

DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CHAVEADO DIDÁTICO DE DUPLO ESTÁGIO (CA-CC E CC-CA) PARA LABORATÓRIOS DE ENSINO¹

Vinícius Guilherme Hoffmann²
Me. Eng. Rafael Gomes Faust³
Dr. Eng. José Flávio Dums⁴

Resumo: O ensino da Eletrônica de Potência em cursos de engenharia enfrenta desafios significativos devido à sua natureza multidisciplinar e à dificuldade de replicar a complexidade dos sistemas reais por meio de abordagens puramente teóricas ou simuladas. Para superar essa lacuna e atender à crescente demanda por profissionais capacitados, este artigo propõe e descreve o desenvolvimento de um conversor chaveado didático de duplo estágio (C.A. – C.C. e C.C. – C.A.), projetado especificamente como ferramenta de baixo custo e alta replicabilidade para laboratórios de ensino. O protótipo é estruturado em submódulos de comando e potência, permitindo um estudo detalhado do estágio de retificação com barramento ajustável (com tensão de saída de até 311 V_{CC} para uma entrada de 220 V_{RMS}) e do estágio inversor (C.C. – C.A.), capaz de operar com uma frequência fundamental entre 50 Hz e 150 Hz. A metodologia envolveu o dimensionamento de componentes, esquemáticos detalhados, simulação numérica e validação em bancada. Os resultados experimentais confirmaram a funcionalidade do equipamento didático, demonstrando a capacidade de manipulação controlada dos valores e formas de onda.

Palavras-chave: Eletrônica de Potência; Retificador; Inversor; Ensino; Kit Didático.

1 INTRODUÇÃO

Países altamente desenvolvidos e industrializados apresentam um consumo de energia elétrica *per capita* significativamente mais alto, impulsionado por um estilo de vida moderno e pela vasta utilização de tecnologias. Em contraste, nações em desenvolvimento ou com populações menores frequentemente exibem um consumo mais baixo de energia elétrica (Abreu; Oliveira; Guerra, 2010).

No Brasil, o consumo de energia elétrica por habitante tem experimentado um relevante aumento nas últimas décadas. Porém, se comparado a países desenvolvidos, o consumo de eletricidade do Brasil ainda é baixo – no ano de 2022, o consumo médio brasileiro foi de 2.362 kWh, enquanto o chinês foi de 5.885 kWh e o estadunidense, expressivos 12.154 kWh. Dentro do próprio Brasil, o contraste no consumo de energia também é evidente: no mesmo ano, o estado de Santa Catarina apresentou um consumo de 3.593 kWh por habitante, mais que o triplo do estado do Maranhão, que registrava apenas 1.082 kWh por habitante (Bueno, 2024).

O aumento na complexidade das instalações e dos sistemas elétricos e eletrônicos, tanto residenciais quanto industriais, está exigindo profissionais cada vez mais capacitados e atualizados. No entanto, a formação atual nem sempre acompanha a

¹ Artigo apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica. 2025. Orientador: Prof. Rafael Gomes Faust, Mestre. Coorientador: Prof. José Flávio Dums, Doutor.

² e-mail: vinicius.gh@aluno.ifsc.edu.br

³ e-mail: rafael.faust@ifsc.edu.br

⁴ e-mail: joseflavio@ifsc.edu.br

velocidade das inovações tecnológicas e as exigências do mercado de trabalho (Giroto; Poker; Omote, 2012).

O modelo de ensino tradicional frequentemente se baseia na transmissão dogmática do conhecimento, limitando o papel do professor a um mero transmissor e o aluno a um receptor passivo. Contudo, é fundamental considerar as diversas formas de compreensão individuais do ensino e a natureza multifacetada do aprendizado. No contexto escolar, a interação entre professor, aluno e conteúdo é central para a construção sólida e efetiva do saber (Teixeira, 2019).

Nos cursos de engenharia, essa dinâmica de ensino e aprendizagem é ainda mais complexa, dada a dificuldade de sua produção de sentido e interpretação aos alunos. Este artigo apoia-se na ideia de que o conhecimento em engenharia não deve ser restrito apenas à memorização de conceitos, envolvendo a compreensão de teorias, leis, fórmulas e axiomas. Acredita-se que outros recursos de ensino devem ser fundamentais no processo de aquisição de conceitos, com um destaque dado aqui para o uso da experimentação no ensino, com seus diferentes enfoques e finalidades (Silva et al., 2021).

Durante a formação em engenharia espera-se que os alunos não somente realizem a assimilação de conteúdos passados, mas que também tenham a capacidade de poder contextualizar, analisar e até mesmo questionar o que lhe é apresentado, indo além da mera recepção de informações na sala de aula. A adoção de recursos práticos e interativos pode aprimorar significativamente o processo de aprendizagem, capacitando os novos engenheiros para os atuais e futuros desafios do setor energético (Kenski, 2007).

Nesse contexto, este artigo propõe o desenvolvimento de um conversor chaveado didático de duplo estágio (CA-CC e CC-CA), uma topologia já explorada no ensino técnico desta instituição, onde tradicionalmente os estudantes eram responsáveis pelo ciclo de desenvolvimento de *layout* e montagens, que estava acarretando resultados experimentais não satisfatórios. A principal contribuição deste trabalho reside na oferta de um projeto de *hardware* padrão, consolidado e de fácil replicabilidade para os cursos de engenharia.

Desta forma, elimina-se a etapa de *design* da placa, permitindo que os alunos recebam os esquemáticos e *layouts* prontos para realizarem a montagem física e a validação em bancada. Essa abordagem otimiza o tempo didático, mantendo a experiência prática da construção do protótipo, mas direcionando o foco principal para a análise funcional e entendimento aprofundado da Eletrônica de Potência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O significativo avanço na capacidade e desempenho dos dispositivos semicondutores de comutação nos últimos anos, em conjunto com a incessante busca por aumento da performance e da eficiência em dispositivos elétricos e eletrônicos, tem posicionado a eletrônica de potência como uma área de fundamental importância e crescimento acelerado. Sua relevância estende-se por toda a engenharia elétrica, às indústrias e à sociedade em geral (Hart; Júnior; Abdo, 2012).

O desenvolvimento de dispositivos eletroeletrônicos modernos, em suas mais diversas aplicações, depende intrinsecamente dos fundamentos da eletrônica de potência, com destaque particular para a utilização de conversores estáticos. Esses conversores são elementos cruciais para a concepção e implementação de sistemas que buscam otimizar a eficiência energética, reduzir o tamanho e peso, e oferecer alta confiabilidade operacional (Domingues, 2021).

No entanto, ensinar eletrônica de potência representa ainda um grande desafio, especialmente quando não se dispõe de recursos didáticos apropriados. Isso se deve ao caráter multidisciplinar da área, que demanda o domínio de diversos campos da engenharia elétrica como circuitos elétricos, eletromagnetismo, controle, processamento de sinais e dispositivos semicondutores, tornando todo o processo de ensino e aprendizagem complexo e desafiador para professores e alunos em qualquer nível de formação (Mi; Shen; Ceccarelli, 2005).

A proposta de modernizar ou repensar a educação tem sido feita através da introdução de tecnologias, como kits didáticos, que visam proporcionar uma significativa melhoria em todo o processo de ensino e aprendizagem de estudantes em sala de aula (Gomes; Bastos; Lanes, 2018).

Diante das demandas crescentes, empresas como a De Lorenzo do Brasil já se destacam na criação de excelentes soluções educacionais para alunos e professores. A empresa atua em diversas áreas da eletricidade e eletrônica, e explica que, a eletrônica de potência, também conhecida como eletrônica industrial, é uma área de grande relevância que tem como objetivo o controle do fluxo de energia por meio de semicondutores de potência (De Lorenzo do Brasil, 2024).

Contudo, a aquisição destes kits ainda é um desafio para muitas instituições de ensino. Além disso, a complexidade da montagem dos módulos didáticos restringe a capacidade de professores e alunos de replicá-los. Diante dessa problemática, surge uma lacuna que este artigo pretende suprir: propor uma solução de baixo custo e fácil replicabilidade. Tal proposta não compromete a qualidade e nem o objetivo fundamental de apoiar a aprendizagem em eletricidade e eletrônica, com uma especial ênfase na eletrônica de potência.

Os estágios do conversor proposto, retificador e inversor, estão estruturados em submódulos de comando e potência, permitindo que cada um seja estudado de forma separada ou integrada. Oferecendo uma sólida complementação ao aprendizado tradicional, permitindo que os estudantes manipulem um conversor real, visualizem formas de onda, experimentem diferentes configurações e observem na prática os efeitos de parâmetros de comando sobre o desempenho do conversor.

Ao proporcionar essa experiência *hands-on*, o conversor didático não apenas reforçará os conceitos teóricos, mas também auxiliará no desenvolvimento de habilidades práticas essenciais para a atuação profissional. No mercado de trabalho, os futuros engenheiros enfrentarão situações mais complexas e completas, que transcendem o idealizado em ambientes puramente teóricos ou de simulação.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento do conversor chaveado didático de duplo estágio obedece a um processo estruturado em fases sequenciais, visando assegurar a robustez e a plena funcionalidade do protótipo final.

A etapa inicial concentra-se no projeto matemático do sistema, momento em que são definidos os requisitos operacionais de tensão e corrente. Com base nessas premissas, realiza-se o dimensionamento dos componentes semicondutores, utilizando as equações características dos circuitos elétricos, eletrônicos e as estratégias de modulação adequadas.

Todo esse desenvolvimento teórico é fundamentado em bibliografias consolidadas na área de Eletrônica de Potência, seguindo as diretrizes e modelos matemáticos propostos por renomados autores (Barbi, 2001; Batarseh; Harb, 2018; Erickson; Maksimovic, 2020; Hart; Júnior; Abdo, 2012; Mohan, 2013; Rashid, 2023).

Com o dimensionamento concluído, é dado início ao desenvolvimento dos esquemáticos elétricos detalhados, empregando ferramentas CAD, e à seleção criteriosa dos componentes eletrônicos que atendam aos parâmetros técnicos e de disponibilidade.

Uma etapa crucial antes da implementação física é a simulação numérica dos circuitos em *softwares* específicos. Isso permite verificar o comportamento do conversor em diversas condições, minimizando erros e riscos.

Após a validação por simulação, é elaborado o projeto do *layout* das Placas de Circuito Impresso (PCIs), considerando aspectos de posicionamento, roteamento de trilhas, isolamento e dissipação térmica para otimizar o desempenho. As PCIs são então fabricadas, seguida pela soldagem manual dos componentes com atenção à precisão e confiabilidade das conexões.

Para garantir a funcionalidade antes da integração total, os circuitos são validados em bancada em etapas intermediárias. Por fim, a validação completa do conversor ocorre em laboratório, onde são realizados testes de desempenho sob diferentes condições operacionais.

3.1 ESPECIFICAÇÕES

A Tabela 1 exibe as especificações técnicas do conversor proposto (retificador e inversor). Por se tratar de um protótipo didático que será utilizado por estudantes em laboratório, o maior foco deste projeto foi dado nas funcionalidades de cada conversor e não em aspectos de alta performance de rendimento, como é realizado em projetos industriais.

Tabela 1 - Especificações de projeto do conversor chaveado didático.

RETIFICADOR		
Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão de entrada	V_{IN}	220 V _{RMS}
Frequência da rede	f_{REDE}	60 Hz
Tensão de saída	V_{OUT}	até 311 V _{CC}
Corrente de saída	I_{OUT}	1 A @ 300 V
Potência de saída	P_{OUT}	300 W
Percentual de ondulação de tensão na saída	$\% \Delta V$	10 %
INVERSOR		
Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão de entrada	V_{IN}	311 V _{CC}
Tensão de saída	V_{OUT}	100 a 220 V _{RMS}
Corrente de saída	I_{OUT}	1 A
Potência de saída	P_{OUT}	220 W
Frequência de saída	f_o	50 a 150 Hz
Frequência de comutação	f_{SW}	20 kHz

Fonte: Autores (2025).

Visando assegurar a robustez do protótipo e a segurança operacional durante os ensaios didáticos, a seleção dos componentes semicondutores e passivos foi baseado no cálculo dos esforços máximos de tensão e corrente, aplicando-se margens de segurança adequadas.

3.1.1 Dimensionamento do estágio retificador

O retificador de barramento ajustável é formado por um gradador que alimenta um retificador de diodos em ponte completa. Foi escolhido um TRIAC para operar o gradador, o esforço de tensão máxima (V_{DRM}) é determinado pelo pico da tensão de entrada da rede elétrica ($V_{IN} = 220 \text{ V}_{RMS}$), conforme mostra a equação (1).

$$V_{DRM} \geq V_{IN(PK)} = \sqrt{2} \cdot V_{IN} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ V} \quad (1)$$

Substituindo os valores nominais, obtém-se uma tensão de pico de aproximadamente 311 V. O componente escolhido, BT139, suporta até 600 V, atendendo com folga ao critério de tensão de bloqueio.

O dimensionamento da corrente no estágio de entrada requer uma análise não linear. Como o retificador alimenta um filtro capacitivo de valor elevado, a corrente drenada da rede elétrica não é senoidal, mas sim pulsada, fluindo apenas nos instantes em que a tensão instantânea da rede supera a tensão armazenada no capacitor (BARBI, 2012).

Esse comportamento resulta em um Fator de Potência (FP) reduzido e um alto conteúdo harmônico. Para determinar a corrente eficaz ($I_{T(RMS)}$) que o TRIAC deve suportar, utilizou-se a relação da potência ativa de saída considerando um fator de potência conservador para retificadores monofásicos com filtro capacitivo (estimado em 0,55), conforme apresenta a equação (2).

$$I_{T(RMS)} = \frac{P_{OUT}}{V_{IN} \cdot FP} = \frac{300}{220 \cdot 0,55} \approx 2,48 \text{ A} \quad (2)$$

Adicionalmente, deve-se considerar a corrente de surto repetitivo (I_{PK}) durante a carga do capacitor, que pode atingir valores de 3 a 5 vezes a corrente nominal. Mesmo considerando este cenário de pico ($I_{SURGE} \approx 12,4 \text{ A}$), o TRIAC BT139 selecionado apresenta-se superdimensionado e seguro, pois possui capacidade de corrente contínua ($I_{T(RMS)}$) de 16A e suporta surtos não repetitivos (I_{TSM}) de até 155 A, garantindo robustez térmica e elétrica ao retificador do conversor didático.

O dimensionamento do capacitor de filtro do barramento (C_{BUS}) foi calculado para garantir uma ondulação de tensão (ΔV_C) inferior a 10% da tensão de pico, garantindo um nível C.C. adequado para o inversor. Utilizou-se o cálculo realizado para retificadores de onda completa, conforme aponta a equação (3).

$$C_{BUS} \geq \frac{P_{OUT}}{2 \cdot f_{REDE} \cdot V_{IN(PK)}^2 \cdot \% \Delta V} \geq \frac{300}{2 \cdot 60 \cdot 311^2 \cdot 10\%} \geq 258 \mu F \quad (3)$$

3.1.2 Dimensionamento do estágio inversor

Para os interruptores do inversor, atendido pela topologia *full-bridge*, o critério de tensão de bloqueio dreno-fonte (V_{DS}) deve ser superior à tensão de entrada do barramento de corrente contínua, como indica a equação (4). Adotando-se na escolha uma margem de segurança para acomodar eventuais sobretensões durante a comutação.

$$V_{DS} \geq V_{IN} = 311 \text{ V} \quad (4)$$

Considerando o barramento máximo com amplitude de 311 V, o MOSFET IRF840 foi selecionado por apresentar uma tensão de ruptura de 500 V. O esforço de corrente nos transistores (I_D) foi dimensionado com base na corrente de pico da carga na potência nominal. Considerando a carga resistiva e a tensão de saída RMS desejada este valor é calculado através da equação (5).

$$I_{D(PK)} = \sqrt{2} \cdot \frac{P_{OUT}}{V_{OUT}} = \sqrt{2} \cdot \frac{220}{220} = 1,41 \text{ A} \quad (5)$$

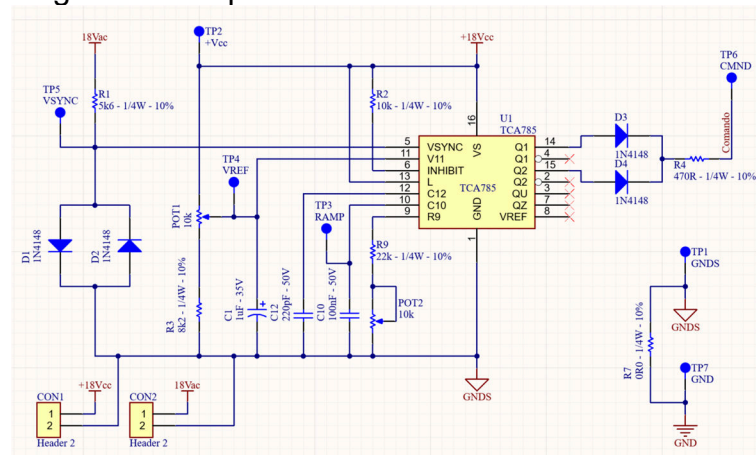
O IRF840 suporta uma corrente contínua de dreno de até 8A (em 25°C), o que é substancialmente superior à corrente de operação prevista para o inversor (projetado para corrente uma corrente eficaz na ordem de 1A), garantindo assim uma operação térmica estável.

3.2 ESQUEMÁTICOS ELÉTRICOS

Para o desenvolvimento do projeto do conversor didático, utilizou-se o *software Altium Designer®*, ferramenta que possibilita a elaboração dos esquemas elétricos, o roteamento das PCs e a visualização tridimensional das montagens.

A Figura 1 detalha o circuito lógico de comando do retificador, cujo núcleo operacional é o circuito integrado TCA785. Este componente dedicado é amplamente reconhecido na eletrônica industrial pela sua precisão no controle de fase e na geração de pulsos de disparo para semicondutores de potência, como Tiristores e TRIACs.

Figura 1 – Esquemático de comando do retificador.



Fonte: Autores (2025).

O seu princípio de funcionamento baseia-se na sincronização com a passagem da tensão da rede por zero (*zero-crossing*), gerando internamente uma rampa de tensão linear que, ao ser comparada com um sinal de referência, define o momento exato do disparo dos semicondutores.

Essa arquitetura interna permite uma variação contínua e estável do ângulo de disparo (α) em toda a faixa operacional de 0° a 180°, garantindo linearidade na modulação da tensão entregue à carga. Além de simplificar drasticamente o *hardware* ao substituir arranjos complexos de componentes discretos, o TCA785 oferece alta imunidade a ruídos e estabilidade térmica, características essenciais para aplicações robustas em conversores estáticos (SIEMENS, 2005).

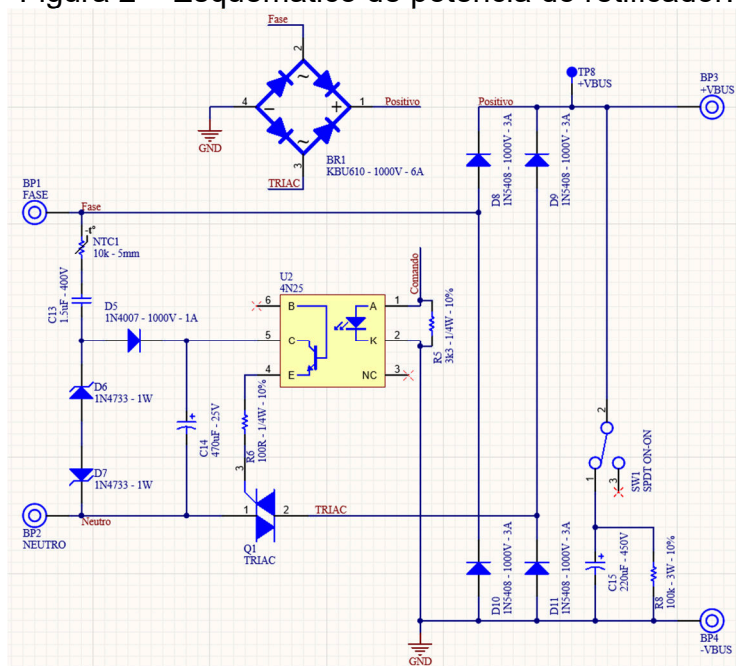
A Figura 2 ilustra o circuito de potência, constituído por um gradador que alimenta um retificador em ponte completa. Nesta configuração, é possível ajustar a tensão contínua do barramento C.C. mediante o ajuste do ângulo de disparo do gradador. O projeto conta ainda com uma chave seletora na saída, permitindo conectar ou desconectar o capacitor de barramento. Esse recurso didático possibilita a análise da forma de onda sem filtragem, evidenciando o corte de fase, ou com a atuação do filtro capacitivo, demonstrando a variação da tensão média no barramento.

Para a etapa de potência, selecionou-se o TRIAC BT139. Este componente destaca-se por operar nos quatro quadrantes, característica que proporciona maior flexibilidade ao projeto do circuito de disparo. Sua utilização é indicada para cenários que exigem elevada tensão de bloqueio e condução bidirecional de corrente, aliados a um comportamento térmico estável e robusto (WeEn, 2018).

Tais atributos o tornam ideal para o controle de diversas cargas de corrente alternada, como motores, iluminação industrial e sistemas de aquecimento. Além disso, o dispositivo facilita a integração do *hardware*, pois permite o interfaceamento direto com saídas de microcontroladores e circuitos lógicos de baixa potência, dispensando a necessidade de *drivers* complexos.

Um aspecto relevante no desenvolvimento do esquemático de potência foi a flexibilidade de *layout*. O circuito foi projetado para permitir que o estudante replique o protótipo optando tanto pelo uso de diodos discretos tradicionais quanto por pontes retificadoras integradas em encapsulamento único, formato comumente encontrado em aplicações industriais de maior potência.

Figura 2 – Esquemático de potência do retificador.



Fonte: Autores (2025).

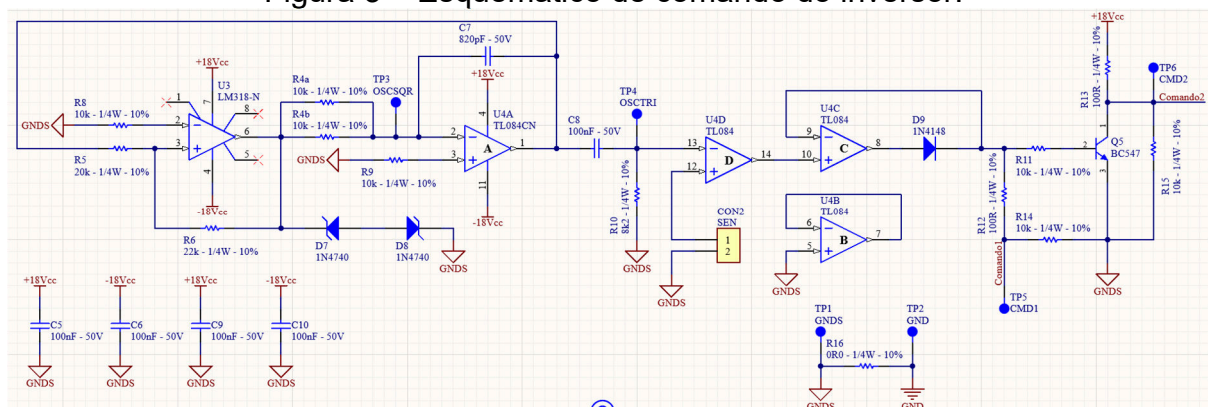
Especificamente para o protótipo apresentado neste trabalho, utilizou-se a ponte retificadora monofásica KBU610. A escolha deste componente justifica-se por sua baixa queda de tensão direta e elevada capacidade de corrente, aliadas a uma alta confiabilidade operacional. Tais características o tornam ideal para a implementação em placas de circuito impresso, garantindo robustez e eficiência à montagem final (Won-Top, 2012).

A Figura 3 apresenta o esquemático detalhado do circuito de comando analógico do inversor, responsável pela implementação da estratégia de Modulação por Largura de Pulso Senoidal (SPWM).

O primeiro estágio do sistema consiste na geração da onda portadora, realizada por meio de um oscilador de relaxação composto pelo amplificador operacional LM318-N de alta velocidade, com *slew-rate* de 70V/μs, configurado como comparador com histerese, operando em malha fechada com o integrador formado pelo amplificador operacional TL084. Esta topologia assegura a geração de uma onda triangular linear e estável, essencial para a qualidade da modulação.

Na sequência, este sinal portador é conectado ao comparador, onde é comparado com o sinal de referência senoidal (modulador) proveniente do conector de entrada (CON2), resultando na geração dos pulsos do SPWM. Por fim, o estágio de saída utiliza o transistor NPN e circuitos lógicos auxiliares para realizar o condicionamento de nível e o *buffering* dos sinais de comando (Comando1 e Comando2), garantindo a integridade dos pulsos que serão enviados aos drivers dos semicondutores de potência.

Figura 3 – Esquemático de comando do inversor.



Fonte: Autores (2025).

A Figura 4 ilustra o estágio de potência do inversor, configurado na topologia de ponte completa (*full-bridge*). Este circuito é responsável por converter a tensão contínua proveniente do barramento C.C. em uma tensão de saída alternada de alta frequência, modulada em largura de pulso.

A realização da comutação do inversor é atribuída a quatro transistores MOSFETs de potência, modelo IRF840. A seleção deste componente justifica-se pela sua ampla disponibilidade comercial e aceitação consolidada na indústria eletrônica. O dispositivo oferece uma combinação otimizada entre elevada velocidade de comutação, robustez estrutural e baixa resistência de condução, características que contribuem diretamente para a eficiência do sistema e para uma relação custo-benefício favorável (Vishay, 2021).

O acionamento dos transistores é efetuado pelos *drivers* de meia-ponte (*half-bridge*) IR2111. Estes componentes são projetados especificamente para operar com MOSFETs e IGBTs de alta tensão e alta velocidade, dispondo de canais de saída com referências independentes para as configurações *high-side* e *low-side*. A interface de entrada lógica do componente apresenta total compatibilidade com os padrões CMOS, facilitando a integração com o circuito de comando.

Uma característica muito importante deste CI é a inserção automática de um tempo-morto (*dead-time*) interno de aproximadamente 500 ns. Esta funcionalidade é

fundamental para evitar a condução simultânea entre os interruptores de um mesmo braço do inversor, prevenindo curtos-circuitos que poderiam danificar o estágio de potência. Além disso, o canal flutuante permite o acionamento eficaz de semicondutores na configuração *high-side* operando com tensões de até 600 V, o que oferece uma margem de segurança robusta para a aplicação proposta (Infineon, 2004).

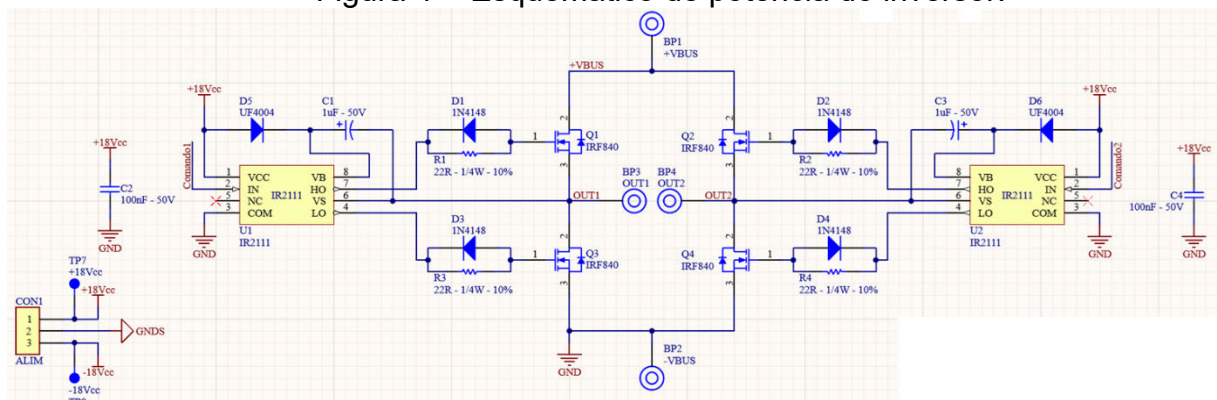
A utilização destes circuitos integrados simplifica substancialmente o *hardware*, pois implementam internamente a técnica de *bootstrap* – cujos componentes externos (diodo e capacitor) são visíveis no esquema – necessária para o correto acionamento dos interruptores superiores da ponte. Adicionalmente, observa-se nas portas (*gates*) dos transistores a presença de resistores e diodos em antiparalelo, projetadas para refinar a velocidade de comutação e mitigar interferências eletromagnéticas.

Vale ressaltar que, devido ao caráter didático do conversor, optou-se deliberadamente por não integrar o filtro LC de saída na placa de circuito impresso do inversor. Esta estratégia pedagógica transfere ao estudante a responsabilidade de calcular, projetar e conectar externamente o filtro passivo, proporcionando uma experiência prática enriquecedora sobre a filtragem de harmônicos e a obtenção da senoide fundamental que julgar mais adequada.

Durante a fase de desenvolvimento dos estágios do retificador e inversor, os autores identificaram uma oportunidade estratégica de aprimoramento técnico e pedagógico: a implementação de uma solução para a geração da referência senoidal necessária à modulação SPWM. O desafio proposto consistiu em desenvolver um circuito oscilador capaz de operar de forma autônoma, eliminando tanto a dependência de instrumentos de bancada externos, como geradores de funções, quanto a barreira técnica associada à curva de aprendizado de programação de microcontroladores.

A incorporação deste recurso confere ao protótipo uma característica de autosuficiência extremamente valiosa para o ambiente de ensino. Na prática, essa abordagem simplifica a montagem dos experimentos, permitindo que o estudante concentre seus esforços na análise dos fenômenos da eletrônica de potência, sem as distrações ou complexidades de configurações periféricas. Além disso, ao apresentar uma solução analógica, replicável e de baixo custo, este trabalho contribui diretamente para a difusão de práticas educacionais mais acessíveis e democráticas na comunidade acadêmica.

Figura 4 - Esquemático de potência do inversor.



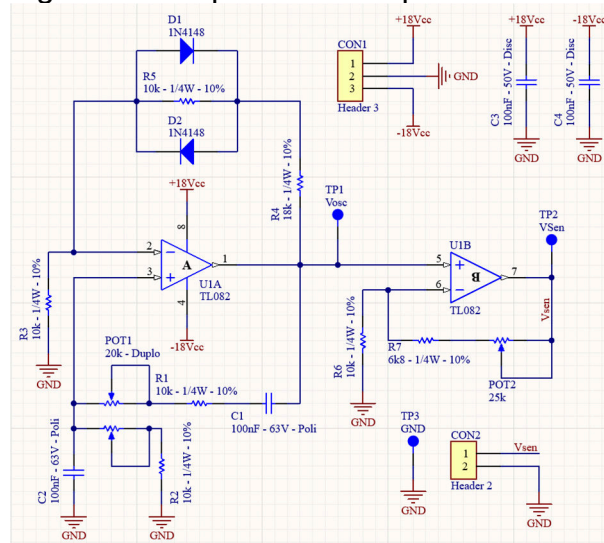
Fonte: Autores (2025).

A Figura 5 apresenta o esquemático detalhado do circuito gerador de referência senoidal, elemento crucial para a modulação SPWM do inversor *full-bridge*. A topologia selecionada para esta função foi o clássico oscilador em Ponte de Wien, imple-

mentado em torno do amplificador operacional TL082. Esta configuração é amplamente reconhecida na literatura acadêmica por sua capacidade de gerar sinais senoidais de baixa distorção harmônica e elevada estabilidade de frequência, características essenciais para a qualidade da tensão de saída do inversor (Boylestad; Nashelsky, 2011; Malvino; Bates; Jr, 2016; Sedra; Smith, 2007).

O circuito opera em regime de auto-oscilação, onde a frequência é determinada pela rede de realimentação positiva RC e o ganho é estabilizado pela malha de realimentação negativa, que inclui um limitador não linear formado pelos diodos em anti-paralelo com um resistor.

Figura 5 – Esquemático da ponte de Wien.



Fonte: Autores (2025).

Do ponto de vista pedagógico, o projeto priorizou a acessibilidade e a facilidade de interação. O estudante pode ajustar os parâmetros do sinal de referência de forma intuitiva e autônoma, sem a necessidade de instrumentação externa complexa. Através da atuação direta em apenas dois potenciômetros, é possível variar a frequência de oscilação numa faixa compreendida entre 50 Hz e 150 Hz, além de definir a amplitude da tensão de pico da senoide entre 5V e 11V, sendo este segundo ajuste realizado no estágio amplificador.

Essa abordagem prática não apenas simplifica a configuração dos experimentos, mas também permite uma compreensão empírica imediata da influência desses parâmetros no desempenho do conversor.

3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Previamente à etapa de desenvolvimento do *layout* das placas de circuito impresso (PCB) e à montagem física, as topologias propostas foram submetidas a um processo de validação e verificação virtual. Para tanto, utilizou-se o *software* LTspice®, uma ferramenta de simulação de circuitos de alto desempenho.

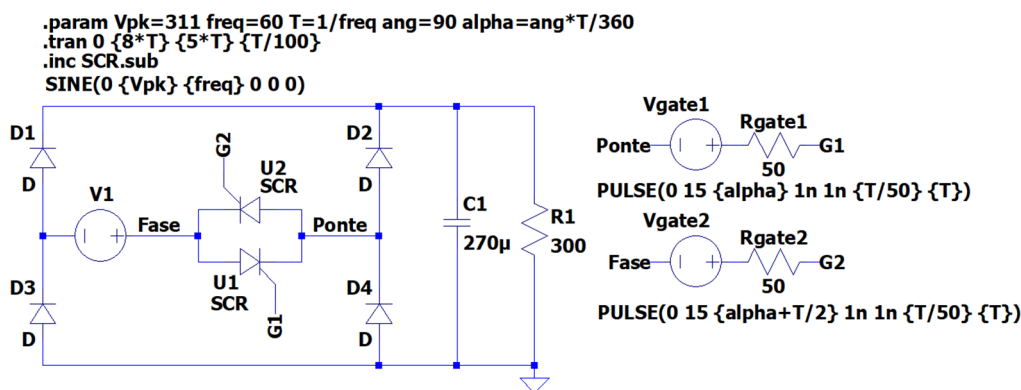
3.3.1 Simulação numérica do retificador de barramento ajustável

Para verificar o comportamento em regime permanente do estágio de entrada, realizou-se a simulação detalhada do circuito retificador. A topologia implementada no ambiente virtual pode ser visualizada na Figura 6.

Os resultados obtidos nesta análise são apresentados na Figura 7, que compila as principais grandezas elétricas do sistema. Nas formas de onda, observa-se a correlação entre a tensão senoidal de entrada (rede) e a tensão resultante no barramento de corrente contínua (*link* C.C.).

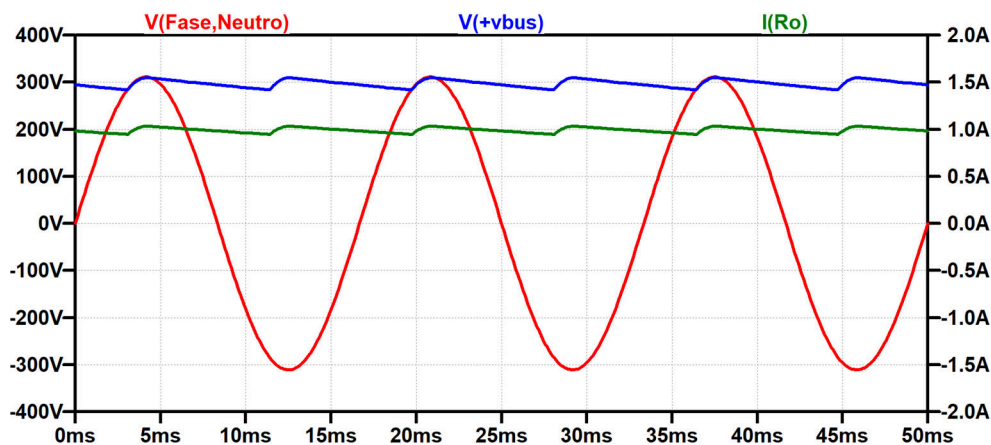
É possível notar claramente a atuação do processo de retificação em onda completa e o efeito de filtragem do capacitor, evidenciado pela ondulação residual (*ripple*) característica sobre o nível C.C. Adicionalmente, o comportamento da corrente de carga é exibido, demonstrando a estabilidade no fornecimento de potência e validando o dimensionamento do estágio para as condições nominais de operação.

Figura 6 – Circuito do retificador simulado.



Fonte: Autores (2025).

Figura 7 - Formas de onda da tensão de entrada (vermelho), tensão de saída na carga (azul) e corrente de saída na carga (verde) do circuito do retificador simulado.



Fonte: Autores (2025).

3.3.2 Simulação numérica do inversor *full-bridge*

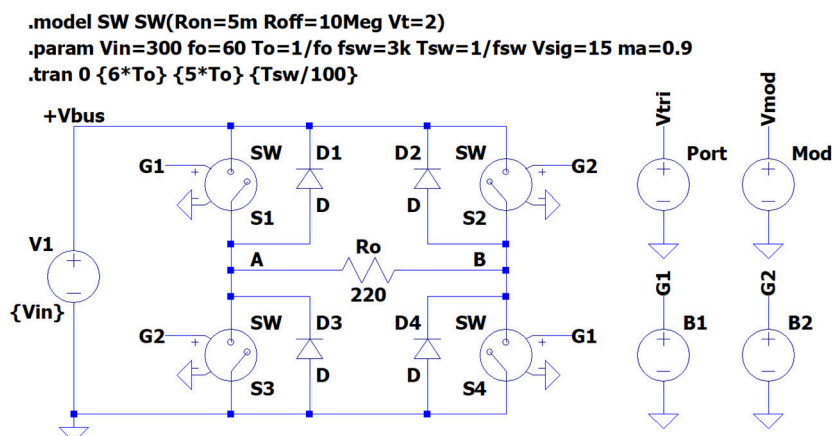
Em continuidade à etapa de validação numérica, o estágio inversor *full-bridge* foi submetido à análise de simulação para verificar a eficácia da estratégia de modulação e o comportamento dos semicondutores de potência. O circuito esquemático modelado no *software* é apresentado na Figura 8.

Os resultados obtidos são detalhados na Figura 9, que exhibe as formas de onda fundamentais para a compreensão do funcionamento do conversor. No plano superior do gráfico, visualiza-se a implementação da técnica de modulação: a superposição da onda portadora triangular de alta frequência com o sinal de referência senoidal. Os

pontos de intersecção entre estes dois sinais determinam os instantes exatos de comutação dos semicondutores.

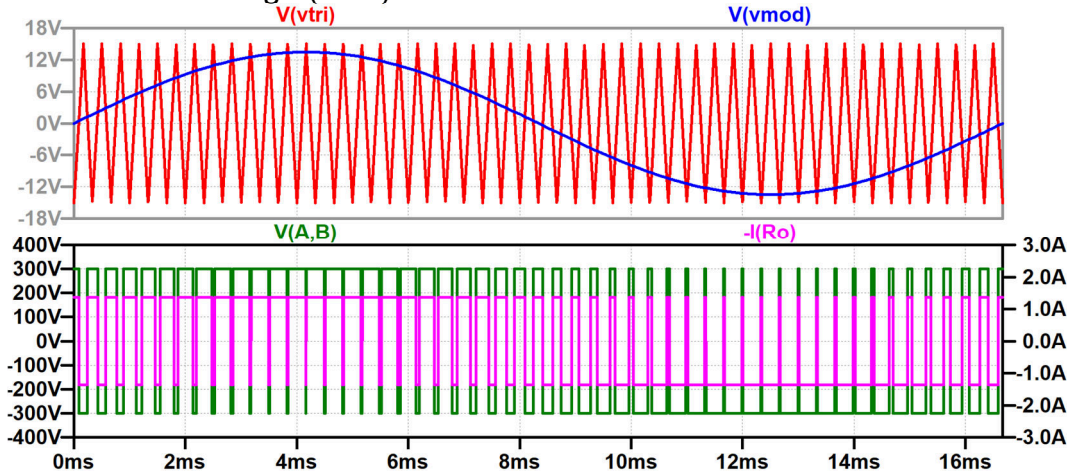
Como consequência direta dessa modulação, o plano inferior apresenta a tensão de saída diferencial aplicada à carga, caracterizada por um trem de pulsos de largura variável, cuja componente fundamental reflete a frequência e amplitude da referência. Simultaneamente, observa-se a forma de onda da corrente de saída, validando a capacidade do sistema em sintetizar uma corrente pulsada alternada ajustada a partir do barramento de tensão contínua.

Figura 8 - Circuito do inversor simulado.



Fonte: Autores (2025).

Figura 9 – Formas de onda da tensão da portadora triangular (vermelho), da tensão de referência (azul), da tensão de saída na carga (verde) e da corrente de saída na carga (rosa) do circuito do inversor simulado.



Fonte: Autores (2025).

3.3.3 Simulação numérica do oscilador em Ponte de Wien

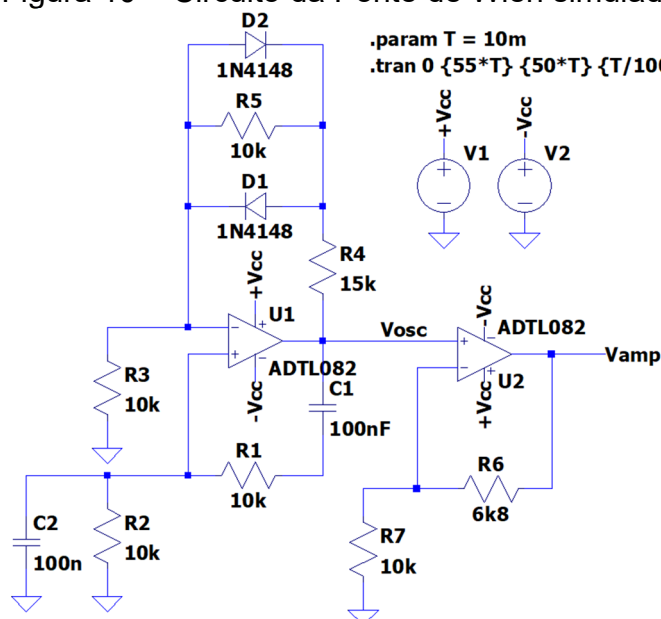
Para validar o dimensionamento do gerador de referência, procedeu-se à simulação numérica do oscilador em Ponte de Wien. O circuito esquemático submetido à análise computacional, contemplando os modelos dos amplificadores operacionais, a rede de realimentação RC e o limitador não-linear, está representado na Figura 10.

Os resultados obtidos no domínio do tempo são apresentados na Figura 11. O gráfico mostra, em vermelho (V_{osc}), o sinal original medido na saída do primeiro estágio oscilador, onde é possível verificar a estabilidade da amplitude garantida pela

malha de realimentação negativa. Já em azul (Vamp), é exibido o sinal após passar pelo estágio de amplificação não-inversora.

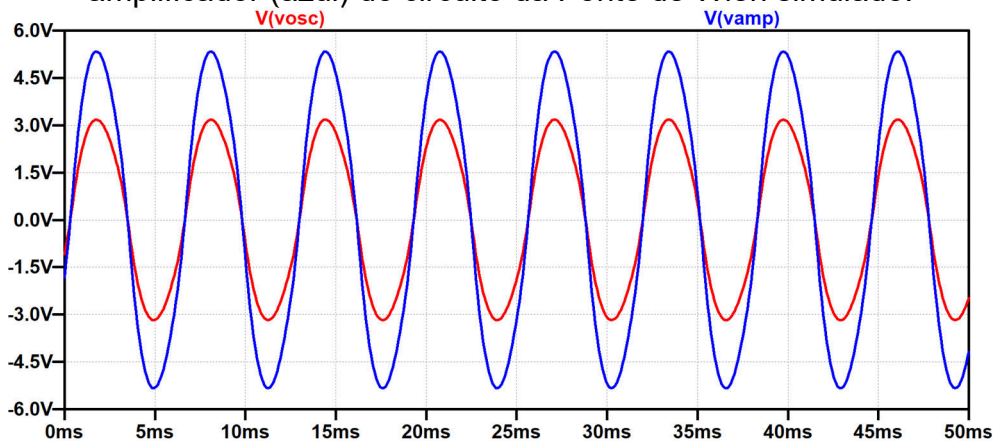
Nota-se que este segundo estágio eleva o nível de tensão da senoide, condicionando-a à amplitude necessária (entre 5 V e 11 V, conforme for ajustado) para excitar adequadamente a entrada do comparador do modulador SPWM. A simulação confirma a baixa distorção harmônica e a estabilidade da frequência de oscilação, validando a topologia para a aplicação didática.

Figura 10 – Circuito da Ponte de Wien simulado.



Fonte: Autores (2025).

Figura 11 – Formas de onda da tensão do estágio oscilador (vermelho) e do estágio amplificador (azul) do circuito da Ponte de Wien simulado.



Fonte: Autores (2025).

Esta fase de simulação é fundamental para a análise do comportamento em regime permanente dos conversores estudados, permitindo o refino dos parâmetros dos componentes e a confirmação das formas de onda esperadas.

Os resultados obtidos numericamente corroboraram o dimensionamento dos componentes, assegurando a funcionalidade dos estágios de potência e comando, além de minimizar significativamente os riscos e custos associados a erros de projeto na fase de prototipagem.

3.4 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

A materialização dos circuitos dimensionados e validados nas etapas anteriores deu-se através da confecção de placas de circuito impresso (PCI) dedicadas. Para a prototipagem, optou-se pelo método de transferência térmica de *toner*, seguido pelo processo de corrosão química do cobre em solução de percloreto de ferro. Após a corrosão e a furação, realizou-se a soldagem manual dos componentes em bancada, observando-se rigorosamente as normas de segurança e as boas práticas de montagem eletrônica.

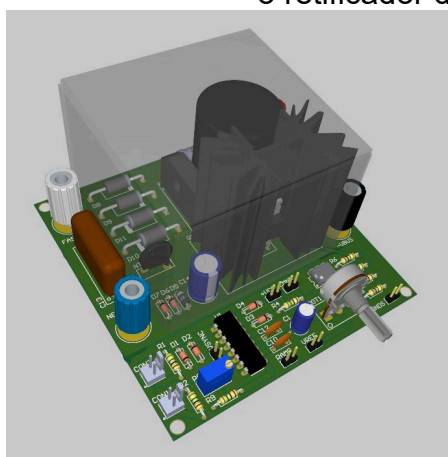
O *design* físico das placas foi concebido sob uma filosofia estritamente didática e modular. Buscou-se um *layout* limpo e intuitivo, onde a disposição dos componentes facilita a identificação visual dos estágios do circuito. Para garantir a flexibilidade necessária em um ambiente de laboratório de ensino, as conexões de potência de entrada e saída utilizam terminais do tipo banana fêmea de 4mm, permitindo a interligação rápida e segura entre os diferentes módulos do conversor didático.

3.4.1 Montagem do retificador de barramento ajustável

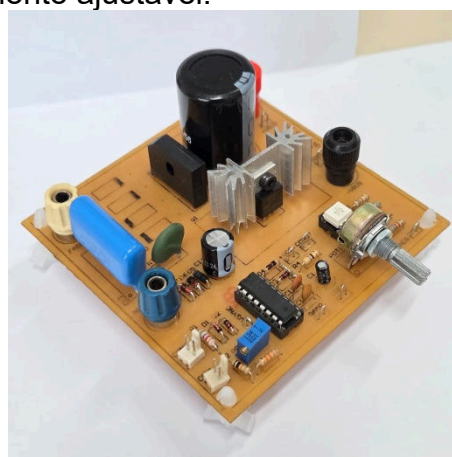
As Figuras 12(a) e 12(b) apresentam, respectivamente, a modelagem tridimensional projetada no ambiente *Altium Designer*[®] e o protótipo físico finalizado do retificador de barramento ajustável, com dimensões de 100mm × 100mm. A comparação visual entre as imagens evidencia a alta fidelidade obtida na montagem, validando a importância da etapa de planejamento virtual para a prevenção de conflitos mecânicos entre os componentes. A disposição espacial dos elementos de maior volume, como o dissipador de calor e o capacitor de filtro do barramento, foi rigorosamente respeitada, garantindo não apenas a integridade estrutural, mas também a ergonomia necessária para o manuseio em bancada.

Um detalhe construtivo relevante, observável na modelagem 3D, é a previsão de uma proteção física translúcida sobre o estágio de potência. A concepção original do projeto previa a instalação de placas de acrílico para isolar as áreas de alta tensão, mantendo expostos apenas a seção de comando e os pontos de teste (*test-points*) destinados à conexão das ponteiros de osciloscópio. Esta medida visava elevar o nível de segurança do conversor, prevenindo o contato acidental dos estudantes com partes vivas durante a operação.

Figura 12 – Modelo tridimensional (a) e protótipo físico (b) desenvolvido para o retificador de barramento ajustável.



(a)



(b)

Fonte: Autores (2025).

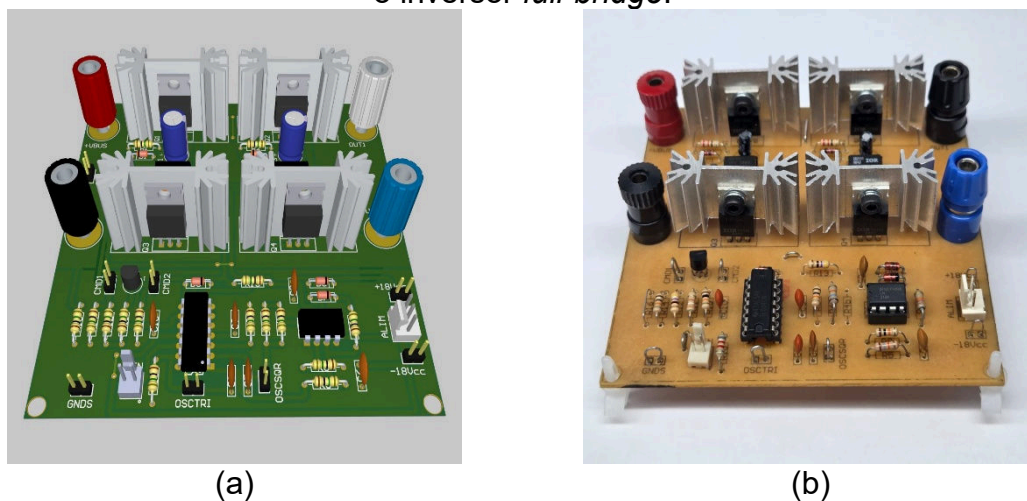
Contudo, devido à restrição de prazos inerente ao cronograma de entrega deste trabalho, a confecção e instalação destas proteções mecânicas não puderam ser concluídas na versão atual do protótipo. Optou-se, portanto, por priorizar a funcionalidade elétrica e a validação dos circuitos de comando e potência. Desta forma, a implementação das proteções de acrílico permanece registrada como uma sugestão prioritária para trabalhos futuros, visando o aperfeiçoamento da segurança intrínseca do equipamento antes de sua inserção definitiva na rotina laboratorial.

3.4.2 Montagem do inversor *full-bridge*

As Figuras 13(a) e 13(b) exibem a comparação entre o projeto virtual e a montagem definitiva do inversor *full-bridge*, com dimensões de 100mm × 100mm. A análise visual confirma a fidelidade da execução, onde a disposição dos componentes seguiu rigorosamente o planejamento do *software* CAD. Uma característica deste *layout* é a integração, em uma única placa de circuito impresso, de dois subsistemas críticos: o estágio de potência (localizado na metade superior) e o circuito modulador PWM analógico (localizado na metade inferior). Esta estratégia de integração elimina a necessidade de cabos externos para os sinais de disparo (*gate signals*), reduzindo a indutância parasita e melhorando a integridade do sinal de comando.

Observa-se que os componentes de potência, os quatro MOSFETs IRF840 e os drivers IR2111, estão agrupados distantes dos sensíveis amplificadores operacionais (TL084 e LM318) responsáveis pela geração da portadora e modulação. Essa setorização tem o objetivo técnico de mitigar a interferência eletromagnética (EMI) gerada pelas rápidas comutações de corrente (elevado di/dt) sobre os sinais de comando de baixa tensão, garantindo uma operação estável e livre de disparos erráticos.

Figura 13 – Modelo tridimensional (a) e protótipo físico (b) desenvolvido para o inversor *full-bridge*.



Fonte: Autores (2025).

Do ponto de vista didático, a montagem priorizou a instrumentação. Conforme evidenciado na Figura 13(b), foram inseridos diversos pontos de teste em formato de alça metálica na região de comando (identificados na serigrafia como CMD1, CMD2, OSCTRI, OSCSQR, GNDS). Estes terminais facilitam a conexão segura de pontas de prova de osciloscópios, permitindo que o estudante visualize, em tempo real, desde a geração da onda triangular interna até o sinal SPWM final que chega aos *gates*, correlacionando a teoria de modulação com a prática de bancada.

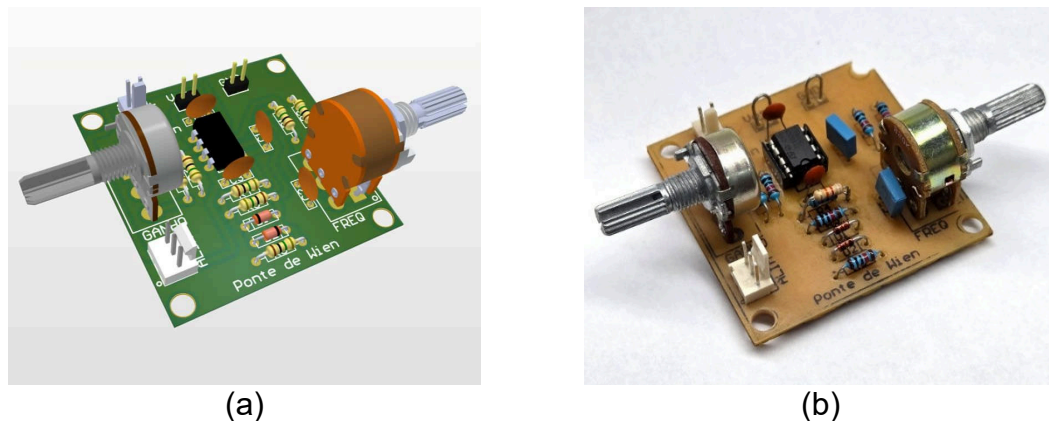
3.4.3 Montagem do oscilador em Ponte de Wien

Por fim, as Figuras 14(a) e 14(b) apresentam o comparativo entre o modelo virtual e a implementação física do oscilador em Ponte de Wien. A montagem real preservou integralmente a concepção compacta do projeto, resultando em uma placa de dimensões reduzidas (50mm × 50mm). A alta fidelidade posicional dos componentes assegura que o protótipo ocupe o mínimo de espaço na bancada, mantendo-se, contudo, robusto e de fácil manuseio.

O diferencial estratégico deste módulo reside na sua autonomia. Conforme discutido na fundamentação, esta placa atua como uma solução 'de bolso' para a geração de sinais, eliminando completamente a dependência de geradores de funções comerciais (equipamentos caros e voluminosos) ou a necessidade de configurações complexas em microcontroladores. O circuito entrega uma referência senoidal limpa e estável de forma imediata (*plug-and-play*), permitindo que o sistema inversor opere em qualquer ambiente, mesmo naqueles com infraestrutura laboratorial limitada.

Do ponto de vista operacional, a placa oferece uma interação didática direta. O estudante tem acesso a um potenciômetro duplo (destaque à direita nas imagens) para a variação linear da frequência e a um potenciômetro simples (à esquerda) para o ajuste fino da amplitude (ganho) do sinal. Além disso, foram dispostos pontos de teste estratégicos, que permitem o monitoramento simultâneo do sinal oscilado e do sinal amplificado, facilitando a calibração do sistema antes da conexão com o estágio modulador.

Figura 14– Modelo tridimensional (a) e protótipo físico (b) desenvolvido para o oscilador em Ponte de Wien.



Fonte: Autores (2025).

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este item dedica-se em demonstrar a operabilidade dos protótipos em bancada, confrontando o desempenho real com as premissas de projeto e os resultados de simulação. Por meio da análise das formas de onda capturadas em osciloscópio, serão detalhados o comportamento dinâmico dos conversores e a eficácia prática das estratégias de comando implementadas.

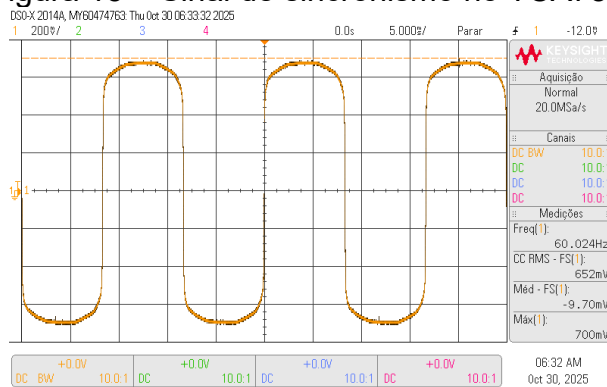
Antes de tudo, é importante ressaltar que, dada a natureza estritamente didática deste projeto, o foco do desenvolvimento não residiu na obtenção de métricas de alta performance industrial, como a supressão total de harmônicos ou eficiência energética extrema. Diferentemente de um produto comercial de prateleira, este protótipo priorizou os requisitos funcionais de transparência, acessibilidade e interatividade. O

objetivo é entregar uma plataforma experimental onde o estudante possa visualizar, medir e compreender os fenômenos da Eletrônica de Potência de forma desmistificada, facilitando significativamente o processo de ensino-aprendizagem.

4.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL DO RETIFICADOR DE BARRAMENTO AJUSTÁVEL

A primeira etapa da validação experimental concentrou-se na verificação do circuito de comando baseado no CI TCA785. A Figura 15 apresenta a forma de onda do sinal de sincronismo monitorado no pino 5 do componente. Observa-se a geração de pulsos precisos alinhados com a passagem da tensão da rede por zero (*zero-crossing*). Este sinal é fundamental para o sistema, pois estabelece a referência temporal necessária para que o disparo dos tiristores ou TRIACs ocorra sempre na fase correta do semiciclo da rede elétrica.

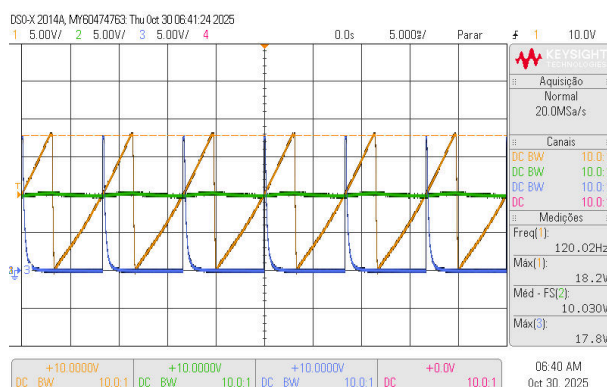
Figura 15 – Sinal de sincronismo no TCA785.



Fonte: Autores (2025).

Na sequência, a Figura 16 detalha a lógica interna de geração dos disparos, ilustrando a riqueza didática do conversor proposto. A imagem sobrepõe três sinais distintos: a rampa de tensão dente-de-serra (amarelo), gerada internamente pelo TCA785 a uma frequência de 120 Hz (o dobro da frequência da tensão de entrada); a tensão de referência contínua (verde), definida pelo ajuste do potenciômetro; e o pulso de gatilho resultante (azul). A captura de tela comprova visualmente o funcionamento do comparador interno: o pulso de comando é enviado ao TRIAC exatamente no instante em que a rampa cruza o nível de tensão de referência, validando a linearidade e a precisão do ajuste angular.

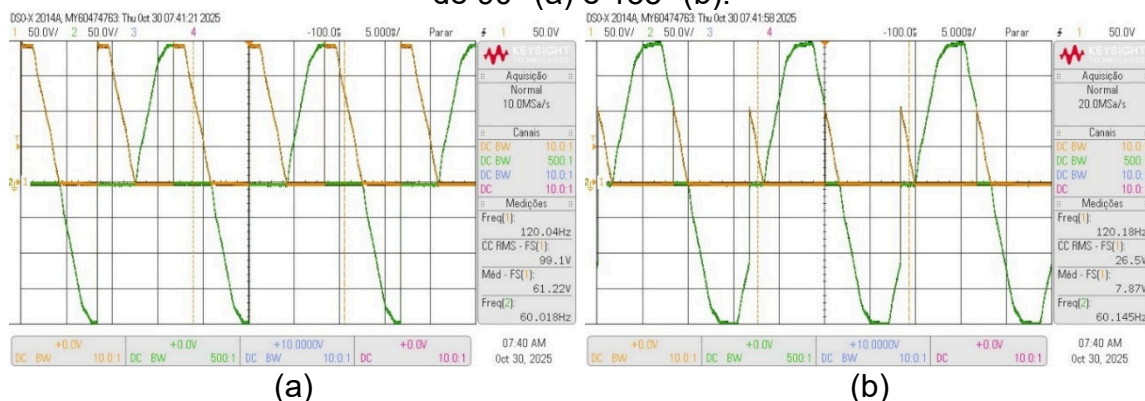
Figura 16 – Formas de onda da rampa de tensão dente de serra (amarelo), tensão de referência (verde) e do pulso de gatilho (azul) do TRIAC do retificador.



Fonte: Autores (2025).

Para demonstrar o efeito direto do ângulo de disparo (α) sobre a tensão de saída, realizaram-se ensaios com o retificador operando sem o capacitor de filtro. As Figuras 17(a) e 17(b) comparam a forma de onda da tensão no TRIAC (verde) com o sinal retificado na carga (amarelo) para dois ângulos distintos.

Figura 17 – Formas de onda de tensão sob o TRIAC (verde) e saída do retificador de barramento ajustável (amarelo) para ângulos de disparo de 90° (a) e 135° (b).



Fonte: Autores (2025).

Na Figura 17(a), configurada com um ângulo de disparo próximo a 90°, nota-se que a condução ocorre apenas em metade de cada semiciclo, resultando em uma tensão média reduzida. Já na Figura 17(b), o ângulo foi ajustado para aproximadamente 135°, atrasando ainda mais o disparo e permitindo que uma porção menor da senoide seja entregue à carga. Estes resultados confirmam a capacidade do circuito de modular a potência através do "ceifamento" da onda, conceito central em retificadores controlados.

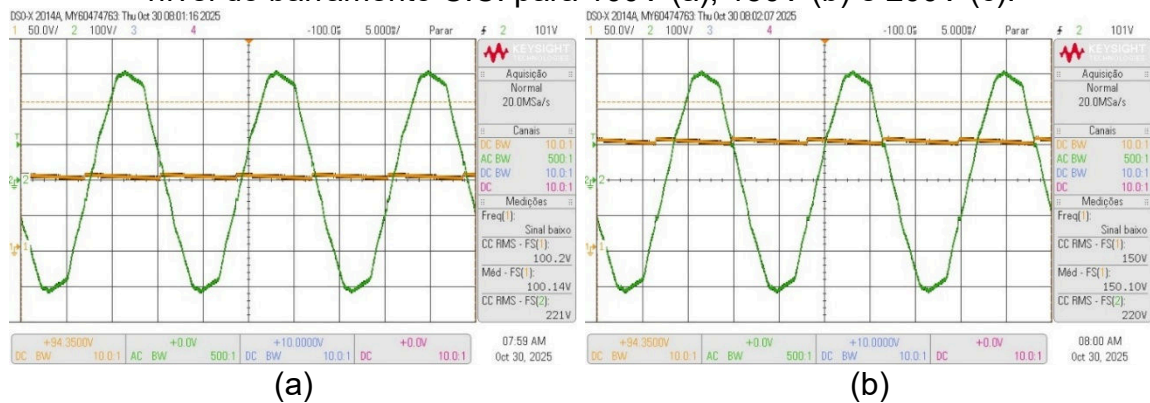
A etapa final de validação do retificador consistiu em conectar o capacitor de barramento C.C. e submeter o circuito a uma carga resistiva de 300 Ω , cenário que simula a demanda real de alimentação do estágio inversor subsequente. As Figuras 18(a), 18(b) e 18(c) demonstram a versatilidade do protótipo em ajustar a tensão do barramento C.C. para diferentes níveis de operação.

Através da variação da referência do ângulo de disparo, obteve-se tensões médias reguladas em 100V, Figura 18(a), 150V, Figura 18(b), e 200V, Figura 18(c). Observa-se nas imagens que, mesmo sob carga, o sistema mantém o nível C.C. estável no patamar desejado. A ondulação residual (*ripple*) visualizada sobre a linha contínua (amarelo) é intrínseca à topologia de retificação e ao dimensionamento da capacitância, mantendo-se dentro dos parâmetros previstos para esta aplicação.

4.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL DO OSCILADOR EM PONTE DE WIEN

A validação experimental do módulo de comando prossegue com a análise do gerador de sinais senoidais. Este circuito é responsável por fornecer a referência analógica para a modulação SPWM. Nas imagens obtidas, o sinal em amarelo corresponde à saída direta do estágio oscilador (pino 1 do TL082), responsável pela geração da onda senoidal, enquanto a forma de onda em verde representa o sinal após passar pelo estágio de amplificação não-inversora (pino 7 do TL082), onde ocorre o ajuste de amplitude.

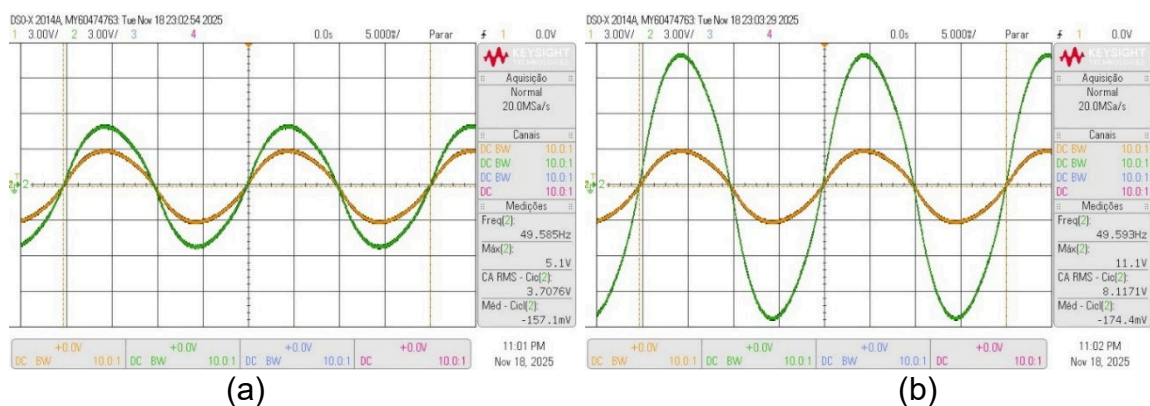
Figura 18 – Formas de onda da tensão de entrada (verde) e saída do retificador (amarelo), com capacitor de barramento e carga conectados, ajustando o nível do barramento C.C. para 100V (a), 150V (b) e 200V (c).



Fonte: Autores (2025).

As Figuras 19(a) e 19(b) ilustram a operação do circuito na extremidade inferior da faixa de frequência, ajustada para operar próxima aos 50 Hz. A comparação entre estas duas imagens evidencia a eficácia do controle de ganho: manteve-se a frequência estável e variou-se o nível de tensão de pico do sinal de saída (verde) de 5 V (Figura 19(a)) para 11 V (Figura 19(b)).

Figura 19 – Formas de onda experimental do sinal do oscilador (amarelo) e do amplificador não-inversor (verde) da Ponte de Wien para aproximadamente 50 Hz em 5 V (a) e 11 V (b) de amplitude ajustada.

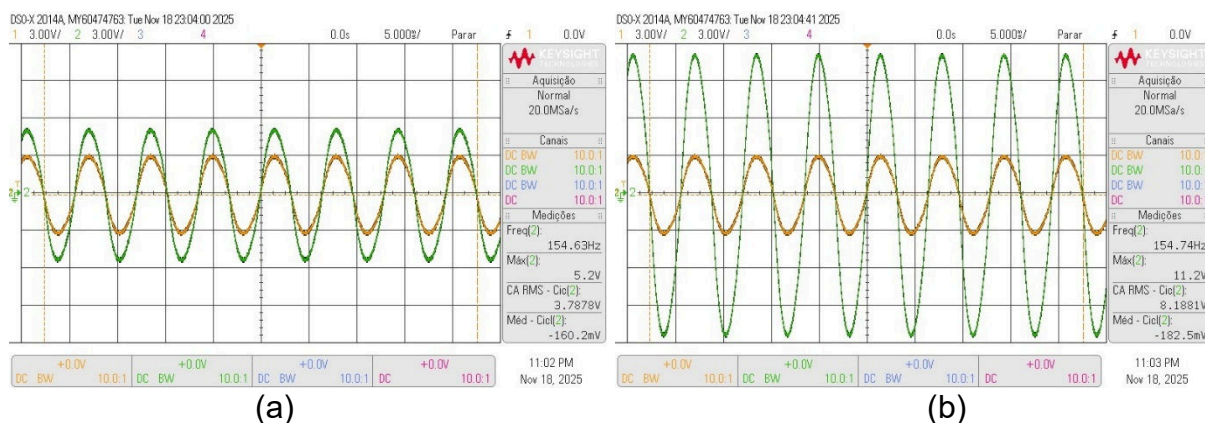


Fonte: Autores (2025).

De maneira análoga, as Figuras 20(a) e 20(b) demonstram a resposta do circuito na extremidade superior da faixa, alcançando frequências próximas a 150 Hz. Novamente, observa-se a capacidade do sistema em sustentar a oscilação com baixa distorção harmônica tanto em amplitudes reduzidas de 5 V (Figura 20(a)) quanto em amplitudes elevadas de 11 V (Figura 20(b)).

Vale ressaltar que as frequências e amplitudes obtidas na bancada apresentam discretos desvios em relação aos valores teóricos absolutos do dimensionamento. Tais variações são intrínsecas à montagem experimental e decorrem, primordialmente, das tolerâncias dos componentes passivos (resistores e capacitores) que compõem a malha de realimentação RC, bem como das não-idealidades naturais dos amplificadores operacionais. Contudo, a estabilidade e a pureza espectral das formas de onda geradas validam o circuito como uma fonte de referência robusta e confiável para o acionamento do inversor.

Figura 20 – Formas de onda experimental do sinal do oscilador (amarelo) e do amplificador não-inversor (verde) da Ponte de Wien para aproximadamente 150 Hz em 5 V (a) e 11 V (b) de amplitude ajustada.



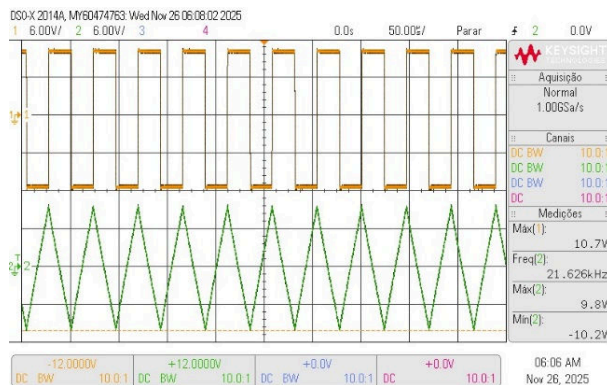
Fonte: Autores (2025).

4.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL DO INVERSOR *FULL-BRIDGE*

A validação do estágio inversor inicia-se pela verificação da geração dos sinais de comando. A Figura 21 apresenta a origem da portadora triangular. Nela, observa-se o sinal de saída do oscilador de onda quadrada (amarelo) e o resultado da integração deste sinal, formando a onda triangular (verde) que servirá como base de tempo para a modulação e frequência de comutação dos MOSFETs. A linearidade das rampas de subida e descida confirma o correto funcionamento do integrador.

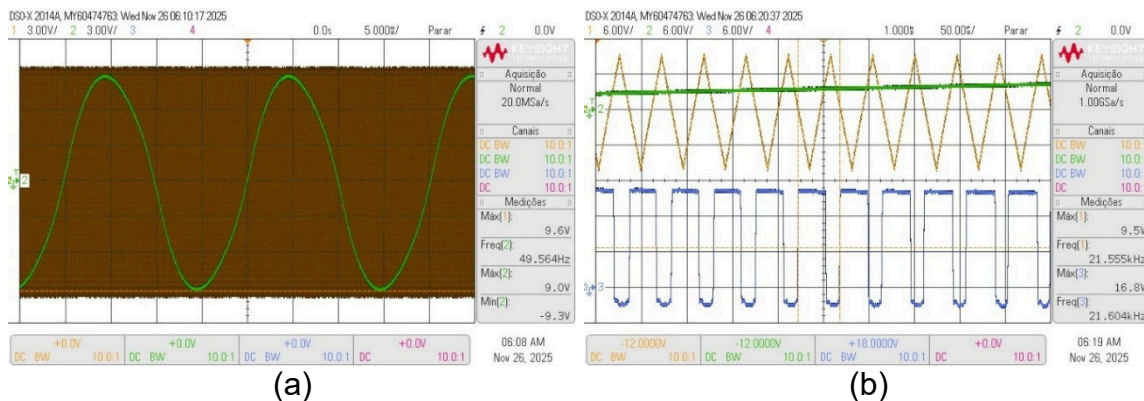
Na sequência, as Figuras 22(a) e 22(b) demonstram a implementação da estratégia SPWM. A Figura 22(a) exibe a comparação analógica entre a portadora triangular de alta frequência (amarelo) e o sinal modulante senoidal de baixa frequência (verde) proveniente da Ponte de Wien. O resultado desta comparação é detalhado em alta frequência na Figura 22(b), onde se visualiza o pulso de comando gerado (azul) sobreposto aos sinais de entrada. Nota-se que a largura do pulso varia proporcionalmente à amplitude instantânea da senoide, validando a lógica do SPWM.

Figura 21 – Formas de onda experimental quadrada do oscilador (amarelo) e triangular da portadora (verde) do comando do inversor.



Fonte: Autores (2025).

Figura 22 – Formas de onda experimental da portadora triangular (amarelo) de alta frequência, da moduladora senoidal (verde) de baixa frequência (a) e o resultado da saída do comparador (azul) em alta frequência (b).



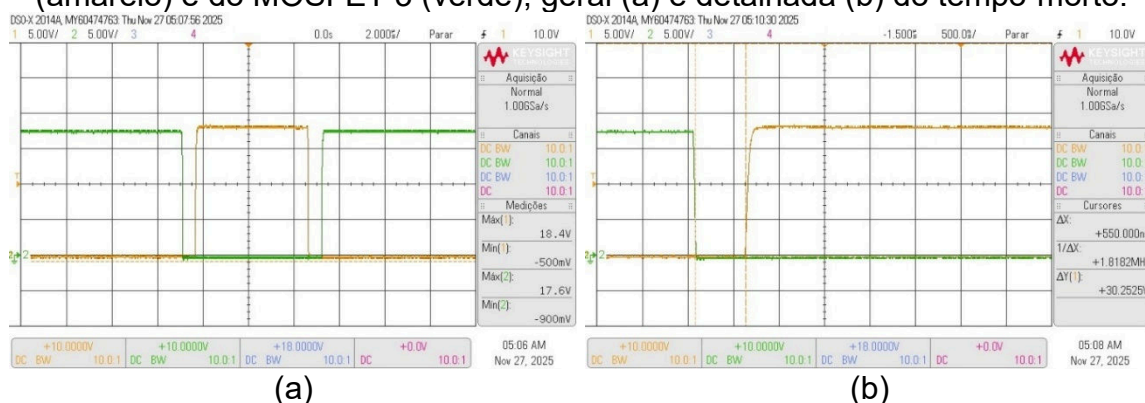
Fonte: Autores (2025).

Um aspecto crítico para a segurança e integridade do inversor *full-bridge* é a garantia do tempo-morto (*dead-time*) entre o desligamento de uma chave e o ligamento da sua complementar, evitando o curto-circuito do barramento C.C. As Figuras 23(a) e 23(b) apresentam as tensões de *gate-source* (V_{GS}) dos MOSFETs de um mesmo braço do inversor.

A Figura 23(a) oferece uma visão geral da comutação complementar, enquanto a Figura 23(b) aplica um *zoom* na transição dos estados. A medição detalhada pelos cursores do osciloscópio comprova a existência de um intervalo de tempo em que ambos os sinais permanecem em nível baixo antes da próxima comutação. O tempo medido situa-se em torno de 500 ns, valor condizente com as especificações do *driver* IR2111.

Por fim, o inversor foi submetido a ensaios com diferentes cargas resistivas para verificar a estabilidade da tensão de saída. As Figuras 24(a), 24(b), 24(c) e 24(d) apresentam as formas de onda da tensão de saída (amarelo) e da corrente na carga (verde) com frequência fundamental ajustada em 50 Hz para resistências de 1.400 Ω , 370 Ω , 250 Ω e 190 Ω , respectivamente.

Figura 23 – Formas de onda experimental da tensão V_{G-s} do MOSFET 1 (amarelo) e do MOSFET 3 (verde), geral (a) e detalhada (b) do tempo-morto.

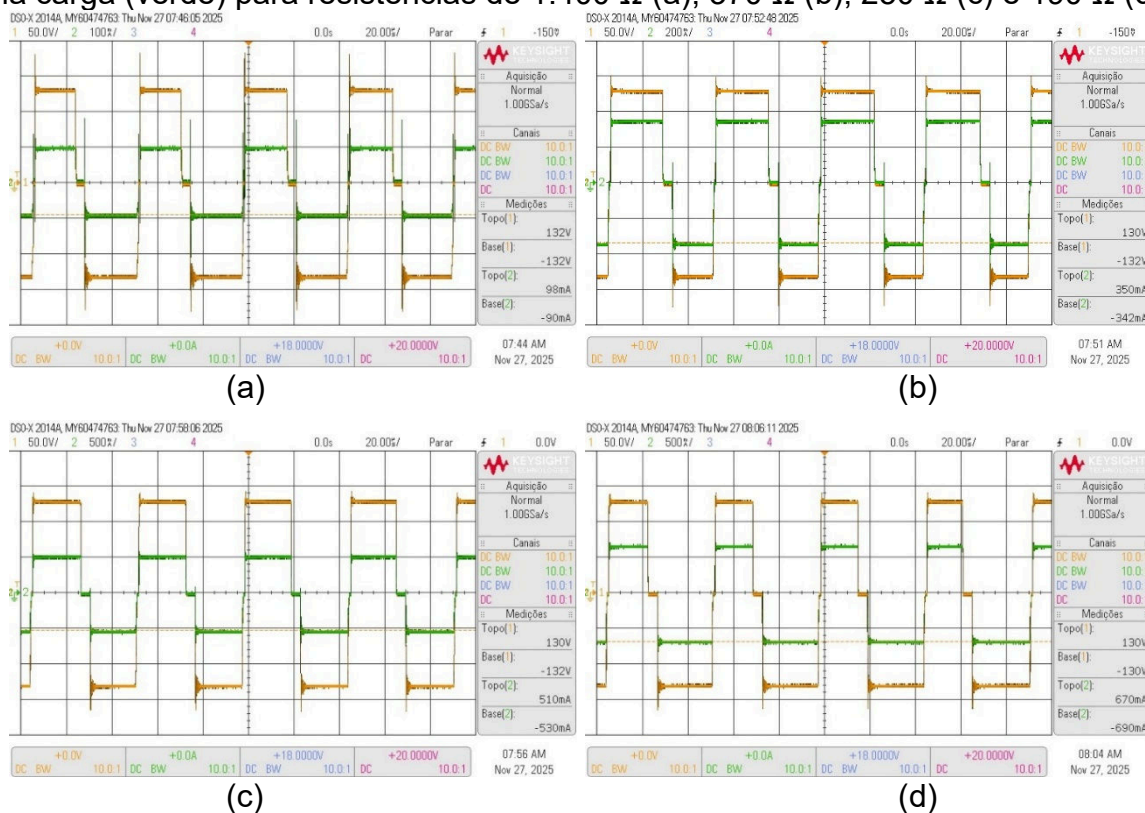


(a)

(b)

Fonte: Autores (2025).

Figura 24 – Formas de onda experimental da tensão de saída (amarelo) e corrente na carga (verde) para resistências de 1.400 Ω (a), 370 Ω (b), 250 Ω (c) e 190 Ω (d).



(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: Autores (2025).

Nota-se que, independentemente da carga conectada, o inversor manteve a modulação SPWM estável. É importante salientar que, nesta etapa de prototipagem acadêmica, os ensaios não visaram atingir os limites térmicos ou a potência nominal máxima dos componentes de potência. A estratégia de testes concentrou-se na validação qualitativa e funcional das topologias. O objetivo primário, que consistia em demonstrar a capacidade do conversor didático em converter energia foi atingido, qualificando o equipamento como uma ferramenta didática robusta para o ensino de Eletrônica de Potência nos cursos de engenharia.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho cumpre o objetivo de dimensionar, desenvolver e validar um sistema conversor estático de potência modular com fins estritamente didáticos. A jornada de desenvolvimento, estruturada desde a fundamentação teórica, passando pela validação numérica em ambiente virtual (LTspice®) até a prototipagem física das placas de circuito impresso, demonstrou a eficácia da metodologia adotada em reduzir a distância entre os conceitos acadêmicos e a prática de bancada.

Do ponto de vista técnico, os resultados experimentais corroboraram as premissas de projeto. O módulo retificador proposto mostrou-se capaz de fornecer um barramento C.C. ajustável e estável, essencial para a flexibilidade dos ensaios. O inversor *full-bridge*, por sua vez, operou de forma consistente, validando a estratégia de modulação SPWM analógica e os circuitos de proteção (*dead-time*), garantindo a integridade dos semicondutores mesmo sob variações de carga.

Um destaque particular é atribuído ao desenvolvimento do oscilador em Ponte de Wien. A implementação desta solução autônoma e compacta eliminou a dependência de geradores de funções externos ou de complexas rotinas de programação em microcontroladores, conferindo ao conversor didático um caráter de autossuficiência (*stand-alone*) extremamente valioso para laboratórios de ensino.

Sob a ótica pedagógica, o protótipo atinge sua meta de acessibilidade e transparência funcional. A disposição física dos componentes, a setorização dos estágios de potência e comando, e a disponibilização estratégica de pontos de teste permitem uma visualização clara dos fenômenos elétricos. Ao remover as "caixas-pretas" tecnológicas e simplificar a interação com o *hardware*, o projeto entrega à comunidade acadêmica uma ferramenta que democratiza o ensino da Eletrônica de Potência, permitindo que o estudante concentre seus esforços na compreensão dos conceitos fundamentais de conversão de energia.

Como sugestões para a continuidade e aprimoramento deste trabalho, recomenda-se a implementação de proteções mecânicas em acrílico sobre os estágios de alta tensão, visando elevar a segurança intrínseca do equipamento durante o manuseio por estudantes iniciantes. Propõe-se também a implementação da geração dos sinais de comando e da modulante utilizando microcontrolador de baixo custo, com foco em uma programação simplificada. Adicionalmente, é sugerido o estudo de malhas de controle fechadas para a regulação automática da tensão de saída do inversor *full-bridge*, expandindo o escopo didático para disciplinas de Sistemas de Controle. Em suma, o conversor desenvolvido apresenta-se não como um produto final encerrado, mas como uma plataforma aberta e evolutiva para o fomento da educação tecnológica.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Yolanda Vieira de; OLIVEIRA, Marco Aurélio Gonçalves de; GUERRA, Sinclair Mallet Guy. **Energia, sociedade e meio ambiente**. Málaga, Espanha: Eumed.Net, 2010.
- BARBI, Ivo. **Projetos de Fontes Chaveadas**. Florianópolis, SC: Edição do Autor, 2001.
- BARBI, IVO. **ELETRÔNICA DE POTENCIA**. [S.l.]: EDICAO DO AUTOR, 2012.
- BATARSEH, Issa; HARB, Ahmad. **Power Electronics: Circuit Analysis and Design**. Cham: Springer, 2018.
- BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos**. [S.l.]: Pearson Universidades, 2011.
- BUENO, Felipe. **Brasil apresenta expansão do consumo de energia por habitante**. **Jornal da USP**, 25 jun. 2024. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/radio-usp/brasil-apresenta-expansao-do-consumo-de-energia-por-habitante/>>. Acesso em: 31 maio. 2025
- DE LORENZO DO BRASIL. **Catálogo Eletrônica de Potência**. São Paulo, SP: [S.n.]. Disponível em: <<https://www.delorenzo.com.br/>>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- DOMINGUES, Taiane Janaina Soares Paiva Domingues. **Desenvolvimento de um sistema de teste de confiabilidade burn-in de baixo custo para fontes chaveadas para simulação da vida útil do produto, com capacidade reduzida**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2021.
- ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIC, Dragan. **Fundamentals of Power Electronics**. Cham: Springer, 2020.
- GIROTO, Claudia Regina Mosca; POKER, Rosimar Bortolini; OMOTE, Sadao. **As tecnologias nas práticas pedagógicas inclusivas**. Marília, São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012.
- GOMES, Otávio Rodrigues; BASTOS, Maria Eduarda Silva; LANES, Matusalém Martins. Kit didático flexível para experimentação de conversores estáticos de potência. In: XLVI CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA. **Anais...** Salvador, BA: set. 2018.
- HART, Daniel W.; JÚNIOR, Antonio Pertence; ABDO, Romeu. **Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos**. 1. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2012.
- INFINEON. **IR2111**. El Segundo, CA: International Rectifier, dez. 2004. Disponível em: <<https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-ir2111-ds-en.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- KENSKI, Vani Moreira. **Educação e tecnologias: O novo ritmo da informação**. [S.l.]: Papirus Editora, 2007.

MALVINO, Albert P.; BATES, David J.; JR, Antonio Pertence. **Eletrônica: Volume 2**. 8ª edição ed. [S.l.]: AMGH, 2016.

MI, C.; SHEN, Z. J.; CECCARELLI, T. Continuing Education in Power Electronics. **IEEE Transactions on Education**, v. 48, n. 1, p. 183–190, fev. 2005.

MOHAN, Ned. **Eletrônica de Potência - Curso Introductório**. [S.l.]: LTC, 2013.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência: Dispositivos, Circuitos e Aplicações**. [S.l.]: Pearson Universidades, 2023.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica**. 5ª edição ed. [S.l.]: Pearson Universidades, 2007.

SIEMENS. **TCA785**. Munique, Alemanha: SIEMENS AG, fev. 2005. Disponível em: <<https://www.farnell.com/datasheets/1836360.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2025.

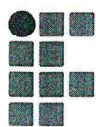
SILVA, Cândido dos Santos *et al.* **PRÁTICAS EXPERIMENTAIS PARA O ENSINO DE CIÊNCIA: construindo alternativas adequadas à realidade educacional brasileira**. [S.l.]: Editora BAGAI, 2021.

TEIXEIRA, Odete Pacubi Baierl. A Ciência, a Natureza da Ciência e o Ensino de Ciências. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 25, n. 4, p. 851–854, out. 2019.

VISHAY. **IRF840**. San Jose, CA: Vishay Siliconix, ago. 2021. Disponível em: <<https://www.vishay.com/docs/91070/91070.pdf>>. Acesso em: 9 jun. 2025.

WEEN, Semiconductors. **BT139-600e**. Shanghai, China: [S.n.]. Disponível em: <<https://br.mouser.com/datasheet/3/1515/1/bt139-600e.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2025.

WON-TOP, Electrocnics. **KBU610**. Kaohsiung, Taiwan: Won-Top Electronics Co., Ltd., set. 2012. Disponível em: <https://www.wontop.com/uploadfiles/56/sort_excel/pdf/kbu600.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2025.



INSTITUTO FEDERAL
Santa Catarina

Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

Vinícius Guilherme Hoffmann

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CHAVEADO DE
DUPLO ESTÁGIO (CA-CC E CC-CA) PARA LABORATÓRIOS DE ENSINO**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville, 12 de dezembro de 2025.



Prof. Rafael Gomes Faust, Me. Eng.

Orientador

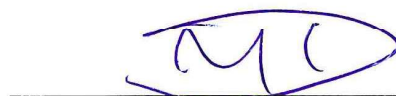
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Prof. José Flávio Dums, Dr. Eng.

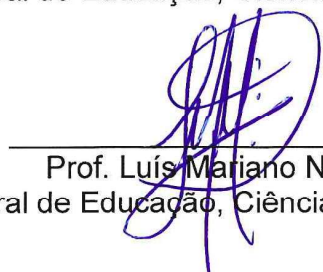
Coorientador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Prof. Janderson Duarte, Dr. Eng.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Prof. Luís Mariano Nodari, Me. Eng.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Erick Kupas, Eng.

Supplier – Indústria e Comércio de Eletroeletrônicos