

DESENVOLVIMENTO DE UM INVERSOR DE TENSÃO MONOFÁSICO COM SAÍDA SENOIDAL PURA PARA CARGAS NÃO LINEARES

Development of a single-phase voltage inverter with pure sinusoidal output for non-linear loads

ADONO, Gustavo Thomaz

Centro Universitário de Jaguariúna – UNIFAJ

CATÃO, Gabriel Pinto

Centro Universitário de Jaguariúna – UNIFAJ

SANTOS, Leonardo Caíque

Centro Universitário de Jaguariúna – UNIFAJ

TASSO, Gabriel

Centro Universitário de Jaguariúna – UNIFAJ

Resumo: Apresentação do estudo e desenvolvimento de um inversor de tensão monofásico com saída senoidal pura para cargas não lineares, com tensão de saída 127V – 60 Hz, com potência máxima de 250W. Utilizando um microcontrolador da família STM32 e aplicando a técnica de modulação por largura de pulso senoidal (SPWM), busca-se a obtenção de sinal senoidal puro para ser entregue à carga. Ao final, resultados de todo o projeto são apresentados, incluindo simulações no software PSIM, desenvolvimento de uma placa de circuito impresso no *software* Altium Designer, testes e medições em protótipo físico, bem comparação do inversor à dispositivos similares da literatura convencional.

Palavras-chave: Inversor; tensão; “SPWM”.

Abstract: Presentation of the study and development of a single-phase voltage inverter with pure sinusoidal output for non-linear loads, with an output voltage of 127V – 60 Hz, with a maximum power of 250W. Using a microcontroller from the STM32 family and applying the sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technique, the aim is to obtain a pure sinusoidal signal to be delivered to the load. At the end, results of the entire project are presented, including simulations in PSIM software, development of a printed circuit board in Altium Designer software, tests and measurements on a physical prototype, as well as comparison of the inverter to similar devices in the conventional literature.

Key-words: Inverter; voltage; “SPWM”.

INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos, o homem se utilizou de sistemas conversores de energia para transformação dos mais variados tipos de energia, seja desta em outra forma ou trabalho, tais como energia cinética em energia elétrica ou vice-versa.

A eletrônica de potência, objeto deste artigo, trata das conversões de energia no ramo da eletricidade e pode ser definida como a arte de converter energia elétrica de forma eficiente, limpa, compacta e arrojada, satisfazendo as necessidades definidas (RASHID, 2014). Utiliza como principal elemento para realização das conversões elétricas as chaves semicondutoras, que observaram uma revolução notável a partir de 1958, com o desenvolvimento do tiristor pela *General Electric Company* e posteriormente entre o final dos anos 80 e início da década de 90 (CARROL, 1996), possibilitando o chaveamento mais veloz de dispositivos de potência cada vez mais elevada.

O uso dos conversores na eletrônica de potência, possibilita a transformação dos níveis de tensão, corrente e frequência, podendo estes serem classificados em quatro tipos: corrente contínua para corrente contínua (CC-CC), corrente alternada para corrente alternada (CA-CA), corrente alternada para corrente contínua (CA-CC) e corrente contínua para corrente alternada (CC-CA).

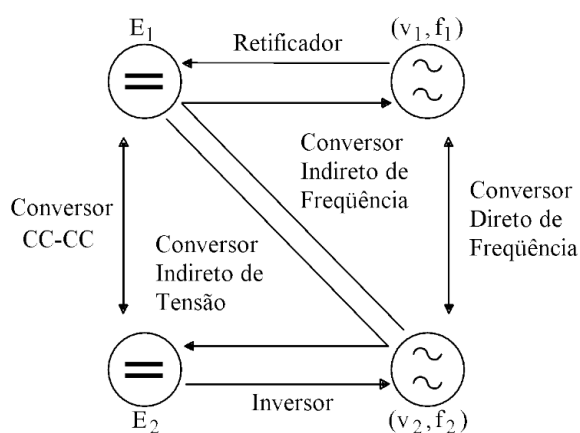


Figura 1: Conversores da eletrônica de potência
Fonte: BARBI (2019).

Fundamentação teórica

Também conhecidos como inversores, os conversores CC-CA têm a finalidade de transformar um sinal de entrada contínuo em um sinal de saída alternado simétrico, com amplitude e frequência desejados (BEDFORD e HOFT, 1964).

Classificados como inversores de tensão ou corrente, sendo seu sistema monofásico ou trifásico, os inversores apresentam diversas topologias para alcançar a conversão de tensão ou corrente desejados.

Essencialmente, um inversor de tensão é alimentado por uma fonte CC constante, normalmente uma bateria ou algum retificador controlado, e o inversor executa a conversão para uma tensão de saída CA (AHMED, 2000).

O objetivo deste artigo, é verificar as duas principais topologias e técnicas de controle disponíveis para os inversores de tensão monofásicos.

Inversor de tensão em meia-ponte

Considerado a base dos inversores de tensão e utilizado em aplicações de baixa potência, a configuração em meia-ponte utiliza duas chaves semicondutoras, que comumente podem ser um BJT (*Bipolar Junction Transistor*) ou um MOSFET (*metal-oxide semiconductor field-effect transistor*), duas fontes de tensão DC e dois diodos completam o circuito, mantendo o funcionamento adequado do mesmo quando a carga é indutiva (AHMED, 2000).

Realizando a conexão entre a carga e as fontes de tensão, as chaves se alternam ciclicamente entre abertas e fechadas por metade do ciclo de trabalho cada, apresentando na saída um sinal de tensão quadrado AC, que por limitação desta topologia, tem amplitude igual a metade da soma das fontes de tensão de entrada.

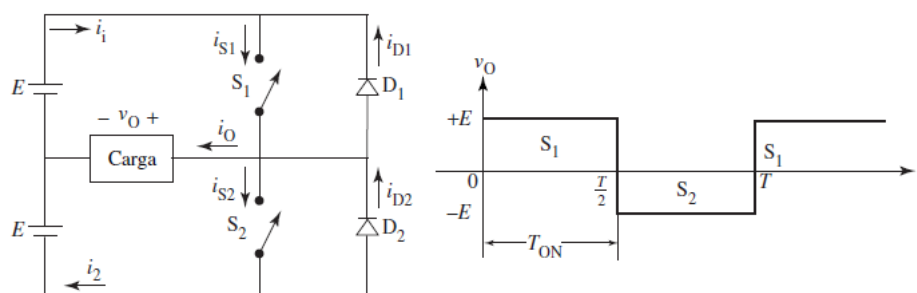


Figura 2: Inversor de tensão em meia ponte, sinal de saída.
Fonte: Adaptado de AHMED (2000, p 353).

Inversor de tensão em ponte completa

Originário da combinação entre dois circuitos em meia ponte, o inversor de ponte completa tem seu funcionamento baseado no chaveamento em pares das quatro

chaves semicondutoras presentes no circuito, durante metade de cada ciclo de trabalho (AHMED, 2000).

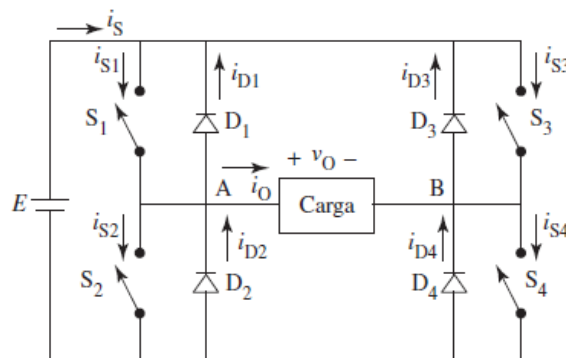


Figura 3: Inversor de tensão em ponte completa.
Fonte: AHMED (2000, p 357)

Seu funcionamento é baseado no chaveamento alternado em pares dos quatro elementos interruptores. Com a passagem de corrente entre S1 e S4 ou S2 e S3, é permitido a alternância de polaridade na carga, fornecendo à saída do circuito um sinal alternado de amplitude máxima igual à tensão de entrada (AHMED, 2000).

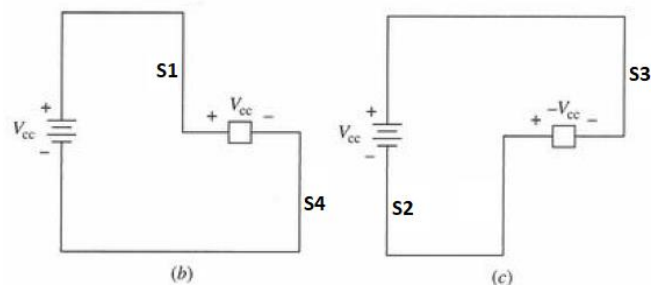


Figura 4: Chaveamento S1/S4 e S2/S3 da carga.
Fonte: Adaptado de HART (2012, p 347).

No entanto, devemos notar que as chaves S1 e S2 e S3 e S4 não podem ser fechadas ao mesmo tempo, visto que ocorreria um curto-circuito da fonte de entrada. Como na prática as chaves eletrônicas não possuem ativação instantânea, é necessário realizar a temporização adequada da transição entre as chaves, evitando um curto-circuito. O nome deste procedimento é conhecido como tempo morto (HART, 2012).

Dentre as técnicas existentes para efetuar o controle dos elementos comutadores do inversor de tensão, a modulação por largura de pulso (PWM) é a mais encontrada. Nela, a tensão de saída é uma onda modulada, onde a largura dos pulsos

se altera conforme a necessidade de projeto. A modulação por largura de pulso pode ser classificada em três grupos: modulação por largura de pulso simples, modulação por largura de pulso múltipla e modulação por largura de pulso senoidal (AHMED, 2000).

Modulação por largura de pulso simples

Neste método de controle o sinal de saída apresenta apenas um pulso por semiciclo da tensão, onde a amplitude máxima do sinal é definida pela alteração do tempo de condução de cada par de chaves semicondutoras, no caso de um inversor de ponte completa (AHMED, 2000).

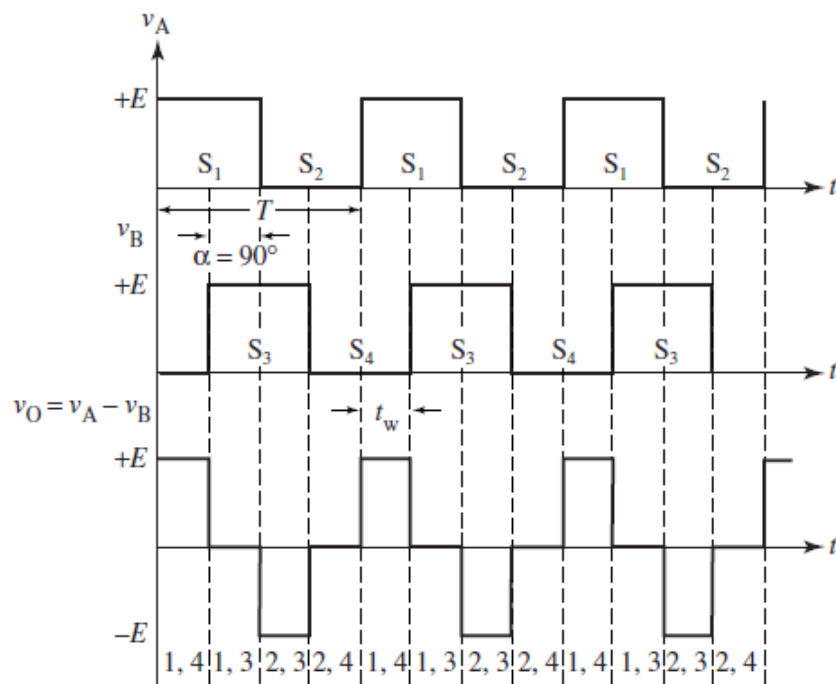


Figura 5: Modulação por largura de pulso simples.
Fonte: AHMED (2000, p 367).

Modulação por largura de pulso múltipla

O controle por largura de pulso múltipla, ao contrário da técnica anterior, não limita a duração de um único pulso por semiciclo, e sim aumenta a quantidade de pulsos existentes em cada semiciclo, a fim de controlar a tensão de saída (AHMED, 2000).

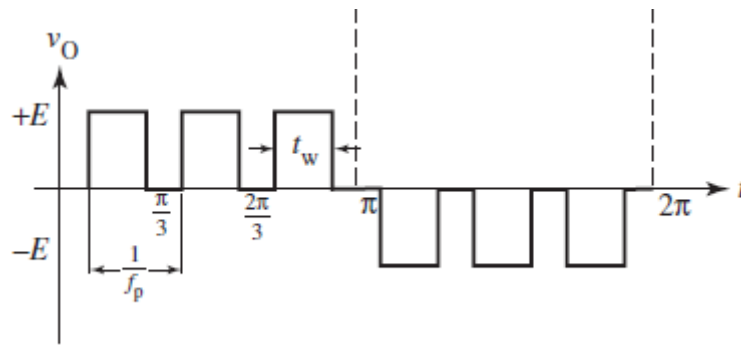


Figura 6: Sinal de saída modulado por largura de pulso múltipla.
Fonte: Adaptado de AHMED (2000, p 368).

A geração do sinal de controle é obtida a partir da comparação entre um sinal de referência linear e uma onda portadora triangular, que são aplicados aos elementos comutadores (RASHID, 2014), como exemplificado na Figura 7.

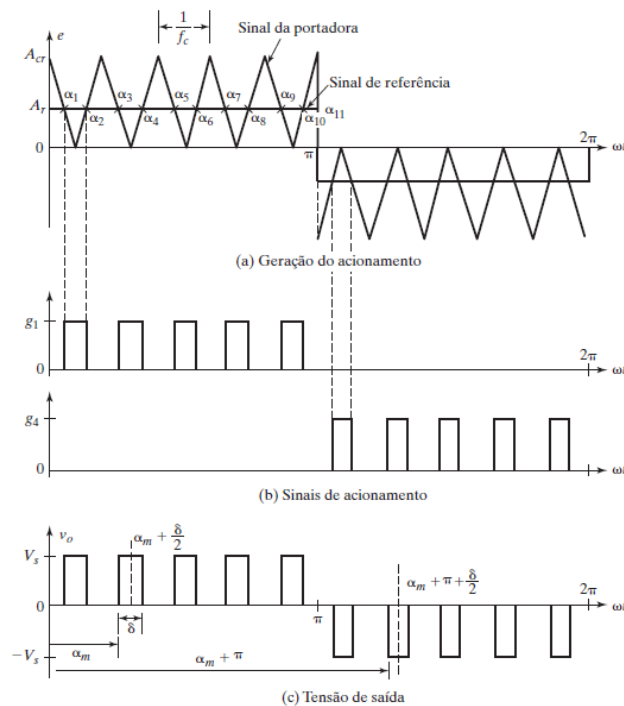


Figura 7: Processo de geração do sinal modulado por largura de pulso múltipla.
Fonte: RASHID (2014, p 263).

Modulação por largura de pulso senoidal

Desejando obter na saída um sinal senoidal, esta técnica utiliza uma onda senoidal como referência de comparação à um sinal triangular. Neste método, a duração dos pulsos por semiciclo se altera conforme a amplitude da onda senoidal utilizada na comparação (RASHID, 2014). Dessa forma, os pulsos terão duração mais longa nos momentos de pico da onda senoidal (AHMED, 2000).

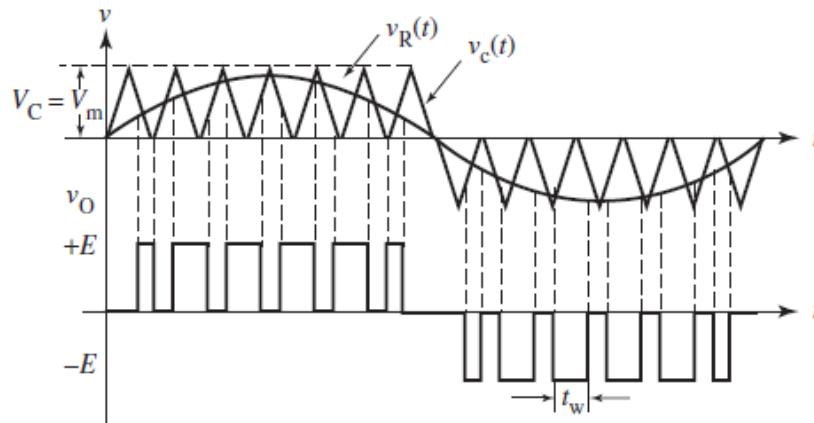


Figura 8: Comparação do sinal senoidal e triangular, geração da modulação por largura de pulso senoidal.

Fonte: AHMED (2000, p 370).

Transformador

Devido aos dois métodos de conversão abordadas nesse artigo, sendo meia-ponte (Half Bridge) e ponte completa (Full Bridge), deve-se atentar a construção do transformador, etapa destinada a elevação de tensão, onde surge preocupações com possíveis saturação de núcleo (GERENT, 2005)

Conforme a figura 9, a escolha do núcleo é dada pela área da janela do núcleo (A_w) e do entreferro (A_e).

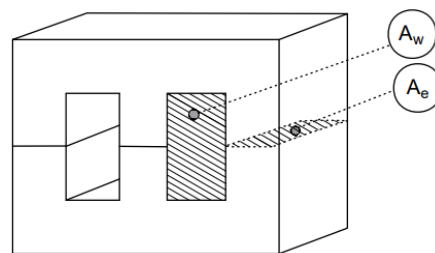


Figura 9: Núcleo Transformador
Fonte: BARBI (2007).

A definição do núcleo se dá por (1.1):

$$A_e A_{ew} = \frac{1,1 P_{out} 10^4}{K_p K_w J f \Delta B} \text{ cm}^4 \quad (1.1)$$

Onde a constante K_p representa o fator de utilização do primário e a constante K_w o fator de utilização da área do enrolamento, tendo seus valores sugeridos por (Barbi, 2007), como $K_p = 0,41$ e $K_w = 0,4$.

Para a adoção da secção do fio de cobre devemos observar abaixo (1.2) (BARBI, 2007):

$$S_{cm} = \frac{I_{ef}}{J} \quad (1.2)$$

Para a definição do número de espiras do primário utilizamos (1.3) (OLIVEIRA, 2009):

$$N_1 \geq \frac{V_{imin} D_{max}}{A_e B F_a} \quad (1.3)$$

Deste modo (1.4) apresenta a relação de transformação (OLIVEIRA, 2009).

$$N = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.4)$$

Filtro de Saída

Em função da manutenção das frequências de saída, devido as altas distorções harmônicas, provenientes da condensação do sinal senoidal, a adoção de um filtro LC passa-baixa apresentado na Figura 10, torna-se fundamental (MICHELS, CAMARGO, & BOTTERÓN, 2005).

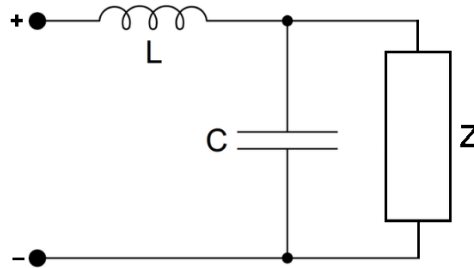


Figura 10: Filtro LC
Fonte: Adaptado de MICHELS, CAMARGO, & BOTTERÓN (2005).

Deste modo o resultado da função de transferência se mostra em (2.1) e (2.2), onde a frequência de corte do filtro e dada por (ω), e o coeficiente de amortecimento por (ζ) (SANTOS, 2017).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (2.1)$$

e,

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\omega_o^2}{s^2 + 2\zeta\omega_o s + \omega_o^2} \quad (2.2)$$

Sendo,

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

e,

$$\zeta = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.4)$$

Devemos ressaltar que o valor do coeficiente de amortecimento tenha seu valor acima de 0,7, como também não deve ultrapassar a 1, a fim de preservar-se de oscilações e defasagens respectivamente.

Em função da frequência de corte recomendasse considerar valores próximos a trinta vezes superior que a fundamental (SANTOS, 2017).

OBJETIVO

O trabalho surge pela motivação de disponibilizar uma fonte de energia de corrente alternada (CA) a partir da conversão de energia de uma bateria (fonte de corrente contínua), em locais diversos onde não haja disponibilidade de tensão alternada, como acampamentos, regiões montanhosas, vilarejos de difícil acesso ou regiões periféricas sem infraestrutura adequada.

Posto isso o trabalho visa o estudo, projeto e montagem de um inversor senoidal monofásico com saída senoidal pura para cargas não lineares, visando o aprimoramento de conversores comerciais que não apresentam tais características.

METODOLOGIA

Para este trabalho foi indispensável uma vasta pesquisa bibliográfica afim de gerar e melhorar os fundamentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Através desta pesquisa, foi possível determinar o circuito de controle, interface de potência, transformador elevador e o filtro LC que atende a necessidade das cargas não-lineares. O projeto foi dividido em seis etapas a qual a Figura 11, ilustra.

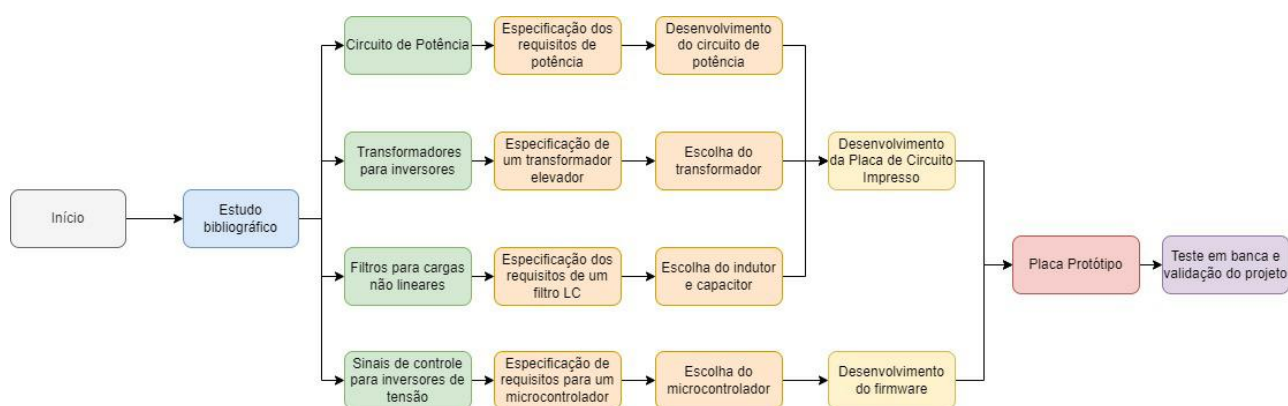


Figura 11: Fluxograma de desenvolvimento do projeto.
Fonte: Autoria própria.

A primeira etapa foi baseada na pesquisa bibliográfica, foram analisadas na literatura artigos científicos, livros, monografias e dissertações.

Na segunda etapa, foi determinado a separação dos principais temas abordados no trabalho e cada um estudado de forma aprofundada. Aqui foi possível realizar uma especificação das técnicas e requisitos dos materiais necessários para o desenvolvimento do protótipo físico.

Na terceira etapa, foi feita a especificação e dimensionamento dos indutores, capacitores, chaves de potência, microcontrolador, transformador e demais componentes para que fosse possível realizar a confecção de protótipo físico.

Na quarta etapa, foi desenvolvido o circuito elétrico, o layout da placa de circuito impresso, a lista de materiais e arquivos de fabricação, para que fosse possível fabricar a placa protótipo em uma empresa especializada. Nesta etapa também foi desenvolvido as bibliotecas e algoritmos necessários para realizar o controle da interface de potência, bem como a realização de simulações no *software* PSIM para validação da funcionalidade do projeto.

A quinta etapa será responsável pela montagem do protótipo, tanto da parte eletrônica quanto da parte elétrica e mecânica, nesta etapa também será realizado testes, elétricos e funcionais a fim de garantir a integridade dos sub circuitos e algoritmos desenvolvidos previamente.

Já na sexta etapa, serão realizados testes elétricos e funcionais com cargas não lineares, dessa forma será possível analisar se o inversor irá atender a todos os requisitos impostos neste trabalho.

DESENVOLVIMENTO

Parâmetros de projeto

Para o início do desenvolvimento do inversor de tensão, alguns parâmetros de projeto devem ser estabelecidos. Inicialmente, serão definidos os seguintes valores: tensão de saída CA de 127 V – 60 Hz, corrente máxima de saída de 2 A, fornecendo uma potência de saída de até 250 W, e tensão de entrada CC de 12 V, provenientes de uma bateria.

A técnica para obtenção do sinal de saída alternado escolhida foi a modulação por largura de pulso senoidal, que será obtida a partir da utilização de um microcontrolador, neste caso o STM32G474RE. A topologia de potência do inversor será a saída à ponte completa, com o emprego de quatro chaves do tipo MOSFET.

Por fim, um transformador customizado será utilizado como elevador de tensão, aliado a um filtro de segunda ordem para refino da tensão de saída disponibilizada à carga.

Circuito de controle

Para gerar uma senoide através do *PWM* do microcontrolador foi utilizada a seguinte fórmula (3.1).

$$Y_{SineDigital}(x) = \left(\sin \sin \left(x \frac{2\pi}{n_s} \right) + 1 \right) \left(\frac{0xFFF + 1}{2} \right) \quad (3.1)$$

Onde x é o valor do *duty cycle* referente a tensão da senoide a ser obtida, esses valores são previamente calculados em um *buffer* de 850 amostras, assim quanto maior o número de amostras maior a resolução da onda senoidal e para garantir um número alto de amostras mesmo em frequências mais altas, o *PWM* de 16 bits juntamente com um processador trigonométrico e uma unidade de ponto flutuante tornam o STM32G474RE o microcontrolador que atende a todos os requisitos para a malha de controle.

Circuito de potência

Composto pela ponte completa de chaves semicondutoras, neste caso transistores MOSFET, tem a função de realizar o chaveamento da tensão no enrolamento primário do transformador elevador, à fim de induzir uma tensão

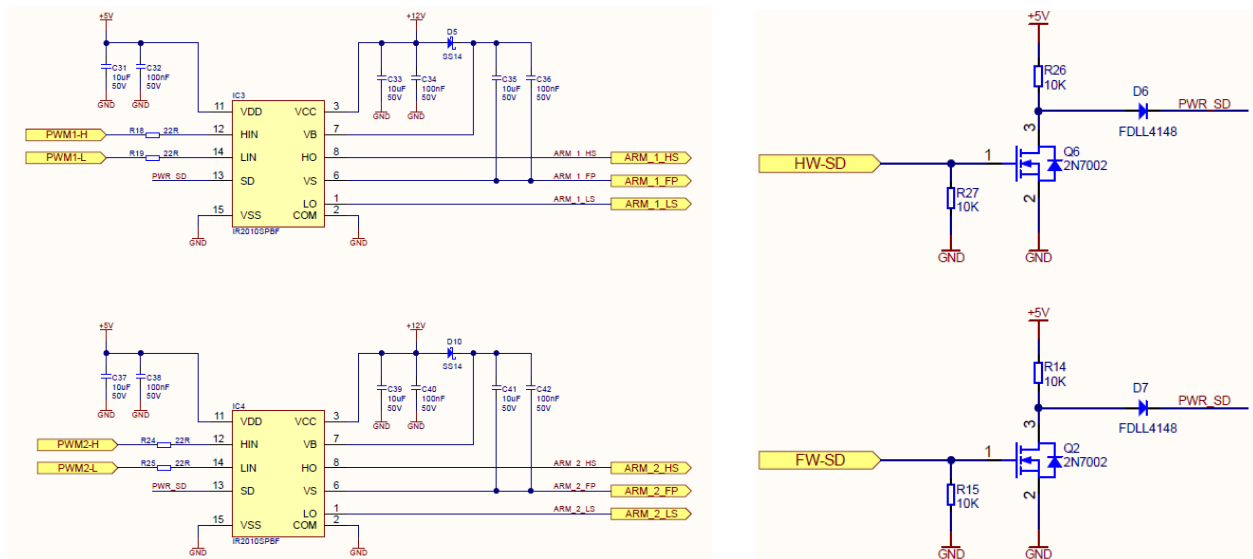


Figura 13: Circuito de *driver* ponte completa (esq.) e circuito de *shutdown* (dir.).

Fonte: Autoria própria.

Transformador

A seleção do transformador para este circuito leva em consideração aspectos semelhantes ao já mencionados como: corrente máxima de entrada, potência máxima de dissipação e capacidade de operação em altas frequências de chaveamento.

Deste modo será utilizado um transformador elevador de 12V para 127V, operando em uma faixa de frequência de 50KHz, dimensionado a uma potência de 300W, com o objetivo de normalizar a potência de saída suprimindo possíveis perdas de rendimento ocasionadas pela transformação, bem como pelo processo de conversão.

Como resultado das necessidades apresentadas o transformador foi fabricado de forma customizada para esta aplicação específica.

Filtro de saída

Necessário para minimizar as distorções harmônicas de alta frequência no sinal proveniente do transformador, e de forma a garantir uma forma de onda senoidal com frequência de 60 Hz à carga, o filtro LC (indutor-capacitor) do tipo passa-baixa de segunda ordem deve ser determinado conforme 4.1 e 4.2.

$$L = \frac{E}{4 \times F_{PWM} \times \Delta I_L} \quad (4.1)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 \times L} \quad (4.2)$$

Desta forma, encontra-se o valor da indutância conforme 4.3, considerando a tensão de saída de 127 V, frequência do PWM de 50 KHz e adotando a variação de corrente no indutor como 40%:

$$L = \frac{127}{4 \times 50000 \times 0.8} \rightarrow (4.3)$$

Em seguida a capacitância de acordo com 4.4:

$$C = \frac{1}{(2 \times \pi \times 10000)^2 \times L} \rightarrow (4.4)$$

Após a determinação dos valores teóricos de indutância e capacitância, 780uH e 330nF, estes foram aproximados para os valores comerciais 1mH e 2.2uF, sendo o indutor fabricado de forma customizada para esta aplicação específica.

Circuitos adicionais

Adicionalmente às etapas descritas anteriormente, o inversor de tensão é composto por circuitos de sinalização estruturados por indicadores luminosos, sonoros e *display OLED*, conjunto de monitoramento de temperatura e resfriamento formados com sensores NTC e *cooler* respectivamente, bem como conexões para possíveis atualizações do código de controle e obtenção de dados de desempenho do inversor.

Finalmente, amplificadores operacionais realizam a proteção geral do inversor com a desativação do bloco de potência, por meio do circuito de *shutdown*, na ocorrência de qualquer anomalia elétrica, como sobre tensão e/ou corrente, conexão de alimentação indevida ou falhas no circuito de controle principal.

RESULTADOS

Com a finalidade de validar o desenvolvimento do esquema elétrico do inversor de tensão, foram realizadas simulações no *software* PSIM.

Inicialmente verifica-se os sinais de PWM gerados pelo microcontrolador que serão aplicados à ponte de MOSFETs.

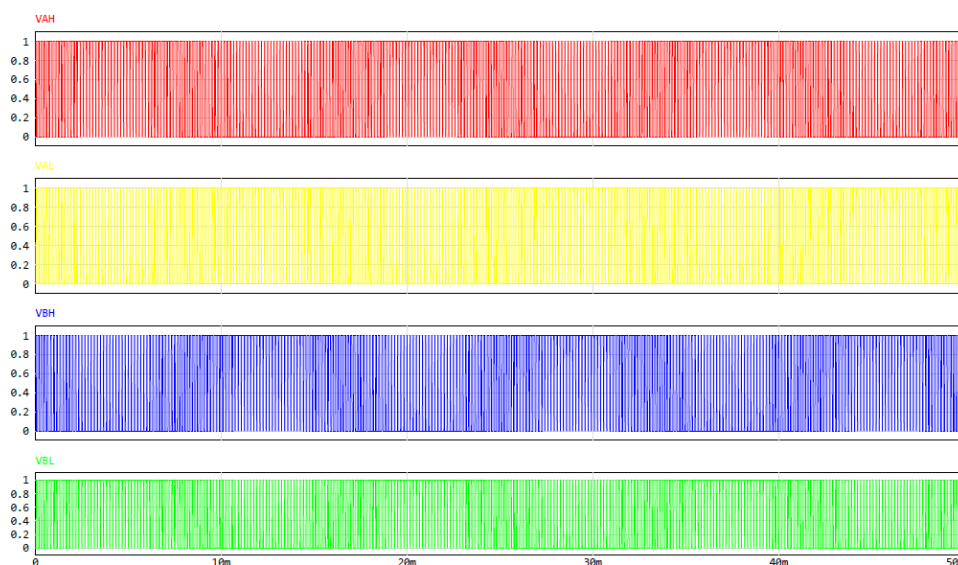


Figura 14: Sinais PWM gerados pelo MCU, aplicados à ponte de MOSFETs.
Fonte: Autoria própria (PSIM).

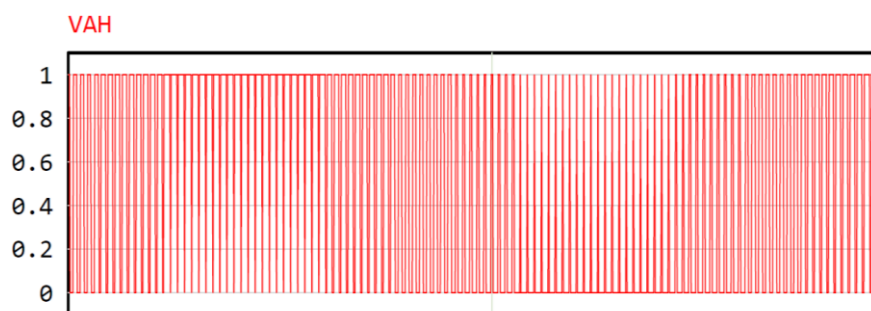


Figura 15: Sinal PWM ampliado.
Fonte: Autoria própria (PSIM).

Sequencialmente, observam-se as formas de onda oriundas do secundário do transformador, já em níveis elevados de tensão, próximos à 127 V.

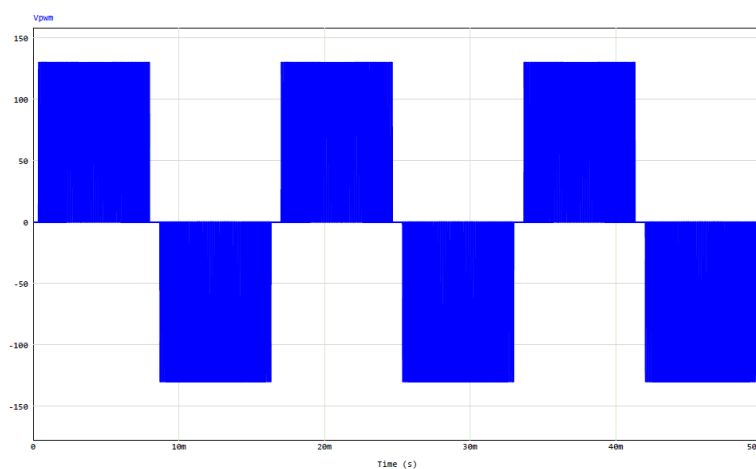


Figura 16: Forma de onda obtida no secundário do transformador.
Fonte: Autoria própria (PSIM).

Por fim, o sinal disponibilizado à carga após passagem pelo filtro LC, em formato senoidal, 127 V – 60 Hz.

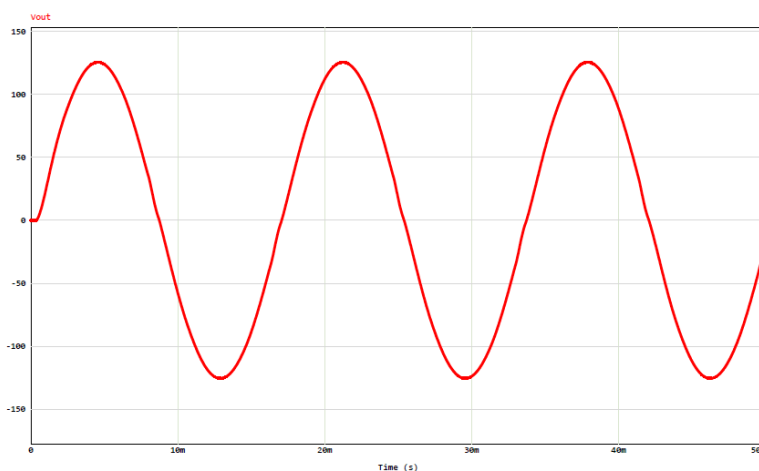


Figura 17: Forma de onda disponibilizada à carga, sinal de saída.
Fonte: Autoria própria (PSIM).

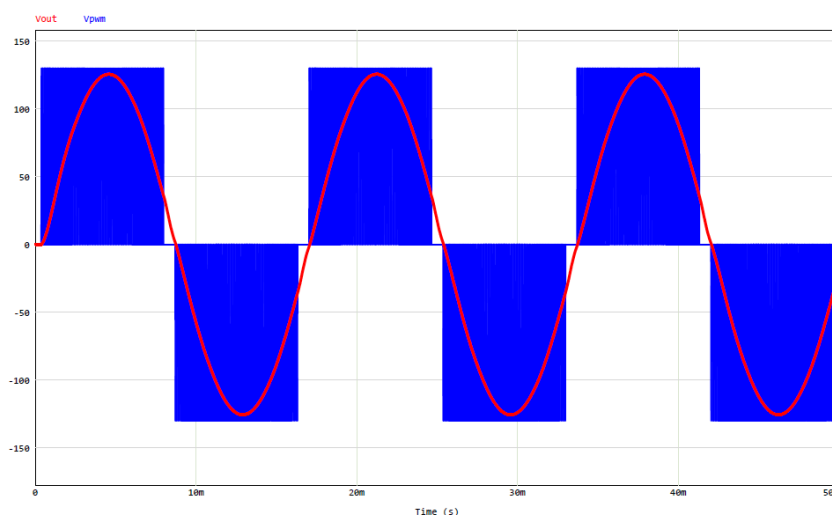


Figura 18: Comparação sinal secundário transformador (azul) X sinal disponibilizado à carga (vermelho).
Fonte: Autoria própria (PSIM).

Após a comprovação do funcionamento adequado das etapas cruciais do inversor de tensão, foi realizado o *design* da placa de circuito impresso por meio do *software* Altium Designer, para posterior montagem do protótipo e validação prática de seu funcionamento.

A placa foi desenvolvida seguindo padrões de *design* para manufatura, com o intuito de se obter um protótipo próximo à um produto comercial.

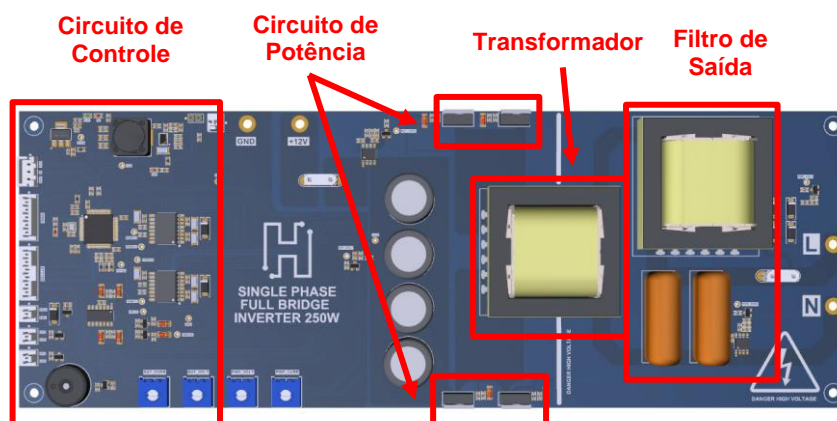


Figura 19: Placa de circuito impresso desenvolvida, vista superior.
Fonte: Autoria própria (Altium Designer).



Figura 20: Placa de circuito impresso desenvolvida, perspectiva isométrica.
Fonte: Autoria própria (Altium Designer).

Definido o *layout* da placa de circuito impresso e geração de seus arquivos de fabricação, ela foi produzida e montada seguindo padrões técnicos para prosseguimento dos testes e validações. A figura 21 ilustra o aspecto inicial do protótipo.

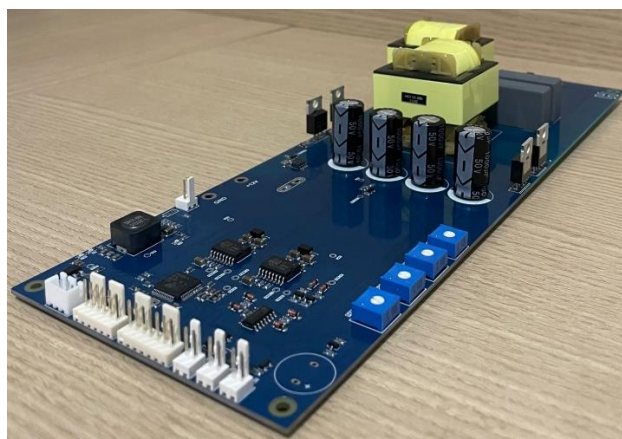


Figura 21: Montagem inicial do protótipo.
Fonte: Autoria própria.

A obtenção e visualização de alguns sinais de controle são necessários para validação e comprovação do funcionamento do protótipo do inversor de tensão.

Primeiramente, é apresentado na figura 22 dois dos sinais de PWM gerados pelo microcontrolador que são aplicados à ponte de MOSFETs. Nota-se que a frequência deste é próxima de 50 KHz, frequência definida na seção do transformador e filtro de saída.

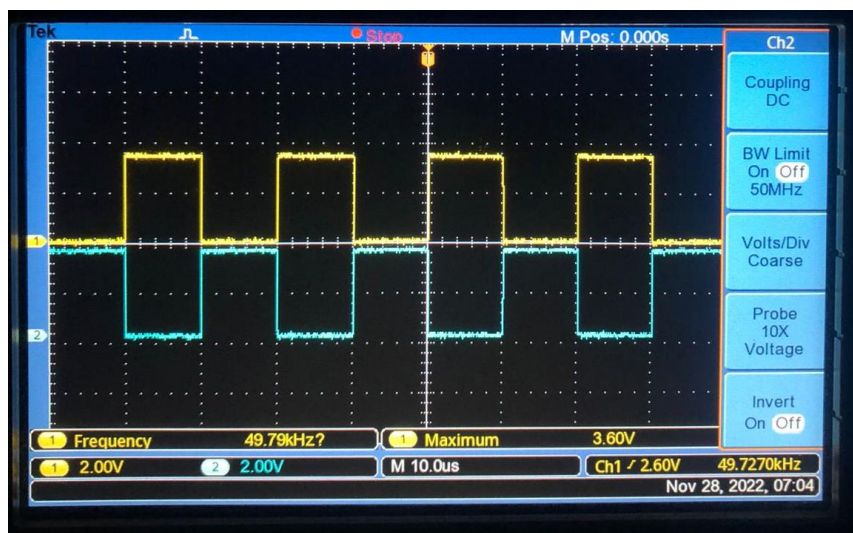


Figura 22: Sinais PWM aplicados à ponte de MOSFETs.
Fonte: Autoria própria.

Finalmente, o sinal senoidal de saída, após passagem pelo filtro LC, com nível de tensão próximo à 127 V – 60Hz. Cita-se que a ponta de prova de medição está configurada para atenuação do sinal em 100 vezes, portanto o valor de tensão exibido é de 1,28 V, que corresponde a aproximadamente 128 V reais na saída do circuito.

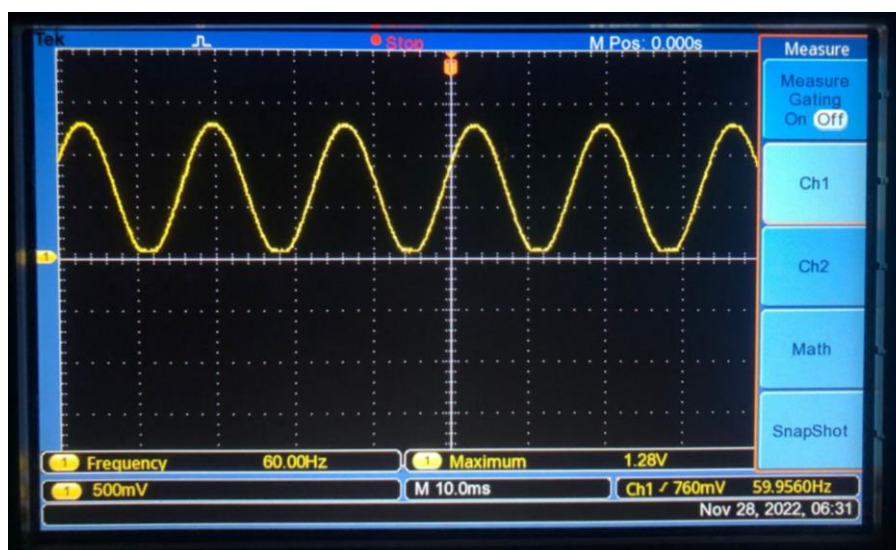


Figura 23: Sinal de saída do inversor de tensão, obtido do protótipo físico.
Fonte: Autoria própria.

Com a validação do funcionamento do protótipo, sua montagem foi finalizada, com acomodação do *display* de visualização, *cooler* de resfriamento, dissipadores de calor, sensores de temperatura e estrutura de proteção.

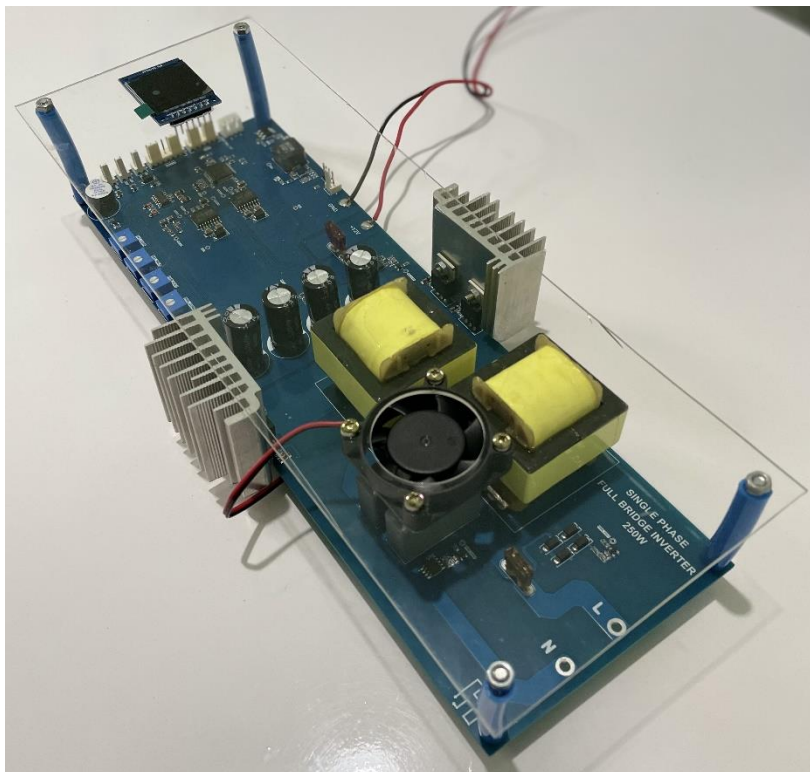


Figura 24: Protótipo finalizado.
Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos por meio das simulações no *software* PSIM e medições realizadas no protótipo físico, observa-se que o circuito projetado apresenta funcionamento dentro do esperado. Analisando as formas de onda regressivamente, simuladas e medições reais, o sinal disponibilizado à carga (figuras 17 e 23) apresentam as características definidas em projeto: formato senoidal com frequência de 60 Hz, amplitude de 127 V e potência máxima de saída próxima de 250W, validando o correto funcionamento do filtro LC, bem como o propósito de elevação da tensão oriunda da ponte por meio do transformador elevador.

Consequentemente, comprova-se a eficiência dos sinais PWM gerados por meio do microcontrolador STM32G474RE (figuras 14 e 22) que são aplicados a ponte de MOSFETs, originando a onda quadrada alternada (figura 16), na amplitude de 127 V, após elevação da tensão pelo transformador.

O *designer* da placa de circuito impresso, demonstra a utilização de técnicas profissionais de desenvolvimento, com o agrupamento de componentes de circuitos similares, como controle e potência, além da separação e distanciamento do circuito CA de alta tensão dos circuitos de controle CC. Por fim, a eficiência na distribuição dos componentes e roteamento destes, alcançando um tamanho bastante reduzido para a placa, 10cm x 28cm, apesar da potência razoável proporcionado pelo inversor de tensão.

Abaixo (figura 25), temos a comparação de circuitos no qual o projeto tomou como base de (Ahmed N. a., 2021), a esquerda observamos o circuito modular, e pelo objetivo da construção de um produto comercial optou-se pelo agrupamento e otimização dos circuitos, apresentando a direita.

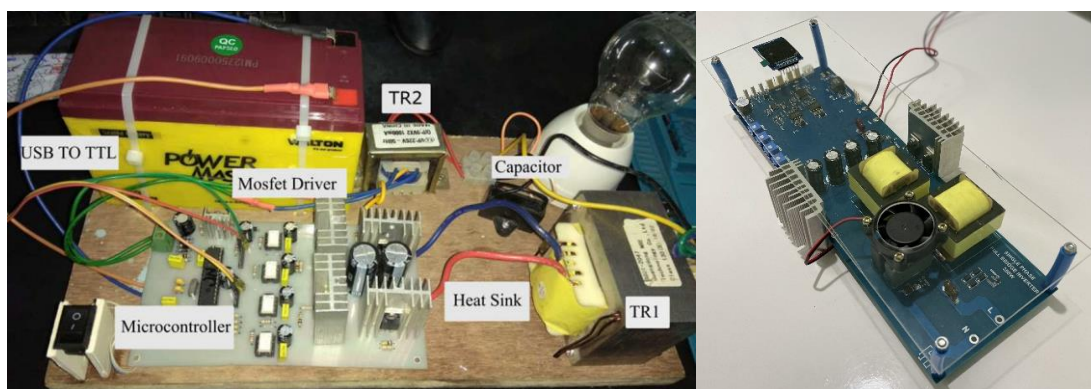


Figura 25: Comparação de circuitos
Fonte: Ahmed (2021), autoria própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final do desenvolvimento os objetivos principais foram atingidos com sucesso, apresentando um inversor próximo de uma versão comercial, a fim de solucionar necessidades de fonte de energia de corrente alternada (CA), em locais sem a devida infraestrutura, como também o aperfeiçoamento em comparação de conversores comerciais que não apresentam característica como saída senoidal pura.

No decorrer deste artigo, a realização de estudos da bibliografia disponível possibilitou a listagem dos métodos e topologias disponíveis para o projeto do inversor de tensão. Sequencialmente, a utilização do *software* de simulação PSIM possibilitou a obtenção de diversas formas de onda e a validação do esquema elétrico desenvolvido, seguido do projeto da placa de circuito impresso por meio do *software*

profissional Altium Designer, para posterior produção do protótipo físico e testes neste dispositivo.

Como sugestão consideramos a elevação da potência de saída para acionamento de cargas maiores, bem como o estudo sobre o rendimento da conversão e seus níveis de distorções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-RAHIM, N. M. (1996). Analysis and design of a multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source UPS inverters. *IEEE Transactions on power electronics*, 532--541.
- AHMED, A. (1998). *Eletrônica de Potência*. Pearson.
- AHMED, A. (2000). *Eletrônica de Potência*. Pearson.
- ANIS, M. I. (2009). Techniques for SPWM using LUTs on low-cost microcontrollers. *2009 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, 327-331.
- BARBI, I. (2007). *Eletrônica de potência: Projeto de fontes chaveadas*. Edição do autor.
- BEDFORD, B. D.; HOFT, R. G. (1964). *Principle of Inverter Circuits*.
- CARROLL, E. I. (1996). "Power Electronics: Where Next?". *Power Engineering Journal*.
- GERENT, F. H. (2005). Metodologia de Projeto de Inversores monofásicos de tensão para cargas não-lineares. Florianópolis.
- HART, D. W. (2012). *Eletrônica de Potência: análise e projeto de circuitos*.
- MICHELS, L., CAMARGO, R. F., & BOTTERÓN, F. (2005). Metodologia de projeto de filtros de segunda ordem para inversores de tensão com modulação PWM digital. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 16, n. 2,, p. 221-242,.
- OLIVEIRA, J. C. (2009). PROJETO E ESTUDO DE UM CONVERSOR CA/CC DE ALTA POTÊNCIA, 14,4 V E 300 A PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS. Londrina.
- RASHID, M. H. (2014). *Eletrônica de Potência. Dispositivos, circuitos e aplicações*.
- SANTOS, W. B. (2017). Estudo, reprodução e análise de um inversor de tensão em ponte completa chaveado em alta frequência com saída senoidal pura. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Sobre os autores

Gustavo Thomaz Adono.

Graduando em Engenharia Elétrica.

E-mail para contato: adonogustavo@gmail.com

Gabriel Pinto Catão.

Graduando em Engenharia Elétrica.

E-mail para contato: bielcatao9@gmail.com

Leonardo Caique dos Santos.

Graduando em Engenharia Elétrica.

E-mail para contato: leonardocaiquesantos@outlook.com

Gabriel Tasso.

Graduando em Engenharia Elétrica.

E-mail para contato: gabrieltassoo@gmail.com