



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Abinoã Praxedes Forte

**ANÁLISE DE CONVERSORES DE ELEVADA POTÊNCIA APLICADOS AO
HIDROGÊNIO VERDE**

CARAÚBAS

2025

Abinoã Praxedes Forte

**ANÁLISE DE CONVERSORES DE ELEVADA POTÊNCIA APLICADOS AO
HIDROGÊNIO VERDE**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Dr. Antônio Alisson Alencar Freitas.

CARAÚBAS - RN

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F737a Forte, Abinoã Praxedes.
Análise de conversores de elevada potência
aplicados ao hidrogênio verde / Abinoã Praxedes
Forte. - 2025.
73 f. : il.

Orientador: Antônio Alisson Alencar Freitas.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Hidrogênio Verde. 2. Retificadores de Alta
Potência. 3. Retificadores Trifásicos. 4.
Retificadores Controlados. 5. Retificadores Não
Controlados. I. Freitas, Antônio Alisson Alencar,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Abinoã Praxedes Forte

ANÁLISE DE CONVERSORES DE ELEVADA POTÊNCIA APLICADOS AO HIDROGÊNIO VERDE

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 15 / 12 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ANTONIO ALISSON ALENCAR FREITAS

Data: 30/12/2025 16:33:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Antônio Alisson Alencar Freitas, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente



FRANCISCO DE ASSIS BRITO FILHO

Data: 17/12/2025 22:03:39-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Francisco de Assis Brito Filho, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente



MARIA VICTÓRIA DA SILVA OLIVEIRA

Data: 15/12/2025 16:32:51-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Maria Victória da Silva Oliveira, Eng^a. (ISTE)
Membro Examinador

*“Uma nação que não consegue controlar suas
fontes de energia não pode controlar o seu
futuro.”*

Barack Obama

AGRADECIMENTOS

Dedico meu primeiro agradecimento ao autor de cada propósito que me trouxe até este momento, Deus. Agradeço pela sabedoria que guiou minhas escolhas e me sustentou diante das dificuldades. Tudo o que conquistei e ainda hei de conquistar, entrego primeiramente a Ele. Foi Ele quem manteve minha direção e clareza nos momentos mais decisivos.

À minha mãe Arnirene Praxedes, minha referência de amor e resiliência. Obrigado por cada gesto de cuidado, e por ser minha maior torcida em todos os caminhos. Sua fé em mim, me impulsionou a seguir. Seu apoio tornou este percurso mais leve e possível. Esta conquista não é apenas minha, mas nossa.

Aos meus avós José Elias e Artemísia Praxedes, que sempre torceram por mim, me incentivaram e acreditaram no meu potencial. O carinho, a sabedoria e a paciência de vocês moldaram grande parte do que sou e sempre trouxe segurança e incentivo. Esta conquista também honra o amor e a história que construíram.

À minha tia Adilene Praxedes, que foi mais do que presença: foi suporte em todos os momentos da minha trajetória. Obrigado por cada gesto de cuidado e por todo apoio oferecido. Sua disponibilidade e cuidado me acompanharam nos momentos mais desafiadores e me ajudaram a seguir.

Ao professor e orientador, Alisson Freitas, pela confiança e ensinamentos que contribuíram para a escrita deste trabalho e, também, para minha formação pessoal e profissional.

À minha namorada Mariana Meneghetti, pela palavra de incentivo nos momentos de cansaço e nas etapas mais difíceis deste percurso. Seu amor e cuidado me deram equilíbrio quando tudo parecia urgente demais. Obrigado por celebrar comigo, por acreditar em mim e por caminhar ao meu lado. Eu te amo!

E, por fim, à banca avaliadora, pela disponibilidade, pelo olhar atento e pelas contribuições enriquecedoras, que ampliaram a qualidade e o alcance deste estudo.

RESUMO

O Hidrogênio Verde surge como uma tecnologia promissora fundamental para o processo de descarbonização global, com seu método de produção realizado a partir da eletrólise da água e alimentada por fontes de energia renovável. Contudo, a viabilidade da implementação desta tecnologia depende diretamente da eficiência e da qualidade dos seus componentes. O processo de eletrólise requer corrente contínua (CC) estável e de alta pureza, enquanto as fontes renováveis e a rede elétrica fornecem corrente alternada (CA). Portanto, a partir disto, este presente trabalho de conclusão de curso investe em uma análise mais aprofundada acerca das topologias e funcionamento dos retificadores trifásicos de alta potência. Para uma análise mais específica, este trabalho realizou um estudo comparativo de duas topologias de conversores: o retificador não controlado a diodos e o retificador controlado a tiristores, ambos de 12 pulsos. Para fins de análise, optou-se pela escolha do retificador controlado, devido ser mais convencional. Para isso, foi realizado a análise, modelagem e dimensionamento a partir de premissas teóricas, para que após isso, fosse realizado a sua validação por meio de simulação no *software* PSIM. De forma geral, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios e decisivos, pois os valores médios de tensão e corrente na saída do conversor foram considerados dentro da faixa esperada e de tolerância para um circuito de 1kW de potência, além do mais as formas de onda demonstraram operação estável, baixa distorção harmônica e eficiência elevada, validando a topologia como solução técnica viável para aplicações em alta potência.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde; Retificadores de Alta Potência; Retificadores Trifásicos; Retificadores Controlados; Retificadores Não Controlados.

ABSTRACT

Green Hydrogen emerges as a promising technology that could be fundamental to the global decarbonization process, with its production method based on water electrolysis and powered by renewable energy sources. However, the implementation of this technology depends directly on the efficiency and quality of its components. The electrolysis process requires stable, high-purity direct current (DC), while renewable sources and the electrical grid provide alternating current (AC). Therefore, this final course project invests in a more in-depth analysis of the topologies and operation of high-power three-phase rectifiers. For a more specific analysis, this work carried out a comparative study of two converter topologies: the uncontrolled diode rectifier and the thyristor-controlled rectifier, both 12-pulse. For analysis purposes, the controlled rectifier was chosen because it is more conventional. To this end, an analysis, modeling, and dimensioning were carried out based on theoretical proposals, so that, after that, its validation could be performed through simulation in the PSIM software. Overall, the results obtained were considered decisive and conclusive, as the average voltage and current values at the converter output were within the expected range and tolerance for a 1kW power circuit. Furthermore, the waveforms showed stable operation, low harmonics, and high efficiency, validating the topology as a viable solution for high-power applications.

Keywords: Green Hydrogen; High-Power Rectifiers; Three-Phase Rectifiers; Controlled Rectifiers; Uncontrolled Rectifiers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - consumo médio residencial no Brasil.....	18
Figura 2 consumo médio residencial no Brasil.	19
Figura 3 - Evolução da geração total de eletricidade no Brasil em 2024.	20
Figura 4 - Evolução e previsão da demanda mundial de hidrogênio no mundo.	22
Figura 5 - Planta do Hub de Pecém.....	25
Figura 6 - Retificador Trifásico 6 pulsos a diodo.....	28
Figura 7 - Formas de onda e tempos de condução dos diodos.....	28
Figura 8 - Conversor trifásico completo..	31
Figura 9 - Conversor trifásico completo formas de onda.	32
Figura 10 - Planta hidrogênio verde.	34
Figura 11 - Tiristor 12 pulsos.....	35
Figura 12 - Tiristor 12 pulsos conectados em paralelo.....	36
Figura 13 - Intervalos de operação 1 e 2 tiristor	37
Figura 14 - Intervalos de operação 3 e 4 tiristor	38
Figura 15 - Intervalos de operação 5 e 6 tiristor	39
Figura 16 - Tiristor 12 pulsos a diodo com chopper multifásico	40
Figura 17 - Retificador 12 pulsos a diodo	40
Figura 18 - Intervalos de operação 1 e 2 diodo	42
Figura 19 - Intervalos de operação 3 e 4 diodo	43
Figura 20 - Intervalos de operação 5 e 6 diodo	43
Figura 21 - Retificador 12-TR	48
Figura 22 - Gates para as pontes de tiristores.....	48
Figura 23 - Formas de onda de entrada	50
Figura 24 - Tensão de saída do conversor sem o capacitor de filtro.....	51
Figura 25 - Tensão de saída do conversor com filtro de entrada.....	55
Figura 26 - Comparação das formas de onda de saída com x sem filtro de entrada.	56
Figura 27 - Tensões nos pares de tiristores para o conversor com filtro de entrada.	57
Figura 28 - Circuito elétrico do conversor 12 pulsos a tiristor no PSIM.....	58
Figura 29 - Forma de onda final do retificar 12 pulsos.	59

Figura 30 - Comparação das formas de onda de saída para todos os modelos.	60
Figura 31 - Tensão de saída nos tiristores para o retificador completo	61
Figura 32 - Corrente de saída retificador completo.....	61
Figura 33 - Corrente de saída retificador completo.....	62
Figura 34 - FFT no retificador sem filtro	63
Figura 35 - FFT no retificador 12-TR proposto	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens 12-TR	45
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens 12-DRMC.....	46
Tabela 3 - Valores medidos na saída sem capacitor de filtro.....	51
Tabela 4 - Valores médios calculados na saída.	53
Tabela 5 - Valores médios medidos na saída.	53
Tabela 6 - Valores medidos na saída do retificador com filtro de entrada.	56
Tabela 7 - Valores medidos na saída do retificador completo.	60
Tabela 8 - Comparação dos valores médios de saída nos conversores.	62

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	14
1.2 Estrutura do Trabalho	15
2 - OBJETIVOS	17
2.1 Objetivos Específicos	17
3 - REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 Crescimento populacional e maior demanda de energia	18
3.2 Hidrogênio Verde como alternativa	21
3.2.1 Hidrogênio Verde no Cenário Global	22
3.2.2 Hidrogênio Verde no Cenário Latino-Americano	23
3.2.3 Hidrogênio Verde no Cenário Brasileiro	23
3.2.4 Desafios	25
3.3 Retificadores trifásicos	26
3.3.1 Retificadores trifásicos não controlados	27
3.3.2 Retificadores trifásicos controlados	29
4 - ANÁLISE QUANTITATIVA E QUALITATIVA A CERCA DO CONVERSORES PROPOSTOS	33
4.1 Conversor de 12 pulsos a tiristor (12-TR)	35
4.2 Conversor de 12 pulsos a diodo com chopper multifásico (12-DRMC)	39
4.3 Comparação	44
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
7 - REFERÊNCIAS	67
8 - APÊNDICE A: CÁLCULOS DO FILTRO DE ENTRADA E DE SAÍDA	72

1 - INTRODUÇÃO

A partir do consequente aumento populacional e econômico que decorre nos tempos contemporâneos, a necessidade por uma oferta maior de energia elétrica é algo praticamente inevitável, tendo em vista a dependência direta da eletricidade no nosso cotidiano.

Portanto, para suprir essa eminente demanda de energia, a oferta de eletricidade precisa ser superior a cada ano. Como uma alternativa para suprir essa carência, surgiu a necessidade de uma diversificação das matrizes atuais, tendo em vista a exigência de um maior cuidado com o meio ambiente, já que a maior parte das matrizes energéticas são poluentes, como o carvão mineral e o petróleo. Nesse viés, as fontes de energias renováveis, como eólica e solar, por exemplo, despontaram como alternativas sustentáveis mais viáveis para a geração de eletricidade sem a preocupação com impactos ambientais mais severos. De acordo com dados do relatório REN21 (2025), mais de 30% de toda a capacidade global de geração elétrica em 2024 foi proveniente de fontes de energias renováveis.

Ainda assim, a produção de energia sofre com instabilidades devido a sua intermitência, o que ocasiona a ligação de usinas termelétricas para suprir a demanda. A incapacidade de armazenar essa energia produzida é uma dificuldade enfrentada pelas fontes renováveis, que conseguem ter bons rendimentos, mas não conseguem armazenar o excedente.

O Hidrogênio Verde é um termo que é utilizado para se referir ao hidrogênio que é obtido por meio de fontes renováveis, visando um processo no qual não haja a emissão de carbono.

Nesse viés, o hidrogênio verde, surge como uma fonte de energia promissora, que promete solucionar esse problema das renováveis, permitindo a armazenagem de energia elétrica e a sua passagem para a rede, de uma forma limpa e também segura, por meio da conversão de energia elétrica através da eletrolise.

O processo de fabricação do Hidrogênio Verde se dá por meio de um processo químico denominado de eletrólise. A eletrólise acontece através da concepção de uma corrente contínua que alimenta os eletrolisadores. Como o sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica na maioria das vezes é encontrado na forma de corrente alternada, então faz-se necessário a utilização de um conversor CA/CC, que

são os chamados retificadores. Dessa forma, faz-se necessário o uso da eletrônica de potência para a obtenção do hidrogênio.

A corrente e tensão necessária para a obtenção de Hidrogênio Verde a partir de eletrólise deve ser o mais constante possível. Devido a tensão ser proveniente da rede, torna-se necessário a conversão da corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), portanto, para isso, torna-se necessário a utilização de retificadores/conversores de elevada potência para realizar essa transformação.

Os retificadores de alta potência que são conectados à rede elétrica desempenham um papel muito importante; pois eles são responsáveis por transformar a média tensão (MT) em alta corrente contínua (CC) para abastecer as células eletrolíticas. Os retificadores comerciais de alta potência podem chegar à faixa de 10 MW de potência, fornecendo uma corrente de 1,5 kA a 10 kA com uma tensão de até 1 kV. Os principais problemas relacionados a eles são devido ao excesso de geração de potência reativa. (Vitale, 2024)

1.1 Justificativa

A eletrolise da água, é o processo que se dá a formação do hidrogênio na forma verde, e passa por dois componentes obrigatórios, são eles: os retificadores conversores de alta potência os eletrolisadores. Segundo Chen et. al (2022), na produção de energia elétrica proveniente de hidrogênio verde, o conversor de alta potência P2H é componente essencial nesse processo, já que converte a energia da rede de MV corrente alternada em corrente contínua, para alimentar os eletrolisadores da água

Entretanto, apesar do seu grande potencial, as etapas de produção do hidrogênio verde ainda enfrentam obstáculos técnicos, econômicos e operacionais que impedem a sua implementação em larga escala. O uso e aplicação de hidrogênio verde implica em algumas incertezas, sendo o custo de operação uma delas. Os custos são mais elevados devido a corrente elétrica ser derivada de outra fonte renovável. (Viegas, 2021)

Logo, os conversores de elevada potência utilizados em eletrolisadores enfrentam desafios significativos ao lidar com as oscilações comuns das fontes

renováveis, exigindo assim estratégias de controle para evitar perdas e reduzir esforços elétricos sobre a carga. (Hassan et al., 2024)

Em ambientes de extração de hidrogênio, é essencial garantir a durabilidade e confiabilidade dos componentes utilizados na sua produção. A otimização dos projetos dos conversores de potência para gerenciar as altas demandas de corrente dos processos de eletrólise é essencial para garantir um bom funcionamento das células eletrolíticas. (Hassan et al., 2024)

Desse modo, os circuitos da eletrônica de potência são essenciais para a boa produção do Hidrogênio Verde, pois são os responsáveis diretos em fornecer a corrente e a tensão ideal, além de aprimorar a qualidade da energia e converter a corrente alternada em corrente contínua. (Hassan et al., 2024)

Ainda assim, os retificadores trifásicos controlados por tiristores dominam as aplicações industriais de grande porte devido ao seu baixo custo, elevada robustez, eficiência e por ser uma tecnologia mais madura, tornando-os amplamente usados em sistemas de eletrólise voltados à produção de hidrogênio. Porém, atualmente os custos totais para a implementação dos retificadores a diodo com *chopper* multifásico são mais reduzidos, podendo ser equiparado ao 12-TR. (Scaini e Ma, 2002; Hassan et al., 2024)

1.2 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, além das referências bibliográficas e o capítulo de apêndice que contém o memorial de cálculo dos filtros, estão estruturados de forma a apresentar de maneira clara e progressiva o desenvolvimento teórico, a modelagem e a simulação do conversor proposto.

A partir disso, o Capítulo 2 define o objetivo geral e os objetivos específicos, direcionando ao presente trabalho, para a análise conceitual do hidrogênio e dos retificadores trifásicos controlado e não controlado, bem como a modelagem, simulação e análise do conversor proposto.

No Capítulo 3, apresenta-se o referencial teórico, que associa os conceitos de Hidrogênio Verde e retificadores trifásicos de ponte completa que são utilizados para

a produção do hidrogênio. Além disso, também trata de abordar as suas respectivas etapas de operação, bem como suas topologias mais usuais seguidas de uma comparação entre suas vantagens e desvantagens.

O Capítulo 4 trata da análise qualitativa e quantitativa dos conversores 12 pulsos a diodo com chopper multifásico (12-DRMC) e o conversor de 12 pulsos a tiristor (12-TR). A partir disso, foi realizada uma análise teórica acerca de seus conceitos fundamentais, etapas de operação, topologias, vantagens e desvantagens no ponto de vista de aplicação direta no processo de eletrólise. Então, após a análise, um dos conversores propostos foi escolhido para ser usado como base para a modelagem e simulação.

O Capítulo 5 abrange todos os resultados obtidos nas simulações do conversor 12-TR. Inicialmente, foi analisado o conversor proposto sem nenhum tipo de filtro ou componente passivo, para que fosse realizado os primeiros cálculos que servirão como base para a análise comparativa. Posteriormente, foi adicionado ao modelo elétrico um filtro LC de entrada para que então fosse possível analisar a primeira comparação. E então, ao final, foi incluído um filtro de saída que completa o circuito elétrico do conversor proposto. Portanto, os resultados são comparados aos valores teóricos, permitindo a verificação e validação do modelo desenvolvido, afim de demonstrar a eficiência da topologia do conversor 12-TR, bem como seu comportamento em vários estágios.

Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as considerações finais, que explanam as principais conclusões do trabalho, destacando os resultados obtidos, as técnicas alcançadas e colocando à disposição os resultados para perspectivas futuras, como por exemplo o aperfeiçoamento do conversor proposto.

2 – OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é entender por que o Hidrogênio Verde é apontado como uma tecnologia inovadora no cenário de transição energética, bem como entender o funcionamento e a utilização dos conversores de alta potência que são utilizados durante o processo de produção de energia. Além disso, foi realizada a projeção de um dos conversores para que a compreensão e análise do trabalhado seja mais satisfatória.

2.1 Objetivos Específicos

- Compreender o conceito de Hidrogênio Verde, bem como sua importância;
- Apresentar quais os tipos de conversores e eletrolisadores mais comuns, assim como seus respectivos circuitos elétricos;
- Demonstrar os diferentes tipos de conversores utilizados na produção de hidrogênio verde;
- Entender a importância dos conversores de alta potência na produção de hidrogênio verde;
- Simular e dimensionar componentes presentes na etapa de produção, como conversores e eletrolisadores.

3 - REFERENCIAL TEÓRICO

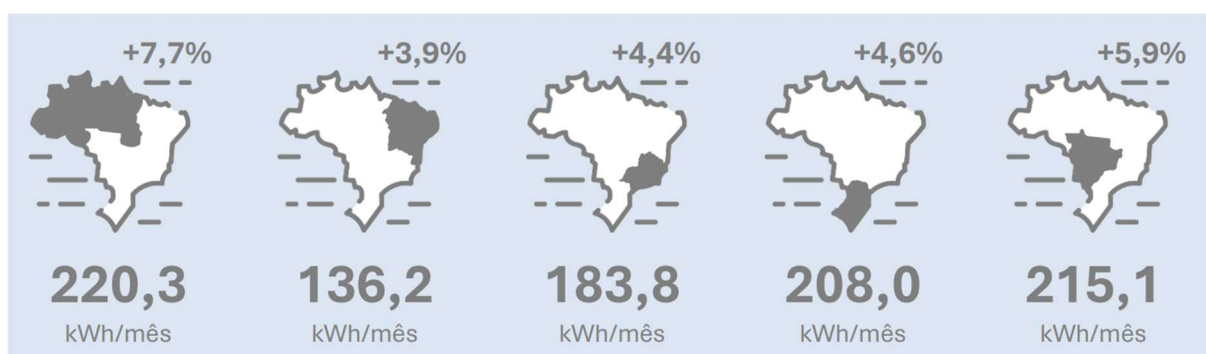
3.1 Crescimento populacional e maior demanda de energia

Segundo dados da Organização Mundial das Nações Unidas (2024), a previsão é que até 2100 o mundo alcance a população mundial em torno de 10,3 bilhões de habitantes. Já no Brasil, a estimativa populacional no ano de 2023 era de aproximadamente 203 milhões de habitantes, enquanto que atualmente, no ano de 2025 o nosso país alcançou a marca de 213 milhões de habitantes, o que representa um aumento de quase 5% em relação ao último censo (IBGE, 2023; 2025).

É inegável que à medida que a população cresce, surge uma demanda maior de energia elétrica, visto que é parte essencial no cotidiano de milhões de famílias. Quando falamos em acesso a eletricidade, o Brasil, por exemplo, consegue fornecer acesso a eletricidade em cerca de 99,4% dos domicílios nacionais (IBGE, 2025).

Esse é um dado que corrobora fielmente para provar que a eletricidade é item indispensável na vida de milhões de pessoas. Conforme demonstrado na figura o consumo médio de eletricidade para fins residências sofreu um aumento positivo no ano de 2023.

Figura 1 – consumo médio residencial no Brasil.



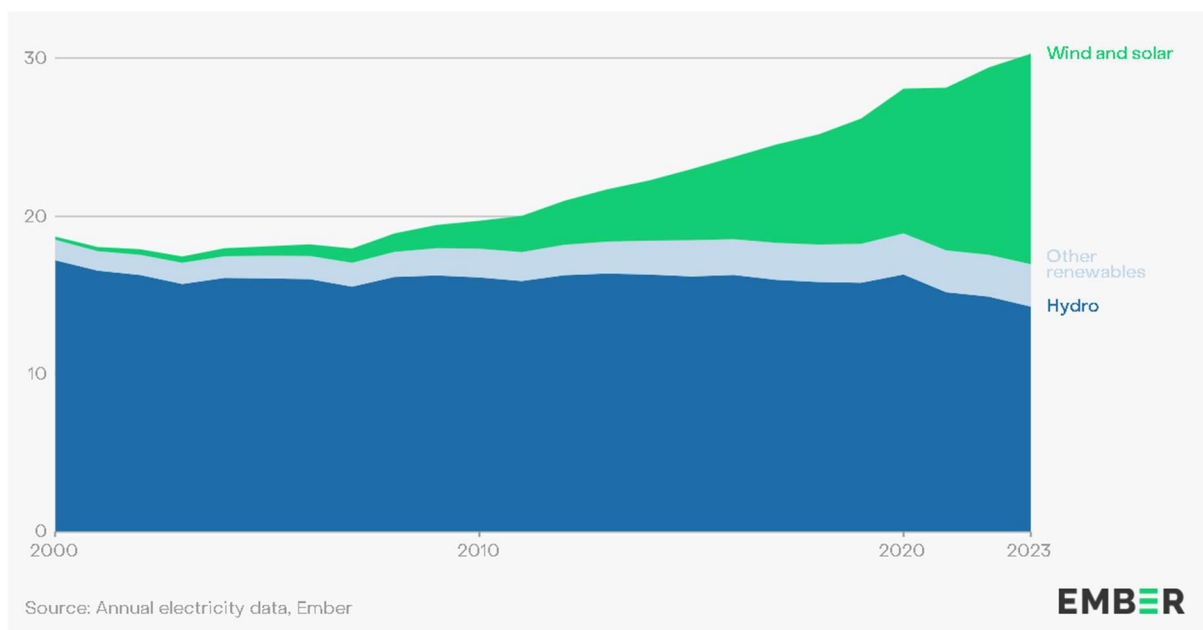
Fonte: EPE (2024).

Portanto, após a crise do petróleo em 1973, muitas nações resolveram voltar suas atenções em buscar alternativas que venham substituir uma única fonte de gerar eletricidade por uma matriz energética diversificada. Após isso, em meados dos anos 1980, o mundo voltou-se a pensar em maneiras de diminuir os impactos ambientais que eram causados pela emissão exagerada de gases CO₂, efeito estufa, derivados

da queima de combustíveis fósseis. A partir de então, os investimentos e estudos relacionados ao desenvolvimento de produção de energia elétrica através de recursos naturais conseguiram um avanço enorme.

Para entendermos melhor, segundo dados da Ember (2024) demonstram a crescente das fontes de energias renováveis, que em 2000 ocupavam cerca de 19% da oferta mundial de energia e em 2023 passou para 30%, um aumento considerável, conforme demonstrado na figura abaixo. Além disso, de toda a capacidade de geração elétrica adicionada no planeta em 2023, 81% foram de fontes renováveis, resultando em aproximadamente 473GW, esse dado inclui também fontes não renováveis, como combustíveis fósseis e nuclear (IRENA, 2024).

Figura 2 – consumo médio residencial no Brasil.

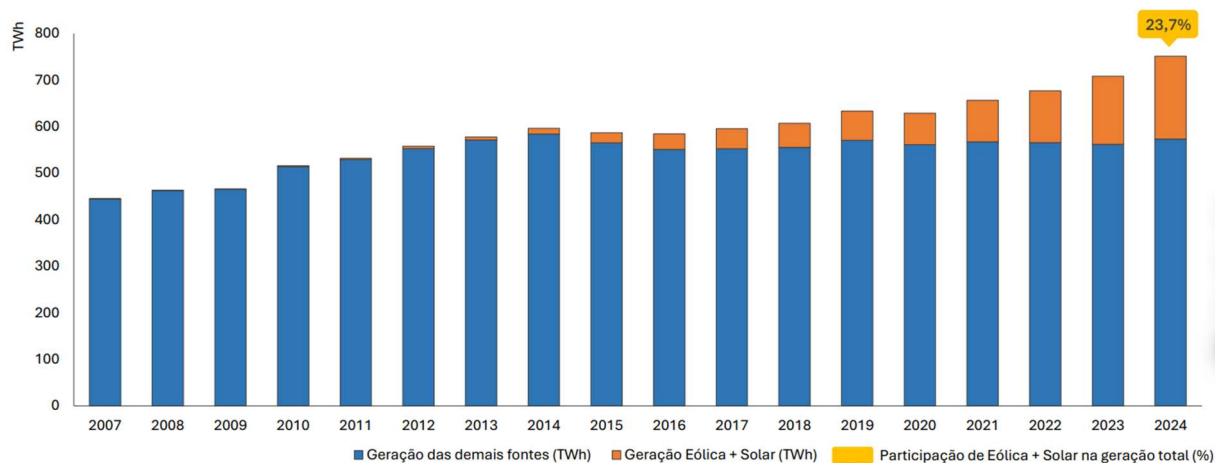


Fonte: Ember (2024).

No Brasil, por exemplo a produção de energia por meio das usinas fotovoltaicas ganham destaque ano, após ano. Segundo o Anuário Estatísticos de Energia Elétrica 2025, as usinas fotovoltaicas obtiveram um crescimento de 28% em 2024, em relação ao ano anterior, além de representar atualmente 23,7% de toda a geração elétrica no Brasil (EPE, 2025).

Figura 3 - Evolução da geração total de eletricidade no Brasil em 2024.

Juntas, a eólica e a solar fotovoltaica representaram 23,7% da geração total de eletricidade no País em 2024, demonstrando a evolução destas fontes na matriz elétrica brasileira.



Fonte: EPE (2025).

Esse grande aumento das fontes de energias renováveis no mundo é bastante importante para o cenário de transição energética mundial, contudo, as fontes de energias renováveis enfrentam alguns problemas, que podem causar um desequilíbrio na matriz energética, que são eles: a sua intermitência, que seria a incapacidade de gerar eletricidade durante o dia inteiro, e a sua falta de armazenamento de eletricidade excedente.

Segundo Hochstetler e Monteiro (2023), o ponto máximo de energia elétrica proveniente dos solares e eólicas em determinados momentos é alto o suficiente, para que a energia seja jogada fora, pois não se consome o que produz. Sendo assim, a energia é vertida por falta de não armazenamento. Essa situação também pode ser chamada de curtailment, que é quando os operadores de energia restringem a transmissão em virtude da pouca demanda. Isso acaba ocasionando um desperdício de energia elétrica, que muitas vezes não possui tecnologia suficiente para ser armazenada para o uso futuro. Esse fator de verter energia ocorre, pois ela precisa ser consumida quase que de forma instantânea, já que não pode ser integralmente armazenada.

Para isso, segundo o Plano Nacional de Energia 2050, (EPE, 2024), é importante a aplicação de tecnologias de armazenamento de energia, para que nos momentos de maior demanda essa energia excedente possa ser armazenada e, conseqüentemente, utilizada posteriormente.

3.2 Hidrogênio Verde como alternativa

Nesse viés, o Hidrogênio Verde, surge como uma fonte de energia promissora, que promete solucionar esse problema das renováveis, permitindo a armazenagem de energia elétrica e a sua passagem para a rede, de uma forma limpa e também segura, por meio da conversão de energia elétrica através da eletrolise.

O hidrogênio verde, pode ser obtido através de fontes de energias renováveis, como eólica e solar fotovoltaica, através de um processo químico chamado eletrólise. Que consegue converter essa energia e armazena-la, ou mesmo produzir combustíveis e baterias, sem que ocorra a emissão de gás carbônico.

Atualmente, são utilizados métodos de armazenamento a partir do carvão, que transforma a energia excedente em grandes pilhas, assim como gás natural, que é armazenado em tubulações e regiões subterrâneas e o armazenamento de petróleo em grandes usinas. Porém, essas fontes de armazenagem podem não ter resultados satisfatórios a longo prazo. Nesse contexto de crescente aumento de fontes renováveis, o Hidrogênio Verde ocupa um lugar promissor para resolução desse problema, sendo apontado como uma solução para o problema de armazenamento de energia. A perspectiva é que seja uma alternativa mais viável, quando comparado aos métodos de armazenagem por meio de energias não renováveis, pois o hidrogênio verde, por ser gerado através de fontes renováveis de energia e eletrolise da água não emite gás poluente ou do efeito estufa, e pode ser armazenado para posteriormente ser usado e injetado na rede. Isso o torna uma alternativa muito mais eficiente e sustentável. (Schneiders et al., 2024).

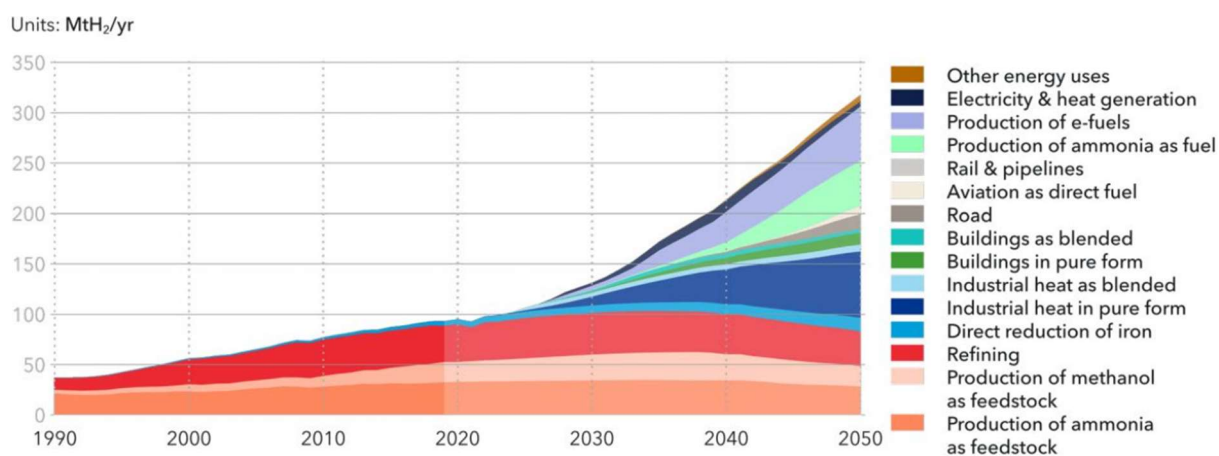
3.2.1 Hidrogênio Verde no Cenário Global

A expectativa é de que até o ano de 2030 aconteça uma evolução significativa na produção de hidrogênio verde, alcançando assim o número de 49 milhões de toneladas produzidas a cada ano, até 2030. Isso significa que terá um aumento em relação aos 38 milhões que eram esperados até essa mesma data (IEA, 2024). A união europeia, por exemplo, possui um plano de produção de 40GW de eletrolisadores de hidrogênio verde até o ano de 2030 (IEA, 2024).

Uma das líderes mundiais no quesito de produção de eletrolisadores para o hidrogênio verde de baixa emissão é a china, que em 2023 correspondia a 60% de toda a produção ativa no mundo. Sendo a Europa e a china correspondentes a 72% de todo hidrogênio produzindo no mundo (IEA, 2024).

A figura abaixo é importante para entendermos o crescimento exponencial do hidrogênio verde no mundo, bem como seus meios de distribuição e finalidade.

Figura 4 - Evolução e previsão da demanda mundial de hidrogênio no mundo.



Fonte: DNV (2022).

O aumento significativo da produção de hidrogenio verde no mundo chama atenção, mas a sua produção ainda não é distribuída de forma satisfatória, pois atualmente 98% de toda a produção é através de combustíveis fósseis, enquanto que o restante é dividido entre o hidrogenio azul e o hidrogenio verde. Apesar disso, O mercado de hidrogênio verde mantém o crescimento, já que atingiu o patamar de 300 milhões de dólares de investimento ainda em 2020. Os investimentos tendem a

aumentar gradativamente. A expectativa é de que no final da década chegue a marca de 10 bilhões de dólares (Eikhan, 2021).

3.2.2 Hidrogênio Verde no Cenário Latino-Americano

Atualmente, a América Latina é uma das regiões que mais utilizam eletricidade gerada por meio de fontes de energia renovável, isso é um ponto positivo, quando se pensa em investimentos relacionados ao Hidrogênio Verde. Desse modo, essa região tem atraído muitos investidores, que possuem o desejo de realizar fortes investimentos para a produção a longo prazo, com o objetivo de realizarem a importação desse hidrogênio.

Dessa forma, atualmente mais de 25 projetos de Hidrogênio Verde de baixa emissão já se encontram em fase inicial de desenvolvimento. Desse modo, pelo menos 11 países já demonstraram o desejo de elaborar estratégias para investirem na produção do hidrogênio. Dentre esses países, o Chile e o Brasil são os mais indicados para investirem, devido aos seus vastos recursos renováveis, e também com políticas abertas de exportação desse produto. (IEA, 2024)

3.2.3 Hidrogênio Verde no Cenário Brasileiro

No Brasil, temos uma situação semelhante ao que ocorre no mundo. A aplicação e implementação do Hidrogênio Verde está em fase inicial, porém, podemos dizer que há muitas oportunidades para se trabalhar e investir. Em agosto de 2023 foi lançado O PNH2 no Plano de Trabalho Trienal 2023-2025. Neste documento, foram elaboradas 65 ações de incentivo ao hidrogênio verde.

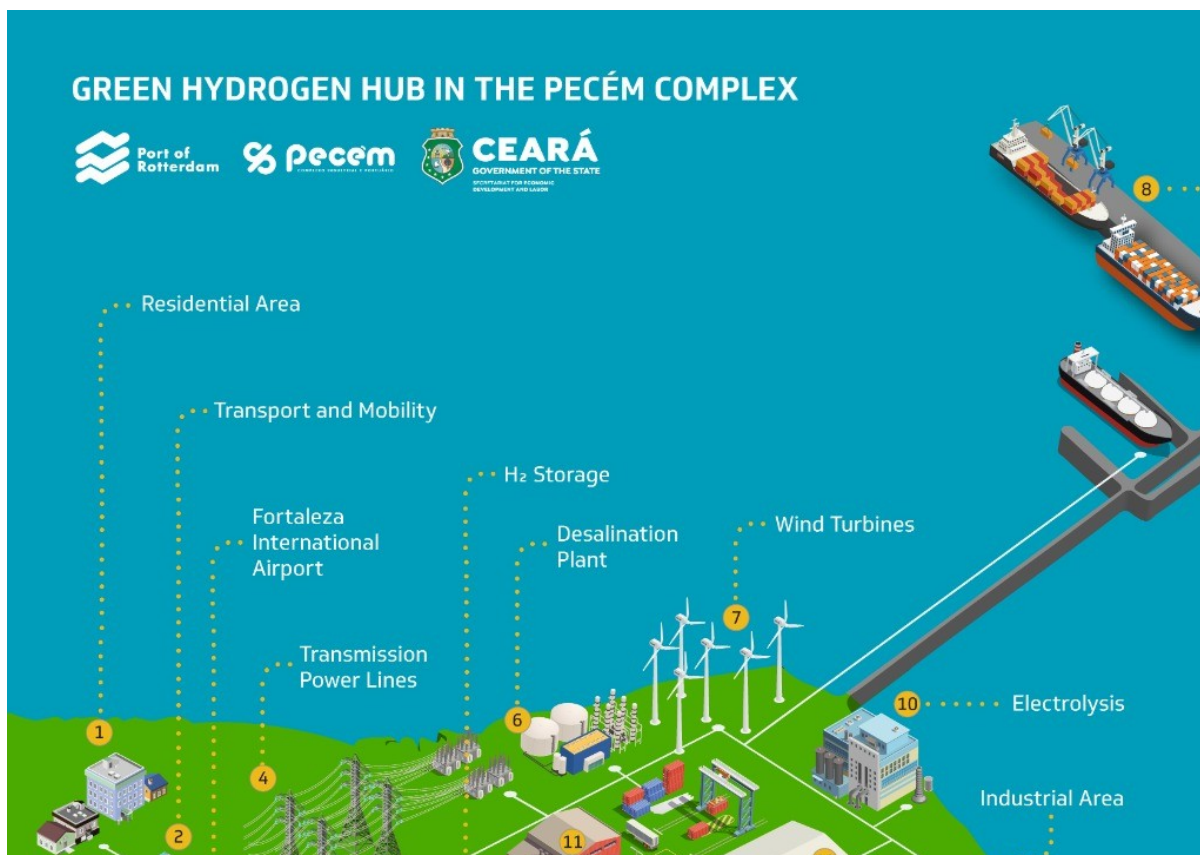
Um dos planos do Ministério de Minas e Energia para o plano de trabalho foi investir forte no hidrogênio verde, com uma meta de aumentar em sete vezes os investimentos anuais, sejam elas em pesquisa, desenvolvimento e inovação. No início de 2020 os investimentos foram de aproximadamente R\$ 29 milhões, então, o objetivo era chegar em R\$210 milhões no ano de 2025. Além disso, foram estabelecidas metas para a criação de plantas de hidrogênio em todas as regiões do território nacional (Brasil, 2023).

Em 2023 a união europeia anunciou a construção de uma usina no litoral do Piauí para a produção de hidrogênio verde. Naquela ocasião, os investimentos passaram de 2 bilhões de euros. Mas naquele mesmo ano, o Brasil já possuía mais de US\$30 bilhões investidos em projetos de hidrogênio verde. (Ministério de Minas e Energia, 2023)

Resultados dos investimentos citados, o Brasil conta com alguns empreendimentos de hidrogênio, seja para fase de estudos ou até mesmo de fabricação. Podemos citar os seguintes: Centro de Hidrogênio Verde (CH2V) Instalado na Universidade Federal de Itajubá, Hubs no Piauí (Porto Piauí – Luís Correia, Teresina e São João do Piauí), e o Hub de Pecém (CE).

Os Hubs de Hidrogênio Verde no Piauí tiveram suas obras iniciadas no ano de 2025, e poderá se tornar a maior usina de hidrogênio do mundo. A obra é fruto de um investimento foi por uma multinacional espanhola chamada Solatio Energia Livre e conta com um investimento inicial de aproximadamente R\$ 27 bilhões. A expectativa é de que a usina produza cerca de 400 mil toneladas de Hidrogênio Verde e 2,2 milhões de toneladas de Amônia Verde por ano, a previsão é de que a usina deva entrar em funcionamento no segundo semestre de 2029. O Projeto do Green Energy Park é uma iniciativa da empresa europeia para a construção de outra usina de hidrogênio no Piauí, com foco também na exportação de Hidrogênio Verde para a Europa (Investe Piauí, (2025); Piauí, (2025)).

O centro de Hidrogênio Verde (CH2V) foi inaugurado em 2023 pelo Ministério de Minas e Energias e é fruto de uma cooperação entre os países Brasil e Alemanha. O laboratório terá alimentação por usinas solar fotovoltaica e servirá como um ambiente para empresas e instituições realizarem testes e pesquisas acerca do hidrogênio de baixa emissão de gás carbônico (EBC, 2023). Ainda assim, temos o Hub de Pecém, que fica localizado no Estado do Ceará e que já está em fase ativa de construção, e já firmou contrato com várias empresas para viabilizar acordos de exportação. Na figura abaixo, pode-se observar a planta do projeto.

Figura 5- Planta do Hub de Pecém

Fonte: Governo do Ceará (2025).

Então, as metas para o Brasil é de que até 2030 seja um dos líderes de produção de hidrogênio verde, sendo um dos fortes candidatos no mundo. Mas para 2035 a perspectiva se tornar uma tecnologia consolidada, a partir da construção e maturação de hubs de hidrogênio, para que seja possível integrar o elemento na nossa matriz energética, bem como integra-lo com as demais etapas de armazenamento e transporte, para que assim, seja possível fomentar a economia nacional. (Brasil, 2023).

3.2.4 Desafios

A dificuldade de implementação do hidrogênio verde no Brasil, assim como no restante do mundo se passa por algumas questões pertinentes. Devido ao alto investimento inicial para implementar usinas/hubs de hidrogênio, muitas vezes torna-se difícil obter investidores para alavancarem os projetos. Apesar de seus inúmeros

benefícios, tanto operacional quanto sustentável, ainda é uma tecnologia cara de ser produzida. Portanto, para que essa tecnologia seja implementada de forma célere, é necessário avanços tecnológicos na produção, como nos equipamentos e na parte de distribuição, como o transporte e o armazenamento, por exemplo. Apesar disso, muitos países adotam políticas públicas e marcos regulatórios para que essa nova modalidade de produção de energia se concretize. Aliado a isso, percebemos muitos investimentos dos setores privados (BEZERRA, 2021).

Atualmente, embora a produção de hidrogênio por meio de eletrólise corresponda a aproximadamente 5% de toda a produção, espera-se que até 2050, 25% de todo o Hidrogênio Verde produzido seja por meio de eletrólise. Portanto, torna-se necessário que a escolha do conversor retificador seja o mais preciso possível, visto que cada retificador reage de uma maneira diferente com o eletrolisador. A escolha adequada de um retificador pode aumentar a eficiência do sistema, assim como a má escolha pode ocasionar problemas no processo de fabricação.

Portanto, a partir desse pensamento, torna-se essencial analisarmos os tipos de retificadores, para que a partir de sua análise, seja possível encontrar vantagens e desvantagens em cada topologia e, então, implementar de modo correto ao conversor desejado.

3.3 Retificadores trifásicos

A utilização do retificador no processo de fabricação do Hidrogênio Verde é parte essencial, pois os eletrolisadores que produzem o hidrogênio necessitam de um fornecimento de corrente contínua. Contudo, a energia elétrica que é fornecida para a realização do processo é encontrada na forma de corrente alternada, pois é proveniente da rede elétrica, derivada da produção a partir de fontes de energias renováveis. Nesse caso, os retificadores assumem um papel fundamental, pois realizam a conversão de Corrente Contínua (CC) para Corrente Alternada (CA).

Segundo Santana et al. (2023), como a eletrolise é um processo que demanda muita energia, faz-se necessário investir em conhecimento no seu processo de produção, tanto nos eletrolisadores, quanto nos conversores que utilizados para transformar a corrente. Então, faz-se necessário, entender de forma mais clara como

os conversores de potência reagem com a carga, pois de acordo com a escolha de um conversor, alguns problemas podem ser apresentados no sistema, como por exemplo, alteração do fator de potência.

Geralmente, os retificadores são abordados em dois grupos, são eles: retificadores monofásicos e retificadores trifásicos. Para a realização deste trabalho, é preciso aprofundar o conhecimento nos retificadores trifásicos, pois são o tipo mais utilizados para esse tipo de operação. (Rashid, 2014)

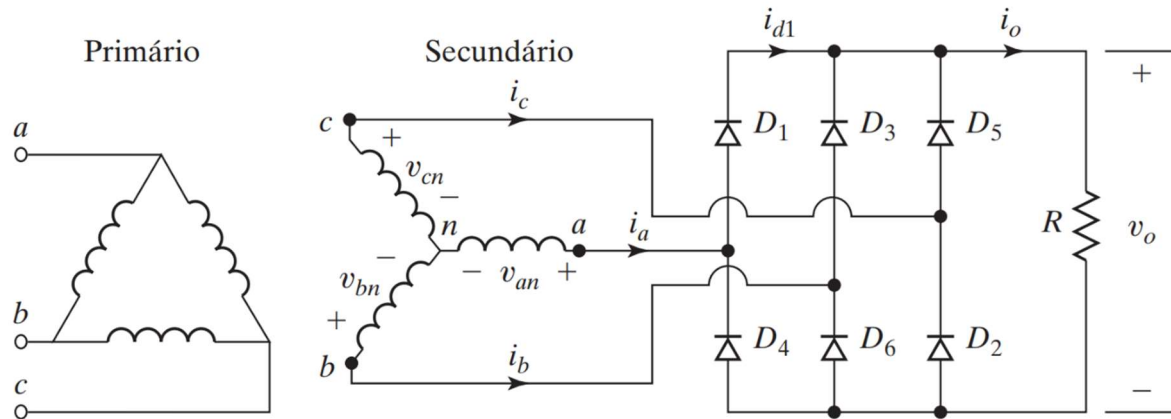
Ainda nesse grupo de retificadores trifásicos, podemos abordar dois tipos distintos de retificadores trifásicos, mas que realizam a mesma função, eles são denominados de retificadores controlados e não controlados. Os retificadores não controlados, são caracterizados pela utilização de diodos, posicionados em pontes. Enquanto que os retificadores controlados, são utilizados tiristores, definidos em ângulos. (Rashid, 2014)

A diferença e rendimento dos retificadores varia de acordo com a proposta de sua aplicação. Por exemplo. Os retificadores a tiristor são recomendados para circuitos de alta tensão, pois são mais fáceis de serem controlados pela sua corrente de saída, já que pode ser ajustada pelo ângulo de disparo dos tiristores. Os retificadores trifásicos a diodo também são recomendados para plantas de alta potência, porém, pode-se apresentar resultados menos eficientes, quando comparado ao tiristor. (Yodwong et al. ,2020)

A partir disso, é essencial analisar as topologias e diferenças entre retificadores trifásicos controlados e não controlados, para que seja mais fácil de compreender e comparar os dois tipos de retificadores.

3.3.1 Retificadores trifásicos não controlados

O retificador trifásico não controlado, é feito a partir de uma ponte de diodos e pode ou não ser necessário o uso de transformadores na interface para que o processo seja realizado. Sua forma de saída, como podemos observar na figura tal é uma forma de onda senoidal de 6 pulsos.

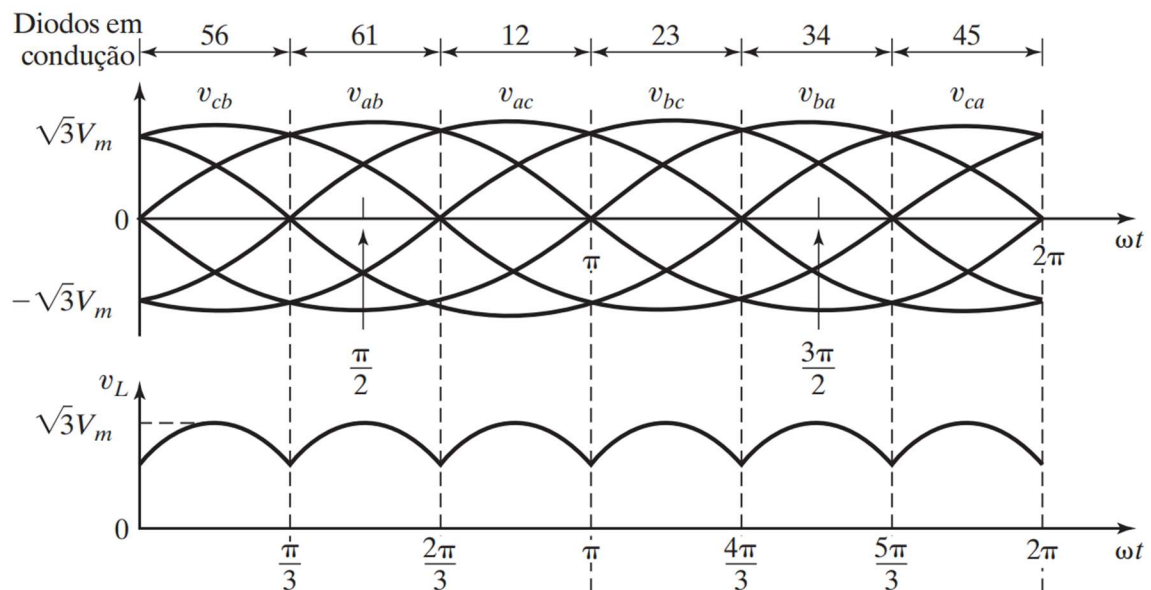
Figura 6 - Retificador Trifásico 6 pulsos a diodo.

Fonte: Rashid (2014).

A etapa de operação desse circuito ocorre da seguinte forma: primeiro a corrente que passa pelo transformador adentra na ponte de diodos, a sequência de condução para os diodos ocorre da seguinte forma:

$$D_1 \rightarrow D_2, D_3 \rightarrow D_2, D_3 \rightarrow D_4, D_5 \rightarrow D_4, D_5 \rightarrow D_6, D_1 \rightarrow D_6 \quad (1)$$

Dessa forma, a condução ocorre quando os pares de diodos estiverem conectados entre o par da linha de maior tensão instantânea, ou seja, quando houver o pico de tensão. Assim, cada diodo conduz 120° , e sua comutação ocorre a cada 60° .

Figura 7 - Formas de onda e tempos de condução dos diodos.

Fonte: Rashid (2014).

Dessa forma, a tensão de linha é a relação entre raiz de três ($\sqrt{3}$) e a tensão de fase da rede elétrica. Portanto, como podemos ver, a forma de onda e os tempos de condução podem ser descritas pelas seguintes equações, onde V_p é a tensão de pico:

$$V_{an} = V_p \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

$$V_{bn} = V_p \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (3)$$

$$V_{cn} = V_p \cdot \text{sen}(\omega t - 240^\circ) \quad (4)$$

3.3.2 Retificadores trifásicos controlados

Retificadores trifásicos controlados possuem grande diferença quando comparados aos não controlados. Uma grande diferença é que retificadores com diodos fornecem uma tensão de saída fixa, mas os retificadores tiristorizados conseguem controlar a corrente de saída, alterando e variando os valores do ângulo de disparo dos tiristores. (Rashid, 2014)

O ângulo de disparo dos retificadores controlados é justamente o intervalo entre o ângulo de polarização e a aplicação de um pulso (gate), portanto se o valor do ângulo de disparo for nulo, então o retificador se comportará como um retificador não controlados (Hart, 2012).

Além disso, os retificadores controlados a tiristores são relativamente mais baratos quando comparados aos retificadores a diodo, e mesmo assim conseguem manter uma taxa de eficiência acima dos 95%. Eles também podem ser divididos em conversores monofásicos ou trifásicos, mas ainda assim, podem ser divididos em outros subgrupos: como semi-conversor, conversor completo e dual conversor. (Rashid, 2014)

Mas neste trabalho trataremos do conversor trifásico conversor completo. Os conversores trifásicos são principalmente utilizados em projetos de alta potência, na faixa de até 120kW. (Rashid, 2014)

Dessa forma, podemos entender o seu modo de operação da seguinte maneira: A corrente alternada de entrada é controlada por um par de tiristores, que realizam a condução e direcionam a corrente até a carga. Isso acontece porque cada par de tiristores permite a passagem de corrente apenas do ânodo (positivo) para o cátodo (negativo). Assim, somente a parte positiva da tensão é conduzida, já que os tiristores só entram em condução quando a tensão da fonte fica positiva (RASHID, 2014). Dessa forma, o intervalo de ligação entre os pares de tiristores pode ser dado por $\pi/3$, enquanto que sua frequência de ondulação pode ser calculada por seis vezes a corrente da fonte ($6f_s$).

A divisão dos intervalos de ligação dos tiristores ocorrem da seguinte forma:

1° Intervalo:

$$\omega t = \frac{\pi}{6} + \alpha \quad (5)$$

Nesse intervalo, podemos dizer que os tiristores T_1 e T_6 estão conduzindo.

2° Intervalo:

$$\omega t = \frac{\pi}{2} + \alpha \quad (6)$$

Nesse intervalo liga-se o T_2 e o T_6 é polarizado de forma negativa imediatamente. Nesse caso, devido a essa polarização reversa, eles não podem conduzir, mesmo que recebessem pulso de gate.

Eles permanecem em bloqueio aguardando o momento em que a tensão da fase fique positiva novamente.

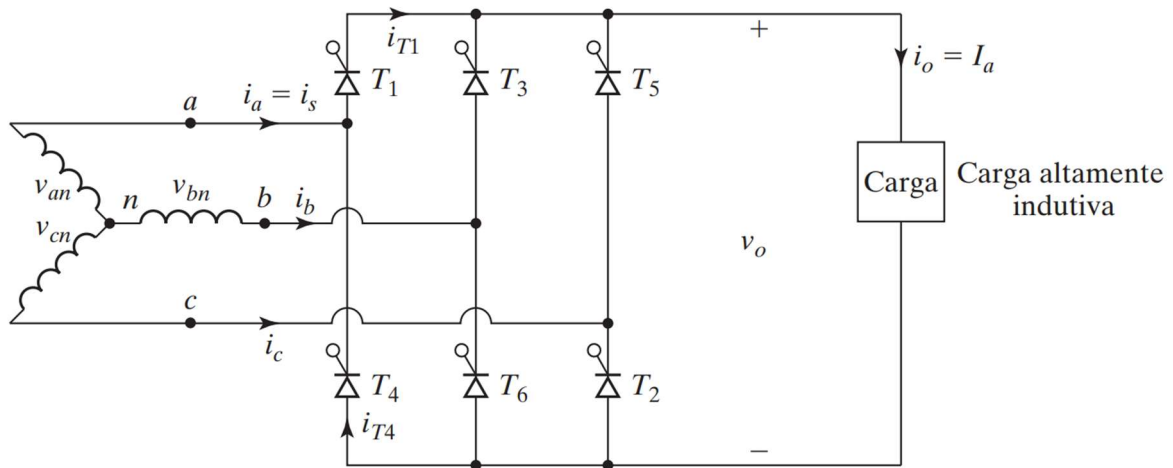
3° Intervalo:

$$\left(\frac{\pi}{2} + \alpha \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6} + \alpha\right) \quad (7)$$

Nesse intervalo o T_1 e o T_2 conduzem corrente, pois estão ligados e podemos medir a tensão de linha. O par de tiristores correspondente é acionado pois recebem

o pulso no ângulo de disparo. Ao serem acionados, eles passam a conduzir corrente até a carga.

Figura 8 - Conversor trifásico completo. (a) Circuito.

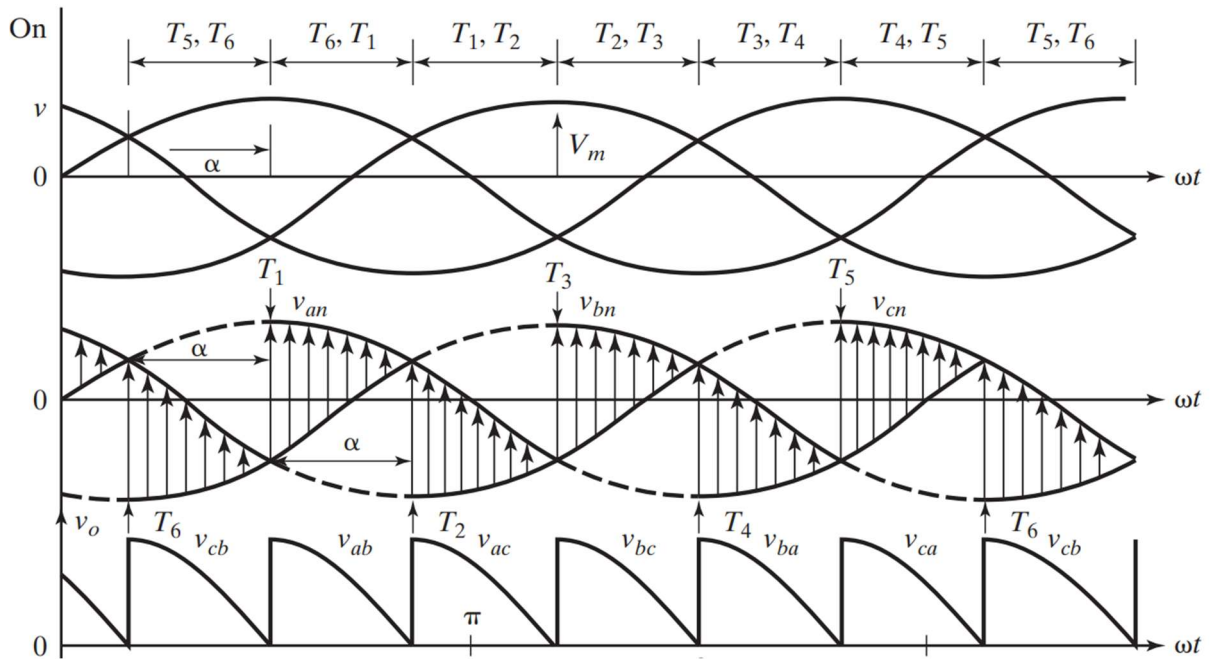


Fonte: Rashid (2014).

Dessa forma, o comportamento dos tiristores é de modo que um SCR conduzirá na parte superior e outro SCR conduzirá na parte inferior, nunca conduzirá dois SCR da parte superior ou inferior simultaneamente. Portanto, cada intervalo teremos um par de SCR conduzindo por pelo menos 120° . Como vemos na figura 9, cada sinal senoidal, se trata de uma tensão de linha.

Como a rede trifásica fornece tensões senoidais, nós temos a superposição de três fontes de tensões senoidais, que se multiplicam através da tensão de linha e da comutação entre os pares de tiristores. Desse modo, o retificador anula as correntes negativas, e seleciona sempre os maiores intervalos positivos das tensões de linha. Por isso, o formato de onda não fica parecido com uma senoide, mas sim como um “dente de serra”.

$$T_5, T_6 \rightarrow T_6, T_1 \rightarrow T_1, T_2 \rightarrow T_2, T_3 \rightarrow T_3, T_4 \rightarrow T_4, T_5 \rightarrow T_5, T_6 \quad (8)$$

Figura 9 - Conversor trifásico completo formas de onda.

Fonte: Rashid (2014).

Logo, podemos definir as tensões de fase a partir das seguintes equações:

$$V_{an} = V_p \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (9)$$

$$V_{bn} = V_p \cdot \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (10)$$

$$V_{cn} = V_p \cdot \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (11)$$

E as tensões de linha a partir delas:

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = \sqrt{3} \cdot V_p \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad (12)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = \sqrt{3} \cdot V_p \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (13)$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = \sqrt{3} \cdot V_p \text{sen}\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right) \quad (14)$$

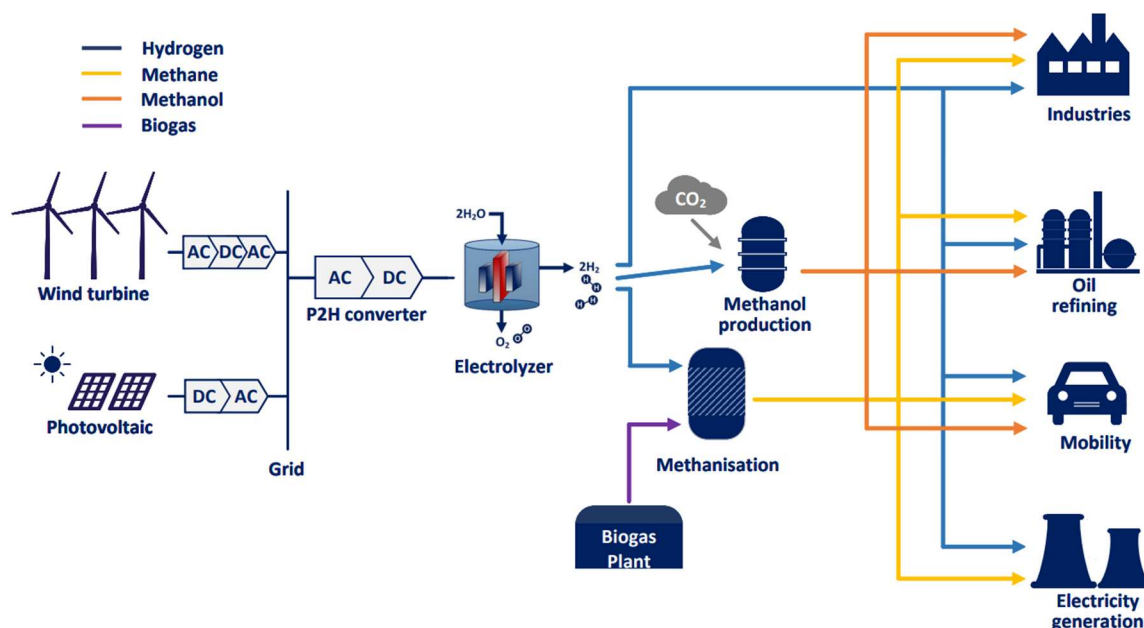
4 - ANÁLISE QUANTITATIVA E QUALITATIVA A CERCA DO CONVERSORES PROPOSTOS

A literatura nos mostra diversos tipos de conversores para a produção de hidrogênio verde, com finalidades e propostas dos mais variados tipos. Para esse trabalho, abordamos dois tipos de conversores de alta potência utilizados na produção de Hidrogênio Verde. O primeiro, trata-se de um conversor com retificador de 12 pulsos a tiristor, com filtro passivo na entrada. Enquanto que o segundo é um conversor com retificador a diodo com um chopper multifásico também de 12 pulsos. Ambos os modelos possuem a mesma finalidade, que é de converter a corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC). Porém, possuem patologias e características distintas, que podem influenciar positivamente ou negativamente o rendimento da fabricação do hidrogênio.

A fonte de tensão que é disponibilizada no circuito para produzir o Hidrogênio Verde vem de fontes renováveis, na grande maioria dos casos de turbinas eólicas e de usinas fotovoltaicas de médio e grande porte, que são conectadas a rede. (Chen et al., 2022)

De forma geral, precisamos entender qual é o caminho percorrido pela corrente até chegar ao retificador, onde é feito o processo de conversão da corrente para a produção do hidrogênio. Dessa forma, a partir da figura 10, vamos entender todos os passos.

Figura 10 - Planta hidrogênio verde.



Fonte: Chen et al. (2022).

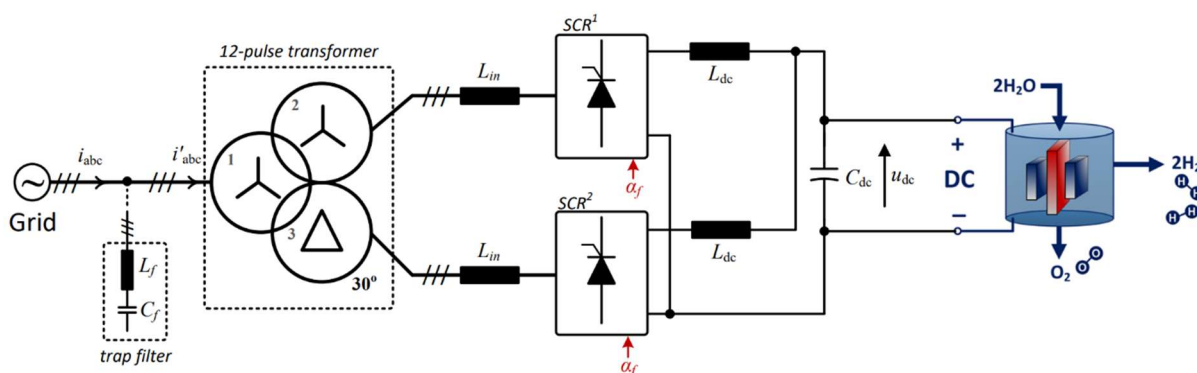
Primeiramente, temos essa energia sendo gerada e injetada na rede elétrica comum, de média ou alta tensão. Após isso, passa por um conversor de frequência CA/CC/CA quando é o caso de produção a partir de eólicas, ou por um inversor CC/CA, para casos de produção através energia solar fotovoltaica. Posteriormente, essa energia chega na forma de corrente alternada em um *P2H Converter*, que seria a combinação de transformadores, filtros e retificadores, que juntos contribuem para que essa corrente seja tratada de forma a ter uma corrente contínua na saída do retificador. A última etapa é quando essa corrente retificada chega ao eletrolisador, onde é realizado o processo de eletrolise, para que possa ser armazenada, distribuída ou convertida em outros elementos químicos, como o metanol e metano, por exemplo, bem como utilizada para fins diversos. (Chen et al., 2022)

A partir desse entendimento, podemos analisar os conversores mais utilizados na fabricação de Hidrogênio do tipo “Verde”. Com base na literatura, foram analisados diversos tipos de conversores, mas para o presente trabalho, apenas dois foram selecionados. Devido serem tecnologias mais maduras e de maior acervo bibliográfico, os conversores trifásicos de 12 pulsos a tiristor e o de 12 pulsos a diodo com chopper, foram escolhidos para serem investigados.

4.1 Conversor de 12 pulsos a tiristor (12-TR)

Para entendermos toda a parte de funcionamento e operação deste conversor, primeiro precisamos analisar cada parte/componente dele. Dessa forma, podemos representar o primeiro retificador proposto na figura 11:

Figura 11- Tiristor 12 pulsos.



Fonte: Chen et al. (2022).

Inicialmente, podemos ver que existe um *trap filter*, que são filtros de armadilha sintonizados de modo a atenuar as 11ª e 13ª harmônicas. Eles são bastante utilizados na configuração de retificadores de 12 pulsos a tiristor, devido as altas tensões de entrada. Outra alternativa que pode ser eficaz, é implementar um filtro passa-alta em paralelo, para que seja possível reduzir harmônicos presentes em circuitos de alta potência. (Chen et al., 2022)

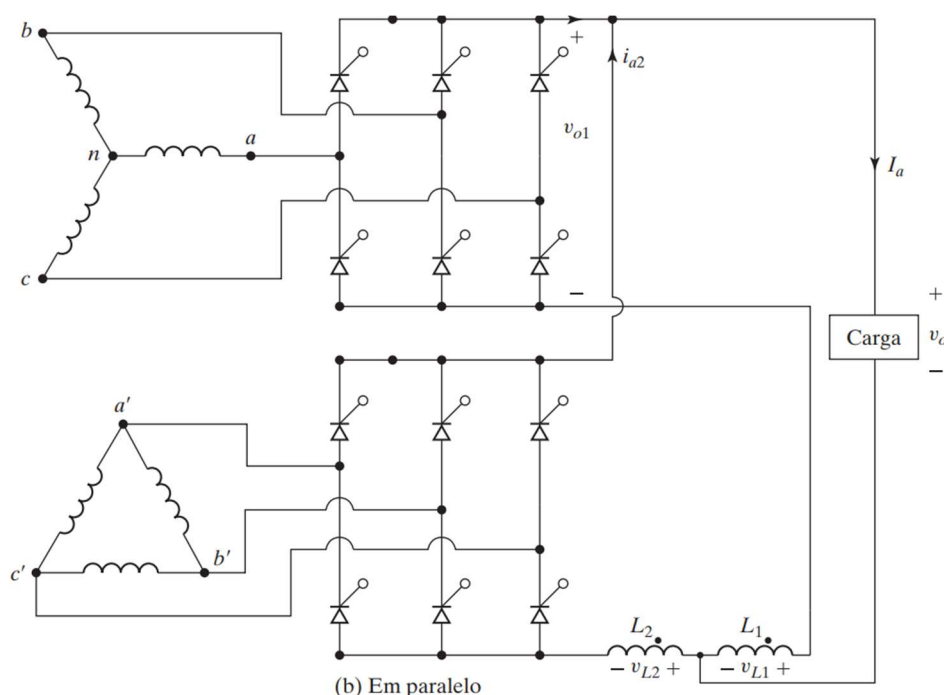
Durante o projeto de um conversor de alta potência, é necessário que aconteça um prévio estudo acerca dos harmônicos, para que o filtro possa ter um rendimento mais eficiente, visto que além de reduzir os harmônicos, os filtros atuam como um compensador de toda a potência reativa, devido os retificadores a tiristor atuarem com baixo FP. Essa alta potência reativa pode ser um problema, pois pode ocasionar um FP abaixo do esperado e ocasionar ângulos de disparo mais altos. Por isso, é essencial um *trap filter* na entrada. (Rodríguez et al. 2005; Solanki et al. 2013)

Logo após o filtro de entrada, é inserido um *12-pulse transformer* que é normalmente utilizado na configuração de estrela-triângulo-estrela. Essa medida é pensada no intuito de remover mais harmônicos, porém de 5ª e 7ª ordem. (Chen et al., 2022)

Outra função do transformador na entrada do retificador é de ser um elemento abaixador ou levantador de tensão. Dessa forma, o transformador de 12 pulsos é muito importante, para que em circuitos de alta tensão o fator de potência e o controle de corrente e tensão sejam adequados da melhor forma possível para que o processo seja realizado de forma mais eficiente. Ademais, o uso de transformadores é uma alternativa mais acessível para resolver essas questões. Além disso, ao reduzir os harmônicos, a forma senoidal da tensão de saída torna-se mais definida e estável. Costa Neto, Godoi e Freitas (2016). Para que ainda sejam reduzidos mais harmônicos, imediatamente após o transformador, se utiliza um indutor de saída para que o cancelamento de harmônicos possa se tornar mais satisfatórios. (Solanki et al., 2013).

Posteriormente, temos a etapa que dá sentido ao trabalho, que é a etapa de retificação da corrente, processo que converte a corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), que servirá para alimentar os eletrolisadores que produzem o Hidrogênio Verde.

Figura 12 - Tiristor 12 pulsos conectados em paralelo.



Fonte: Rashid (2014).

O circuito elétrico de um retificador de 12 pulsos, nada mais é do que a combinação de dois retificadores de 6 pulsos, que podem ser conectados em série ou em paralelo. Basicamente, o circuito do retificador proposto é representado em uma

organização paralela, ambas conectadas e acopladas nas interfaces dos transformadores.

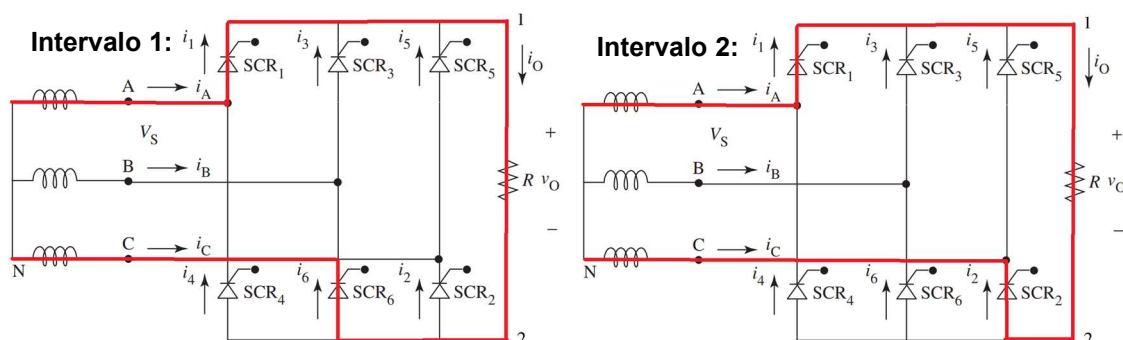
Deste modo, um retificador de 6 pulsos é conectado ao componente delta-delta e o outro é conectado na interface delta-estrela, mas ambas as pontes de tiristores estão em paralelo. A escolha do tipo de conexão entre as pontes é importante para a finalidade do conversor. Para aumento de corrente na saída, ou seja, na carga, o ideal é a escolha da conexão paralela entre as pontes, enquanto que a conexão em série, ocasiona uma elevação da tensão na saída do retificador.

O modo de operação dele funciona basicamente igual ao retificador de 6 pulsos controlado, porém agora com a adição de outra ponte, ou seja, as duas pontes funcionam simultaneamente. A defasagem comum entre eles é de $\pi / 6$ (ou 30°), pois 360° dividido por 12 pulsos é igual ao ângulo de disparo de 30° . Como o retificador é de 12 pulsos, podemos dizer que há 12 tensões de linha, uma em cada par de tiristor. Essa defasagem é essencial para que os pulsos sejam intercalados até atingirem 360° , quando o processo se reinicia. (Yodwong et al. 2020; Costa Neto, Godoi e Freitas 2016).

O modo de operação do retificador trifásico controlado pode ser definido em intervalor. Os intervalos de condução dos componentes tiristores ocorrem em pares. Portanto, em circuitos de ponte trifásica totalmente controlada, que é composta por seis tiristores, sempre dois dispositivos conduzem simultaneamente, sendo um pertencente à parte inferior e outro à parte superior da ponte.

Desse modo, podemos definir seis intervalos de condução para o funcionamento correto do retificador.

Figura 13 – Intervalos de operação 1 e 2 tiristor

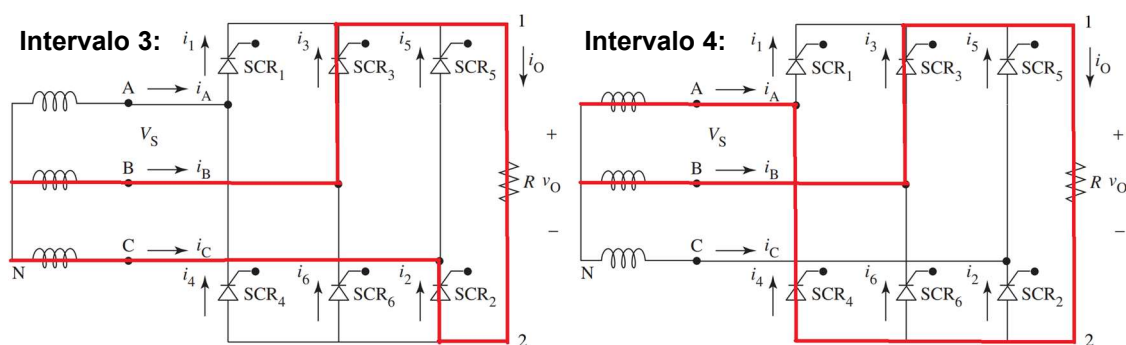


Fonte: Adaptado do Ahmed (2000).

No primeiro intervalo (Intervalo 1) temos que no instante correspondente ao valor de 0° , o SCR1 é disparado, entrando em condução, o que provoca o desligamento do SCR5. O primeiro estágio está entre os ângulos de 0° e 60° , logo, a maior tensão de linha é V_{AB} . Dessa forma, os SCR's 1 e 6 permanecem conduzindo, alimentando a carga com a tensão V_{AB} .

No segundo intervalo (Intervalo 2), é atingido o valor de 60° do ângulo de disparo, e o SCR2 é acionado, ocasionando o desligamento do SCR6. Então, após isso, durante o intervalo de 60° e 120° , a tensão de linha passa a ser V_{AC} . Assim, os SCR's 1 e 2 entram em condução, e a tensão V_{AC} é aplicada à carga.

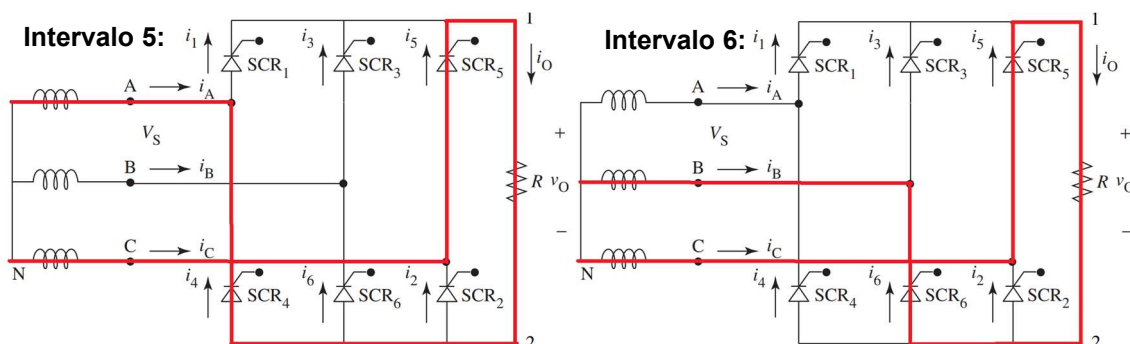
Figura 14 – Intervalos de operação 3 e 4 tiristor



Fonte: Adaptado do Ahmed (2000).

No terceiro intervalo (Intervalo 3), ocorre o disparo do SCR3 em 120° , ocasionando o desligamento do SCR1. E no intervalo de 120° a 180° , a tensão V_{BC} torna-se a maior tensão de linha, sendo fornecida a carga através dos tiristores SCR's 2 e 3, que conduzem nesse período.

No quarto intervalo (Intervalo 4), o SCR4 é acionado em 180° , ocasionando o desligamento do SCR2. Portanto, entre 180° e 240° , a tensão de linha é V_{BA} e a mais elevada, e os tiristores SCR's 3 e 4 são os responsáveis de conduzi-la à carga.

Figura 15 – Intervalos de operação 5 e 6 tiristor

Fonte: Adaptado do Ahmed (2000).

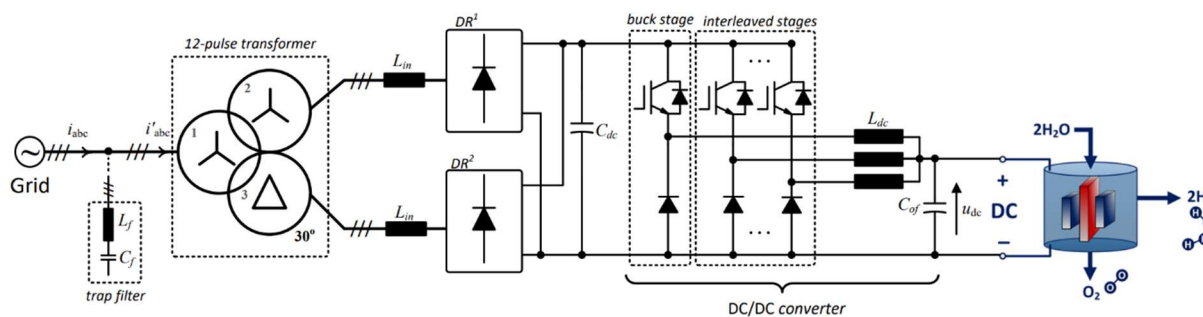
No quinto intervalo (Intervalo 5), o SCR5 entra em condução a partir de 240° e consequentemente levando ao desligamento do SCR3. Logo, no intervalo de 240° a 300° , a tensão aplicada a carga pelos SCRs 4 e 5 é a V_{CA} , devido estar polarizada positivamente e atingir o maior valor de linha.

O sexto e último intervalo (Intervalo 6), inicia-se ao ser atingido o valor de 300° de ângulo, quando se dispara o SCR6 e a interrupção de condução do SCR4. Portanto, entre 300 e 360° , que é o último intervalo, a tensão que alimenta a carga é a tensão de linha V_{CB} , que é percorre os SCRs 5 e 6.

Sendo assim, quando o ciclo de operação se encerra em 360° , o SCR1 dispara e o processo é realizado novamente. Dessa forma, o conversor realiza todo o processo de retificação da corrente e envia para o eletrolisador uma corrente contínua pronta para a etapa de produção. Para esse retificador em específico o ângulo de disparo dos tiristores passa a ocorrer 30° após o ponto natural de condução.

4.2 Conversor de 12 pulsos a diodo com chopper multifásico (12-DRMC)

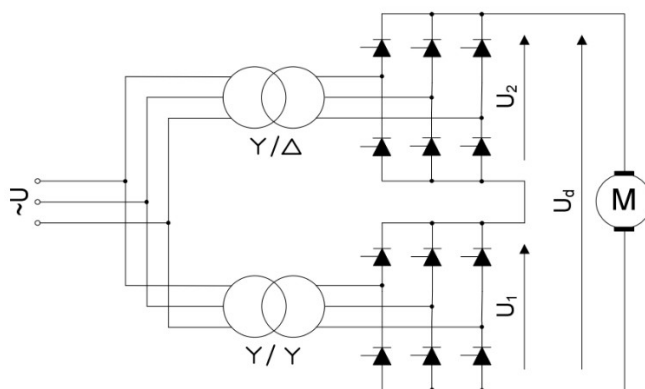
O outro tipo de conversor é o de 12 pulsos a diodo com chopper multifásico. Este tipo de retificador foi desenvolvido com a proposta de melhorar o problema do baixo fator de potência do retificador a tiristor. Portanto, na maior parte da faixa de frequência, esse retificador atua com o fator de potência unitário, dessa forma, não é necessário incluir circuitos adicionais para compensar problemas de potência reativa.

Figura 16 - Tiristor 12 pulsos a diodo com chopper multifásico

Fonte: Chen et al. (2022).

De forma análoga à análise do retificador tiristor de 12 pulsos, o retificador a diodo possui diversas similaridades, principalmente nas etapas principais. Da saída da rede até a entrada no retificador a diodo, o funcionamento é basicamente o mesmo, sendo colocados *trap filter* para reduzir e eliminar harmônicos de ordem ímpar, com o transformador estrela-delta-estrela também utilizado, ambos defasados em um ângulo de 30° , e na maioria dos casos um indutor na saída do transformador.

Porém, o modo de operação de um conversor a diodo é totalmente diferente quando comparado ao tiristor, mesmo que contenham o mesmo objetivo que é de converter a corrente alternada em corrente contínua. A sua estrutura é feita de duas pontes de 6 diodos em paralelo, totalizando 12 diodos, com cada ponte funcionando de forma independente retificando a tensão de cada transformador. O transformador nesse caso, torna-se essencial, visto que ao conectar as duas pontes de diodo, ele fará com que a tensão de saída seja a média das tensões retificadas na ponte um e dois. Yodwong et al. (2020)

Figura 17 - Retificador 12 pulsos a diodo

Fonte: Hyla (2022).

Passado o circuito retificador, temos ainda uma etapa de CC/CC converter que conta com um estágio buck e estágios intercalados, que são essenciais para o uso em circuitos de alta potência. Essa etapa, pode ser representada como um bloco de chopper multifásica, que são diversos estágios de *buck* inseridos em paralelo ou em série. Essa etapa é importante para que a ondulação (*Ripple*) seja atenuada, tendo em vista que o retificador a diodo não possui um controle tão preciso da tensão de saída, quando comparado ao retificador a tiristor. Então neles, temos a implementação de pontes de IGBT'S de Silícios (SI) e diodos de roda livre. Eles são organizados de forma intercalada, em paralelo ou série, para que a corrente de saída do retificador seja mais atenuada, por isso dá-se o nome de DC/DC converter. Chen et al. (2022)

O *buck stage* é uma aplicação muito conhecida em retificadores não controlados, mas atua de modo muito importante, pois é um estágio regulador de tensão, que faz com que a tensão média de saída seja menor do que a da entrada. Eles utilizam Transistores Bipolares de Junção (BJT), que realizam o papel de serem um conversor abaixador. (Hart, 2012).

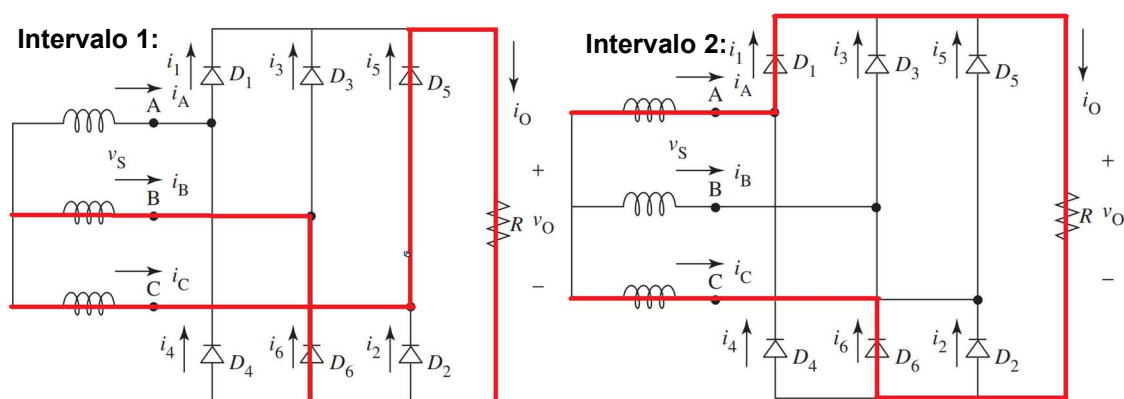
Cada seção de *chopper* pode ser composta por diversos múltiplos do mesmo até atingir a corrente de saída ideal para o circuito. Além disso, cada seção de *chopper* possui um circuito de descarga. A vantagem de usar *chopper*, é que em cada seção a corrente é controlada, de modo que a utilização de secundários do transformador seja opcional.

O seu modo de funcionamento baseia-se nos intervalos de comutação da ligação dos transistores, portando, quando o transistor é ligado, ele é submetido a uma tensão diferencial, que faz com que a corrente de entrada percorra da fonte de tensão até a carga. Durante o período que o transistor está acionado, ele armazena energia em seu campo magnético, enquanto o diodo está desligado. Portanto, quando a operação contrária ocorre, ou seja, quando o BJT é desligado, a energia que estava armazenada no campo magnético faz com que a mudança de condução não sofra bruscas alterações. Então, nesse caso, quando a chave é ligada ocorre um aumento linear da corrente para a carga, enquanto que quando é desligado, a corrente não é interrompida imediatamente, mas sim, diminui linearmente.

Existe uma grande similaridade da operação e funcionamento dos retificadores a tiristores e a diodos, mas podemos definir que principalmente, o modo de operação do retificador a diodo ocorre da seguinte forma:

- Dois diodos posicionados em série conduzem, enquanto os demais permanecem interrompidos.
- De forma organizacional pode-se definir um grupo ímpar de diodos e outro par, que conduzem um de cada grupo.
- Cada diodo conduz por 120° .
- A corrente flui do terminal mais positivo da fonte através de um diodo.

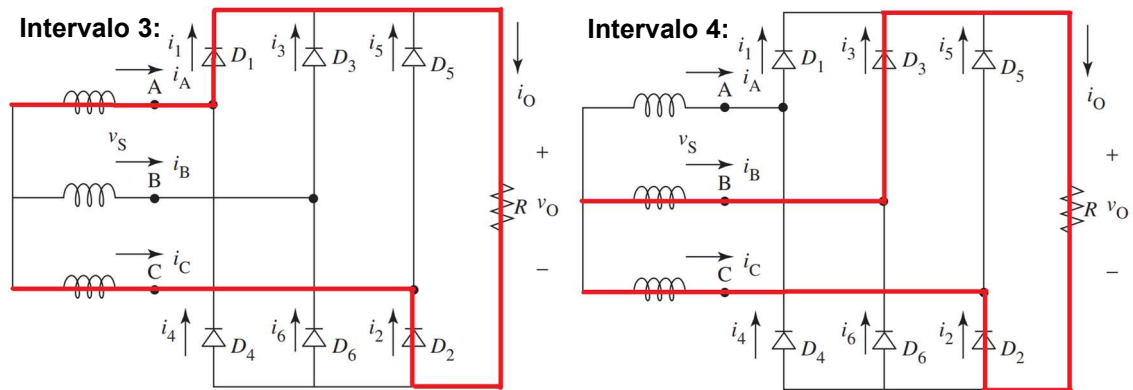
Figura 18 – Intervalos de operação 1 e 2 diodo



Fonte: Adaptado do Ahmed (2000).

No primeiro intervalo (Intervalo 1), temos que o diodo D5 entra em condução, juntamente com o diodo D6. Portanto, a corrente percorre o D5 e chega à carga através do D6, quando a maior tensão de linha for V_{CB} .

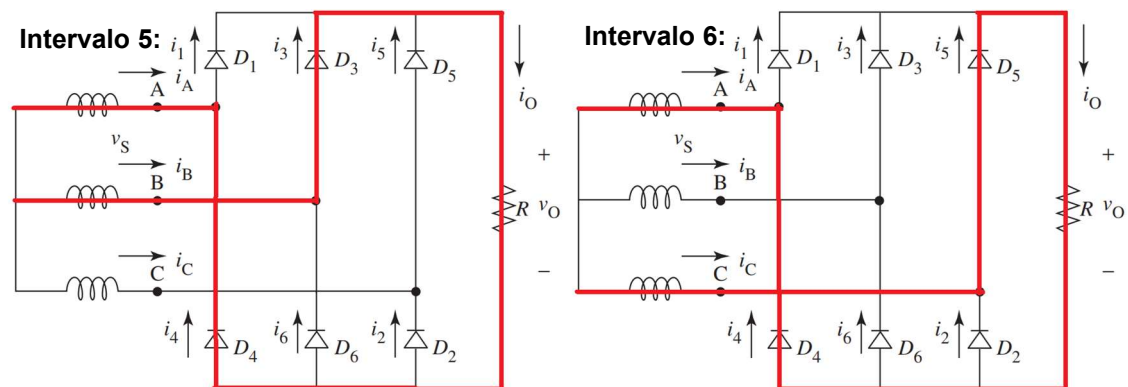
No segundo intervalo (Intervalo 2), temos a mudança de ângulo que faz com que a fase A se torna a mais positiva, enquanto a fase B permanece como a mais negativa. Portanto, nesse exato momento, o diodo D1 entra em condução substituindo o D5, enquanto o D6 continua conduzindo. Então, quando a tensão de linha V_{AB} for superior, a carga receberá tensão através de D1 e D6.

Figura 19 – Intervalos de operação 3 e 4 diodo

Fonte: Adaptado do Ahmed (2000).

No terceiro intervalo (Intervalo 3), a fase A se torna mais positiva. Nesse instante, o diodo D2 entra em condução substituindo o D6, enquanto o D1 continua conduzindo. A corrente, então, passa pelo D1, pela carga, e retorna pela fase C através do D2. A maior tensão de linha será V_{Ac} .

No quarto intervalo (Intervalo 4), A fase B é a mais positiva. O diodo D3 entra em condução na ponte superior, enquanto o D2 continua conduzindo na ponte inferior. A corrente flui da fase B, através do D3, da carga, e retorna pela fase C através do D2. A maior tensão de linha é V_{BC} .

Figura 20 – Intervalos de operação 5 e 6 diodo

Fonte: Adaptado do Ahmed (2000).

No quinto intervalo (Intervalo 5) a fase B continua como a mais positiva, enquanto a fase A passa a ser a mais negativa. O diodo D3 permanece conduzindo, e o D4 entra em condução substituindo o D2, que é interrompido. Nesse instante, a maior tensão de linha aplicada é V_{BA} .

No sexto intervalo e último intervalo (Intervalo 6), a fase C é a mais positiva e a fase A mais negativa. Então, o diodo D5 entra em condução na ponte superior, enquanto o D4 continua conduzindo na ponte inferior. E a maior tensão na carga é V_{CA} . Após isso, todo o processo é reiniciado

Logo, os retificadores a base de diodo têm como vantagem uma menor complexidade na ponte retificadora, já que conta com diodos, que não necessitam diretamente de um comando ou ângulo de disparo para funcionar. Porém, para esse determinado conversor, utiliza-se ferramentas de controle adicionais, como por exemplo um *chopper* multifásico, que são importantes, pois a corrente que chega ao eletrolisador pode ser controlada a partir da tensão e da corrente. (Yodwong et al., 2020)

Neste caso, torna-se importante realizar uma comparação entre os conversores para a produção de hidrogênio verde, para que possa ser definido qual tecnologia utilizar, visto que retificadores a tiristores e a diodo possuem topologias e características diferentes.

4.3 Comparação

Atualmente, podemos dizer que a configuração mais utilizada dos conversores de alta potência para a eletrólise são alimentados por retificadores a tiristor. Devido a sua alta capacidade de corrente, eles conseguem se adequar muito bem às condições pedidas para a realização de eletrólise em escala industrial.

A tecnologia de tiristores hoje em dia, é mais madura e acessível, visto que os custos são reduzidos, quando comparado ao retificador a diodo, por exemplo. Hoje em dia, é uma tecnologia madura, confiável e de alta eficiência. (Álvaro Iribarren, et al., 2023)

Os conversores a tiristor têm dominado as aplicações em conversões de alta potência CA/CC e podem fornecer uma corrente contínua de 1,5 a 10kA, com uma tensão constante de até 1kV. Então, temos que cada unidade por gerar uma potência total de, no máximo 10MW. (Chen et al., 2022)

Em contra partida, os conversores a tiristor ainda possuem problema em relação a qualidade de energia, no que diz respeito ao fator de potência e potência reativa, que podem causar problemas na distorção da corrente de saída. (Solanki et al., 2013; Chen et al. 2022). Outro fator que deve-se levar em consideração é a taxa de distorção harmônica total na corrente (DHTi). Os conversores de 12 pulsos apresentam um fator de potência no geral, em torno de 0,98 e DHTi de aproximadamente 14%, mas pode variar de acordo com suas tipologias. (Costa Neto, Godoi e Freitas, 2016).

Retificadores a diodo do tipo chopper operam em FP alto e quase constantes, e em cargas menores a tendência é de que o valor seja superior a 0,95. Outro ponto positivo é que não é necessário uso de compensação externa para a obtenção de um FP mais alto. (Rodríguez et al., 2005);

Com toda certeza, para aplicações de alta potência, o mais indicado seria o retificador a tiristor, devido a sua maturidade de facilidade de manutenção e custos, mas para aplicações de baixa potência, retificadores a diodo com chopper multifásico podem ser uma tecnologia mais adequada. (Solanki et al., 2013).

Em geral, as principais vantagens e desvantagens dos retificadores de tiristores são as seguintes: .

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens 12-TR

Conversor de 12 pulsos a tiristor	
Vantagens	Desvantagens
Alta eficiência	Alta potência reativa
Alta confiabilidade	Harmônicos de corrente
Bom controle de corrente	Utilização de filtro para corrigir harmônicos
Custos mais baixos	Ripple na corrente de saída
Tecnologia madura	

Fonte: Autoria Própria (2025).

Já as principais vantagens dos retificadores a diodo são as seguintes:

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens 12-DRMC.

Retificador 12 pulsos a diodo com chopper	
Vantagens	Desvantagens
Alto fator de potência	Perdas maiores
Baixa emissão de potência reativa	Maior quantidade de semicondutores
Resposta dinâmica de corrente rápida	
Confiabilidade	Ruído eletromagnético
Projetos para a potência máxima	Filtros adicionais

Fonte: Autoria Própria (2025).

Portanto, a fim de desenvolver um conhecimento mais conservado e maduro, e de acordo com a necessidade de utilização na produção de hidrogênio foi escolhido o retificador de 12 pulsos a tiristor (12-TR) para a realização da simulação.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação que será discutida nesse capítulo, foi desenvolvida com base no modelo de conversor de 12 pulsos (12-TR) utilizado produção de hidrogênio verde, conforme esquematizado na Figura 11. Esse modelo foi selecionado devido à sua elevada qualidade de forma de onda e ao menor conteúdo harmônico, que são características essenciais para que a operação se torne eficiente nos eletrolisadores. Então, para isso, a análise quantitativa do conversor foi realizada no software PSIM, que permite a representação fiel dos componentes em sistema de grandeza e garante maior precisão na observação dos resultados.

Na figura 15, podemos observar o modelo elétrico de um conversor trifásico de 12 pulsos a tiristor que é comumente utilizado na operação de eletrólise, com ângulo de disparo de 30° entre os tiristores.

Desse modo, para realizar a correta simulação e dimensionamento do Conversor 12-TR, é necessário que a montagem do mesmo seja realizada por partes. A princípio, como se trata de um retificador de 12 pulsos trifásico, faz-se necessário realizar a simulação do retificador, para que posteriormente os próximos passos sejam seguidos na ordem correta.

Etapas do dimensionamento:

1ª Montagem e simulação de um retificador 12 pulsos trifásico controlado;

2ª Cálculo dos filtros de entrada

3ª Cálculo do filtro de saída.

Para a realização da primeira etapa, foi produzido um retificador trifásico controlado com duas pontes de 6 tiristores ligadas em paralelo, produzindo assim 12 pulsos. Além disso, o ângulo de disparo foi definido em 30° para que a topologia se assemelhasse ao que é proposto na literatura.

O transformador pode ser definido como abaixador, elevador e isolador. Para que seja comportado como isolador é necessário possuir uma relação de transformação em que a relação de espiras do secundário do transformador estrela-

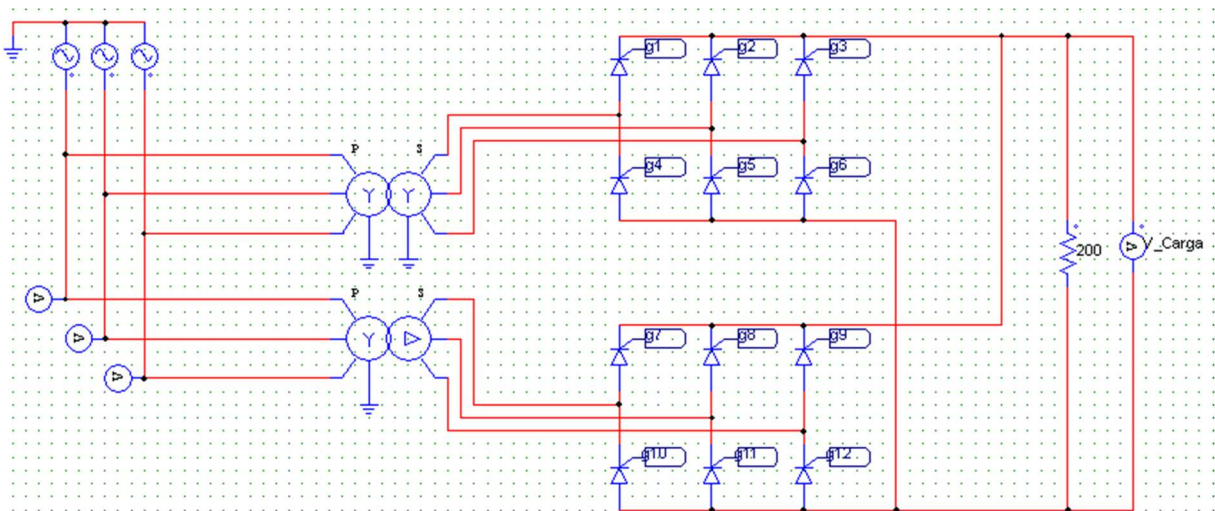
delta deve ser multiplicada por $\sqrt{3}$. Porém, como o objetivo da análise é observar a resposta do circuito, então as espiras foram definidas todas para serem igual a 1.

Em que:

- $N_p = 1$
- $N_s = 1$

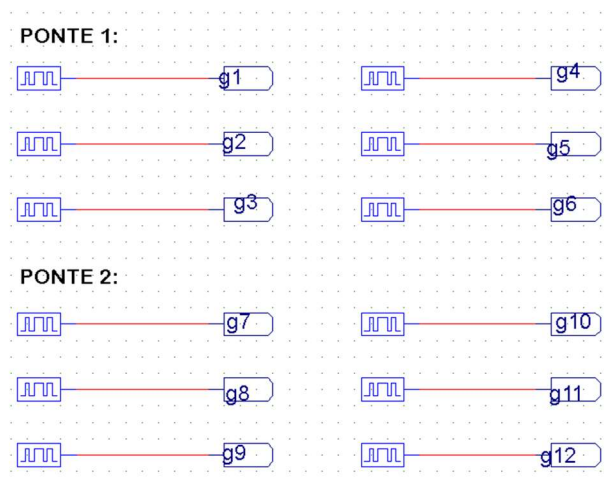
Além disso, esses transformadores ligados na interface do retificador ajudam a suprimir harmônicos de 5ª e 7ª ordem, bem como, proporcionando o seu devido isolamento galvânico. (Vitale, 2024)

Figura 21 - Retificador 12-TR



Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 22 – Gates para as pontes de tiristores



Fonte: Autoria Própria (2025).

Para realizar a simulação de uma fonte de tensão trifásica (rede), foram utilizadas três fontes de tensão senoidais individuais, com tensão eficaz (RMS) de 220V cada uma. Logo, é possível calcular a tensão de entrada eficaz, a partir de uma relação entre o valor de tensão de pico na entrada e raiz de 2 ($\sqrt{2}$):

$$V_{ef} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} = V_{pico} \cdot 0,707 \quad (15)$$

Em que:

- $V_{ef} = \text{Tensão eficaz};$
- $V_{pico} = \text{Tensão de pico}.$

A primeira medição realizada no PSIM foi com o intuito de verificar as três tensões senoidais aplicadas no circuito. Com ela, é possível perceber que a tensão de pico em cada fonte é de $V_{pico} = 311V$, e ambas possuem defasagem. A primeira tensão é a de referência, que é definida no estágio inicial, em 0° , a segunda encontra-se atrasada em 120° e a terceira atrasada em 240° (ou adiantada em 120°), conforme ilustrado na figura 16.

Desse modo, pode-se confirmar o valor da tensão eficaz a partir da equação:

$$V_{Ef} = \frac{V_{Pico}}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

$$V_{Ef} = \frac{311}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

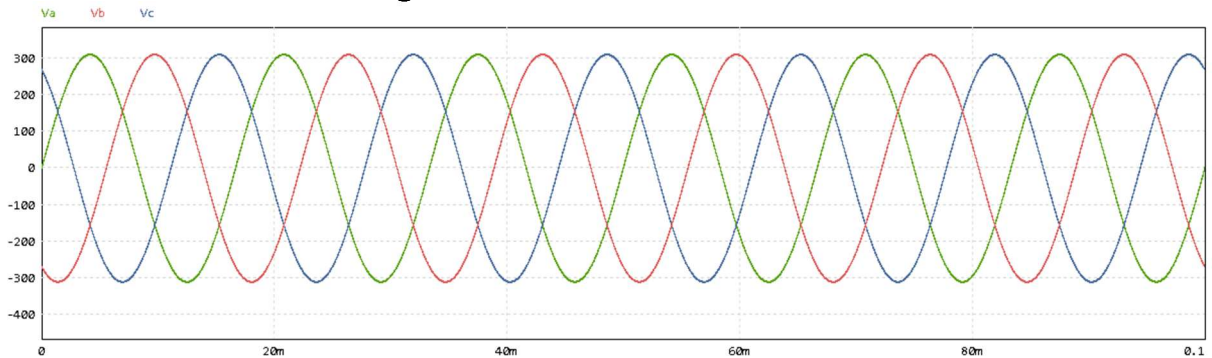
$$V_{Ef} = 220 \text{ V} \quad (18)$$

Bem como, as curvas de tensão:

$$V_A = 311 \text{ V}; \quad (19)$$

$$V_B = 311 \text{ V } (-120^\circ) \quad (20)$$

$$V_C = 311 \text{ V } (-120^\circ) \quad (21)$$

Figura 23 - Formas de onda de entrada

Fonte: Autoria Própria (2025).

O Conversor foi dimensionado para obter uma potência de saída de aproximadamente 1000W (1kW). Uma das formas de atingir esse valor, é manipulando outras componentes que são relacionadas com a potência, que nesse caso seriam a tensão, corrente ou resistência da carga. Nesse caso, para manter a corrente de entrada e a composição do circuito, foi calculada a potência a partir do valor de resistência da carga.

Portanto,

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow R = \frac{V^2}{P} \quad (22)$$

Em que:

- $P = \text{Potência};$
- $V = \text{Tensão na carga};$
- $R = \text{Resistência da carga}.$

Sendo a tensão na carga de aproximadamente 450V, então:

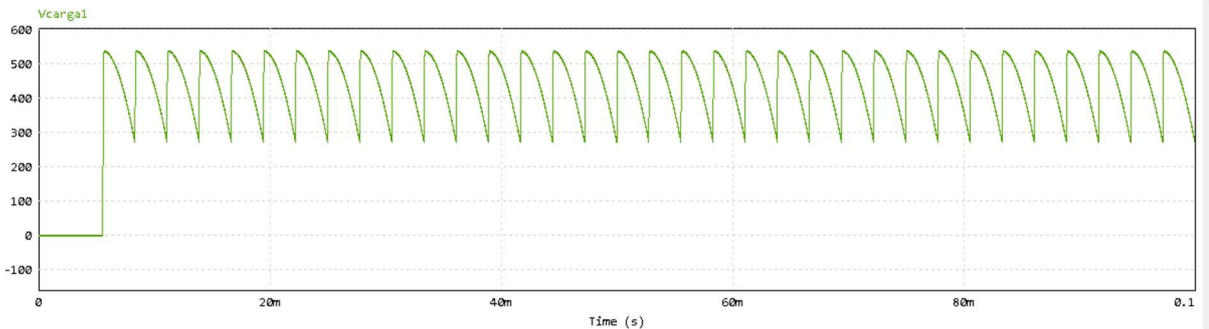
$$R = \frac{450^2}{1000} \quad (23)$$

$$R \sim 200 \, \Omega \quad (24)$$

Ao inserir o novo valor da resistência, é importante conferir o comportamento gráfico da saída, bem como sua corrente, com o objetivo de verificar se há similaridade

dos valores teóricos e medidos. Portanto, na figura 18, é possível verificar a forma de onda de saída no conversor sem a inserção dos filtros LC na entrada e saída.

Figura 24 - Tensão de saída do conversor sem o capacitor de filtro.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Tabela 3 - Valores medidos na saída sem capacitor de filtro.

α	Tensão de Entrada (V_{in})	Tensão Média na Saída (V_{out})	Corrente Média de Saída (I_{out})
30°	310,92 V	445,47 V	2,22 A

Fonte: Autoria Própria (2025).

Desse modo, com o retificador em devido funcionamento, é necessário realizar a etapa de cálculo das correntes e tensões médias nos grupos de tiristores e na carga, para que seja possível analisar se o circuito está funcionando corretamente. É importante destacar que dependendo do ângulo de disparo dos tiristores, os valores podem alterar significativamente. No caso desse conversor em específico, foi utilizado o ângulo de disparo igual a $\alpha = 30^\circ$, devido a maior quantidade de retificadores na literatura utilizarem esse valor.

Para a realização dos cálculos das tensões médias, utiliza-se como base o valor de tensão eficaz, que foi definido em 220V, partir das equações (26), (27), (28), (29). (Rashid, 1999)

Tensão média nas pontes de tiristor:

$$F_1(x) = V_{Ef} \cdot \sin(x) \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \quad (25)$$

$$F_1(x) = 578,38 \cdot \sin(x)$$

$$V_{Méd_Tiristores} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\int_{180^\circ+30^\circ}^{300^\circ+30^\circ} F_1(x) + \int_{240^\circ+30^\circ}^{360^\circ+30^\circ} F_1(x) dx \right) \quad (26)$$

$$V_{Méd_Tiristores} = -222,6 V$$

Em que:

- $V_{Méd_Tiristores} = \text{Tensão média nos tiristores}$

Tensão média na carga:

$$V_{Méd_Carga} = \frac{6}{2\pi} \cdot \left(\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha_{rad}}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha_{rad}} F_1(x) dx \right) \quad (27)$$

$$V_{Méd_Carga} = 445,3 V$$

Em que:

- $V_{Méd_Carga} = \text{Tensão média na carga}$

Corrente média na carga:

$$I_{Méd_Carga} = \frac{V_{Méd_Carga}}{R} \quad (28)$$

$$I_{Méd_Carga} = \frac{445,3}{2}$$

$$I_{Méd_Carga} = 2,226 A$$

Em que:

- $I_{Méd_Carga} = \text{Corrente média na carga}$

Corrente média nos tiristores:

$$I_{Méd_Tiristores} = \frac{I_{Méd_Carga}}{2 \cdot 3} = \quad (29)$$

$$I_{Méd_Tiristores} = \frac{2,226}{2 \cdot 3}$$

$$I_{Méd_Tiristores} = 0,371 \text{ A}$$

Em que:

- $I_{Méd_Tiristores}$ = Corrente média nos tiristores

Tabela 4 - Valores médios calculados na saída.

Valores Calculados	
Tensão média na carga	445,3 V
Tensão média nos tiristores	-222,6 V
Corrente média na carga	2,225 A
Corrente média nos tiristores	0,371 A

Fonte: Autoria Própria (2025).

Tabela 5 - Valores médios medidos na saída.

Valores Medidos	
Tensão média na carga	455,89 V
Tensão média nos tiristores	-230,78 V
Corrente média na carga	2,278 A
Corrente média nos tiristores	0,374 A

Fonte: Autoria Própria (2025).

Com os valores medidos e calculados já definidos e expostos nas tabelas 4 e 5, pode-se realizar a comparação dos valores teóricos e registrados via simulação. Desse modo, as tabelas demonstram os resultados de ambas etapas. A tensão média nos tiristores é a mesma para cada ponte de tiristores, contudo, o resultado é negativo devido a tensão de polarização reversa, que é o momento em que os tiristores estão

bloqueados naturalmente devido o cátodo estar mais positivo que o ânodo. Deste modo, a ponte superior encontra-se com o mesmo valor, porém positivo, já que está em polarização direta.

Como mencionado anteriormente, o retificador a tiristores de 12 pulsos (12-TR) é composto por filtros de entrada e de saída, necessários para permitir a atenuação da maior quantidade possível de harmônicos presentes no sistema. Os harmônicos, quando não tratados, provocam distorções na forma de onda, aquecimento excessivo em equipamentos, redução da eficiência energética e possíveis interferências eletromagnéticas. Por isso, a filtragem é essencial para garantir o correto funcionamento do conversor e a qualidade da energia processada.

Dessa forma, o retificador 12-TR ilustrado na figura 11 utiliza dois filtros: um filtro de entrada e um filtro de saída. O filtro de entrada é do tipo *trap filter* (filtro de armadilha), responsável por suprimir harmônicos específicos antes do processo de retificação, enquanto que o filtro de saída é do tipo LC, empregado para reduzir os harmônicos restantes.

2ª Etapa:

Com base nisso, o filtro de entrada foi dimensionado a partir da equação (30) e (31), de forma a atender às exigências operacionais estabelecidas para o conversor. As equações utilizadas nos cálculos tiveram como base a apostila do professor Edilson Mineiro, baseado em Ozenbaugh (2001).

Filtro de entrada:

Em que:

- $V_{In} = \text{Tensão de entrada} = 311 \text{ V};$
- $P_{out} = \text{Potência de saída} \cong 1000 \text{ W};$
- $\eta = \text{Eficiência da planta} = 0,95;$
- $F_s = \text{Frequência de comutação} = 12 \cdot 60 \text{ Hz} = 720 \text{ Hz}.$

$$C_{in} = \frac{10}{2\pi \cdot F_s \cdot R_{eq}} \quad (30)$$

$$C_{in} = 24,06 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

$$L_{in} = \frac{R_{eq}}{2\pi \cdot F_s} \quad (31)$$

$$L_{in} = 20,31 \cdot 10^{-3}$$

Em que:

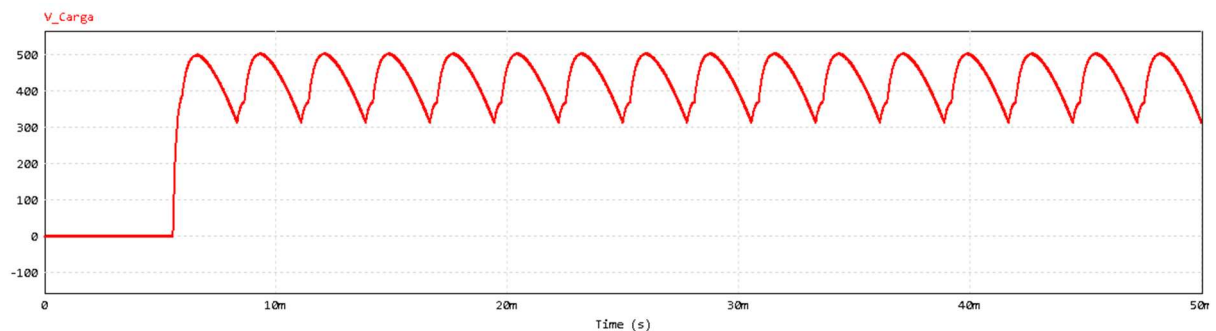
- C_{in} = Capacitor de entrada;
- L_{in} = Indutor de entrada;
- R_{eq} = Resistência equivalente.

Os valores do capacitor e do indutor de filtro que foram calculados teoricamente foram arredondados para o valor comercial mais próximo, para fins de praticidade e de principalmente viabilizar a implementação prática do filtro.

$$C_{in} = 24,06 \cdot 10^{-6} F \rightarrow 30\mu F$$

$$L_{in} = 20,31 \cdot 10^{-3} \rightarrow 27mH$$

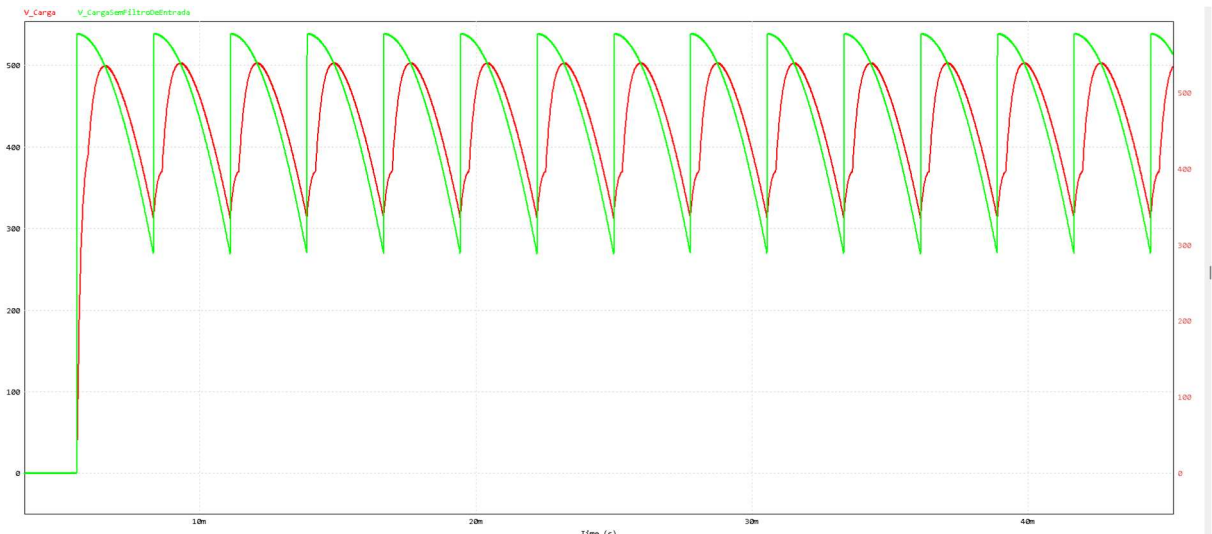
Figura 25 -Tensão de saída do conversor com filtro de entrada.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Com a implementação do filtro de entrada no retificador, foi realizada uma nova medição no PSIM para visualizar se houve mudança de comportamento. Então, na figura 19 é possível perceber a forma de onda de saída com a adição do filtro. A princípio, parece bem similar à forma de onda encontrada no primeiro formato do conversor, que não continha filtro. Porém, na figura 20 é possível perceber que a forma de tensão da saída encontra-se bem menos oscilante quando comparada com a primeira forma da figura 19. Por isso a importância de, além do filtro de saída, a utilização de um filtro de entrada. A tensão torna-se bem mais atenuada com um filtro de entrada.

Figura 26 - Comparação das formas de onda de saída com x sem filtro de entrada.



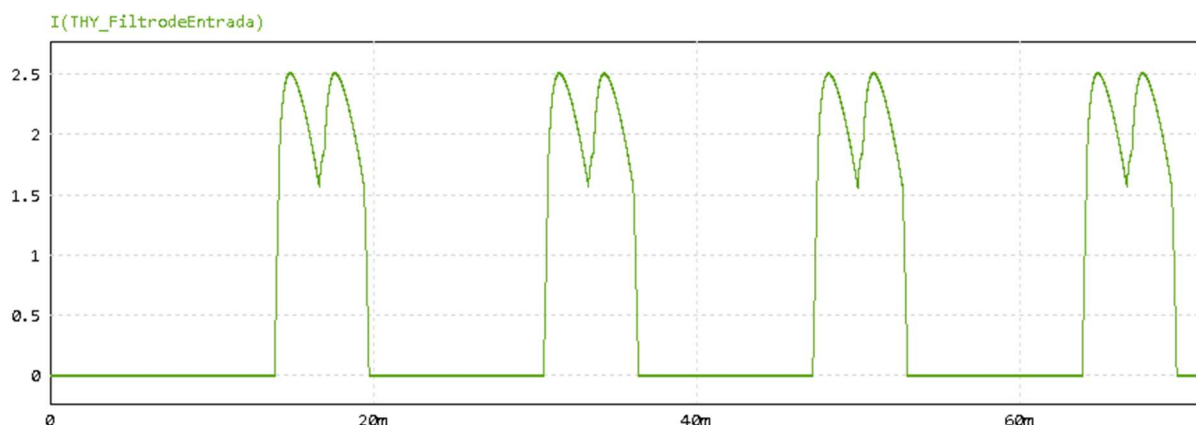
Fonte: Autoria Própria (2025).

Tabela 6 - Valores medidos na saída do retificador com filtro de entrada.

Saída (Carga)	
Corrente mínima	1,57 A
Corrente média	2,15 A
Corrente máxima	2,51 A
Tensão mínima	313,57 V
Tensão média	430,33 V
Tensão máxima	502,78 V

Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 27 – Tensões nos pares de tiristores para o conversor com filtro de entrada.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Na tabela 6, podemos ver os valores medidos na carga para o retificador apenas com filtro de entrada. Comparando os resultados obtidos com os da tabela 4 é possível verificar uma similaridade nos valores de corrente e tensão média, porém com uma tensão relativamente menor. Ainda se tratando do retificador com filtro de entrada, podemos verificar na figura 21 os pulsos de corrente intercalados em um par de tiristores.

Agora, novamente fazendo referência à figura 11, pode-se notar que ainda existe mais um filtro de harmônicos, que serve para filtrar a corrente já retificada com o objetivo de reduzir ondulações restantes. Dessa forma, para calcular o filtro de saída do conversor 12-TR, foram utilizadas as equações (33) e (34) .

3ª Etapa:

Filtro de saída:

Dados:

- $V_{saída} = \text{Tensão de saída} = 455,3 \text{ V}$
- $P_{out} = \text{Potência de saída} = 1000 \text{ W}$
- $\eta = \text{Eficiência do circuito} = 0,95$
- $F_s = \text{Frequência de comutação} = 12 \cdot 60 \text{ Hz} = 720 \text{ Hz}$

$$R_{eq} = \frac{V_{saída}^2}{P_{out}} \quad (32)$$

$$C_{out} = \frac{10}{2\pi \cdot F_s \cdot R_{eq}} \quad (33)$$

$$C_{out} = 10,66 \cdot 10^{-6} F$$

$$L_{out} = \frac{R_{eq} \cdot 4}{2\pi \cdot F_s} \quad (34)$$

$$L_{out} = 183 \cdot 10^{-3} H$$

Em que:

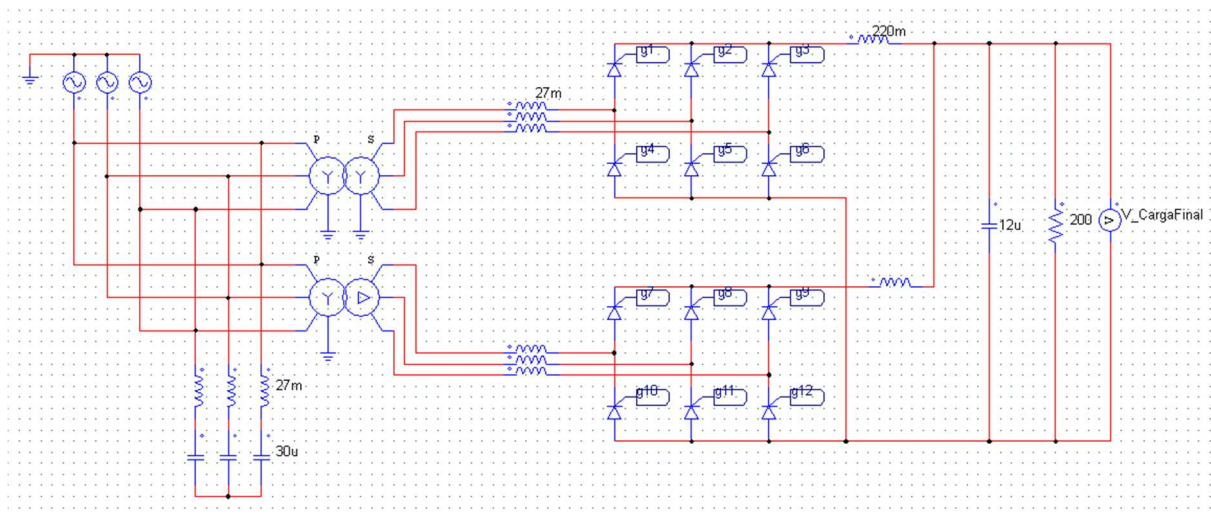
- C_{out} = Capacitor de saída;
- L_{out} = Indutor de saída;
- R_{eq} = Resistência equivalente.

De forma análoga ao que foi feito na 2ª etapa para o filtro de entrada, os novos valores do capacitor e indutor foram modificados para o valor comercial mais próximo.

$$C_{out} = 10,66 \cdot 10^{-6} F \rightarrow 12\mu F$$

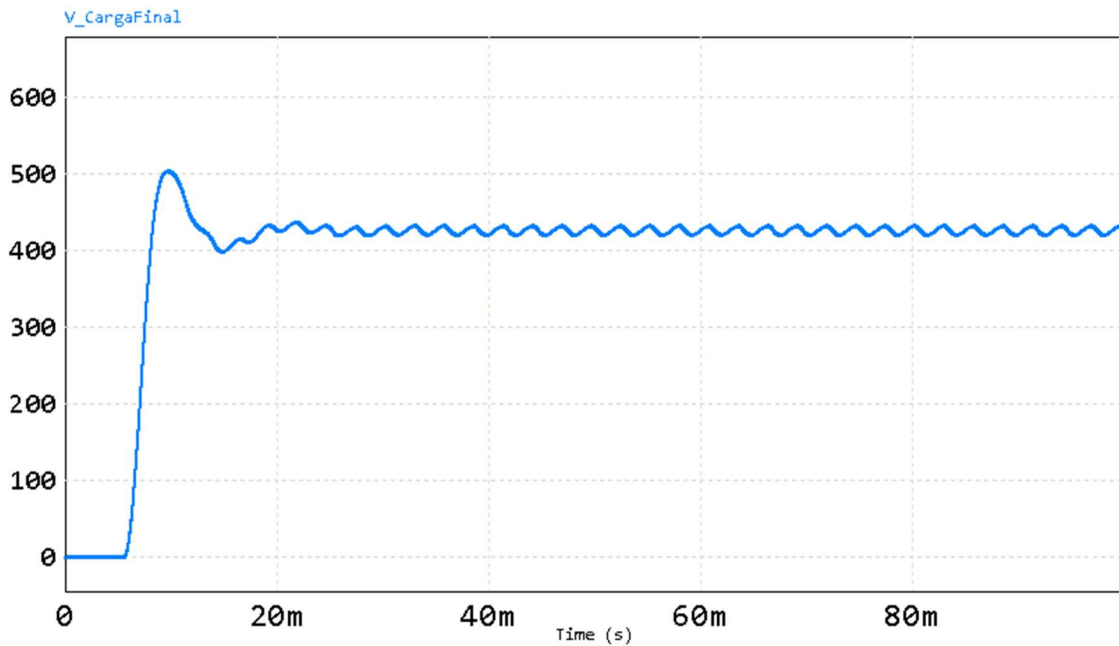
$$L_{out} = 183 \cdot 10^{-3} \rightarrow 220mH$$

Figura 28 - Circuito elétrico do conversor 12 pulsos a tiristor no PSIM.



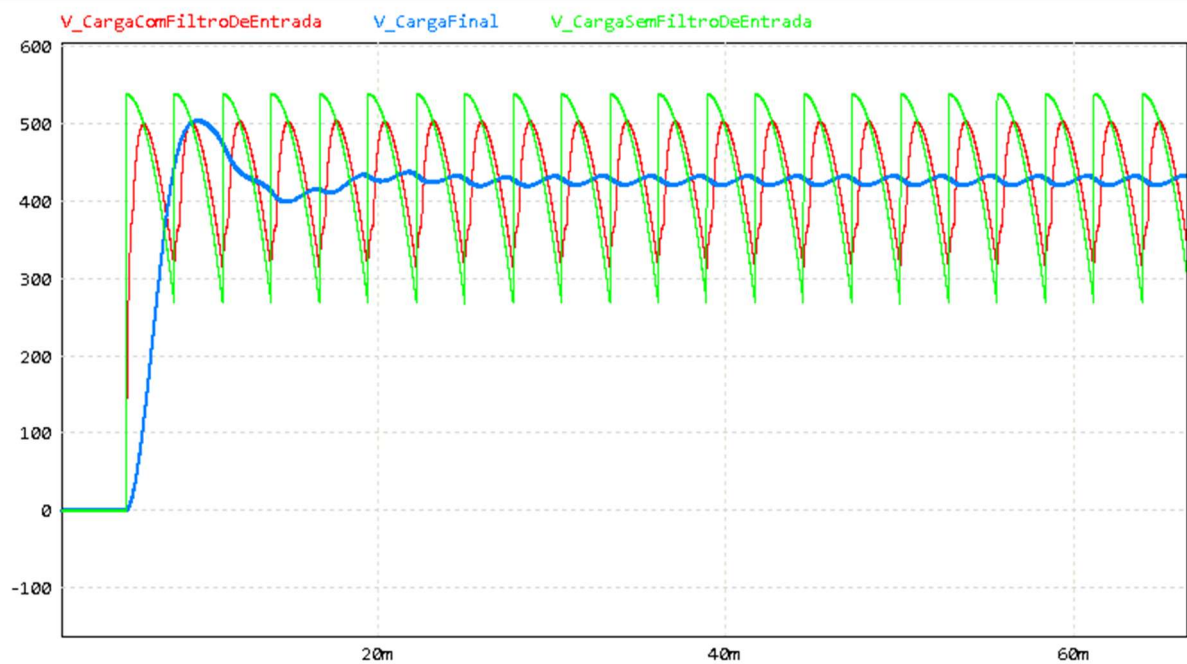
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 29- Forma de onda final do retificar 12 pulsos.



Fonte: Autoria Própria (2025).

A figura 22 ilustra o conversor 12-TR finalizado, com todos os componentes e filtros de entrada e saída dimensionados. Enquanto que na figura 23, podemos visualizar a forma de onda final do retificador de alta potência proposto. O comportamento da forma de onda de saída da figura 23, exibe a tensão de saída ao longo do tempo. Após a adição do filtro, percebe-se que a forma de onda na carga tornou-se menos ondulada, típica do processo de retificação. A curva demonstra um sistema que tem uma rápida elevação de tensão, mas logo em seguida atinge um patamar quase constante.

Figura 30 - Comparação das formas de onda de saída para todos os modelos.

Fonte: Autoria Própria (2025).

Tabela 7 - Valores medidos na saída do retificador completo.

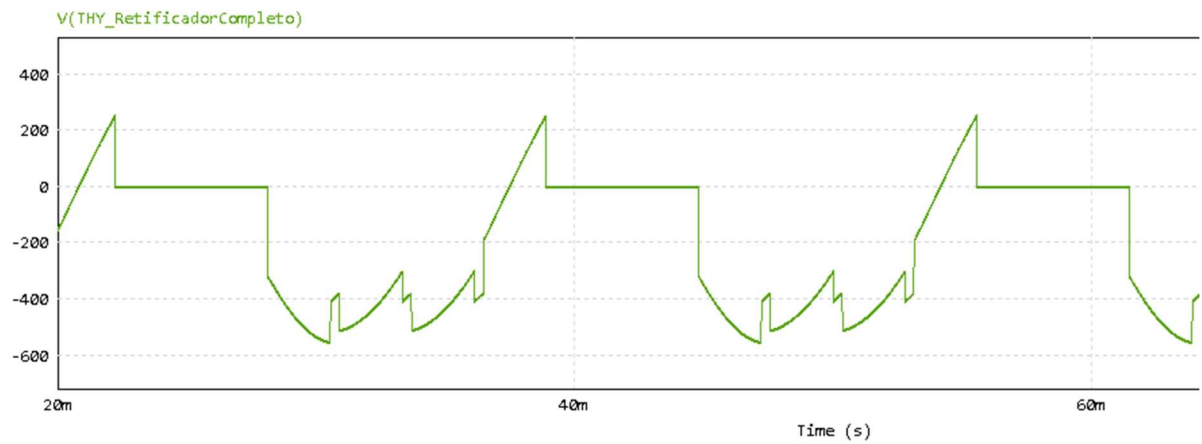
Saída (Carga)	
Corrente mínima	2,1 A
Corrente média	2,13 A
Corrente máxima	2,16 A
Tensão mínima	420,4 V
Tensão média	426,06 V
Tensão máxima	504,2 V

Fonte: Autoria Própria (2025).

Podemos concluir, que o sistema 12-TR com filtro de entrada e de saída alcançou o resultando mais satisfatório, das três formas de tensão na carga sob diferentes condições, a curva sem filtro de entrada apresenta oscilações mais intensas, indicando maior ripple e instabilidade. Já no sistema com o filtro de entrada, houve uma melhora significativa, visto que teve seu ripple atenuado, mas ainda assim com variações perceptíveis. Além do mais, a tabela 7 apresenta resultados satisfatórios para o conversor 12-TR. Todos os valores de tensão e corrente apresentam uma taxa de variação muito baixa, que contribuem para uma eficiência

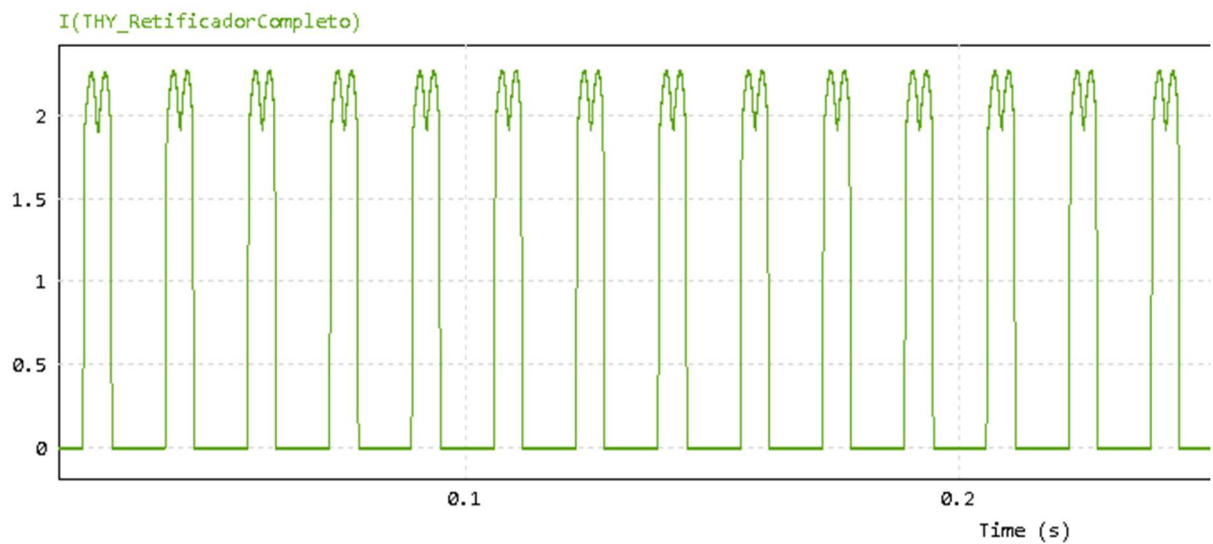
mais satisfatória no eletrolisador, visto que necessitam de tensão e corrente com pouca distorção.

Figura 31 - Tensão de saída nos tiristores para o retificador completo

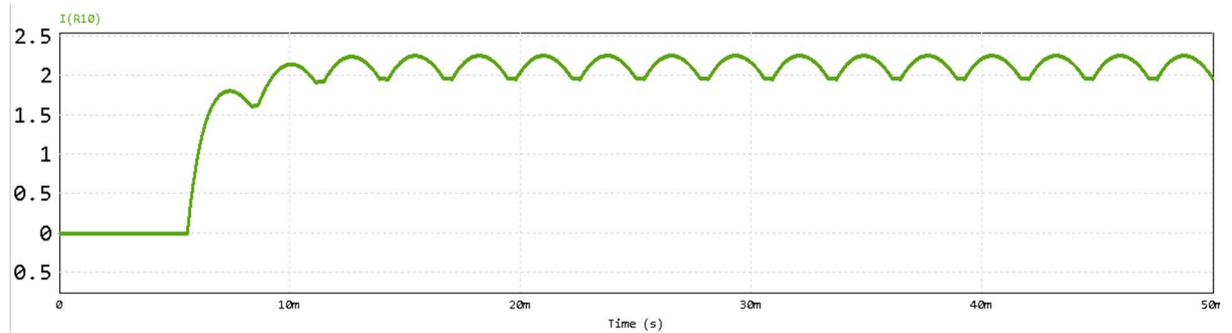


Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 32 - Corrente de saída retificador completo



Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 33 - Corrente de saída retificador completo

Fonte: Autoria Própria (2025).

Por fim, a curva final, após todo o processo de retificação e filtragem, mostra uma tensão mais estável e suavizada, próxima de 400 V, evidenciando a eficácia do sistema de filtragem em reduzir oscilações e melhorar a qualidade da tensão entregue. Consequentemente, também se obtém uma corrente de saída menos ondulatória, próxima a 2 A, como ilustrado na figura 27. Além disso, as figuras 25 e 26 demonstram o comportamento da tensão e corrente nos pares de tiristores.

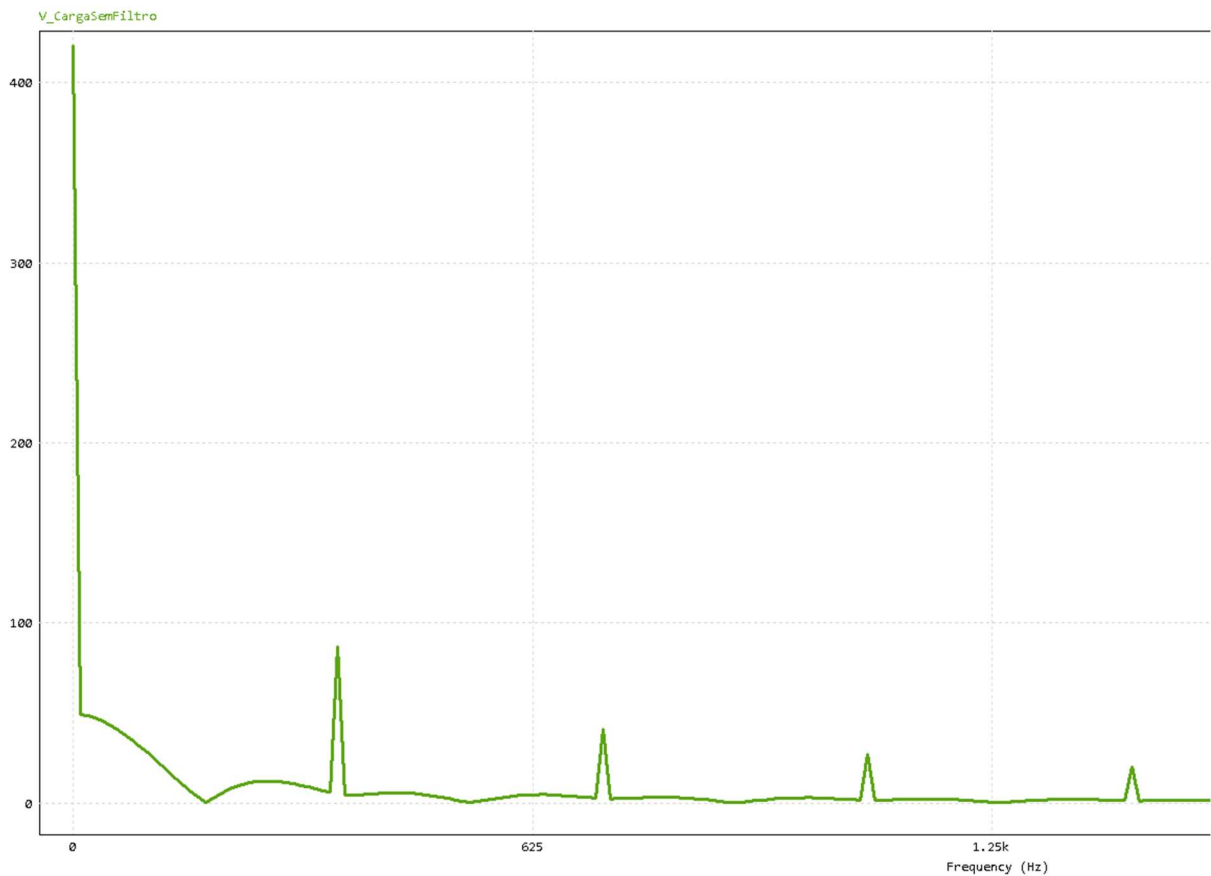
Tabela 8 - Comparação dos valores médios de saída nos conversores.

	Retificador sem filtro	Com filtro de entrada	Conversor (12-TR)
$V_{Médio_Carga}$	445,3 V	430,33 V	426,06 V

Fonte: Autoria Própria (2025).

Visualmente e matematicamente, é possível provar que de fato a tensão está retificada e o conversor está funcionando no seu modo de operação normal. Mas outra maneira de verificar a eficiência do sistema é através de uma FFT, que é o teorema fundamental de Fourier. Na transformada de Fourier o sinal de saída no domínio do tempo é transformado em componentes de frequências.

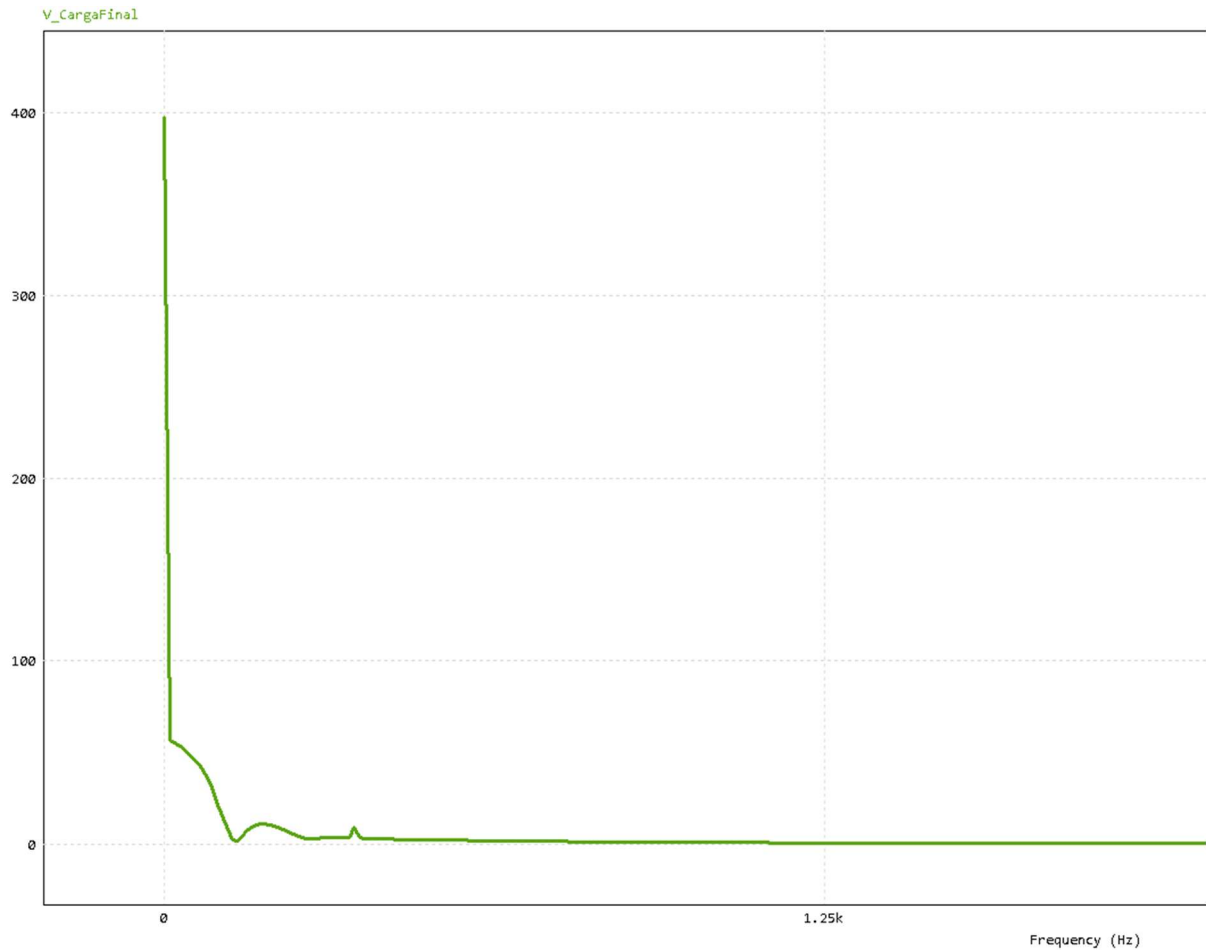
Figura 34 - FFT no retificador sem filtro. Fonte: (Autoria Própria, 2025).



Fonte: Autoria Própria (2025).

Dessa forma, é uma maneira eficiente de visualizar as componentes harmônicas que causam ondulações nas formas de saída. Na figura 28 foi realizada a transformada de Fourier para o primeiro retificador sem a presença de filtros. Nela é possível observar vários sinais de pico, que indicam presença de harmônicos que aumentam a ondulação das formas de onda da saída, então consequentemente as tensões serão menos estáveis.

Figura 35 - FFT no retificador 12-TR proposto. Fonte: (Autoria Própria, 2025)



Fonte: Autoria Própria (2025).

Por outro lado, na figura 29, é possível observar que praticamente não há sinais de harmônicos próximos da fundamental na FFT. Nesse caso, isso é uma forma clara de demonstrar a eficiência dos filtros presentes no sistema. De forma geral, a análise de uma transformada de Fourier para um sistema retificador, pode confirmar se, de fato a corrente encontra-se contínua. Os harmônicos suprimidos são os de ordem ímpar, mais especificamente os 11° e 13°.

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da exposição dos capítulos anteriores, pode-se afirmar que o desenvolvimento deste trabalho permitiu compreender, de forma ampla e fundamentada, o comportamento e as etapas de operação dos conversores de alta potência aplicados na produção de Hidrogênio Verde. Portanto, a simulação do modelo elétrico do conversor baseado a tiristor foi de grande valor para o entendimento do processo, uma vez que possibilitou observar de forma visual e matemática o seu desempenho, bem como as formas de onda e os efeitos diretos das topologias sobre a qualidade da energia fornecida ao sistema de eletrólise.

Os resultados obtidos demonstraram que o estudo detalhado dos retificadores é de grande importância, pois o seu dimensionamento impacta diretamente no rendimento e eficiência do eletrolisador, especialmente no que se refere à estabilidade da tensão e à redução de harmônicos na corrente elétrica. Assim, compreender o funcionamento de cada topologia, suas variações e limitações tornam-se fundamental para garantir maior eficiência, confiabilidade, redução de custos na implementação e menor degradação dos componentes, resultando assim, em uma planta otimizada para a produção do hidrogênio.

Além disso, esse trabalho verificou a importância da implementação de filtros do tipo LC e de armadilha, que desempenham um papel decisivo no aperfeiçoamento das correntes de saída, uma vez que reduz significativamente a ondulação e os harmônicos. Eles são usados diretamente para melhorar a qualidade da energia que é destinada à carga. Com correntes menos onduladas, a vida útil dos equipamentos torna-se mais durável.

Portanto, conclui-se que a integração entre análise bibliográfica, para obter o entendimento necessário sobre o modo de funcionamento e importância dos conversores, aliado à simulação, para a análise dos retificadores e aplicação de filtros adequados constitui uma etapa indispensável para o desenvolvimento de sistemas eficientes de eletrólise voltados à produção de hidrogênio verde. Desse modo, esse trabalho reforça a relevância de pesquisas nessa área e abre caminho para estudos futuros, que podem incluir otimizações mais avançadas, estudo de novas topologias

dos retificadores, bem como o desenvolvimento de filtros mais avançados para aplicações como essa.

7 - REFERÊNCIAS

BEZERRA, Francisco Diniz. **Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia**. Caderno Setorial ETENE, ano 6, n. 212, dez. 2021. Fortaleza: Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste – ETENE, 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Brasil: Líder Mundial na Transição Energética**. [Brasília]: MME, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/BrasilLiderMundialnaTransicaoEnergeticaMinisteriodeMinaseEnergia.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **União Europeia anuncia construção usina de hidrogênio verde no Brasil**. [Brasília]: MME, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/uniao-europeia-anuncia-construcao-usina-de-hidrogenio-verde-no-brasil>. Acesso em: 21 nov. 2025.

CHEN, Mengxing; CHOU, Shih-Feng; BLAABJERG, Frede; DAVARI, Pooya. **Overview of power electronic converter topologies enabling large-scale hydrogen production via water electrolysis**. Applied Sciences, v. 12, n. 1906, p. 1–12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12041906>. Acesso em: 25 nov. 2025.

COSTA NETO, Antônio O.; GODOI, Rodolfo R.; FREITAS, Luiz Carlos Gomes de. **Retificador trifásico de 12 pulsos com transformador delta-poligonal e conversores SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter) com isolamento galvânica**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência – NUPEP, 2016.

EBC (EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO). **Alexandre Silveira destaca vanguarda do país em inauguração de centro de hidrogênio verde**. [Brasília]: Agência Gov, 2023. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202309/alexandre-silveira-destaca-vanguarda-do-pais-em-inauguracao-de-centro-de-hidrogenio-verde>. Acesso em: 21 nov. 2025.

Eletrônica de potência. Muhammad H. Rashid; tradução Leonardo Abramowicz; revisão técnica Carlos Marcelo de Oliveira Stein. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência.** 2. ed. Tradução de Ivo Barbi. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1999.

EMBER. **World passes 30% renewable electricity milestone.** [S.l.]: Ember, 2024. Disponível em: <https://ember-energy.org/latest-updates/world-passes-30-renewable-electricity-milestone/>. Acesso em: 25 nov. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Boletim Mensal de Consumo de Energia Elétrica.** Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: [URL do boletim]. Acesso em: 25 nov. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050.** Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 25 nov. 2025.

GOMES, Isabela Temístocles. **A urgência pela descarbonização climática das economias globais e o papel do hidrogênio verde brasileiro.** ÍANDÉ: Ciências e Humanidades, São Bernardo do Campo (SP), v. 7, n. 1, p. 2–15, 2023. DOI: 10.36942/iande.v7i1.661

HART, Daniel W. **Eletrônica de potência.** Porto Alegre: AMGH, 2012.

HASSAN, AlAmir; ABDEL-RAHIM, Omar; BAJAJ, Mohit; ZAITSEV, Ievgen. **Power electronics for green hydrogen generation with focus on methods, topologies, and comparative analysis.** *Scientific Reports*, vol. 14, p. 24767, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-76191-6.

HOCHSTETLER, Richard Lee; MONTEIRO, Eduardo Müller. **Os desafios da sobreoferta de energia: Vertimentos e Curtailment.** 2023. Disponível em: https://acendebrasil.com.br/wpcontent/uploads/2023/12/20231219_ArtigoBroadcastEnergia.pdf. Acesso em: 25 nov. 2025.

HYLA, Marian. **Higher harmonics filtration in the power supply system of thyristor hoisting machine of shaft transport in a mining plant**. Elektrotehnika i Elektronika, 2022. doi:10.15199/48.2022.05.08.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). **Global Hydrogen Review 2025**. Paris: IEA, 2025. Disponível em: [URL do relatório]. Acesso em: 25 nov. 2025.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). **Hydrogen production – Global Hydrogen Review 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-production>. Acesso em: 21 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **99,8% dos domicílios brasileiros têm acesso à energia elétrica**. Rio de Janeiro: IBGE, 22 ago. 2025. Disponível em: <https://jornaldamazonia.com/ibge-998-dos-domicilios-brasileiros-tem-acesso-a-energia-eletrica/>. Acesso em: 25 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **De 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões**. Rio de Janeiro: IBGE, 28 jun. 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>. Acesso em: 25 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **População estimada do país chega a 213,4 milhões de habitantes em 2025**. Rio de Janeiro: IBGE, 28 ago. 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/44305-populacao-estimada-do-pais-chega-a-213-4-milhoes-de-habitantes-em-2025>. Acesso em: 25 nov. 2025.

INVESTE PIAUÍ. **Hub Hidrogênio Verde**. [S.l.]: Investe Piauí, 2025. Disponível em: <https://investepiaui.com/hub-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 21 nov. 2025.

KOJIMA, H.; NAGASAWA, K.; TODOROKI, N.; ITO, Y.; MATSUI, T.; NAKAJIMA, R. **Influence of renewable energy fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, p. 4572–4593, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.018.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Texto para Discussão (TD) 2787. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2022.

OLIVEIRA, A. M.; BESWICK, R. R.; YAN, Y. **A green hydrogen economy for a renewable energy society**. International Journal of Hydrogen Energy, ano provável 2021 (ou conforme o ano da publicação no PDF que você tiver).

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais. Divisão de População. **World Population Prospects 2024: Summary of Results**. Nova Iorque: ONU, 2024. Disponível em: https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Summary-of-Results.pdf.

Acesso em: 25 nov. 2025.

OZENBAUGH, Richard Lee. **EMI Filter Design**. 2. ed. Revised and expanded. Boca Raton: Taylor & Francis, 2000. 348 p.

PIAUÍ. Governo do Estado. **Com obras iniciadas, maior usina de hidrogênio verde do mundo coloca Piauí como líder da transição energética**. [Teresina]: Governo do Estado, 2025. Disponível em: <https://www.pi.gov.br/com-obras-iniciadas-maior-usina-de-hidrogenio-verde-do-mundo-coloca-piaui-como-lider-da-transicao-energetica/>. Acesso em: 21 nov. 2025.

RODRÍGUEZ, José R. et al. **Large current rectifiers: state of the art and future trends**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 52, n. 3, p. 738-746, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIE.2005.843949>. Acesso em: 25 nov. 2025.

SANTANA, Delano Mendes de; SÁ JR., Edilson Mineiro; LOBO, Fernanda Leite; PONTES, Karen Valverde; MALLMANN, Maira Debarba; FERNANDES, Júlia Teixeira; MURTA, Aurélio Lamare Soares. **Rotas de produção de hidrogênio e os principais tipos de eletrolisadores**. 1. ed. Brasília: FAU; GIZ; LaSUS, 2023. (Coleção H₂ Brasil – Quali-A, v. 2).

SCHNEIDERS, Thorsten et al. **A Transição Energética para o Carbono Zero (H₂ Pt-X)**. [S.l.]: H₂Brasil, 2024. v. 1. Disponível em: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2024/06/Livro-01-Col-1_final_JTF.pdf. Acesso em: 25 nov. 2025.

SCHNEIDERS, Thorsten et al. ***Rotas de produção de hidrogênio e os principais tipos de eletrolisadores***. [S.l.]: H₂Brasil, 2024. v. 2. Disponível em: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2024/06/Livro-02-Col-1_final_JTF.pdf. Acesso em: 25 nov. 2025.

SOLANKI, Jitendra; FRÖHLEKE, N.; BÖCKER, J.; WALLMEIER, P. ***Comparison of thyristor-rectifier with hybrid filter and chopper rectifier for high-power, high-current application***. In: PCIM Europe 2013 – International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Proceedings [...]. Nuremberg, Alemanha: PCIM Europe, 2013.

VIEGAS, Paulo Roberto Alonso. ***Perspectivas do “Hidrogênio Verde” no Brasil em 2021***. Boletim Legislativo n. 90. Brasília: Senado Federal, 2021. 14 p. Disponível em: <https://www2.senado.leg.br/bdsf/handle/id/589405>. Acesso em: [data de acesso].

VITALE, Gianpaolo. ***Power Converters for Green Hydrogen: State of the Art and Perspectives***. Electronics, v. 13, n. 22, p. 4565, 2024. doi: 10.3390/electronics13224565.

YODWONG, Burin; CHO, Yongsu; JUNG, Jin-Woo; CHO, Gyujin; AHN, Sae-Han. ***A twelve-pulse current source rectifier adapted for grid-connected applications***. Energies, v. 13, n. 15, p. 1–19, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13153957>. Acesso em: 25 nov. 2025.

8 - APÊNDICE A: CÁLCULOS DO FILTRO DE ENTRADA E DE SAÍDA

Para o filtro de entrada:

Dados:

$$V_{In} = 311 \text{ V};$$

$$P_{out} \sim 1000 \text{ W};$$

$$\eta = 0,95;$$

$$F_s = 12 \cdot 60 \text{ Hz} = 720 \text{ Hz}.$$

1° Passo: Potência de entrada

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

$$P_{in} = \frac{1000}{0,95}$$

2° Passo: Resistência Equivalente

$$R_{eq} = \frac{V_{In}^2}{P_{in}}$$

$$R_{eq} = \frac{311^2}{1502}$$

$$R_{eq} = 91,94$$

3° Passo: Cálculo do Capacitor

$$C_{in} = \frac{10}{2\pi \cdot F_s \cdot R_{eq}}$$

$$C_{in} = \frac{10}{2\pi \cdot 720 \cdot 91,94}$$

$$C_{in} = 24,06 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

4° Passo: Cálculo do Indutor

$$L_{in} = \frac{91,94}{2\pi \cdot 720}$$

$$L_{in} = 20,31 \cdot 10^{-3}$$

Para o filtro de saída:

Dados:

$$V_{Saída} = 455,3 \text{ V};$$

$$P_{out} = 1000 \text{ W};$$

$$\eta = 0,95;$$

$$F_s = 12 \cdot 60 \text{ Hz} = 720 \text{ Hz}.$$

1° Passo: Resistência equivalente

$$R_{eq} = \frac{V_{Saída}^2}{P_{out}}$$

$$R_{eq} = \frac{445,3^2}{1000}$$

$$R_{eq} = 198,29$$

2° Passo: Cálculo do capacitor

$$C_{out} = \frac{10}{2\pi \cdot 720 \cdot 198,29}$$

$$C_{out} = 10,66 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

3° Passo: Cálculo do indutor

$$L_{out} = \frac{198,29 \cdot 4}{2\pi \cdot 720}$$

$$L_{out} = 183 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$