

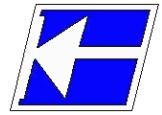
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO TÉCNICO INTEGRADO DE ELETRÔNICA

Eletrônica de Potência



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - CONVERSORES CC-CA

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2020.

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

Check-list

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

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

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

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

- () Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentações 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 por 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 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. Este é o quarto quadrante de operação na Figura 1.

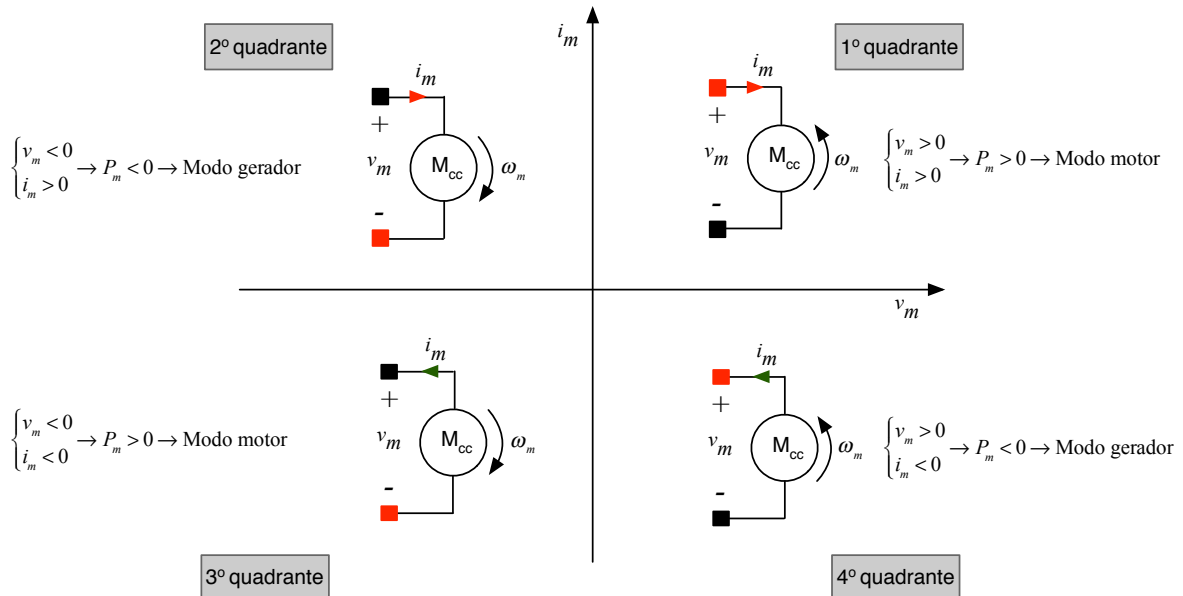


Figura 1 – Quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua.

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 zero 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.

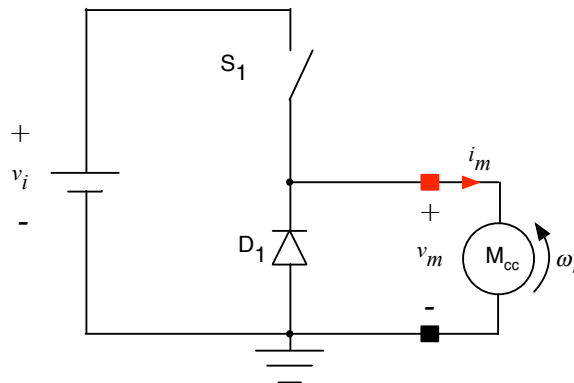


Figura 2 – Circuito simples para acionamento de um motor de corrente contínua.

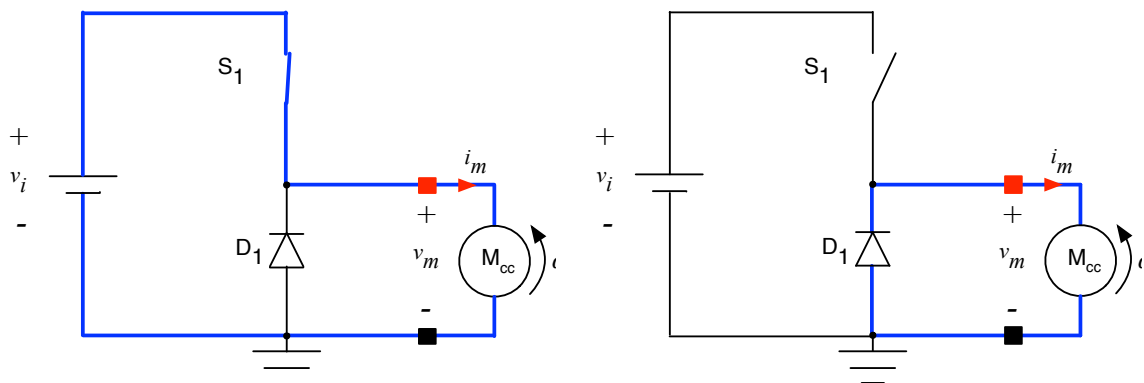


Figura 3 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com interruptor simples.

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.

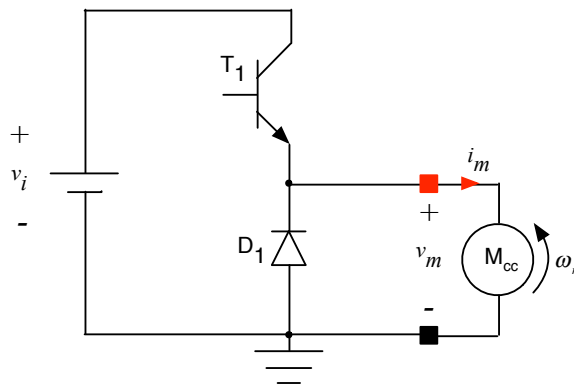


Figura 4 – Circuito com transistor para acionamento de um motor de corrente contínua.

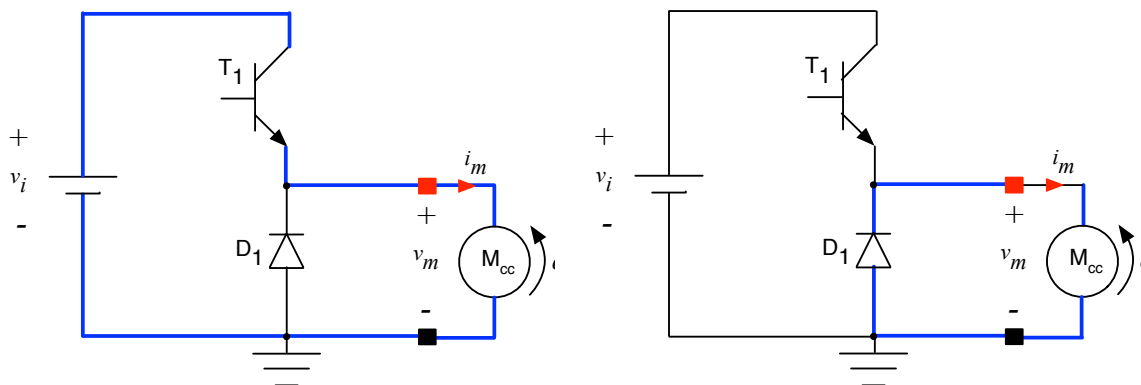


Figura 5 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com transistor.

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 saí 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 nanossegundos 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.

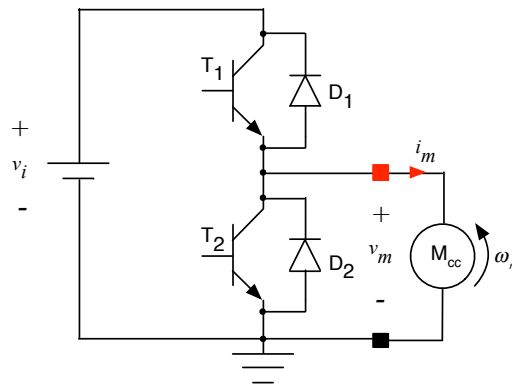


Figura 6 – Circuito para acionamento de um motor de corrente contínua e operação em dois quadrantes.

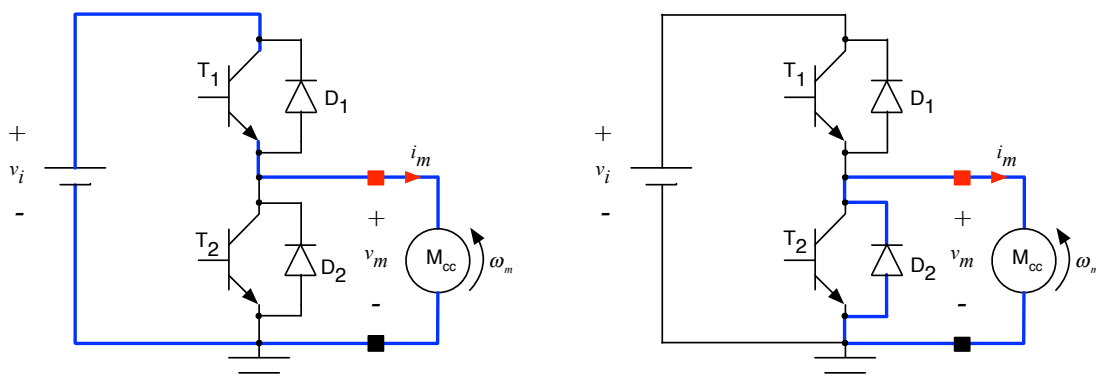


Figura 7 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com operação em dois quadrantes e funcionando como motor.

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 depende 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 os 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.

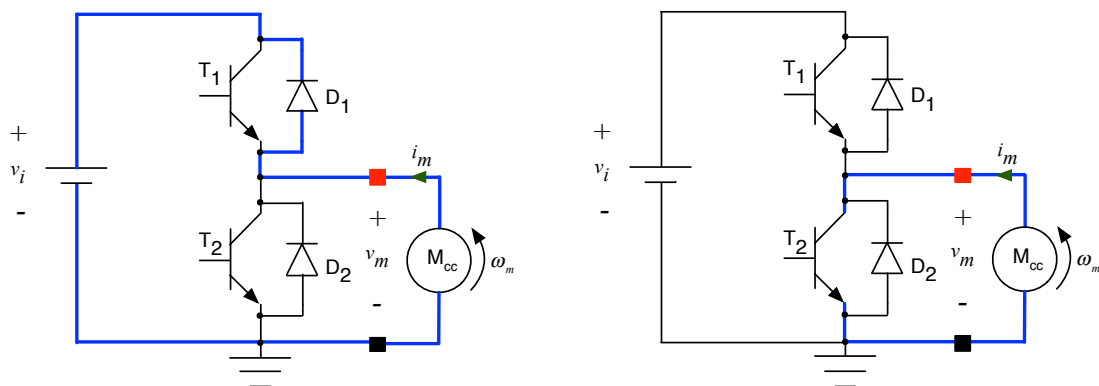


Figura 8 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com operação em dois quadrantes e funcionando como gerador.

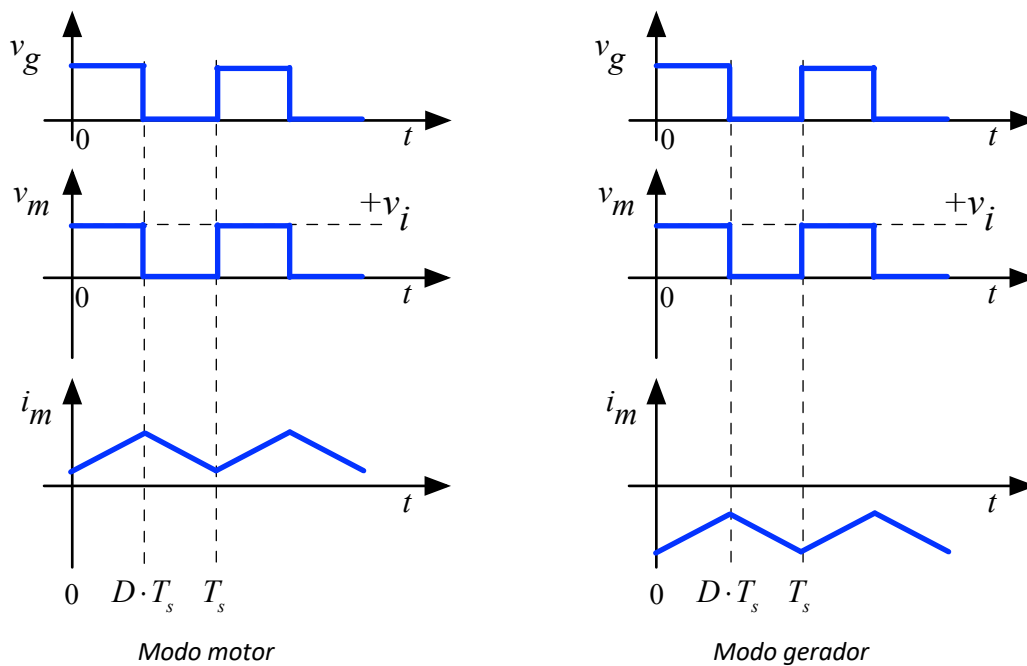


Figura 9 – Formas de onda do circuito de acionamento do motor com operação em dois quadrantes e funcionando como motor e gerador.

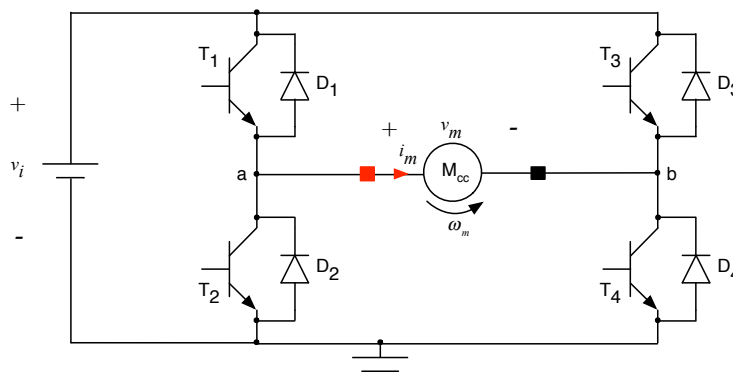


Figura 10 – Circuito para acionamento de um motor de corrente contínua e operação em quatro quadrantes.

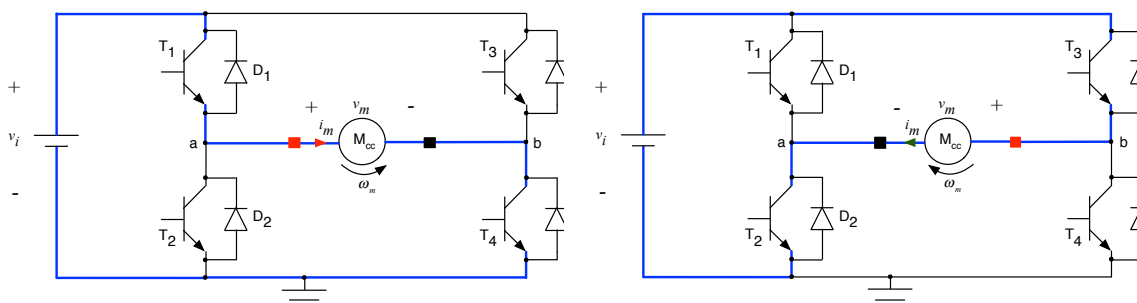


Figura 11 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com operação em quatro quadrantes e funcionando como motor nos dois sentidos de rotação.

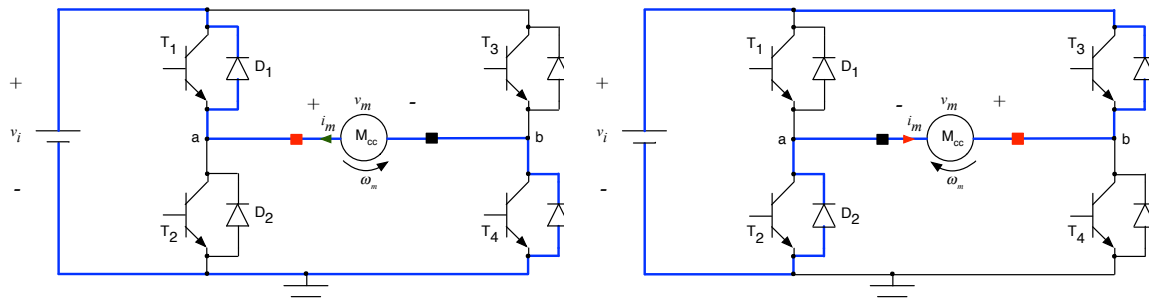


Figura 12 – Etapas de operação do circuito de acionamento do motor com operação em quatro quadrantes e funcionando como gerador nos dois sentidos de rotação.

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.

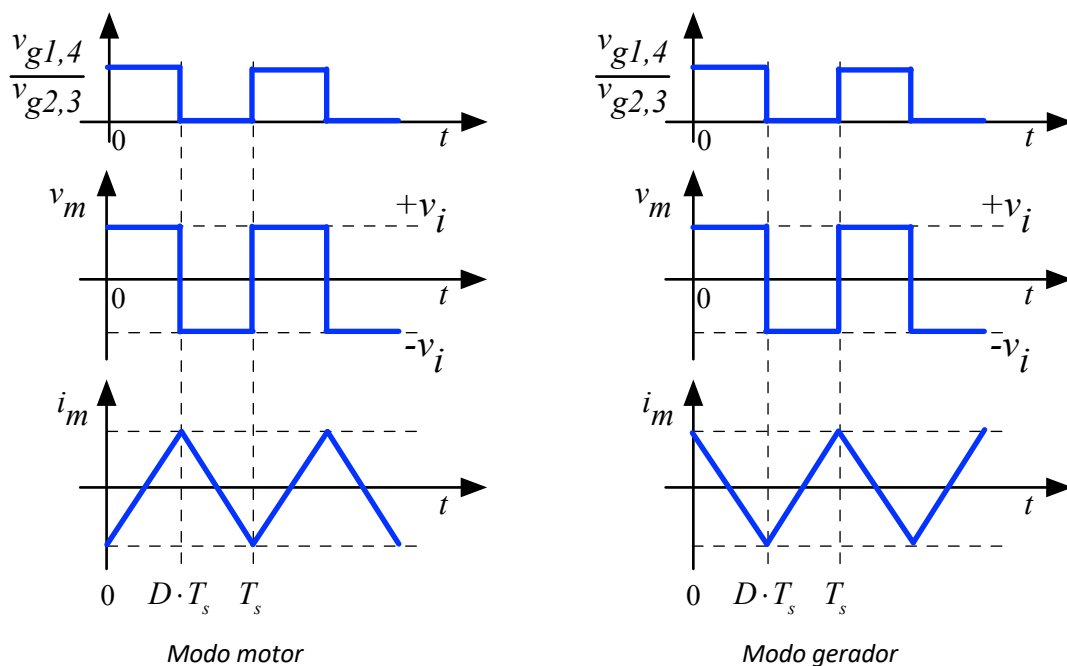


Figura 13 – Formas de onda do circuito de acionamento do motor com operação em dois quadrantes e funcionando como motor e gerador.

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 dada 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 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.

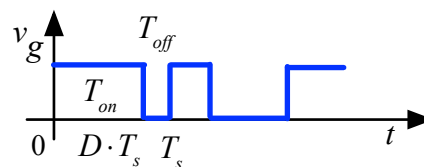


Figura 14 – Sinal de comando de um conversor cc-ca.

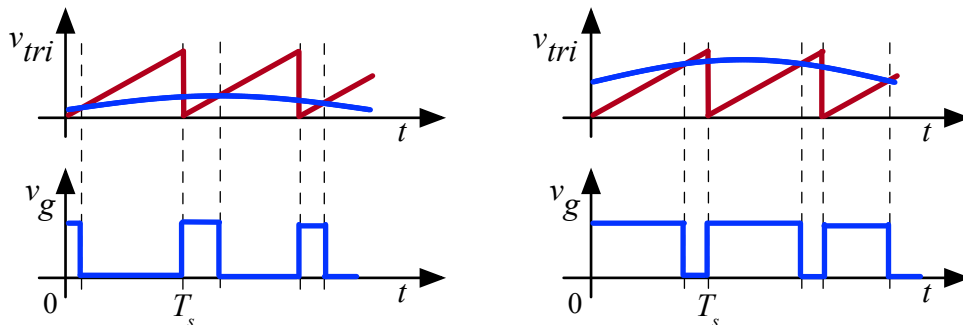


Figura 15 – Formas de onda para modulação por largura de pulsos (PWM) senoidal com diferentes amplitudes do sinal modulante.

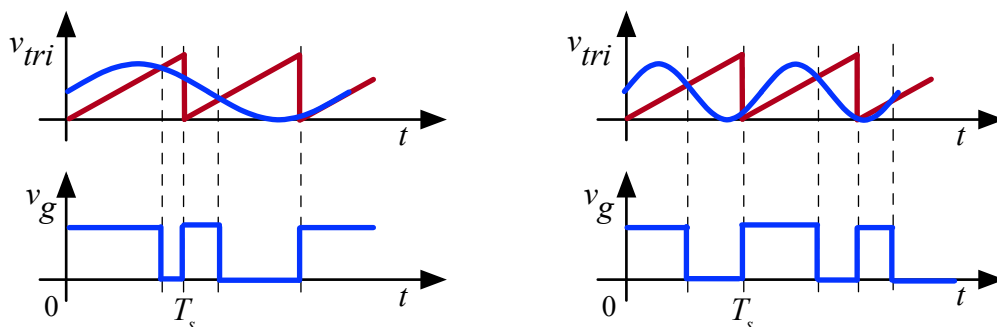


Figura 16 – Formas de onda para modulação por largura de pulsos (PWM) senoidal com diferentes frequências do sinal modulante.

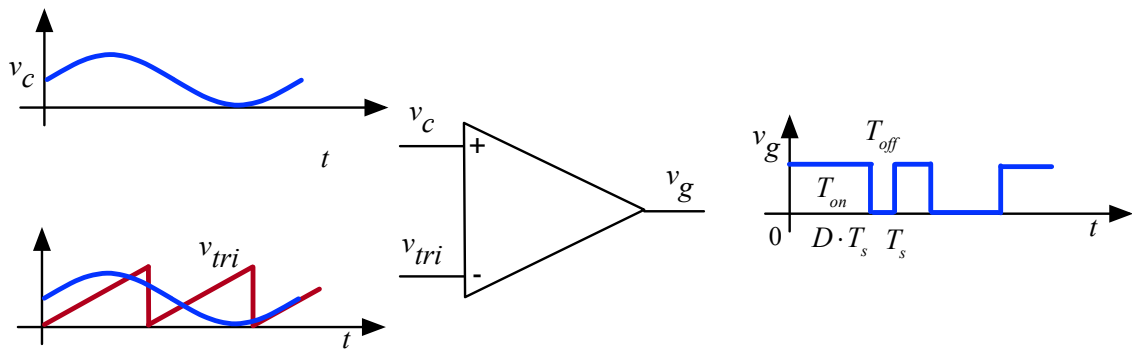


Figura 17 – Circuito discreto para modulação por largura de pulsos senoidal.

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.

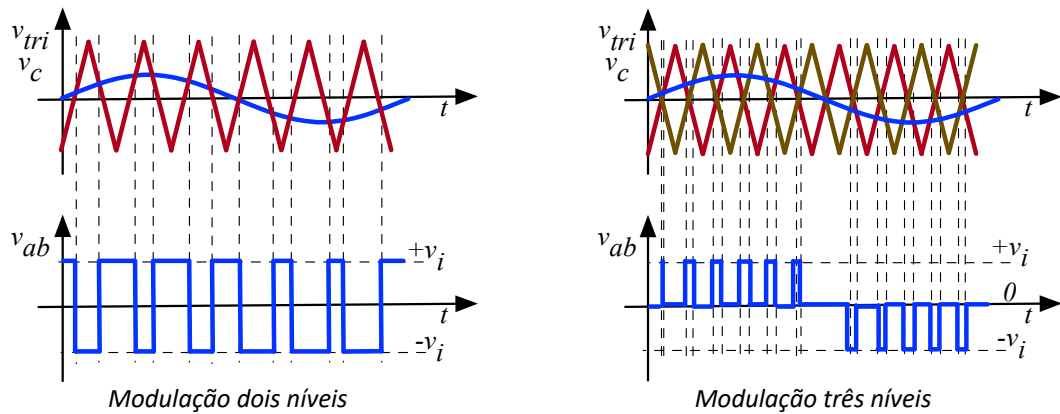


Figura 18 – Formas de onda para modulação dois níveis e três níveis.

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.

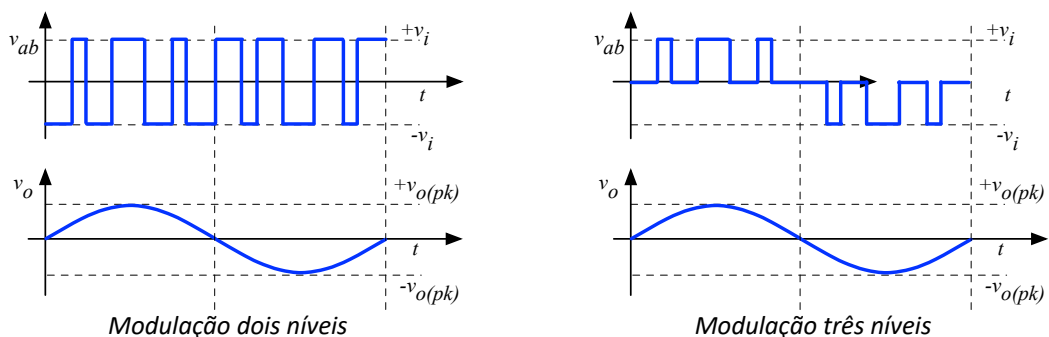


Figura 19 – Formas de onda para modulação dois níveis e três níveis.

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:

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

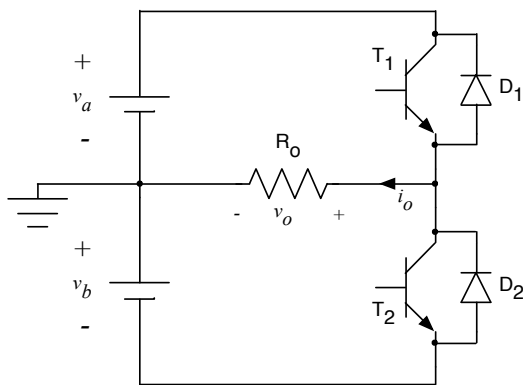


Figura 20 – Conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva.

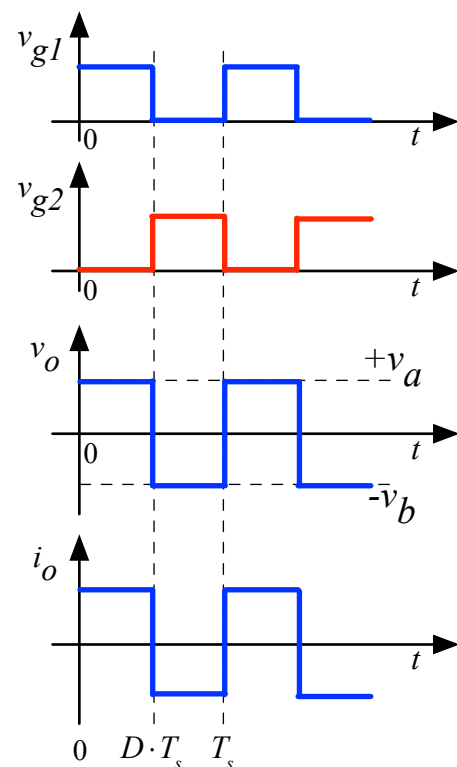


Figura 21 – Principais formas de onda do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva.

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 .

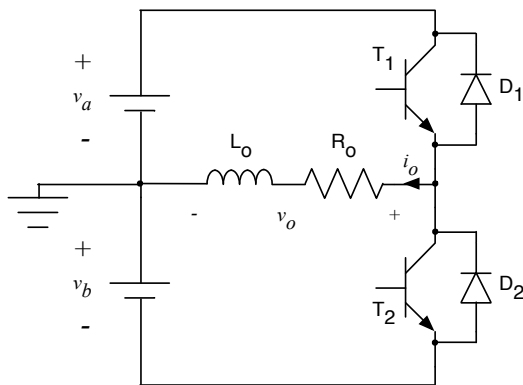


Figura 22 – Conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

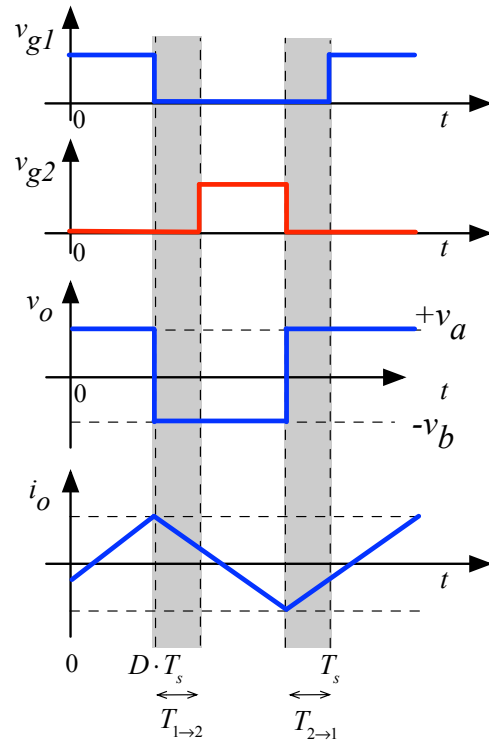


Figura 23 – Principais formas de onda do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

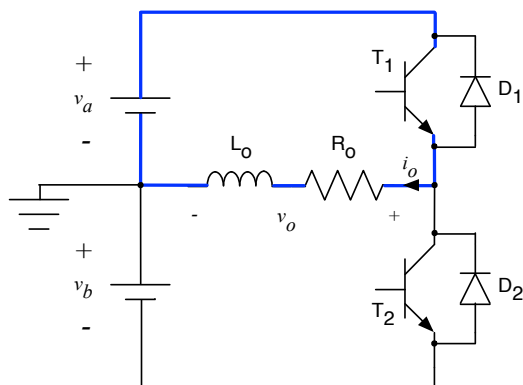


Figura 24 – Primeira etapa de operação do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

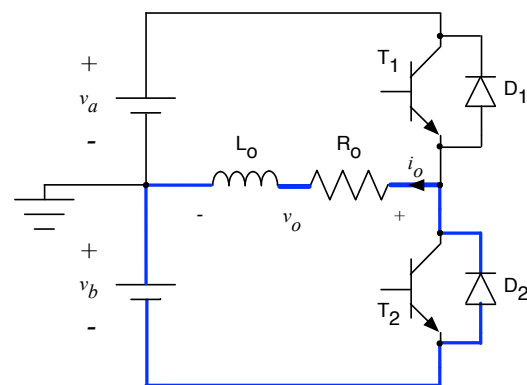


Figura 25 – Segunda etapa de operação do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

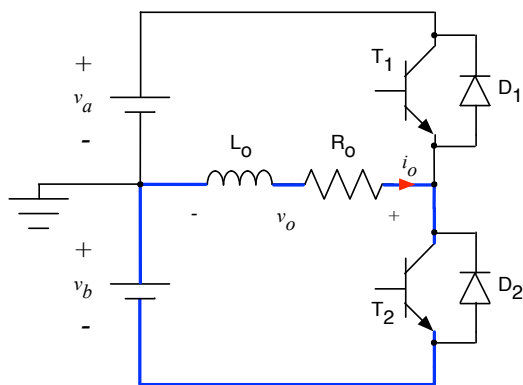


Figura 26 – Terceira etapa de operação do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

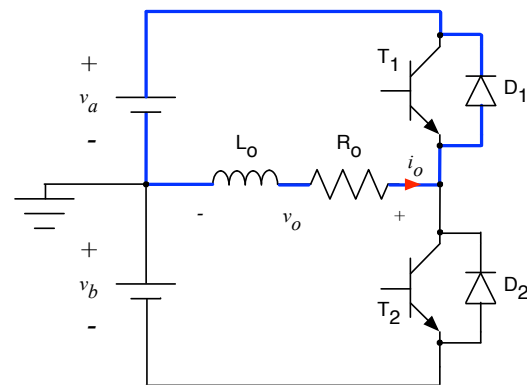


Figura 27 – Quarta etapa de operação do conversor cc-ca meia ponte com carga resistiva-indutiva.

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 2π 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:

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

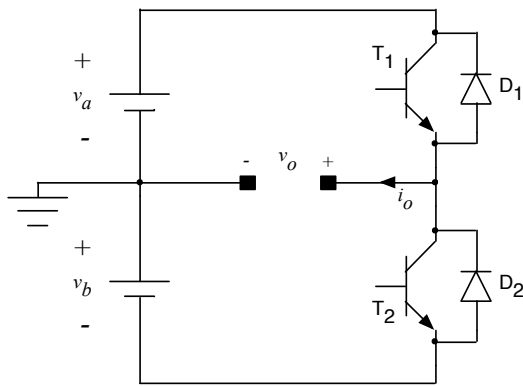


Figura 28 – Conversor cc-ca meia ponte onda quadrada.

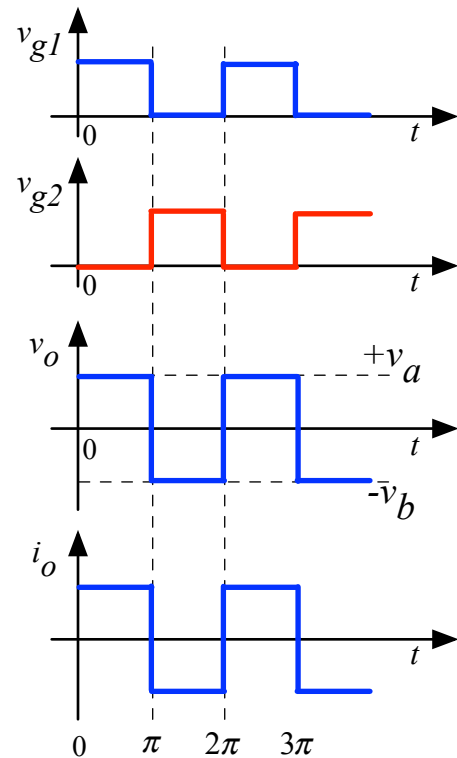


Figura 29 – Principais formas de onda do conversor meia ponte onda quadrada.

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.

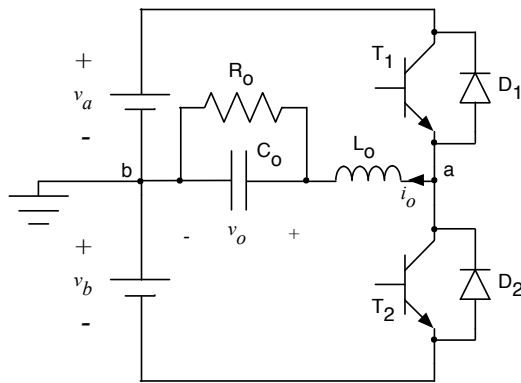


Figura 30 – Conversor cc-ca meia ponte PWM senoidal.

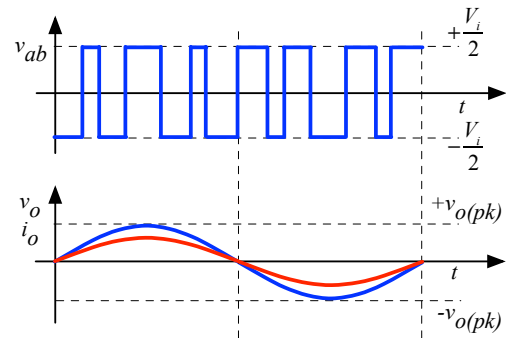


Figura 31 – Principais formas de onda do conversor meia ponte PWM senoidal.

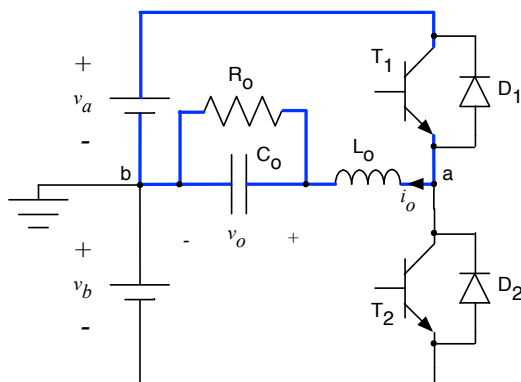
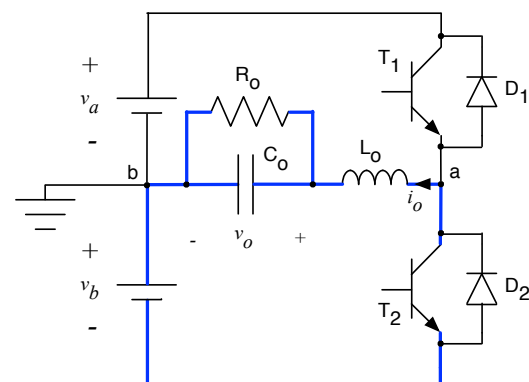


Figura 32 – Etapas de operação do conversor meia ponte PWM senoidal.



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:

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

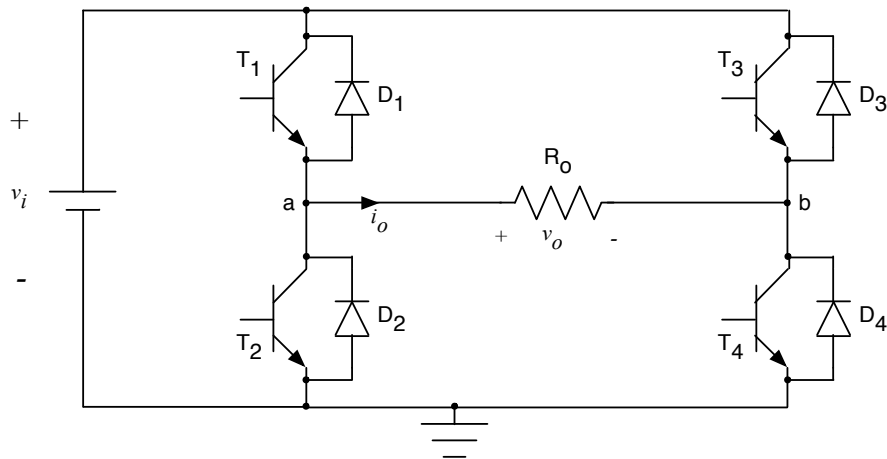


Figura 33 – Circuito do conversor cc-ca ponte completa onda quadrada.

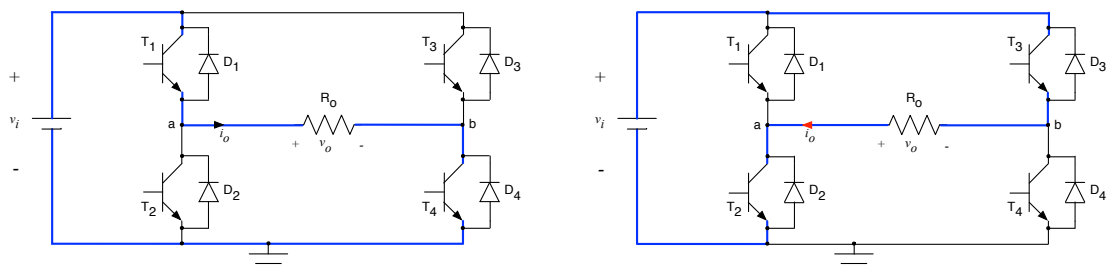


Figura 34 – Etapas de operação do conversor ponte completa onda quadrada.

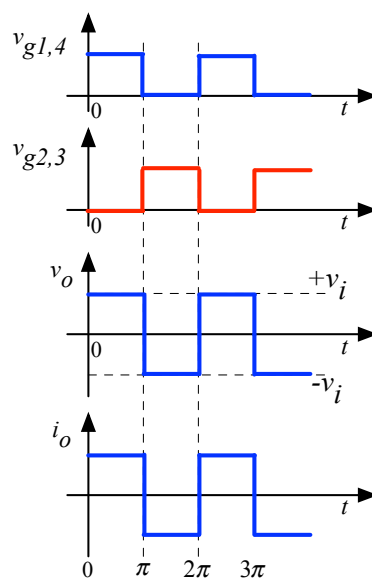


Figura 35 – Formas de onda do conversor ponte completa onda quadrada sem tempo morto.

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.

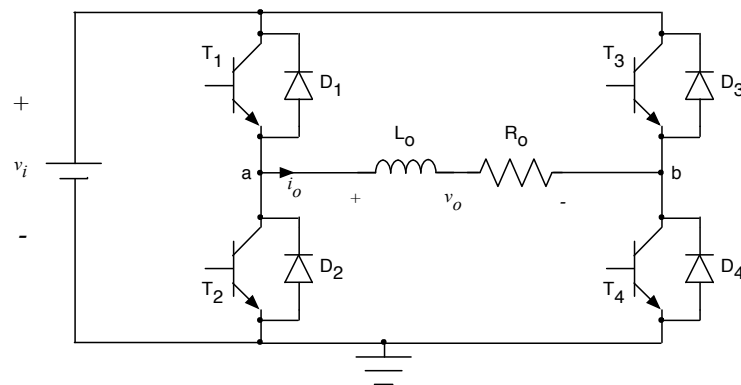


Figura 36 – Circuito do conversor cc-ca ponte completa onda quadrada com carga mista.

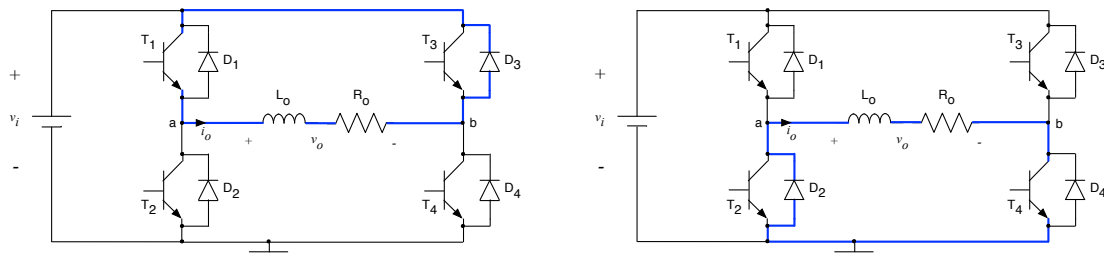


Figura 37 – Etapas de operação do conversor ponte completa onda quadrada com carga mista e corrente positiva na carga.

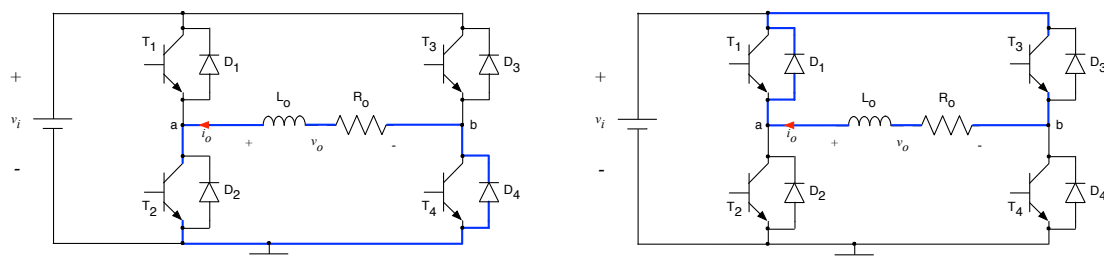


Figura 38 – Etapas de operação do conversor ponte completa onda quadrada com carga mista e corrente negativa na carga.

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 .

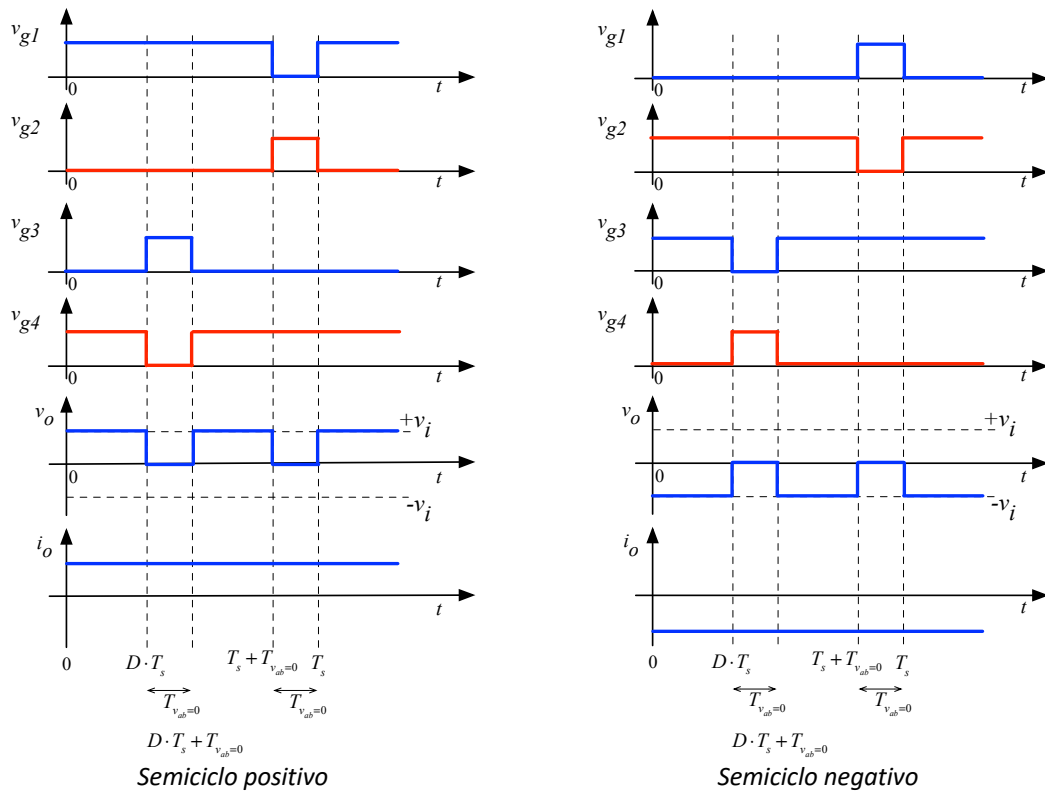


Figura 39 – Formas de onda do conversor ponte completa onda quadrada com tempo morto.

3.2 Conversor Ponte 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 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.

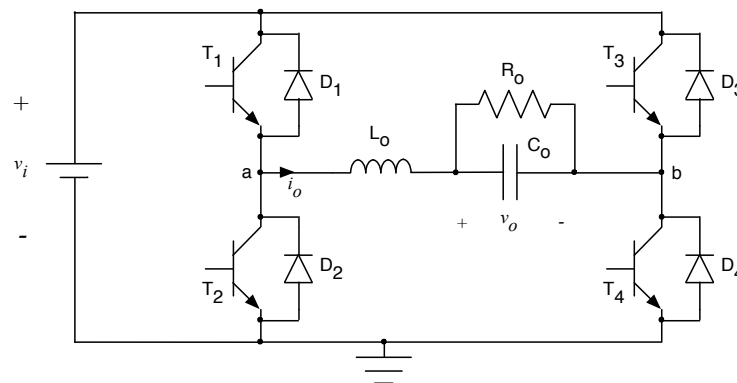


Figura 40 – Circuito do conversor cc-ca ponte completa PWM senoidal.

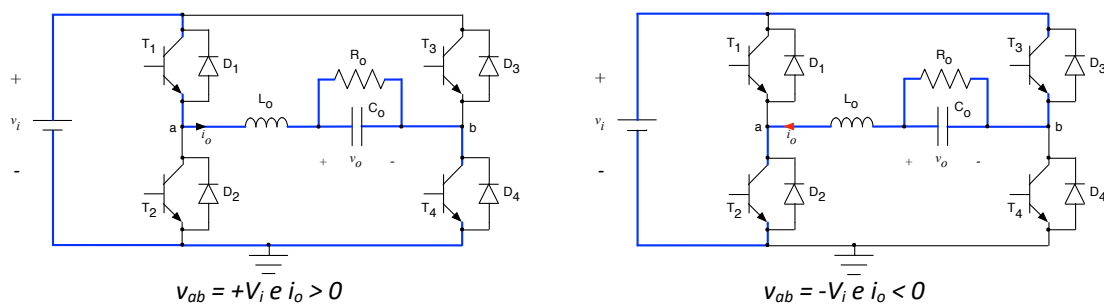


Figura 41 – Etapas de operação do conversor ponte completa PWM senoidal.

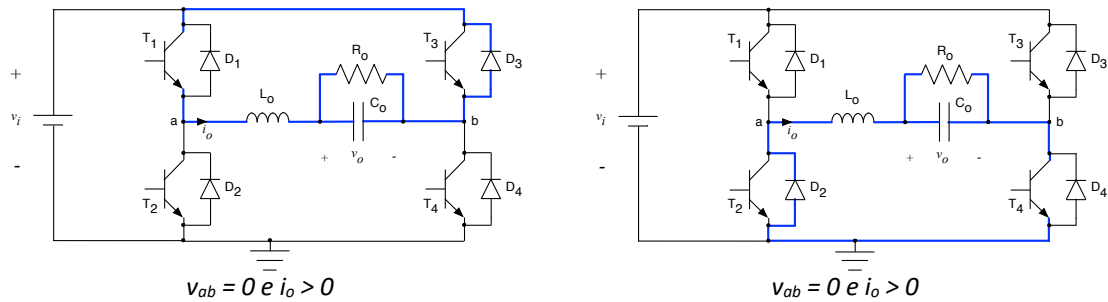


Figura 42 – Etapas de operação do conversor ponte completa PWM senoidal.

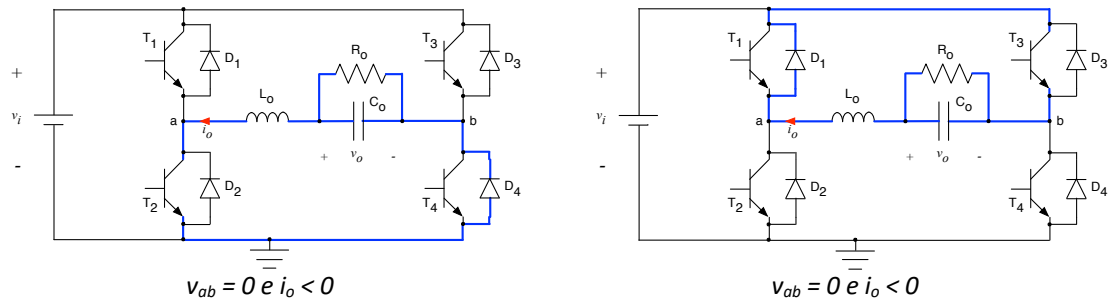


Figura 43 – Etapas de operação do conversor ponte completa PWM senoidal.

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 .

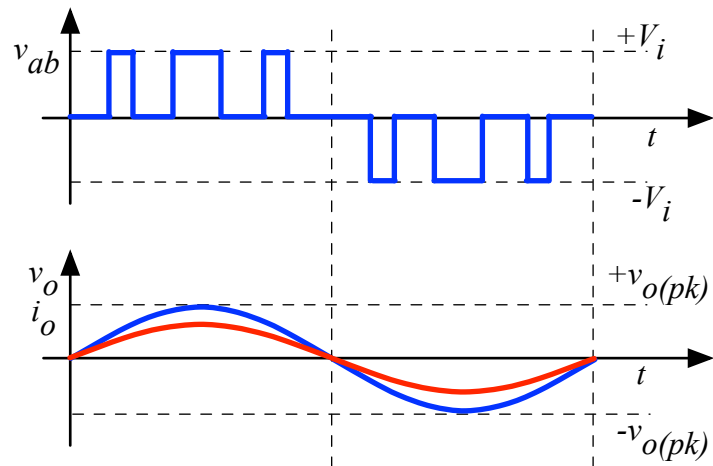


Figura 44 – Principais formas de onda para o conversor ponte completa PWM senoidal.

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.

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

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

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