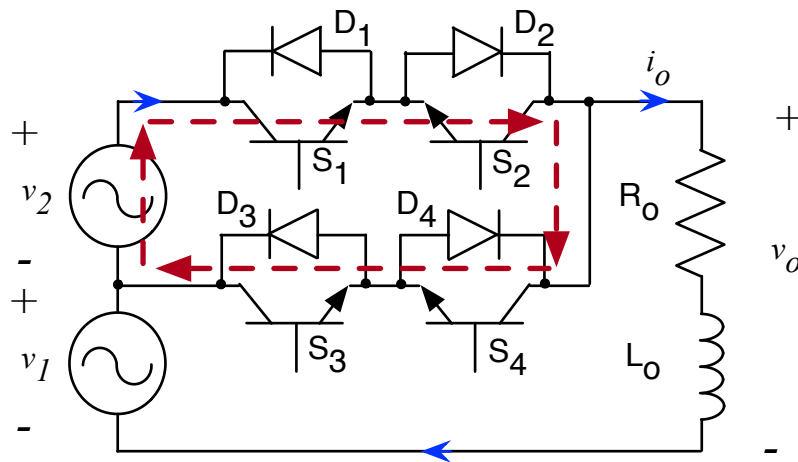


Figura 14 – Problema da comutação de conversor ca-ca com transistores.

## 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° 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.

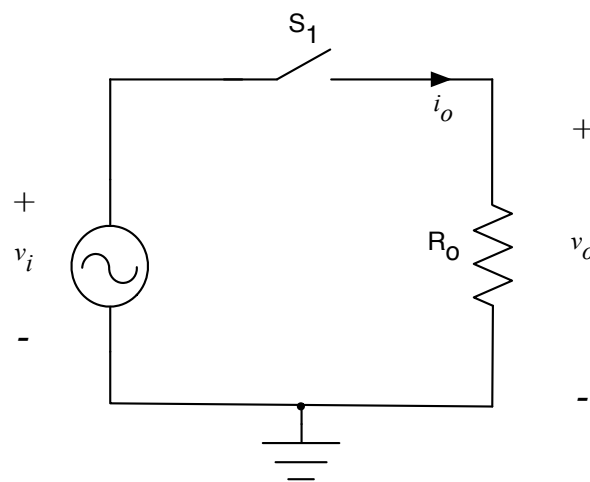


Figura 15 – Conversor ca-ca simples.

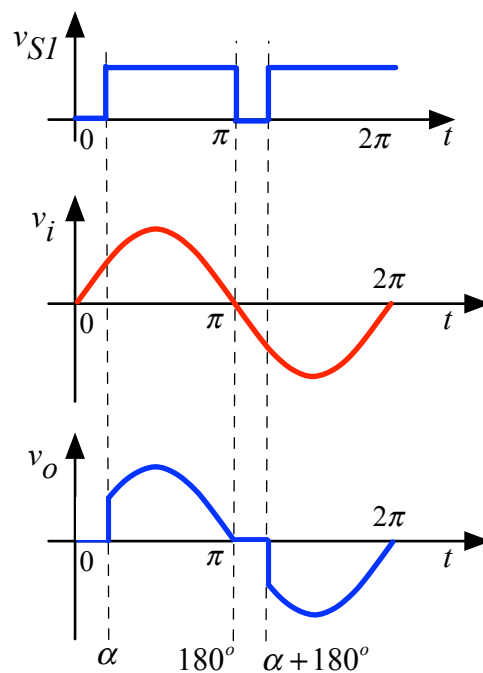


Figura 16 – Formas de onda do conversor ca-ca simples operando com controle por ângulo de fase.

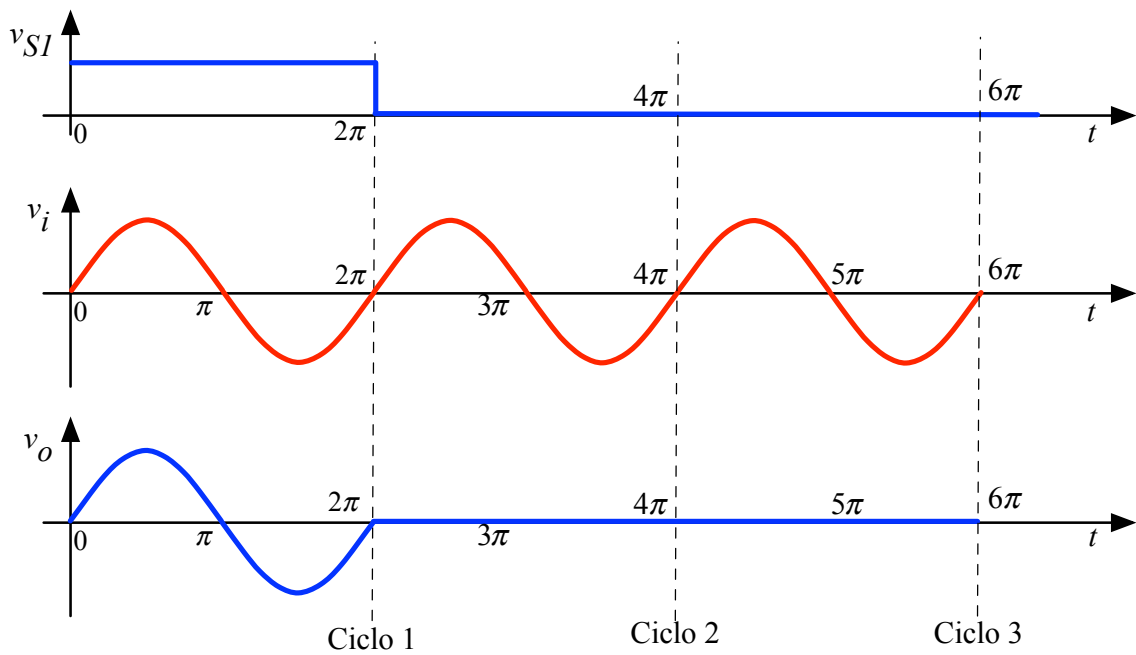


Figura 17 – Formas de onda do conversor ca-ca simples operando com controle por ciclos inteiros.

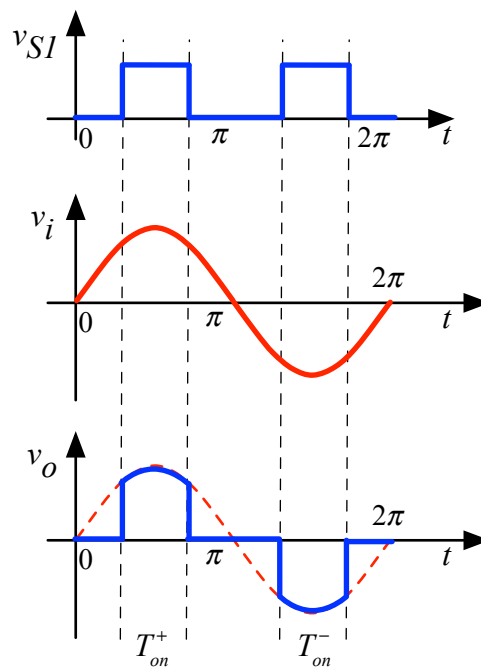


Figura 18 – Formas de onda do conversor ca-ca simples operando com controle por modulação por largura de pulsos (PWM).

## 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.

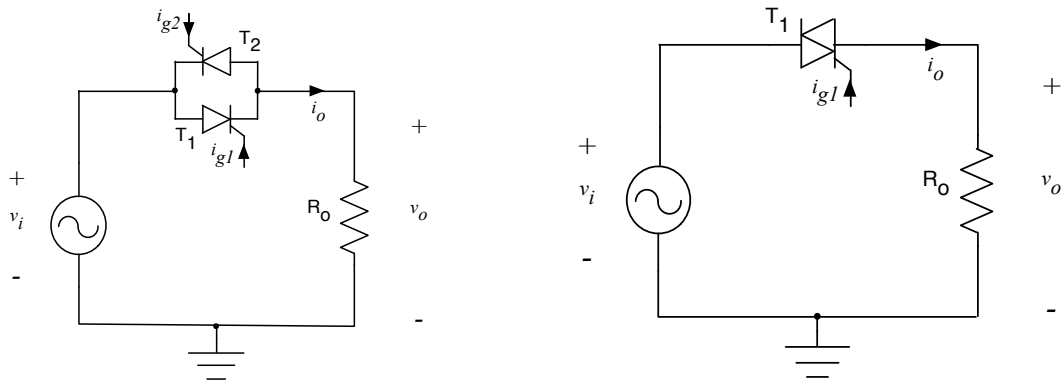


Figura 19 – Conversor ca-ca com tiristores e controle por ângulo de fase.

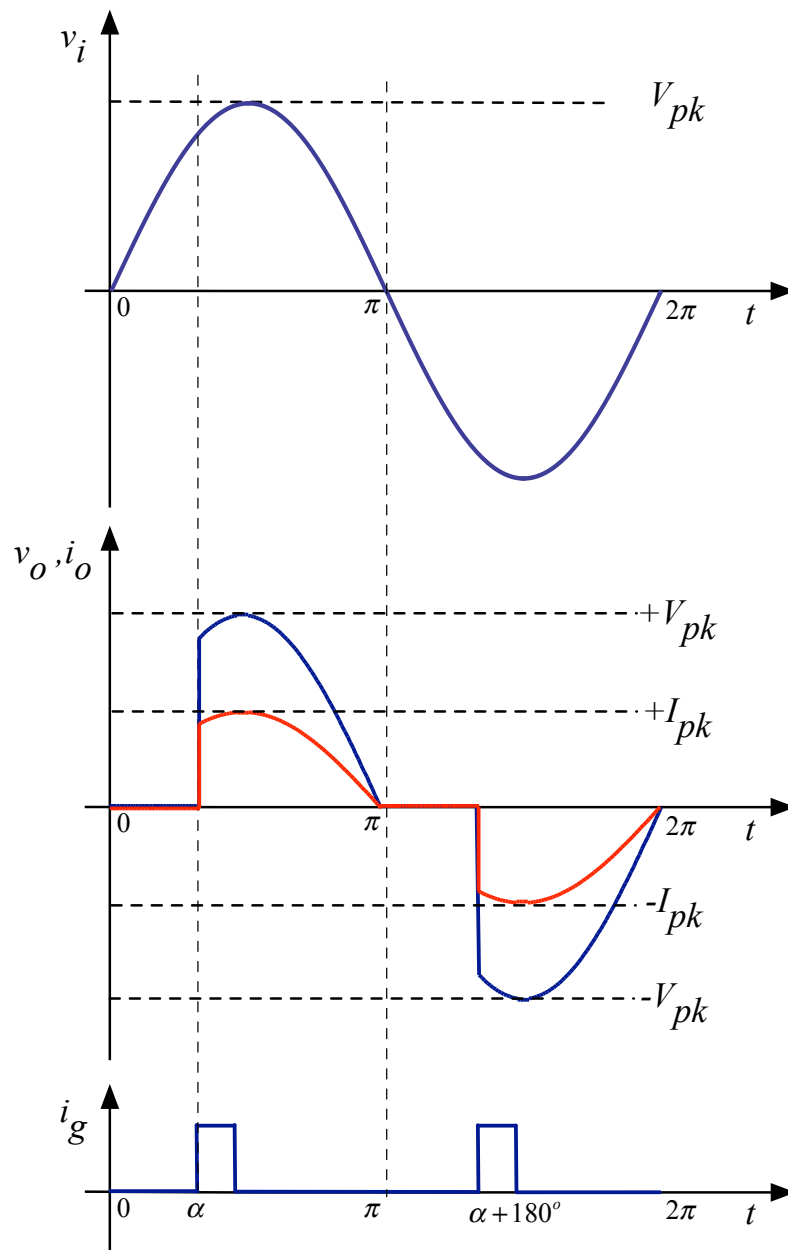


Figura 20 – Principais formas de onda do conversor ca-ca com tiristores e controle por ângulo de fase.

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:

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

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

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

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:

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

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.

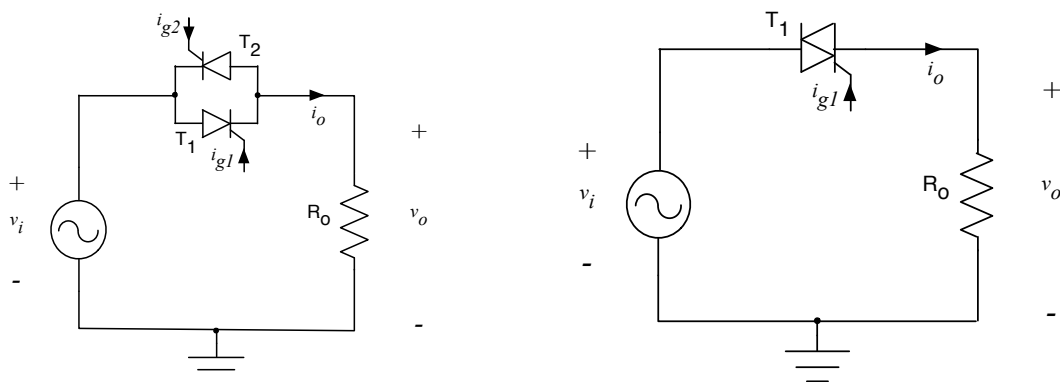


Figura 21 – Conversor ca-ca com tiristores e controle por ciclos inteiros.

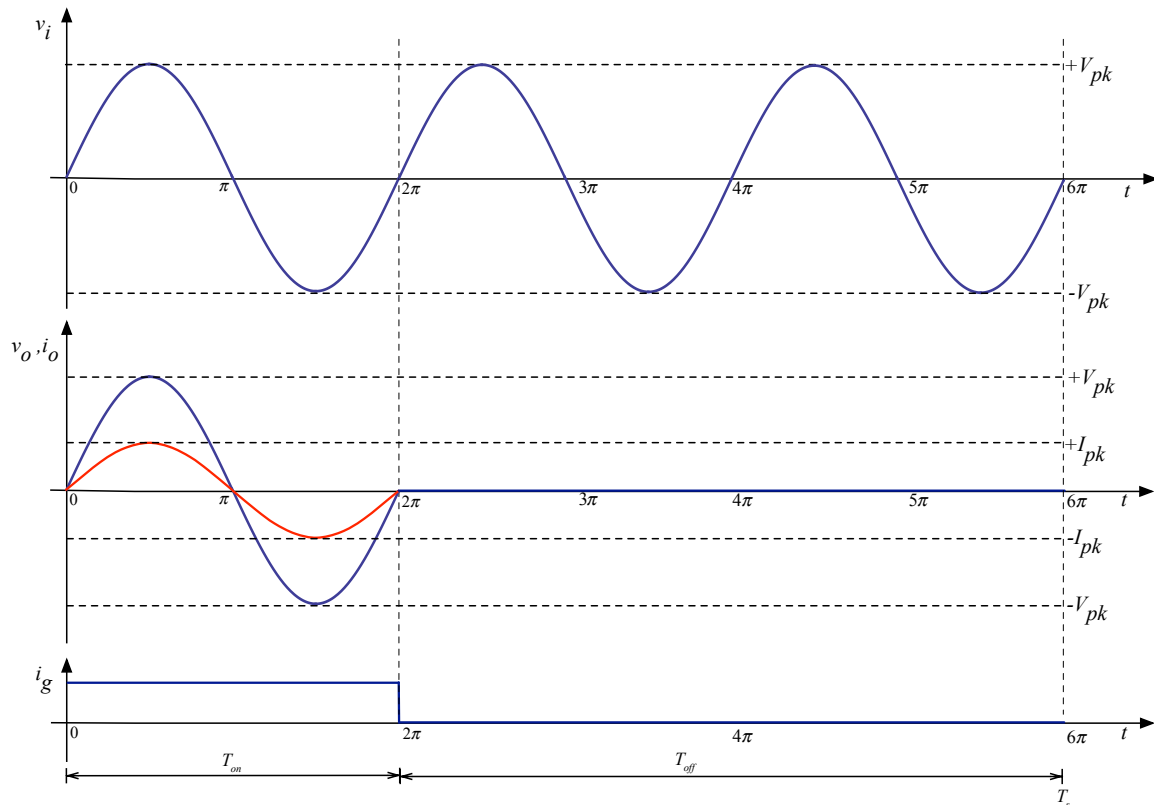


Figura 22 – Principais formas de onda do conversor ca-ca com tiristores e controle por ciclos inteiros.

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:

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

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

$\phi \rightarrow$  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.

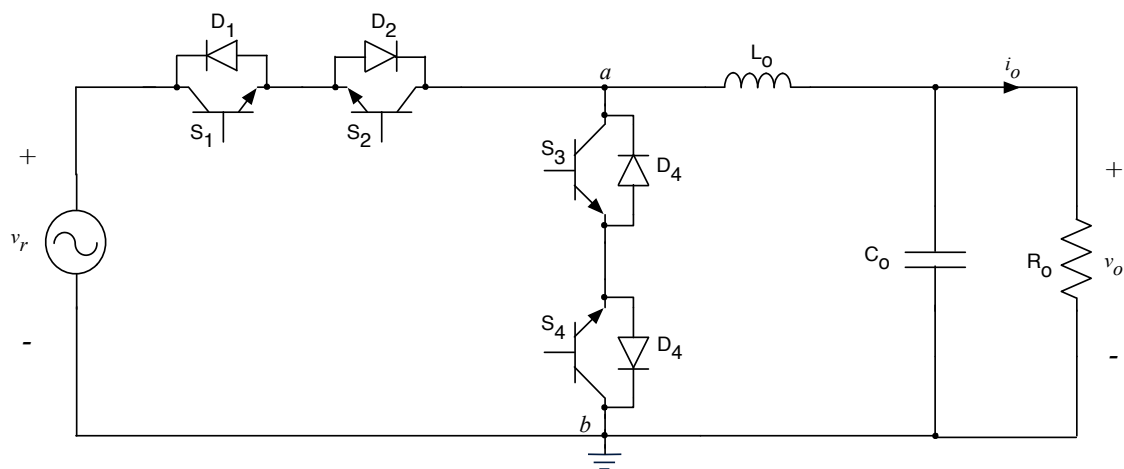


Figura 23 – Conversor ca-ca com transistores e modulação PWM.

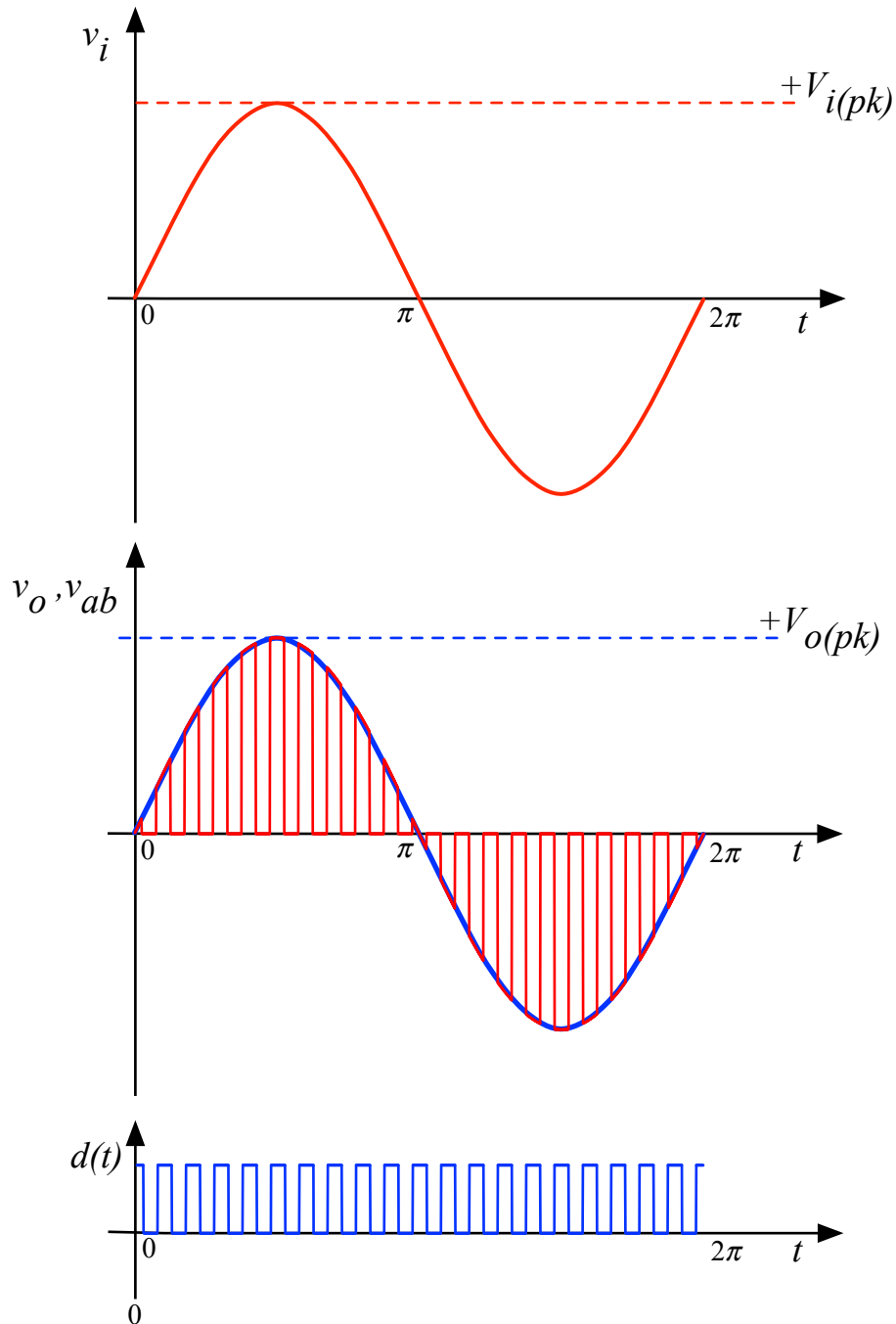


Figura 24 – Principais formas de onda do conversor ca-ca com transistores e modulação PWM.

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.

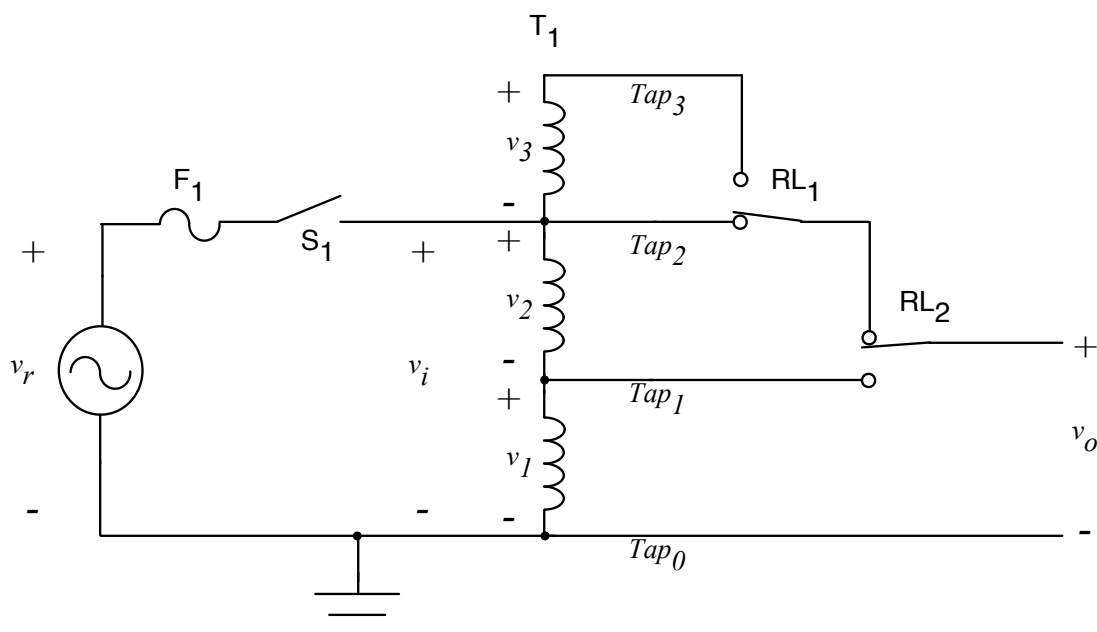


Figura 26 – Estabilizador de tensão alternada com relés.

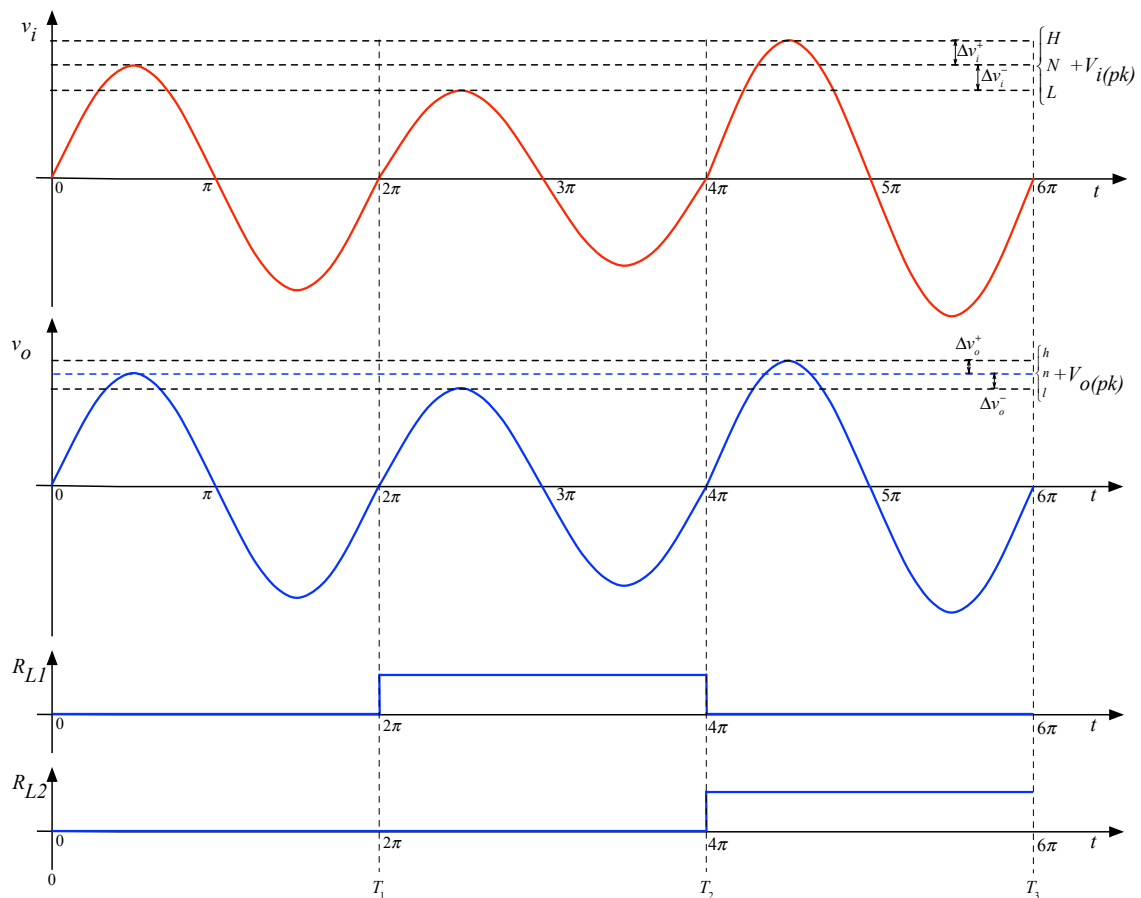


Figura 27 – Principais formas de onda do estabilizador de tensão com relés.

### 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 alterada 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.

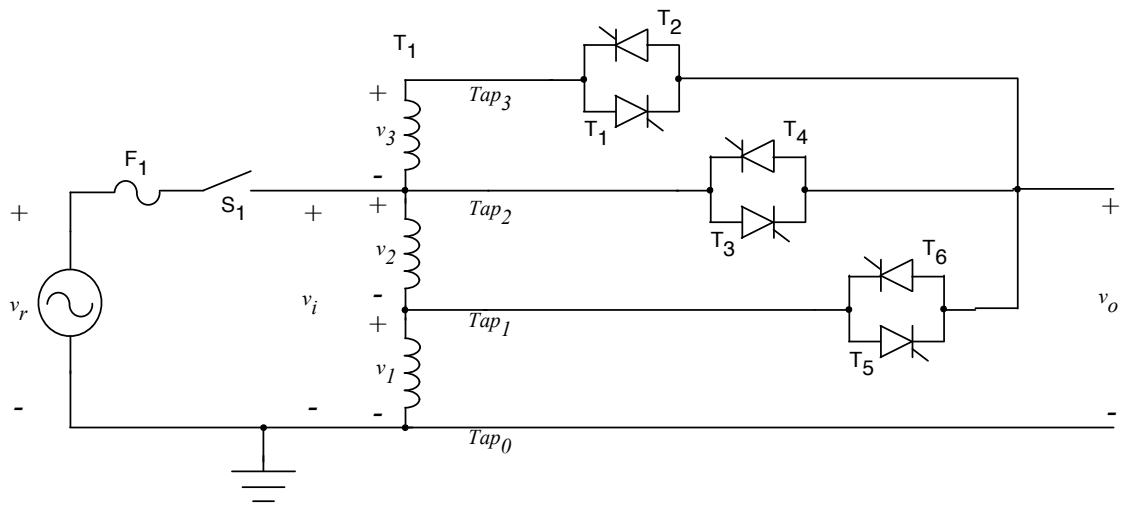


Figura 28 – Estabilizador de tensão alternada com tiristores.

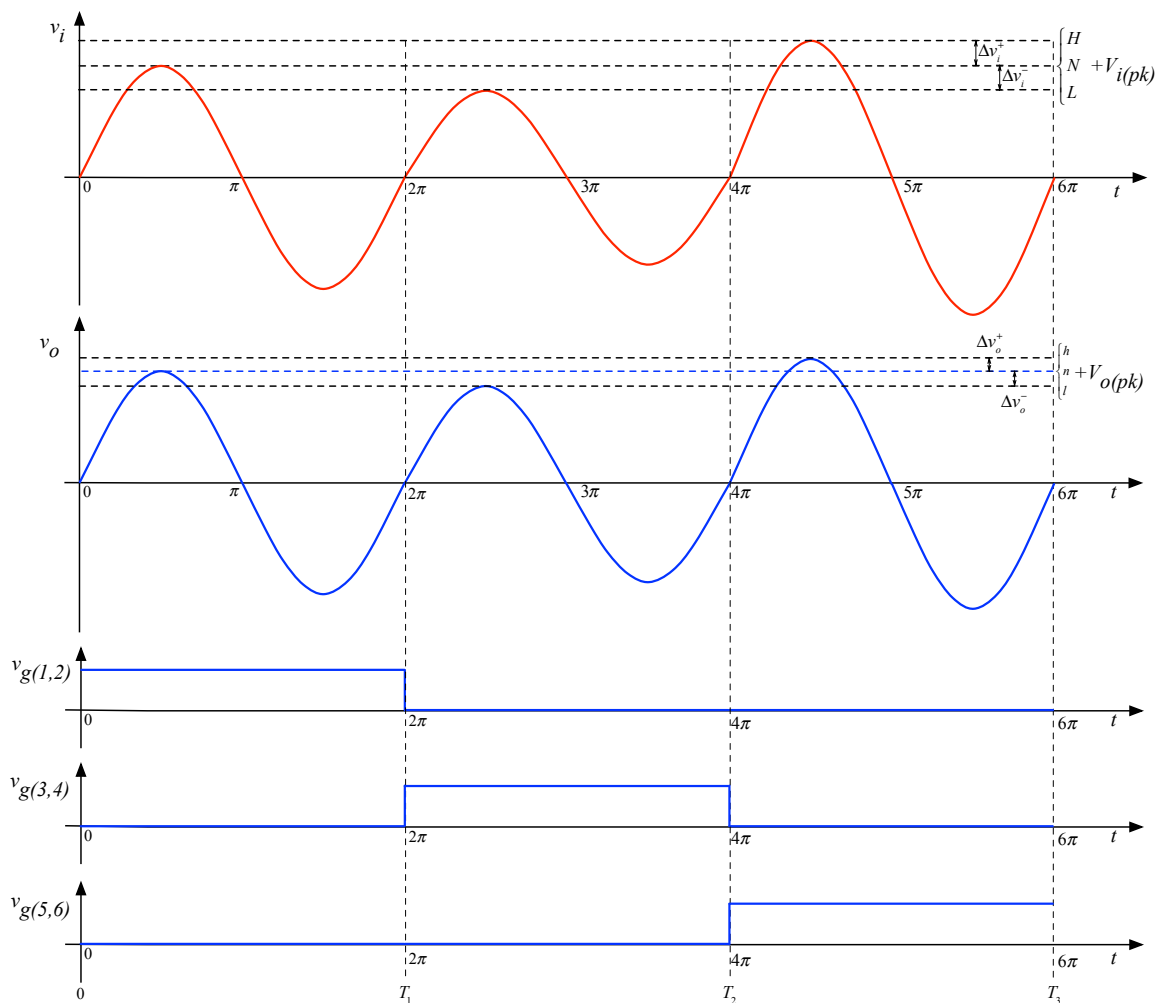


Figura 29 – Principais formas de onda do estabilizador de tensão com tiristores.

## 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 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.

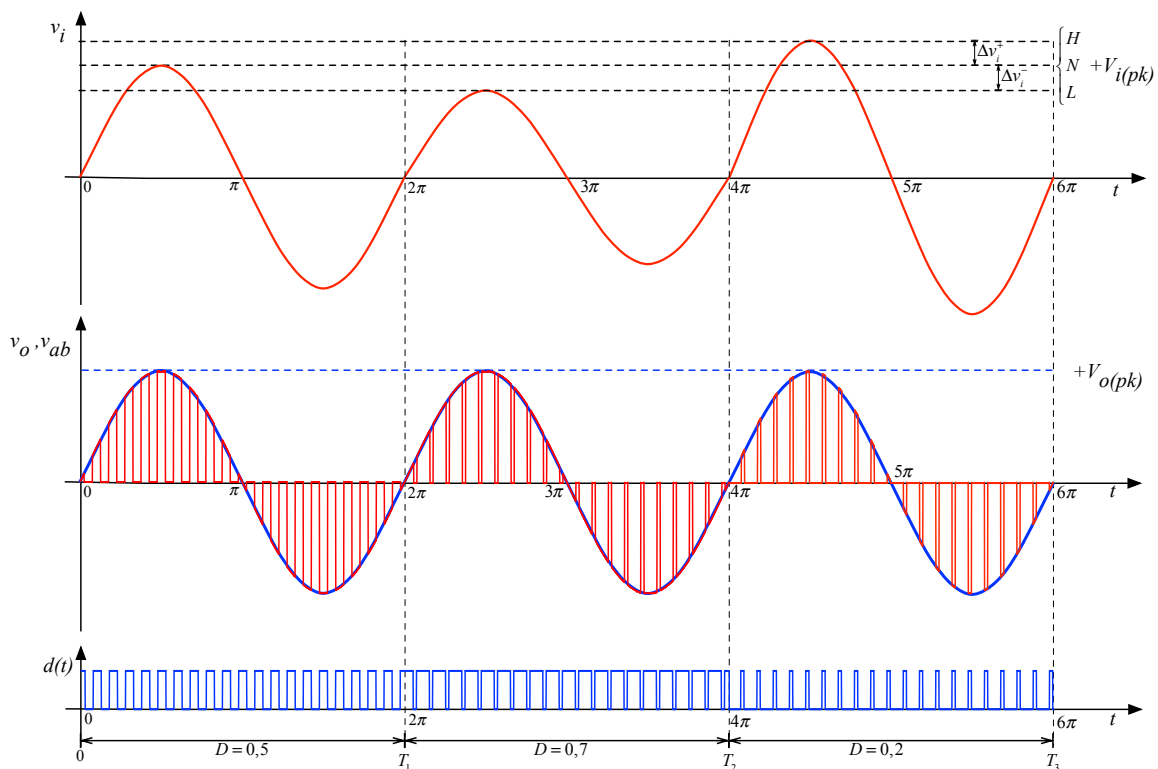


Figura 30 – Principais formas de onda do estabilizador de tensão com transistores.

## 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  $V_o = V_i \times \text{razão} \left(\frac{M}{m}\right) = 220 \times \text{razão} \left(\frac{5}{5}\right) = 220 \text{ V}$ . 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.

---

# **GUIA DE ESTUDO**

---

**- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -**  
**PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS**

---

## **PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS**

### **Objetivo de Aprendizagem**

Realizar o projeto de indutores para operação em alta frequência.

### **Objetivos parciais**

- Conhecer os princípios do eletromagnetismo;
- Conhecer núcleos para elementos magnéticos;
- Realizar cálculos relacionados com eletromagnetismo;
- Projetar indutores em alta frequência.

### **Capítulos e aulas relacionadas**

Este objetivo de aprendizagem está relacionado ao capítulo 15 da apostila e com a aula 15 disciplina.

### **Pré-requisitos**

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 06 – Conversores ca-ca.

### **Continuidade dos Estudos**

O próximo objetivo de aprendizagem será continuar o estudo dos conteúdos transversais, como 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 (apresentação 15);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulo 15).

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 - PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS

## 1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conteúdos transversais do curso, isto é, aqueles conteúdos que são aplicados a todos os grupos de conversores estudados, sejam ca-cc, cc-cc, cc-ca ou ca-ca. Assim, o objetivo aqui será realizar uma revisão das principais grandezas do eletromagnetismo e apresentar a metodologia de projeto de indutores para operação em alta frequência.

### 1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Revisão de eletromagnetismo;
- Aspectos do projeto de elementos magnéticos;
- Projeto de indutores para operação em alta frequência.

### 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:

- Descrever com suas palavras as principais grandezas do eletromagnetismo;
- Entender os principais aspectos relacionados com o projeto de elementos magnéticos;
- Saber projetar um indutor para operação em alta frequência.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em solicitar que o estudante realize o projeto de um indutor para operação em alta frequência, a partir dos dados de projeto apresentados.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar a curva  $B \times H$  de um material magnético;
2. Citar aspectos relacionados com o projeto de elementos magnéticos;
3. Dimensionar os elementos de um indutor;
4. Avaliar os resultados do projeto de elementos magnéticos.

## 2 Eletromagnetismo

### 2.1 Introdução

O projeto de elementos magnéticos, sejam indutores ou transformadores, para uso em eletrônica de potência, envolve o conhecimento das principais grandezas do eletromagnetismo e das características dos materiais magnéticos.

Assim, neste capítulo será realizada uma breve revisão sobre as principais grandezas do eletromagnetismo e dos principais aspectos relacionados ao projeto de elementos magnéticos.

### 2.2 Magnetismo Atômico

Os menores elementos magnéticos, do ponto de vista do projeto de indutores e transformadores ou fenômenos mais usuais em eletrônica de potência, são os dipolos magnéticos. Em menor escala, um elétron se apresenta como um dipolo magnético, ou seja, apresenta um polo norte e um polo sul, conforme mostrado na Figura 1.

O próximo nível é o magnetismo atômico, ou seja, a nível de um átomo, que conforme a quantidade de cargas na camada de valência, especialmente, poderá apresentar ou não um momento magnético, isto é, ter um pequeno campo magnético resultante dos dipolos magnéticos de cada elétron que forma o átomo, conforme mostrado na Figura 2.

Finalmente, já a nível de construção de núcleos magnéticos utilizados na implementação de indutores e transformadores se tem os domínios magnéticos, que são pequenas regiões do material, que podem ter orientação preferencial ou não, conforme mostra a Figura 3.

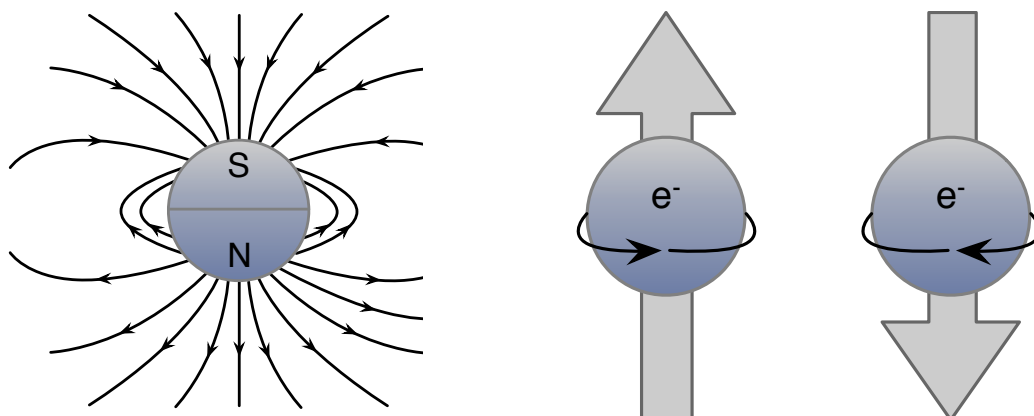


Figura 1 – Dipolos magnéticos.

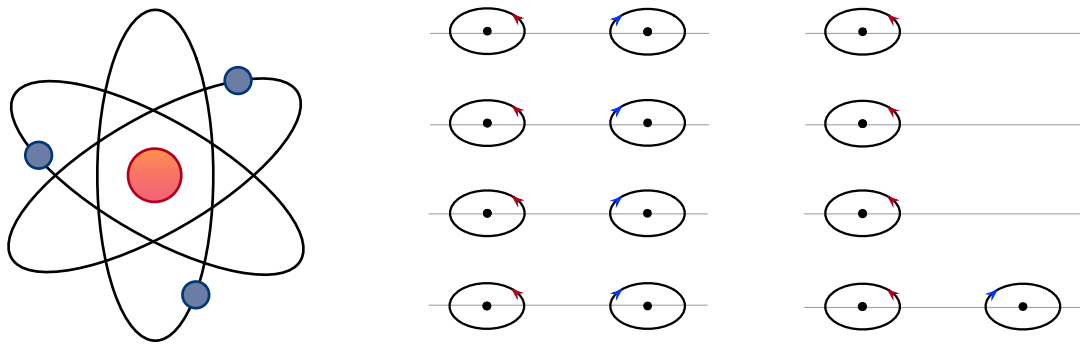


Figura 2 – Magnetismo em um átomo.

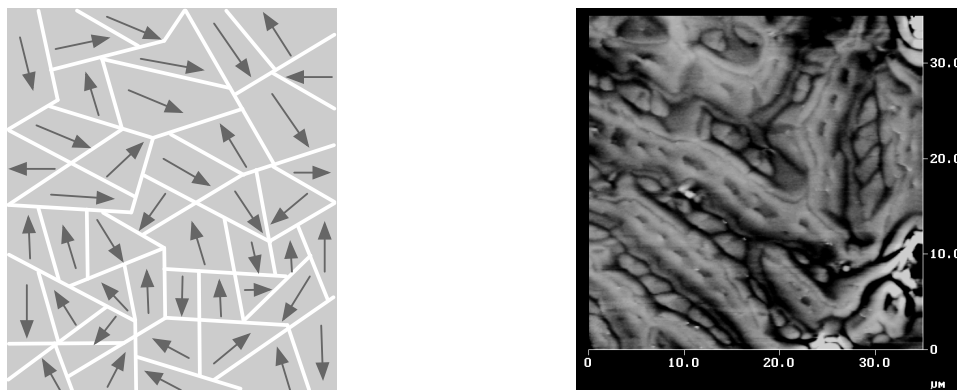


Figura 3 – Domínios magnéticos de um material.

Fonte: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx> e [www.geociencias.unam.mx](http://www.geociencias.unam.mx). Acesso em: 28/09/2014.

Os domínios magnéticos são os elementos que constituem o núcleo de um indutor ou transformador, os quais devem ser orientados conforme a direção das linhas de campo magnético, para que em conjunto formem um campo magnético mais intenso ou não. Um ímã é um elemento físico no qual os domínios estão orientados em uma mesma direção, formando assim um campo magnético intenso; por isso se fala que um ímã é um elemento magnetizado. Por outro lado, um material desmagnetizado tem os domínios orientados aleatoriamente, ou seja, sem uma direção preferencial, fazendo com o que o campo magnético resultante seja nulo.

## 2.3 Campo Magnético

O campo magnético é uma região do espaço onde se tem a presença de fenômenos magnéticos, especificamente linhas de campo, conforme mostrado na Figura 4. O campo pode ser uniforme, conforme as linhas de campo estiverem distribuídas com mesma intensidade e direção, ou não-uniforme, se as linhas de campo estiverem concentradas ou espalhadas, fazendo variar sua intensidade e direção ao longo do espaço.

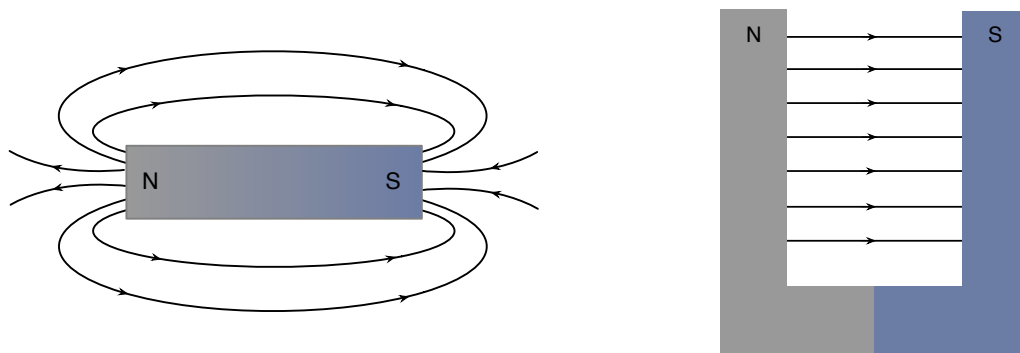


Figura 4 – Campo magnético.

Fonte: (Ramalho, 2006).

Em síntese, o objetivo do núcleo em um elemento magnético é promover a concentração das linhas de campo, fazendo com que as mesmas se limitem ao volume ocupado pelo núcleo.

O campo magnético pode ser originado pela corrente elétrica circulando por um condutor retilíneo, em forma de espira (volta) ou bobina. A diferença é que o campo magnético criado por um pedaço pequeno de condutor, com um delta de comprimento, será pequeno, enquanto que, na medida que se aumentar o comprimento do condutor (somação de vários deltas de comprimento, isto é, somação de pequenos pedaços de comprimento de condutor) se aumentará o campo resultante. Do mesmo modo, se o condutor for enrolado na forma de uma espira (volta), o campo no interior da espira será somado, ou seja, os vetores de campo magnético se somam na parte central da espira, resultando em um campo com maior intensidade e dependente da geometria da espira. Por fim, se for construída uma bobina (ou enrolamento) com diversas espiras, o efeito será novamente de soma, ou seja, o campo resultante será mais intenso conforme se aumentar o número de espiras do indutor construído.

## 2.4 Densidade de Fluxo Magnético e Fluxo Magnético

A densidade de fluxo ( $B$ ) é número de linhas de campo por unidade de área. Sua unidade é Tesla [T], onde um Tesla é igual a 1 Weber por metro quadrado de área.

Por sua vez, o fluxo magnético ( $\phi$ ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma área. Tem como unidade o weber [Wb], sendo que 1 Weber corresponde a  $1 \times 10^8$  linhas de campo. O fluxo magnético ( $\phi$ ) em um área ( $A$ ) corresponde a densidade de fluxo magnético ( $B$ ), conforme mostrado na Figura 5.

A densidade de fluxo magnético é obtida por:

$$B = \frac{\phi}{A} \left[ T = \frac{Wb}{m^2} \right]$$

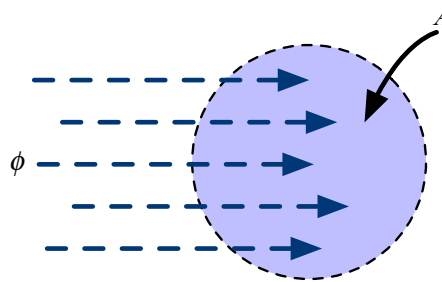


Figura 5 – Fluxo magnético ( $\phi$ ) em uma área A.

Fonte: Adaptado de (Boylestad, 2004).

## 2.5 Força Magnetizante

A reação do material ao campo magnético é denominada de força magnetizante (H), sendo dependente da corrente elétrica, do número de espiras e da geometria do elemento magnético. A Figura 6 mostra diferentes curvas, para diversos diferentes tipos de materiais, onde se observa que a inclinação da curva é altamente dependente do material, significando que se consegue diferentes intensidades de campo magnético (B), para a mesma força magnética (H).

A força magnetizante é calculada por:

$$H = (I, N, l) [A / m]$$

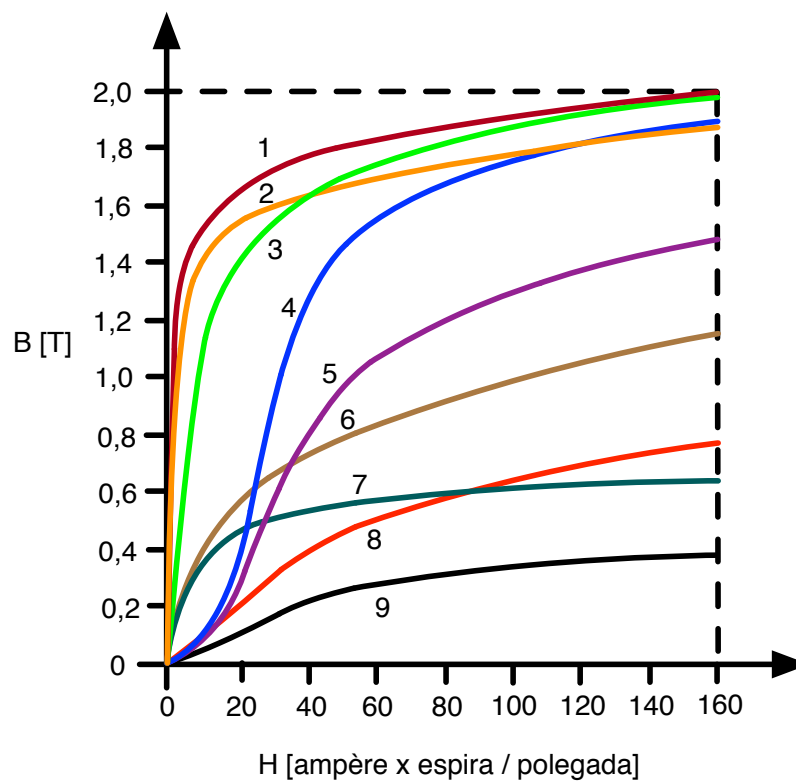


Figura 6 – Curva B x H para diferentes materiais (1 – chapa de aço, 2 – aço silício, 3 – aço fundido, 4 – aço tungstênio, 5 – aço magnético, 6 – ferro fundido, 7 – níquel, 8 – cobalto, 9 – magnetita).

Fonte: Adaptado de (Wikipédia, 2014).

A inclinação da curva pode ser alterada e ajustada usando-se diferentes materiais para construir o núcleo magnético ou então inserindo-se elementos diferentes no caminho magnético, alterando assim a relutância magnética. Deste modo, quando for realizado o projeto do elemento magnético, será calculado o entreferro, que é uma distância entre dois elementos ferromagnéticos (núcleo) onde se coloca material sem propriedades magnéticas, como por exemplo papel, plástico, fenolite, etc.

Ao observar as curvas da Figura 6 nota-se que para forças magnéticas de grande amplitude, a curva de resposta do material muda de inclinação, entrando em uma região onde se aumenta a força (H) e o campo (B) não aumenta mais; neste caso, o material magnético saturou, ou seja, todos os domínios magnéticos foram orientados. Em termos práticos, se for um indutor, por exemplo, se ocorrer a saturação significa dizer que a indutância tenderá a zero, então o indutor não apresentará mais reatância indutiva, mas apenas a resistência ôhmica do fio utilizado para enrolar as espiras do mesmo. Se este indutor estiver sendo utilizado em um conversor cc-cc, então a corrente elétrica irá aumentar, pois nestes conversores, a taxa de crescimento (derivada) da corrente elétrica é dada pela relação entre a tensão sobre indutor pela indutância ( $i = V / L$ ); implicando que se a indutância tende a zero, a corrente tenderá a infinito.

## 2.6 Permeabilidade Magnética

A relação entre a densidade de campo magnético (B) e a força magnética (H) é denominada de permeabilidade magnética. A classificação dos materiais é realizada conforme sua permeabilidade magnética, ou seja, seu comportamento quando imerso em um campo magnético, concentrando ou não as linhas de campo.

A permeabilidade magnética é dada por:

$$\mu = \frac{B}{H} \left[ \frac{Wb}{A/m} \right]$$

Os materiais são classificados em relação a permeabilidade do vácuo, como sendo:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o$$

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A/m}$$

A permeabilidade dos materiais pode variar muito, como está mostrado na Tabela 1, onde o uso de materiais com maior permeabilidade relativa implica em menor volume e peso, pois se obterá a mesma indutância com um número de espiras muito menor. A grosso modo, comparando ar com ferrite, pode-se estimar que seriam necessárias 2.000 espiras para obter a mesma

indutância caso se utilize como núcleo o ar, ao invés do ferrite. Em contrate, os materiais elaborados a partir das terras raras, tem permeabilidades muito altas, como o permalloy, por exemplo.

Tabela 1 - Permeabilidade relativa de alguns materiais.

Material	Permeabilidade relativa ( $\mu_r$ )
Ar	1
Papel, plástico, fenolite	1
Ferrite	2.000
Ferro comercial	9.000
Ferro silício	55.000
Permalloy	1.000.000
Super permalloy	10.000.000

O comportamento da curva  $B \times H$  de um material é mostrado na Figura 7. Esta curva é conhecida como curva de histerese, pois mostra que a curva de magnetização e desmagnetização do material são diferentes. Isso ocorre porque ao diminuir a corrente elétrica (força magnética  $H$ ), os domínios devem ficar desorientados, ou seja, orientados de maneira aleatória; no entanto, alguns domínios permanecem orientados, fazendo com que mesmo com corrente zero (força  $H$  nula), o campo ( $B$ ) resultante não seja zero, denotando a presença de magnetismo residual ou remanescente. Assim, a curva  $B \times H$  forma um laço, chamado de laço de histerese, e representa a energia necessária para orientar e desorientar os domínios magnéticos.

Em comparação com a curva da Figura 7, o ar tem a curva na forma de reta, sem apresentar o efeito de saturação e de magnetismo residual.

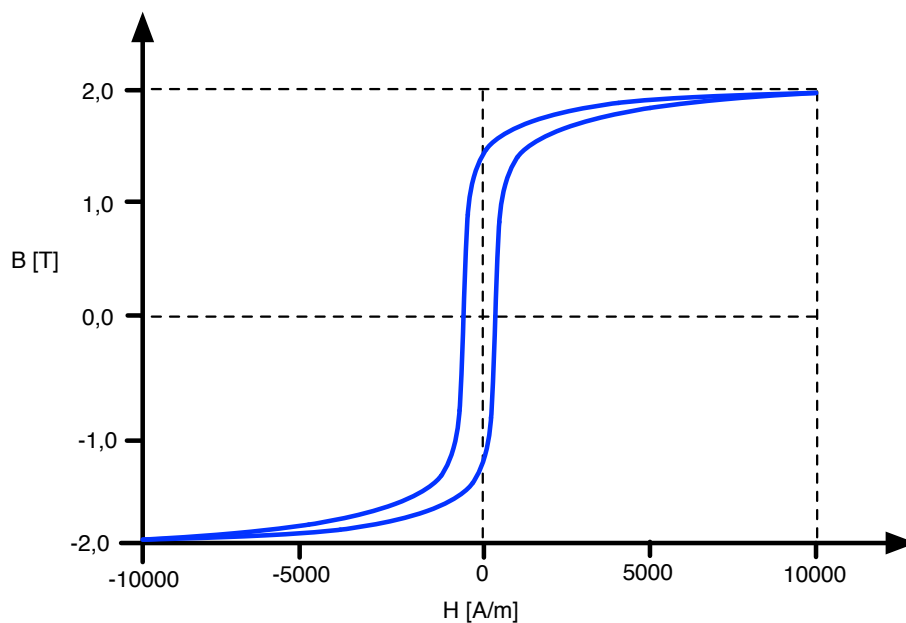


Figura 7 – Curva  $B \times H$  (histerese) de um material magnético.

Fonte: Adaptado de (Boylestad, 2004).

A Figura 8 apresenta a curva B x H de materiais magnéticos utilizados para implementação de indutores e transformadores de alta frequência. Nota-se na figura que a curva é alterada pela temperatura do material, devendo-se evitar temperaturas acima de 140 °C, pois a permeabilidade é alterada significativamente e logo acima de 160 °C se tem a temperatura de Curie, onde a permeabilidade tende a zero, ou seja, o material perde suas propriedades magnéticas.

A partir da Figura 8, costuma-se utilizar para projeto a curva para temperatura de 80 °C, colocando-se o ponto de operação na região abaixo de 4 Oe de força magnetizante, para evitar a saturação do elemento magnético.

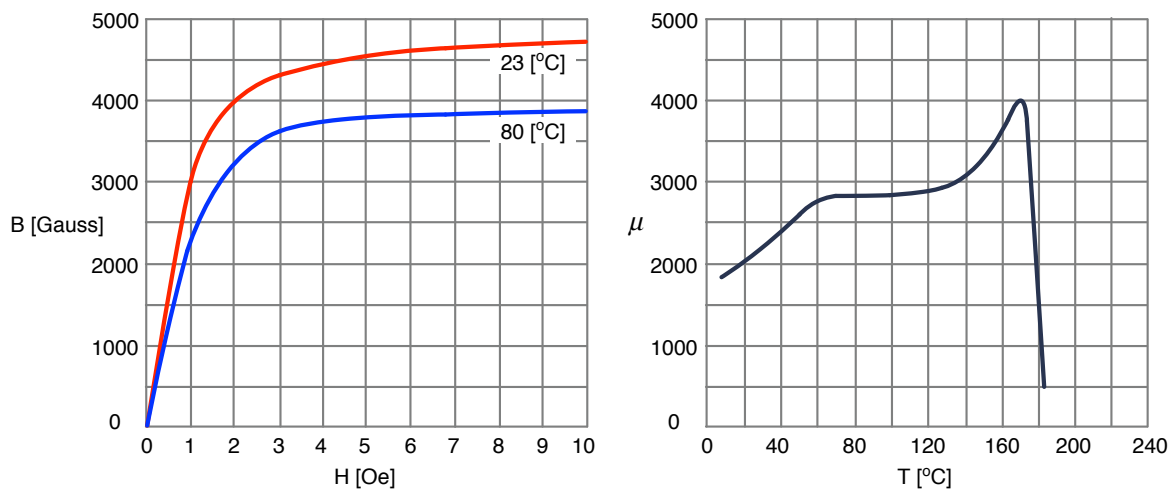


Figura 8 – Curva B x H para ferrites.

Fonte: Adaptado de <http://www.thornton.com.br>. Acesso em: 23/09/2020.

## 3 Aspectos de Elementos Magnéticos

### 3.1 Introdução

Alguns aspectos relevantes para o projeto de elementos magnéticos serão abordados aqui, como tipos de núcleos, perdas magnéticas e escolha dos condutores.

### 3.2 Tipos de Núcleos Magnéticos

Os núcleos magnéticos mais utilizados em eletrônica de potência são ferro sílicio, ferrite e pós-metálicos. A Figura 9 mostra alguns exemplos dos diferentes materiais utilizados como núcleos magnéticos, onde se nota que o núcleo de ferrite é do tipo E, enquanto o núcleo de pós-metálicos é do tipo toroidal.

A escolha do núcleo é realizada em função da frequência de operação do elemento magnético e das perdas no núcleo, pois a medida que a frequência aumenta as perdas aumentam.

Assim, em baixas frequências (da ordem de 60 Hz), se utilizam núcleos de ferro-silício, que possuem alta permeabilidade, mas tem maiores perdas em alta frequência inviabilizando seu uso em conversores cc-cc, por exemplo. Por outro lado, em baixas frequências não é vantajoso usar núcleos de ferrite, pois estes tem permeabilidade menor que os núcleos de ferro-silício. Já em altas frequências se utilizam os núcleos de ferrite e pós-metálicos, que tem permeabilidade menor que o ferro-silício, mas apresentam menores perdas em alta frequência.

Em síntese, os materiais aqui apresentados podem ser utilizados em baixas e altas frequências, no entanto, a escolha do material certo levará a um projeto com menor peso e volume, implicando também em redução de custo e consequentemente um produto final mais competitivo.



núcleo de ferro-silício

núcleos de ferrite

núcleos de pós-metálicos

Figura 9 – Tipos de núcleos magnéticos.

Fonte: <http://www.tessin.com.br>; <http://www.thornton.com.br> e <http://www.magmattec.com>.

Acesso em: 22/09/2020.

### 3.3 Perdas nos Elementos Magnéticos

As perdas em um elemento magnético, por exemplo um indutor ou transformador, serão no núcleo e no enrolamento, sendo conhecidas como perdas no núcleo e perdas no fio.

As perdas no núcleo se devem a energia necessária para orientar os domínios magnéticos durante as fases de magnetização e desmagnetização do núcleo e também devido as correntes parasitas, pois se o núcleo for de material condutor ou semi-condutor, se terá correntes induzidas no mesmo e consequentemente circulação de corrente e efeito Joule, provocando também aquecimento no material magnético.

As espiras que constituem o enrolamento (bobinado) do dispositivo magnético (indutor, transformador, motor, relé, etc.) terão resistência ôhmica e dissiparão potência na forma de calor, devido ao efeito Joule que irá ocorrer em função da circulação das cargas elétricas nos condutores.

Assim, em síntese se tem que as perdas em um dispositivo magnético são:

- Perdas no enrolamento – perdas por efeito Joule nos condutores (espiras);

- Perdas no núcleo:
  - Perdas por histerese – perdas para a orientação dos domínios magnéticos;
  - Perdas por correntes parasitas – perdas por efeito Joule pela indução de correntes no próprio núcleo.

### 3.4 Escolha dos Condutores

A escolha dos condutores para a construção do elemento magnético não é apenas realizada em função da corrente que irá circular pelo mesmo.

O campo magnético produzido nas espiras do elemento magnético origina o efeito de proximidade, que representa a força a qual as cargas elétricas ficam submetidas devido às espiras que estão próximas a esta. Em correntes da ordem de centenas de ampères o efeito de proximidade se torna significativo e deve ser levado em conta.

Por sua vez, o efeito pelicular (*skin*) faz com que a corrente se concentre na periferia do condutor quando se opera em frequências altas. Este efeito restringe a secção do condutor para frequências elevadas. O efeito pelicular restringe a área útil do condutor em relação à frequência de operação. Isso significa que se deve utilizar condutores com secção menor do que a profundidade de penetração da corrente, dada pela expressão a seguir, que especifica o raio máximo que o condutor deverá possuir para que a corrente ocupe toda a sua área útil.

O raio, medida que representa até que parte do condutor a corrente irá penetrar, é dado por:

$$r \approx \frac{7,5}{\sqrt{F_s}} [cm]$$

Assim, o diâmetro do condutor será obtido por:

$$D = 2 \cdot r = 2 \cdot \frac{7,5}{\sqrt{F_s}} = \frac{15}{\sqrt{F_s}}$$

Deste modo, a escolha do condutor deve levar em conta inicialmente a frequência de operação e em seguida a corrente que irá fluir pelo elemento. Assim, escolhe o condutor em função da frequência de operação, consultando uma tabela de fios de cobre ou alumínio, e em seguida, define-se, em virtude da corrente que irá circular pelo elemento, a quantidade de fios em paralelo, caso seja necessário.

## 4 Projeto de Indutores

### 4.1 Introdução

O projeto de indutores consiste em escolher o núcleo adequado para o elemento magnético, determinar o número de espiras e escolher a área dos condutores a serem utilizados.

Em termos de núcleo, os indutores podem ser com núcleo de ar, ferro-silício, pós-metálicos ou ferrite. Apresentaremos a seguir o procedimento de projeto para indutores com núcleo de ar e de ferrite, neste último para o formato toroidal e EE.

### 4.2 Indutores com Núcleo de Ar

A indutância de um indutor com núcleo de ar é dada por:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l}$$

Esta expressão é válida quando o comprimento do indutor é em torno de dez vezes superior ao seu diâmetro. Caso isso não aconteça, o erro no valor calculado será significativo.

O número de espiras será:

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu \cdot A}}$$

O diâmetro e a área de um condutor circular serão:

$$D_{\text{fio}} = 2 \cdot r_{\text{fio}}$$

$$A_{\text{fio}} = \pi \cdot r_{\text{fio}}^2 = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{fio}}}{2}\right)^2 = \frac{\pi \cdot D_{\text{fio}}^2}{4}$$

O comprimento do elemento será dado em função do diâmetro do fio e do número de espiras:

$$l = N \cdot D_{\text{fio}}$$

A área do núcleo será:

$$A_{\text{nucleo}} = \pi \cdot r_{\text{nucleo}}^2 = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{nucleo}}}{2}\right)^2 = \frac{\pi \cdot D_{\text{nucleo}}^2}{4}$$

Assim:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot \left( \pi \cdot \frac{D_{nucleo}^2}{4} \right)}{N \cdot D_{fio}} = \frac{N \cdot \mu \cdot \pi \cdot D_{nucleo}^2}{D_{fio} \cdot 4}$$

$$N = \frac{L \cdot D_{fio} \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot D_{nucleo}^2}$$

Deste modo, para uma dada indutância  $L$ , frequência e corrente, deve-se escolher inicialmente o condutor ( $D_{fio}$ ), especificando também o diâmetro do núcleo ( $D_{nucleo}$ ). A seguir determina-se o número de espiras.

É interessante verificar se o comprimento resultante é bem maior do que a área do núcleo, visando determinar a validade da expressão utilizada para o cálculo da indutância do indutor.

As perdas por efeito Joule são obtidas calculando o comprimento do condutor.

$$l_{fio} = 2\pi \cdot r_{nucleo} \cdot N = 2\pi \cdot \frac{D_{nucleo}}{2} \cdot N = \pi \cdot D_{nucleo} \cdot N \text{ [m]}$$

A resistência será:

$$R_{fio} = \rho \cdot l_{fio} \cdot 100 \text{ [}\Omega\text{]}$$

O multiplicador 100 na expressão anterior serve para ajustar a resistividade para metros.

Assim, a potência dissipada no enrolamento será:

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{(ef)}^2 \text{ [W]}$$

### 4.3 Indutores com Núcleo Toroidal

A Figura 10 mostra o aspecto e dimensões de um núcleo toroidal, que será a base para o projeto do mesmo. O condutor será escolhido conforme foi visto anteriormente, levando-se em conta a frequência de operação e a corrente que irá circular pelo indutor.

O fabricante de núcleos toroidais fornece um fator de relação entre o número de espiras e a indutância, denominado de  $Al$ :

$$Al = \frac{L}{N^2} \text{ [nH]}$$

Assim, o número de espiras é calculado em função da indutância desejada:

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}}$$

A seguir deve-se verificar se a área interna do núcleo é suficiente para acomodar o número de espiras calculado. As dimensões do núcleo são mostradas na Figura 10.

A área do núcleo será:

$$A_{nucleo} = \pi \cdot r_{nucleo}^2 = \pi \cdot \left( \frac{D_{nucleo}}{2} \right)^2 = \frac{\pi \cdot D_{nucleo}^2}{4} [cm^2]$$

A área ocupada pelas espiras será:

$$A_{enrolamento} = A_{fio\_isol} \cdot N [cm^2]$$

Portanto, o fator de ocupação, que é a relação entre a área disponível e a área ocupada pelos condutores será:

$$F_o = \frac{A_{enrolamento}}{A_{nucleo}}$$

Na prática este fator de ocupação deve ser da ordem de 40%, visto que os condutores são cilíndricos e sua acomodação na parte interna no núcleo não é uniforme.

Pode-se também determinar as perdas por efeito Joule, calculando o comprimento do condutor, com auxílio da Figura 10.

$$l_{fio} = N \cdot [2 \cdot (D - d) + 2 \cdot h] [m]$$

A resistência será:

$$R_{fio} = \rho \cdot l_{fio} \cdot 100 [\Omega]$$

O multiplicador 100 na expressão anterior serve para ajustar a resistividade para metros.

Assim, a potência dissipada no enrolamento será:

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{(ef)}^2 [W]$$

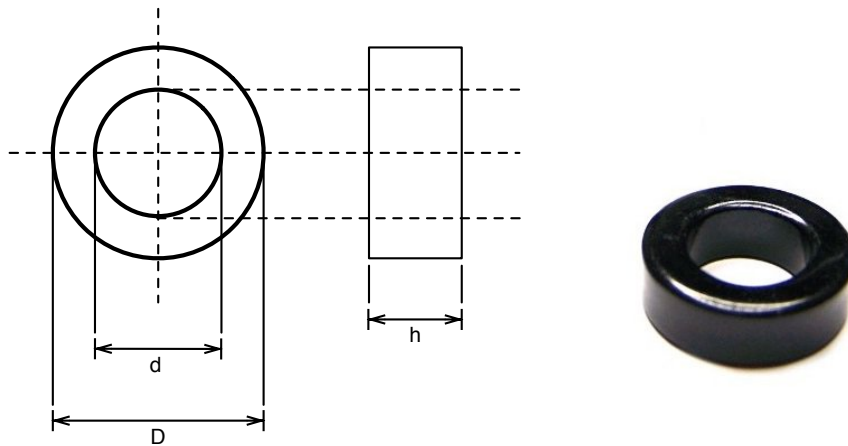


Figura 10 – Dimensões de um núcleo toroidal.

Fonte: <http://www.thornton.com.br>. Acesso em: 29/09/2014.

#### 4.4 Indutores com Núcleo EE

A Figura 11 mostra o formato e dimensões do núcleo e carretel do tipo EE, onde se nota que o carretel é o elemento onde serão acomodadas as espiras do indutor.

O núcleo tem uma área denominada de  $A_e$ , ou área da perna central. Já o carretel tem uma área útil (onde ficará alojado o enrolamento) denominada de  $A_w$ , ou área da janela.

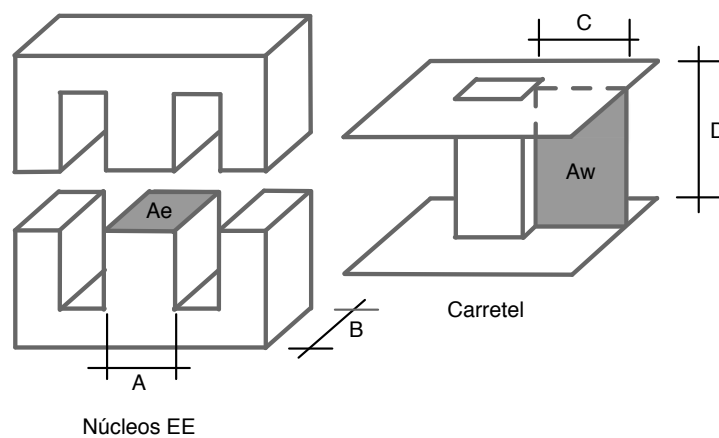


Figura 11 – Núcleo e carretel com formato EE.

Fonte: Adaptado de (Barbi, 2007).

O projeto é iniciado pela especificação de alguns parâmetros que devem ser conhecidos, quais sejam:

- $L$  – indutância do elemento;
- $F_s$  – frequência de operação do indutor;
- $I_{L(pk)}$  – corrente de pico (máxima no indutor);
- $I_{L(ef)}$  – corrente eficaz no indutor;

- $\Delta I_L$  – ondulação (*ripple*) de corrente no indutor;
- $k$  – fator de utilização do enrolamento, em geral 70%;
- $J$  – densidade de corrente para os condutores, em geral 450 A/cm<sup>2</sup>;
- $B$  – densidade de fluxo máximo, que depende do núcleo escolhido. Para o núcleo do fabricante Thornton, com as curvas mostradas na Figura 8, usa-se o valor de 0,35 T, conforme mostrado na Figura 12;
- $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb} / \text{A} / \text{m}$  – permeabilidade do vácuo.

Inicialmente determina-se o produto de áreas para o núcleo, que permitirá a sua escolha:

$$A_e A_w = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot I_{L(ef)} \cdot 10^4}{k \cdot B \cdot J} \text{ [cm}^4\text{]}$$

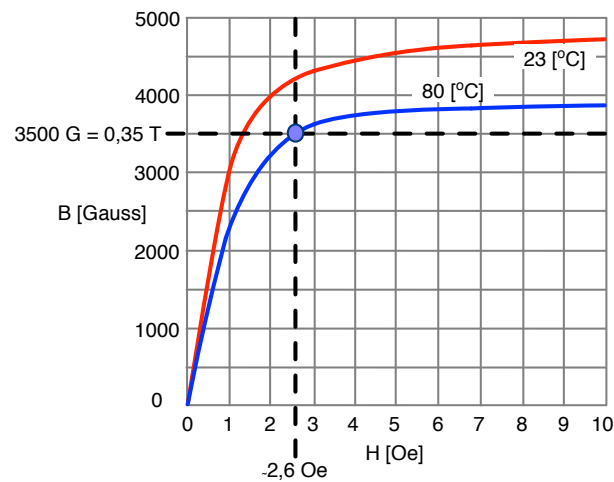


Figura 12 – Ponto de operação na curva  $B \times H$  de ferrites.

Fonte: Adaptado de <http://www.thornton.com.br>. Acesso em: 23/09/2020.

O núcleo pode ser escolhido no sítio do fabricante ou pela Tabela 2, que apresenta alguns núcleos do tipo EE do fabricante Thornton.

Tabela 2 – Alguns núcleos EE do fabricante Thornton.

Núcleo	$A_e$ [cm <sup>2</sup> ]	$A_w$ [cm <sup>2</sup> ]	$l_e$ [cm]	$l_t$ [cm]	$V_e$ [cm <sup>3</sup> ]	$A_e A_w$ [cm <sup>2</sup> ]
E-20	0,31	0,26	4,28	3,8	1,34	0,08
E-30/7	0,60	0,80	6,7	5,6	4,00	0,48
E-30/14	1,20	0,85	6,7	6,7	8,00	1,02
E-42/15	1,81	1,57	9,7	8,7	17,10	2,84
E-42/20	2,40	1,57	9,7	10,5	23,30	3,77
E-55	3,54	2,50	1,2	11,6	42,50	8,85

Fonte: (Barbi, 2007).

A seguir calcula-se o número de espiras do indutor:

$$N = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot 10^4}{B \cdot A_e}$$

O entreferro será dado por:

$$lg = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A_e \cdot 10^{-2}}{L} [cm]$$

A variação de densidade de fluxo, causada pela variação (*ripple*) na corrente será:

$$\Delta B = B \frac{\Delta I_L}{I_{L(pk)}}$$

As perdas no núcleo podem ser determinadas, considerando os fatores empíricos:

$$K_H = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$K_E = 4 \cdot 10^{-10}$$

$$P_{nucleo} = \Delta B^{2,4} \cdot (K_H \cdot F_s + K_E \cdot F_s^2) \cdot V_e$$

Em seguida escolhe-se o condutor, levando em conta a profundidade de penetração, dependente da frequência de operação.

A resistência dos condutores do enrolamento será determinada pela expressão a seguir, onde  $N_{fios}$  é o número de fios em paralelo para atender ao critério da corrente de condução.

$$R_{fio} = N \cdot \frac{\rho}{N_{fios}} \cdot l_t$$

Assim, as perdas no fio serão:

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{(ef)}^2 [W]$$

A perda total no indutor será:

$$P = P_{nucleo} + P_{fio}$$

Pode-se então calcular a elevação de temperatura do elemento magnético:

$$R_{ter} = 23 \cdot (AeAw)^{-0,37} [^{\circ}C/W]$$

$$\Delta T = R_{ter} \cdot P [^{\circ}C]$$

Finalmente pode-se determinar o fator de ocupação e verificar se é possível construir o indutor projetado.

A área ocupada pelas espiras será:

$$A_{\text{enrolamento}} = A_{\text{fio\_isol}} \cdot N_{\text{fios}} \cdot N \left[ \text{cm}^2 \right]$$

Portanto, o fator de ocupação será:

$$FO = \frac{A_{\text{enrolamento}}}{A_{\text{nucleo}}}$$

Na prática este fator de ocupação deve ser da ordem de 70% ou menos, para que seja possível construir o elemento magnético.

## 5 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

**ER 01.** Comente sobre as perdas nos elementos magnéticos.

As perdas nos elementos magnéticos ocorrem no núcleo e nos condutores. No núcleo se tem as perdas por correntes parasitas e por histerese, enquanto nos condutores se tem as perdas por efeito Joule.

**ER 02.** Como deve ser determinada a área dos condutores de um elemento magnético.

A área da seção transversal dos condutores é definida, inicialmente calculando o diâmetro máximo do condutor, em função da frequência de operação, levando em conta o efeito pelicular (*skin*). A seguir, em virtude da corrente elétrica que irá circular pelo elemento se determina a quantidade de fios em paralelo, se for o caso.

**ER 03.** Projete um indutor com núcleo de ar para operar com frequência de 50 kHz, corrente eficaz de 3 A e que tenha indutância de 1 mH. Determine:

- Número de espiras;
- Condutor do enrolamento.

Inicialmente deve-se determinar o diâmetro do condutor máximo em virtude da frequência de operação, que será:

$$D_{\text{fio(max)}} = \frac{15}{\sqrt{F_s}} = \frac{15}{\sqrt{50k}} = 0,067 \text{ cm}$$

Consultando uma tabela de fios de cobre se verifica que o fio poderá ser o 22 AWG ou mais fino.

Escolhendo então o fio 22 AWG, se tem:

- $D_{\text{fio}} = 0,064 \text{ cm}$  – diâmetro do fio;
- $A_{\text{fio}} = 0,003255 \text{ cm}^2$  – área do fio;
- $D_{\text{fio(isolado)}} = 0,071 \text{ cm}$  – diâmetro do fio isolado;
- $A_{\text{fio(isolado)}} = 0,004013 \text{ cm}^2$  – área do fio isolado;
- $\rho@20 \text{ }^\circ\text{C} = 0,000530 \text{ } \Omega/\text{cm}$  – resistividade do fio em  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- $I@450 \text{ A/cm}^2 = 1,465 \text{ A}$  – densidade de corrente.

Nota-se que a corrente que o condutor 22 AWG suporta é de 1,465 A, enquanto o projeto especifica uma corrente de 3 A. Assim, serão necessários condutores em paralelo para suportar a corrente de projeto. O número de fios em paralelo será:

$$N_{\text{fios}} = \frac{I_{\text{proj}}}{I_{\text{fio(escolhido)}}} = \frac{3}{1,465} = 2,05 \cong 2 \text{ fios}$$

Escolhendo um diâmetro para o núcleo com 1 cm, que é a espessura de uma caneta ou lápis, aproximadamente, pode-se determinar o número de espiras:

$$N = \frac{L \cdot D_{\text{fio}} \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot D_{\text{nucleo}}^2} = \frac{1\text{m} \cdot 2 \cdot 0,064\text{cm} \cdot 4}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot (1\text{cm})^2} \cong 12969 \text{ espiras}$$

O diâmetro do fio foi multiplicado por 2, visto se usarem dois fios em paralelo.

Note que este número de espiras é muito elevado, tornando impraticável construir o indutor com estas características. Se o diâmetro do núcleo for aumentado para 10 cm, então o número de espiras será de 129,69, ou seja, em torno de 130 espiras, o que tornaria o projeto factível, mas ocupando uma área significativa.

**ER 04.** Projete um indutor com núcleo de ferrite toroidal para operar com frequência de 50 kHz, corrente eficaz de 3 A e que tenha indutância de 1 mH. Determine:

- Núcleo a ser usado;
- Número de espiras;
- Condutor do enrolamento;
- Fator de ocupação.

Os dados do projeto são semelhantes ao exercício resolvido 03, alterando-se o tipo de núcleo, a

título de comparação. Assim, o fio escolhido e número de fios em paralelo será o mesmo.

Consultando um catálogo de núcleos toroidais, do fabricante Thornton, por exemplo, se pode escolher entre diversos diâmetros de núcleos. Iniciando o projeto pela escolha do núcleo modelo NT-10/5/6,5-2400-IP12 que tem um  $Al$  de 2400 nH; o número de espiras será:

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}} = \sqrt{\frac{1m}{2400n}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{2400 \cdot 10^{-9}}} = 20,4 \cong 21 \text{ espiras}$$

A área deste núcleo é:

$$A_{\text{núcleo}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{núcleo}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (10mm)^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1cm)^2}{4} = 0,785 cm^2$$

Já a área ocupada pelas espiras será:

$$A_{\text{enrolamento}} = N_{\text{fios}} \cdot A_{\text{fio(isolado)}} \cdot N = 2 \cdot 0,003255 \cdot 21 = 0,137 cm^2$$

Assim, o fator de ocupação será:

$$FO = \frac{A_{\text{enrolamento}}}{A_{\text{núcleo}}} = \frac{0,137}{0,785} = 0,174 = 17,4\%$$

Conclui-se que o núcleo escolhido foi grande demais, ou seja, pode-se escolher um núcleo com menor diâmetro, pois se está ocupando apenas 17,4% de sua área disponível. A rigor, deve-se refazer o projeto com um novo núcleo, que permita obter um fator de ocupação da ordem de 40%.

**ER 05.** Projete um indutor com núcleo de ferrite tipo EE para operar com frequência de 50 kHz, corrente eficaz de 3 A e que tenha indutância de 1 mH. Determine:

- Núcleo a ser usado;
- Número de espiras;
- Condutor do enrolamento;
- Perdas no indutor;
- Fator de ocupação.

Os dados do projeto são semelhantes ao exercício resolvido 03, alterando-se o tipo de núcleo, a título de comparação. Assim, o fio escolhido e número de fios em paralelo será o mesmo.

Inicialmente se calcula o produto de áreas do núcleo:

$$AeAw = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot I_{L(ef)} \cdot 10^4}{k \cdot B \cdot J} = \frac{1m \cdot 3 \cdot 3 \cdot 10^4}{0,7 \cdot 0,35 \cdot 450} = 0,816 cm^4$$

A corrente de pico foi considerada igual a eficaz, visto não ter sido fornecida nos dados do projeto. O fator de utilização (k) foi utilizado como 70%. A densidade de fluxo máximo de 0,35, conforme a Figura 8. A densidade de corrente foi de 450 A/cm<sup>2</sup>.

A partir do valor obtido para o produto de áreas do núcleo, consultando a Tabela 2, pode-se escolher o núcleo modelo E-30/14, que tem os seguintes dados:

- $A_e = 1,20 \text{ cm}^2$  – área da perna central do núcleo;
- $A_w = 0,85 \text{ cm}^2$  – área da perna lateral do núcleo;
- $l_e = 6,7 \text{ cm}$  – comprimento da espira;
- $l_t = 1,20 \text{ cm}$  – comprimento médio da espira;
- $V_e = 8,00 \text{ cm}^3$  – volume do núcleo;
- $A_e A_w = 1,02 \text{ cm}^4$  – produto de áreas do núcleo.

A seguir pode-se calcular o número de espiras:

$$N = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot 10^4}{B \cdot A_e} = \frac{1 \text{ m} \cdot 3 \cdot 10^4}{0,35 \cdot 1,20} = 71,43 \cong 72 \text{ espiras}$$

A variação da densidade de fluxo, considerando uma ondulação de corrente de 20%, será:

$$\Delta B = B \cdot \frac{\Delta I_L}{I_{L(pk)}} = 0,35 \cdot \frac{0,2 \cdot 3}{3} = 0,07 \text{ T}$$

Assim, as perdas no núcleo serão:

$$K_H = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$K_E = 4 \cdot 10^{-10}$$

$$P_{nucleo} = \Delta B^{2,4} \cdot (K_H \cdot F_s + K_E \cdot F_s^2) \cdot V_e = 0,07^{2,4} \cdot (4 \cdot 10^{-5} \cdot 50k + 4 \cdot 10^{-10} \cdot (50k)^2) \cdot 8 = 0,0406 \text{ W}$$

A resistência dos condutores do enrolamento será:

$$R_{fio} = N \cdot \frac{\rho}{N_{fios}} \cdot l_t = 72 \cdot \frac{0,000530}{2} \cdot 1,20 = 0,023 \Omega$$

As perdas nos condutores serão:

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{L(ef)}^2 = 0,023 \cdot 3^2 = 0,21 \text{ W}$$

As perdas totais no indutor serão:

$$P = P_{nucleo} + P_{fio} = 0,0406 + 0,21 = 0,25 \text{ W}$$

Pode-se determinar a elevação de temperatura por:

$$R_{ter} = 23 \cdot (AeAw)^{-0,37} = 23 \cdot (1,02)^{-0,37} = 22,83 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$\Delta T = R_{ter} \cdot P = 22,83 \cdot 0,25 = 5,72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nota-se que a elevação de temperatura é pequena, não afetando o funcionamento adequado do elemento magnético.

Por fim, vamos determinar a área ocupada pelos condutores e o fator de ocupação:

$$A_{enrolamento} = N_{fios} \cdot A_{fio(isolado)} \cdot N = 2 \cdot 0,003255 \cdot 21 = 0,137 \text{ cm}^2$$

$$FO = \frac{A_{enrolamento}}{A_{nucleo}} = \frac{0,137}{0,85} = 0,161 = 16,1\%$$

## Exercícios Propostos

**EP 01.** Explique o que é saturação de um elemento magnético.

**EP 02.** Comente sobre a curva de histerese de um núcleo e sua influência nas perdas do mesmo.

**EP 03.** Projete um indutor com núcleo de ar para operar com frequência de 10 kHz, corrente eficaz de 1 A e que tenha indutância de 100  $\mu\text{H}$ .

**EP 04.** Projete um indutor com núcleo de ferrite e formato toroidal para operar com frequência de 10 kHz, corrente eficaz de 1 A e que tenha indutância de 100  $\mu\text{H}$ .

**EP 05.** Projete um indutor com núcleo de ferrite e formato EE para operar com frequência de 10 kHz, corrente eficaz de 1 A e que tenha indutância de 100  $\mu\text{H}$ .

## 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 são domínios magnéticos?

**AA 02.** Cite as perdas nos elementos magnéticos.

**AA 03.** Considerando núcleos magnéticos de ferro-silício e ferrite, qual deles é utilizado em baixas frequências e qual deles em altas frequências?

**AA 04.** Um indutor com núcleo de ar foi projetado, obtendo-se um número de 500 espiras. Se neste elemento for usado um núcleo de ferrite, qual será, a grosso modo, o novo número de espiras?

**AA 05.** Explique o que é o efeito pelicular e como o mesmo afeta o projeto de elementos magnéticos.

AA 01. Domínios magnéticos são pequenas regiões de material do núcleo magnético, que se orientam ou desorientam conforme o campo magnético no qual estão imersos.

AA 02. As perdas nos elementos magnéticos ocorrem nos condutores do enrolamento e no núcleo. No enrolamento se tem as perdas por efeito Joule nos fios; já no núcleo se tem as perdas por correntes parasitas e as perdas por histérese.

AA 03. Os núcleos de ferro-silício são usados em baixa frequência, enquanto que os núcleos de ferrite são empregados em altas frequências.

AA 04. A permeabilidade do ferrite é em torno de 2000 vezes maior que a do ar; então o novo número de espiras seria de  $500 / 2000 = 0,25$  espiras; isto é, se precisaria de  $\frac{1}{4}$  de espira apenas.

AA 05. O efeito pelicular ou *skin* faz com que as cargas elétricas se concentrem nas bordas/superfície do material na medida que a frequência da corrente elétrica aumenta. Assim, a escolha dos condutores do enrolamento dos elementos magnéticos deve levar em conta o efeito pelicular, ou seja, a frequência de operação.



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 -

### OPERAÇÃO DE CONVERSORES EM MALHA FECHADA

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2020.

---

## **OPERAÇÃO DE CONVERSORES EM MALHA FECHADA**

### **Objetivo de Aprendizagem**

Estudar a operação de conversores em malha fechada.

### **Objetivos parciais**

- Conhecer os princípios da operação em malha fechada;
- Identificar técnicas de controle de conversores;
- Entender as funcionalidades dos conversores em malha fechada.

### **Capítulos e aulas relacionadas**

Este objetivo de aprendizagem está relacionado ao capítulo 18 da apostila e com a aula 18 disciplina.

### **Pré-requisitos**

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 07 – Projeto de elementos magnéticos.

### **Continuidade dos Estudos**

O próximo objetivo de aprendizagem será continuar o estudo dos conteúdos transversais, como circuitos integrados para conversores estáticos, 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 (apresentação 18);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulo 18).

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 -**  
**OPERAÇÃO DE CONVERSORES EM MALHA**  
**FCHADA**

## 1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conteúdos transversais do curso, isto é, aqueles conteúdos que são aplicados a todos os grupos de conversores estudados, sejam ca-cc, cc-cc, cc-ca ou ca-ca. Assim, o objetivo aqui será realizar uma introdução à operação dos conversores em malha fechada.

### 1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Operação em malha fechada;
- Técnicas de controle.

### 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:

- Descrever com suas palavras o que é e quais as implicações da operação de conversores em malha fechada;
- Descrever algumas técnicas de controle de conversores;
- Aplicar técnicas de controle simples.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em solicitar que o estudante descreva técnicas de controle simples aplicadas na operação em malha fechada de conversores estáticos.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar as diferenças entre operação em malha aberta e malha fechada de conversores;
2. Citar técnicas de controle;
3. Aplicar técnicas de controle simples nos conversores estáticos;
4. Descrever os impactos na operação de um conversor quando se utiliza técnicas de controle específicas.

## 2 Operação em Malha Fechada

### 2.1 Introdução

A operação em malha fechada dos conversores, em geral, tem o objetivo de se obter na saída o controle de alguma variável de interesse, sendo na maioria das vezes a tensão de saída ou a corrente de saída do conversor. Assim, o uso de conversores em malha aberta também pode ocorrer, mas não predomina nas aplicações de eletrônica de potência.

As aplicações de conversores são muito diversas e em sua maioria se utiliza a operação em malha fechada, visando o controle da(s) variável(veis) de interesse. Assim, em sistemas de aquecimento pode-se desejar manter uma temperatura constante, o que poderá ser feito por meio do controle da tensão sobre os elementos resistivos, por exemplo. Em sistemas de iluminação pode-se desejar manter o nível de luminosidade fixo, podendo ser feito por meio do controle da corrente aplicada no conjunto de iluminação com LED, por exemplo. Em veículos elétricos pode-se desejar manter a velocidade constante, podendo-se controlar a tensão e corrente aplicadas nos motores elétricos, por exemplo.

Assim, neste capítulo será realizada um breve estudo sobre a operação dos conversores em malha fechada, podendo ser aplicado aos quatro grupos de conversores estudados, que são os conversores ca-cc, cc-cc, cc-ca e ca-ca.

### 2.2 Objetivos do controle em malha fechada

Em síntese, os objetivos do controle em malha fechada são:

- Garantir a precisão no ajuste da variável de saída;
- Rápida correção de eventuais desvios provenientes de transitórios na alimentação ou mudanças na carga.

### 2.3 Características da operação em malha aberta versus malha fechada

Entre as principais características da operação em malha aberta se tem:

- Circuito simples;
- Geralmente sem problemas de estabilidade;
- Erros estáticos (de regime) grande;
- Respostas transitórias com sobressinal;
- Projeto simples;
- Conformação de sinais complicada.

Por sua vez, na operação de conversores em malha fechada se tem:

- Circuitos mais complexos;
- Podem apresentar problemas de estabilidade;
- Erros estáticos praticamente nulos;
- Melhora da resposta transitória;
- Projeto complexo;
- Possibilidade de conformar sinais.

## 2.4 Principais técnicas de controle

Existem diversas técnicas de controle, dentre as mais simples e as mais complexas.

Algumas delas são listadas a seguir:

- Técnicas lineares versus não-lineares;
- Controle clássico versus controle moderno;
- Controle no domínio do tempo versus controle no domínio da frequência;
- Controle liga-desliga;
- Controle por histerese;
- Controle fuzzy;
- Controle adaptativo;
- Controle por variáveis de estado;
- Controle por modos deslizantes;
- Dentre outros.

Algumas técnicas são mais simples de serem implementadas, como por exemplo o controle liga-desliga e o controle por histerese, enquanto outras técnicas são mais complexas. Do mesmo modo, algumas técnicas possuem uma abordagem matemática simples, enquanto outras envolvem cálculos complexos e dispendiosos.

## 2.1 Sistema de controle em malha fechada

A Figura 1 mostra um conversor cc-cc Buck com os blocos de circuitos para operação em malha fechada. Note que neste caso se tem os estágios de medição e controle, que não estariam presentes em um conversor para operação em malha aberta. No exemplo da figura, está sendo medida a tensão de saída do conversor, que será comparada com uma referência, e a partir do sinal de erro faz-se a compensação deste, gerando por fim a tensão de controle que será aplicada na modulação PWM, por exemplo.

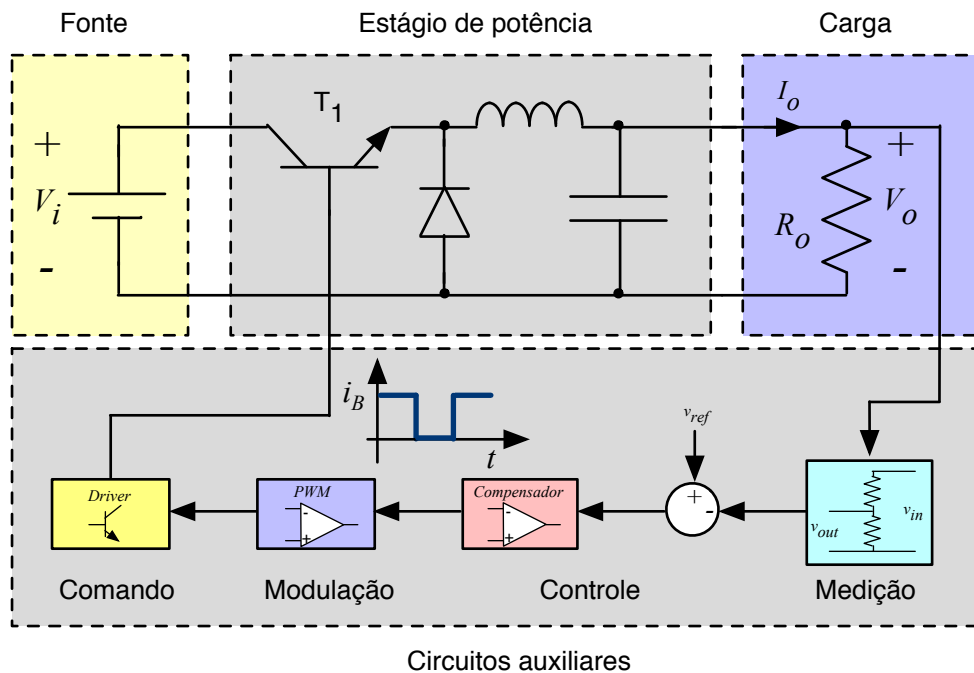


Figura 1 – Esquemático de um conversor para operação em malha fechada.

Fonte: Adaptado de Fonte: (Erickson, 1997).

A Figura 2 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de controle para operação em malha fechada. Este sistema é simplificado, pois mostram-se apenas as etapas de geração do sinal de erro e sua compensação pelo bloco denominado de compensador, originando a tensão de controle que é aplicada no modulador. Já a Figura 3 mostra um sistema completo, que possui os seguintes elementos:

- Tensão de controle – variável de interesse e controlada no sistema em malha fechada;
- Referência – valor desejado para a variável controlada;
- Tensão medida – valor realimentado a partir da variável de interesse, ou seja, da tensão controlada;
- Erro – diferença entre o valor desejado e o valor real na variável controlada;
- Compensador – elemento responsável pelo processamento do sinal de erro, visando se obter a tensão de controle correta que fará com que a variável controlada seja levada ao valor correto. Em um conversor estático operando com modulação PWM, significa que o compensador deverá gerar a tensão de controle adequada, que aplicada ao modulador, irá originar a razão cíclica (D) correta, para que a tensão na saída seja igual ao valor de referência desejado;

- Modulador – circuito responsável por gerar a razão cíclica adequada, ou seja, o sinal de comando do interruptor, a partir da tensão de controle (modulante) e portadora;
- Planta – conversor que está sendo controlado, podendo ser qualquer conversor estudado, isolado ou não, ou outros conversores ainda não estudados até aqui;
- Perturbações – alterações no sistema que provocam alteração na variável controlada, por exemplo: alteração na tensão de entrada do conversor e alteração na carga conectada em sua saída. As perturbações não estão sendo medidas no sistema exemplo da Figura 3, mas o sistema de controle precisa corrigir a tensão de saída (variável controlada) sempre que ocorrer alguma perturbação no sistema, tornando assim a saída imune a estas alterações na planta;
- Medição – circuito responsável por realimentar a variável de interesse, podendo ser um circuito atenuador de tensão, usando divisor resistivo, ou sensores de tensão ou corrente, por exemplo.

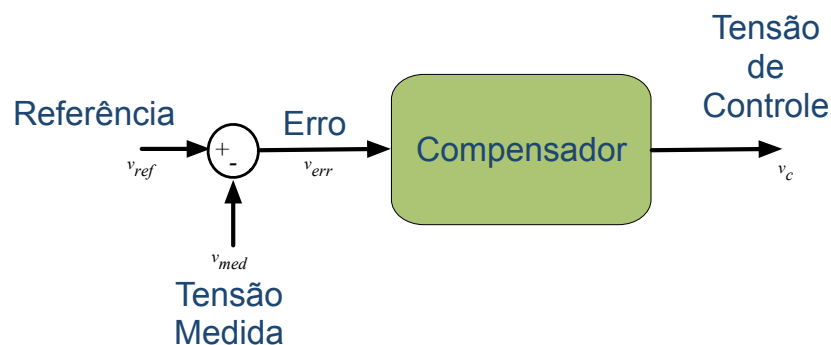


Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema simplificado em malha fechada.

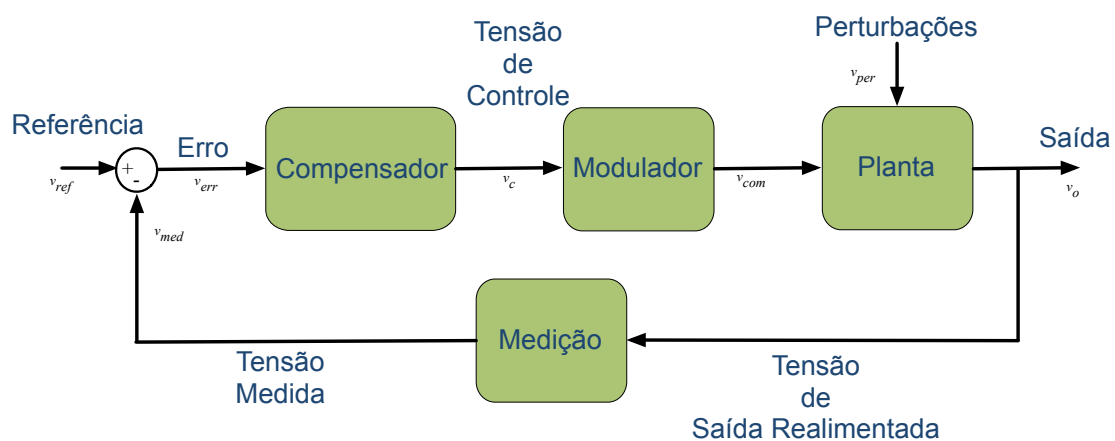


Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema completo em malha fechada.

## 2.1 Aspectos de um sistema de controle em malha fechada

A depender da complexidade do sistema a ser controlado e da técnica de controle utilizada, pode ser necessária a modelagem da planta, onde se entende por planta o circuito, conversor, sistema, a ser controlado. Em conversores estáticos, modelar a planta, representa obter expressões matemáticas que relacionem a variável a ser controlada pela variável de controle. Por exemplo, para um conversor cc-cc Buck operando em condução contínua, o ganho estático, que é a relação entre a tensão de saída e a razão cíclica é:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = D$$

Por sua vez, do ponto de vista do comportamento dinâmico do conversor, quando ocorrem alteração na carga, na tensão de entrada ou na razão cíclica, a relação entre a tensão de saída e a razão cíclica, no domínio da frequência, será:

$$G(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} = V_i \cdot \frac{R_o}{s^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot R_o + s \cdot L_o + R_o}$$

Onde:

$$s = j \cdot \omega$$

$$j = \sqrt{-1}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot F$$

A análise no domínio da frequência é, matematicamente, mais simples do que a análise no domínio do tempo. Note que na expressão que relaciona a tensão de saída pela razão cíclica, em termos de resposta dinâmica, se tem a influência dos elementos do filtro de saída do conversor ( $L_o$  e  $C_o$ ) e da carga ( $R_o$ ). Isso significa dizer que os tempos de resposta do conversor não dependerão apenas da técnica de controle e da velocidade dos componentes do circuito de controle, mas também dos componentes do estágio de potência do conversor e da frequência de comutação ( $F_s$ ). Assim, para um conversor operando com frequência de comutação da ordem de 1 kHz e com indutores da ordem de mH e capacitores da ordem de  $\mu\text{F}$ , se terá tempos de resposta da ordem de ms, mesmo que se utilize processadores de alto desempenho no sistema de controle.

Em algumas aplicações de eletrônica de potência se utiliza a realimentação aliada com a pré-alimentação, que consiste em medir também a tensão de entrada do conversor, por exemplo.

Assim, quando ocorrerem alterações na tensão de entrada, faz-se a correção da razão cíclica de forma mais rápida do que apenas empregando a realimentação, pois neste último caso, se aguarda que a tensão de saída varie, para então realizar alguma ação de controle, enquanto na pré-alimentação se atua imediatamente quando a perturbação na entrada foi detectada (medida).

Ainda, em virtude das grandezas elétricas de um conversores apresentarem variações conforme a frequência de comutação, isto é, a corrente em um indutor de um conversor cc-cc cresce e decrece com ondulação (*ripple*) em função da frequência de comutação, pode-se utilizar valores médios para implementar o sistema de controle. Assim, ao invés de utilizar os valores instantâneos das variáveis do conversor, se utiliza valores filtrados, ou seja, a média daquela grandeza.

Em operação em malha fechada, quando se está realizando o projeto dos elementos do sistema de controle, pode-se considerar algumas características ou requisitos de projeto, por exemplo:

- Tempo de subida – tempo que o sinal leva para crescer de 10 a 90% da amplitude final;
- Tempo de retardo – tempo que o sinal leva para atingir 50% da amplitude final;
- Tempo de acomodação ou assentamento – tempo que o sinal leva para entrar em regime permanente;
- Regime transitório – intervalo de tempo em que o sinal está variando (crescendo ou decrescendo);
- Regime permanente – quando o sinal está estabilizado e não varia mais;
- Sobressinal ( $M_p$ ) – amplitude que o sinal atinge acima do valor de regime permanente.

## 2.2 Compensadores para sistemas de controle

Os compensadores são os elementos do diagrama de blocos da Figura 3 que, a partir da tensão de erro, calculam ou determinam, a tensão de controle necessária para o conversor operar com a saída igual a referência desejada. Existem inúmeros exemplos de compensadores, sendo os mais comuns:

- Liga-desliga (on-off) (Figura 4) – controlador muito simples, que compara a variável medida com a referência fazendo com que o interruptor seja ligado ou desligado conforme a saída estiver abaixo ou acima do valor desejado. O período de comutação e velocidade de resposta dependem unicamente da dinâmica do

filtro do conversor;

- Histerese (Figura 4) – também é um sistema simples, mas que utiliza limites para definir se o interruptor deve ser ligado ou desligado; sendo que esta banda de limites é denominada de histerese. O período de comutação depende da faixa de histerese e do filtro de saída do conversor;
- Compensador proporcional (Figura 5) – representa um ganho ou uma atenuação simplesmente, denominado de K. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; este compensador apresenta erro estático em regime permanente;
- Compensador proporcional-integral (Figura 6) – representa um ganho com integração, que na prática é um efeito de memória do compensador, eliminando o erro estático em regime permanente, sendo denominado de PI. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; tem erro estático nulo em regime permanente;
- Compensador proporcional-derivativo (Figura 7) – representa um ganho com derivação, que na prática é um efeito de antecipação da tendência da variável controlada, sendo denominado de PD. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; este compensador apresenta erro estático em regime permanente, mas tem boa velocidade de resposta;
- Compensador proporcional-integral-derivativo (Figura 8) – representa um ganho com integração e derivação, sendo o controlador mais utilizado na indústria, denominado de PID. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; tem erro estático nulo em regime permanente e boa velocidade de resposta.

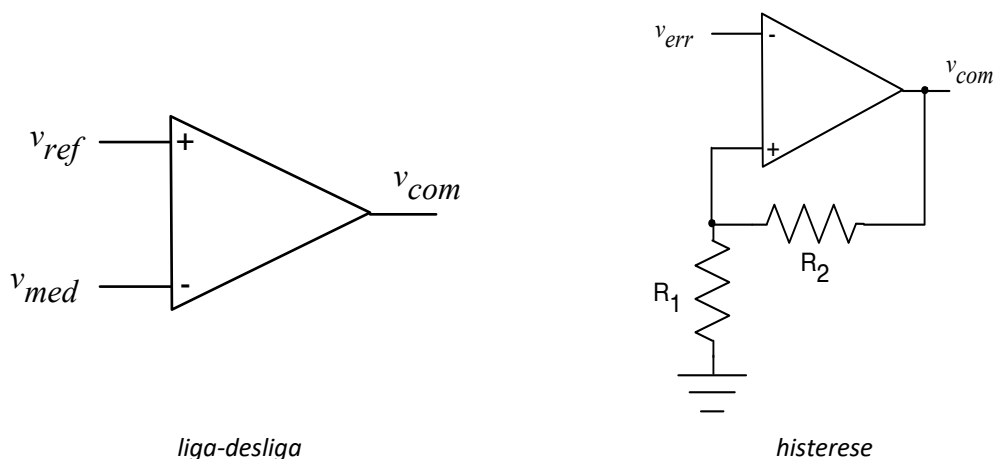


Figura 4 – Exemplos de compensadores.

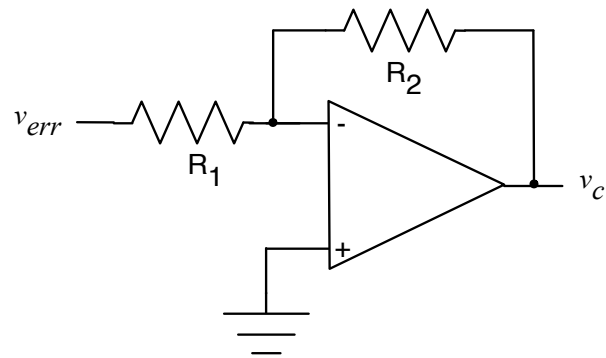
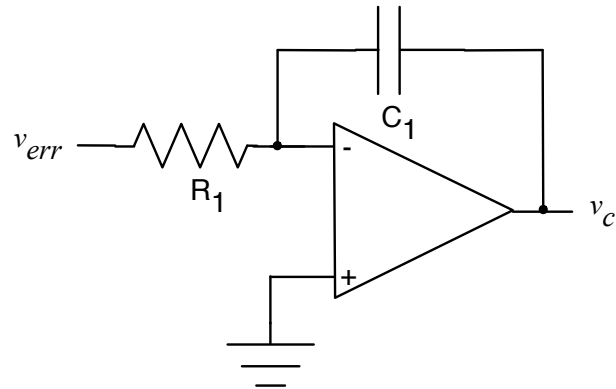
Figura 5 – Compensador proporcional ( $k$ ).

Figura 6 – Compensador proporcional-integral (PI).

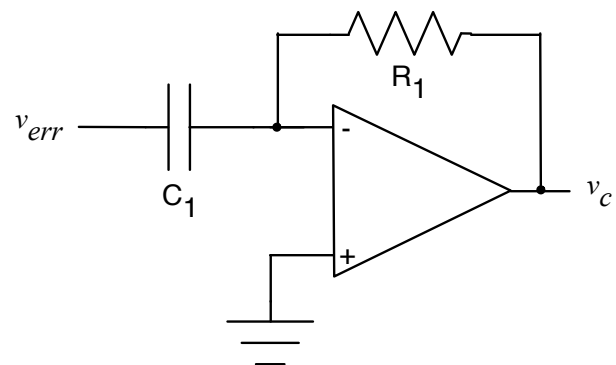


Figura 7 – Compensador proporcional-derivativo (PD).

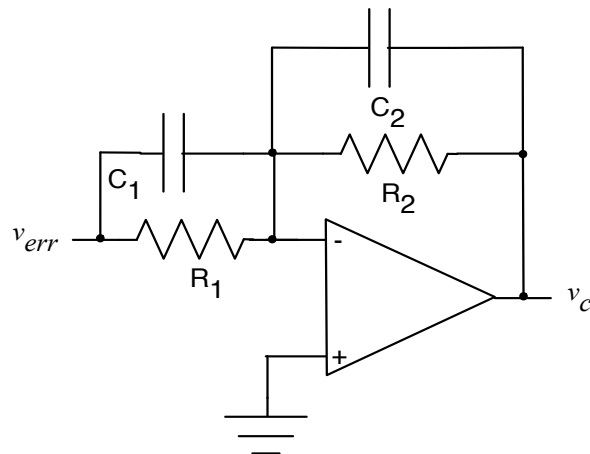


Figura 8 – Compensador proporcional-integral-derivativo (PID).

## 3 Técnicas de Controle

### 3.1 Introdução

As técnicas de controle, conforme comentado anteriormente, são as mais diversas, dentre as mais simples e as mais complexas.

A seguir serão apresentadas duas técnicas de controle simples, para que intuitivamente o leitor entenda as implicações e o comportamento do conversor quando operando em malha fechada.

### 3.2 Controle liga-desliga

A técnica de controle conhecida como liga-desliga (*on-off*) é simples e muito utilizada em sistemas que não exigem respostas rápidas ou que tenham dinâmicas lentas, como por exemplo em sistemas de aquecimento.

Esta técnica consiste, basicamente, em se medir a variável de interesse e se comparar com uma referência, e caso a saída esteja acima da referência, se desliga o elemento atuador, e caso a saída esteja abaixo da referência, se liga o atuador.

Em um conversor Buck cc-cc operando em condução contínua, onde a tensão de saída aumenta com o aumento da razão cíclica, se liga o interruptor para aumentar a tensão de saída e se desliga o interruptor para diminuir a tensão de saída.

A Figura 9 mostra as formas de onda aproximadas para o controle liga-desliga de um conversor estático. A tensão de saída medida é representada pela linha azul e oscila próxima da tensão de referência, que tem linha tracejada vermelha. Assim, sempre que a tensão medida estiver acima da referência, a tensão de comando, na parte inferior da figura, será baixa, representando o tempo de não condução do interruptor ( $t_{off}$ ). Já quando a tensão medida estiver abaixo da referência, a tensão de comando será alta, representada pelo tempo de condução do interruptor ( $t_{on}$ ).

A variação da tensão de saída do conversor tem forma de onda diferente daquela mostrada na Figura 9, pois conforme comentado anteriormente, a dinâmica do sistema dependerá os elementos do filtro, ou seja, do atraso no crescimento e decréscimo da corrente e da tensão no indutor e capacitor de filtro, respectivamente; caso se esteja estudando um conversor cc-cc, por exemplo.

Em geral, o controle liga-desliga, permite obter respostas oscilatórias do sistema, isto é, a variável controlada irá aumentar e diminuir, oscilando ao redor da referência desejada.

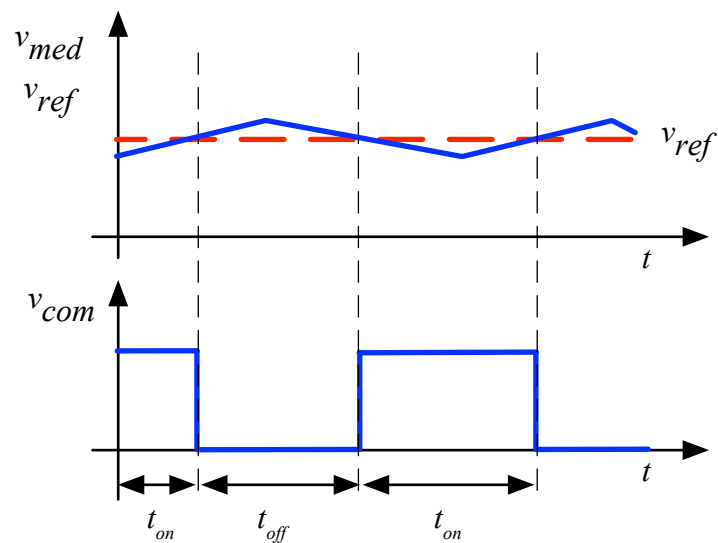


Figura 9 – Formas de onda aproximadas para controle liga-desliga.

### 3.1 Controle por histerese

Alterando-se o controle liga-desliga, no sentido de se ter uma dinâmica mais rápida, e um melhor controle da variável de interesse, foi desenvolvido o controle por histerese, que é semelhante ao liga-desliga, mas permite pré-determinar os limites mínimo e máximo dentre os quais a variável de interesse irá oscilar.

Assim, no controle por histerese, se compara a tensão medida do conversor, por exemplo, com os limites inferior e superior da tensão de referência, que na verdade são os limites da histerese na tensão de saída. Deste modo, quando a tensão medida for maior que o limite superior da histerese, deve-se desligar o interruptor do conversor, iniciando o tempo de não condução ( $t_{off}$ ). Por outro lado, quando a tensão de saída medida ficar abaixo do limite inferior da histerese de referência, deve-se ligar o interruptor, começando o tempo de condução ( $t_{on}$ ).

As formas de onda aproximadas do controle por histerese são mostradas na Figura 10, onde se notam os limites inferior e posterior da tensão de referência, representando a histerese no controle da tensão de saída. Novamente aqui as formas de onda são aproximadas, pois na prática poderão ter formatos diferentes de trechos retílineos, visto se ter a presença dos indutores e capacitores no circuito.

É importante destacar que no controle liga-desliga e no controle por histerese, não se tem o estágio de modulação no circuito, ou seja, a frequência de comutação é dada diretamente pela ação de controle. Em outras palavras, a frequência de operação do conversor poderá ir de zero até infinito. Na prática haverá um limite superior para a frequência de operação, pois os semicondutores possuem tempos de resposta finitos.

É possível realizar ajustes ou adaptações na técnica de controle por histerese para operar com frequência conhecida, dentre de limites inferiores e superiores, por exemplo. Neste caso se utiliza modulação PWM empregando o princípio geral da técnica de histerese. Assim, em um sistema analógico ou digital, quando a tensão medida ultrapassar o limite superior da histerese, ao invés de simplesmente desligar o interruptor, se realiza o decremento da razão cíclica. Do outro lado, quando a tensão medida ficar abaixo do limite inferior da histerese, ao invés de simplesmente ligar o interruptor, se aumenta gradativamente a razão cíclica.

O ajuste ou adaptação na técnica de controle por histerese, sugerido anteriormente, implica em frequência de comutação fixa, pois pode-se utilizar modulação PWM, e tempo de resposta de acordo com o incremento/decremento na razão cíclica, ficando então a critério do projetista determinar a dinâmica do conversor.

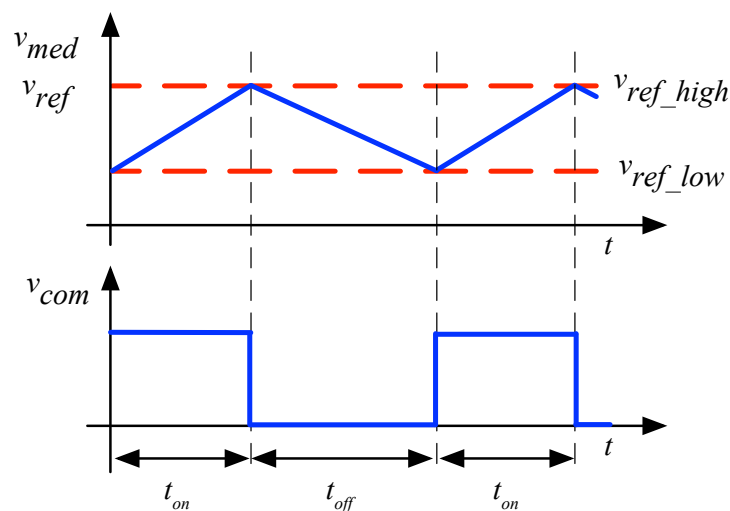


Figura 10 – Formas de onda aproximadas para controle por histerese.

## 4 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

**ER 01.** Comente sobre operação de conversores em malha aberta versus malha fechada.

A operação em malha aberta implica em circuitos de controle mais simples, mas com erro estático, isto é, a tensão na saída pode ser diferente da tensão efetivamente obtida. Para a obtenção em malha fechada, o erro estático pode ser pequeno ou nulo, conforme a técnica de controle utilizada, mas os circuitos são mais complexos e eventualmente podem ocorrer instabilidades no sistema, ou seja, a tensão de saída não permanece com valor fixo em regime permanente, podendo ter amplitude oscilatória, por exemplo.

**ER 02.** Cite duas técnicas de controle de conversores.

Controle liga-desliga e controle fuzzy.

**ER 03.** Comente sobre um objetivo de se operar os conversores em malha fechada.

Um dos objetivos da operação de conversores em malha fechada é a correção rápida da variável controlada, quando ocorrem perturbações, por exemplo, alteração na carga ou na tensão de entrada.

**ER 04.** O que é um compensador em um sistema de controle?

O compensador é o elemento do sistema de controle que a partir do sinal de erro, determina a tensão de controle, por exemplo, que possibilitará obter a tensão correta na saída em um conversor cc-cc, quando for o caso.

**ER 05.** Comente sobre a técnica de controle liga-desliga.

A técnica liga-desliga é muito simples e consiste em ligar o interruptor sempre que a variável controlada estiver abaixo do valor de referência e desligar o interruptor sempre que a variável controlada estiver acima do valor de referência.

---

## Exercícios Propostos

---

**EP 01.** Comente sobre a operação de conversores em malha aberta versus operação em malha fechada.

**EP 02.** Cite duas características da operação de um conversor cc-cc em malha aberta.

**EP 03.** Cite duas características da operação de um conversor cc-cc em malha fechada.

**EP 04.** Cite duas técnicas de controle de conversores.

**EP 05.** Explique a técnica de controle por histerese.

---

## 5 Atividade Avaliativa

---

### 5.1 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.** Comente sobre uma vantagem da operação de conversores em malha fechada.

**AA 02.** Cite duas características para a operação em malha fechada que são distintas na operação em malha aberta.

**AA 03.** Cite dois exemplos de controladores.

**AA 04.** O que é sobressinal em um sistema de controle?

**AA 05.** Comente sobre o controle por histerese de um conversor.

AA 01. Uma das vantagens dos conversores que operam em malha fechada é o pequeno ou até erro nulo, que significa que a variável controlada terá exatamente o valor desejado.

AA 02. A operação em malha fechada implica em circuitos mais complexos do que a operação em malha aberta; também, em termos de estabilidade, os conversores em malha aberta, em geral, são estáveis, já em malha fechada podem ocorrer instabilidades.

AA 03. Controlador proporcional e controlador proporcional-integral-derivativo.

AA 04. Sobressinal é a amplitude máxima acima do valor de referência que a variável controlada atinge quando ocorrem ações de controle no sistema.

AA 05. O controle por histerese é simples e consiste em comparar a tensão de saída, por exemplo, com um limite inferior e outro limite superior da referência. Sempre que a tensão medida ultrapassar o limite superior se abre a chave ou diminui a razão cíclica, já se a tensão medida ultrapassar o limite inferior se fecha a chave ou aumenta a razão cíclica.

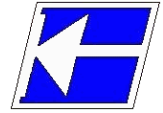


INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO TÉCNICO INTEGRADO DE ELETRÔNICA

Eletrônica de Potência



---

# GUIA DE ESTUDO

---

## - OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -

### CIRCUITOS INTEGRADOS PARA CONVERSORES ESTÁTICOS

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, outubro de 2020.

---

## **CIRCUITOS INTEGRADOS PARA CONVERSORES ESTÁTICOS**

### **Objetivo de Aprendizagem**

Estudar os principais circuitos integrados para conversores estáticos.

### **Objetivos parciais**

- Conhecer circuitos integrados para conversores estáticos;
- Identificar circuitos integrados para conversores estáticos;
- Aplicar circuitos integrados para conversores estáticos.

### **Capítulos e aulas relacionadas**

Este objetivo de aprendizagem está relacionado ao capítulo 17 da apostila e com a aula 17 disciplina.

### **Pré-requisitos**

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 08 – Operação de conversores em malha fechada.

### **Continuidade dos Estudos**

Os principais objetivos de aprendizagem elencados para o Curso de Eletrônica de Potência encerram com este capítulo, restando os estudos correlatos a esta disciplina a serem feitos de maneira independente pelo estudante.

### **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 (apresentação 17);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulo 17).

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 -**  
**CIRCUITOS INTEGRADOS PARA CONVERSORES**  
**ESTÁTICOS**

## 1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conteúdos transversais do curso, isto é, aqueles conteúdos que são aplicados a todos os grupos de conversores estudados, sejam ca-cc, cc-cc, cc-ca ou ca-ca. Assim, o objetivo aqui será realizar uma introdução aos principais circuitos integrados para conversores estáticos.

### 1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Circuitos integrados para conversores estáticos.

### 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:

- Citar alguns exemplos de circuitos integrados para conversores estáticos;
- Descrever algumas funcionalidades dos circuitos integrados citados;
- Aplicar circuitos integrados para conversores estáticos.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em solicitar que o estudante cite alguns circuitos integrados utilizados na implementação de conversores estáticos.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Cite três circuitos integrados utilizados na implementação de conversores estáticos;
2. Comente sobre as principais funcionalidades dos circuitos integrados utilizados em fontes chaveadas;
3. Cite duas vantagens de se utilizar circuitos integrados para conversores estáticos;
4. Cite uma desvantagem de se utilizar circuitos integrados para implementar conversores estáticos.

## 2 Circuitos Integrados para Conversores Estáticos

### 2.1 Introdução

A eletrônica, de maneira geral, passou por grandes avanços com a invenção e implementação dos circuitos integrados (CIs), logo após a descoberta do transistor bipolar de junção. Assim, a intensificação no uso de equipamentos eletrônicos, inicialmente rádios e televisores, ocorreu de maneira consistente até os dias de hoje, onde diversos dispositivos e aparatos utilizam circuitos eletrônicos para diferentes funcionalidades.

Assim, também na área da eletrônica de potência, ocorreram avanços com o desenvolvimento de circuitos integrados específicos, denominados de circuitos integrados dedicados, principalmente na implementação de fontes chaveadas, já no século passado. Atualmente se encontram comercialmente circuitos integrados para auxiliar na implementação de conversores estáticos de diferentes fabricantes e com diferentes faixas de preço e funcionalidades.

Assim, neste capítulo serão apresentados alguns circuitos integrados, não se pretendendo aprofundar ou esgotar o assunto. Os circuitos integrados apresentados aqui podem ser aplicados aos quatro grupos de conversores estudados, que são os conversores ca-cc, cc-cc, cc-ca e ca-ca.

### 2.2 Vantagens no uso de circuitos integrados

Em síntese, algumas vantagens no uso de circuitos integrados são:

- Simplificação nos circuitos;
- Redução no espaço, peso e volume ocupados;
- Simplificação no projeto dos circuitos;
- Redução de custo do produto em desenvolvimento;
- Simplificação no desenho das placas de circuito impresso;
- Facilidade na manutenção dos circuitos;
- Aumento da confiabilidade dos circuitos;
- Diminuição de erros de montagem;
- Aumento de velocidade pela proximidade das conexões;
- Diminuição de perdas pela proximidade das conexões.

### 2.3 Desvantagens no uso de circuitos integrados

Entre as principais desvantagens de seu utilizar circuitos integrados se tem:

- Troca do componente inteiro, ao ocorrer dano em parte do circuito integrado;

- Necessidade de conhecimentos técnicos mais elaborados;
- Menor potência de dissipação;
- Manutenção mais complexa;
- Aumento de interferências eletromagnéticas pela proximidade das conexões.

## 2.1 Exemplo de aplicação de circuitos integrados

As Figura 1 e Figura 2 mostram exemplos de conversores cc-cc com circuitos integrados auxiliando na implementação do conversor Buck. Nestes casos percebe-se que são utilizados diversos componentes externamente ao circuito integrado, isto é, as funções desempenhadas pelos componentes integrados são restringidas a parte do circuito, normalmente os estágios de controle, comando, modulação, proteção e eventualmente o interruptor de potência. Em geral, é comum se utilizar externamente ao circuito integrado os elementos do filtro (capacitores e indutores), por exemplo.

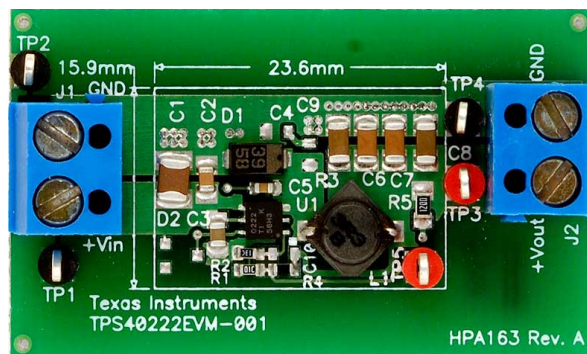


Figura 1 – Exemplo de conversor cc-cc Buck comercial.

Fonte: [www.ti.com](http://www.ti.com). Acesso em: 31/08/2014.



Figura 2 – Exemplo de conversor cc-cc Buck comercial.

Fonte: <https://www.filipeflop.com>. Acesso em: 07/10/2020.

## 3 Circuitos Integrados para Conversores CA-CC e CA-CA

### 3.1 Introdução

Os circuitos integrados para conversores ca-cc (retificadores) e ca-ca não são tão diversos como para conversores cc-cc. Assim, aqui serão apresentados alguns exemplos de componentes mais utilizados, não pretendendo-se fazer uma revisão de todas as possibilidades ou disponibilidades comerciais na atualidade, mas sim, introduzir o assunto e permitir que o leitor prossiga conforme seu interesse e necessidades técnicas futuras.

### 3.2 Circuitos retificadores

A associação de quatro diodos na forma de ponte retificadora pode ser considerado como uma integração de componentes, visto se ter mais que um elemento de circuito no mesmo encapsulamento. Assim, na Figura 3 se mostra um exemplo de ponte retificadora com quatro diodos de silício com capacidade para 10 A e 1000 V.

De maneira geral, se entende por circuito integrado o componente eletrônico que possui diversos componentes e funcionalidades de circuitos elétricos e eletrônicos integrados no mesmo encapsulamento (pastilha) e montados sobre o mesmo substrato semicondutor. Assim, a rigor, o encapsulamento integrado de semicondutores de potência poderia ou não caracterizar um circuito integrado. De todo modo, não se pretende aqui adentrar nesta seara, exemplificando-se os componentes apresentados como casos de integração que visam simplificar a montagem e otimizar o desenho de placas de circuito impresso, por exemplo.

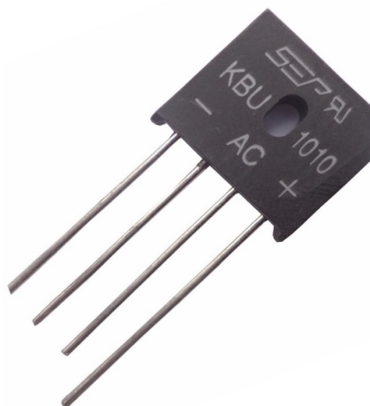


Figura 3 – Ponte retificadora com diodos de silício.

Fonte: <https://www.filipeflop.com>. Acesso em: 07/10/2020.



Figura 4 – Ponte retificadora trifásica.

Fonte: <https://www.semikron.com>. Acesso em: 07/10/2020.

### 3.1 TCA 785

O circuito integrado TCA 785 é utilizado para implementação de conversores ca-cc e ca-ca com controle por ângulo de fase. A Figura 5 mostra

As principais funcionalidades deste circuito integrado são:

- Realiza o acionamento de tiristores;
- Implementa o circuito de sincronismo;
- Possibilidade de utilizar em circuitos trifásicos;
- Corrente de saída de 250 mA;
- Ampla faixa de variação de temperatura;
- Tensão de alimentação até 18 V.

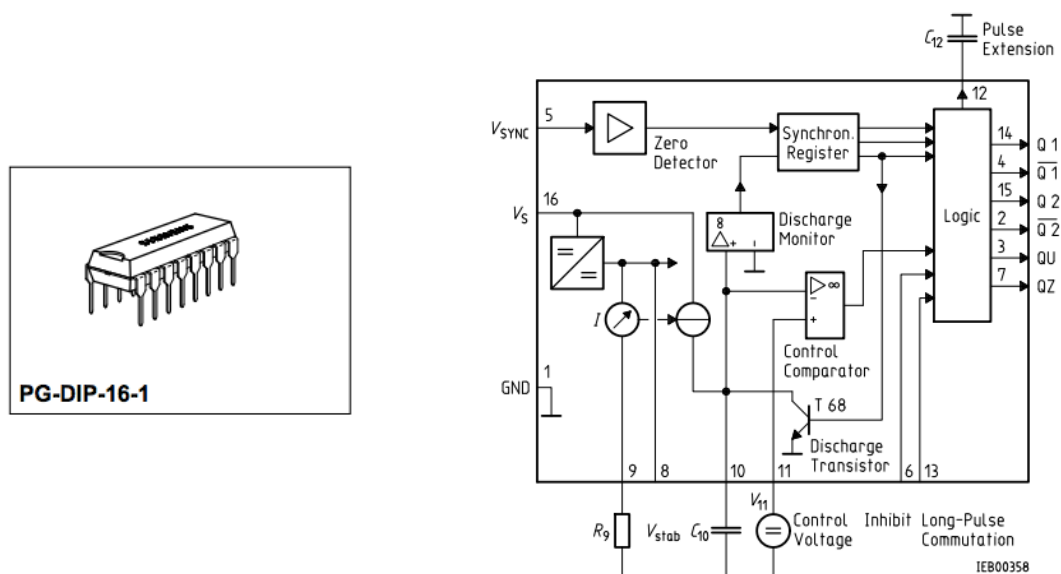


Figura 5 – Encapsulamento e diagrama de blocos do TCA 785.

Fonte: <http://www.farnell.com>. Acesso em: 07/10/2020.

### 3.2 MOC3010/FOD4118

O circuito integrado TCA 785 foi muito utilizado no século passado, na implementação de circuitos discretos e analógicos. Atualmente com o uso mais intenso de circuitos digitais, microcontrolados e/ou microprocessados, incorporando interface com o usuário, funcionalidades de comunicação, controle e comando, além de automação internet das coisas (IOT), se utilizam com frequência circuitos integrados baseados em optoacopladores específicos para acionamento de tiristores, por exemplo. Assim, os circuitos integrados da família MOC, no caso o MOC3010, conforme mostrado na Figura 6, pode fazer o acionamento de tiristores, sejam SCRs ou TRIACs. Na Figura 7 mostra-se um circuito exemplo com o circuito integrado da família FOD, que o fabricante sugere em substituição a família MOC, por exemplo.

As principais funcionalidades destes circuitos integrados são:

- Realiza o acionamento de tiristores;
- Isolação óptica;
- Acionamento na passagem por zero (*zero crossing*) ou não (*fase aleatória*);
- Tensão e operação de 250 ou 400 V;
- Simplicidade de uso.

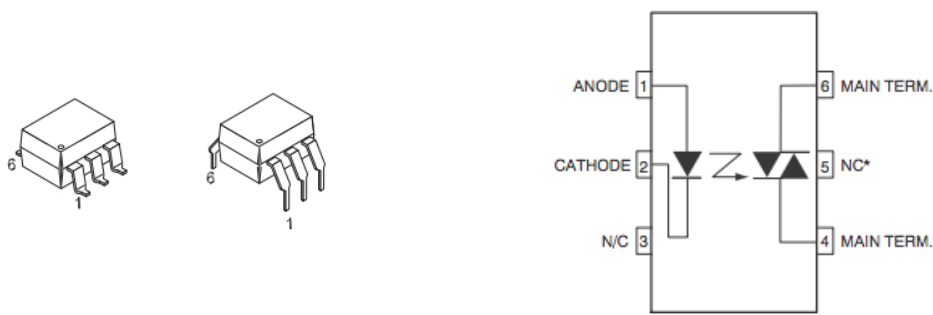


Figura 6 – Encapsulamento e diagrama de blocos do MOC3010.

Fonte: <https://www.onsemi.com>. Acesso em: 07/10/2020.

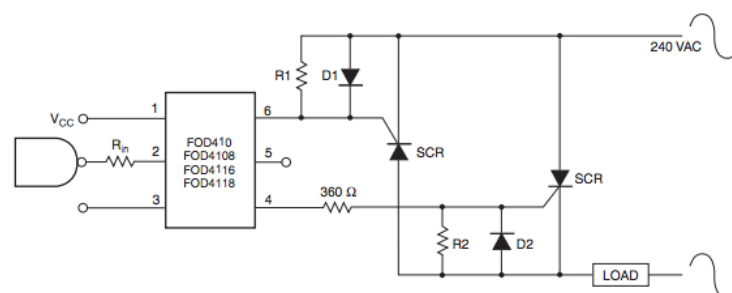


Figura 7 – Exemplo de circuito com FOD4118.

Fonte: <https://www.onsemi.com>. Acesso em: 07/10/2020.

## 4 Circuitos Integrados para Conversores CC-CC

### 4.1 Introdução

Os circuitos integrados para conversores cc-cc são diversos e existem diferentes modelos disponíveis no mercado. Estes circuitos integrados tiveram grande desenvolvimento no século passado a partir de circuitos dedicados para fontes chaveadas e para conversores cc-cc para as aplicações relacionadas com a corrida espacial.

Apresentaremos a seguir alguns modelos, dentre as inúmeras possibilidades e configurações possíveis atualmente.

### 4.2 SG2524/SG3524

O SG1524 foi o primeiro circuito integrado com modulação por largura de pulsos (PWM) para conversores cc-cc. Atualmente a Texas Instruments produz o SG2524 e o SG3524, evoluções daquela primeira versão dos anos 70.

Estes circuitos integrados ainda são produzidos devido a sua versatilidade e facilidade de uso, podendo serem utilizados em conversores cc-cc isolados ou não, em ampla faixa de frequências de operação e tensão de alimentação. O diagrama de blocos deste circuito integrado é mostrado na Figura 8.

As principais características deste circuito integrado são:

- Tensão de alimentação: 8 a 40 V;
- Frequência de operação: até 450 kHz;
- Razão cíclica: 45% em cada saída;
- Comparador para proteção de sobrecorrente;
- Possibilidade de operação em malha aberta e em malha fechada;
- Partida suave.

### 4.3 UC3525A/UC3527A

Os circuitos integrados UC1525A, UC1527A, UC2525A, UC2527A, UC3525A, e UC3527A são versões de melhor desempenho do que o SG3524, além de permitirem conexões diferentes em suas saídas, conforme mostrado na Figura 9. Possuem também conexões para sincronização, caso sejam utilizados diversos componentes em um mesmo conversor.

As principais características deste circuito integrado são:

- Tensão de alimentação: 8 a 40 V;

- Frequência de operação: 100 a 450 kHz;
- Razão cíclica: 45% em cada saída;
- Sinais de comando: com sobreposição de sinais no UC3527;
- Comparador para proteção de sobrecorrente;
- Possibilidade de operação em malha aberta e em malha fechada;
- Partida suave.

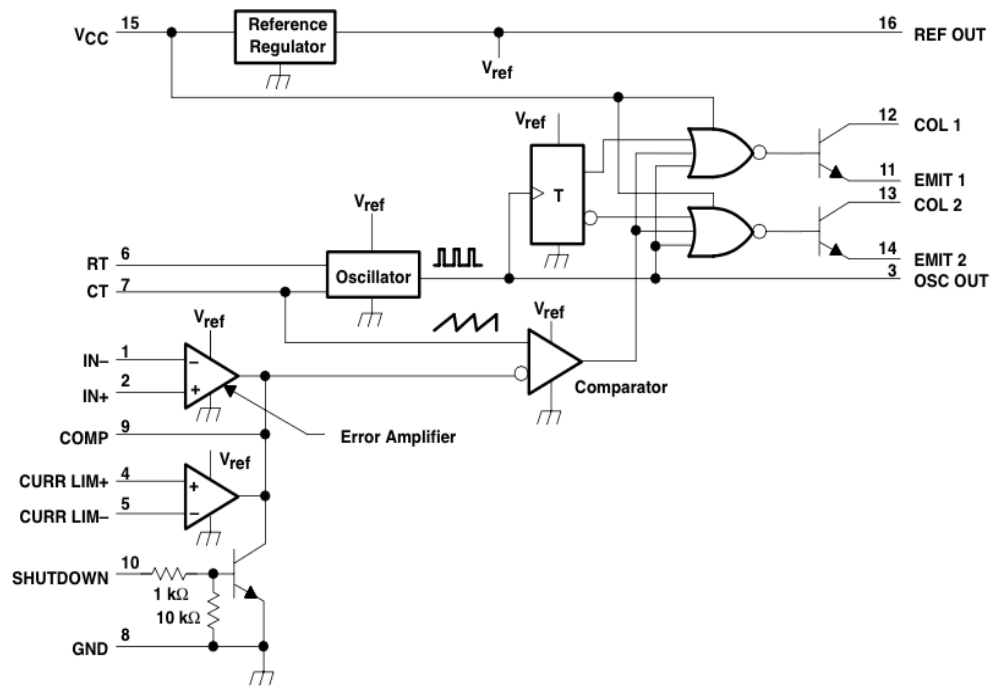


Figura 8 – Diagrama de blocos do SG2524/SG3524.

Fonte: [www.ti.com](http://www.ti.com). Acesso em: 25/11/2014.

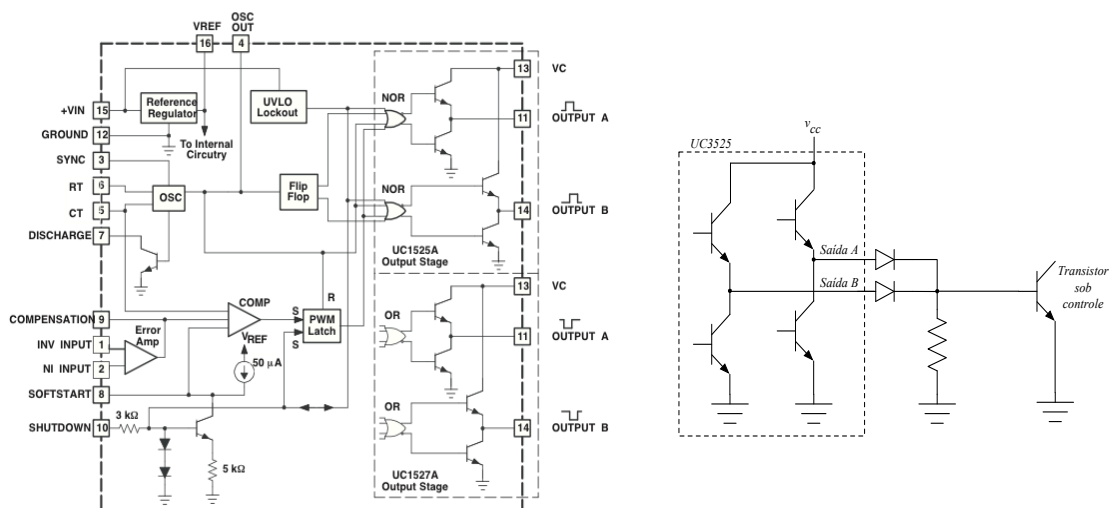


Figura 9 – Diagrama de blocos e conexão das saídas do UC3525A/UC3527A.

Fonte: [www.ti.com](http://www.ti.com). Acesso em: 25/11/2014.

#### 4.4 FSQ500L

A série de circuitos integrados FSQ500 da Fairchild Semiconductor foi desenvolvida para aplicações em fontes chaveadas, visto estes componentes serem para tensões altas e baixas correntes. No entanto, os mesmos podem ser utilizados em qualquer aplicação, bastando se projetar o circuito de acordo com as especificações do componente. Este circuito integrado é mostrado na Figura 10 e na Figura 11 se mostra um exemplo de fonte chaveada com o FSQ500L, isolada, com tensão de saída de 5 V e corrente de 400 mA, com potência da ordem de 2 W.

As principais características deste circuito integrado são:

- Tensão de alimentação: menor que 10 V;
- Frequência de operação: 130 kHz;
- Transistor de potência, do tipo MOSFET integrado;
- Tensão do MOSFET: 700 V;
- Resistência do MOSFET: 25 a 41  $\Omega$ ;
- Proteção de corrente;
- Proteção de temperatura.

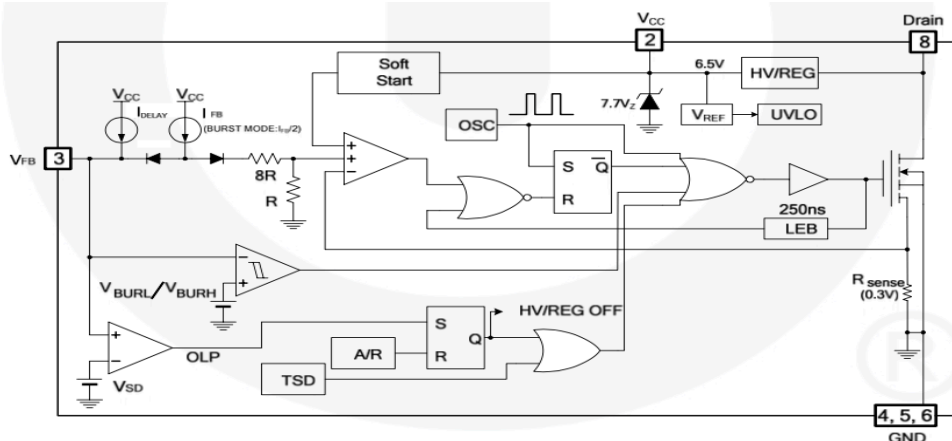


Figura 10 – Diagrama de blocos do FSQ500L.

Fonte: [www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com). Acesso em: 25/11/2014.

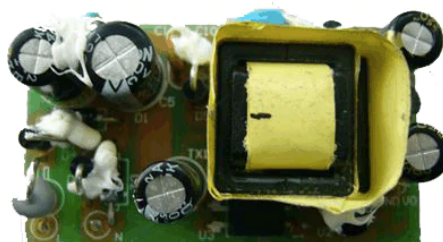


Figura 11 – Exemplo de fonte chaveada com o FSQ500L.

Fonte: [www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com). Acesso em: 07/10/2020.

## 4.5 VIPER22A

A exemplo da série de circuitos integrados FSQ500 da Fairchild Semiconductor, o integrado VIPER22A da ST também foi desenvolvido para aplicações em fontes chaveadas. Este componente possui funcionalidades semelhantes ao FSQ500N. Este circuito integrado é mostrado na Figura 12 e na Figura 13 se mostra um exemplo de fonte chaveada não-isolada de 1,44 W, com tensão de entrada universal de 85 a 265 V e saída com 12 V e 120 mA.

As principais características deste circuito integrado são:

- Tensão de alimentação: 9 até 38 V;
- Frequência de operação: 60 kHz;
- Transistor de potência, do tipo MOSFET integrado;
- Tensão do MOSFET: 730 V;
- Resistência do MOSFET: 15 a 31  $\Omega$ ;
- Proteção de corrente;
- Proteção de temperatura.

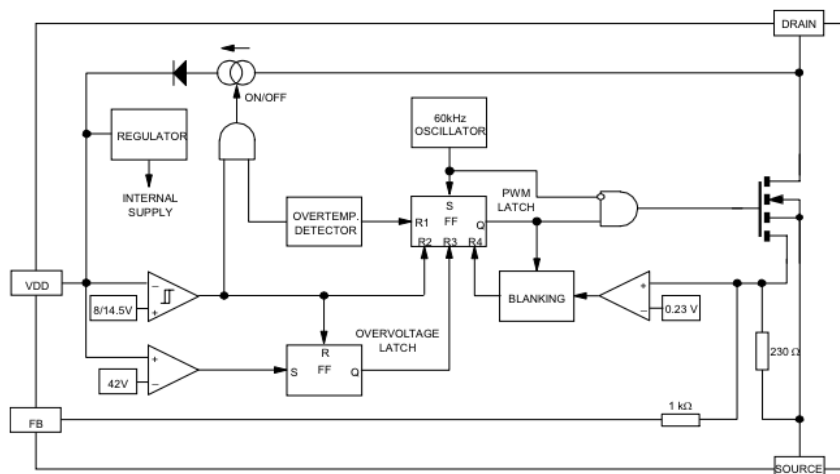


Figura 12 – Diagrama de blocos do VIPER22A.

Fonte: [www.st.com](http://www.st.com). Acesso em: 25/11/2014.



Figura 13 – Exemplo de fonte chaveada não-isolada com o VIPER22A.

Fonte: [www.st.com](http://www.st.com). Acesso em: 07/10/2020.

## 4.6 LM2575

O circuito integrado LM2575, inicialmente desenvolvido e produzido pela National Semiconductor, agora Texas Instruments, é um regulador chaveado, facilmente utilizado em circuitos reguladores de tensão, semelhantes aos lineares, da família LM78xx.

Por ser um componente simples de utilizar, dispensando um projeto complexo, o mesmo é amplamente utilizado para a construção de conversores cc-cc, normalmente abaixadores de tensão, conforme mostrado na Figura 14. Por sua vez, o circuito integrado LM2577 é utilizado para a implementação de conversores cc-cc elevadores de tensão.

As principais características deste circuito integrado são:

- Tensão de operação: até 40 V na versão padrão e 60 V na versão HV;
- Frequência de operação: 52 kHz;
- Transistor de potência integrado;
- Versões com tensão fixa de 3,3, 5, 12 e 15 V e com tensão ajustável de saída;
- Corrente de saída de 1 A;
- Proteção de corrente;
- Proteção de temperatura.

Exemplos de conversores cc-cc implementados com os circuitos integrados LM2575 e LM2577 são mostrados nas Figura 15 e Figura 16, para conversores Buck (abaixador) e Boost (elevador), respectivamente.

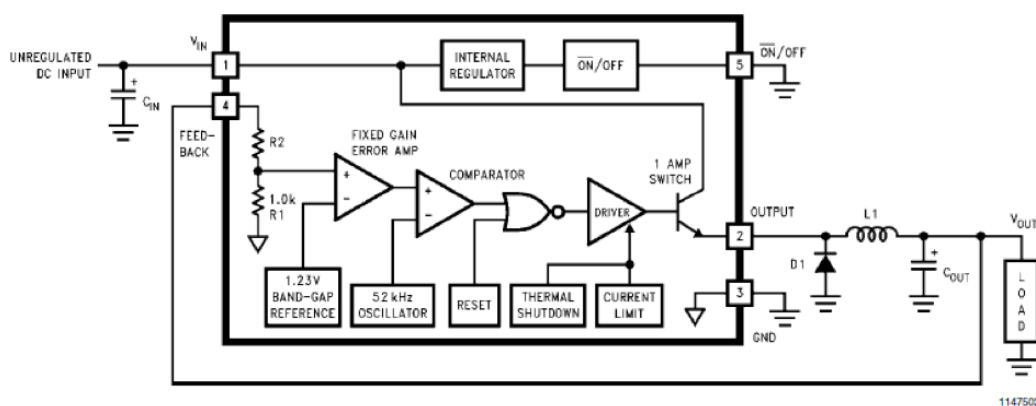


Figura 14 – Diagrama de blocos do LM2575.

Fonte: [www.st.com](http://www.st.com). Acesso em: 25/11/2014.



Figura 15 – Exemplo de conversor cc-cc abaixador com o LM2575.

Fonte: [www.ebay.com](http://www.ebay.com). Acesso em: 25/11/2014.



Figura 16 – Exemplo de conversor cc-cc elevador com o LM2577.

Fonte: [www.prodctodc.com](http://www.prodctodc.com). Acesso em: 25/11/2014.

## 5 Circuitos Integrados para Conversores CC-CA

### 5.1 Introdução

Os circuitos integrados para conversores cc-ca (inversores) são comuns tanto na parte de acionamento dos interruptores (*drivers* de acionamento) como nos módulos dos semicondutores também, incluindo aí os conversores monofásicos e trifásicos.

Apresentaremos a seguir alguns exemplos visando introduzir o assunto e mostrar o potencial uso destes componentes.

### 5.2 L293

O circuito integrado L293 é muito utilizado no acionamento de motores de corrente contínua, motores de passo e outras aplicações de eletrônica. Além disso, o mesmo pode ser utilizado para implementação de inversores, conforme mostrado na Figura 17.

Estes circuitos integrados é conhecido e utilizado na implementação de circuitos de

acionamento de motores cc, na configuração ponte completa, conhecido comumente como ponte H, como está mostrado no exemplo de aplicação da Figura 18.

As principais características deste circuito integrado são:

- Tensão de alimentação: 4,6 a 36 V;
- Possui dois circuitos ponte completa internamente;
- Corrente de saída de 1 A ou 2 A por canal;
- Diodos de roda-livre no modelo L293D;
- Fontes separadas para lógica e para potência.

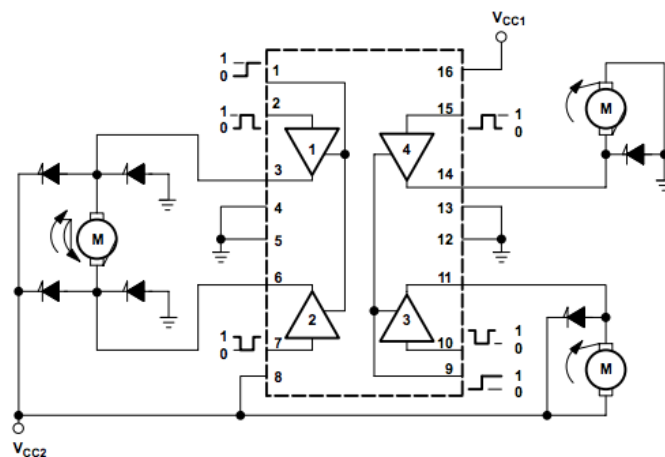


Figura 17 – Diagrama de blocos do L293.

Fonte: [www.ti.com](http://www.ti.com). Acesso em: 07/10/2020.

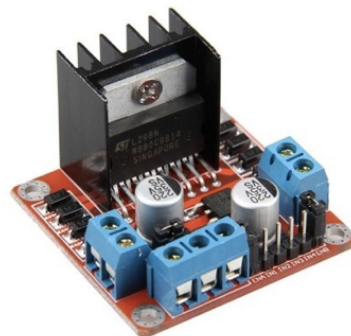


Figura 18 – Exemplo de conversor com o L293.

Fonte: <https://www.curtocircuito.com.br>. Acesso em: 03/06/2020.

### 5.3 IR2110

O circuito integrado IR2110 é utilizado para acionamento de interruptores em inversores de tensão e corrente, tendo entradas independentes para cada interruptor, conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 19 e circuito típico da Figura 20.

As principais características deste circuito integrado são:

- Tensão de operação de 500 ou 600 V (modelo IR2113);
- Corrente de saída de 2 A;
- Tensão de saída entre 10 e 20 V;
- Tempo para ligar e desligar o sinal da ordem de 120 e 94 ns.

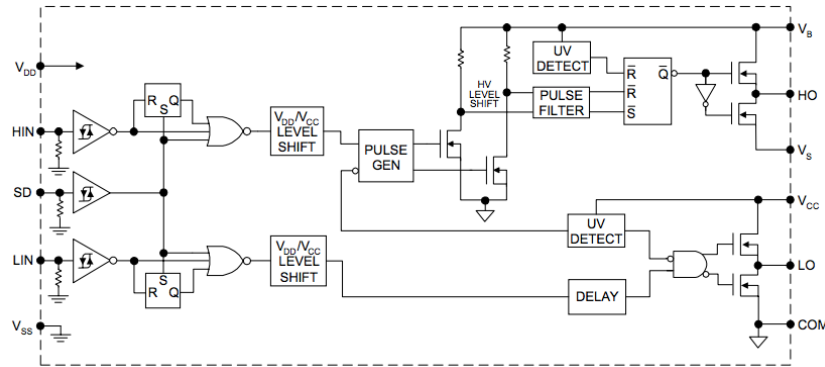


Figura 19 – Diagrama de blocos do IR2110.

Fonte: <https://www.infineon.com>. Acesso em: 07/10/2020.

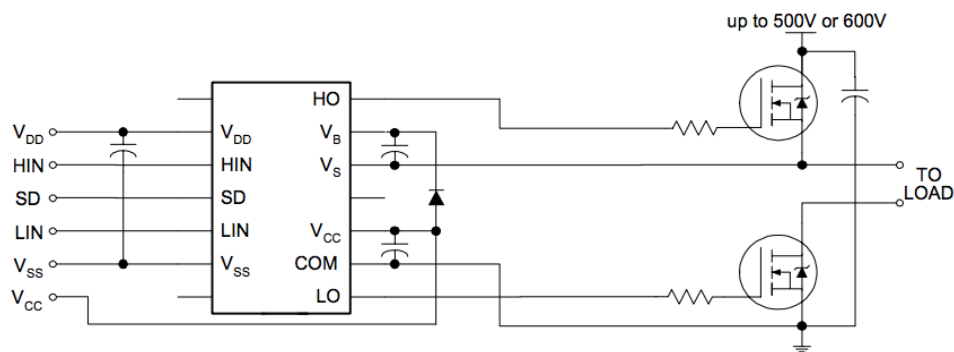


Figura 20 – Circuito típico de inversor com o IR2110.

Fonte: <https://www.infineon.com>. Acesso em: 07/10/2020.

## 5.4 IR2111

O circuito integrado IR2111, do mesmo modo que o IR2110, também é utilizado para o acionamento de interruptores em inversores de tensão e corrente, tendo apenas uma entrada, conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 21 e circuito típico da Figura 22.

As principais características deste circuito integrado são:

- Tensão de operação de 600 V;
- Corrente de saída de 200 ou 420 mA;
- Tensão de saída entre 10 e 20 V;
- Tempo morto típico de 650 ns.

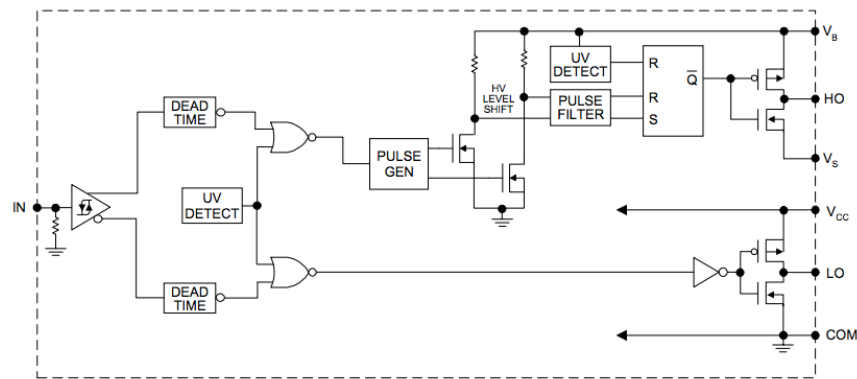


Figura 21 – Diagrama de blocos do IR2111.

Fonte: <https://www.infineon.com>. Acesso em: 07/10/2020.

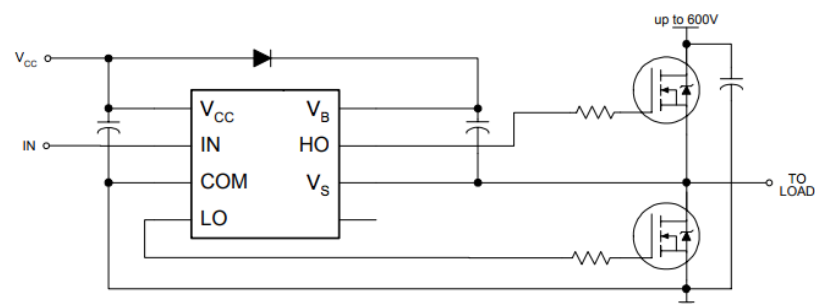


Figura 22 – Circuito típico de inversor com o IR2111.

Fonte: <https://www.infineon.com>. Acesso em: 07/10/2020.

## 5.5 IRS26310DJ

O circuito integrado IRS26310DJ é um *driver* de acionamento de inversores trifásicos, podendo prover o comando de seis interruptores simultaneamente, conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, sendo um componente utilizado na linha branca, por exemplo, na implementação de inversores para máquinas de lavar roupa.

As principais características deste circuito integrado são:

- Trifásico
- Tensão de operação de 600 V;
- Corrente de saída de 200 ou 350 mA;
- Tensão de saída entre 12 e 20 V;
- Tempo morto típico de 290 ns;
- Entrada lógica de 3,3 V;
- Proteção de sobretensão;
- Proteção de sobrecorrente;
- Acionamento de MOSFET ou IGBT.

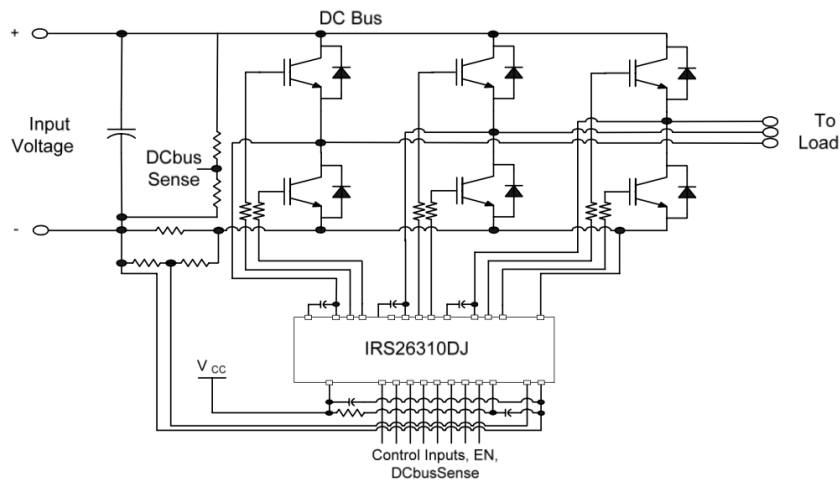


Figura 23 – Diagrama de blocos do IRS26310DJ.

Fonte: <https://www.infineon.com>. Acesso em: 07/10/2020.

## 6 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

**ER 01.** Cite duas vantagens de se utilizar circuitos integrados em eletrônica.

Dentre as vantagens de se utilizar circuitos integrados em eletrônica se tem: simplificação dos circuitos, redução de tamanho e peso.

**ER 02.** Cite duas desvantagens de se utilizar circuitos integrados em eletrônica.

Necessidade de conhecimentos técnicos e descarte do componente inteiro caso danifique parte do mesmo.

**ER 03.** Cite um circuito integrado utilizado em conversores ca-cc e ca-ca.

MOC3011.

**ER 04.** Cite dois circuitos integrados utilizados em conversores cc-cc.

SG3524 e LM2575.

**ER 05.** Cite dois circuitos integrados utilizados em inversores de tensão.

IR2110 e IR2111.

### Exercícios Propostos

**EP 01.** Comente sobre as vantagens e desvantagens de se utilizar circuitos integrados em eletrônica.

**EP 02.** Cite duas características do circuito integrado LM2575.

**EP 03.** O circuito integrado FSQ500L é utilizado na implementação de qual grupo de conversores?

**EP 04.** Cite dois circuitos integrados utilizados em conversores cc-ca.

**EP 05.** Cite um circuito integrado utilizado em conversores ca-ca.

## 7 Atividade Avaliativa

### 7.1 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.** Comente sobre a utilização de circuitos integrados em termos de layout de placas de circuito impresso.

**AA 02.** Cite dois circuitos integrados utilizados em conversores cc-cc.

**AA 03.** Cite duas características do circuito integrado L293.

**AA 04.** Cite um circuito integrado utilizado como *driver* de acionamento de interruptores em conversores cc-ca.

**AA 05.** Cite um circuito integrado utilizado em conversores ca-cc e ca-ca no acionamento de tiristores.

AA 01. As placas de circuito impresso ficam mais simples com a utilização de circuitos integrados.  
AA 02. FSQ500L e VIPER22A.  
AA 03. Possui duas pontes H em seu interior e opera com tensão de alimentação até 36 V.  
AA 04. IR2111.  
AA 05. MOC3011.