

23

Capítulo

Inversor PWM Senoidal

Meta deste capítulo

Estudar inversores PWM senoidal.

objetivos

- Entender o princípio de funcionamento do inversor PWM senoidal;
- Analisar circuitos de inversores PWM senoidal;
- Simular circuitos de inversores PWM senoidal;
- Implementar circuitos de inversores PWM senoidal.

Pré-requisitos

Ter estudado os capítulos referentes a modulação PWM senoidal e inversores de tensão meia ponte e ponte completa.

Continuidade

O curso continuará com o estudo dos conversores ca-ca.

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

1 Introdução

Os capítulos anteriores versaram sobre o estudo dos princípios de funcionamento e conceitos aplicados aos conversores cc-ca, denominados de inversores. Estudaram-se em detalhes os inversores de tensão meia ponte e ponte completa.

Este capítulo apresentará detalhes de aplicações típicas dos inversores de tensão e particularidades da modulação utilizada nos mesmos, em consonância com as tecnologias atuais empregadas pela indústria.

A Figura 1 mostra um inversor de tensão aplicado no acionamento de motor de veículo elétrico, exemplo típico de uso de inversor com variação na frequência de saída, denominado no mercado de inversor de frequência. Esta mesma aplicação é comum na indústria, no acionamento de motores de indução com velocidade variável; e conforme estudado no capítulo anterior, a topologia mais comum e empregada é do conversor de tensão em ponte completa.

Assim, neste capítulo serão estudados detalhes referentes ao estágio de potência e modulação dos conversores ponte completa, para aplicações distintas, sejam inversores de tensão aplicados em acionamentos elétricos, filtros ativos, *nobreaks*, dentre outras aplicações comuns dos conversores cc-ca.

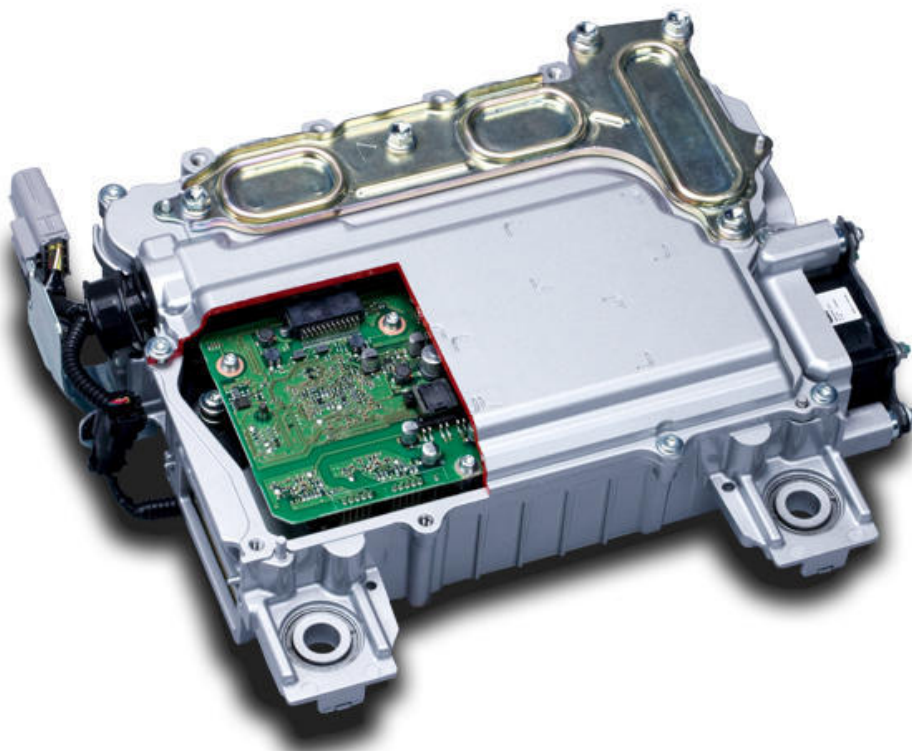


Figura 1 – Exemplo de aplicação de inversor em veículos elétricos.

Fonte: <https://www.toyota-industries.com>. Acesso em: 19/06/2020.

2 Inversor PWM Senoidal

2.1 Introdução

Os inversores de tensão na configuração ponte completa necessitam apenas uma fonte de tensão na entrada, como está mostrado na Figura 2, o que caracteriza uma vantagem em relação aos conversores na configuração meia ponte estudados no capítulo anterior.

A topologia mostrada na Figura 2 é de um conversor ponte completa, o qual tem dois braços, com 4 interruptores bidirecionais em corrente e unidirecionais em tensão (S_1/D_1 , S_2/D_2 , S_3/D_3 , e S_4/D_4). Estes conversores também são denominados de ponte H.

O inversor de tensão ponte completa, com filtro de saída, está mostrado na Figura 3, onde se identificam as polaridades das tensões e sentidos das correntes nos elementos do circuito. O circuito da Figura 3 será utilizado para o estudo das etapas de funcionamento do conversor, apresentadas a seguir.

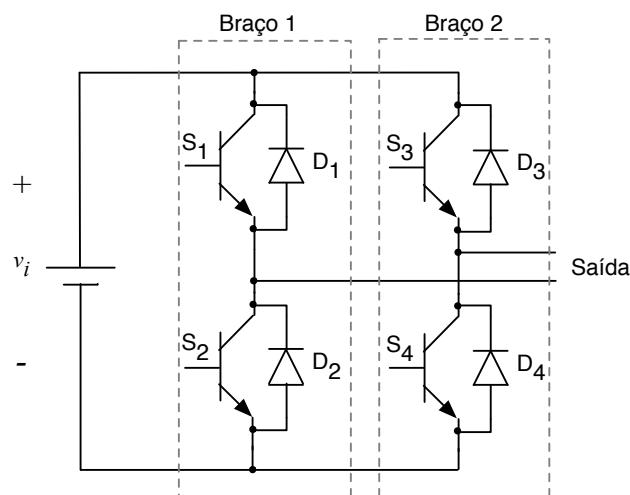


Figura 2 – Conversor ponte completa.

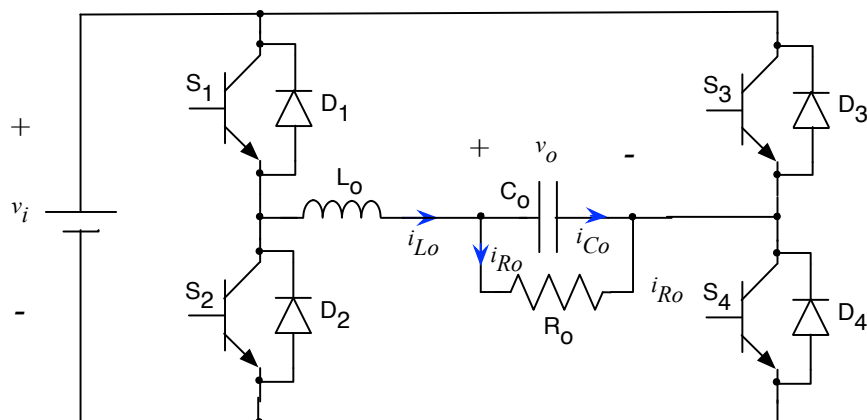


Figura 3 – Conversor ponte completa com filtro de saída.

2.2 Inversor de Tensão Onda Quadrada

O conversor ponte completa operando como inversor de tensão onda quadrada é mostrado na Figura 4. Apesar deste capítulo focar nos inversores de tensão PWM senoidal, apresenta-se esta configuração de inversores, por ser uma solução disponível no comércio e utilizado com cargas que podem funcionar corretamente com alimentação em onda quadrada. As vantagens deste inversor são:

- Dispensa filtro de saída;
- Pode empregar interruptores lentos, comutando na frequência da tensão de saída (baixa).

As formas de onda de entrada e saída do inversor são mostradas na Figura 4 onde se nota que a saída é originada basicamente invertendo a tensão de entrada. Assim, o comando dos interruptores é muito simples, usando a mesma lógica do inversor de tensão dois níveis (modulação bipolar) estudado no capítulo anterior. Este conversor é também conhecido comercialmente por inversor quase senoidal, pelo fato de a tensão de saída ser alternada, mas quadrada, e não senoidal.

A Figura 5 mostra o esquema da modulação do inversor onda quadrada. Neste caso, a razão cíclica terá forma de onda quadrada também, pois para gerar a tensão quadrada na saída bastará inverter a tensão de entrada no semiciclo negativo.

As etapas de funcionamento do inversor onda quadrada são idênticas aquelas descritas no capítulo anterior, para modulação dois níveis (bipolar), onde os interruptores S_1 e S_4 são comandados em conjunto, enquanto S_2 e S_3 também são comandados conjuntamente, mas com sinal defasado de 180° (invertido) em relação aos primeiros. A frequência de comutação é igual a frequência desejada na saída, normalmente igual a frequência da rede de energia elétrica, isto é, 60 Hz.

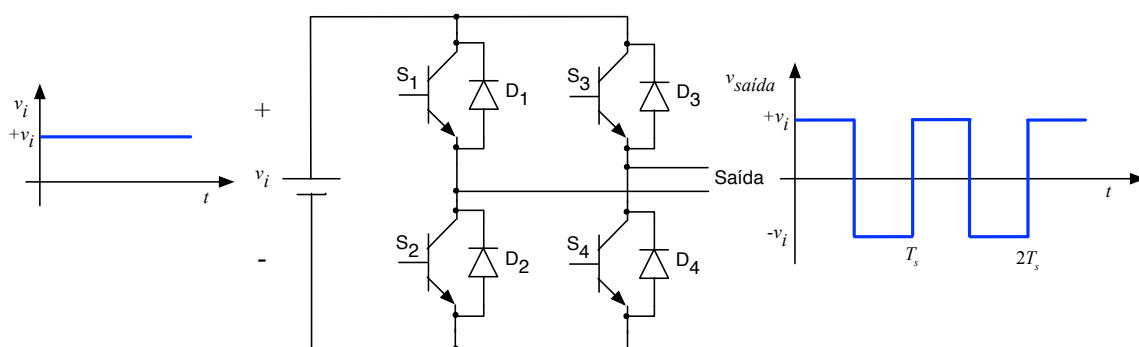


Figura 4 – Inversor de tensão onda quadrada.

A tensão de entrada é dada por:

$$v_{i(t)} = V_i$$

Por sua vez, a tensão de saída será:

$$v_{o(t)} = \begin{cases} +V_i \rightarrow 0 \leq t \leq \pi \\ -V_i \rightarrow \pi \leq t \leq 2\pi \end{cases}$$

Assim, a razão cíclica será:

$$d(t) = \frac{v_{o(t)}}{v_{i(t)}} = \frac{\begin{cases} +V_i \rightarrow 0 \leq t \leq \pi \\ -V_i \rightarrow \pi \leq t \leq 2\pi \end{cases}}{V_i} ;$$

$$d(t) = \begin{cases} +1 \rightarrow 0 \leq t \leq \pi \\ -1 \rightarrow \pi \leq t \leq 2\pi \end{cases}$$

A modulação do inversor onda quadrada é mostrada na Figura 5, de acordo com as expressões apresentadas acima.

Este inversor é simples de implementar e pode ser utilizado para cargas resistivas e eletrônicas, isto é, que possuem fontes chaveadas na sua entrada. Por outro lado, cargas que necessitam de forma de onda senoidal, como motores de indução por exemplo, podem não funcionar corretamente com este tipo de inversor, pois as perdas nestes motores seriam maiores com alimentação em onda quadrada do que com alimentação com forma de onda senoidal. Equipamentos que possuem na entrada fontes com correção de fator de potência podem apresentar funcionamento inconsistente, visto estas fontes serem projetadas para que se tenha tensão senoidal na entrada, para que na operação em malha fechada os mesmos apresentem também corrente senoidal na entrada.

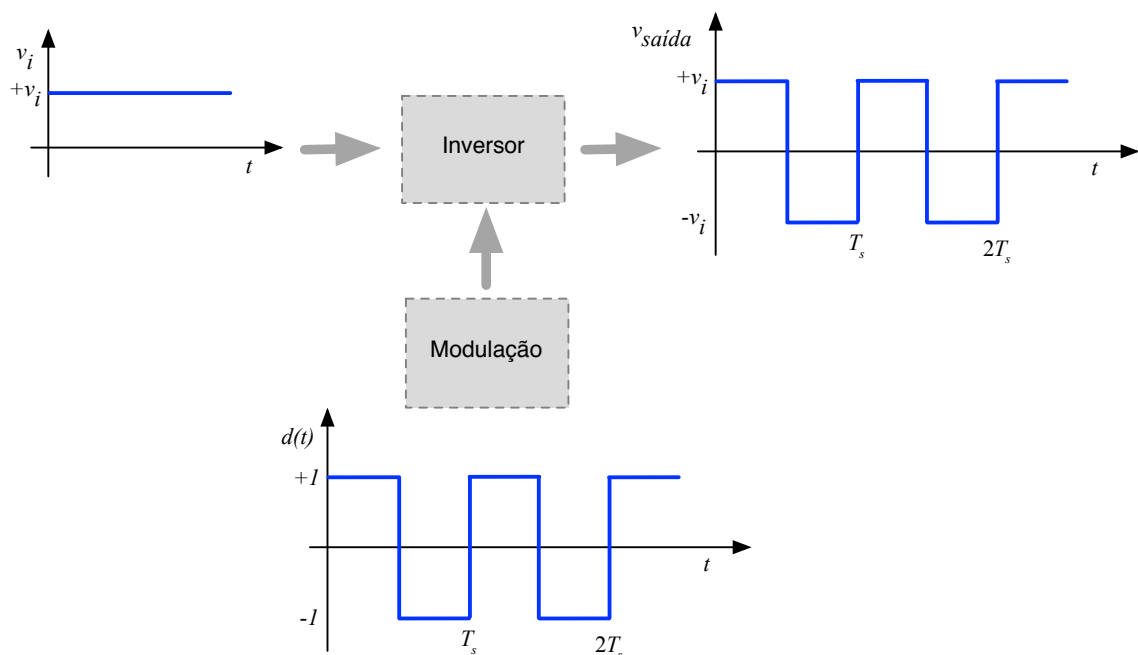


Figura 5 – Modulação do inversor de tensão onda quadrada.

A Figura 6 apresenta um circuito completo de um inversor de tensão onda quadrada. Nesta figura tem-se dois estágios: o primeiro é um retificador onda completa com filtro capacitivo, enquanto o segundo estágio é o inversor ponte completa.

A tensão de entrada (v_i) mostrada nas Figura 4 e Figura 5 é identificada na Figura 6 como sendo v_{DC} . A saída do retificador onda completa com filtro capacitivo é denominada na literatura por barramento em corrente contínua, ou simplesmente barramento cc (*dc* em inglês).

O projeto do retificador de tensão é realizado conforme estudado no capítulo correspondente deste curso, empregando-se a metodologia de projeto apresentada naquele momento. A título de exemplo, o capacitor do retificador (C_i) é obtido usando-se a seguinte expressão:

$$C_i = \frac{P_o}{f_r \cdot (V_{DC(max)}^2 - V_{DC(min)}^2)}$$

Por exemplo, se este inversor fosse utilizado para conectar em sua saída uma fonte chaveada de 1 kW, para uma ondulação de tensão de 20%, rede de energia elétrica (v_i) de 220 V, o valor do capacitor do retificador de entrada seria:

$$C_i = \frac{P_o}{f_r \cdot (V_{DC(max)}^2 - V_{DC(min)}^2)} = \frac{1000}{60 \cdot (311^2 - 248,8^2)} \cong 479 \mu F$$

Considerando que este capacitor deve ser para tensão da ordem de 400 ou 450 V, seu volume e custo serão significativos. Além disso, é importante levar em conta que capacitores eletrolíticos possuem baixa vida útil, sendo comumente, os componentes que antes falham em circuitos de eletrônica de potência. Capacitores juntamente com baterias são os componentes que apresentam os menores tempos de vida útil dentre os componentes eletrônicos.

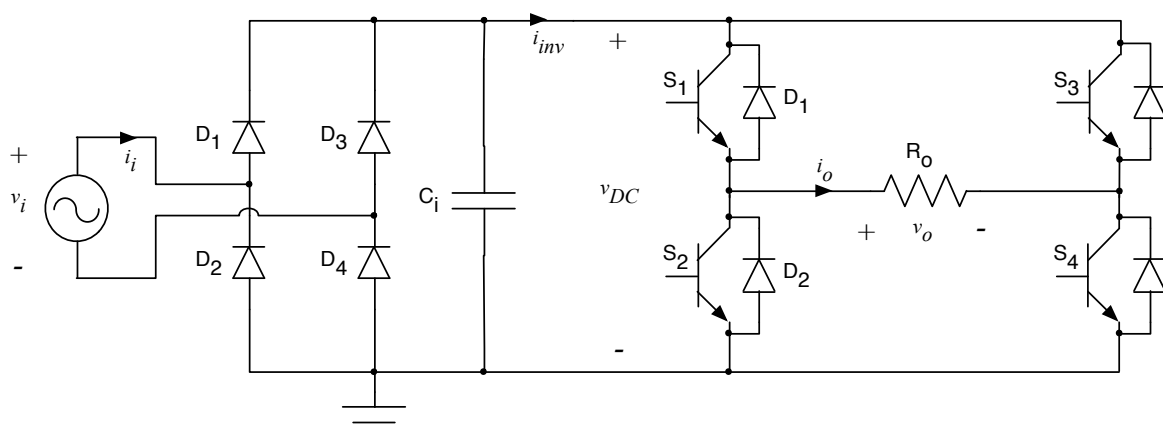


Figura 6 – Circuito completo de um inversor de tensão onda quadrada.

2.3 Inversor de Tensão PWM Senoidal

O conversor ponte completa operando como inversor de tensão PWM senoidal é mostrado na Figura 7. Note que neste caso é necessário o uso de filtro na saída. As vantagens deste inversor são:

- Apresentar forma de onda senoidal pura na saída;
- Permitir a variação da amplitude e frequência da tensão de saída.

As formas de onda de entrada e saída do inversor são mostradas na Figura 4 onde se nota que a saída deve ser originada pela modulação adequada dos interruptores do inversor, conforme foi estudado no capítulo anterior. Este inversor pode operar com modulação dois níveis (bipolar) ou três níveis (unipolar), sendo a frequência de comutação sempre superior a frequência da tensão de saída; em geral dez ou mais vezes maior. Os interruptores precisam ser para alta frequência e apresentam perdas por comutação. Estas perdas eram inexistentes no inversor de tensão onda quadrada do item anterior.

A Figura 8 mostra o esquema da modulação do inversor PWM senoidal. Neste caso, a razão cíclica terá forma de onda senoidal, pois será necessário modular os interruptores em dois níveis ou três níveis, conforme desejado.

As etapas de funcionamento do inversor PWM senoidal são idênticas aquelas descritas no capítulo anterior, para modulação dois níveis (bipolar) ou três níveis (unipolar). A frequência da saída é normalmente igual a frequência da rede de energia elétrica, isto é, 60 Hz, podendo ser variável caso se desejar alterar a velocidade de motores de indução, por exemplo. Já a frequência de comutação é determinada pelo projetista em função da tecnologia dos interruptores utilizados e do local de trabalho do inversor, visto que aplicações domésticas não podem gerar ruído audível (faixa de 20 Hz até 20 kHz), enquanto em aplicações industriais pode-se tolerar níveis de ruído maiores. Outros fatores também podem afetar a escolha da frequência de comutação, tais como: volume dos componentes do conversor, necessidade de dissipadores de calor, qualidade desejada na forma de onda da saída, etc.

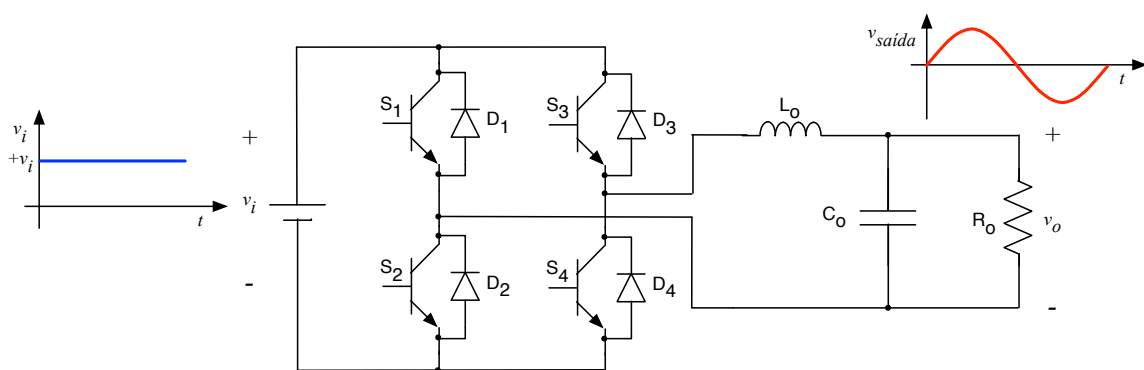


Figura 7 – Inversor de tensão PWM senoidal.

A tensão de entrada é dada por:

$$v_{i(t)} = V_i$$

Por sua vez, a tensão de saída será:

$$v_{o(t)} = V_{o(pk)} \cdot \text{seno}(\omega_o \cdot t) \rightarrow 0 \leq t \leq 2\pi$$

$V_{o(pk)}$ é a amplitude de pico da tensão de saída, enquanto ω_o é a frequência angular da tensão de saída, sendo:

$$\omega_o = 2 \cdot \pi \cdot F_o$$

Assim, a razão cíclica será:

$$d(t) = \frac{v_{o(t)}}{v_{i(t)}} = \frac{V_{o(pk)} \cdot \text{seno}(\omega_o \cdot t)}{V_i} \rightarrow 0 \leq t \leq 2\pi$$

Usando a definição de índice de modulação (IM):

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i}$$

Por fim, a razão cíclica será:

$$d(t) = IM \cdot \text{seno}(\omega_o \cdot t) \rightarrow 0 \leq t \leq 2\pi$$

A modulação do inversor PWM senoidal é mostrada na Figura 8, de acordo com as expressões apresentadas acima, sendo idêntica a modulação utilizada no capítulo anterior para o conversor ponte completa operando como inversor de tensão.

O circuito completo de um inversor PWM senoidal é mostrado na Figura 9, sendo semelhante aquele do inversor onda quadrada mostrado na Figura 6, com a diferença que agora os interruptores devem ser para alta frequência e se tem a presença do filtro de saída, formado pelo indutor (L_o) e pelo capacitor (C_o).

As considerações que foram realizada no item anterior sobre a escolha do capacitor (C_i) do retificador de onda completa da entrada valem também para o inversor PWM senoidal, com a diferença que agora, em virtude da comutação em alta frequência do inversor, também se terá circulação de corrente na frequência de comutação pelo capacitor da entrada, o que elevará sua corrente eficaz e produzirá mais aquecimento no mesmo, diminuindo ainda mais sua vida útil.

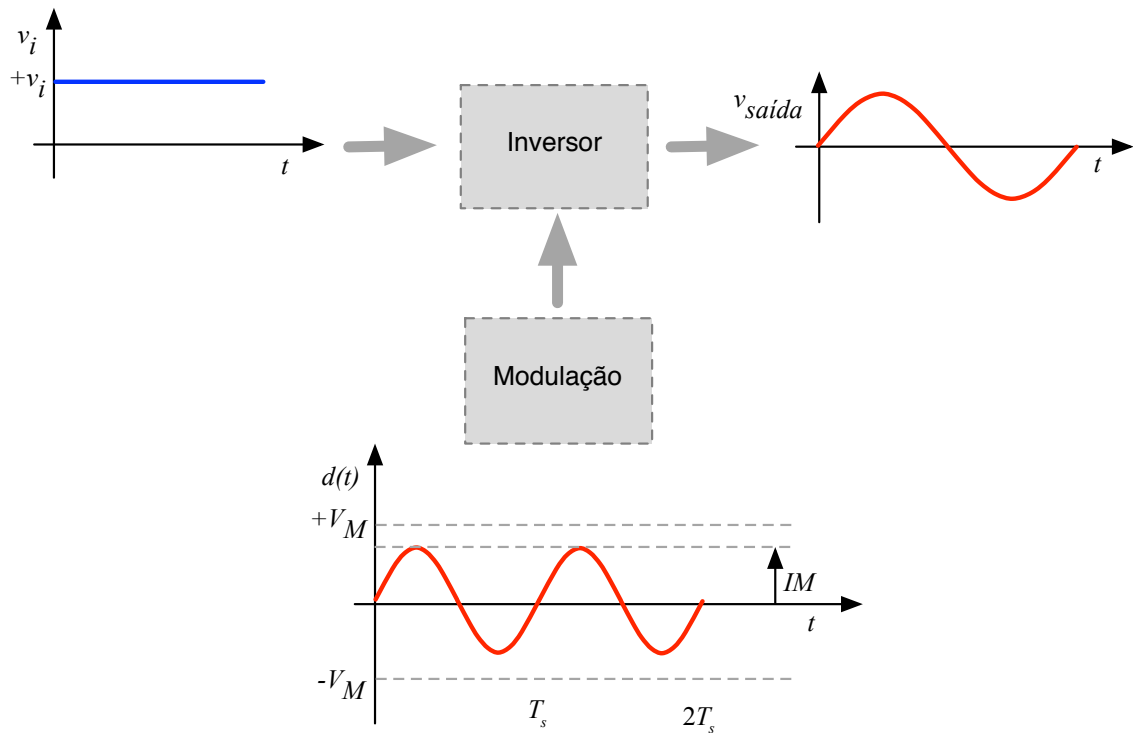


Figura 8 – Modulação do inversor de tensão PWM senoidal.

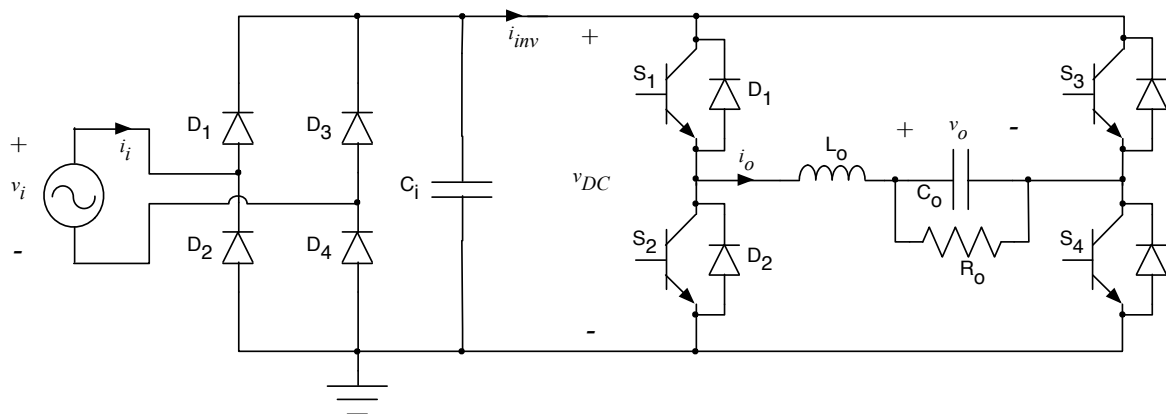


Figura 9 – Circuito completo de um inversor de tensão PWM senoidal.

2.4 Inversor de Tensão PWM Senoidal sem Barramento CC

O conversor ponte completa operando como inversor de tensão PWM senoidal sem barramento em corrente contínua é mostrado na Figura 10. A diferença deste inversor em relação ao inversor PWM senoidal é o fato de que a tensão de entrada tem formato de uma senóide retificada. As vantagens deste inversor são:

- Apresentar forma de onda senoidal pura na saída;
- Permitir a variação da amplitude e frequência da tensão de saída;
- Empregar capacitor de pequeno valor no retificador com filtro da entrada.

As formas de onda de entrada e saída do inversor são mostradas na Figura 11 onde se nota

que a saída deve ser originada pela modulação adequada dos interruptores do inversor, conforme foi estudado no capítulo anterior. Este inversor pode operar com modulação dois níveis (bipolar) ou três níveis (unipolar), sendo a frequência de comutação sempre superior a frequência da tensão de saída; em geral dez ou mais vezes maior. Os interruptores precisam ser para alta frequência e apresentam perdas por comutação.

A Figura 11 mostra o esquema da modulação do inversor PWM senoidal sem barramento em corrente contínua (cc). Neste caso, a razão cíclica terá forma de onda quadrada, pois será necessário modular os interruptores em dois níveis ou três níveis, conforme desejado.

As etapas de funcionamento do inversor onda PWM senoidal sem barramento em corrente contínua são idênticas aquelas descritas no capítulo anterior, para modulação dois níveis (bipolar) ou três níveis (unipolar). A frequência da saída é normalmente igual a frequência da rede de energia elétrica, isto é, 60 Hz, podendo ser variável caso se desejar alterar a velocidade de motores de indução, por exemplo. Já a frequência de comutação é determinada pelo projetista de modo idêntico ao inversor PWM senoidal.

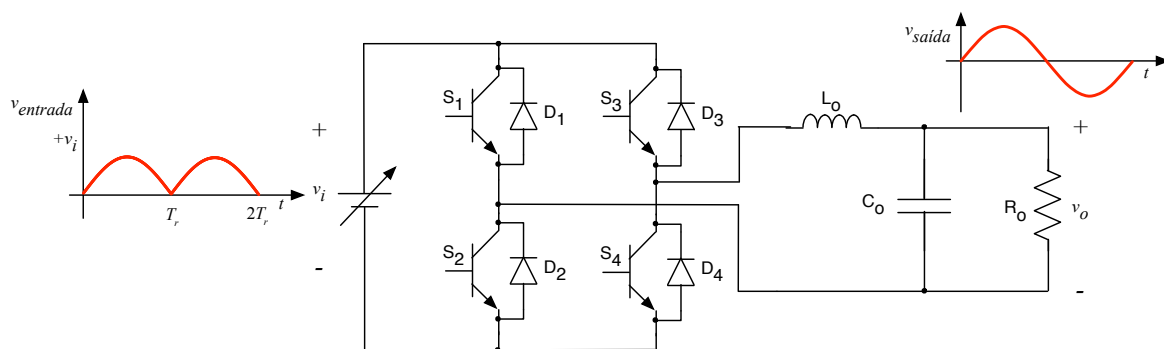


Figura 10 – Inversor de tensão PWM senoidal sem barramento cc.

A tensão de entrada é dada por:

$$v_{i(t)} = V_{i(pk)} \cdot |\text{seno}(\omega_o \cdot t)| \rightarrow 0 \leq t \leq 2\pi$$

A expressão anterior apresenta a parte variável da tensão de entrada em módulo, isto é, matematicamente a operação de calcular o módulo de uma variável representa fisicamente um circuito retificador em onda completa.

Por sua vez, a tensão de saída será:

$$v_{o(t)} = V_{o(pk)} \cdot \text{seno}(\omega_o \cdot t) \rightarrow 0 \leq t \leq 2\pi$$

$V_{o(pk)}$ é a amplitude de pico da tensão de saída, enquanto ω_o é a frequência angular da tensão de saída, sendo:

$$\omega_o = 2 \cdot \pi \cdot F_o$$

Assim, a razão cíclica será:

$$d(t) = \frac{v_{o(t)}}{v_{i(t)}} = \frac{V_{o(pk)} \cdot \text{seno}(\omega_o \cdot t)}{V_{i(pk)} \cdot |\text{seno}(\omega_o \cdot t)|} \rightarrow 0 \leq t \leq 2\pi$$

Usando a definição de índice de modulação (IM):

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i}$$

Assim, a razão cíclica será:

$$d(t) = IM \cdot \frac{\text{seno}(\omega_o \cdot t)}{|\text{seno}(\omega_o \cdot t)|},$$

$$d(t) = \begin{cases} +IM & \rightarrow 0 \leq t \leq \pi \\ -IM & \rightarrow \pi \leq t \leq 2\pi \end{cases}$$

A modulação do inversor PWM senoidal sem barramento em corrente contínua é mostrada na Figura 11, de acordo com as expressões apresentadas acima, diferindo daquela apresentada no capítulo anterior para o inversor de tensão ponte completa.

O circuito completo de um inversor PWM senoidal sem barramento em corrente contínua é idêntico aquele mostrado na Figura 9 do item anterior, com a diferença que agora o capacitor de filtro da entrada (C_i) terá um valor pequeno, da ordem de 1 a 10 μF . Este capacitor de pequeno valor continua necessário em virtude do tempo morto do conversor ponte completa, onde a corrente do indutor precisará de um caminho para circular e, como o retificador ponte completa da entrada é unidirecional em corrente, esta corrente deverá circular pelo capacitor da saída do retificador (e de entrada do inversor).

Uma aplicação dos inversores PWM senoidais sem barramento em corrente contínua é em filtros ativos, *nobreaks* e estabilizadores de tensão. A Figura 12 apresenta um conversor ca-ca bidirecional, operando como condicionador de tensão, estudado em detalhes em (Petry, 2005). Nesta aplicação foram utilizados dois conversores ponte completa, um deles atuando como retificador bidirecional e o outro como inversor de tensão PWM senoidal sem barramento em corrente contínua.

As técnicas de modulação apresentadas neste capítulo também foram exploradas naquela referência, inclusive com as expressões para cálculo das variáveis dos conversores lá apresentados, incluindo esforços de corrente e tensão nos componentes, comutação, perdas, etc.

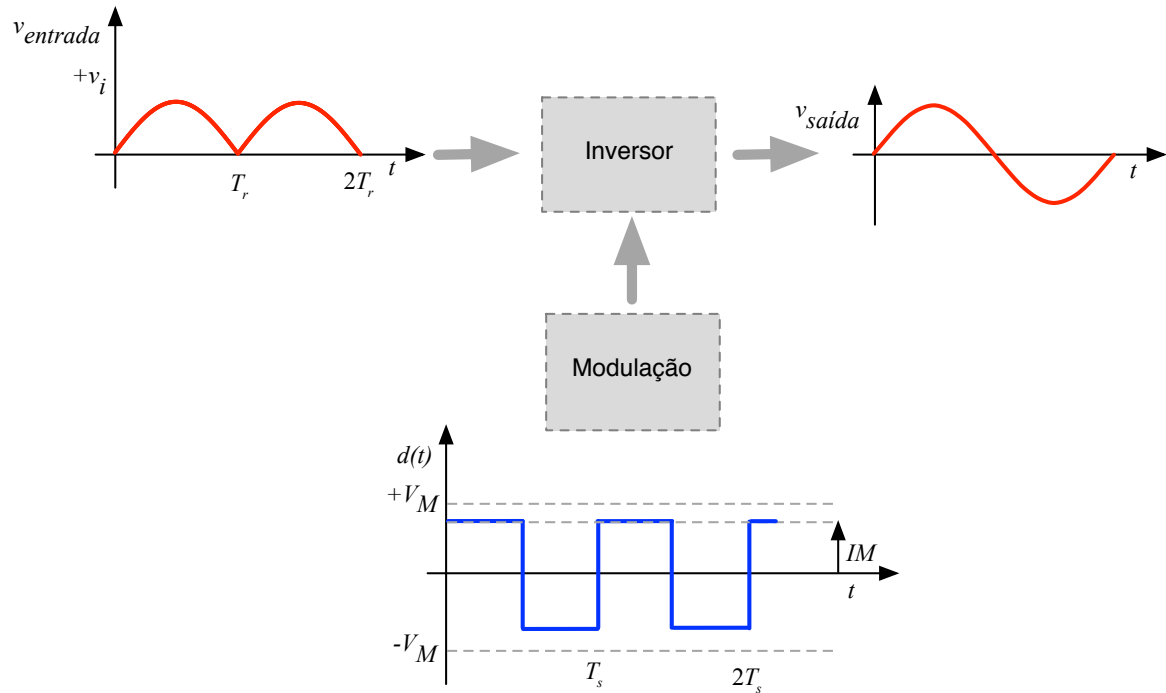


Figura 11 – Modulação do inversor de tensão PWM senoidal sem barramento cc.

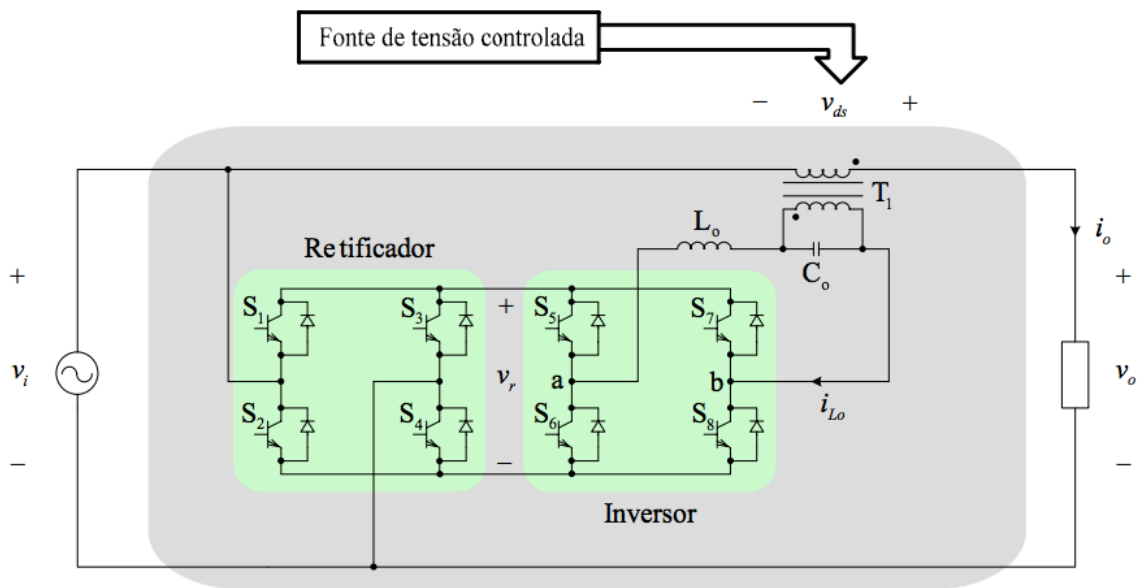


Figura 12 – Exemplo de inversor PWM senoidal sem barramento cc e bidirecional.

3 Simulação dos Circuitos Estudados

As simulações do conversor ponte completa operando como inversor onda quadrada, inversor PWM senoidal e inversor PWM senoidal sem barramento cc serão realizadas neste capítulo. Os valores utilizados são semelhantes aqueles que se utilizarão em laboratório.

3.1 Simulação do Inversor Onda Quadrada

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 13, com características semelhantes aquelas que serão utilizadas na aula de laboratório. Note que os componentes são ideais, ou seja, genéricos, não se utilizando algum modelo específico de chave. A fonte é para 220 V (eficazes). A carga possui uma resistência de 10Ω . O filtro do inversor é formado pela indutância de $500 \mu\text{H}$ e pela capacitância de $10 \mu\text{F}$. O tempo de simulação pode ser entre 20 ms e 50 ms e passo de cálculo de 0,1 ms ($100 \mu\text{s}$). Note que a frequência de comutação é de 60 Hz, igual a frequência da tensão de saída do inversor onda quadrada. Os elementos ON1 a ON4 são utilizados pelo Psim para comandar interruptores, equivalente a *drivers* de acionamento do interruptor. O capacitor de filtro do retificador de entrada é de $2.200 \mu\text{F}$.

O modulador implementado no Psim é mostrado na Figura 14, sendo que a tensão modulante é variável de -1 a 1 V com forma de onda quadrada, já a portadora é uma triangular com amplitude de -1 a 1 V, como está mostrado na Figura 16.

As principais formas de onda o estágio de potência são mostradas na Figura 15 onde se nota a tensão de entrada, a tensão no barramento de corrente contínua, a tensão de saída do inversor e a corrente no indutor.

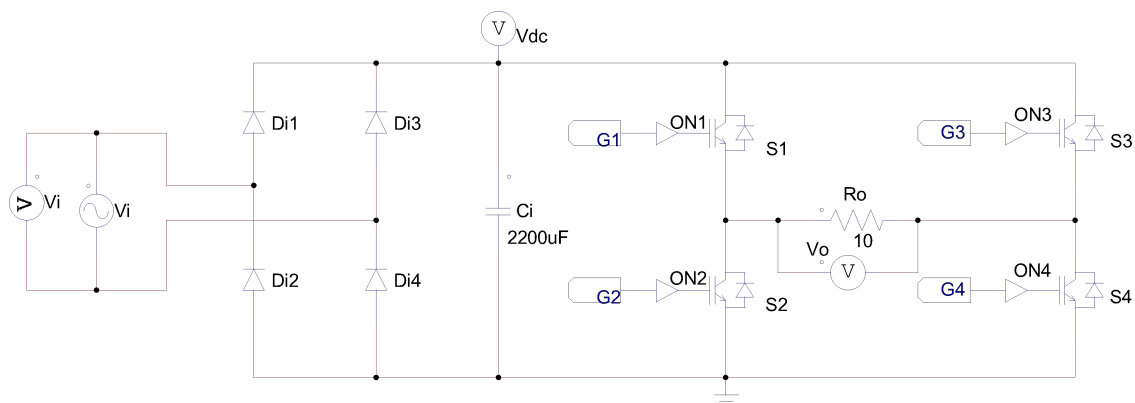


Figura 13 – Estágio de potência do inversor onda quadrada.

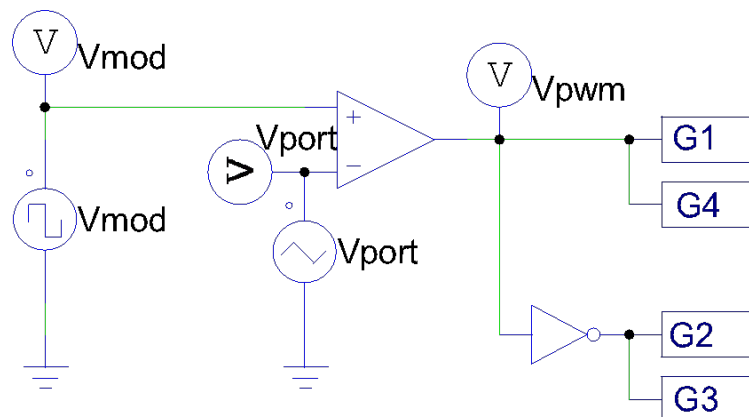


Figura 14 – Circuito da modulação do inversor onda quadrada.

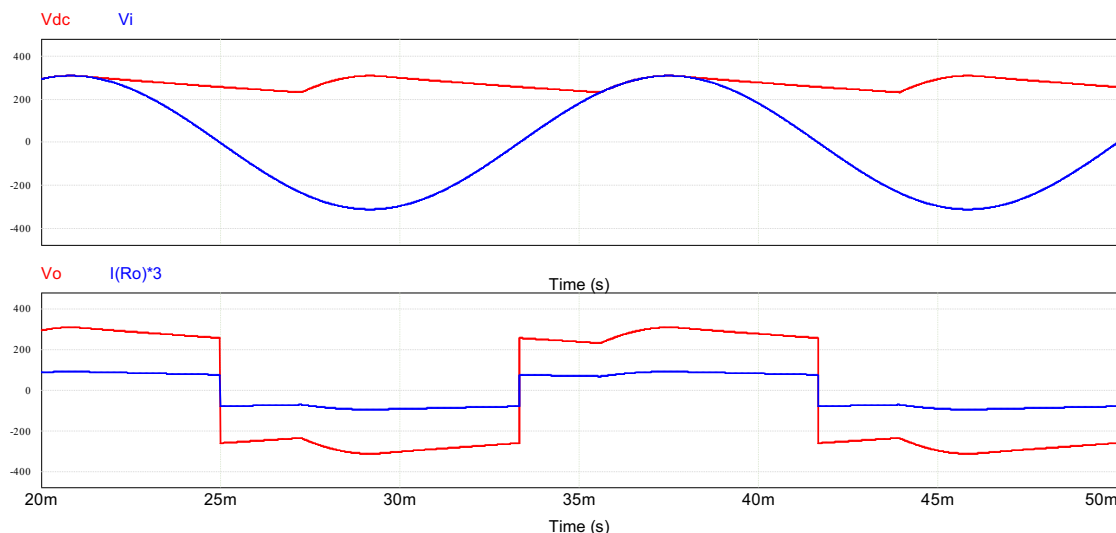


Figura 15 – Principais formas de onda do inversor onda quadrada.

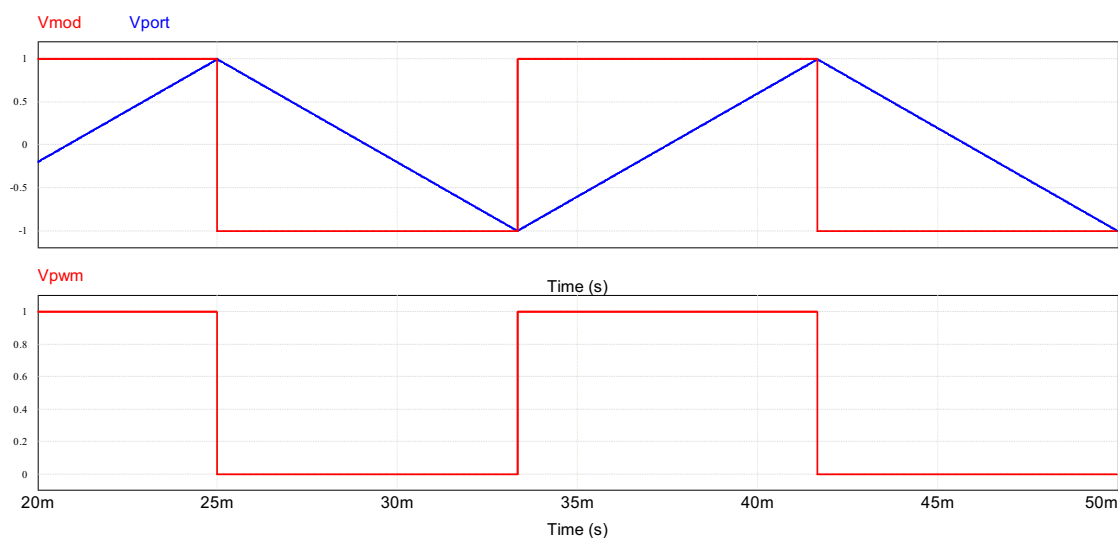


Figura 16 – Detalhe da modulação do inversor onda quadrada.

3.2 Simulação do Inversor PWM Senoidal

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 17, com características semelhantes aquelas que serão utilizadas na aula de laboratório. Note que os componentes são ideais, ou seja, genéricos, não se utilizando algum modelo específico de chave. A fonte é para 220 V (eficazes). A carga possui uma resistência de 10Ω . O filtro do inversor é formado pela indutância de $500 \mu\text{H}$ e pela capacitância de $10 \mu\text{F}$. O tempo de simulação pode ser entre 20 ms e 50 ms e passo de cálculo de $0,0001 \text{ ms}$ ($0,1 \mu\text{s}$). Note que a frequência de comutação é de 50 kHz. Os elementos ON1 a ON4 são utilizados pelo Psim para comandar interruptores, equivalente a *drivers* de acionamento do interruptor. O capacitor de filtro do retificador de entrada é de $2.200 \mu\text{F}$.

O modulador implementado no Psim é mostrado na Figura 18, sendo que a tensão modulante é variável de -1 a 1 V com forma de onda senoidal, já a portadora é uma triangular com amplitude de -1 a 1 V, como está mostrado nas Figura 21 e Figura 22.

As formas de onda para operação com razão cíclica de 50% são mostradas na Figura 19 onde se nota a tensão de entrada, a tensão no barramento de corrente contínua, a tensão de saída do inversor antes da filtragem, a tensão de saída do inversor e a corrente no indutor. Os detalhes das formas de onda do estágio de potência são mostradas na Figura 20. Por sua vez, as formas de onda do estágio de modulação e seus detalhes são mostradas nas Figura 21e Figura 22.

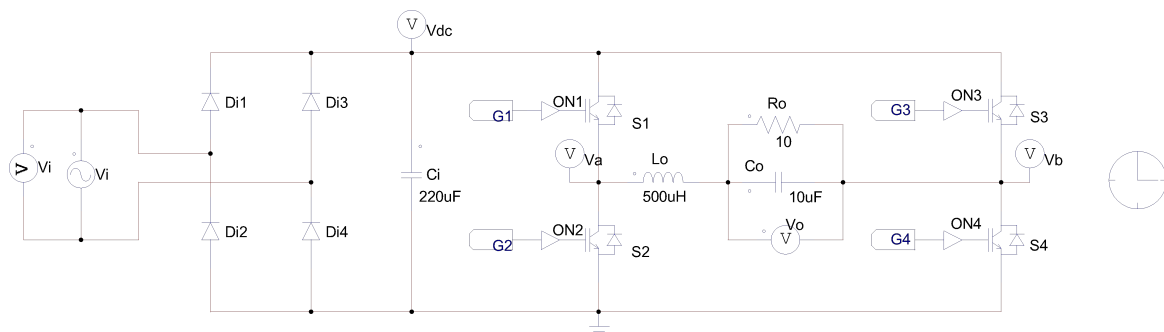


Figura 17 – Estágio de potência do inversor PWM senoidal.

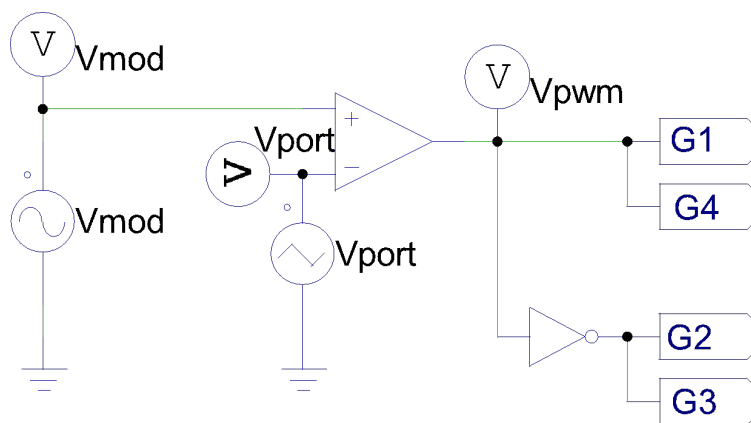


Figura 18 – Circuito da modulação do inversor PWM senoidal.

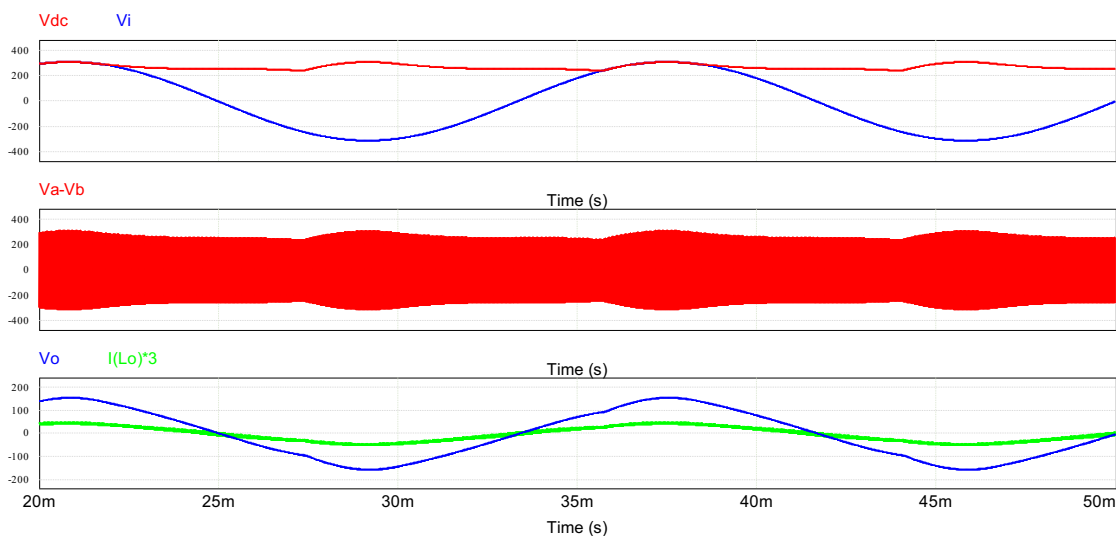


Figura 19 – Principais formas de onda do conversor com razão cíclica de 50%.

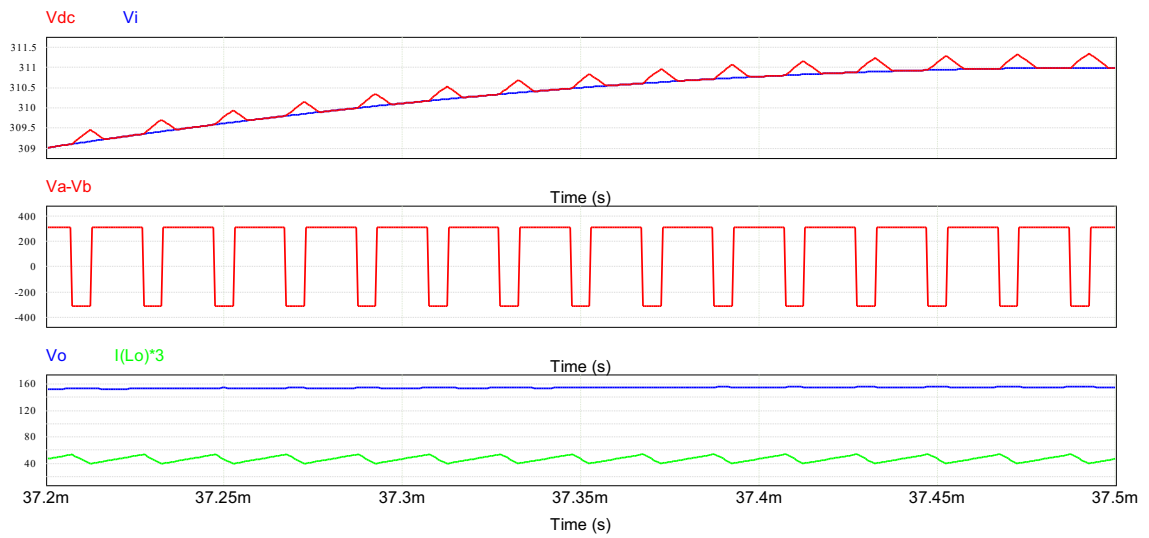


Figura 20 – Detalhe das formas de onda do estágio de potência do conversor.

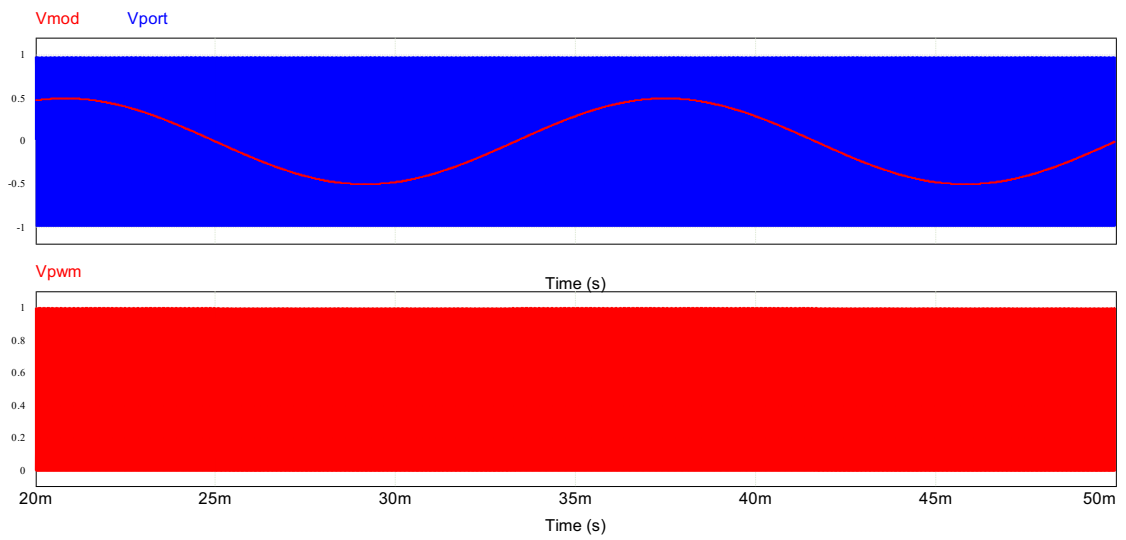


Figura 21 – Formas de onda da modulação do inversor PWM senoidal.

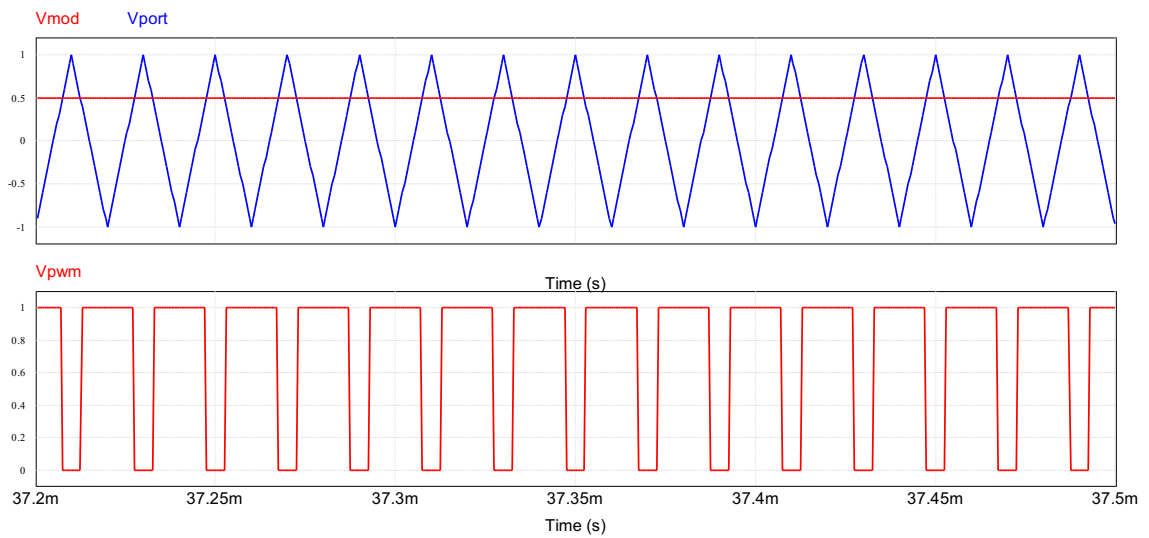


Figura 22 – Detalhe da modulação do inversor PWM senoidal.

3.3 Simulação do Inversor PWM Senoidal sem Barramento CC

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 23, com características semelhantes aquelas que serão utilizadas na aula de laboratório. Os componentes e parâmetros são os mesmos da simulação do item anterior, com alteração do capacitor de filtro do retificador de entrada que agora passa a ser de $2,2 \mu\text{F}$. A fonte é para 220 V (eficazes). A carga possui uma resistência de 10Ω . O filtro do inversor é formado pela indutância de $500 \mu\text{H}$ e pela capacitância de $10 \mu\text{F}$. O tempo de simulação pode ser entre 20 ms e 50 ms e passo de cálculo de $0,0001 \text{ ms}$ ($0,1 \mu\text{s}$). Note que a frequência de comutação é de 50 kHz .

O modulador implementado no Psim é mostrado na Figura 24, sendo que a tensão modulante é variável de -1 a 1 V com forma de onda quadrada, já a portadora é uma triangular com amplitude de -1 a 1 V , como está mostrado nas Figura 27 e Figura 28.

As formas de onda para operação com razão cíclica de 50% são mostradas na Figura 25 onde se nota a tensão de entrada, a tensão no barramento de corrente contínua, a tensão de saída do inversor antes da filtragem, a tensão de saída do inversor e a corrente no indutor. Os detalhes das formas de onda do estágio de potência são mostradas na Figura 26. Por sua vez, as formas de onda do estágio de modulação e seus detalhes são mostradas nas Figura 27 e Figura 28.

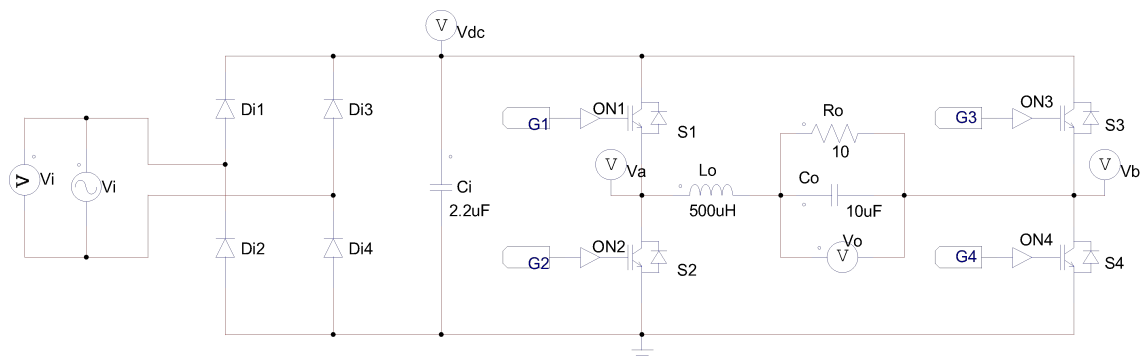


Figura 23 – Estágio de potência do inversor PWM senoidal sem barramento cc.

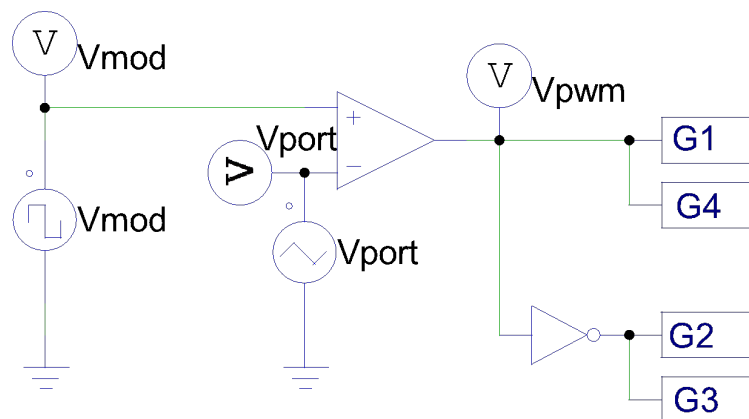


Figura 24 – Circuito da modulação do inversor PWM senoidal sem barramento cc.

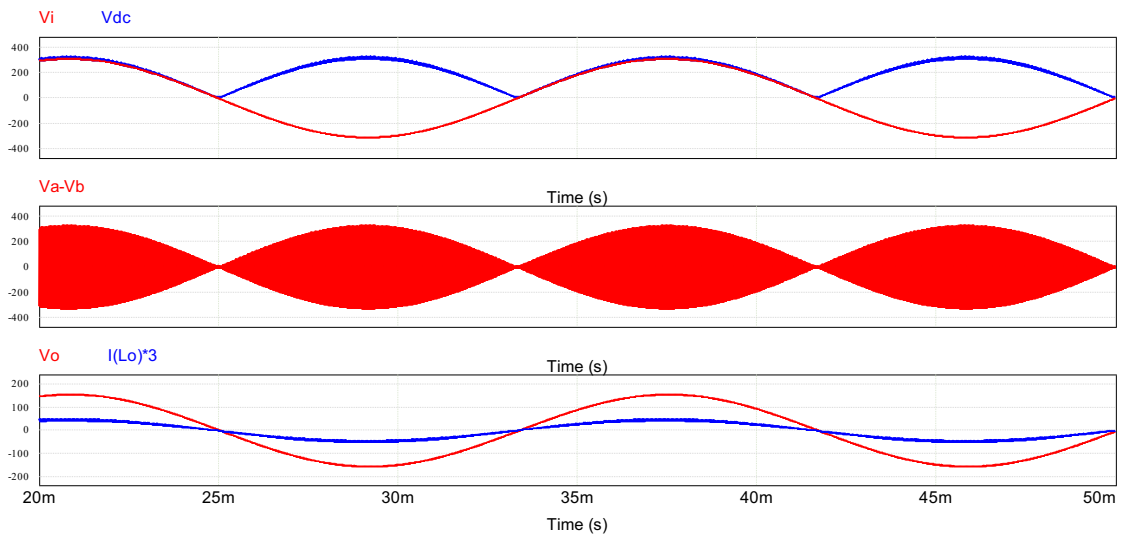


Figura 25 – Principais formas de onda do conversor com razão cíclica de 50%.

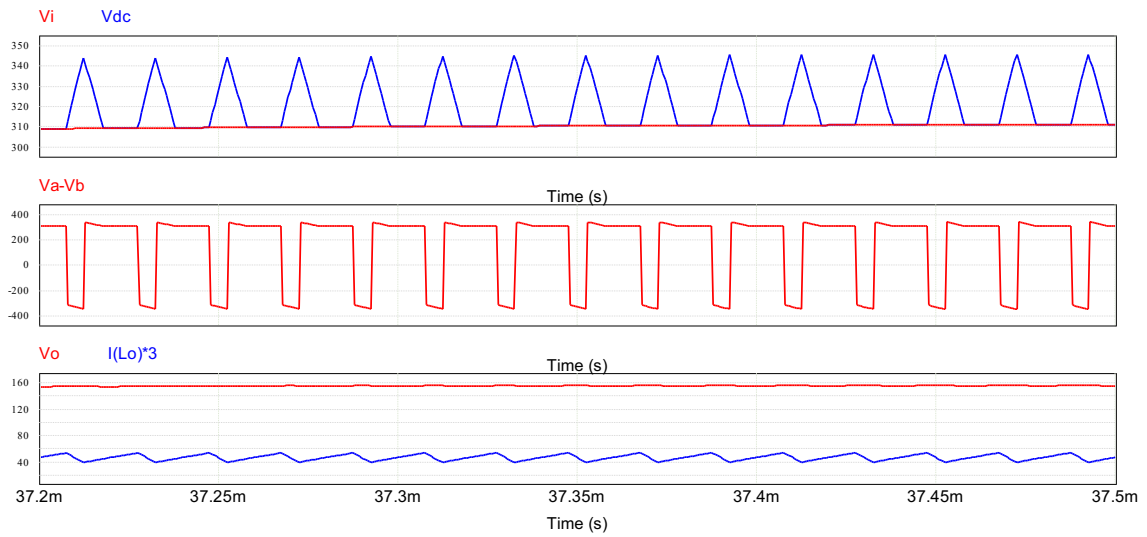


Figura 26 – Detalhe das formas de onda do estágio de potência do conversor.

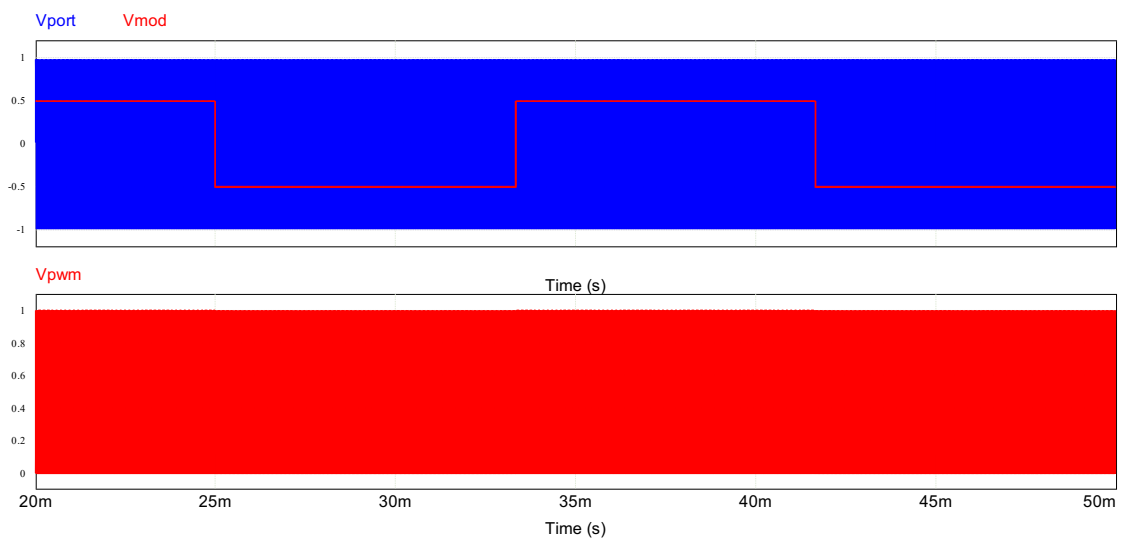


Figura 27 – Formas de onda da modulação do inversor PWM senoidal sem barramento cc.

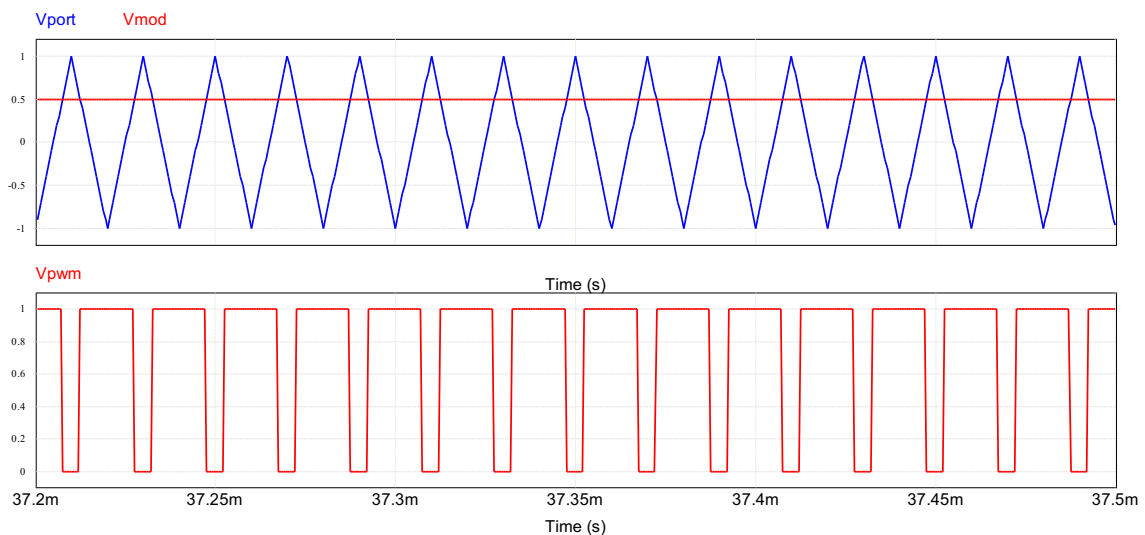


Figura 28 – Detalhe da modulação do inversor PWM senoidal sem barramento cc.

4 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 13, determine:

- A tensão de entrada do inversor;
- A máxima tensão de pico na saída;
- A máxima tensão eficaz na carga;
- A máxima corrente de pico na carga;
- A máxima corrente eficaz na carga.

A tensão de entrada será igual a tensão de pico da rede de energia elétrica da entrada. Assim:

$$V_{DC} = v_{i(pk)} = \sqrt{2} \cdot v_i = \sqrt{2} \cdot 220 = 311V$$

A tensão de pico na saída, considerando que os componentes são ideais, será igual a tensão de entrada do inversor, ou seja, 311 V.

A tensão eficaz na carga será:

$$V_{o(ef)} = V_{o(pk)} = 311V$$

As correntes de pico e eficaz na carga serão:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{311}{10} = 31,1A$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{311}{10} = 31,1A$$

ER 02) Considerando o circuito da Figura 17, determine:

- A tensão de entrada do inversor;
- A máxima tensão de pico na saída;
- A máxima tensão eficaz na carga;
- A máxima corrente de pico na carga;
- A máxima corrente eficaz na carga.

A tensão de entrada será igual a tensão de pico da rede de energia elétrica da entrada. Assim:

$$V_{DC} = v_{i(pk)} = \sqrt{2} \cdot v_i = \sqrt{2} \cdot 220 = 311V$$

A tensão de pico na saída, considerando que os componentes são ideais, será igual a tensão de entrada do inversor, ou seja, 311 V.

A tensão eficaz na carga será:

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} = 220V$$

As correntes de pico e eficaz na carga serão:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{311}{10} = 31,1A$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{220}{10} = 22A$$

ER 03) Considerando o circuito da Figura 23, determine:

- A tensão de entrada do inversor;
- A máxima tensão de pico na saída;
- A máxima tensão eficaz na carga;
- A máxima corrente de pico na carga;
- A máxima corrente eficaz na carga.

A tensão de pico na entrada do inversor será igual a tensão de pico da rede de energia elétrica da entrada. Assim seu valor de pico e médio serão:

$$V_{DC(pk)} = v_{i(pk)} = \sqrt{2} \cdot v_i = \sqrt{2} \cdot 220 = 311V$$

$$V_{DC} = \frac{2 \cdot V_{DC(pk)}}{\pi} = \frac{2 \cdot v_{i(pk)}}{\pi} = \frac{2 \cdot 311}{\pi} \cong 198V$$

A tensão de pico na saída, considerando que os componentes são ideais, será igual a tensão de entrada do inversor, ou seja, 311 V.

A tensão eficaz na carga será:

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} = 220V$$

As correntes de pico e eficaz na carga serão:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{311}{10} = 31,1A$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{220}{10} = 22A$$

Exercícios Propostos

EP 01) Explique a diferença entre inversores os inversores: onda quadrada, PWM senoidal e PWM senoidal sem barramento em corrente contínua.

EP 02) Qual destes inversores opera naturalmente em malha aberta: onda quadrada, PWM senoidal ou PWM senoidal sem barramento em corrente contínua?

EP 03) Quais as vantagens de se empregar inversores onda quadrada?

EP 04) Cite cargas que podem ser alimentadas por inversores onda quadrada.

EP 05) Cite cargas que não podem ser alimentadas por inversores onda quadrada?

EP 06) O que são inversores com forma de onda quase senoidal?

EP 07) Quais as vantagens de se empregar inversores PWM senoidal?

EP 08) Quais as vantagens de se empregar inversores PWM senoidal sem barramento cc?

EP 09) Simule o circuito da Figura 13 considerando a tensão da fonte como sendo de 110 V.

EP 10) Simule o circuito da Figura 17 considerando a tensão da fonte como sendo de 110 V.

EP 11) Simule o circuito da Figura 23 considerando a tensão da fonte como sendo de 110 V.

EP 12) Dimensione o capacitor de filtro do retificador do circuito da Figura 17 para uma ondulação de 20%, considerando a carga apresentada naquele circuito.

5 Laboratório

5.1 Introdução

Esta atividade de laboratório tem por objetivo exercitar o conteúdo estudado nesta aula (capítulo), especificamente sobre o estudo de conversores cc-ca operando como inversores com modulação PWM senoidal.

Em síntese, objetiva-se:

- Aplicar os princípios da modulação PWM senoidal;
- Simular um conversor cc-ca operando em malha aberta;
- Entender os princípios básicos de conversores cc-ca;
- Realizar medições no circuito no circuito simulado;
- Observar as formas de onda sobre os elementos do circuito.

5.2 Inversor Onda Quadrada

Implemente no simulador o circuito mostrado na Figura 29. A tensão de entrada (v_i) será de 220 V. Conecte um resistor de carga de 10Ω . Os diodos são ideais, o capacitor C_i tem capacitância de $220 \mu\text{F}$.

Implemente um circuito de comando que gere uma tensão quadrada na carga. Para tal, utilize a modulação de dois níveis. A frequência fundamental da tensão de saída (v_o) será de 60 Hz.

Simule o circuito mostrado na Figura 29 e meça os valores solicitados a seguir.

$$V_{o(pk)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad V_{o(ef)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad F_o = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\dot{i}_{o(ef)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \dot{i}_{in(avg)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \dot{i}_{i(ef)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

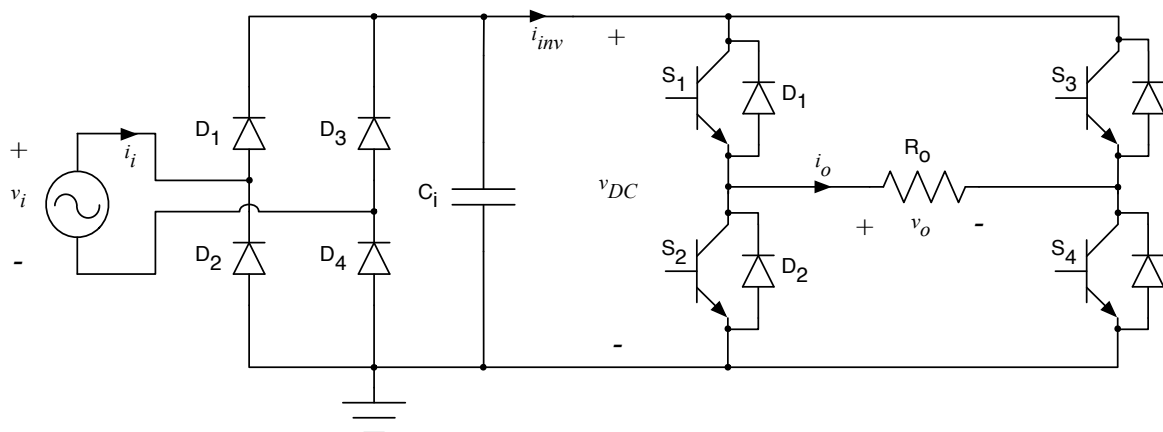


Figura 29 – Inversor onda quadrada.

5.1 Inversor PWM Senoidal

Implemente no simulador o circuito mostrado na Figura 30. A tensão de entrada (v_i) será de 220 V. O resistor de carga será de 10Ω , o capacitor de filtro da tensão de saída será de $10 \mu\text{F}$. O indutor de filtro da corrente de saída será de $500 \mu\text{H}$. Os diodos são ideais, o capacitor tem capacitância C_i de $220 \mu\text{F}$. A frequência de comutação será de 50 kHz.

Implemente um circuito de comando que gere uma tensão senoidal na carga. Para tal, utilize a modulação de três níveis. A frequência fundamental da tensão de saída (v_o) será de 60 Hz.

Simule o circuito mostrado na Figura 30 com índice de modulação de 80% e meça os valores solicitados a seguir.

$$V_{o(pk)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad V_{o(ef)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad F_o = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\dot{i}_{o(ef)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \dot{i}_{in(ef)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \dot{i}_{i(ef)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

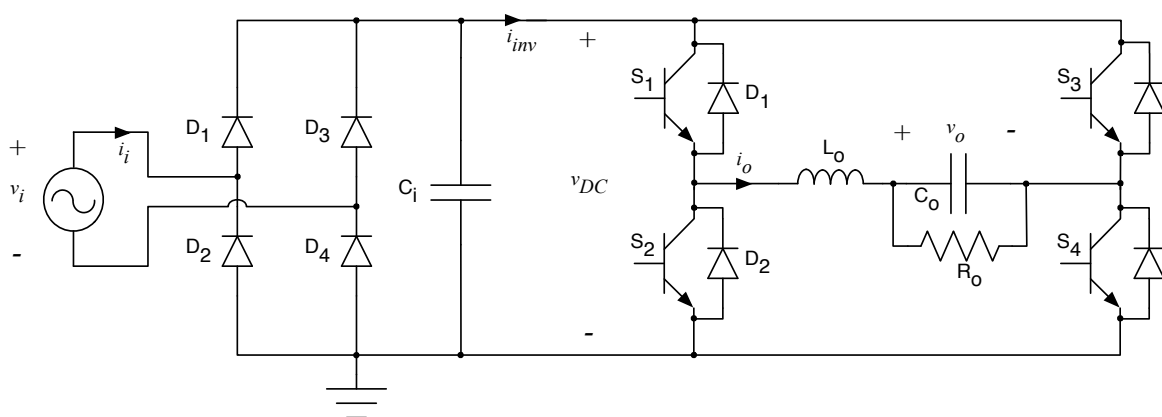


Figura 30 – Inversor PWM senoidal.

5.1 Inversor PWM Senoidal sem Barramento CC

Implemente no simulador o circuito mostrado na Figura 31. A tensão de entrada (v_i) será de 220 V. O resistor de carga será de 10Ω , o capacitor de filtro da tensão de saída será de $10 \mu\text{F}$. O indutor de filtro da corrente de saída será de $500 \mu\text{H}$. Os diodos são ideais, o capacitor tem capacitância C_i de $2,2 \mu\text{F}$.

A frequência de comutação será de 50 kHz. Implemente um circuito de comando que gere uma tensão senoidal na carga. Para tal, utilize a modulação de três níveis. A frequência fundamental da tensão de saída (v_o) será de 60 Hz.

Simule o circuito mostrado na Figura 31 com índice de modulação de 80% e meça os valores solicitados a seguir.

$$V_{o(pk)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad V_{o(ef)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad F_o = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$i_{o(ef)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad i_{in(avg)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad i_{i(ef)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

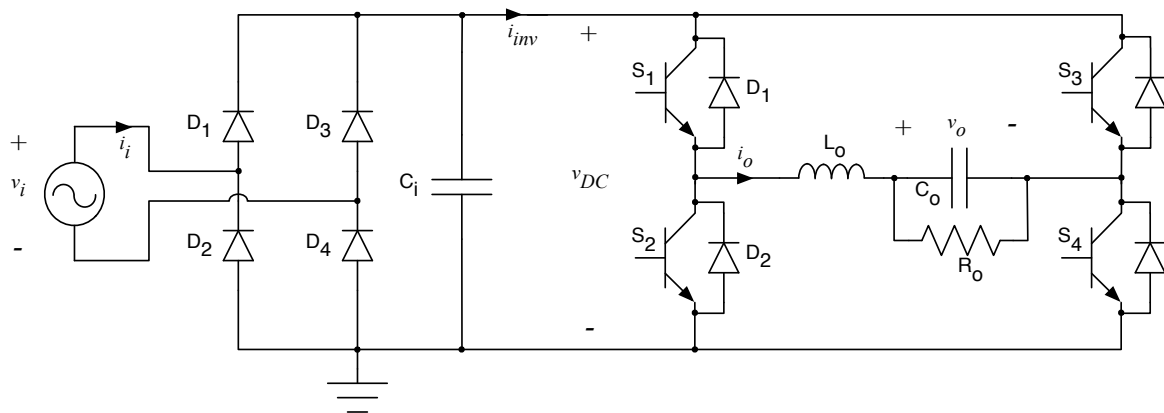


Figura 31 – Inversor PWM senoidal sem barramento cc.

5.2 Questões – Comente suas respostas.

- 1) O circuito operou corretamente, ou seja, conforme o esperado?
- 2) Quais foram as dificuldades encontradas nesta aula de laboratório?
- 3) Alterando-se o índice de modulação, a tensão de saída poderia ser alterada?
- 4) Como poderia ser alterada a frequência da tensão de saída do inversor?

6 Referências

- [1] AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- [2] ERICKSON, Robert W. Fundamentals of Power Electronics. New York, EUA – Chapman & Hall, 1997.
- [3] MOHAN, N. Power Electronic Converters, Application and Design. New York: IE-Wilwy, 2003.
- [4] BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. Conversores CC-CC Básicos Não Isolados. Florianópolis, SC - Brasil – Edição dos Autores, 2000.
- [5] PETRY, Clóvis A. Estabilizador de Tensão Alternada para Cargas Não-Lineares. Florianópolis, SC – Brasil, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [6] PETRY, Clóvis A. Estabilizadores de tensão alternada para alimentação de cargas não-lineares estudo de variações topológicas e métodos de controle. Florianópolis, SC – Brasil, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.