

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME MATHEUS TODYS

**DESENVOLVIMENTO DE UM RETIFICADOR TRIFÁSICO INTERCALADO DE
ENTRADA DUPLA PARA APLICAÇÃO EM AEROGERADORES DE PEQUENO
PORTE**

CURITIBA

2025

GUILHERME MATHEUS TODYS

**DESENVOLVIMENTO DE UM RETIFICADOR TRIFÁSICO INTERCALADO DE
ENTRADA DUPLA PARA APLICAÇÃO EM AEROGERADORES DE PEQUENO
PORTE**

**Development of a dual-input interleaved three-phase rectifier for application
in small wind turbines**

Dissertação de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Flores Cortez

Coorientador: Prof. Dr. Amauri Amorin Assef

CURITBA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



GUILHERME MATHEUS TODYS

**DESENVOLVIMENTO DE UM RETIFICADOR TRIFÁSICO INTERCALADO DE ENTRADA DUPLA PARA APLICAÇÃO EM
AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Automação E Sistemas De Energia.

Data de aprovação: 21 de Março de 2025

Dr. Daniel Flores Cortez, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Eduardo Felix Ribeiro Romaneli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rogers Demonti, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 21/03/2025.

À minha família, cuja força, apoio e amor
tornaram tudo isso possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me guiar, fortalecer e iluminar meu caminho ao longo dessa jornada, concedendo-me saúde, sabedoria e perseverança para superar os desafios. Agradeço também à minha família, meu alicerce e motivação em todos os momentos. Ao meu pai, Antonio Carlos Todys, à minha mãe, Elizabeth Aparecida Bento Todys, à minha irmã, Jéssica Ingrid Todys, e à minha namorada, Gabriela Rodrigues de França, por todo o amor, apoio incondicional e incentivo ao longo dessa caminhada. Sem vocês, nada disso seria possível.

Dedico também esta conquista à memória do meu amado irmão, Eduardo Felipe Bento, cuja presença sempre iluminou minha vida. Sua força, alegria e determinação continuam sendo uma inspiração para mim. Que este trabalho seja também uma homenagem ao seu legado e à pessoa incrível que sempre foi.

Agradeço também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE) e ao Laboratório de Processamento Eletrônico de Energia (LPEE), que proporcionaram o ambiente e os recursos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa. Minha mais sincera gratidão ao meu orientador, Professor Dr. Daniel Flores Cortez, e ao meu coorientador, Professor Dr. Amauri Amorin Assef, pelo suporte, ensinamentos e orientação ao longo dessa jornada. Um agradecimento especial ao Professor Dr. Roger Gules, cuja contribuição foi fundamental para a elaboração dos artigos publicados ao longo deste mestrado.

Agradeço, ainda, à empresa brasileira NHS Sistemas de Energia pelo apoio financeiro, que viabilizou a realização deste trabalho.

Meu sincero agradecimento ao estagiário Murilo P. de Oliveira pelo suporte fornecido durante a aquisição dos resultados experimentais, cuja dedicação e ajuda foram essenciais para a conclusão desta etapa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista, meu sincero muito obrigado.

Grandes realizações não são feitas por impulso, mas por uma soma de pequenas conquistas (Vincent Van Gogh).

RESUMO

Esta dissertação apresenta um retificador trifásico intercalado de alto ganho, operando em modo de condução descontínua (*DCM*), e com dupla ponte retificadora de entrada, para aplicação em aerogeradores de pequeno porte. As duas pontes de diodos promovem o compartilhamento da corrente, resultando em uma redução significativa dos esforços de corrente do conversor quando comparado a topologias anteriores. Foi realizada uma análise teórica do conversor, seguida de um estudo de simulação e testes experimentais com uma placa protótipo. As simulações compararam o retificador trifásico proposto com outras três topologias trifásicas, demonstrando sua operação com esforços de corrente significativamente reduzidos e indutores de entrada menores. Os experimentos analisaram o desempenho do conversor operando com uma fonte de alimentação trifásica, e com uma turbina eólica associada a um método de rastreamento do ponto de máxima potência (*MPPT*), utilizando a técnica Perturba e Observa (P&O). Para uma potência de saída de 1 kW, em um barramento CC de 400 V e uma tensão de linha eficaz de entrada de 114 V, a eficiência do conversor obtida foi superior a 95%. Além disso, os resultados experimentais confirmaram que o retificador opera com correntes de entrada senoidais, baixa ondulação de corrente e alto fator de potência em todos os cenários testados.

Palavras-chave: retificador trifásico; modo de condução descontínua; retificador trifásico intercalado.

ABSTRACT

This master's thesis presents a high-gain three-phase interleaved rectifier operating in discontinuous conduction mode (DCM) with a dual-input diode bridge configuration for application in small wind generators. The two input diode bridges enable current sharing, significantly reducing the converter's current stresses compared to previous topologies. A theoretical analysis of the converter was conducted, followed by a simulation study and experimental tests using a prototype board. The simulations compared the proposed three-phase rectifier with three other three-phase topologies, demonstrating its operation with significantly reduced current stresses and smaller input inductors. The experiments evaluated the converter's performance when operating with a three-phase power supply and a wind turbine associated with a maximum power point tracking (MPPT) method using the Perturb and Observe (P&O) technique. For an output power of 1 kW, a 400 V DC bus, and an input RMS line voltage of 114 V, the converter's efficiency exceeded 95%. Additionally, the experimental results confirmed that the rectifier operates with sinusoidal input currents, low current ripple, and a high power factor in all tested scenarios.

Keywords: three-phase rectifier; discontinuous conduction mode; three-phase interleaved rectifier.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Retificador trifásico a diodos.	17
Figura 2 – Retificador boost trifásico operando em modo de condução descontínua.	18
Figura 3 – Retificador trifásico Nabae.	18
Figura 4 – Retificador trifásico de três níveis intercalado boost DCM.	18
Figura 5 – Diagrama de blocos do algoritmo MPPT Perturba e Observa considerando uma variável de controle "C".	20
Figura 6 – Retificador trifásico boost DCM intercalado de entrada dupla.	22
Figura 7 – Esquemático de controle do método MPPT implementado.	23
Figura 8 – Placa protótipo do retificador - vista superior.	25
Figura 9 – Placa protótipo do retificador - vista lateral.	25
Figura 10 – Bancada experimental utilizada nos testes	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da Quantidade de Componentes entre as Quatro Topologias de Retificadores Trifásicos	24
Tabela 2 – Parâmetros Para Os Testes Experimentais	25
Tabela 3 – Especificações Do Aerogerador Utilizado	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCM	Modo de Condução Contínua, do inglês <i>Continuous Conduction Mode</i>
D	Razão Cíclica, do inglês <i>Duty Cycle</i>
DCM	Modo de Condução Descontínua, do inglês <i>Discontinuous Conduction Mode</i>
DSC	Controlador de Sinal Digital, do inglês <i>Digital Signal Controller</i>
MPP	Ponto de Máxima Potência, do inglês <i>Maximum Power Point</i>
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência, do inglês <i>Maximum Power Point Tracking</i>
PMSG	Gerador Síncrono a Ímãs Permanentes, do inglês <i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
THD	Distorção Harmônica Total, do inglês <i>Total Harmonic Distortion</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação	13
1.2	Procedimentos Metodológicos	13
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	Justificativa	14
1.5	Estrutura do Documento	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Aplicação da eletrônica de potência na geração de energia com fontes renováveis	16
2.1.1	Eletrônica de potência aplicada a geração eólica de pequeno porte	16
2.2	Rastreamento do ponto de máxima potência na geração eólica	19
2.3	Conclusão	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	Artigos Publicados	21
3.2	Retificador trifásico intercalado de entrada dupla em modo de condução descontínua	21
3.3	Análise teórica do retificador	22
3.4	Método MPPT utilizado	22
3.5	Estudo de simulação: Comparação com outras topologias de retificadores trifásicos	23
3.6	Testes experimentais	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global, e as mudanças climáticas dele resultantes, têm se tornado uma questão prioritária ao redor do mundo. A queima de combustíveis fósseis é uma das principais responsáveis por esse fenômeno climático, devido à emissão de gases de efeito estufa para atmosfera. Como resultado, um esforço mundial tem se intensificado para reduzir a utilização desses combustíveis, buscando alternativas mais limpas e ecológicas. Aliado a esse cenário, há também uma crescente demanda global por energia, o que torna a busca por novas fontes energéticas ainda mais crucial para a manutenção da sociedade atual de maneira sustentável (BREYER *et al.*, 2022; BLAABJERG *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2021; ROY *et al.*, 2022).

Nesse cenário, fontes de energia renováveis, como energia eólica e solar, têm ganhado notoriedade globalmente, tendo sua capacidade de geração ampliada a cada ano, e sendo temas recorrentes em pesquisas relacionadas ao desenvolvimento sustentável, livres da emissão de gases nocivos à atmosfera (HAEGEL; KURTZ, 2023; BREYER *et al.*, 2022; ROY *et al.*, 2022).

Em 2023, a energia gerada por fontes eólicas e solares apresentou um rápido crescimento, com um aumento total da capacidade de geração instalada de 462 GW, representando um crescimento de 67% em relação ao ano anterior (INSTITUTE, 2024). A energia solar liderou esse aumento, com cerca de 346 GW de nova capacidade instalada, enquanto a energia eólica registrou um aumento de 115 GW (INSTITUTE, 2024). É importante destacar que, embora a capacidade recém-instalada de energia eólica seja inferior à da energia solar, a energia eólica alcançou um ano recorde em capacidade de geração instalada. Em ambos os casos, a China foi o país com a maior nova capacidade de geração instalada, responsável por um quarto do crescimento da energia solar e 66% do crescimento da energia eólica (INSTITUTE, 2024).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*), as fontes renováveis fornecerão 98% dos 2.518 TWh de geração previstos para serem adicionados entre 2022 e 2025 (GLOBAL, 2023). Além disso, até 2027, espera-se que as fontes renováveis de energia, lideradas pela energia solar e eólica, sejam o principal foco da demanda por energia elétrica mundialmente (GLOBAL, 2023).

Apesar de proporcionarem evidentes e importantes benefícios ambientais, tanto a energia solar quanto a energia eólica enfrentam problemas de confiabilidade e estabilidade devido à sua natureza variável em função das condições meteorológicas ao longo do dia. A intensidade dos ventos pode variar significativamente em curtos intervalos de tempo, com um comportamento difícil de prever, o que causa oscilações e instabilidade na geração eólica. Embora a energia solar seja mais previsível e apresente variações menores ao longo do dia, sua indisponibilidade no período noturno resulta em intervalos em que a carga não é alimentada (REHMAN *et al.*, 2020; GÜVEN *et al.*, 2023).

Dessa forma, a eletrônica de potência desempenha um papel essencial na viabilização de sistemas de geração baseados em energias renováveis (TANG; YANG; BLAABJERG, 2022; BLAABJERG *et al.*, 2023). Os conversores estáticos de energia, amplamente estudados nessa

área, são responsáveis por adequar a energia gerada a padrões de qualidade aceitáveis, seja para conexão ao sistema elétrico de potência ou para o abastecimento de uma carga específica (TANG; YANG; BLAABJERG, 2022; BLAABJERG *et al.*, 2023). Além disso, esses circuitos permitem a otimização da operação dos sistemas de geração, contribuindo para a mitigação dos problemas decorrentes da variabilidade e imprevisibilidade inerentes a essas fontes de energia (TANG; YANG; BLAABJERG, 2022; BLAABJERG *et al.*, 2023).

1.1 Motivação

Com o aumento da demanda global por energia e a crescente preocupação em mitigar os impactos ambientais associados à sua produção, as fontes renováveis de energia são consideradas fundamentais para a diversificação e expansão da matriz energética de um país.

Diante dos desafios para viabilizar e expandir o uso da geração de energia a partir de fontes renováveis, o desenvolvimento de novas topologias de conversores estáticos de energia torna-se indispensável. A proposta e elaboração de topologias aprimoradas, capazes de atender às demandas das mais diversas aplicações, não apenas impulsionam um desenvolvimento mais sustentável, mas também enriquecem a base de conhecimento sobre conversores estáticos de energia, contribuindo para a evolução tecnológica e o aumento da eficiência desses sistemas.

1.2 Procedimentos Metodológicos

O trabalho inicia-se com uma revisão bibliográfica sobre a produção de energia em nível global, destacando o impacto ambiental dos combustíveis fósseis e a crescente procura por fontes renováveis de energia. São abordadas a situação atual e as perspectivas futuras dessas fontes, com foco na geração eólica. Além disso, discute-se a aplicação da eletrônica de potência nesse cenário, abordando o uso de conversores estáticos de energia, e também fornecendo um contexto sobre técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência, do inglês *Maximum Power Point Tracking* (MPPT).

Com base nos estudos realizados, propõe-se uma nova topologia de conversor CA-CC para aerogeradores de pequeno porte. A metodologia adotada segue a abordagem do artigo publicado na revista *Eletrônica de Potência*, desenvolvido ao longo do mestrado e apresentado nesta dissertação. O trabalho abrange a análise teórica do conversor, sua modelagem matemática, estudos de simulação computacional e validação experimental.

A análise teórica, assim como a modelagem matemática, definem os princípios de operação do conversor, enquanto as simulações avaliam seu desempenho em comparação com outras topologias mencionadas na literatura. Em seguida, implementa-se um protótipo para testes em laboratório, utilizando uma fonte de alimentação trifásica e um aerogerador.

Os resultados obtidos são analisados e discutidos, destacando os avanços da topologia proposta em relação às soluções convencionais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um retificador trifásico intercalado de entrada dupla, com operação em Modo de Condução Descontínua, do inglês *Discontinuous Conduction Mode* (DCM), para aplicação em aerogeradores de pequeno porte.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Descrever o princípio de operação do conversor;
- Realizar a análise teórica (matemática) da topologia;
- Descrever o método MPPT que será utilizado no conversor;
- Realizar estudos de simulação, comparando a topologia proposta com outros conversores já estabelecidos na literatura;
- Realizar testes experimentais com a placa protótipo do retificador conectada a uma fonte de alimentação trifásica;
- Realizar testes experimentais com a placa protótipo do retificador conectada a um aerogerador;
- Validar as características de operação no retificador trifásico proposto.

1.4 Justificativa

Tendo em mente a crescente importância e visibilidade da geração de energia a partir de fontes renováveis, aliada aos desafios inerentes a esse tipo de geração, este trabalho busca contribuir para os avanços na geração eólica, por meio do desenvolvimento de uma nova topologia de conversor CA-CC para aplicação em aerogeradores de pequeno porte. A proposta visa oferecer melhorias em relação às soluções existentes na literatura, fortalecendo a pesquisa e ampliando o conhecimento sobre conversores estáticos de energia voltados para esse tipo de aplicação.

1.5 Estrutura do Documento

O trabalho está organizada em cinco capítulos, estruturados para apresentar a fundamentação teórica, a metodologia adotada, os resultados obtidos e as conclusões do estudo.

O primeiro capítulo introduz o tema, destacando a motivação da pesquisa, os desafios na geração de energia renovável e a relevância do estudo. Além disso, são definidos os objetivos do trabalho e sua justificativa.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, abordando o uso da eletrônica de potência na geração de energia renovável, com foco em sistemas eólicos de pequeno porte. Também discute o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), detalhando o método Perturba e Observa, amplamente utilizado atualmente.

No terceiro capítulo, é apresentada a metodologia adotada, fundamentada no artigo publicado na revista Eletrônica de Potência, desenvolvido ao longo do mestrado. A referência completa do artigo é fornecida, seguida pela descrição detalhada dos procedimentos utilizados para o estudo de simulação, bem como para a realização dos testes experimentais.

O quarto capítulo apresenta o artigo na íntegra, detalhando a modelagem do conversor proposto, as estratégias de controle e as técnicas de simulação e implementação experimental empregadas para validar a proposta, além dos resultados obtidos no estudo. Por fim, o quinto capítulo conclui a pesquisa, sintetizando os principais achados e discutindo suas contribuições para a área, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta os resultados da revisão de literatura sobre o tema estudado, fornecendo o embasamento teórico necessário para os conceitos aplicados no desenvolvimento do trabalho proposto.

2.1 Aplicação da eletrônica de potência na geração de energia com fontes renováveis

O caráter estocástico da geração a partir de fontes renováveis, como a eólica e a solar, introduz problemas como imprevisibilidade e instabilidade. Quando conectadas à rede elétrica, essas variabilidades podem afetar a estabilidade e o funcionamento do sistema elétrico de potência. Para viabilizar essa integração, é essencial garantir a qualidade da energia gerada. Nesse contexto, a eletrônica de potência desempenha um papel crucial, permitindo a conexão eficiente dessas fontes por meio de conversores estáticos de energia. Esses conversores controlam o fluxo de energia e mitigam os impactos das flutuações inerentes às fontes renováveis, assegurando a qualidade e a confiabilidade da energia fornecida à rede elétrica (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014; BLAABJERG *et al.*, 2023).

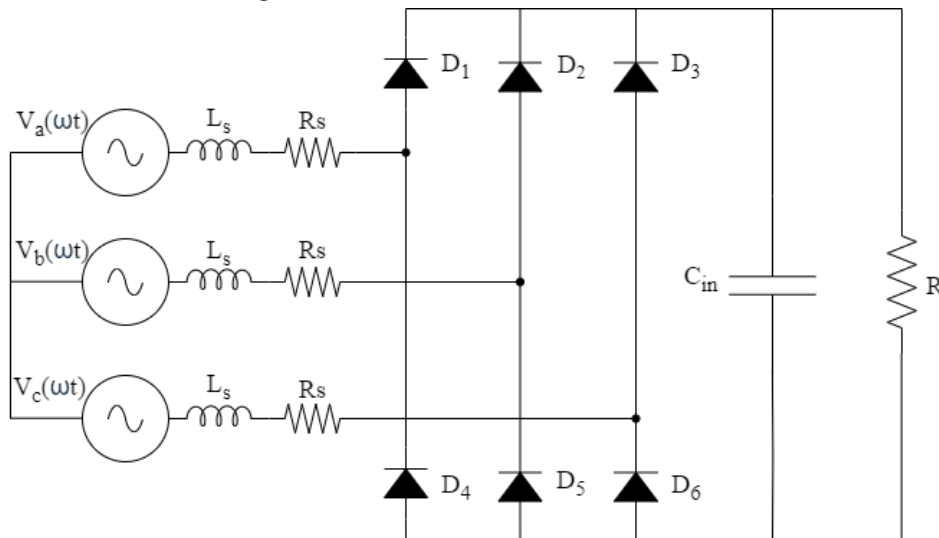
2.1.1 Eletrônica de potência aplicada a geração eólica de pequeno porte

Em sistemas de geração eólica, a energia cinética dos ventos é convertida em energia mecânica por meio de turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores. Essa energia mecânica é então transformada em energia elétrica por um gerador elétrico, geralmente um Gerador Síncrono a Ímãs Permanentes, do inglês *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). A seguir, um conversor estático de energia desempenha a função de regular a energia elétrica gerada, garantindo que ela atenda aos padrões de qualidade da rede elétrica ou às exigências de uma carga local. Além disso, quando o sistema de geração está conectado à rede elétrica, é comum a utilização de transformadores para elevar o nível da tensão da energia elétrica gerada (TANG; YANG; BLAABJERG, 2022; BLAABJERG; MA, 2017; BLAABJERG; MA, 2013).

Aerogeradores de pequeno porte, com potência máxima de saída de até 15 kW, são utilizados em locais onde a instalação de geradores maiores seria inviável, como é o caso de áreas urbanas (COSTA *et al.*, 2016). Nesses sistemas, desde a geração até a conexão com a rede elétrica, são necessárias duas etapas de conversão de energia: uma etapa retificadora, responsável por converter a Corrente Alternada (CA) em corrente Corrente Contínua (CC); e uma etapa inversora, que converte a corrente contínua de volta em corrente alternada (LAZZARIN *et al.*, 2015; SOLTOSKI; FONT, 2017).

Em sistemas eólicos de pequeno porte, a topologia mais básica encontrada na literatura para a etapa de retificação é o retificador trifásico a ponte de diodos, mostrado na Figura 1. Esse retificador apresenta uma estrutura simples, com baixo custo de implementação. No entanto, devido à elevada Distorção Harmônica Total, do inglês *Total Harmonic Distortion* (THD) na corrente de entrada, o circuito apresenta um baixo fator de potência. Além disso, essa estrutura não permite o rastreamento do ponto de máxima potência, o que inviabiliza sua aplicação em sistemas eólicos de geração (LAZZARIN *et al.*, 2015; DIAS; LAZZARIN, 2018; SOLTOSKI; FONT, 2017; ECKSTEIN; LAZZARIN; BARBI, 2014).

Figura 1 – Retificador trifásico a diodos.

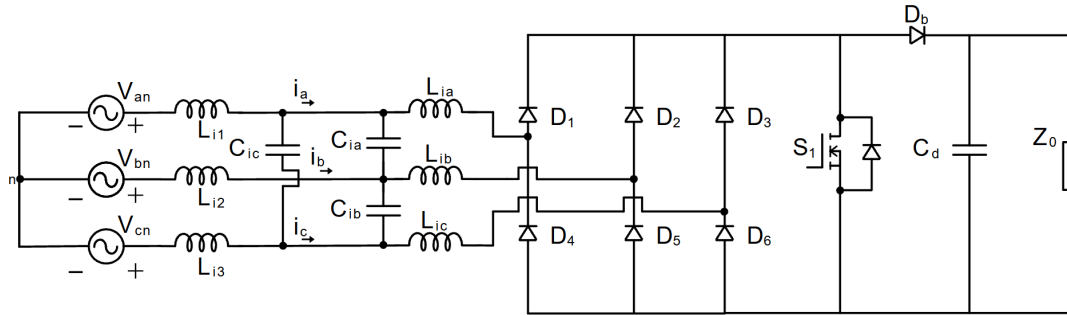


Fonte: Adaptado de (ECKSTEIN; LAZZARIN; BARBI, 2014).

O retificador boost trifásico operando em DCM (GRANZA; GULES; FONT, 2019a; PRASAD; ZIOGAS; MANIAS, 1991a), mostrado na figura 2, é uma opção mais interessante para aplicação em sistemas eólicos de pequeno porte. Essa topologia apresenta uma redução da THD da corrente de entrada, resultando em uma melhoria significativa no fator de potência do conversor em comparação com o retificador trifásico a ponte de diodos, mostrado na Figura 1. No entanto, a presença de distorções harmônicas de baixa frequência na corrente de entrada, elevados esforços de corrente e a necessidade de um filtro de alta frequência volumoso na entrada desse retificador, indicam que alternativas mais adequadas devem ser exploradas.

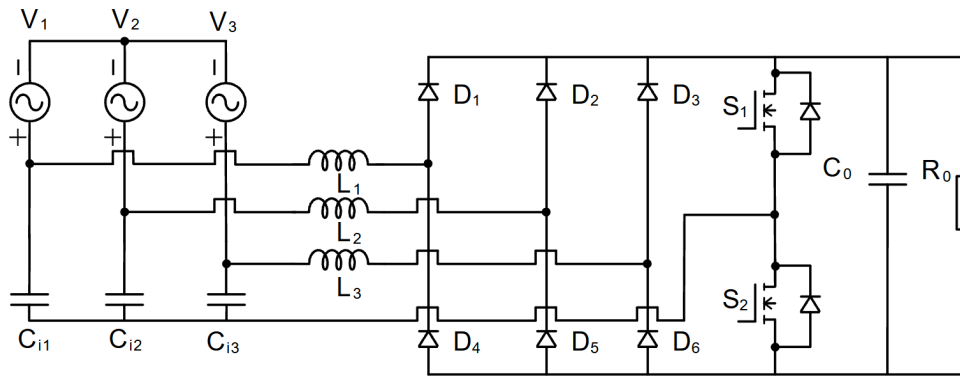
As limitações do retificador boost trifásico DCM podem ser mitigadas pela topologia proposta em (NABAE; NAKANO; ARAI, 1994), mostrada na figura 3. Essa configuração apresenta menores esforços de corrente devido à sua operação intercalada, redução da distorção harmônica de baixa frequência na entrada e elimina a necessidade de um filtro de alta frequência na entrada do conversor. Indo além, o retificador trifásico de três níveis intercalado boost DCM, descrito em (GRANZA; GULES; FONT, 2019a), e apresentado na figura 4, oferece uma redução dos esforços de tensão sobre os interruptores, graças à presença de um ponto médio na estrutura, e proporciona um maior ganho estático em comparação com os conversores discutidos anteriormente.

Figura 2 – Retificador boost trifásico operando em modo de condução descontínua.



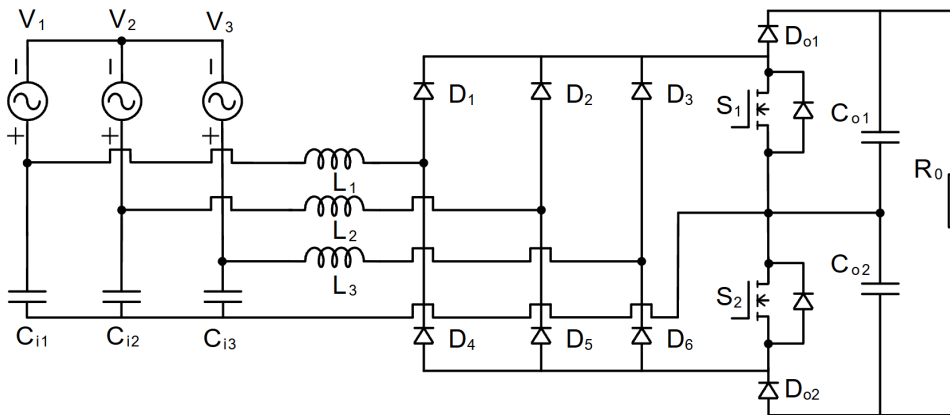
Fonte: Adaptado de (PRASAD; ZIOGAS; MANIAS, 1991a).

Figura 3 – Retificador trifásico Nabae.



Fonte: Adaptado de (NABAE; NAKANO; ARAI, 1994).

Figura 4 – Retificador trifásico de três níveis intercalado boost DCM.



Fonte: Adaptado de (GRANZA; GULES; FONT, 2019a).

No entanto, é possível reduzir os esforços de corrente do conversor apresentado na Figura 4 por meio de uma modificação na estrutura de entrada. O circuito proposto neste trabalho visa implementar e consolidar essas melhorias, desenvolvendo uma topologia de entrada dupla que proporciona uma redução significativa nos esforços de corrente.

2.2 Rastreamento do ponto de máxima potência na geração eólica

Como já mencionado, a geração eólica de energia, assim como a solar, é bastante dependente das condições atmosféricas e pode variar consideravelmente ao longo do dia. Dessa forma, a potência de saída desses sistemas flutua devido ao caráter estocástico do processo de geração. Para mitigar os impactos dessas variações e garantir uma operação eficiente, emprega-se o Rastreamento do Ponto de Máxima Potência, do inglês Maximum Power Point Tracking (MPPT), um algoritmo que identifica o ponto de operação no qual a máxima potência de saída é alcançada e ajusta o sistema para que ele permaneça operando nesse ponto (IBRAHIM *et al.*, 2023; SWAMINATHAN; LAKSHMINARASAMMA; CAO, 2022).

Diferentes abordagens podem ser adotadas para o desenvolvimento e a implementação do algoritmo de MPPT, abrangendo desde conceitos mais simples até configurações mais complexas, incluindo o uso de inteligência artificial. Para aplicações de menor custo, as técnicas mais simples tornam-se mais atrativas. Dentre os algoritmos mais difundidos na literatura, o método Perturba e Observa destaca-se pela simplicidade e pelo baixo custo de implementação (IBRAHIM *et al.*, 2023; SWAMINATHAN; LAKSHMINARASAMMA; CAO, 2022).

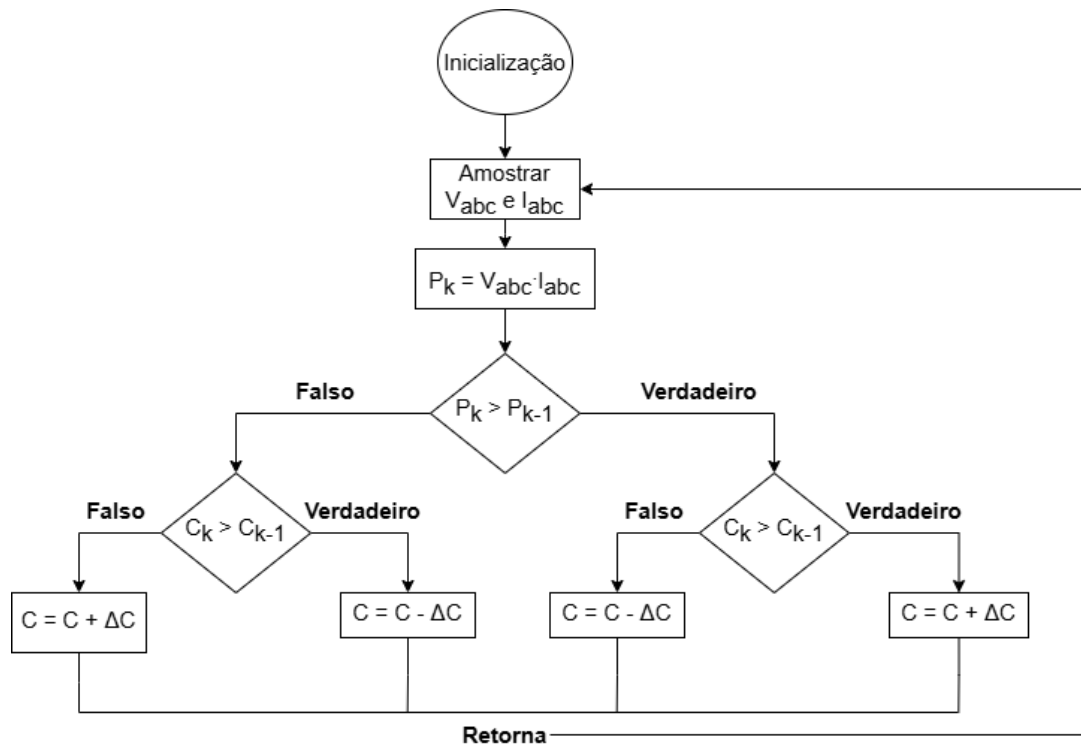
Essa técnica baseia-se na definição de uma variável de controle cujo valor é periodicamente ajustado para observar o impacto na potência de saída do sistema. A cada iteração, a potência medida é comparada com a anterior, e a variável de controle é incrementada ou decrementada conforme necessário. Como cada sistema eólico possui uma curva de potência específica, dependente tanto do aerogerador utilizado quanto da velocidade do vento em determinado instante, o algoritmo percorre essa curva buscando operar no ponto onde a potência de saída é maximizada (IBRAHIM *et al.*, 2023; SWAMINATHAN; LAKSHMINARASAMMA; CAO, 2022).

A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos de um exemplo de aplicação do algoritmo Perturba e Observa em um sistema de geração trifásico. Nesse esquema, a potência trifásica de saída do sistema em uma dada iteração k , representada por P_k , é calculada a partir da amostragem das correntes e tensões de entrada ($I_{a,b,c}$ e $V_{a,b,c}$). Em seguida, esse valor é comparado à potência trifásica da iteração anterior, P_{k-1} . Com base nessa comparação e na direção da última variação da variável de controle C (aumento ou redução) o algoritmo decide se deve aumentar ou diminuir C , ajustando a operação do sistema para se aproximar do ponto de máxima potência.

2.3 Conclusão

Este capítulo apresentou a revisão bibliográfica do tema estudado, fornecendo um panorama sobre a aplicação da eletrônica de potência na geração eólica e destacando a importância da utilização de métodos de MPPT em sistemas de geração com fontes renováveis, com ênfase na técnica Perturba e Observa. A análise das topologias de retificadores aplicadas à geração

Figura 5 – Diagrama de blocos do algoritmo MPPT Perturba e Observa considerando uma variável de controle "C".



Fonte: Autoria própria.

eólica foi construída de forma progressiva, partindo da estrutura mais básica — o retificador trifásico em ponte de diodos — até alcançar topologias mais avançadas e adequadas para essa aplicação, culminando na proposta apresentada neste trabalho. Em relação ao método MPPT, foi apresentado um diagrama de blocos genérico da estratégia Perturba e Observa, com o objetivo de elucidar como sua implementação foi realizada no desenvolvimento deste estudo.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento da metodologia deste trabalho baseia-se em um dos artigos produzidos durante o mestrado, intitulado "*Dual Input Interleaved Three-Phase Rectifier in Discontinuous Conduction Mode for Application in Small Wind Turbines*", publicado na revista Eletrônica de Potência. A referência completa para o artigo é apresentada na Seção 3.1.

Inicialmente, é realizada a análise teórica do retificador, incluindo a descrição do seu princípio de operação e a modelagem matemática da topologia. Além disso, são detalhadas as características do método MPPT adotado. Em seguida, propõe-se um estudo de simulação para comparar o desempenho do retificador trifásico desenvolvido com três outras topologias de retificadores trifásicos adequadas para aerogeradores de pequeno porte.

Por fim, a validação experimental é conduzida por meio de testes em uma placa protótipo do retificador. O conversor é avaliado tanto em conjunto com uma fonte de alimentação trifásica, para verificar suas características operacionais, quanto acoplado a um aerogerador, permitindo a análise do desempenho do conversor, e do método MPPT, em condições mais próximas das reais.

3.1 Artigos Publicados

TODYS, Guilherme M.; CUSTÓDIO, Luís P.; BADIN, Alceu A.; ASSEF, Amauri A.; GULES, Roger; BANDEIRA JR., Delvanei G.; ROMANELI, Eduardo F. R.; CORTEZ, Daniel F. Dual Input Interleaved Three-Phase Rectifier In Discontinuous Conduction Mode For Application In Small Wind Turbines. Eletrônica de Potência, [S. l.], v. 30, p. e202509, 2025. DOI: 10.18618/REP.e202509. Disponível em: <https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/994>. Acesso em: 7 apr. 2025;

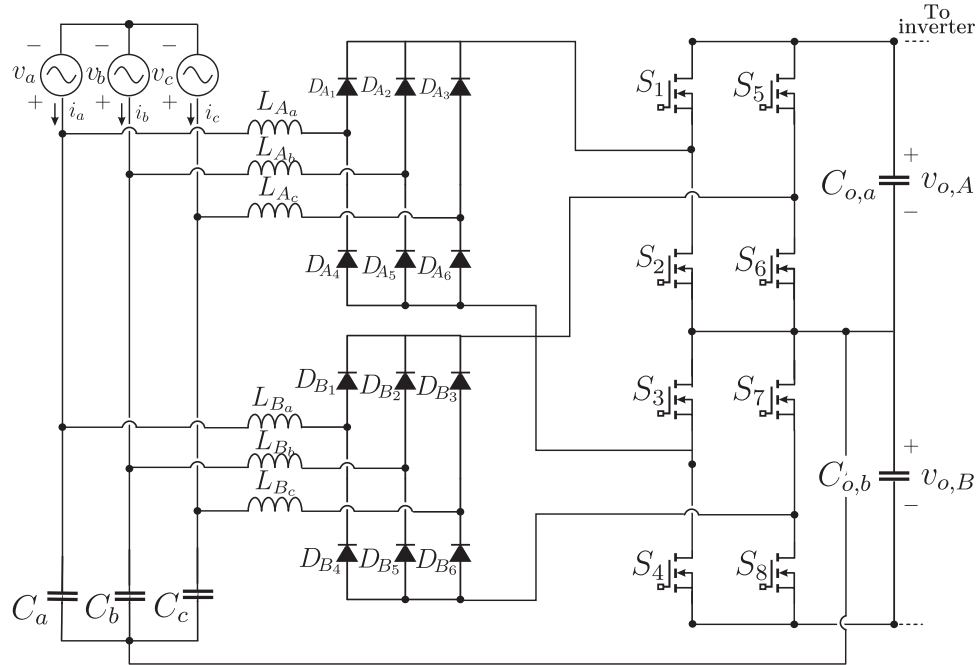
TODYS, Guilherme M.; CUSTÓDIO, Luís P.; BADIN, Alceu A.; ASSEF, Amauri A.; GULES, Roger; BANDEIRA JR., Delvanei G.; ROMANELI, Eduardo F. R.; CORTEZ, Daniel F. Dual Input Interleaved Three-Phase Rectifier In Discontinuous Conduction Mode For Application In Small Wind Turbines. Eletrônica de Potência, [S. l.], v. 30, p. e202509, 2025. DOI: 10.18618/REP.e202509. Disponível em: <https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/994>. Acesso em: 14 feb. 2025.

3.2 Retificador trifásico intercalado de entrada dupla em modo de condução descontínua

O retificador trifásico intercalado de entrada dupla, proposto e desenvolvido neste trabalho, é apresentado na Figura 6. Essa topologia reduz significativamente os esforços de corrente

em comparação com estruturas similares, devido à dupla ponte retificadora na entrada do conversor.

Figura 6 – Retificador trifásico boost DCM intercalado de entrada dupla.



Fonte: Autoria própria.

3.3 Análise teórica do retificador

A análise teórica detalhada, incluindo o princípio de operação e a modelagem matemática do retificador, é apresentada no artigo publicado na revista Eletrônica de Potência, mencionado na Seção 3.1, em seu Capítulo II, nas Seções A e B.

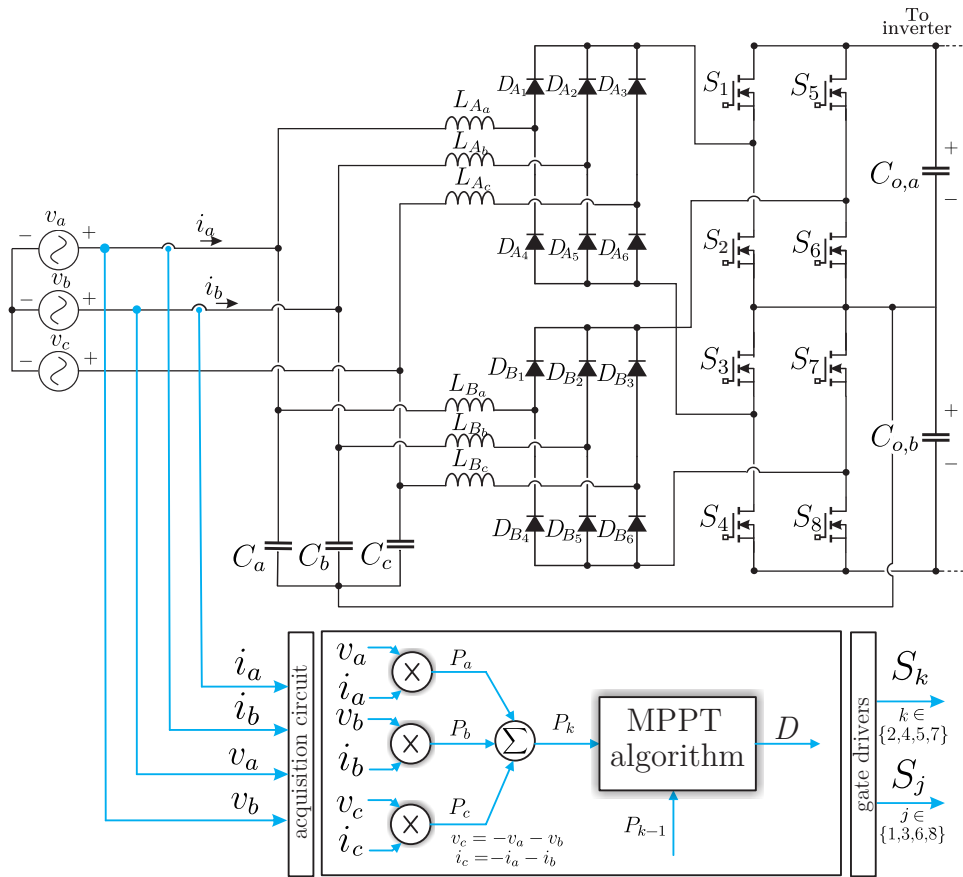
3.4 Método MPPT utilizado

Para o rastreamento do ponto de máxima potência do conversor proposto, o método Perturba e Observa foi escolhido, por ser um algoritmo simples, e de fácil implementação.

No contexto desse trabalho, e baseado na análise matemática do conversor, a Razão Cíclica, do inglês *Duty Cycle* (D), foi escolhida como a variável de controle, devido a sua relação direta com o valor de potência desenvolvida pelo retificador. A descrição detalhada da lógica do algoritmo implementada pode ser encontrada no artigo publicado na revista Eletrônica de Potência, mencionado na Seção 3.1, em seu Capítulo II, na Seção C.

A Figura 7 apresentada o esquemático de controle do método MPPT implementado.

Figura 7 – Esquemático de controle do método MPPT implementado.



Fonte: Autoria própria.

3.5 Estudo de simulação: Comparação com outras topologias de retificadores trifásicos

Para uma análise mais detalhada das características e vantagens do retificador proposto, foi realizado um estudo de simulação comparativa com três outras topologias de retificadores trifásicos adequadas para aerogeradores de pequeno porte. As topologias selecionadas foram: o retificador boost trifásico de dois níveis em Modo de Condução Contínua, do inglês *Continuous Conduction Mode* (CCM) (CHEN; GUERRERO; BLAABJERG, 2009), o retificador boost trifásico em modo de condução descontínua (DCM) (PRASAD; ZIOGAS; MANIAS, 1991b; VILATHGAMUWA; JAYASINGHE, 2012) e o retificador boost trifásico intercalado de três níveis em modo de condução descontínua (DCM) (GRANZA; GULES; FONT, 2019b).

Todas as simulações foram conduzidas no software PSIM, versão 2022.3, considerando as mesmas especificações de projeto para os quatro retificadores. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as topologias com base na quantidade de componentes utilizados. Como o retificador proposto pode operar normalmente mesmo quando os interruptores S_1 , S_4 , S_5 e S_8 são substituídos por diodos, foram analisadas duas configurações distintas: a Configuração 1 (Config 1), que considera a presença desses interruptores, e a Configuração 2 (Config 2), na qual eles são substituídos por diodos.

Tabela 1 – Comparação da Quantidade de Componentes entre as Quatro Topologias de Retificadores Trifásicos

Topologia	Indutores	Capacitores	Interruptores	Diodos
Retificador boost trifásico de dois níveis CCM (CHEN; GUERRERO; BLAABJERG, 2009)	3	1	6	0
Retificador boost trifásico DCM (PRASAD; ZIOGAS; MANIAS, 1991b; VILATHGAMUWA; JAYASINGHE, 2012)	3 + 3(filtro)	1 + 3(filtro)	1	7
Retificador boost trifásico intercalado de três níveis DCM (GRANZA; GULES; FONT, 2019b)	3	5	2	8
Retificador trifásico boost DCM intercalado de entrada dupla	6	5	Config 1: 8 Config 2: 4	Config 1: 12 Config 2: 16

A concepção da topologia com 8 interruptores tem como objetivo proporcionar maior flexibilidade à placa protótipo do retificador, facilitando a realização de diferentes testes experimentais. Embora essa configuração possa acarretar uma leve variação no rendimento do conversor, sua operação permanece essencialmente inalterada. Como alternativa mais viável em termos de custo, recomenda-se a utilização da configuração com 4 interruptores (Configuração 2), que apresenta menor complexidade e custo de implementação.

Ao término do estudo de simulação, foi realizado o projeto dos indutores de entrada de cada conversor, visando comparar as dimensões desses componentes em cada topologia.

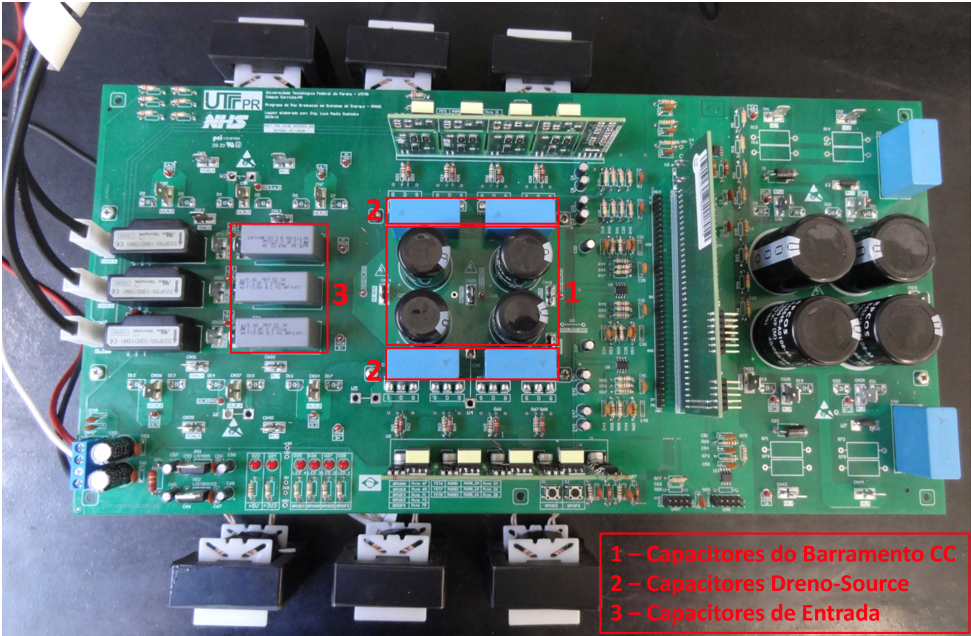
3.6 Testes experimentais

Os testes experimentais foram conduzidos para duas configurações de entrada distintas do retificador. Na primeira, utilizou-se uma fonte de alimentação trifásica para validar as características de operação do conversor. Na segunda, o retificador foi testado com um aerogerador de pequeno porte, permitindo avaliar seu desempenho, bem como o do método MPPT utilizado, em condições mais próximas de uma aplicação real.

Com relação aos testes para validação das características operacionais do retificador, a fonte de alimentação trifásica ITECH IT7625 (300 V CA, 12 A eficazes, potência máxima de 4,5 kVA) foi utilizada. Para emular um barramento CC controlado por um inversor, ao qual o retificador seria conectado, empregou-se a fonte de alimentação CC programável FCC 350-100i, configurada para fornecer uma tensão fixa de 400 V. A medição da potência de saída do retificador, e de seu rendimento, foi realizada por meio do analisador de potência Fluke Norma 4000. A Figura 8 apresenta a vista superior da placa protótipo do conversor utilizada nos

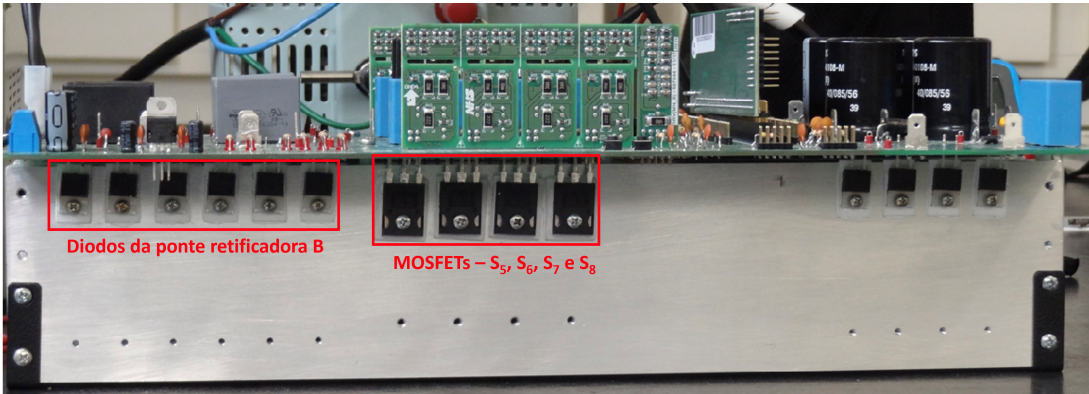
testes, enquanto a Figura 9 apresenta sua vista lateral. A Tabela 2 detalha as especificações do retificador adotadas nos experimentos, e a bancada experimental montada para os testes é exibida na Figura 10.

Figura 8 – Placa protótipo do retificador - vista superior.



Fonte: Autoria própria.

Figura 9 – Placa protótipo do retificador - vista lateral.

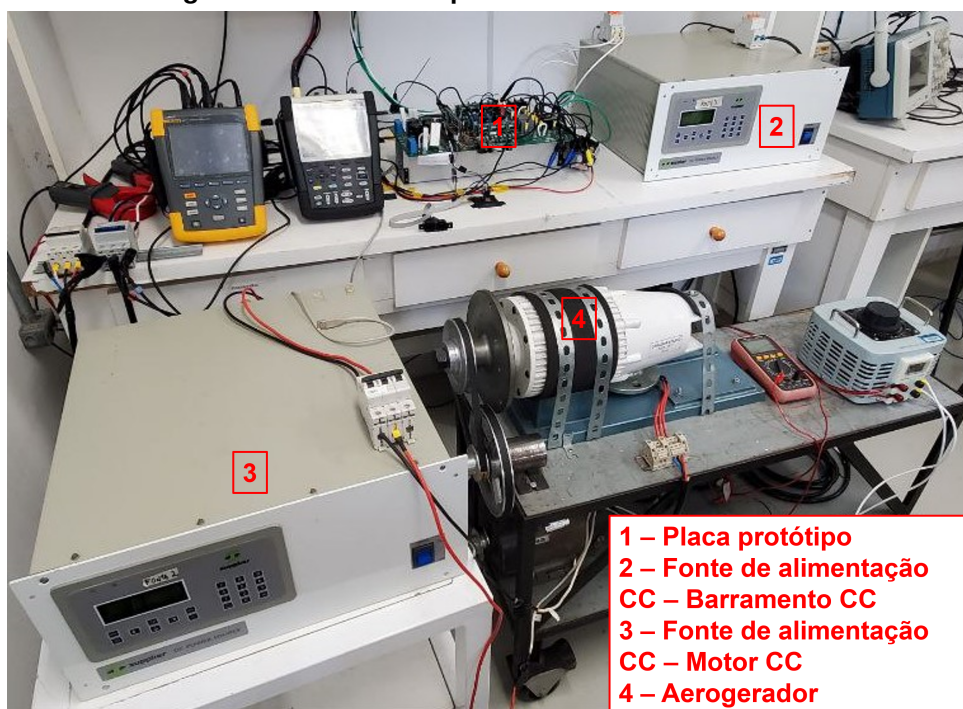


Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Parâmetros Para Os Testes Experimentais

Parâmetro	Valor
Potência de saída máxima	1 kW
Tensão do barramento CC	400 V
Tensão de linha de entrada eficaz	114 V
Frequência de comutação	51,4 kHz
Indutância de entrada	80,7 μ H
Capacitância de entrada	2 μ F
Capacitância de saída	2x470 μ F

Figura 10 – Bancada experimental utilizada nos testes



Fonte: Autoria própria.

As especificações do aerogerador utilizado na segunda configuração dos testes experimentais estão apresentadas na Tabela 3. Para realização desses experimentos, o aerogerador foi acionado por um motor CC alimentado por uma fonte CC, modelo FCCT 400-10-I, de modo que o Ponto de Máxima Potência, do inglês *Maximum Power Point* (MPP) foi determinado pela potência máxima fornecida pela fonte. Para a implementação do método MPPT adotado, utilizou-se o Controlador de Sinal Digital, do inglês *Digital Signal Controller* (DSC), 56F84789, da NXP Semiconductors. Durante os testes de validação do MPPT, um analisador de energia, modelo Fluke 434, foi empregado para registrar dados da potência de entrada do sistema, além da tensão de linha eficaz e das correntes de fase eficazes.

Tabela 3 – Especificações Do Aerogerador Utilizado

Parâmetro	Valor
Potência de saída máxima	2 kW
Raio da turbina	1,6 m
Máxima velocidade do vento	10 m/s
Tensão de linha RMS máxima	96 V

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, é apresentado, na íntegra, o artigo publicado na revista Eletrônica de Potência, desenvolvido ao longo do mestrado, e mencionado na Seção 3.1. O artigo abrange todo o estudo realizado, desde a fundamentação teórica até as descobertas experimentais e as conclusões do trabalho.



Received June 11, 2024; accepted December 23, 2024; Date of publication January 21, 2025.
 The review of this paper was arranged by Associate Editor Mokhtar A. Ahmed and Editor-in-Chief Heverton A. Pereira.
 Digital Object Identifier <http://doi.org/10.18618/REP.e202509>

Dual Input Interleaved Three-Phase Rectifier In Discontinuous Conduction Mode For Application In Small Wind Turbines

Guilherme M. Todys^{1,*}, Luís P. Custódio¹, Alceu A. Badin², Amauri A. Assef²,
 Roger Gules², Delvanei G. Bandeira Jr.¹, Eduardo F. R. Romaneli¹,
 Daniel F. Cortez¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), PPGSE – Curitiba, PR, Brasil.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), CPGEI – Curitiba, PR, Brasil.

e-mail: guilhermemtodys@gmail.com*; luiscustodio@alunos.utfpr.edu.br; badin@utfpr.edu.br; amauriassef@utfpr.edu.br;
 rgules@gmail.com; delvaneijunior@utfpr.edu.br; felix@utfpr.edu.br; danielcortez@utfpr.edu.br

*Corresponding author

ABSTRACT This paper presents a high-gain three-phase interleaved rectifier operating in DCM, with dual input, for application in small wind generators. The two input diode bridges promote the sharing of the current, resulting in a significant reduction of the converter's current stresses when compared to previous topologies. A theoretical analysis of the proposed converter was performed, followed by a simulation study, and experimental tests with a physical prototype. The simulations compared the proposed three-phase rectifier with three other three-phase topologies, demonstrating its operation with significantly reduced current stresses and smaller input inductors. The experiments compared the operation of the converter when working with a three-phase power supply, and a wind turbine in association with an MPPT method using the Perturb and Observe (P&O) technique. For an output power of 1 kW, on a 400 V DC bus and an input RMS line voltage of 114 V, the structure's obtained efficiency was higher than 95%. Furthermore, the experimental results confirmed that the rectifier operates with sinusoidal input currents, low current ripple, and high power factor for all the tested scenarios.

KEYWORDS Three-phase rectifier, Discontinuous Conduction Mode, Three-phase interleaved rectifier

I. INTRODUCTION

Due to the growing demand for energy worldwide, combined with the need to reduce environmental impacts related to its production, renewable energy sources are considered essential for diversifying and expanding a country's energy matrix [1]–[5]. In this scenario, wind energy has been widely studied, gaining particular notoriety in recent years, presenting a generation capacity with a tendency of growth at a global level [1]–[3], [6], [7].

In wind systems, the conversion of wind energy into electrical energy is done by using a wind turbine and an electrical generator [8]. Small wind generators, with a power range between 1 kW and 15 kW, are used in situations where the implementation of larger generators is unfeasible, as is the case in urban areas [9]–[11]. In small systems, the wind turbine is used with a permanent magnet synchronous generator (PMSG), operating with a variable output frequency and low voltage, due to the wind speed variation. Therefore, for the system to be connected to the grid, it is necessary to use static converters to adapt the generated energy to the desired standards, with two types of converters being used to carry out this task: a rectifier followed by an inverter [9], [10].

Regarding the rectifier stage, the most basic topology mentioned in the literature is the diode bridge rectifier [11], [12]. Although this topology is simple, with few components and low implementation cost, it has a low input power factor, due to the current with high total harmonic distortion (THD) drained from the PMSG. Moreover, it is unfeasible to track the maximum power point (MPP) in this type of rectifier, making this topology unsuitable for wind generation [11], [12]. A more appropriate option for application in small wind conversion systems is the three-phase boost rectifier operating in discontinuous conduction mode (DCM) [13], [14]. This topology presents a significant improvement regarding the power factor, as well as the THD of the input current, compared to the diode bridge rectifier in its most basic configuration. However, its operation presents high current stress and low-frequency distortion in the input current, in addition to requiring the use of a high-frequency filter at the converter input. An improvement of such topology can be found in the three-phase boost DCM multiphase rectifier [15], where current stress is reduced as a consequence of multiphase operation and the need for the input filter is eliminated. Nevertheless, the low-frequency interference in the input current remains present. Furthermore, the rectifier

introduced in [16], presents even lower current stress in the switches, in addition to reducing the low-frequency interference in the input current. Based on such topology, the three-phase three-level DCM interleaved boost rectifier, proposed in [17], was developed, presenting improvements, such as reducing the voltage stress on the switches to half of the output voltage, in addition to a greater static gain, while maintaining the positive aspects of [16].

The topology presented in this article is based on the three-level DCM interleaved boost rectifier [17], and aims to further improve the matter concerning the structure's current stresses, promoting a considerable reduction through an operation with a double input rectifier bridge. The proposed topology is presented in Section II of this paper, which includes a description of its principle of operation, a theoretical analysis of the converter, and a description of the maximum power point tracking (MPPT) method used in the experiments. In Section III, a simulation study was conducted, presenting a comparative evaluation of the proposed rectifier against three other three-phase rectifier topologies. Section IV presents the experimental results, and the conclusions are provided in Section V. Lastly, Section VI is dedicated to acknowledgments.

II. PROPOSED THREE-PHASE RECTIFIER

The topology of the proposed three-phase rectifier is presented in Fig. 1. In this double-input circuit, despite having six inductive elements at the input, the current stresses are divided between the switching legs through the two three-phase bridges, thus reducing the current stress on both the inductors and the switches. It is worth mentioning that switches S_1 , S_4 , S_5 , and S_8 could be replaced with diodes without affecting the converter's operation. However, in order to prioritize the reduction of the structure's conduction losses, the switches were maintained.

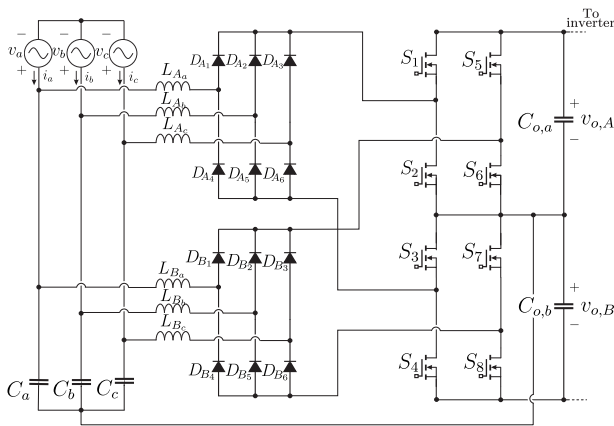


FIGURE 1. Dual Input Interleaved DCM Three-Phase Rectifier.

A. Principle of Operation

To detail the topological stages of the converter operating in discontinuous conduction mode, an interval of 60° (from

120° to 180°) of the electrical operation cycle (0° to 360°) was considered. For switching commands, the duty cycle (D) is considered fixed, with $D = 0.5$, and switches S_2 - S_4 / S_5 - S_7 operate with a phase difference of 180° in relation to switches S_1 - S_3 / S_6 - S_8 .

In the first operation stage, as depicted in Fig. 2(a), switches S_2 - S_4 / S_5 - S_7 are commanded to conduct, and diodes D_{A1} , D_{A2} , D_{A6} , D_{B1} , D_{B2} and D_{B6} are conducting. In this condition, energy is stored in inductors L_{Aa} , L_{Ab} and L_{Bc} through switches S_2 and S_7 , while energy is transferred from inductors L_{Ac} , L_{Ba} and L_{Bb} through switches S_4 and S_5 .

In operation steps 2, 3, and 4, respectively shown in Fig. 2(b), Fig. 2(c), and Fig. 2(d), the energy transfer process of inductors L_{Bb} , L_{Ba} and L_{Ac} is completed. Also, diodes D_{B2} , D_{B1} and D_{A6} are reversed biased, respectively.

In operation step 5, as illustrated in Fig. 2(e), switches S_1 - S_3 / S_6 - S_8 are commanded to conduct, and diodes D_{A1} , D_{A2} , D_{A6} , D_{B1} , D_{B2} and D_{B6} are conducting. In this condition, energy is stored in inductors L_{Ac} , L_{Ba} and L_{Bb} through switches S_3 and S_6 , while energy is transferred from inductors L_{Aa} , L_{Ab} and L_{Bc} through switches S_1 and S_8 .

In operation steps 6, 7, and 8, respectively shown in Fig. 2(f), Fig. 2(g) and Fig. 2(h), the energy transfer process of inductors L_{Ab} , L_{Aa} and L_{Bc} is completed. Also, diodes D_{A2} , D_{A1} and D_{B6} are reverse biased, respectively.

The waveforms corresponding to the described operation steps are shown in Fig. 3. The current signals of switches S_5 , S_6 , S_7 and S_8 are equivalent to the ones of switches S_1 , S_2 , S_3 and S_4 with a phase shift of 180° .

B. Theoretical analysis

The mathematical analysis of the presented rectifier is based on [18], [19] and [20].

The value of the input inductance is obtained through (1):

$$L_{in} = \frac{3\sqrt{3}DV_p^2}{4P_{in}f_s}. \quad (1)$$

Where,

- V_p is the peak value of the input phase voltage [V];
- D is the converter's duty cycle;
- P_{in} is the input power [W];
- f_s is the switching frequency [Hz].

The peak value of the current flowing through the input inductors ($I_{pL_{in}}$) is determined by (2):

$$I_{pL_{in}} = \frac{2\sqrt{3}V_pD}{3L_{in}f_s}. \quad (2)$$

The ratio between the peak value of the input voltage (V_p) and the output voltage (V_o) is given by α , obtained through (3):

$$\alpha = \frac{V_p}{V_o}. \quad (3)$$

The expression to calculate the RMS value of the input current (I_{inef}) is shown in (4):

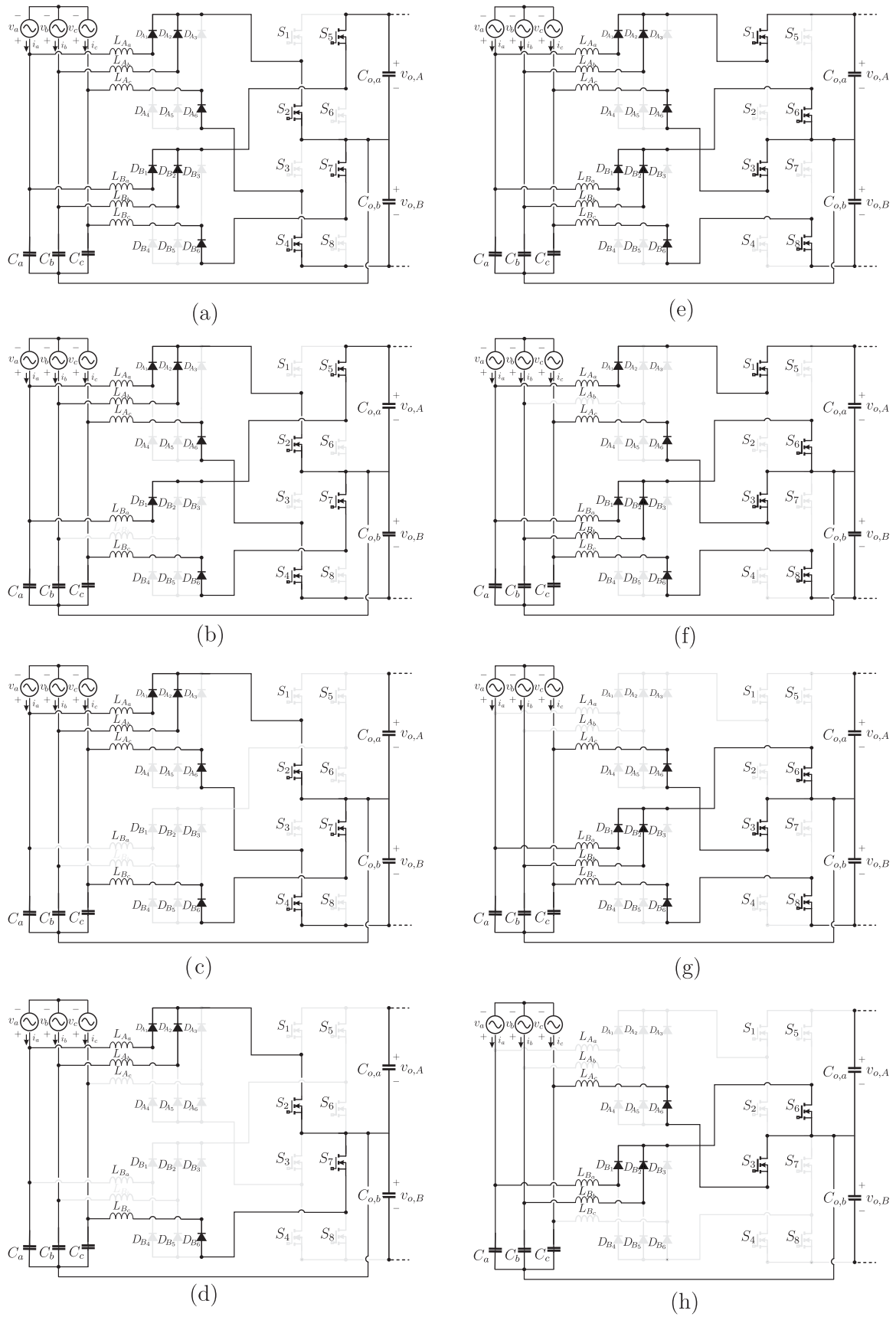


FIGURE 2. Rectifier operation stages.

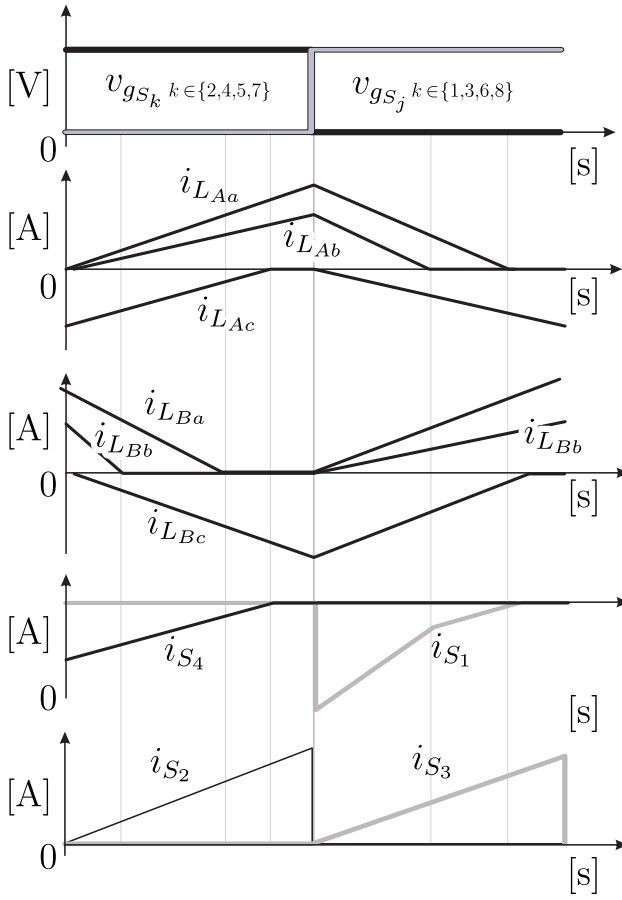


FIGURE 3. Theoretical rectifier's waveforms.

$$I_{inef} = \frac{V_o D^2 \sqrt{\alpha}}{f_s L_{in} \sqrt{\pi}}. \quad (4)$$

The power factor (PF) and THD can be obtained using (5) and (6), respectively:

$$PF = \frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\alpha} + \sqrt{\pi}} \left[-2 - \frac{\pi}{\alpha} + \frac{2}{\alpha \sqrt{1-\alpha^2}} \beta \right]}{\sqrt{\frac{2}{1-\alpha^2} + \frac{\pi}{\alpha} + \frac{2\alpha^2-1}{\alpha(1-\alpha)^2} + \frac{2}{\sqrt{1-\alpha^2}} \beta}}, \quad (5)$$

$$THD = \sqrt{\frac{1}{PF^2} - 1}. \quad (6)$$

Where, β is obtained through (7):

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \right). \quad (7)$$

Regarding the current stress in the switches, (8) and (9) present the expressions for calculating the average and RMS current values in the switches S_1 , S_4 , S_5 and S_8 :

$$I_{S_k,med} = \frac{3V_p D^2}{L_{in} f_s \pi}, \quad (8)$$

$$I_{S_k,rms} = \frac{\sqrt{3}V_p}{L_{in} f_s} \sqrt{\frac{D^3}{\pi}}, \quad (9)$$

where $k \in \{1, 4, 5, 8\}$.

Considering switches S_2 , S_3 , S_6 and S_7 , the average and RMS values of the current flowing through these components can be obtained by utilizing (10) and (11):

$$I_{S_n,med} = \frac{2V_p D^2}{L_{in} f_s \pi}, \quad (10)$$

$$I_{S_n,rms} = \frac{\sqrt{2}V_p \sqrt{D^3}}{2L_{in} f_s}, \quad (11)$$

where $n \in \{2, 3, 6, 7\}$.

The voltage to which the diodes and switches are subjected has the same peak value, expressed by (12):

$$V_{D_p} = V_{S_p} = -\frac{V_o}{2}. \quad (12)$$

The input capacitance value for the three phases ($C_k, k \in a, b, c$) is calculated considering the load variation (ΔQ) and the input capacitor voltage ripple ($\Delta V_{C_{in}}$). Equation (13) presents the resulting expression:

$$C_{in} = \frac{\Delta Q}{\Delta V_{C_{in}}} = \frac{I_{pL_{in}}}{8f_s \Delta V_{C_{in}}}. \quad (13)$$

The output capacitance (C_o) has its value estimated by the output power, P_o , and by the variation in the output voltage, ΔV_{C_o} , as shown in (14):

$$C_o = \frac{P_o}{2\pi f_s V_o \Delta V_{C_o}}. \quad (14)$$

C. MPPT method

When powered by the wind turbine, the MPPT strategy applied to the rectifier utilizes the Perturb and Observe (P&O) method, with the duty cycle (D) as the chosen control variable [21], [22].

The method implementation relies on the calculation of the input power based on measurements of the three-phase voltages and currents. It compares the calculated power of a given iteration k with the value calculated in the previous iteration ($k-1$) to determine whether the power increased or decreased. Likewise, it evaluates the variation of the control variable, D , between the previous and current iterations. Finally, based on the results of the preceding steps, the duty cycle is updated accordingly. The schematic of control of the described MPPT method is detailed in Fig. 4, and Fig. 5 illustrates the algorithm's logic.

III. SIMULATION ANALYSIS: COMPARATIVE EVALUATION WITH OTHER THREE-PHASE RECTIFIER TOPOLOGIES

In order to promote a more in-depth analysis of the differences and advantages of the three-phase rectifier proposed in this paper, a simulation study was performed utilizing the software PSIM, version 2022.3. The aim of this study is to compare the proposed three-phase rectifier with three other three-phase topologies suitable for small

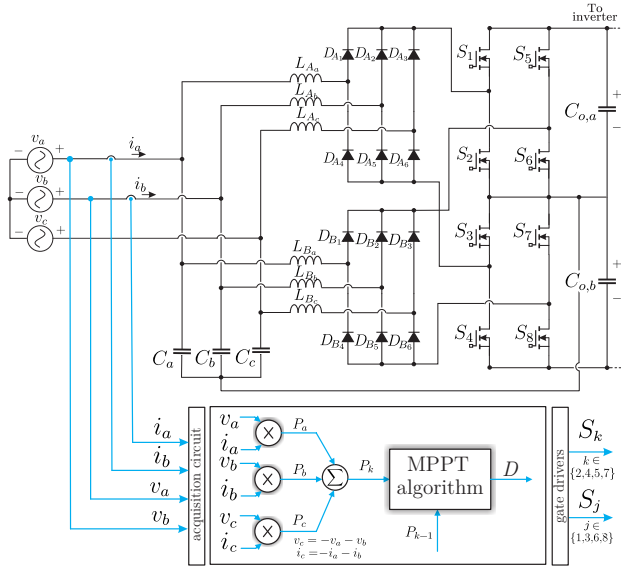


FIGURE 4. MPPT control schematic.

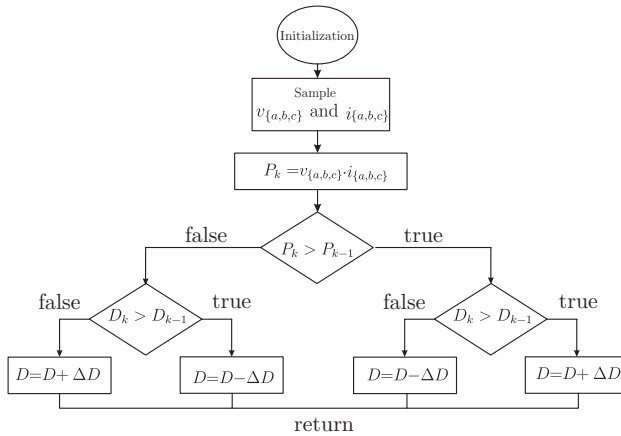


FIGURE 5. MPPT algorithm block diagram.

wind turbine generation. The selected rectifiers include the two-level three-phase boost CCM rectifier [23], the three-phase boost DCM rectifier [13], [14], and the three-level three-phase interleaved boost DCM rectifier [17]. The same project specifications were considered for all rectifiers. Table I presents a comparison between the rectifiers in terms of the number of components, while Table II provides information on the operating parameters of each rectifier.

Since the rectifier presented in this paper can still operate properly when switches S_1 , S_4 , S_5 , and S_8 are replaced with diodes, two possible configurations will be considered for the component quantity comparison, presented in Table I: configuration 01 (Config 01) includes switches S_1 , S_4 , S_5 , and S_8 , while configuration 02 (Config 02) replaces these switches with diodes. As a result, the two configurations will differ in the number of diodes and switches used. As shown in the results of Table II, the current stresses throughout the entire structure of the proposed three-phase

rectifier, including the inductors, switches, and output capacitors, were significantly reduced compared to the other two topologies operating in DCM. Furthermore, these values are close to those obtained for the CCM topology but with input inductances approximately 15 times smaller. Therefore, although the proposed converter presents six input inductors, as shown in Table I, the reduced current stress and lower inductance values decrease both the cost and volume of these components compared to the DCM and CCM structures, which utilize only three input inductors.

Furthermore, the waveform of input current of phase A (i_a), for each rectifier topology considered in the simulation analysis, is shown in Fig. 6(a), Fig. 6(b), Fig. 6(c) and Fig. 6(d), respectively. For the three-level three-phase interleaved boost DCM rectifier [17] and the dual input interleaved DCM three-phase rectifier, an input series inductance of $300 \mu\text{H}$ was considered in order to emulate the presence of a wind turbine at the system's input. The input PF and the THD of the input current i_a are presented in Table III. From the analysis of Fig. 6 and Table III, it can be concluded that all tested topologies achieved a high power factor and low THD. Additionally, in a real-world application, where the rectifier is connected to a wind turbine, the turbine's inductance would further reduce the THD across all rectifiers.

To evaluate the switching losses in the rectifiers, Fig. 7 presents the voltage and current waveforms, v_s and i_s , for one switch in each rectifier topology. In order to improve the visualization of the current's waveforms, the current was multiplied by a factor of 20, so current and voltage signals could be more easily analyzed and compared. As illustrated in Fig. 7(a) the CCM topology exhibits dissipative switching, with the switch voltage stress equal to the DC bus voltage (400 V). In contrast, since the other three topologies operate in DCM, Fig. 7(b), Fig. 7(c) and Fig. 7(d) show Zero Current Switching (ZCS), with zero current through the switch at turn-on. Additionally, in both the three-level three-phase interleaved Boost DCM Rectifier [17] and the dual input interleaved DCM three-phase rectifier—both three-level topologies—the voltage stress on switches is reduced to half that of the CCM topology and the other DCM topology, equaling half the DC bus voltage (200 V). Consequently, switching losses are significantly higher in the CCM topology due to the combination of dissipative switching, elevated voltage stress on switches, and diode reverse recovery, which further increases switching losses.

Considering the use of conventional silicon (Si) switches, the IGBT is the suitable power switch for the two-level CCM rectifier due to the highest voltage stress (400 V) and the presence of ultra-fast intrinsic switch diode. The CCM operation results in a high reverse recovery current, increasing the switch turn-on losses. Thus, the use of MOSFET is not recommended for this topology due to the slow intrinsic diode that significantly increases the switch turn-on losses and the high conduction losses for high voltage level operation. However, the IGBT presents the tail current increasing

TABLE I. Component Quantity Comparison Across the Four Three-Phase Rectifier Topologies

Topology	Inductors	Capacitors	Switches	Diodes
Two-level three-phase boost CCM rectifier [23]	3	1	6	0
Three-phase boost DCM rectifier [13], [14]	3 + 3(filter)	1 + 3(filter)	1	7
Three-level three-phase interleaved boost DCM rectifier [17]	3	5	2	8
Dual input interleaved three-phase rectifier	6	5	Config 01: 8 Config 02: 4	Config 01: 12 Config 02: 16

TABLE II. Operation Parameters Comparison Across the Four Three-Phase Rectifier Topologies

Operation parameters	Two-level three-phase boost CCM rectifier [23]	Three-phase boost DCM rectifier [13], [14]	Three-level three-phase interleaved boost DCM rectifier [17]	Dual input interleaved three-phase rectifier
Does it require a three-phase LC input filter?	No	Yes	No	No
Input RMS Line Voltage	114 V	114 V	114 V	114 V
Switching Frequency	20 kHz	50 kHz	51.4 kHz	51.4 kHz
Output Power	1 kW	1 kW	1 kW	1 kW
Output Voltage	400 V	400 V	400 V	400 V
Input Capacitor Value	-	-	5.29 μ F	1.6 μ F
Input Capacitor - Peak Current	-	-	5.99 A	1.05 A
Input Capacitor - RMS Current	-	-	3.28 A	0.36 A
Input Inductor Value	1.662 mH	46 μ H	65.3 μ H	109.48 μ H
Input Inductor - Peak Current	7.14 A	20.15 A	15.4 A	7.54 A
Input Inductor - RMS Current	5.05 A	9.46 A	6.94 A	3.07 A
Output Capacitor Value	235 μ F	235 μ F	2x470 μ F	2x470 μ F
Output Capacitor - Peak Current	5.18 A	17.58 A	13.34 A	7.24 A
Output Capacitor - RMS Current	3.21 A	6.06 A	4.46 A	2.56 A
Switches - Peak Current	7.9 A	17.59 A	20.08 A	9.69 A
Switches - RMS Current	3.61 A	8.6 A	8.23 A	3.31 A
Switches - Voltage Stress	400 V	400 V	200 V	200 V

TABLE III. Simulation Analysis - Power Factor and THD of the Studied Rectifiers

Topology	PF	THD (%)
Two-level three-phase boost CCM rectifier [23]	0.999	4.08
Three-phase boost DCM rectifier [13], [14]	0.997	5.21
Three-level three-phase interleaved boost DCM rectifier [17]	0.999	2.36
Dual input interleaved three-phase rectifier	0.995	2.86

the turn-off losses, limiting the switching frequency lower than 30 kHz.

The MOSFET switch is recommended for the DCM topologies due to the ZCS turn-on without the reverse recovery of the intrinsic diodes. For this reason, the slow intrinsic diode of the MOSFET is not a problem for the

DCM operation. The lowest voltage stress of the three-level topologies (200 V) allows the use of very low conduction losses MOSFET with reduced turn-off switching losses compared to the two-level CCM rectifier. As a result, the DCM rectifiers are usually designed with switching frequency higher than the CCM rectifiers.

Therefore, to ensure a fair comparison, the switching frequency for the two-level three-phase boost CCM rectifier was set to 20 kHz in the simulation analysis. In contrast, the DCM topologies operated at higher switching frequencies, being 50 kHz or above.

Additionally, the design of the input inductors for each rectifier was carried out, and the results are presented in Table IV. The 'Total volume' column presents the combined volume of all inductors used in the respective converter topology. The analysis of the data in Table IV confirms that, as expected, the core designed for the proposed rectifier has the smallest volume. It is nearly five times smaller than the core used in the CCM topology and about twice as small as the cores in the other DCM topologies. This is due to

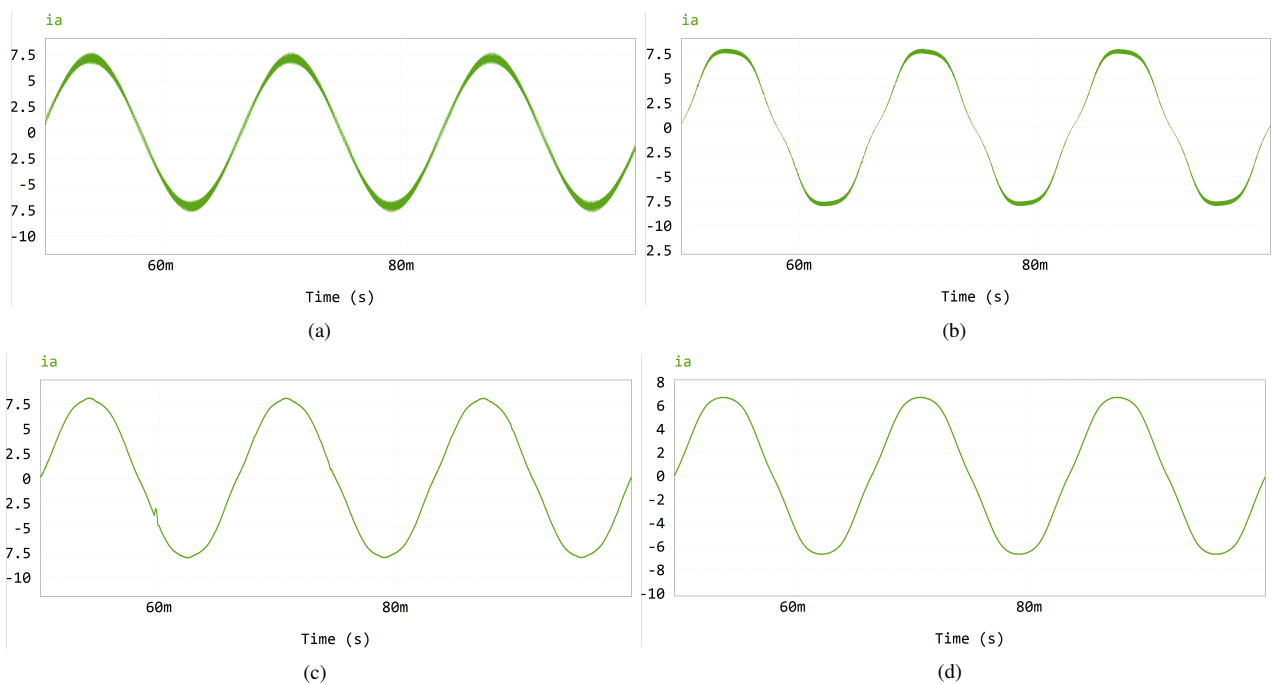


FIGURE 6. Input current comparison: (a) Two-level three-phase boost CCM rectifier; (b) Three-phase boost DCM rectifier; (c) Three-level three-phase interleaved boost DCM rectifier; (d) Dual input interleaved DCM three-phase rectifier.

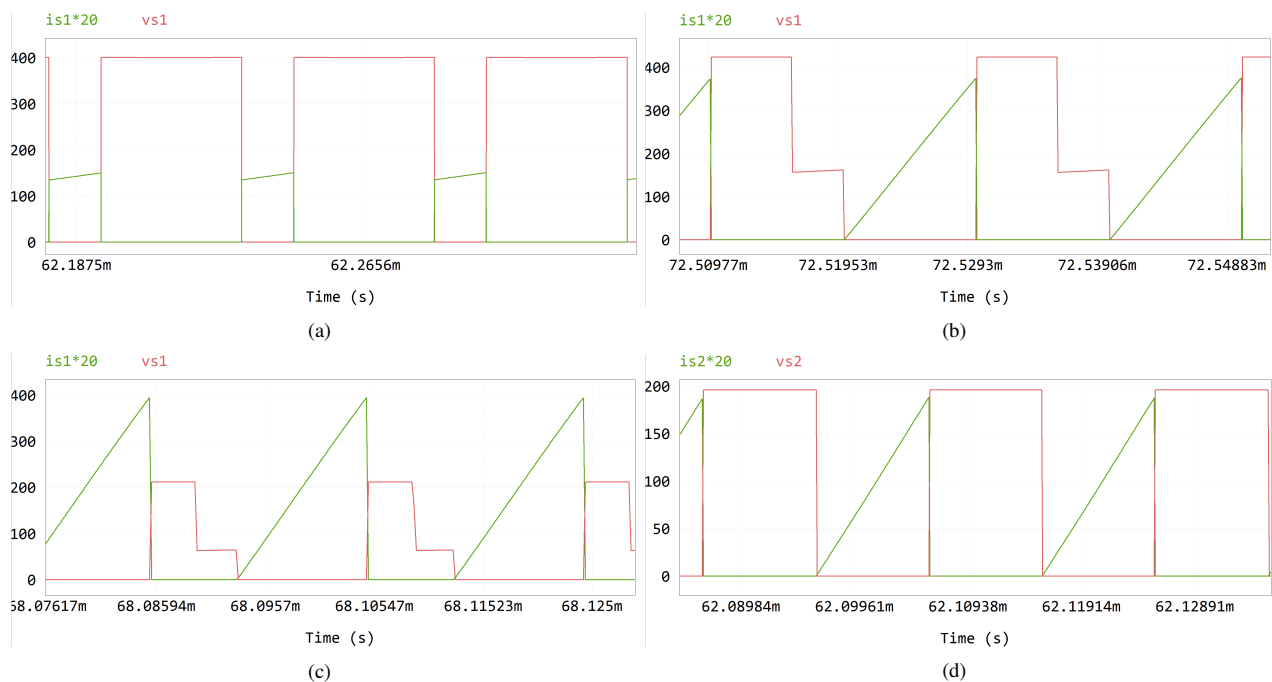


FIGURE 7. Comparison of the waveforms of the voltage across the switch, v_s , and the current through the switch, i_s (a) Two-level three-phase boost CCM rectifier; (b) Three-phase boost DCM rectifier; (c) Three-level three-phase interleaved boost DCM rectifier; (d) Dual input interleaved DCM three-phase rectifier.

the substantially lower inductance value compared to the CCM topology, and the reduced current stresses compared to the structures operating in DCM. Moreover, in terms of total volume, the proposed rectifier continues to exhibit

the smallest value, despite utilizing six input inductors, compared to only three in the other topologies.

Lastly, Table V presents a cost analysis, comparing all rectifiers based on component costs. The main source of

TABLE IV. Selected Cores for the Input Inductors

Rectifier	Selected Core	Core volume (cm ³)	Total volume (cm ³)
Two-level three-phase boost CCM rectifier [23]	E-65/13	36.4	109.2
Three-phase boost DCM rectifier [13], [14]	E-42/15	17.6	52.8
Three-level three-phase interleaved boost DCM rectifier [17]	E-42/15	17.6	52.8
Dual input interleaved three-phase rectifier	E-30/14	8	48

information regarding the price of the components was the DigiKey Electronics website. For this evaluation, the configuration considered for the dual input interleaved DCM three-phase rectifier is configuration 02, presented in Table I. Additionally, for the inductors, only the core costs were considered to simplify the quotation process. This analysis indicates that the most expensive topology is the three-level three-phase interleaved Boost DCM rectifier [17], followed by the dual input interleaved three-phase rectifier.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

To validate the rectifier's operation, experimental tests were conducted with a programmable three-phase power supply, model ITECH IT7625, 300 V AC, 12 A RMS, and a maximum power of 4.5 kVA. In order to emulate a DC bus controlled by an inverter, to which the rectifier would be connected in a real-life application, a programmable DC power supply, model FCC 350-100i, was used to establish a fixed voltage of 400 V on the rectifier output bus. A power analyzer, model Fluke Norma 4000, was used to measure the converter's output power and efficiency. The rectifier's specifications utilized for the tests can be found in Table VI, images of the constructed prototype are shown in Fig. 8 (top view) and Fig. 9 (side view), and the experimental setup is presented in Fig. 10.

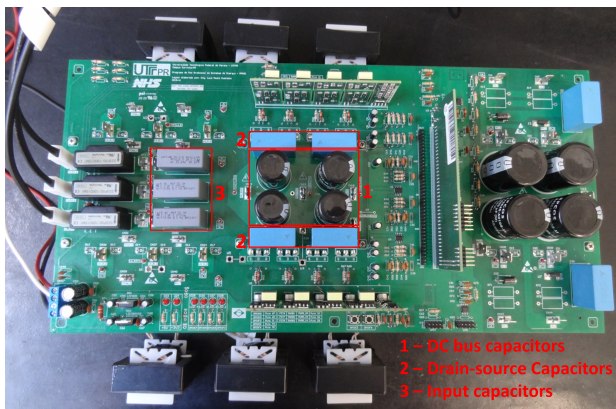


FIGURE 8. Rectifier prototype board - top view.

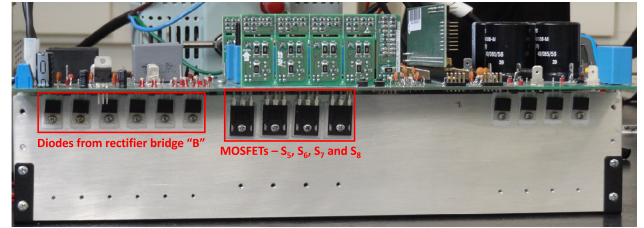


FIGURE 9. Rectifier prototype board - side view.

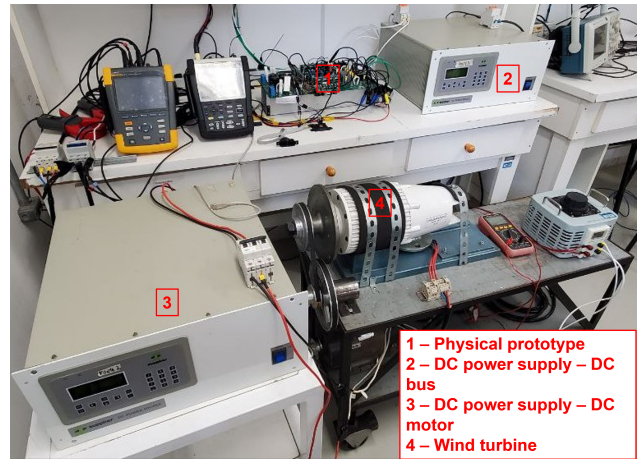


FIGURE 10. Experimental setup.

The rectifier's efficiency curve, shown in Fig. 11, was obtained by controlling the converter's output power as the duty cycle was adjusted accordingly. Measures were acquired for six different values of output power: 200 W, 400 W, 600 W, 800 W, 900 W and 1 kW. The waveforms of the input currents and the input capacitor voltage of phase A (v_{C_a}), for an output power of 1 kW, can be seen in Fig. 12. The waveforms of the currents flowing through inductors L_{A_a} and L_{B_a} can be found in Fig. 13. The THD of the input current i_a , and the rectifier's power factor, for an output power of 1 kW, are presented in Fig. 14 and Fig. 15, respectively. As can be seen in Fig. 13, the rectifier operates in DCM, and Fig. 12 demonstrates its operation with sinusoidal input currents, containing a low ripple. Fig. 15 indicates a high power factor of 0.997, and Fig. 14 shows

TABLE V. Component Price Analysis

Topology	Component	Part Number	Price (\$) (Unit)	Total Price (\$)	Total Cost
Two-level three-phase boost CCM rectifier	1 x CAP ALUM 240UF 20% 450V	EKHJ451VSN241MR35M	\$ 8.40	\$ 8.40	\$ 24.84
	6 x IGBT 600V 7.5A DPAK	STGD3HF60HDT4	\$ 1.37	\$ 8.22	
	3 x Inductor core NEE-65/33/13-3600	THORNTON - 215465	\$ 2.74	\$ 8.22	
Three-phase boost DCM rectifier	1 x CAP ALUM 240UF 20% 450V	EKHJ451VSN241MR35M	\$ 8.40	\$ 8.40	\$ 30.46
	1 x MOSFETs Power TRS, 600V/16A	RJK6014DPP-E0#T2	\$ 5.54	\$ 5.54	
	7 x DIODE GEN PURP 200V 6A	SF64G	\$ 0.80	\$ 5.60	
	3 x CAP PP 3.3UF 10% 200V RADIAL	399-R71VN433050H6K-ND	\$ 2.70	\$ 8.10	
	3 x Inductor core NEE-42/21 /15-4000	THORNTON - 214515	\$ 0.94	\$ 2.82	
Three-level three-phase interleaved boost DCM rectifier	2 x CAP ALUM 470UF 20% 250V SNAP TH	B43505A2477M000	\$ 6.31	\$ 12.62	\$ 50.05
	2 x MOSFET N-CH 300V 15A TO220FL	H5N3007FL-M0-E#T2	\$ 3.61	\$ 7.22	
	8 x DIODE GEN PURP 300V 8A DPAK	SDURD830	\$ 0.63	\$ 5.04	
	3 x CAP PP 5.1UF 5% 200V RADIAL	MKP385551040JPI2T0	\$ 7.45	\$ 22.35	
	3 x Inductor core NEE-42/21 /15-4000	THORNTON - 214515	\$ 0.94	\$ 2.82	
Dual input interleaved three-phase rectifier	2 x CAP ALUM 470UF 20% 250V SNAP TH	B43505A2477M000	\$ 6.31	\$ 12.62	\$ 38.08
	4 x MOSFET N-CH 300V 7A D2PAK	FQB7N30TM	\$ 0.78	\$ 3.12	
	3 x CAP PP 1.8UF 5% 250V RADIAL	399-R75PR4180AA30J-ND	\$ 2.64	\$ 7.92	
	16 x DIODE GEN PURP 300V 4A DO201AD	SF45G	\$ 0.71	\$ 11.36	
	6 x Inductor core NEE-30/15/14-4000	THORNTON - 215902	\$ 0.51	\$ 3.06	

TABLE VI. Experimental Tests Parameters

Parameter	Value
Maximum output power	1 kW
DC bus voltage	400 V
Input line voltage (RMS)	114 V
Switching frequency	51.4 kHz
Input inductance	80.7 μ H
Input capacitance	2 μ F
Output capacitance	2x470 μ F

a low THD of i_a , measured at 2.08%. Furthermore, the converter's efficiency presented satisfactory results, being above 95% for the maximum output power applied, as depicted in Fig. 11.

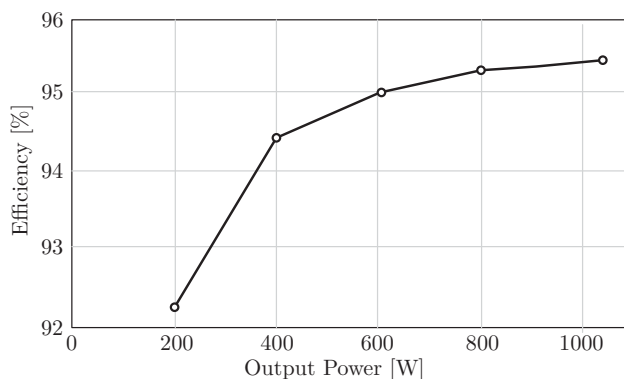
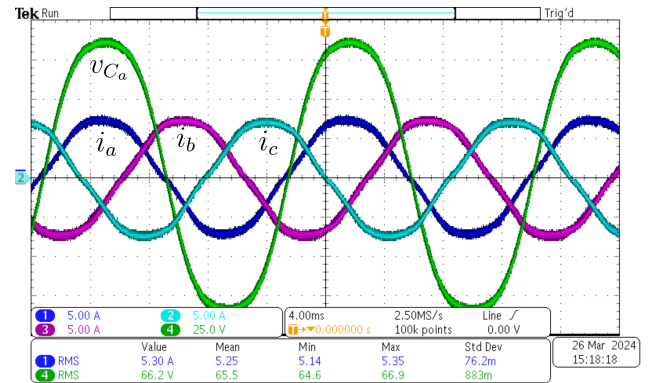
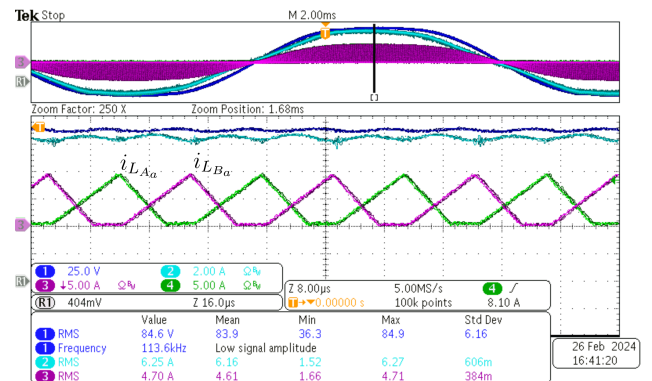


FIGURE 11. Rectifier's efficiency curve.

To assess the rectifier's performance when connected to a small wind turbine, experiments were executed using a

FIGURE 12. Input currents (i_a , i_b and i_c) and input capacitor voltage of phase A (v_{C_a}).FIGURE 13. Currents in inductors L_{A_a} and L_{B_a} .

wind turbine whose technical specifications are detailed in Table VII. To perform the experiments, the turbine was

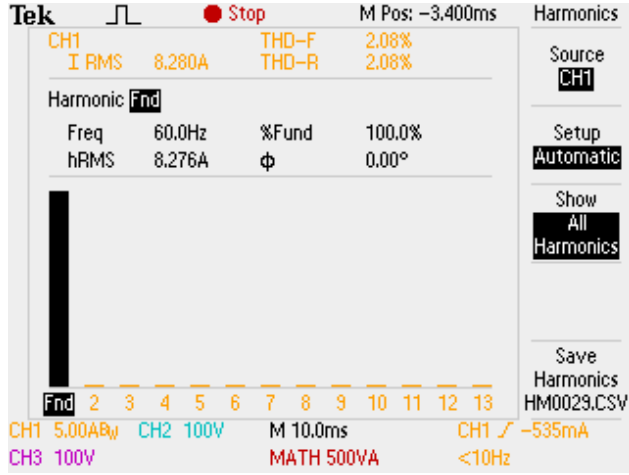
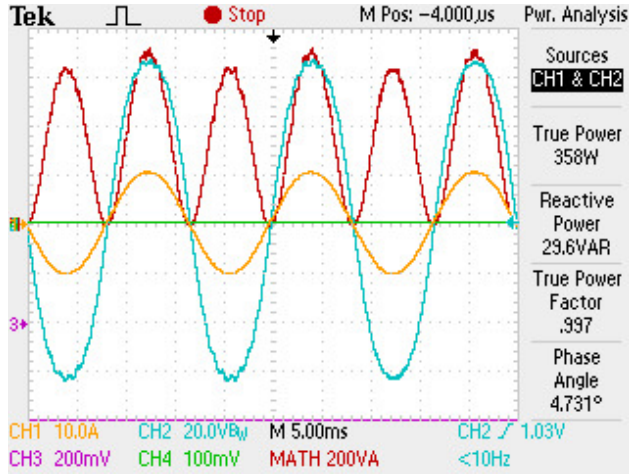
FIGURE 14. Experimental THD of input current i_a .

FIGURE 15. Experimental power factor.

connected to a DC motor powered by a DC power source, model FCCT 400-10-I. In this scenario, the MPP of the system is determined by the maximum power delivered by the DC source. Fig. 16 illustrates the waveforms of the input currents and the input capacitor voltage of phase A (v_{C_a}) when operating with the wind turbine, while Fig. 17 presents these waveforms for transient response condition. The experimental results presented in Fig. 16 demonstrate that the rectifier still operates with sinusoidal input currents, with a high power factor, and the results presented in Fig. 17, show that the input current waveform follows the input voltage waveform from the moment the system is turned on.

TABLE VII. Wind Turbine Parameters

Parameter	Value
Maximum output power	2 kW
Turbine radius	1.6 m
Maximum wind speed	10 m/s
Maximum line voltage RMS	96 V

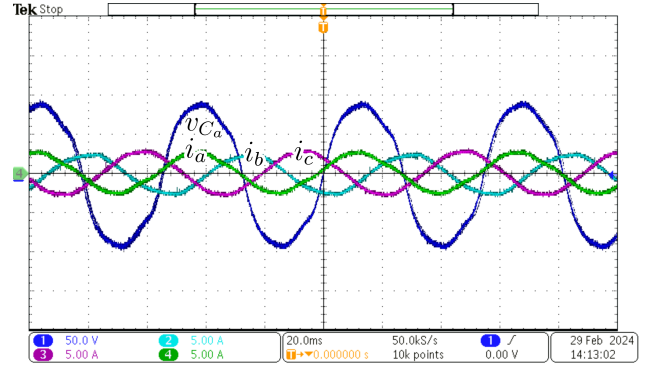
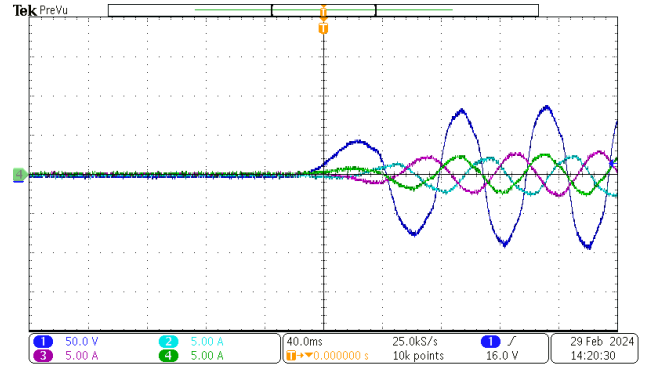
FIGURE 16. Input currents (i_a , i_b and i_c) and input capacitor voltage of phase A (v_{C_a}) when operating with the wind turbine.

FIGURE 17. Rectifier's transient response when operating with the wind turbine.

To further analyze the converter's operation with the small wind generator, experimental tests were carried out utilizing the MPPT strategy presented in Section II.C. The controller utilized was the digital signal controller (DSC) 56F84789 from NXP Semiconductors. During the experiments, an energy analyzer, model Fluke 434, was used to record data of the converter's input power, input RMS line voltages, and input RMS phase currents. Fig. 18 presents the wind turbine power over time, and Fig. 19 illustrates the wind turbine power in function of the RMS line voltage v_{ac} , which is proportional to the wind turbine rotation speed. As it is possible to observe in both Figures, the MPPT algorithm successfully tracked the point of maximum power, and the converter operates consistently around the obtained value (close to 390 W).

V. CONCLUSION

This article proposes a rectifier topology for operation in the rectifier stage of small wind power systems, considering power levels below 15 kW. The converter, which operates in discontinuous conduction mode, can handle variable input voltages (as occurs in variable speed wind turbines), and the dual-input configuration allows for higher power demand ap-

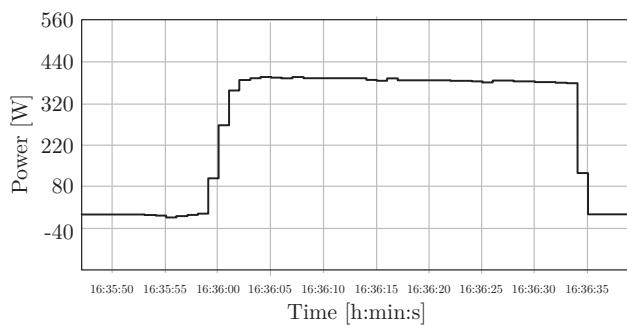
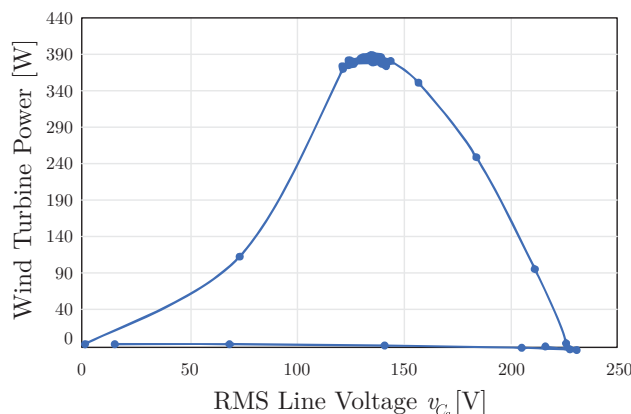


FIGURE 18. Windturbine power vs Time.

FIGURE 19. Windturbine power vs RMS line voltage v_{ac} .

plications compared to single-input structures, as the current stresses are shared between the two diode bridges.

The simulation study demonstrated that the current stresses throughout the entire structure of the proposed three-phase rectifier are significantly reduced compared to the two other topologies operating in DCM. In fact, they are close to those in the CCM topology, despite utilizing input inductances approximately 15 times smaller. Moreover, the inductor core designed for the proposed rectifier had the smallest volume — nearly five times smaller than that of the CCM topology and about half the size of the cores used in the other DCM topologies. Thus, even though the proposed converter uses six input inductors, the reduced current stress, combined with lower inductance values, offers a reduction in both cost and volume of these components compared to the DCM and CCM structures that use three input inductors.

Experiments were performed in order to validate the rectifier's operation characteristics, employing a three-phase power supply, a wind turbine, and a wind turbine in conjunction with an MPPT method. The experimental results from all three scenarios demonstrate that the converter operated with sinusoidal input currents, exhibited low current ripple, and achieved a high power factor. Additionally, the rectifier's efficiency at the maximum applied output power (1 kW) exceeded 95%.

Therefore, the proposed rectifier is suitable for applications in small wind turbines, presenting a topology with high gain and considerably reduced current stresses.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the efforts of Murilo P. de Oliveira and Michell L. Stiz during the experimental results acquisition. They would also like to express their sincere gratitude to the Brazilian company NHS Sistemas de Energia for the provided financial support.

AUTHOR'S CONTRIBUTIONS

G. M. TODYS: Conceptualization, Data Curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project Administration, Software, Validation, Visualization, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing. **L. P. CUSTÓDIO:** Conceptualization, Formal Analysis, Investigation. **A. A. BADIN:** Funding Acquisition, Project Administration, Resources, Supervision, Writing – Review & Editing. **A. A. ASSEF:** Investigation, Methodology, Project Administration, Resources, Software, Supervision, Writing – Review & Editing. **R. GULES:** Conceptualization, Data Curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project Administration, Supervision, Validation, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing. **D. G. BANDEIRA JR.:** Software, Supervision, Validation, Writing – Review & Editing. **E. F. R. ROMANELI:** Funding Acquisition, Project Administration, Resources, Supervision. **D. F. CORTEZ:** Conceptualization, Data Curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project Administration, Supervision, Validation, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing.

PLAGIARISM POLICY

This article was submitted to the similarity system provided by Crossref and powered by iThenticate – Similarity Check.

REFERENCES

- [1] F. Blaabjerg, Y. Yang, K. A. Kim, J. Rodriguez, "Power Electronics Technology for Large-Scale Renewable Energy Generation", *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 4, pp. 335–355, 2023, doi:10.1109/JPROC.2023.3253165.
- [2] M. Z. Malik, M. H. Baloch, B. Ali, S. H. Khahro, A. M. Soomro, G. Abbas, S. Zhang, "Power Supply to Local Communities Through Wind Energy Integration: An Opportunity Through China-Pakistan Economic Corridor (CPEC)", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 66751–66768, 2021, doi:10.1109/ACCESS.2021.3076181.
- [3] P. Roy, J. He, T. Zhao, Y. V. Singh, "Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review", *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 3, pp. 81–104, 2022, doi:10.1109/OJIES.2022.3144093.
- [4] Z. Wang, Y. Jia, C. Cai, Y. Chen, N. Li, M. Yang, Q. Li, "Study on the Optimal Configuration of a Wind-Solar-Battery-Fuel Cell System Based on a Regional Power Supply", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 47056–47068, 2021, doi:10.1109/ACCESS.2021.3064888.
- [5] C. Breyer, S. Khalili, D. Bogdanov, M. Ram, A. S. Oyewo, A. Agha-hosseini, A. Gulagi, A. A. Solomon, D. Keiner, G. Lopez, P. A. Østergaard, H. Lund, B. V. Mathiesen, M. Z. Jacobson, M. Victoria, S. Teske, T. Pregger, V. Fthenakis, M. Rauegi, H. Holttinen, U. Bardi, A. Hoekstra, B. K. Sovacool, "On the History and Future of 100%

- Renewable Energy Systems Research”, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 78176–78218, 2022, doi:10.1109/ACCESS.2022.3193402.
- [6] F. Stadtmann, A. Rasheed, T. Kvamsdal, K. A. Johannessen, O. San, K. K lle, J. O. Tande, I. Barstad, A. Benhamou, T. Brathaug, T. Christiansen, A.-L. Firl , A. Fjeldly, L. Fr yd, A. Gleim, A. H iberg t, C. Meissner, G. Nyg rd, J. Olsen, H. Paulshus, T. Rasmussen, E. Rishoff, F. Scibilia, J. O. Skog s, “Digital Twins in Wind Energy: Emerging Technologies and Industry-Informed Future Directions”, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 110762–110795, 2023, doi:10.1109/ACCESS.2023.3321320.
- [7] F. Blaabjerg, K. Ma, “Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 139–152, 2013, doi:10.1109/JESTPE.2013.2275978.
- [8] F. Blaabjerg, K. Ma, “Wind Energy Systems”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2116–2131, 2017, doi:10.1109/JPROC.2017.2695485.
- [9] M. M. Xavier, et al., *Retificador SEPIC trifásico isolado operando em DCM para aplicação em aerogeradores de pequeno porte*, Master’s thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.
- [10] P. J. S. Costa, T. B. Lazzarin, F. A. B. Batista, C. H. I. Font, “Conexão de Aerogeradores de Pequeno Porte em Microrredes de Corrente Contínua Utilizando um Retificador Trifásico Modular Sepic”, *Eletrônica de Potência*, vol. 21, no. 3, p. 212–223, Sep. 2016, doi:10.18618/REP.2016.3.2606, URL: <https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/285>.
- [11] R. H. Eckstein, T. B. Lazzarin, I. Barbi, “Proposed power and control system for small scale wind turbines connected to the grid”, in *3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)*, pp. 1–6, 2014, doi:10.1049/cp.2014.0836.
- [12] K. Buchert, F. W. Fuchs, “Comparison of three phase rectifier topologies in small wind turbines”, in *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1–10, 2014, doi:10.1109/EPE.2014.6910894.
- [13] A. Prasad, P. Ziogas, S. Manias, “An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 6, no. 1, pp. 83–92, 1991, doi:10.1109/63.65006.
- [14] D. Vilathgamuwa, S. Jayasinghe, “Rectifier systems for variable speed wind generation - a review”, in *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1058–1065, 2012, doi:10.1109/ISIE.2012.6237235.
- [15] L. Jianlin, H. Shuju, X. Honghua, “A kind of direct-driven WECS using single-switch three-phase Boost rectifier”, in *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 1–6, 2008, doi:10.1109/ICIT.2008.4608557.
- [16] A. Nabae, H. Nakano, S. Arai, “Novel sinusoidal converters with high power factor”, in *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 2, pp. 775–780 vol.2, 1994, doi:10.1109/IAS.1994.377506.
- [17] M. H. Granza, R. Gules, C. H. Illa Font, “Hybrid and Three-Level Three-Phase Rectifiers Using Interleaved DCM Boost Converters”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 160168–160176, 2019, doi:10.1109/ACCESS.2019.2951123.
- [18] M. H. Granza, et al., *Conversores CA-CC multin veis do tipo boost com elevado fator de potência e operação em condução descontínua: estudo de topologias monof sicas, trif sicas, n o isolados e isoladas*, Ph.D. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.
- [19] G. M. Todys, A. A. Badin, A. A. Assef, D. F. Cortez, D. G. Bandeira, E. F. R. Romaneli, L. P. Cust dio, R. Gules, “Interleaved Three-Phase Rectifier Dual Input Single Stage In Discontinuous Conduction Mode With Maximum Power Tracking Method For Application In Small Wind Generators”, in *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*, pp. 1–7, 2023, doi:10.1109/SPEC56436.2023.10407550.
- [20] L. d. O. Stamm, et al., *Retificadores trifásicos três níveis em modo de condução descontínua para geração eólica de baixa potência*, Master’s thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.
- [21] N. Swaminathan, N. Lakshminarasamma, Y. Cao, “A Fixed Zone Perturb and Observe MPPT Technique for a Standalone Distributed PV System”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 1, pp. 361–374, 2022, doi:10.1109/JESTPE.2021.3065916.
- [22] M. H. Ibrahim, S. P. Ang, M. N. Dani, M. I. Rahman, R. Petra, S. M. Sulthan, “Optimizing Step-Size of Perturb Observe and Incremental Conductance MPPT Techniques Using PSO for Grid-Tied PV System”, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 13079–13090, 2023, doi:10.1109/ACCESS.2023.3242979.
- [23] Z. Chen, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, “A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, 2009, doi:10.1109/TPEL.2009.2017082.

BIOGRAPHIES

Guilherme M. Todys was born in Curitiba, Brazil, in 1995, and received the B. S. degree in electrical engineering from the Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Curitiba, Brazil, in 2021. He is currently working towards the Master’s degree in electrical engineering at the Post-graduate Program in Energy Systems - PPGSE, at the Federal Technological University of Paraná, being part of the research team at the Electronic Energy Processing Laboratory (LPEE) at UTFPR. His areas of interest include renewable energy processing, high power factor rectifiers, and power factor correction techniques.

Luís P. Cust dio received the B.S. and M.S. degrees in electrical engineering from the Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Curitiba, Brazil, in 2017 and 2021 respectively. His areas of interest include power electronics, power systems, renewable energy, and Wireless power transfer.

Alceu A. Badin (Member, IEEE) was born in Maravilha, Santa Catarina, Brazil, in 1979. He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, in 2002, 2004, and 2009, respectively. Since 2010, he has been a Professor at the Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Curitiba, Brazil. His current research interests include high-frequency power converter topologies, power factor correction techniques, and power supplies. Prof. Badin is a Member of the Brazilian Power Electronic Society and IEEE Power Electronics Society.

Amauri A. Assef received the B.S. degree in electrical engineering, and the M.Sc. and Ph.D. degrees in science and biomedical engineering from the Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Curitiba, Brazil, in 1999, 2006, and 2013, respectively. Since 2009, he has been a Professor of Electrical Engineering at the Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Curitiba. His research interests include ultrasound and electronic instrumentation.

Daniel Flores Cortez born in Pelotas, Rio Grande do Sul, Brazil, in 1985. He received the B.S. degree from the Catholic University of Pelotas – UCPel, Pelotas (RS), Brazil, in 2009, and the M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, in 2012 and 2015, respectively. Since 2015, he has been a Professor of Electrical Engineering at the Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Curitiba, Brazil. His current research interests include dc/dc bidirectional converters, switched-capacitors, and power factor correction techniques.

Delvanei Gomes Bandeira Jr. was born in Pelotas, RS, Brazil, in 1986. He received the B.S. degree in electrical engineering from the Catholic University of Pelotas, Pelotas RS, Brazil, in 2011, and the M.Sc. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brazil, in 2014 and 2019 respectively. Since 2019, he has been a Professor of Electrical Engineering at the

Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Curitiba. His research interests include soft switching, switched capacitors, and high-voltage power supplies.

Eduardo F. R. Romaneli was born in Londrina, Paraná, Brazil, in 1970. He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from the Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, in 1993, 1998, and 2001, respectively. Since 2003, he has been a Full-Time Professor of Electrical Engineering at the Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Curitiba, Brazil. His research has spanned several disciplines, emphasizing power electronics. His current research interests are focused on uninterruptible power systems, power-factor correction, and renewable energy processing.

Roger Gules (Member, IEEE) was born in Bento Gonçalves, Brazil, in 1971. He received the B.S. degree from the Federal University of Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Brazil, in 1995, and the M.S. and Ph.D. degrees from the Federal University of Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brazil in 1998 and 2001, respectively, all in electrical engineering. From 2001 to 2005, he was a Professor at the Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Brazil. Since 2006, he has been a Professor of Electrical Engineering at the Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Curitiba, Brazil. His research interests include high-frequency power conversion, renewable energy applications, and high-power factor rectifiers.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propõe uma topologia de retificador trifásico para operação na etapa retificadora de sistemas eólicos de pequeno porte, considerando níveis de potência inferiores a 15 kW. O conversor, que opera em modo de condução descontínua (DCM), é capaz de trabalhar com tensões de entrada variáveis (como ocorre em turbinas eólicas de velocidade variável), e sua configuração de entrada dupla permite aplicações com maior demanda de potência em comparação com estruturas de entrada única, pois os esforços de corrente são compartilhados entre as duas pontes de diodos.

O estudo de simulação demonstrou que os esforços de corrente em toda a estrutura do retificador trifásico proposto foram significativamente reduzidos em comparação com as outras duas topologias operando em DCM. De fato, os valores obtidos são próximos aos da topologia CCM, apesar de utilizar indutâncias de entrada aproximadamente 15 vezes menores. Além disso, o núcleo do indutor projetado para o retificador proposto apresentou o menor volume — cerca de cinco vezes menor que o da topologia CCM e aproximadamente metade do tamanho dos núcleos utilizados nas demais topologias em DCM. Assim, mesmo com o uso de seis indutores de entrada, a redução dos esforços de corrente, aliada aos baixos valores de indutância, proporciona uma diminuição tanto no custo quanto no volume desses componentes em comparação com as estruturas DCM e CCM, que utilizam três indutores de entrada.

Experimentos foram conduzidos para validar as características operacionais do retificador, utilizando uma fonte de alimentação trifásica, uma turbina eólica e uma turbina eólica em conjunto com um método MPPT. Os resultados experimentais, para os três cenários, demonstraram que o conversor operou com correntes de entrada senoidais, apresentando baixa ondulação de corrente e atingiu um alto fator de potência. Além disso, a eficiência do retificador na potência máxima aplicada (1 kW) ultrapassou 95%.

Portanto, o retificador proposto é adequado para aplicações em turbinas eólicas de pequeno porte, apresentando uma topologia com alto ganho, e esforços de corrente reduzidos.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo e o desenvolvimento de uma topologia isolada baseada no retificador trifásico proposto neste trabalho, visando aplicações em que a isolamento galvânica seja um requisito de projeto.

REFERÊNCIAS

- ABU-RUB, H.; MALINOWSKI, M.; AL-HADDAD, K. Challenges of the current energy scenario: The power electronics contribution. *In: _____. Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 27–49.
- BLAABJERG, F.; MA, K. Future on power electronics for wind turbine systems. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 1, n. 3, p. 139–152, 2013.
- BLAABJERG, F.; MA, K. Wind energy systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 11, p. 2116–2131, 2017.
- BLAABJERG, F. *et al.* Power electronics technology for large-scale renewable energy generation. **Proceedings of the IEEE**, v. 111, n. 4, p. 335–355, 2023.
- BREYER, C. *et al.* On the history and future of 100% renewable energy systems research. **IEEE Access**, v. 10, p. 78176–78218, 2022.
- CHEN, Z.; GUERRERO, J. M.; BLAABJERG, F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 8, p. 1859–1875, 2009.
- COSTA, P. J. *et al.* Conexão de aerogeradores de pequeno porte em microrredes de corrente contínua utilizando um retificador trifásico modular sepic. **Eletrônica de Potência**, v. 21, n. 3, p. 212–223, 2016.
- DIAS, J. C.; LAZZARIN, T. B. High-gain modular three-phase hybrid boost rectifier for small wind energy harvesting system. *In: 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1094–1099.
- ECKSTEIN, R. H.; LAZZARIN, T. B.; BARBI, I. Proposed power and control system for small scale wind turbines connected to the grid. *In: 3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- GLOBAL, W. E. C. **Global Wind Report 2023**. 2023. Available: https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/03/GWR-2023_interactive.pdf.
- GRANZA, M. H.; GULES, R.; FONT, C. H. I. Hybrid and three-level three-phase rectifiers using interleaved dcm boost converters. **IEEE Access**, v. 7, p. 160168–160176, 2019.
- GRANZA, M. H.; GULES, R.; FONT, C. H. I. Hybrid and three-level three-phase rectifiers using interleaved dcm boost converters. **IEEE Access**, v. 7, p. 160168–160176, 2019.
- GÜVEN, A. F. *et al.* Multi-objective optimization of an islanded green energy system utilizing sophisticated hybrid metaheuristic approach. **IEEE Access**, v. 11, p. 103044–103068, 2023.
- HAEGEL, N. M.; KURTZ, S. R. Global progress toward renewable electricity: Tracking the role of solar (version 3). **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 13, n. 6, p. 768–776, 2023.
- IBRAHIM, M. H. *et al.* Optimizing step-size of perturb observe and incremental conductance mppt techniques using pso for grid-tied pv system. **IEEE Access**, v. 11, p. 13079–13090, 2023.
- INSTITUTE, E. Statistical review of world energy. Energy Institute London, UK, 2024.

LAZZARIN, T. B. *et al.* Proposal of a modular three-phase sepic-dcm rectifier for small wind energy conversion systems. *In: 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 398–404.

NABAE, A.; NAKANO, H.; ARAI, S. Novel sinusoidal converters with high power factor. *In: Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 1994. v. 2, p. 775–780 vol.2.

PRASAD, A.; ZIOGAS, P.; MANIAS, S. An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 6, n. 1, p. 83–92, 1991.

PRASAD, A.; ZIOGAS, P.; MANIAS, S. An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 6, n. 1, p. 83–92, 1991.

REHMAN, S. *et al.* Optimal design and model predictive control of standalone hres: A real case study for residential demand side management. **IEEE Access**, v. 8, p. 29767–29814, 2020.

ROY, P. *et al.* Recent advances of wind-solar hybrid renewable energy systems for power generation: A review. **IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society**, v. 3, p. 81–104, 2022.

SOLTOSKI, J. C. F.; FONT, C. H. I. On the application of a three-phase two-switch dcm boost rectifier in small-scale wind energy conversion system. *In: 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7.

SWAMINATHAN, N.; LAKSHMINARASAMMA, N.; CAO, Y. A fixed zone perturb and observe mppt technique for a standalone distributed pv system. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 10, n. 1, p. 361–374, 2022.

TANG, Z.; YANG, Y.; BLAABJERG, F. Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, v. 8, n. 1, p. 39–52, 2022.

VILATHGAMUWA, D.; JAYASINGHE, S. Rectifier systems for variable speed wind generation - a review. *In: 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1058–1065.

WANG, Z. *et al.* Study on the optimal configuration of a wind-solar-battery-fuel cell system based on a regional power supply. **IEEE Access**, v. 9, p. 47056–47068, 2021.