

SISTEMA EMBARCADO DE APRIMORAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA INVERSORES

Gabriela Esteves Barbosa¹, Wesley Angelino de Souza², Tiago Henrique dos Santos³,
Alessandro Goedel⁴, Marcelo Favoretto Castoldi⁵

RESUMO: Em 1947, foi criado o primeiro transistor com o objetivo de contornar alguns problemas que as válvulas eletrônicas, utilizadas para acionamentos, apresentavam. Após isso, foram desenvolvidos componentes com melhor desempenho em acionamentos de cargas de maior potência e maiores velocidades de comutação, como o *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), amplamente utilizado em inversores de frequência, o mais relevante conversor estático. Tais sistemas atuam no acionamento de motores elétricos. Assim, visando compreender seu funcionamento e aplicação, objetiva-se estudar os componentes utilizados e montar uma placa a fim de validar experimentalmente o comportamento estudado. Inicialmente, foram simulados dois circuitos no MATLAB utilizando a ferramenta *Simulink*: circuitos de inversores *half-bridge* e *full-bridge* com índice de modulação, frequência e amplitude constantes, a fim de analisar as diferenças entre eles. Utilizou-se o bloco *S-function* para escrever um programa que “emula” o firmware do *Digital Signal Processor* (DSP) e gera a modulação por largura de pulso sinusoidal (SPWM). Em seguida, foi desenvolvido um código no DSP, modelo LAUNCHXL-F28379D, que gerava os sinais PWM trifásicos. A segunda etapa consistiu em criar um código para sintetizar os pulsos de acionamento para um inversor trifásico, onde a frequência e o índice de modulação variavam de acordo com a leitura de um valor analógico. Após essa etapa, foi necessário montar uma placa de circuito impresso para testar as diferentes topologias estudadas. Uma *Printed Circuit Board* (PCB) foi projetada para suportar até 311V no barramento, desconsiderando variações na rede elétrica, 5A de corrente, e cada placa teria dois braços inversores. Na próxima etapa do desenvolvimento do projeto, visa-se testar o inversor para as topologias simuladas, *half-bridge* e *full-bridge*, e verificar se as condições de projeto foram atendidas.

Palavras-chave: Acionamento de motores, IGBT, Inversor de frequência.

1 INTRODUÇÃO

Entre os anos de 1904 e 1947, houve um desenvolvimento tecnológico significativo relacionado aos acionamentos de circuito (BOYLESTAD, 2004). Antes, utilizavam-se válvulas eletrônicas, responsáveis pelo funcionamento de rádios e televisores. Para resolver essas limitações, William Shockley, John Bardeen e Walter Houser Brattain criaram o primeiro transistor em 23 de dezembro de 1947 (BOYLESTAD, 2004).

¹ Graduanda, UTFPR, gabrielaesteves@alunos.utfpr.edu.br.

² Doutor, UTFPR, wesleyangelino@utfpr.edu.br.

³ Doutor, IFPR, tiago.santos@ifpr.edu.br.

⁴ Doutor, UTFPR, agoedel@utfpr.edu.br.

⁵ Doutor, UTFPR, marcastoldi@utfpr.edu.br.

Chaves semicondutoras, como o *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), são amplamente utilizadas em inversores de frequência. De acordo com Barbi (2022), inversores de frequência são considerados os mais relevantes conversores estáticos da atualidade, apresentando inúmeras aplicações. Sem tais dispositivos, não existiriam veículos elétricos e energia proveniente de fontes renováveis e alternativas. Outra aplicação importante é o acionamento de motores elétricos (BARBI, 2022).

Neste contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um inversor de frequência, que poderá ser parametrizado por um dispositivo embarcado dedicado baseado em um *Digital Signal Processor* (DSP), com o foco no ajuste de parâmetros para indicar a eficiência energética de máquinas elétricas.

Com isso, tem-se o estudo e funcionamento de circuitos acionadores de motores elétricos e suas aplicações, em especial os inversores de frequência, como objetivo deste estudo. Através dos componentes utilizados para esse processo, foi simulado um circuito a fim de aferir e observar o comportamento do acionador. Posteriormente, foi confeccionada uma *Printed Circuit Board* (PCB) para realizar a função de um inversor de frequência para a detecção de falhas de capacitores em inversores, permitindo o interfaceamento com o DSP para realizar sistemas de controle e de aprimoramento de eficiência, entre outros.

2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada neste trabalho é baseada nas etapas descritas na Figura 1. Inicialmente, foi realizado um estudo sobre chaves semicondutoras e inversores, utilizando como base Ahmad (2000), Boylestad (2004) e Sedra (2000), para compreender o funcionamento de chaves semicondutoras, e Barbi (2022) para entender o funcionamento de inversores. Foram simulados circuitos com o objetivo de compreender o funcionamento de diferentes topologias. Em seguida, programou-se a geração do sinal *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) no DSP e desenvolveu-se uma PCB para utilização no laboratório, visando o desenvolvimento de pesquisas subsequentes e nas aulas de Máquinas Elétricas, proporcionando conhecimento prático sobre inversores de frequência para acionamento de máquinas.

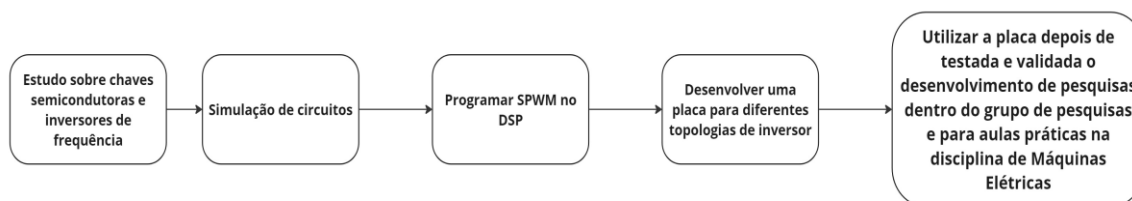


Figura 1: Fluxograma. Fonte: Os autores.

Dessa maneira, foi possível montar circuitos utilizando o software MATLAB por meio da ferramenta *Simulink* para verificar o funcionamento de inversores de frequência. Foram feitos dois circuitos: um de inversor *half-bridge* e outro de inversor *full-bridge*. Para cada configuração, utilizou-se o bloco *S-function* para escrever um código que “emula” o código do DSP e gera o SPWM.

Após a etapa de validação e entendimento do funcionamento das duas topologias de inversores, foi desenvolvido um programa no DSP que gerava o SPWM trifásico com variação de frequência e modulação, por meio da leitura de um valor analógico advindo de um potenciômetro. Em seguida, foi montado um diagrama de IGBTs e *gate drivers*, utilizando um IGBT modelo IRGB15B60KD e um *gate driver* IR2112. O diagrama pode ser configurado para diversas topologias. Uma PCB foi fabricada de acordo com o esquemático para validação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o propósito de analisar o SPWM em um circuito *half-bridge*, foi simulado por meio do bloco *S-function* do *Simulink*, foi feito um código que emula o DSP. No *Simulink* não há necessidade de *gate-drivers* uma vez que as chaves são ideais e conduzem com valor 0 e 1. Ainda, não há perdas e nem há a necessidade de aplicar um *dead time*, ou seja, um tempo entre o acionamento das chaves para evitar curto-circuito. Na Figura 2 é possível observar as saídas do bloco *S-Function*: dente de serra que quando se aplica a função seno gera a senoide, é comparada à portadora e o resultado da comparação que gera o SPWM.

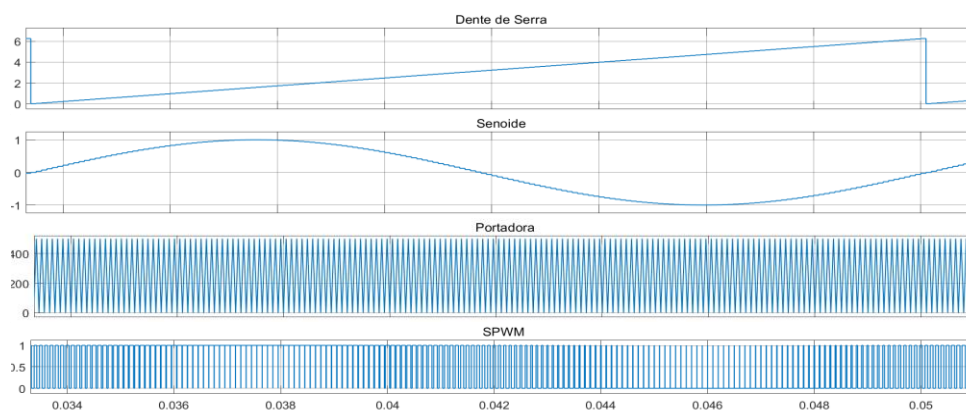


Figura 2: Saída do bloco *S-function*. Fonte: Os autores.

Nessa configuração, foram utilizadas duas chaves e dois capacitores. A função dos capacitores é evitar o uso de duas fontes de alimentação, pois, quando os capacitores são aplicados ao circuito, utilizando a Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT), a tensão da fonte se divide entre os dois capacitores e o sistema opera como duas fontes com tensões menores, entretanto, nessa topologia, apenas metade da tensão da fonte está na carga. A Figura 3 mostra o circuito implementado no ambiente do *Simulink*. Nessa simulação, utilizou-se a frequência da senoide de 60Hz e uma carga puramente resistiva.

É importante notar que como a carga é resistiva, a corrente e a tensão estão em fase e, ainda, como a tensão da fonte é 100V, o pico da tensão na carga é de 50V, exatamente metade do barramento.

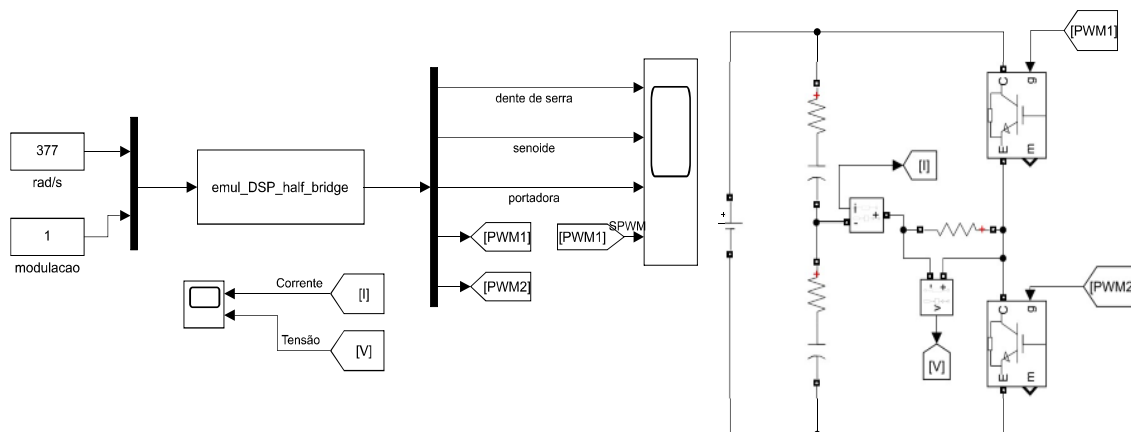


Figura 3: Esquemático *half-Bridge*. Fonte: Os autores.

A segunda simulação realizada foi com um inversor *full-bridge*, Figura 4. Nessa topologia há 4 chaves semicondutoras e, como não há a necessidade de capacitores, a tensão do barramento é a tensão da carga para circuitos ideais. Utilizou-se uma carga RL.

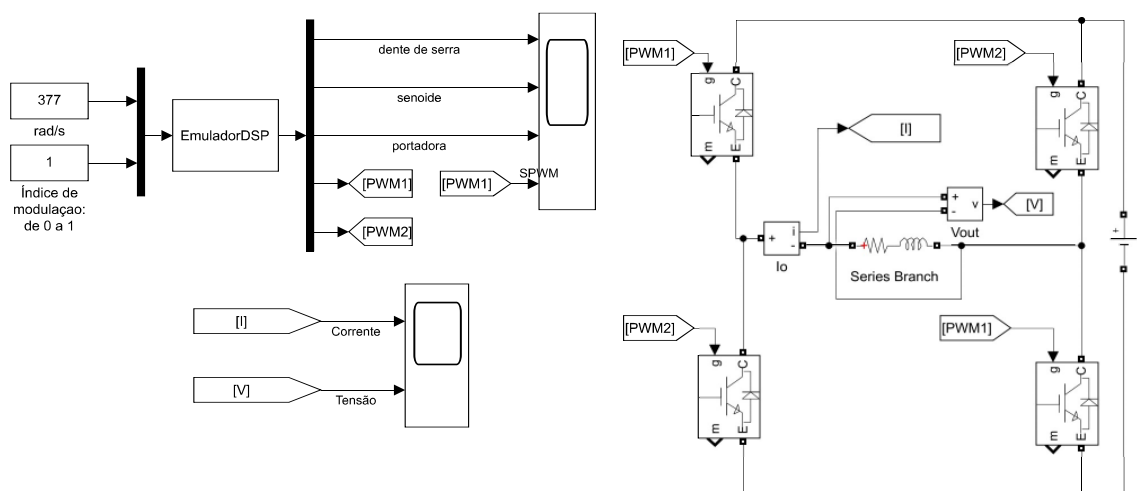


Figura 4: Esquemático *full-Bridge*. Fonte: Os autores.

Pelo fato de ser utilizado uma carga RL a parte indutiva atua como um filtro passa baixa para a corrente, assim, a corrente na carga é uma senoide, Figura 5.

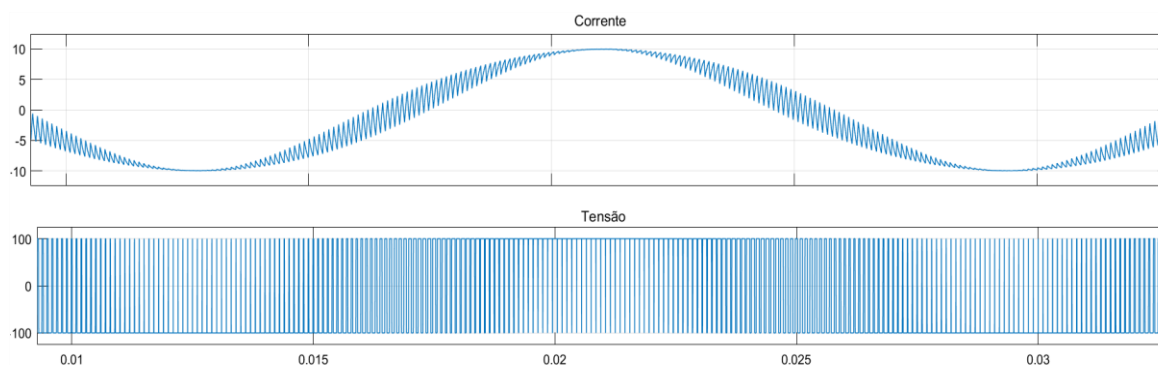


Figura 5: Corrente e tensão na carga. Fonte: Os autores.

Após essa etapa, foi desenvolvido um programa para gerar um SPWM trifásico no DSP. Como seria utilizado com chaves reais, foram implementadas as funções de *dead time* e sinais complementares. Inicialmente, foi criado um código em que a frequência e o índice de modulação da senoide eram fixos em 60Hz e 1, respectivamente. Todos os sinais foram filtrados utilizando um filtro passa-baixa de primeira ordem, com frequência de corte de 1500Hz, a fim de visualizar a senoide gerada no SPWM. Foram acoplados terminais da ponteira do osciloscópio aos pinos de *General Purpose Input/Output* (GPIO), conforme mostrado na Figura 6. O sinal complementar gerado é representado pela linha amarela. Em seguida, foi desenvolvido um programa em que a modulação e a frequência alteravam proporcionalmente à tensão medida de um potenciômetro, variando a frequência de 60 a 80Hz e a modulação de 0 a 1.

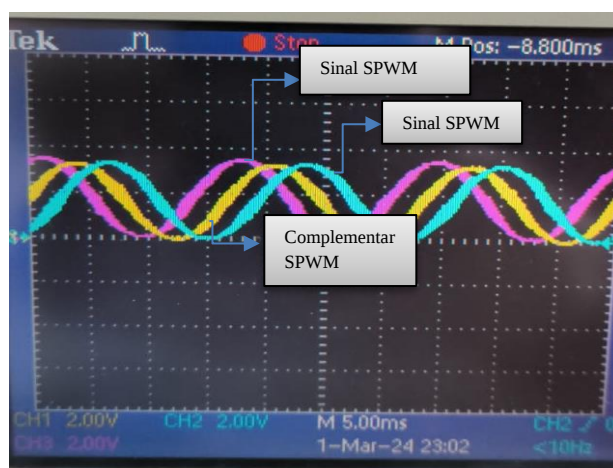


Figura 6: Saída filtrada. Fonte: Os autores.

Posteriormente, foi montada a placa, que foi projetada para suportar 311V no barramento e 5A na parte de potência, sendo possível montar um inversor *full-bridge* com apenas uma placa. Foi utilizado um fusível na unidade de potência para evitar que a carga fosse prejudicada por eventual curto-circuito e sobrecorrentes. O esquemático apresenta terminais para medição na parte de potência, para medir o comportamento das chaves durante o funcionamento. Como a parte esquerda da PCB possui sinais digitais, foi implementada uma malha de terra para evitar ruídos, bem como nos terminais de testes. A Figura 7 apresenta o inversor *full-bridge* montado e soldado.

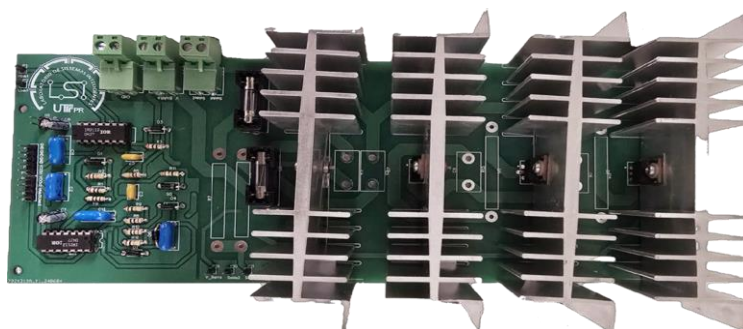


Figura 7: Placa PCB. Fonte: Os autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo foi realizado com o objetivo de entender os dispositivos que atuam no controle de máquinas e aplicar tais conhecimentos. Esses objetivos foram cumpridos, uma vez que diversos sistemas foram simulados e uma PCB foi produzida, permitindo avaliar na prática o que foi estudado.

Como continuação do projeto, pretende-se testar as PCBs para as topologias *half-bridge* e *full-bridge*, verificando se as condições de projeto foram atendidas. Para ampliar as pesquisas relacionadas a máquinas elétricas trifásicas, planeja-se desenvolver uma PCB trifásica que inclua a aquisição de sinais da máquina e dispositivos que garantam a comutação das chaves e o isolamento. Dessa maneira, será possível desenvolver pesquisas com maior segurança e controle, considerando que a parte de aquisição de corrente e tensão estará integrada à placa.

Como trabalho futuro, tem-se a implementação de técnicas de PWM, bem como técnicas de controle das grandezas elétricas do inversor, que serão controladas pelo DSP, possibilitando o estudo de perdas e do desempenho do sistema. Assim, o estudo contribuiu tanto para o entendimento teórico quanto para a aplicação prática de soluções que otimizam a eficiência energética em máquinas elétricas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Iniciação Tecnológica (PIBIT) ao Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro à pesquisa, ao Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio, pela oportunidade de desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Ashfaq. **Eletrônica de potência**. São Paulo, SP: Prentice-Hall, 2000. 479 p. ISBN 8587918036.

BARBI, Ivo. **Inversores monofásicos**. 1. ed. Florianópolis: Ed. Do Autor, 2022. Disponível em: <https://ivobarbi.com.br/livro-inversores-monofasicos/>

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos: teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. ISBN 978-85-87918-22-2.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth Carless. **Microeletrônica**. 5.ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2007. 848 p. ISBN 9788576050223.