

MODELO DE INVERSOR MONOFÁSICO BASEADO EM COMPONENTES DE ESTADO SÓLIDO

Guilherme Eduardo Fonseca
Paulo Sérgio Pádua de Lacerda

RESUMO

Este artigo apresenta a simulação de um inversor monofásico utilizando o software PSIM, com o objetivo de converter uma tensão contínua de 24V em uma tensão alternada de 127V, sem a necessidade de transformadores e empregando exclusivamente dispositivos de estado sólido. O inversor foi projetado em duas etapas principais: uma etapa de elevação da tensão contínua, utilizando um conversor boost, e uma etapa de conversão para corrente alternada, realizada por um conversor de ponte completa. O controle da conversão foi feito por modulação PWM, utilizando uma portadora triangular e uma modulante senoidal para gerar o sinal de comutação dos IGBTs. Os resultados da simulação confirmaram o comportamento esperado, com a saída do inversor apresentando uma forma de onda de senoide pura. No entanto, foi observada uma pequena distorção nos primeiros ciclos, atribuída ao transiente inicial do sistema. A escolha de dispositivos de estado sólido, como transistores, indutores e capacitores, permitiu a eliminação do transformador, resultando em um sistema mais compacto e eficiente. Este estudo demonstra a viabilidade de soluções modernas e econômicas para a conversão de potência, oferecendo uma alternativa eficaz às abordagens tradicionais que utilizam transformadores.

PALAVRAS-CHAVE: Inversor. Simulação. Modelagem.

ABSTRACT

This paper presents the simulation of a single-phase inverter using the PSIM software, with the objective of converting a direct voltage of 24 V into an alternating voltage of 127 V, without the need for transformers and using exclusively solid-state devices. The inverter was designed in two main stages: a step-up stage of the direct voltage, using a boost converter, and a stage of conversion to alternating current, performed by a full-bridge converter. The conversion was controlled by PWM modulation, using a triangular carrier and a sinusoidal modulating one to generate the switching signal of the IGBTs. The simulation results confirmed the expected behavior, with the inverter output presenting a pure sinusoidal waveform. However, a small distortion was observed in the first cycles, attributed to the initial transient of the system. The choice of solid-state devices, such as transistors, inductors and capacitors, allowed the elimination of the transformer, resulting in a more compact and efficient system. This study demonstrates the feasibility of modern and cost-effective solutions for power conversion, offering an effective alternative to traditional approaches using transformers.

KEYWORDS: Inverter. Simulation. Modeling.

1 INTRODUÇÃO

Os inversores de frequência desempenham um papel fundamental em diversas aplicações industriais e residenciais, sendo responsáveis por converter a tensão contínua (CC) em tensão alternada (CA), permitindo o controle preciso da velocidade e torque de motores elétricos, além de possibilitar a alimentação de dispositivos eletrônicos que operam em corrente alternada a partir de fontes de corrente contínua. Esses dispositivos são essenciais para a eficiência energética e a flexibilidade operacional em sistemas de potência.

Existem diferentes topologias de inversores de frequência, variando desde configurações simples para pequenas aplicações até projetos complexos para grandes sistemas industriais. Uma das configurações mais comuns é o inversor de ponte completa, que utiliza transistores como elementos chaveadores para alternar a corrente e gerar a forma de onda alternada. A modulação por largura de pulso (PWM) é uma técnica amplamente utilizada nesses dispositivos para controlar a forma e a

qualidade da tensão de saída, proporcionando uma aproximação eficiente de uma onda senoidal.

A modulação do inversor envolve quatro etapas de operação, em que cada semiciclo da tensão de saída corresponde a duas dessas etapas. Durante todo o semiciclo positivo, a corrente na carga mantém o sentido, sem inversão. Quando a polaridade se inverte, a corrente permanece no mesmo sentido durante todo o semiciclo negativo da tensão de saída. As etapas de operação referentes ao semiciclo negativo não serão detalhadas, pois são análogas às mudanças ocorridas no semiciclo positivo (PERIM, 2000).

O funcionamento básico de um inversor de frequência envolve dois estágios principais: a elevação da tensão contínua, quando necessário, e a posterior conversão dessa tensão em corrente alternada com a frequência desejada. Tradicionalmente, muitos projetos de inversores utilizam transformadores para ajustar os níveis de tensão. No entanto, o presente trabalho propõe a simulação e análise de um inversor monofásico onde todos os componentes utilizados são de estado sólido, como transistores, indutores e capacitores, eliminando assim a necessidade de transformadores. Essa abordagem permite uma maior eficiência, compactidade e confiabilidade do sistema, além de reduzir custos e complexidade de implementação. Para esses valores de tensão, é possível encontrar no mercado de semicondutores transistores rápidos e com alta qualidade de operação (BEZERRA, 2010).

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma simulação detalhada do circuito de um inversor monofásico, utilizando o software PSIM. A simulação abordará tanto a etapa de elevação da tensão, realizada por um conversor boost, quanto a etapa de conversão de corrente contínua em corrente alternada, realizada por um conversor de ponte completa controlado por modulação PWM. A eliminação do transformador no circuito demonstra o potencial dos dispositivos de estado sólido em proporcionar soluções eficientes e modernas para o controle de potência.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, foi realizada a simulação de um inversor monofásico utilizando o software PSIM. O objetivo foi transformar uma tensão contínua de 24V, proveniente de uma bateria, em uma tensão alternada de 127V com um formato de onda senoidal

pura, eliminando a necessidade do uso de transformadores e utilizando apenas dispositivos de estado sólido. O processo de conversão foi dividido em duas etapas principais: elevação da tensão contínua e conversão da tensão contínua em alternada.

Na primeira etapa, foi utilizado um conversor boost, cujo objetivo é elevar a tensão contínua de 24V para um valor superior, capaz de alimentar a etapa de conversão para corrente alternada. Os principais componentes utilizados nessa etapa foram transistores IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors), indutores e capacitores. O transistor IGBT foi utilizado como chaveamento de alta eficiência, o indutor foi responsável pelo armazenamento de energia e pela elevação da tensão na saída do conversor, enquanto o capacitor foi utilizado para filtrar a tensão de saída e manter um valor contínuo mais estável. O conversor boost foi configurado com controle por modulação PWM (Pulse Width Modulation), onde a razão cíclica da chave IGBT foi ajustada para garantir a elevação da tensão contínua.

Na segunda etapa, que consiste na conversão da tensão contínua elevada em corrente alternada, foi utilizado um conversor de ponte completa, composto por quatro IGBTs. Esses transistores são acionados de forma alternada para gerar o sinal alternado de saída. O controle do acionamento dos IGBTs foi realizado por um circuito de modulação PWM. Este circuito é composto por uma portadora triangular e uma modulante senoidal, sendo a portadora de alta frequência comparada com a modulante para gerar os pulsos de controle necessários para a comutação dos transistores. O circuito mais básico frequentemente utilizado para modulação PWM senoidal, que incorpora todas as características previamente discutidas, é o PWM bipolar (MARANGONI, 2012).

A modulante senoidal é responsável por determinar a frequência e forma de onda da tensão de saída (127V CA), enquanto a portadora triangular é usada para gerar os pulsos PWM de alta frequência para controlar a comutação dos IGBTs. A portadora define a frequência de comutação, enquanto o sinal modulante, que deve ser aproximadamente contínuo durante um período da portadora, determina a frequência fundamental da grandeza de saída do conversor. (PETRY, 2013)

Todos os dispositivos usados no projeto, como transistores IGBTs, indutores e capacitores, são dispositivos de estado sólido, o que elimina a necessidade de transformadores para elevação da tensão. O uso desses componentes possibilita uma maior eficiência e compacidade do inversor.

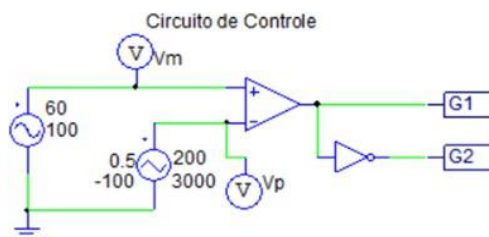
A simulação foi realizada utilizando o software PSIM, que permite a modelagem e análise de circuitos eletrônicos de potência. A simulação incluiu a modelagem detalhada de cada etapa do circuito, desde a entrada de 24V até a saída de 127V em corrente alternada. Os parâmetros dos componentes, como valores de indutância, capacitância e frequência da portadora, foram ajustados de acordo com as especificações de projeto para garantir a operação adequada do inversor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Toda a simulação foi realizada no PSIM, com um tempo total de 0,2 segundos, o que foi suficiente para observar tanto o transiente quanto o regime permanente do sistema. O passo de simulação utilizado foi de $3,6249 \times 10^{-7}$ segundos. Para gerar o SPWM, foi empregado o circuito de controle mostrado na Figura 1. A portadora e a modulante foram configuradas com os seguintes parâmetros: a modulante com uma tensão de pico de 100V e frequência de 60 Hz, e a portadora com um duty cycle de 0,5, tensão pico a pico de 200V, offset de -100V e frequência de 3000 Hz.

A técnica de modulação por largura de pulso aplicada em inversores é feita comparando dois sinais de tensão. O primeiro é um sinal senoidal de referência (modulante) e o segundo é um sinal triangular (portadora). A frequência do sinal de referência deve corresponder à frequência fundamental da tensão do sistema em que a potência está sendo injetada. Já a frequência do sinal portador, que define o ritmo de chaveamento do inversor, é geralmente mantida constante (SOUZA, 2023).

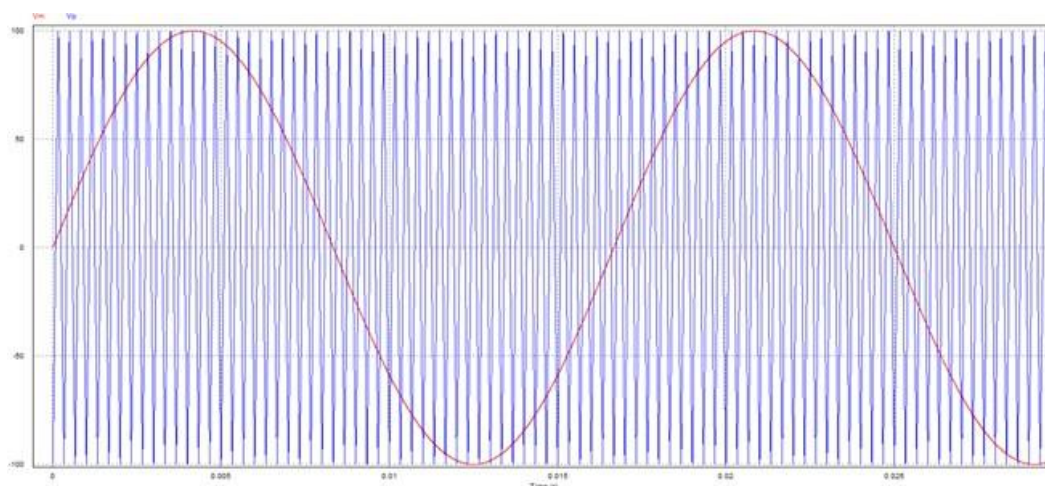
Figura 1: Circuito de controle SPWM.



Fonte: Autores, 2025.

Os sinais da modulante (V_m) e da portadora (V_p) estão ilustrados na Figura 02. O SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) é criado pela comparação desses dois sinais: o sinal da portadora é modulado pela sinal da modulante, resultando em pulsos cuja largura varia em função da amplitude da modulante. Esse processo cria uma onda de saída que se aproxima de uma senoide pura, com a frequência e a forma desejadas para a tensão alternada.

Figura 2: Sinais de Tensão da Modulante e da Portadora.



Fonte: Autores, 2025.

O circuito de potência está ilustrado na Figura 03, onde são detalhados os parâmetros do sistema. A bateria utilizada na simulação fornece uma tensão de 24V. O circuito boost, responsável por elevar a tensão, utiliza um indutor de 2 mH, um capacitor de 400 μF e um IGBT controlado por uma fonte com frequência de 20 kHz e duty cycle de 0,855. Esse circuito aumenta a tensão de entrada para um valor

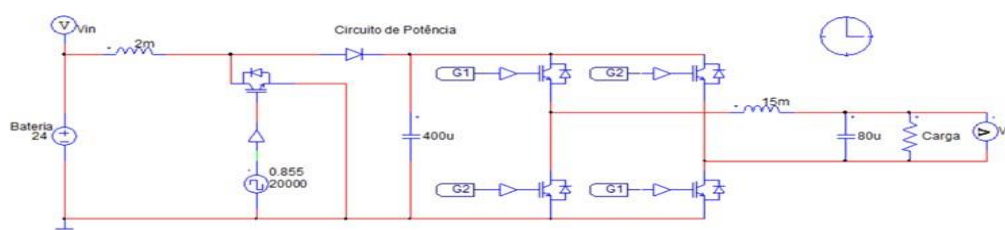
próximo à tensão de pico da senoide desejada. Em circuitos boost, um maior duty cycle resulta em uma maior elevação da tensão.

No conversor boost, a entrada é caracterizada como uma fonte de corrente, enquanto a saída funciona como uma fonte de tensão. A tensão de saída pode variar desde o valor da tensão de entrada até múltiplos dessa tensão. Em teoria, qualquer valor de tensão superior à entrada pode ser alcançado ajustando-se o ciclo de trabalho D do elemento comutador, de acordo com a fórmula $V_{out} = (V_{in}/1-D)$ (GONÇALVES, 2020).

Após a elevação da tensão, o circuito realiza a conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) utilizando uma ponte completa composta por quatro IGBTs, controlados pelo circuito de modulação apresentado na Figura 01. Antes de ser aplicada à carga, a tensão passa por um filtro para garantir que a forma de onda resultante seja senoidal. Este filtro é constituído por um indutor de 15 mH e um capacitor de 80 μ F.

Na topologia em ponte completa, figura 3, quando as chaves S1 e S4 estão fechadas e S2 e S3 estão abertas, a tensão +Vdc é aplicada aos terminais de saída. Quando S2 e S3 estão fechadas e S1 e S4 estão abertas, a tensão -Vdc é aplicada aos terminais de saída. Se S1 e S3 estão fechadas com S2 e S4 abertas, ou se S2 e S4 estão fechadas com S1 e S3 abertas, a tensão na saída é nula. Embora a topologia em ponte completa exija um maior número de componentes e resulte em maiores perdas de comutação, ela proporciona um melhor aproveitamento da fonte de entrada e dos semicondutores. Esta topologia será utilizada no presente trabalho (ARAÚJO, 2023).

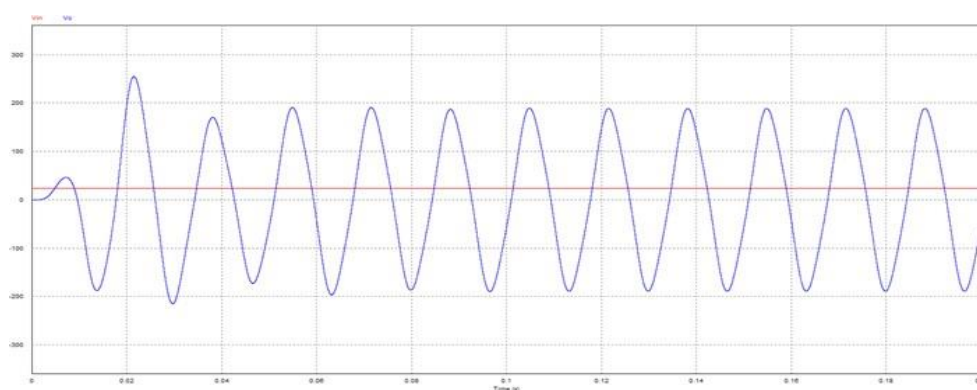
Figura 3: Circuito de Potência do Inversor.



Fonte: Autores, 2025.

Os sinais de tensão de entrada e saída estão ilustrados na Figura 4. A figura mostra, em vermelho, a tensão contínua da bateria de 24V e a tensão alternada de 127V que alimenta a carga, com uma forma de onda senoidal. Observa-se que, durante os dois primeiros ciclos, há uma distorção na forma de onda devido ao transiente do sistema. No entanto, após esse período inicial, a forma de onda se estabiliza, apresentando uma senoide clara e bem definida.

Figura 4: Tensões de Entrada e Saída do Inversor.



Fonte: Autores, 2025.

O valor eficaz, também conhecido como tensão RMS (Root Mean Square), de uma tensão periódica é definido como o valor de uma tensão contínua que produz a mesma dissipação de potência em uma carga resistiva que a tensão periódica (NAKASHIMA, 2013).

A Figura 5 apresenta os resultados das tensões RMS de entrada e saída do sistema. A figura comprova que as tensões desejadas foram alcançadas, evidenciando que o circuito de inversor está operando conforme o esperado, com a tensão de saída de 127V CA e a tensão contínua de 24V da bateria.

Figura 5: Valores RMS das Tensões de Entrada e Saída.

RMS Value	
Time From	3.6249000e-007
Time To	1.9999987e-001
Vin	2.4000000e+001
Vo	1.2744791e+002

Fonte: Autores, 2025.

Todos os resultados esperados na simulação realizada no PSIM foram satisfatoriamente alcançados. A tensão de saída obtida se aproxima muito de uma senoide pura, demonstrando uma forma de onda senoidal de alta qualidade. O valor eficaz da tensão de saída foi medido em 127V, confirmando que o sistema está operando conforme o esperado e produzindo uma saída que atende às especificações desejadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi possível desenvolver e simular um inversor monofásico utilizando exclusivamente componentes de estado sólido, sem a necessidade de transformadores. A simulação, realizada no software PSIM, demonstrou que a utilização de transistores, indutores e capacitores foi eficaz para atingir os objetivos do projeto, evidenciando a viabilidade e os benefícios de uma abordagem moderna e compacta.

Os resultados obtidos confirmaram que todos os valores esperados foram alcançados com sucesso. A tensão de saída se aproximou muito de uma senoide pura, com um valor eficaz de 127V, conforme especificado. A análise dos sinais mostrou uma forma de onda satisfatória, com a presença de uma distorção inicial devido ao transiente do sistema.

No entanto, após esse período inicial, a forma de onda estabilizou-se em uma senoide bem definida durante o regime permanente. A simulação não apenas validou a precisão do circuito projetado, mas também destacou a eficácia do design proposto em gerar uma tensão alternada estável e eficiente.

A ausência de transformadores no circuito e a utilização de dispositivos de estado sólido contribuíram para uma solução mais compacta e econômica, evidenciando a viabilidade desta abordagem para aplicações práticas em conversão de potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Ana Lyvia Pereira Lima de. Projeto e simulação do conversor CC-CA em ponte completa conectado à rede monofásica. 2023. Disponível em: <

https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/76305/1/2023_tcc_alplara%C3%BAjo.pdf>.
Acesso em: 29/08/2024.

BEZERRA, L. D. S. Conversor CC-CA para aplicação em sistemas autônomos de energia elétrica. 2010. Disponível em: <
https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/66753/1/2010_dis_ldsbezerra.pdf >. Acesso em: 01/09/2024.

GONÇALVES, Moisés Martins et al. Estudo e implementação de um conversor cc-cc boost entrelaçado para um sistema de geração fotovoltaico conectado à rede. 2020. Disponível em:
<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/35545/1/dissertacao_moises_martins_goncalves.pdf>. Acesso em: 02/09/2024.

MARANGONI, F. Inversores Monofásicos para Conexão de Sistemas Fotovoltaicos à Rede. Dissertação (Mestrado) — Pato Branco: UTFPR, 2012.

NAKASHIMA, Kazuo. Valor médio e eficaz. Universidade Federal de Itajubá. Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologias de Informação. Itajubá: UNIFEI/IESTI, 2013. Disponível em: < https://www.profelectro.info/wp-content/uploads/rms_medio_multimetro_Dc_e_AC.pdf> Acesso em: 29/08/2024.

PERIN, A. J.; 2000. Curso - Modulação PWM. Florianópolis. Disponível em:
<<http://pt.scribd.com/doc/157303269/PWM-apostila-UFSC>>. Acesso em: 03/09/2024.

PETRY, A. C. Modulação PWM Senoidal. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013. Disponível em:
<https://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Eletronica_Potencia/2013_2/Apresentacao_Aula_19.pdf>. Acesso em: 03/09/2024.

SOUZA, Alyson Rodrigo Arruda de. Análise comparativa entre as técnicas de modulação spwm e svm a partir de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica através de dois estágios com aplicação de filtro ativo. 2023. Disponível em: <
https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/76326/1/2023_tcc_arasouza.pdf>. Acesso em: 01/09/2024.