



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JORDANA ALVES DE FREITAS

**Modelagem, Simulação e Análise Comparativa das Principais Estratégias
de Conversão de Energia Elétrica em Hidrogênio de Baixo Carbono**

Uberlândia

2026

JORDANA ALVES DE FREITAS

**Modelagem, Simulação e Análise Comparativa das Principais Estratégias
de Conversão de Energia Elétrica em Hidrogênio de Baixo Carbono**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Dr. Ivan Nunes Santos

Uberlândia

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F866 Freitas, Jordana Alves de, 2002-
2026 Modelagem, Simulação e Análise Comparativa das Principais Estratégias de Conversão de Energia Elétrica em Hidrogênio de Baixo Carbono [recurso eletrônico] / Jordana Alves de Freitas. - 2026.

Orientador: Ivan Nunes Santos.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.104>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Santos, Ivan Nunes, 1979-, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

JORDANA ALVES DE FREITAS

**Modelagem, Simulação e Análise Comparativa das Principais Estratégias de Conversão
de Energia Elétrica em Hidrogênio de Baixo Carbono**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Uberlândia, 06 de Fevereiro de 2026

Banca Examinadora:

Ivan Nunes Santos – Prof. Dr.

(Orientador – UFU)

Isaque Nogueira Gondim – Prof. Dr.

(Examinador – UFU)

Mateus Duarte Teixeira – Prof. Dr.

(Examinador – UFPR)



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 817, PPGEELT				
Data:	Seis de fevereiro de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	12412EEL008				
Nome do Discente:	Jordana Alves de Freitas				
Título do Trabalho:	Modelagem, Simulação e Análise Comparativa das Principais Estratégias de Conversão de Energia Elétrica em Hidrogênio de Baixo Carbono				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Ivan Nunes Santos. Título do projeto: Desenvolvimento de ferramentas para otimização do planejamento da operação no contexto de complementariedade de fontes renováveis, hibridização e emprego de SAEs. Agência financiadora: Não se aplica. Número do processo na agência financiadora: Não se aplica. Vigência do projeto: 2020 - atual.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Isaque Nogueira Gondim (UFU), Mateus Duarte Teixeira (UFPR) e Ivan Nunes Santos, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Ivan Nunes Santos, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

APROVADA.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente

ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/02/2026, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mateus Duarte Teixeira, Usuário Externo**, em 06/02/2026, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Isaque Nogueira Gondim, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/02/2026, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7028960** e o código CRC **49666033**.

*“Dedico este trabalho à minha mãe, Joelma,
e à minha irmã, Josiane,
como uma forma de retribuir todo o amor
incondicional, o suporte e a força que sempre me
foram essenciais para que eu chegasse até aqui.”*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo de toda essa caminhada, guiando meus passos mesmo nos momentos de maior desafio.

Agradeço profundamente ao meu orientador, professor Ivan Nunes Santos, pela orientação excepcional. Sua dedicação como pesquisador é admirável, e sua contribuição foi essencial para a realização deste trabalho e para minha formação como pesquisadora.

Agradeço à minha mãe, Joelma, pelo amor incondicional, incentivo constante e por sempre acreditar em mim, mesmo quando eu mesma duvidei. Seu apoio foi meu alicerce em cada etapa desse processo.

À minha irmã, Josiane, deixo meu carinho e gratidão pelo companheirismo, incentivo e presença ao longo dessa trajetória.

Ao meu amado, Erikc, agradeço pela paciência, compreensão e apoio nos momentos mais intensos dessa caminhada. Sua presença tornou os dias mais leves e me deu força para continuar.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido ao longo dos últimos 2 anos, essencial para minha permanência na pós-graduação e para a realização deste trabalho.

Agradeço à MAB Engenharia pelo apoio e contribuição técnica que possibilitaram a realização do estudo de acesso desenvolvido neste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os amigos e colegas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o sucesso desta etapa da minha vida.

“Apenas porque algo funciona, não significa que não possa ser aprimorado.”
— Shuri, *Pantera Negra* (2018)

RESUMO

A crescente necessidade de descarbonização dos setores energéticos e industriais tem impulsionado o interesse global pelo hidrogênio verde como vetor energético estratégico. Produzido por eletrólise da água a partir de fontes renováveis, o hidrogênio verde desponta como alternativa promissora para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que amplia a integração entre os setores elétrico e industrial. Nesse contexto, o Brasil apresenta condições particularmente favoráveis à produção desse insumo, em virtude da elevada participação de fontes renováveis em sua matriz elétrica e da disponibilidade de recursos naturais. Entretanto, a conexão de plantas de eletrólise em larga escala ao sistema elétrico impõe novos desafios técnicos e regulatórios, especialmente no que se refere à qualidade da energia elétrica. Conversores de potência utilizados na alimentação dos eletrolisadores caracterizam-se como cargas não lineares de grande porte, capazes de introduzir distorções harmônicas e outros distúrbios que podem comprometer os padrões operativos da rede. Apesar do avanço das políticas públicas voltadas ao desenvolvimento do hidrogênio de baixo carbono, ainda inexistem normativas específicas que estabeleçam critérios técnicos para o acesso dessas instalações à rede básica brasileira, tornando necessária a investigação de seus impactos elétricos sob a ótica dos regulamentos atualmente vigentes. Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da integração de plantas de hidrogênio renovável à rede elétrica brasileira, por meio da análise de diferentes topologias de conversores CA/CC aplicadas a eletrolisadores, considerando aspectos de qualidade da energia e com o intuito de contribuir para a discussão dos requisitos normativos de acesso à rede básica.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde; Conversores de Potência; Requisitos de Acesso; Distorções Harmônicas.

ABSTRACT

The growing need for decarbonization in the energy and industrial sectors has driven global interest in green hydrogen as a strategic energy vector. Produced through water electrolysis powered by renewable sources, green hydrogen emerges as a promising alternative for reducing greenhouse gas emissions while enhancing the integration between the electric power and industrial sectors. In this context, Brazil presents particularly favorable conditions for the production of this input, due to the high share of renewable sources in its electricity matrix and the availability of natural resources. However, the connection of large-scale electrolysis plants to the electrical system introduces new technical and regulatory challenges, especially concerning power quality. Power converters used to supply electrolyzers are characterized as large nonlinear loads, capable of introducing harmonic distortions and other disturbances that may compromise network operating standards. Despite the advancement of public policies aimed at the development of low-carbon hydrogen, specific regulations establishing technical criteria for the access of these installations to the Brazilian transmission system are still lacking, making it necessary to investigate their electrical impacts under the perspective of currently existing regulations. Therefore, this work aims to evaluate the impact of integrating renewable hydrogen plants into the Brazilian electrical grid through the analysis of different AC/DC converter topologies applied to electrolyzers, considering power quality aspects and contributing to the discussion on normative requirements for grid access.

Keywords: Green Hydrogen; Power Converters; Grid Access Requirements; Harmonic Distortions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Densidade de energia gravimétrica (MJ/kg).	27
Figura 2 – Comparativo da capacidade energética mássica do hidrogênio.	28
Figura 3 – Exemplo de hidrogênio verde no contexto PtX.	29
Figura 4 – Rotas tecnológicas de produção de hidrogênio.	30
Figura 5 – Esquemático genérico do processo de eletrólise da água.	36
Figura 6 – Esquemático do processo de eletrólise alcalina.	37
Figura 7 – Esquemático do processo de eletrólise do PEMEL.	38
Figura 8 – Esquemático do processo de eletrólise do SOEL.	39
Figura 9 – Esquemático do processo de eletrólise do AEMEL.	41
Figura 10 – Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos.	43
Figura 11 – Retificador trifásico a diodos de 12 pulsos – lado CC com conexão paralela.	44
Figura 12 – Retificador trifásico a diodos de 12 pulsos – lado CC com conexão série.	44
Figura 13 – Retificador trifásico de 6 pulsos em dupla estrela a diodos.	45
Figura 14 – Retificador trifásico de 12 pulsos em dupla estrela a diodos.	46
Figura 15 – Ponte tiristorizada de 6 pulsos.	47
Figura 16 – Retificador trifásico a tiristor de 12 pulsos.	49
Figura 17 – Retificador trifásico de 6 pulsos em dupla estrela à tiristor.	51
Figura 18 – Retificador trifásico de 12 pulsos em dupla estrela à tiristor.	52
Figura 19 – Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com conversor buck (6D+B).	53
Figura 20 – Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com buck de 3 estágios.	54
Figura 21 – Retificador trifásico a diodos de 12 pulsos com chopper de 3 níveis.	56
Figura 22 – Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com conversor buck empilhado.	58
Figura 23 – Retificador AFE do tipo B6.	59
Figura 24 – Retificador AFE B6 + chopper trifásico.	60
Figura 25 – Retificador AFE de 12 pulsos.	61
Figura 26 – Representação do “Equivalente de Norton” com o LG da Rede Básica.	64
Figura 27 – Lugares Geométricos recomendados pelo ONS. (a) Setor Anular. (b) Polígono de “n” lados.	66
Figura 28 – Arranjo padrão para obtenção das correntes referente a um módulo de 10MW... ..	69
Figura 29 – Estrutura geral do filtro passivo RLC sintonizado empregado na mitigação de harmônicas no lado CA dos conversores.	71
Figura 30 – Arranjo elétrico da topologia 6TR implementado no MATLAB/Simulink®.	73
Figura 31 – Arranjo elétrico da topologia 6TR+F.	74
Figura 32 – Diagrama do sistema de controle para 6TR e 6TR+F.	75
Figura 33 – Diagrama da topologia 12TR implementada no MATLAB/Simulink®.	76
Figura 34 – Diagrama da topologia 12TR+F com filtro harmônico para a 11 ^a e 13 ^a ordem.	77
Figura 35 – Diagrama do sistema de controle para 12TR e 12TR+F.	78
Figura 36 – Diagrama da topologia 6D+B implementada no MATLAB/Simulink®.	79
Figura 37 – Diagrama da topologia 6D+B+F implementada no MATLAB/Simulink®.	80
Figura 38 – Diagrama do sistema de controle para o conversor buck.	80

Figura 39 – Configuração da topologia 6D+3B.	81
Figura 40 – Configuração da topologia 6D+3B+F.....	82
Figura 41 – Diagrama do sistema de controle para 6D+3B e 6D+3B+F.	83
Figura 42 – Configuração da topologia 12D+3B implementada no MATLAB/Simulink®....	84
Figura 43 – Configuração da topologia 12D+3B+F.....	85
Figura 44 – Diagrama do sistema de controle para 12D+3B e 12D+3B+F.	85
Figura 45 – Configuração genérica do ponto de conexão considerada no estudo de acesso. ..	90
Figura 46 – Arranjo padrão da planta de H2V considerada para o estudo.....	91
Figura 47 – Configuração do sistema elétrico de interesse.	92
Figura 48 – Lugares Geométricos obtidos para as ordens 5ª (300Hz), 7ª (420Hz), 11ª (660Hz), 13ª (780Hz), 17ª (1020Hz) e 19ª (1140).....	95
Figura 49 – Diagrama da Rede Interna.....	96
Figura 50 – Distorções harmônicas individuais obtidas para as topologias 6TR + 6TR+F...	102
Figura 51 – Distorções harmônicas individuais obtidas para as topologias 12TR e 12TR+F.	104
Figura 52 – Distorções harmônicas individuais obtidas para as topologias 6D+B e 6D+B+F.	107
Figura 53 – Distorções harmônicas individuais obtidas para as topologias 6D+3B e 6D+3B+F.	110
Figura 54 – Distorções harmônicas individuais obtidas para as topologias 12D+3B e 12D+3B+F.....	114
Figura 55 – Distorções harmônicas totais obtidas para todos os casos.	115
Figura 56 – Lugares Geométricos obtidos para todas as ordens do espectro harmônico normativo.....	138

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do Hidrogênio.	28
Tabela 2 – Processos biológicos e químicos para produção de H_2 a partir da biomassa.....	33
Tabela 3 – Casos definidos para simulação.....	71
Tabela 4 – Correntes certificadas dos eletrolisadores obtidas para cada topologia de conversão.	87
Tabela 5 – Expoentes correspondentes para o fator de agregação.	97
Tabela 6 – Correntes harmônicas agregadas correspondentes aos 08 módulos de eletrólise e às distintas topologias de eletrólise sob avaliação.	98
Tabela 7 – Admitâncias Y_{ih} e Y_{hmin} obtidas por ordem harmônica.	100
Tabela 8 – Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental.....	101
Tabela 9 – Resultados obtidos para as topologias 6TR + 6TR+F.	101
Tabela 10 – Resultados obtidos para as topologias 12TR e 12TR+F.....	103
Tabela 11 – Resultados obtidos para as topologias 6D+B e 6D+B+F.	105
Tabela 12 – Resultados obtidos para as topologias 6D+3B e 6D+3B+F.	109
Tabela 13 – Resultados obtidos para as topologias 12D+3B e 12D+3B+F.	112
Tabela 14 – Síntese das exigências de mitigação harmônica previstas pela NT 009/2016 para o empreendimento avaliado, considerando as topologias analisadas.	117
Tabela 15 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso I.a.....	128
Tabela 16 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso I.b.....	129
Tabela 17 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso II.a.	130
Tabela 18 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso II.b.	131
Tabela 19 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso III.a.	132
Tabela 20 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso III.b.	133
Tabela 21 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso IV.a.....	134
Tabela 22 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso IV.b.....	135
Tabela 23 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso V.a.	136
Tabela 24 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso V.b.	137

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. PANORAMA INTERNACIONAL DAS EMISSÕES DE GEE E COMPROMISSOS CLIMÁTICOS.....	18
1.2. GEOPOLÍTICA DA ENERGIA E O IMPULSO AO HIDROGÊNIO VERDE NO CENÁRIO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	19
1.3. A ASCENSÃO DO BRASIL NO CONTEXTO DO H2V	20
1.4. INCENTIVOS REGULATÓRIOS E PRINCIPAIS PROJETOS-PILOTO NO SETOR NACIONAL DE HIDROGÊNIO.....	21
1.4.1. PROGRAMA NACIONAL DO HIDROGÊNIO.....	21
1.4.2. PROJETO H2BRASIL	22
1.4.3. POLÍTICAS ESTADUAIS E PROJETOS EM HIDROGÊNIO EM DESENVOLVIMENTO NO BRASIL.....	23
1.5. DESAFIOS DA INSERÇÃO DE TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO SOB A ÓTICA DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA E REQUISITOS DE ACESSO	24
1.6. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	25
1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
2. ESTADO DA ARTE: HIDROGÊNIO VERDE, ELETROLISADORES E REQUISITOS DE ACESSO À REDE BÁSICA BRASILEIRA	27
2.1. O HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR ENERGÉTICO	27
2.2. ROTAS TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO	30
2.2.1. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO COM CCUS	31
2.2.2. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS	32
2.2.3. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DA BIOMASSA.....	33
2.2.4. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DA AMÔNIA	33
2.2.5. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR D'ÁGUA	34
2.3. TECNOLOGIAS DE ELETRÓLISE: PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E TIPOS DE ELETROLISADORES	35
2.3.1. ELETROLISADORES ALCALINOS (AEL)	37
2.3.2. ELETROLISADORES DE MEMBRANA DE TROCA DE PRÓTONS (PEMEL)	38

2.3.3.	ELETROLISADORES DE ÓXIDO SÓLIDO (SOEL).....	39
2.3.4.	ELETROLISADORES DE MEMBRANA DE TROCA ANIÔNICA (AEMEL)	40
2.4.	CONVERSORES DE POTÊNCIA APLICADOS À ELETRÓLISE	42
2.4.1.	RETIFICADORES NÃO CONTROLADOS.....	42
2.4.1.1.	Retificador trifásico a diodos de 6 e 12 pulsos	42
2.4.1.2.	Retificador trifásico de 6 e 12 pulsos em dupla estrela a diodos	45
2.4.2.	RETIFICADORES CONTROLADOS	46
2.4.2.1.	Retificador trifásico controlado de 6 pulsos a tiristor	46
2.4.2.2.	Retificador trifásico controlado de 12 pulsos a tiristor	48
2.4.2.3.	Retificador trifásico de 6 e 12 pulsos em dupla estrela à tiristor	50
2.4.3.	RETIFICADORES CHOPPERS.....	52
2.4.3.1.	Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com conversor buck.....	52
2.4.3.2.	Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com conversor buck de 3 níveis	54
2.4.3.3.	Retificador trifásico a diodos de 12 pulsos com conversor chopper de 3 braços.....	56
2.4.3.4.	Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com conversor buck empilhado de 2 níveis.....	57
2.4.4.	RETIFICADORES ATIVOS.....	58
2.4.4.1.	Retificador AFE de dois níveis.....	59
2.4.4.2.	Retificador AFE de dois níveis com conversor buck de 3 estágios	60
2.4.4.3.	Retificador AFE de 12 pulsos.....	60
2.5.	DIRETRIZES NORMATIVAS E SÍNTESE DOS CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA CONEXÃO À REDE ELÉTRICA BÁSICA BRASILEIRA.....	61
2.5.1.	ESTUDO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	63
2.5.1.1.	Determinação do “Equivalente Norton”	64
2.5.1.2.	Determinação da Rede Externa (Rede Básica)	65

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL E SIMULAÇÃO DE DISTINTAS TOPOLOGIAS DE ELETROLISADORES **68**

3.1.	ESTABELECIMENTO DE PREMISSAS, APRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS NORMATIVOS E SELEÇÃO DAS TOPOLOGIAS	68
3.2.	MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE DISTINTAS TOPOLOGIAS DE ELETROLISADORES.....	72
3.2.1.	CASO I – PONTE RETIFICADORA DE 6 PULSOS A TIRISTORES – 6TR E 6TR+F.....	72
3.2.2.	CASO II – PONTE RETIFICADORA DE 12 PULSOS A TIRISTORES – 12TR E 12TR+F	75
3.2.3.	CASO III – PONTE RETIFICADORA DE 6 PULSOS A DIODOS COM CONVERSOR BUCK – 6D+B E 6D+B+F	78
3.2.4.	CASO IV – PONTE RETIFICADORA DE 6 PULSOS A DIODOS COM CONVERSOR BUCK DE 3 INTERRUPTORES – 6D+3B E 6D+3B+F	80

3.2.5. CASO V – PONTE RETIFICADORA DE 12 PULSOS A DIODOS COM CONVERSOR BUCK DE 3 ESTÁGIOS – 12D+3B E 12D+3B+F.....	83
--	----

3.3. EXECUÇÃO DE SIMULAÇÕES PARA OBTENÇÃO DAS CORRENTES CERTIFICADAS DOS ELETROLISADORES.....	86
--	-----------

<u>4. ESTUDO DE ACESSO DE UMA PLANTA HIPOTÉTICA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO À REDE BÁSICA BRASILEIRA: ANÁLISE HARMÔNICA DE DISTINTAS TOPOLOGIAS DE ELETROLISADOR</u>	<u>90</u>
---	------------------

4.1. DEFINIÇÃO DO PONTO DE CONEXÃO COM O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA BRASILEIRO.....	91
--	-----------

4.2. IMPLEMENTAÇÃO DO ESTUDO HARMÔNICO NO HARMZS.....	93
--	-----------

4.2.1. IMPLEMENTAÇÃO DO EQUIVALENTE DA REDE EXTERNA – REDE BÁSICA.....	93
--	----

4.2.2. IMPLEMENTAÇÃO DA REDE INTERNA – PLANTA DE HIDROGÊNIO	95
---	----

4.3. RESULTADOS OBTIDOS E CORRESPONDENTES ANÁLISES CRÍTICAS	99
--	-----------

4.3.1. RESULTADOS PARA O CASO I – PONTE RETIFICADORA DE 6 PULSOS A TIRISTORES – 6TR E 6TR+F	101
---	-----

4.3.2. RESULTADOS PARA O CASO II – PONTE RETIFICADORA DE 12 PULSOS A TIRISTORES – 12TR E 12TR+F	103
---	-----

4.3.3. RESULTADOS PARA O CASO III – PONTE RETIFICADORA DE 6 PULSOS A DIODOS COM CONVERSOR BUCK – 6D+B E 6D+B+F.....	105
---	-----

4.3.4. RESULTADOS PARA O CASO IV – PONTE RETIFICADORA DE 6 PULSOS A DIODOS COM CONVERSOR BUCK DE 3 INTERRUPTORES – 6D+3B E 6D+3B+F.....	108
---	-----

4.3.5. RESULTADOS PARA O CASO V – PONTE RETIFICADORA DE 12 PULSOS A DIODOS COM CONVERSOR BUCK DE 3 ESTÁGIOS – 12D+3B E 12D+3B+F	111
---	-----

<u>5. CONCLUSÕES</u>	<u>118</u>
-----------------------------	-------------------

<u>REFERÊNCIAS</u>	<u>121</u>
---------------------------	-------------------

<u>APÊNDICE A</u>	<u>121</u>
--------------------------	-------------------

<u>APÊNDICE B</u>	<u>138</u>
--------------------------	-------------------

<u>APÊNDICE C</u>	<u>141</u>
--------------------------	-------------------

INTRODUÇÃO

1.1. PANORAMA INTERNACIONAL DAS EMISSÕES DE GEE E COMPROMISSOS CLIMÁTICOS

As emissões de gases de efeito estufa (GEE), sobretudo o dióxido de carbono (CO₂) proveniente das atividades humanas, cresceram de forma acelerada desde a Revolução Industrial, em meados do século XIX. O avanço da industrialização e o desenvolvimento econômico da América do Norte, Europa e, mais recentemente, da Ásia Oriental (com destaque para a China no século XXI, responsável por 44% das emissões globais em 2022), foram os principais vetores dessa elevação. Esse aumento histórico tem consequências diretas no clima global, intensificando eventos extremos da natureza, elevando o nível dos oceanos e ameaçando ecossistemas e comunidades [1].

Para enfrentar esse cenário, a governança climática internacional se estruturou por meio de acordos multilaterais sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, na sigla em inglês). O Protocolo de Quioto, adotado em 1997 e em vigor a partir de 2005, estabeleceu metas obrigatórias de redução para países desenvolvidos, introduzindo mecanismos como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permite a países industrializados aquisição de créditos de carbono oriundos de projetos de mitigação em países em desenvolvimento. Apesar de pioneiro, esse protocolo teve limitações, como a não ratificação pelos Estados Unidos, fragilizando o compromisso global [2], [3].

O Acordo de Paris, firmado em 2015, ampliou esses esforços ao estabelecer metas globais e inclusivas para limitar o aquecimento a “bem abaixo de 2°C”, com esforços para 1,5°C. Instituiu ainda ciclos quinquenais de compromissos nacionais, conhecidos como Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), por meio dos quais cada nação apresenta suas metas de redução de GEE, concebidas para elevar progressivamente o nível de ambição climática. Além disso, definiu mecanismos de financiamento climático para países em desenvolvimento, incluindo a meta de mobilizar US\$ 100 bilhões anuais para ações de adaptação e mitigação, e regulamentou os mercados de carbono como instrumento de viabilização de investimentos em redução de emissões [4], [5]. A Conferência das Partes (COP) da UNFCCC, realizada anualmente desde 1995, constitui o principal fórum decisório que monitora e orienta a implementação desses acordos [6].

1.2. GEOPOLÍTICA DA ENERGIA E O IMPULSO AO HIDROGÊNIO VERDE NO CENÁRIO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Historicamente, os recursos energéticos sempre desempenharam papel central na diplomacia e estabilidade global. Desde o embargo da *Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC)* em 1973 até o uso contemporâneo do gás russo como instrumento de influência, petróleo e gás moldam alianças, conflitos e decisões políticas. Países produtores ajustam a produção para influenciar preços globais, enquanto grandes consumidores adotam medidas políticas e diplomáticas para estabilizar mercados [7]. Estudos com 27 países da União Europeia, entre 2007 e 2022, indicam que menor diversidade energética e maior dependência de importações de baixo custo reduzem preços, mas aumentam a vulnerabilidade a choques externos em contextos de risco geopolítico [8].

Esse quadro de interdependência e fragilidade ganhou contornos ainda mais evidentes em 2022, quando a guerra da Rússia contra a Ucrânia expôs de forma inédita os riscos associados à elevada dependência energética. Antes do conflito, a União Europeia importava cerca de 155 bilhões de metros cúbicos de gás natural da Rússia anualmente, equivalente a aproximadamente 40% do consumo total do bloco [7]. A ruptura desse fluxo desencadeou a primeira crise energética verdadeiramente global, pela disparada dos preços e pela intensificação da incerteza geopolítica [9].

Globalmente, os padrões de comércio de petróleo e gás foram alterados, buscando simultaneamente fortalecer a segurança energética nacional e avançar nas metas climáticas. Exemplos disso incluem a *Inflation Reduction Act (IRA)* nos Estados Unidos, o plano *REPowerEU* na Europa e o programa *GX Green Transformation* no Japão, todos implementados após a invasão russa e acompanhados pelo rápido avanço de tecnologias limpas [9].

Nesse contexto, o hidrogênio verde (H2V) esponta como vetor estratégico para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e descarbonizar setores de difícil mitigação, como siderurgia, produção de amônia e transporte de longa distância [10]. Produzido principalmente por eletrólise com eletricidade renovável, sua utilização é livre de emissões diretas de CO₂, permitindo processos industriais mais limpos, além de oferecer soluções para armazenamento de energia em larga escala e mitigação da intermitência das fontes renováveis [11].

A crise energética de 2022 acelerou investimentos globais em H2V, retomando discussões que se iniciaram ainda na década de 1970, mas agora em sinergia com a rápida

expansão das energias renováveis, cuja capacidade instalada passou de cerca de 200 GW para mais de 3.000 GW no cenário mundial [11].

Governos têm incorporado o hidrogênio às suas estratégias de transição energética. A União Europeia lançou, em 2020, a *EU Hydrogen Strategy*, estabelecendo 40 GW de eletrolisadores até 2030 e a meta de produzir 10 milhões de toneladas anuais de H₂V. Nos Estados Unidos, a IRA prevê créditos fiscais de até US\$ 3/kg para hidrogênio limpo, enquanto a iniciativa *Hydrogen Shot* busca reduzir seu custo a US\$ 1/kg em dez anos. Na Ásia, a China projeta alcançar 200.000 toneladas anuais até 2025 por meio do *National Hydrogen Energy Plan*, enquanto Japão e Coreia do Sul combinam importações de H₂V com o avanço da mobilidade a células de combustível [10].

1.3. A ASCENSÃO DO BRASIL NO CONTEXTO DO H₂V

Apesar do elevado potencial sustentável do H₂V, seus custos ainda são significativamente superiores aos do hidrogênio cinza e azul. Em 2023, a produção de hidrogênio via eletrólise abastecida com eletricidade renovável variava entre USD 4,5 e USD 12/kg, enquanto o hidrogênio cinza era comercializado entre USD 0,98 e USD 2,93/kg e o azul entre USD 1,8 e USD 4,7/kg, a depender do valor do gás natural e da tecnologia de captura de carbono utilizada [12].

As disparidades econômicas decorrem principalmente dos processos empregados. O hidrogênio cinza, responsável por cerca de 95% da oferta global na atualidade, é obtido a partir de combustíveis fósseis e libera grandes volumes de CO₂. O hidrogênio azul segue rota semelhante, mas incorpora captura e armazenamento de carbono (CCUS, sigla em inglês), reduzindo emissões, ainda que mantenha a dependência do gás natural e eleve o valor final. Já o H₂V resulta majoritariamente da eletrólise da água alimentada por fontes limpas, sem emissões diretas, alinhando-se de maneira mais clara às metas de descarbonização [13]. A redução de custos está condicionada à expansão da produção de eletrolisadores e da contínua queda nos preços da eletricidade proveniente de fontes solar e eólica [10].

A competitividade do setor também é influenciada pela disponibilidade de recursos renováveis e hídricos [14]. Em 2022, apenas 29,5% da matriz elétrica mundial era limpa, enquanto o Brasil já atingia 86,1% [15]. Considerando a geração interna e as importações, sobretudo da hidrelétrica de Itaipu, as fontes renováveis responderam por 88% da oferta de eletricidade em 2024, com destaque para 56,8% de origem hidráulica, 14,1% eólica e 9,3% solar [16]. Essa configuração coloca o país em posição de destaque, atraindo cerca de metade

dos investimentos previstos para a América Latina e aproximadamente 8% dos aportes globais. Estudos recentes destacam que o Brasil tem conseguido reduzir consistentemente os custos de geração solar e eólica, consolidando-se como um dos ambientes mais promissores para a produção de H2V [14].

A *World Economic Forum* (WEF) aponta que o Custo Nivelado de Hidrogênio (LCOH, sigla em inglês) na América Latina varia atualmente entre USD 3,70 e USD 5,90/kg, valor inferior à média global, estimada entre USD 3,80 e USD 8,50/kg. Até 2030, Argentina e Chile projetam custos de produção entre USD 1,20 e USD 1,50/kg, posicionando-se entre os mais competitivos do mundo. No Brasil, os preços médios atuais situam-se entre USD 2,87 e 3,56/kg de H2V, com perspectiva de atingir aproximadamente USD 1,90/kg em 2030 e USD 1,20/kg em 2050, permitindo ao país capturar até 10% do mercado global desse produto [17].

Outro diferencial brasileiro é a infraestrutura elétrica. O Sistema Interligado Nacional (SIN) abrange mais de 170.000 km de linhas de transmissão e dispõe de armazenamento hidroelétrico equivalente a 210 TWh, permitindo ampla integração de renováveis e operação flexível dos eletrolisadores. Essa configuração reduz riscos de emissões indiretas e a necessidade de ajustes frequentes na rede. A predominância de energia limpa no SIN, historicamente acima de 70% nas últimas duas décadas, posiciona o Brasil como um caso singular de rede elétrica altamente descarbonizada. Esse contexto contribui para a integridade de carbono da produção de H2V conectada à rede e fortalece, ainda mais, a posição do país no cenário global [18].

1.4. INCENTIVOS REGULATÓRIOS E PRINCIPAIS PROJETOS-PILOTO NO SETOR NACIONAL DE HIDROGÊNIO

O Brasil tem avançado na estruturação de políticas públicas e de incentivos destinados ao desenvolvimento do hidrogênio verde, com iniciativas em âmbito federal e estadual, destacando-se a concentração de investimentos na região Nordeste [19].

1.4.1. Programa Nacional do Hidrogênio

Em agosto de 2021, foram lançadas as Diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), posteriormente institucionalizado pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) via Resolução nº 6/2022, atualizada pela Resolução nº 4/2023. O PNH2 tem como propósito estruturar e consolidar a cadeia de valor do hidrogênio no Brasil, contando com instrumentos como o Plano Trienal de Trabalho e o Marco Legal do Hidrogênio de Baixa

Emissão de Carbono, voltados à criação de um ambiente regulatório estável e atrativo a investimento [20].

O Plano Trienal 2023-2025 busca transformar o potencial brasileiro em resultados concretos no cenário energético global, estabelecendo ações prioritárias para que o país se torne, até 2035, o maior e mais competitivo produtor de hidrogênio de baixa emissão de carbono da América Latina. Desenvolvido de forma colaborativa, envolveu representantes da indústria, investidores, academia, consumidores e sociedade civil, sendo submetido à Consulta Pública nº 147/2022, que recebeu mais de 650 contribuições de 56 instituições. Entre as iniciativas do plano estão a dinamização do ecossistema de inovação, a expansão da capacidade tecnológica e a atração de investimentos privados, com foco em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) [21].

O Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, instituído em 2 de agosto de 2024, define a política nacional para o desenvolvimento deste vetor energético e estabelece conceitos-chave: hidrogênio de baixa emissão de carbono (intensidade máxima de 7 kgCO₂eq/kg H₂), hidrogênio renovável (proveniente de biomassa, etanol ou eletrólise com energia renovável) e hidrogênio verde (produzido exclusivamente por eletrólise com fontes 100% renováveis) [22]. O marco institui o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH₂), garantindo rastreabilidade e conformidade ambiental, e organiza instrumentos de política pública, como o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), que apoia a descarbonização industrial e o transporte pesado com créditos fiscais e metas anuais, e o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio (Rehidro), que oferece benefícios fiscais condicionados à regularidade fiscal, investimento em P&D e destinação de recursos a projetos nacionais, com vigência inicial de cinco anos a partir de 2025 [23], [24].

1.4.2. Projeto H2Brasil

A Cooperação Brasil-Alemanha para o desenvolvimento sustentável atua há décadas nas áreas de energia renovável e eficiência energética, incentivando a expansão de fontes limpas. Nesse contexto, em 2021, foi criado o projeto H2Brasil pela *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ, sigla em alemão), para apoiar a expansão do H2V no Brasil [23].

Em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME), o projeto atua em diversas frentes: elaboração de cenários de planejamento energético, identificação de lacunas no marco regulatório, análise da implementação de um sistema nacional de certificação de H2V e

divulgação de estudos, campanhas educativas e intercâmbios de conhecimento com influenciadores, formadores de opinião e jornalistas [23].

O programa promove também capacitação técnica e profissional, com laboratórios para formação de multiplicadores em tecnologias de H₂V, incentivo à inovação em H₂V e derivados PtX, e apoio a universidades brasileiras por meio de laboratórios e intercâmbios com instituições alemãs. Busca ainda aprimorar a viabilidade econômica da produção industrial de H₂V e fomentar clusters de projetos-piloto ao longo da cadeia de valor H₂/PtX [23].

Entre os parceiros estratégicos do H2Brasil estão a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), além de universidades e empresas brasileiras e alemãs, incluindo a Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha [23].

1.4.3. Políticas estaduais e projetos em hidrogênio em desenvolvimento no Brasil

Diversos estados brasileiros, especialmente na região Nordeste, têm implementado políticas para atrair investimentos em hidrogênio verde [19]. No Ceará, o Complexo do Pecém abriga o hub da Fortescue, com capacidade de eletrólise de 1,2 GW e produção estimada em 180 mil toneladas anuais. Projetos complementares da Qair, Casa dos Ventos, Comerc e AES Brasil preveem unidades de hidrogênio e amônia verde com grandes capacidades de produção, utilizando energia solar e eólica para produção industrial, enquanto a EDP Brasil inaugura um projeto-piloto com capacidade de geração de 250 m³/h de hidrogênio a partir de energia solar [24].

No Piauí, destacam-se dois dos maiores projetos de hidrogênio verde do mundo. O *Green Energy Park* (GEP), com 10 GW de eletrólise, produzirá 2,8 milhões de toneladas de hidrogênio e 15 milhões de toneladas de amônia por ano, voltadas à exportação, enquanto a planta do grupo Solatio, com 11,4 GW de eletrólise alimentada por 25 GWp de energia solar, produzirá 1,7 milhão de toneladas de hidrogênio e 9,6 milhões de toneladas de amônia anualmente [24].

Na Bahia, Minas Gerais, Pernambuco e Rio de Janeiro, há projetos voltados à produção de hidrogênio e amônia verde, fertilizantes e e-metanol, integrando energia solar e eólica e destinando parte à exportação. Em São Paulo, consórcio formado por Shell, Raízen, Hytron, USP e Toyota testa hidrogênio a partir de etanol em transporte pesado. Projetos-piloto da Petrobras e Eletrobras/Furnas também desenvolvem hidrogênio verde com foco em P&D, armazenamento e integração ao Sistema Interligado Nacional [24].

Essas iniciativas evidenciam não apenas o potencial do país para se tornar um protagonista global na produção de hidrogênio verde, mas também a diversidade de abordagens, que contemplam tanto a exportação quanto o atendimento ao mercado interno, bem como a utilização de fontes renováveis variadas, inovação tecnológica e integração a cadeias produtivas estratégicas.

1.5. DESAFIOS DA INSERÇÃO DE TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO SOB A ÓTICA DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA E REQUISITOS DE ACESSO

A inserção de plantas de eletrólise em larga escala representa uma oportunidade para posicionar o Brasil como líder na produção de H₂V, mas também impõe novos obstáculos ao sistema elétrico. A operação de eletrolisadores conectados à rede requer conversores de potência, geralmente AC/DC, que transformam a corrente alternada do sistema elétrico em corrente contínua compatível com os eletrolisadores. Por serem cargas de grande porte e apresentarem comportamento não-linear, esses conversores podem afetar a qualidade da energia (QEE), provocando distúrbios como desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas, geração de potência reativa e interferências em faixas específicas de frequência. Compreender detalhadamente esses efeitos, suas magnitudes e impactos é essencial não apenas para o planejamento e operação segura das plantas, mas também para fundamentar requisitos futuros de acesso à rede elétrica [25].

No Brasil, o contexto regulatório do hidrogênio verde ainda se limita a políticas públicas e diretrizes gerais voltadas ao desenvolvimento econômico e ao amadurecimento tecnológico, sem normativas específicas sobre requisitos de acesso ou estudos de conexão para plantas de hidrogênio verde. A nota técnica 009/2016 estabelece instruções para a realização de estudos e medições de QEE em acessos à rede básica e institui especificações para parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras, mas ainda não contempla especificações para as particularidades das instalações de produção de H₂V. No que se refere à medição e avaliação das características elétricas de eletrolisadores, como distorções harmônicas, não existem padrões específicos consolidados nem no Brasil nem internacionalmente; a IEC 61400-21-1, por exemplo, aborda medições elétricas, mas é direcionada exclusivamente a turbinas eólicas. Isso evidencia que os principais desafios do hidrogênio verde no país não são apenas econômicos ou políticos, mas também regulatórios e técnicos, dado que ainda não há padrões

específicos estabelecidos para condução de estudos de acesso envolvendo essa categoria de cargas de alta potência.

1.6. OBJETIVOS DO TRABALHO

De acordo com as considerações apresentadas, esta dissertação tem como objetivo geral avaliar o impacto da integração de plantas de hidrogênio renovável à rede elétrica, por meio da análise de diferentes topologias de conversores AC/DC, considerando aspectos de qualidade de energia e com o intuito de contribuir para os requisitos normativos de acesso à rede básica.

Nesse contexto, os desenvolvimentos apresentados neste trabalho têm os seguintes objetivos específicos:

- Revisar o estado da arte dos eletrolisadores, com ênfase nos conversores AC/DC e nas normativas relacionadas ao acesso à rede básica, medições disponíveis e avaliações de características elétricas.
- Modelar e implementar, no ambiente MATLAB/Simulink®, módulos de eletrólise utilizando diferentes topologias de conversores AC/DC, de modo a obter as correntes certificadas de cada configuração.
- Desenvolver, no software HarmZs, a modelagem de um barramento do SIN, a fim de simular a conexão dessas plantas em um sistema real e conduzir estudos harmônicos que permitam avaliar os indicadores de QEE associados a cada topologia.
- Analisar os resultados das simulações à luz dos requisitos técnicos e regulatórios, de forma a contribuir para o entendimento dos impactos da integração de plantas de H2V tanto na qualidade de energia quanto nas adequações necessárias para atender aos requisitos de acesso à rede.

1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além desta seção introdutória, a organização do presente trabalho encontra-se estruturada da seguinte forma:

Capítulo 2 – Estado da arte: hidrogênio verde, eletrolisadores e requisitos de acesso à rede básica brasileira

Apresenta-se uma revisão abrangente do hidrogênio como vetor energético e das principais rotas tecnológicas de produção de baixo carbono. São discutidos os princípios de funcionamento das tecnologias de eletrólise e os diferentes tipos de eletrolisadores, com ênfase nos conversores de potência empregados nesse processo. Também são abordadas as diretrizes regulatórias e os critérios técnicos atualmente definidos para a conexão de plantas de hidrogênio à rede elétrica, constituindo a base teórica que fundamenta os capítulos seguintes.

Capítulo 3 – Modelagem computacional e simulação de distintas topologias de eletrolisadores

Descrevem-se as modelagens desenvolvidas no ambiente MATLAB/Simulink®. Inicialmente, são definidos as premissas e os parâmetros utilizados. Em seguida, detalham-se os critérios de seleção e a modelagem eletroeletrônica das topologias de conversores de interesse, assim como a obtenção das correntes características associadas a cada configuração feita.

Capítulo 4 – Estudo de acesso de uma planta hipotética de produção de hidrogênio à rede básica brasileira: análise harmônica de distintas topologias de eletrolisador

Dedica-se à aplicação prática das modelagens em um sistema elétrico real do SIN. Primeiramente, realiza-se a definição e caracterização do sistema. Na sequência, apresenta-se o estudo harmônico desenvolvido no software HarmZs, contemplando a implementação da rede interna, do equivalente externo e o cálculo das impedâncias equivalentes. Reúnem-se os resultados das simulações computacionais referentes a cada topologia analisada. A partir deles, são conduzidas análises críticas de desempenho, considerando os indicadores de qualidade de energia e os requisitos de acesso do ONS estabelecidos no Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede, a fim de comparar as alternativas investigadas.

Capítulo 5 – Conclusões

Sintetiza as principais contribuições da pesquisa, ressaltando os resultados alcançados e sua relevância para a integração de plantas de hidrogênio verde à rede elétrica. Por fim, discutem-se as limitações encontradas e propõem-se perspectivas para trabalhos futuros que avance em alguns aspectos abordados nesta dissertação.

2. ESTADO DA ARTE: HIDROGÊNIO VERDE, ELETROLISADORES E REQUISITOS DE ACESSO À REDE BÁSICA BRASILEIRA

2.1. O HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR ENERGÉTICO

O hidrogênio possui uma longa trajetória no setor energético. Desde sua utilização nos primeiros motores de combustão interna, há mais de duzentos anos, até sua consolidação como insumo estratégico na indústria de refino, demonstrou versatilidade e capacidade de integração em múltiplas aplicações [26].

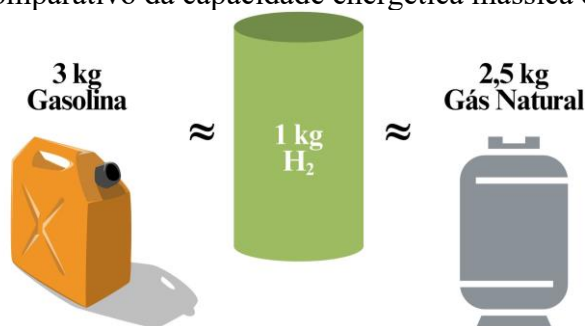
Entre suas propriedades mais relevantes, destaca-se o elevado poder calorífico de massa, aproximadamente 120–144 MJ/kg, cerca de três vezes superior ao da gasolina ou do gás natural [11], [27]. Essa característica evidencia o potencial energético do hidrogênio em relação a outros combustíveis, como ilustrado na Figura 1. Em termos práticos, 1 kg de hidrogênio equivale energeticamente a cerca de 3kg de gasolina ou 2,5 kg de gás natural, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 1 – Densidade de energia gravimétrica (MJ/kg).

Hidrogênio (líq.)	143
Hidrogênio (700 bar)	143
Hidrogênio (1 bar)	143
Metano (1 bar)	55,6
Gás Natural (líq.)	53,6
Gás Natural (250 bar)	53,6
Gás Natural (1 bar)	53,6
GLP (propano)	49,6
GLP (butano)	49,1
Gasolina	46,4
Óleo Biodiesel	42,2
Diesel	45,4
Querosene	46,4

Fonte: Modificado de [27]

Figura 2 – Comparativo da capacidade energética mássica do hidrogênio.



Fonte: Autoria própria.

Apesar de seu elevado conteúdo energético por massa, o hidrogênio apresenta baixa densidade volumétrica em condições ambientes, o que impõe desafios de armazenamento e transporte. Para viabilizar seu uso em escala, são necessárias tecnologias de compressão a 350-700 bar ou liquefação criogênica a -253 °C. Além disso, trata-se de um gás incolor e inodoro, com ampla faixa de inflamabilidade (4-77% em volume no ar), baixa energia mínima de ignição e alta velocidade de propagação de chama [28]. Essas características, resumidas na Tabela 1, evidenciam tanto os cuidados rigorosos necessários para manuseio quanto seu potencial para combustão eficiente e aplicações em motores e células a combustível.

Tabela 1 – Propriedades do Hidrogênio.

Propriedade	Hidrogênio	Comparação
Densidade (gasoso)	0,089 kg/m ³ (0° C, 1 bar)	1/10 do gás natural
Densidade (líquido)	70,79 kg/m ³ (-253° C, 1 bar)	1/6 do gás natural
Ponto de ebulição	-252,76° C (1 bar)	90° C abaixo do gás natural líquido
Energia por unidade de massa (VCL)*	120,1 MJ/kg (33,36 kWh/kg)	3x maior que da gasolina
Densidade de energia (ambiente, VCL*)	0,01 MJ/L	1/3 do gás natural
Energia específica (líquido, VCL*)	8,5 MJ/L	1/3 do gás natural líquido
Velocidade de chama	346 cm/s	8x maior que do metano
Faixa de ignição	4-77% no ar por volume	6x mais ampla que do metano
Temperatura de autoignição	585° C	O da gasolina é 220° C

*VCL = Valor calorífico inferior, sem considerar o calor da condensação da água formada na combustão.

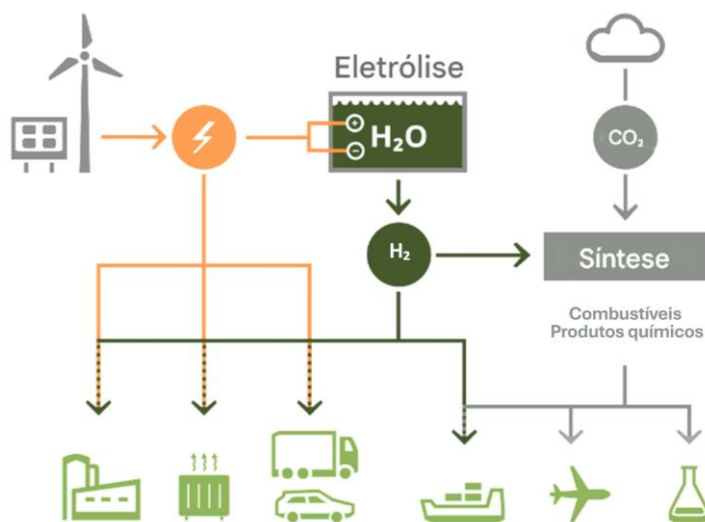
Fonte: Adaptado de [28].

No cenário atual, a produção global de hidrogênio é majoritariamente fóssil [28]. Contudo, as políticas de transição energética tem direcionado esforços para a utilização do hidrogênio de baixa emissão de carbono, capaz de integrar sistemas elétricos com elevada participação de renováveis e atender setores de difícil eletrificação, como siderurgia, química, refino, transporte marítimo e aviação de longas distâncias [28], [29]. Nesses segmentos, o hidrogênio é peça-chave para a chamada “desfossilização” da economia [28].

Nesse contexto, o hidrogênio verde assume papel estratégico não apenas na descarbonização, mas também no avanço das tecnologias *Power-to-X* (PtX), processos que convertem energia elétrica renovável (*power*) em outros vetores energéticos, até mesmo combustíveis sintéticos, produtos químicos ou calor (*X*) [28], [29].

A rota exposta na Figura 3, por exemplo, permite utilizar geração solar e eólica disponíveis para produzir hidrogênio, que pode, por sua vez, ser novamente transformado em eletricidade, por meio de pilha a combustível, e ser utilizado principalmente para mobilidade, além disso, outras utilizações são possíveis, tais como: emprego em sistemas de aquecimento, bem como ser combinado ao CO₂ capturado para síntese de combustíveis e insumos químicos, contribuindo para diversificação das soluções energéticas sustentáveis, utilização na indústria química e de alimentos, entre outras [28].

Figura 3 – Exemplo de hidrogênio verde no contexto PtX.



Fonte: Adaptado de [28].

Outro papel estratégico é como vetor de flexibilidade energética. Tecnologias *Power-to-Gas* (PtG) convertem excedentes de eletricidade renovável em hidrogênio, que pode ser armazenado e posteriormente reconvertido em eletricidade ou calor, auxiliando a integração de

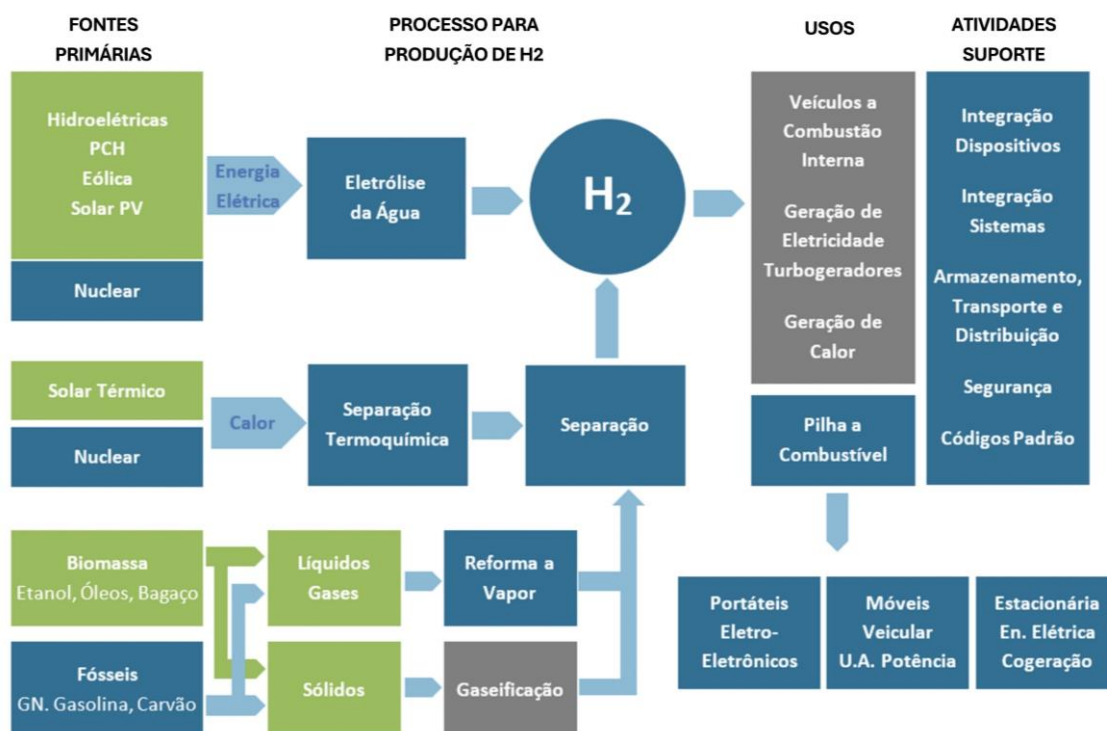
fontes intermitentes. Alternativamente, é possível injetar hidrogênio em gasodutos de gás natural, reduzindo gradualmente o teor de carbono sem substituição imediata da infraestrutura [10].

Em geral, essa abordagem viabiliza a integração setorial e a diversificação de soluções de baixo carbono, preparando o terreno para o avanço das rotas tecnológicas de produção, discutidas na próxima seção.

2.2. ROTAS TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO

O hidrogênio pode ser classificado por cores, frequentemente representadas pelas categorias verde, azul e cinza, que indicam a rota utilizada para produzi-lo, conforme ilustrado na Figura 4. Cada uma dessas rotas está associada a uma fonte primária de energia e a processos distintos de conversão. É importante destacar que essa classificação não é universal e está em constante evolução conforme o desenvolvimento tecnológico em nível global [28].

Figura 4 – Rotas tecnológicas de produção de hidrogênio.



Fonte: [28].

As principais fontes primárias incluem hidrelétricas, energia eólica, solar e nuclear, associadas a diferentes processos de produção de hidrogênio. Por exemplo, eletricidade de

fontes renováveis pode ser utilizada na eletrólise da água para gerar hidrogênio verde, enquanto energia nuclear ou solar térmica pode ser aplicada em processos termoquímicos [28]. Além disso, hidrogênio pode ser obtido a partir de biomassa (etanol, óleos, bagaço), combustíveis fósseis (gás natural e carvão) ou resíduos sólidos urbanos, através de gaseificação, reforma a vapor ou processos alternativos, apresentados a seguir.

2.2.1. Produção de hidrogênio com CCUS

Essa rota de produção de hidrogênio combina a produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis, com técnicas de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS, na sigla em inglês), para reduzir emissões de CO₂. Esse tipo de hidrogênio pode ser produzido tanto a partir de carvão quanto de gás natural.

No caso do carvão, a gaseificação é realizada com carvão sólido, ar e vapor d'água a aproximadamente 1300 °C, formando gás de síntese, que posteriormente sofre uma Reação de Deslocamento Gás-Água (WGSR, na sigla em inglês) para gerar hidrogênio e CO₂ [30]. A gaseificação pode ser representada pelas reações:



Outra rota a partir do carvão é o processo de coquificação, também conhecido como pirólise de alta temperatura, que gera coque e gás de forno de coque, contendo cerca de 55-60% de H₂, 23-27% de CH₄ e 6-8% de CO [30].

Para a produção de hidrogênio a partir do gás natural, os métodos incluem reforma a vapor de metano (SMR, na sigla em inglês), oxidação parcial (POX, na sigla em inglês), reforma autotérmica (ATR, na sigla em inglês) e decomposição do gás natural (NGD, na sigla em inglês) [30].

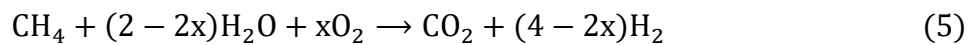
A SMR é um processo endergônico que consome altas temperaturas (~1000 °C) e, na presença de catalisadores baseados em Níquel (*Ni-based*) ou metais nobres, gera hidrogênio conforme [30]:



A POX envolve a reação de hidrocarbonetos com oxigênio em condição deficiente, produzindo CO e H₂, e requer oxigênio puro e catalisadores nobres, limitando essa aplicação na produção em escala.



A ATR combina a oxidação parcial e a reforma a vapor em um único reator, utilizando o calor gerado pela reação exotérmica da oxidação para sustentar a reforma endotérmica, sendo geralmente catalisada por *Ni-based*. A reação pode ser descrita por:



Onde x representa o fator estequiométrico de oxigênio.

Já a NGD consiste na pirólise do gás natural, gerando hidrogênio e carbono sólido, sendo necessário controlar a deposição de carbono para evitar desativação do catalisador [30].



No chamado hidrogênio azul, o CO₂ gerado nesses processos é capturado utilizando tecnologias de CCUS. Após a captura, pode ser armazenado em estado líquido ou supercrítico em reservatórios subterrâneos ou marítimos profundos, ou pode ser utilizado como recurso em processos industriais, como produção de uréia, recuperação aprimorada de petróleo, alimentos, bebidas, metais e outras aplicações comerciais [30].

2.2.2. Produção de hidrogênio a partir de subprodutos industriais

Muitos processos industriais, especialmente refinarias de petróleo e petroquímicas, liberam gases residuais contendo hidrogênio. A separação e purificação desse hidrogênio residual traz benefícios econômicos e ambientais, representando cerca de 15% da produção mundial de hidrogênio [30], [31].

Um exemplo típico é o hidrogênio produzido como subproduto da desidrogenação do propano para obtenção de propeno [30]. Esse hidrogênio pode ser utilizado como combustível em motores ou em outros processos industriais, permitindo maior eficiência energética e redução de emissões de carbono [31].

Comparado aos gases mistos de processos fósseis, os gases residuais industriais apresentam composição mais complexa, exigindo técnicas de purificação [30]. O princípio de funcionamento consiste em recuperar o hidrogênio presente nos subprodutos, purificá-lo e utilizá-lo como fonte de energia ou matéria-prima química, contribuindo para processos mais sustentáveis [31].

2.2.3. Produção de hidrogênio a partir da biomassa

A produção de hidrogênio pode ocorrer por processos biológicos ou químicos, que convertem matéria orgânica em H₂ sob diferentes condições operacionais [32]. A Tabela 2 apresenta uma síntese desses processos, destacando as principais rotas biológicas e químicas utilizadas na conversão de biomassa para produção de hidrogênio.

Tabela 2 – Processos biológicos e químicos para produção de H₂ a partir da biomassa.

Processos biológicos	Processos químicos
Fotólise da água: microalgas e cianobactérias utilizam energia solar para produzir H ₂	Gaseificação: converte biomassa em gás de síntese (H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄) utilizando ar, oxigênio ou vapor como agente oxidante
Fotofermentação: bactérias fotossintéticas convertem ácidos orgânicos em H ₂ em condições anaeróbicas e de luz	Pirólise com reforma: decompõe a biomassa e o alcatrão resultante desse processo é reformado para aumentar a fração de H ₂
Fermentação escura: realizada na ausência de luz, onde bactérias anaeróbicas transformam carboidratos em H ₂ e ácidos orgânicos	Conversão em água supercrítica: ocorre acima de 374 °C e 22 MPa, permitindo processar biomassa úmida sem necessidade de secagem, minimizando a formação de alcatrões

Fonte: [32].

2.2.4. Produção de hidrogênio a partir da amônia

A amônia (NH₃) é um portador de hidrogênio promissor, pois possui alta capacidade de armazenamento (17,7% em peso) e pode ser transportada e armazenada como líquido sob pressões moderadas [33]. O hidrogênio é gerado por decomposição catalítica térmica, segundo a reação:



Este processo ocorre normalmente entre 450-700 °C e requer catalisadores para reduzir a energia de ativação. Catalisadores à base de rutênio apresentam alta eficiência, mas metais mais abundantes, como Co, Ni e Fe, também têm sido estudados, muitas vezes combinados com suportes de alta área e promotores para melhorar o desempenho [30].

Em essência, o princípio de funcionamento consiste em quebrar as ligações N-H da amônia, liberando H₂, enquanto N₂ é formado como subproduto. A amônia líquida facilita o armazenamento e transporte do hidrogênio, tornando essa rota promissora para sistemas de baixo carbono [33].

Entretanto, é importante salientar que o transporte de hidrogênio em forma de amônia pode gerar grandes riscos ambientais significativos. A amônia é tóxica, possui caráter corrosivo e é altamente hidrofílica [34]; em caso de acidente marítimo, dissolve-se rapidamente no oceano, podendo alterar o pH da água local. Descargas acidentais em corpos d'água podem prejudicar ecossistemas aquáticos, comprometendo a vida marinha e causando efeitos ecotóxicos severos sobre a biota local [35].

2.2.5. Produção de hidrogênio a partir d'água

Essa é a rota de produção considerada a tecnologia de menor emissão de carbono mas com custo relativamente elevado, ele é obtido através da fotocatalise ou pela eletrólise da água, utilizando fontes de energia renováveis [30].

- **Fotocatálise:** envolve o uso de fotocatalisadores para dividir a água, produzindo hidrogênio e oxigênio. O processo inclui absorção de fótons, separação e migração de pares elétron-lacuna na superfície do semicondutor, seguidos pelas reações de redução e oxidação. Também existe a fotocatalise com reformação, que combina a oxidação de reagentes sacrificial contendo oxigênio com a separação da água, diminuindo a energia livre necessária e evitando reações reversas [30].
- **Eletrólise da água:** é o processo no qual a energia elétrica é utilizada para quebrar a molécula de água em hidrogênio e oxigênio. Quando essa eletricidade provém de fontes renováveis, obtém-se o chamado hidrogênio verde [28]. No entanto, a fim de garantir clareza e aprofundamento adequado, os diferentes tipos de eletrolisadores e respectivos princípios de funcionamento serão abordados no subtópico seguinte.

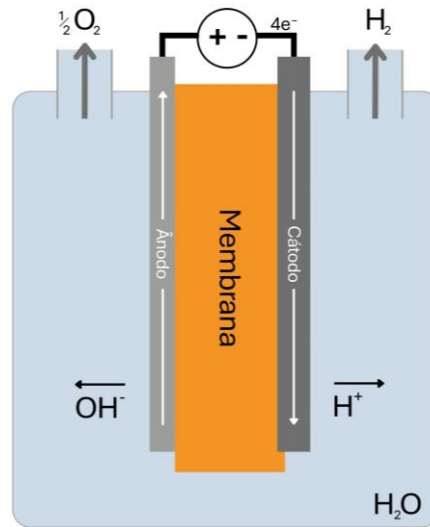
2.3. TECNOLOGIAS DE ELETRÓLISE: PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E TIPOS DE ELETROLISADORES

A eletrólise da água a partir da utilização de energias renováveis é considerada a principal estratégia de produção de hidrogênio verde, ou seja, é a rota tecnológica mais direta e limpa para a obtenção de H_2 , sendo amplamente reconhecida como uma solução central para a transição energética global [10], [28]. Nesse processo, a eletricidade, de origem renovável, é utilizada para decompor a água em hidrogênio e oxigênio, resultando em um vetor energético livre de carbono [10].

O fundamento do processo de eletrólise é a eletroquímica, definida como o estudo dos fenômenos químicos que ocorrem mediante a troca de energia elétrica. Essas transformações envolvem reações de oxidação, nas quais o elemento perde elétrons, e de redução, nas quais o elemento ganha elétrons. Quando se aplica uma diferença de potencial adequada ao sistema, estabelece-se um fluxo de corrente que possibilita essas reações. No ânodo ocorre a oxidação, com liberação de elétrons e formação de íons oxidados, enquanto no cátodo ocorre a redução, com ganho de elétrons e formação de íons reduzidos [28].

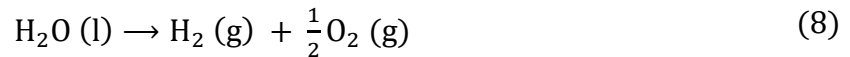
Aplicando esse conceito, o eletrolisador utiliza um eletrólito para permitir a condução iônica entre os eletrodos, promovendo as reações que dissociam as moléculas de H_2O . Durante a reação no ânodo, o elétron do íon OH^- é atraído pelo polo positivo do sistema, formando oxigênio molecular, água e liberando elétrons que retornam pelo circuito externo [28]. A formação de H_2 ocorre na superfície catalítica do cátodo, que promove a quebra da molécula de água e a formação de íons hidroxila (OH^-) ou prótons (H^+), dependendo do tipo de eletrolisador utilizado. Esses íons migram através do eletrólito em direção ao ânodo, onde se combinam para formar oxigênio molecular. O oxigênio, coproduto da reação, é obtido em alta pureza e pode ser comercializado para aplicações hospitalares, químicas ou industriais [28]. Apresenta-se o esquema geral do processo de eletrólise da água na Figura 5.

Figura 5 – Esquemático genérico do processo de eletrólise da água.

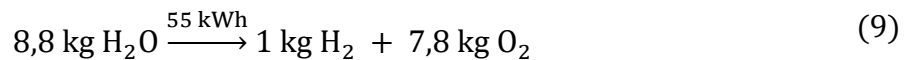


Fonte: Autoria própria.

O resultado global é a produção de hidrogênio no cátodo e oxigênio no ânodo, conforme a reação [11]:



Em termos práticos, eletrólisadores comerciais de baixa temperatura consomem entre 55-60 kWh por quilograma de H_2 produzido, enquanto tecnologias de alta temperatura podem atingir valores de 48-50 kWh/kg, graças ao aproveitamento da energia térmica no processo [11]. A eficiência global é expressa como a razão entre a energia química do hidrogênio produzido e a energia elétrica consumida, podendo ser calculada com base no poder calorífico superior ou inferior do hidrogênio [11], [28]:

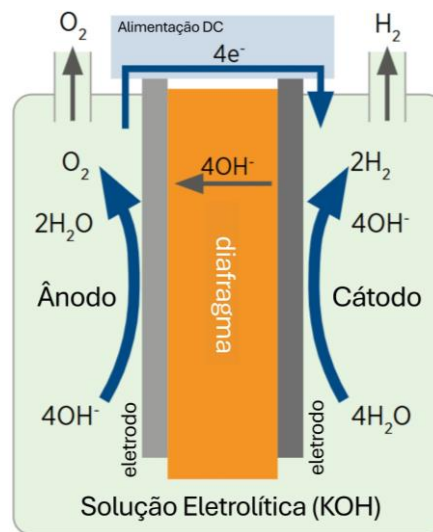


Por fim, compreender esses fundamentos é essencial antes de avançar para a análise dos diferentes tipos de eletrólisadores, que será apresentada na próxima subseção. Cada tecnologia possui características específicas quanto ao eletrólito, temperatura de operação, eficiência e maturidade tecnológica, fatores que impactam diretamente a viabilidade técnica e econômica da produção de hidrogênio verde [36].

2.3.1. Eletrolisadores Alcalinos (AEL)

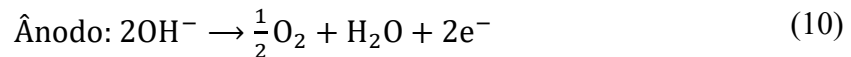
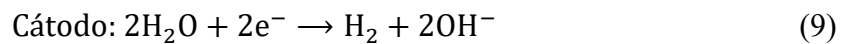
Os Eletrolisadores Alcalinos (AEL, na sigla em inglês) representam a tecnologia de eletrólise mais consolidada, com histórico de uso desde o início do século XX [10]. Utilizam uma solução alcalina, tipicamente hidróxido de potássio (KOH) entre 25 e 30%, como eletrólito. Nessa configuração, ilustrada na Figura 6, dois eletrodos são posicionados entre um diafragma que separa os gases gerados e permite o transporte de íons hidróxido (OH^-) do cátodo para o ânodo [28].

Figura 6 – Esquemático do processo de eletrólise alcalina.



Fonte: Adaptado de [36].

As reações químicas podem ser descritas da seguinte forma [4]:

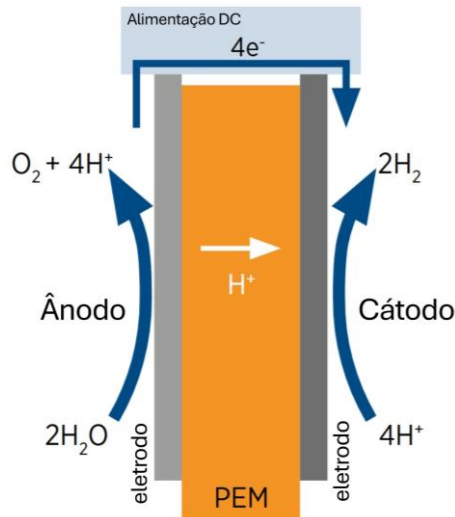


Essa tecnologia apresenta diversas vantagens: é madura, de design simples, utiliza catalisadores de baixo custo (níquel, cobalto, ferro), apresenta alta estabilidade a longo prazo e pode atingir elevadas taxas de produção de hidrogênio, como os $3880 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ obtidos pelo modelo A3880 da NEL Company (4,4 MW). No entanto, a densidade de corrente é relativamente baixa, o que torna os eletrolisadores volumosos e com resposta dinâmica mais lenta, limitando sua operação em cenários de alta variabilidade, como na integração com energia eólica [28].

2.3.2. Eletrolisadores de Membrana de Troca de Prótons (PEMEL)

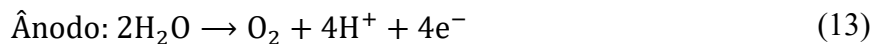
Os Eletrolisadores de Membrana de Troca de Prótons (PEMEL, na sigla em inglês) utilizam uma membrana de polímero sólido (PFSA, como Nafion[®]) que atua simultaneamente como eletrólito e elemento separador de gases [28]. Diferentemente dos AEL, onde o transporte iônico ocorre pela migração de íons OH⁻ através da solução alcalina, no PEMEL o transporte é realizado por prótons H⁺ que atravessam a membrana hidratada. A hidratação adequada dessa membrana é essencial para garantir sua condutividade iônica, uma vez que o fluxo de prótons depende diretamente da presença de água. O funcionamento geral dessa configuração é ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Esquemático do processo de eletrólise do PEMEL.



Fonte: Adaptado de [36].

As reações químicas envolvidas são [28]:



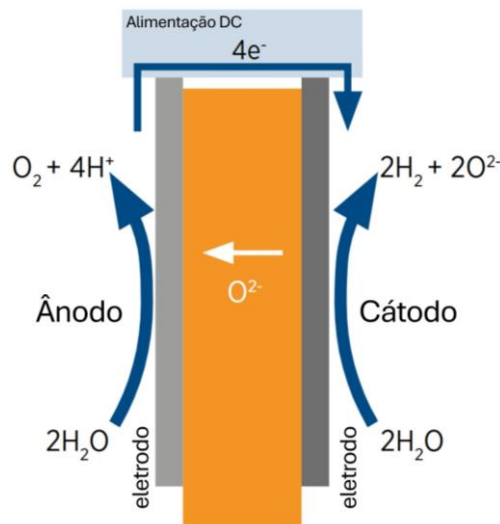
Essa tecnologia opera em temperaturas de 50-80 °C, suporta pressões de até 80 bar e apresenta vantagens significativas: alta densidade de potência, ampla faixa de operação (0-100%), resposta dinâmica rápida e design compacto [28]. Além disso, o hidrogênio produzido apresenta elevada pureza (>99,99%), o que reduz a necessidade de etapas de purificação posteriores [36].

O principal desafio está no custo, já que utiliza catalisadores de metais nobres (irídio e platina) e materiais resistentes à corrosão, como titânio. Contudo, sua excelente capacidade de resposta os torna ideais para aplicações com fontes renováveis intermitentes [28].

2.3.3. Eletrolisadores de Óxido Sólido (SOEL)

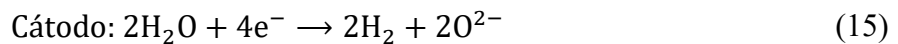
Os Eletrolisadores de Óxido Sólido (SOEL, na sigla em inglês) utilizam um eletrólito sólido cerâmico capaz de conduzir íons O^{2-} para produzir hidrogênio a partir da água [28]. Essa tecnologia opera em temperaturas elevadas, tipicamente entre 700 e 1000 °C [10]. O esquemático do processo de eletrólise por óxido sólido se apresenta na Figura 8:

Figura 8 – Esquemático do processo de eletrólise do SOEL.



Fonte: Adaptado de [36].

A água é alimentada no lado do cátodo, onde é reduzida pela chegada de elétrons, formando H_2 gasoso e íons óxido O^{2-} . Os íons O^{2-} atravessam o eletrólito cerâmico condutor de oxigênio em direção ao ânodo. No ânodo, esses íons são oxidados, liberando elétrons para o circuito externo e formando O_2 . As reações são [36]:



Essa configuração oferece eficiências superiores, podendo atingir até 90%, especialmente quando associada ao aproveitamento de calor residual industrial [10]. Além de

reversibilidade (operar como célula de combustível e eletrolisador), também possibilita coeletrólise de H_2O e CO_2 para produção de *syngas*, recurso importante para a indústria química e reversibilidade [30], [36].

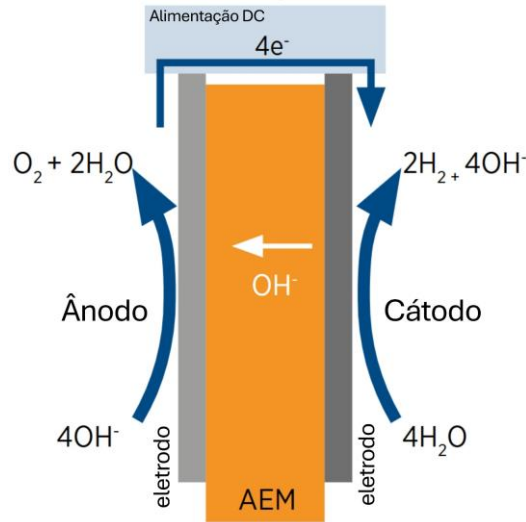
Por outro lado, como a eletrólise de óxido sólido é realizada em altas temperaturas, os materiais utilizados sofrem degradação, o que acaba reduzindo a vida útil do equipamento [28]. Outros problemas relacionados à degradação incluem: desafios relacionados à vedação em pressões diferenciais mais altas; contaminação dos eletrodos por sílica usada como selantes; e outras fontes adicionais de contaminantes provenientes de tubulações, interconexões e selagens [36].

2.3.4. Eletrolisadores de membrana de troca aniônica (AEMEL)

Por fim, os eletrólisadores de membrana de troca aniônica (AEMEL, na sigla em inglês) representam a tecnologia mais recente no campo da eletrólise da água, com poucas empresas comercializando e implantações ainda limitadas. Seu principal potencial está em combinar as vantagens do ambiente menos agressivo dos AEL com a simplicidade e eficiência dos PEMEL, permitindo o uso de catalisadores não-nobres, componentes sem titânio e operação sob pressão diferencial [36].

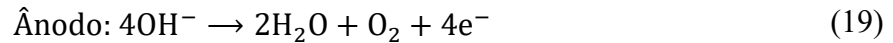
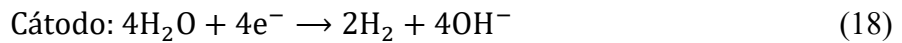
Na eletrólise por membrana de ânions, o íon OH^- é o condutor de carga, migrando através da membrana enquanto a água é alimentada em um lado de maior pressão, promovendo a produção de hidrogênio e oxigênio [28]. A Figura 9 apresenta o esquemático geral do processo de eletrólise dos AEMEL.

Figura 9 – Esquemático do processo de eletrólise do AEMEL.



Fonte: Adaptado de [36].

As reações eletroquímicas que caracterizam o processo são as seguintes:



Apesar desse potencial, os AEMEL ainda enfrentam desafios significativos. A performance dessas células depende do ajuste fino das propriedades de condutividade da membrana ou da adição de eletrólitos de suporte, como KOH ou bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$); contudo, essas estratégias podem reduzir a durabilidade do material. Além disso, o íon OH^- apresenta uma mobilidade aproximadamente três vezes menor que a dos prótons H^+ em membranas PEMEL, o que leva os desenvolvedores de AEMEL a buscar membranas mais finas ou com maior densidade de carga para compensar essa limitação. Esse conjunto de fatores contribui para que o desempenho global ainda seja inferior ao desejado, devido à baixa condutividade iônica, à arquitetura limitada dos eletrodos e à cinética mais lenta dos catalisadores [36].

De forma geral, observa-se que os avanços recentes em materiais, design e integração de sistemas estão tornando todas as tecnologias mais competitivas. Embora os AEL permaneçam como a opção mais madura e acessível, os PEMEL e SOEL tendem a ganhar importância estratégica na produção de hidrogênio verde devido às suas eficiências superiores, resposta dinâmica e potencial de integração a sistemas energéticos renováveis [10].

2.4. CONVERSORES DE POTÊNCIA APLICADOS À ELETRÓLISE

A operação do eletrólizador pode ser integrada de diferentes formas ao sistema elétrico. No acoplamento direto, a alimentação é feita exclusivamente por fontes renováveis, como sistemas fotovoltaicos ou parques eólicos, garantindo produção totalmente verde e minimizando perdas de conversão. Outra alternativa é a integração com a rede elétrica, aproveitando excedentes de energia em horários de baixa demanda, estratégia já utilizada em projetos de PtG na Alemanha. Sistemas híbridos, que combinam múltiplas fontes renováveis, têm sido propostos para garantir estabilidade e aumentar o fator de capacidade, reduzindo a intermitência do fornecimento [10].

No contexto brasileiro, devido o Sistema Interligado Nacional (SIN) ter predominância de fontes renováveis, as plantas de hidrogênio verde conectadas à rede se tornam uma alternativa potencial. Exemplos disso são os projetos de hidrogênio da Fortescue e da Solatio, localizados na região Nordeste do país, que, em 2024 receberam aval da Secretaria Nacional de Transição Energética e Planejamento do Ministério de Minas e Energia para acesso à rede básica do SIN e agora dependem do parecer de acesso do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e da autorização expedida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) [37].

Independentemente do tipo de eletrólizador, é imprescindível a utilização de conversores retificadores, responsáveis por transformar a corrente alternada da rede em corrente contínua, necessária para alimentar o processo de eletrólise.

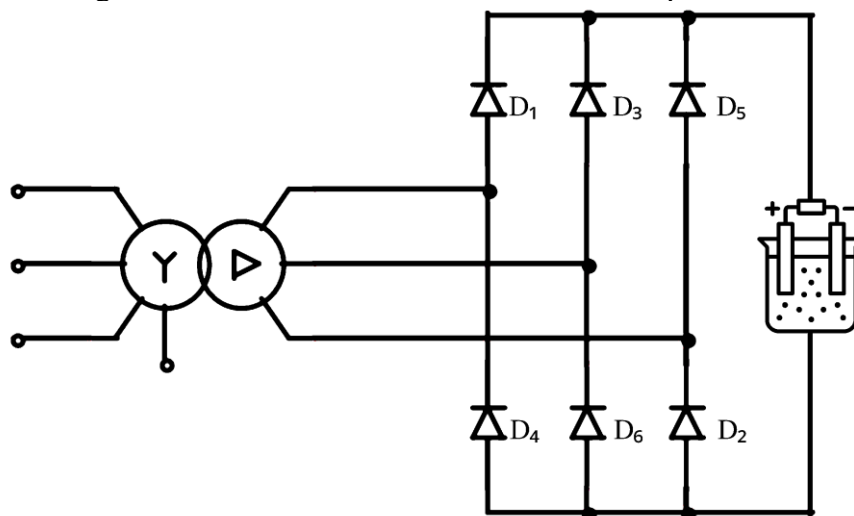
No que se refere aos conversores, existem diversas tecnologias com diferentes princípios de aplicação e estratégias de controle. A seguir, apresenta-se um panorama das principais topologias encontradas na literatura.

2.4.1. Retificadores não controlados

2.4.1.1. Retificador trifásico a diodos de 6 e 12 pulsos

Os retificadores trifásicos em ponte de diodos são particularmente adequados para aplicações de alta potência (>15 kW), diferente dos retificadores monofásicos de diodos, que são indicados para aplicações de baixa e média potência [38]. Tem-se, na Figura 10, um exemplo de retificador trifásico de 6 pulsos.

Figura 10 – Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos.



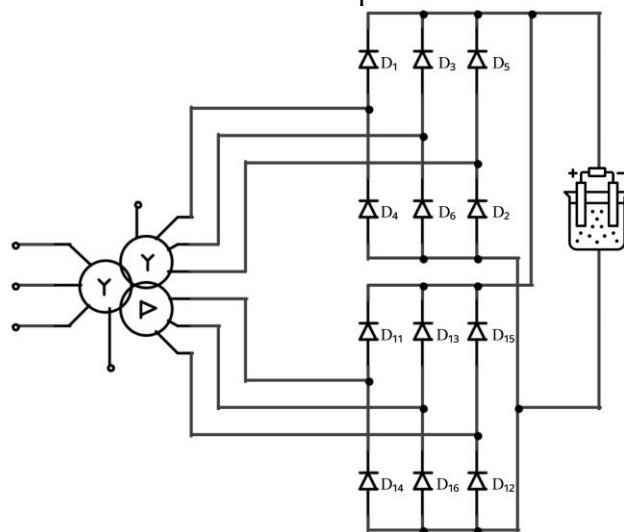
Fonte: Autoria própria.

Nesta figura, a topologia trifásica é composta por seis diodos, cujos ânodos (D1, D3 e D5) são conectados a cada fase da rede CA por meio de um transformador trifásico em delta. Em cada instante, o diodo conduz quando a tensão da sua fase é maior que a das demais. Dessa forma, cada diodo conduz durante um ângulo de 120° ao longo do período de 2π [38].

O retificador trifásico em ponte de seis pulsos (6D) apresenta baixo custo, bom fator de retificação e fator de forma, além de boa eficiência energética devido à comutação na frequência da rede. No entanto, esta topologia fornece apenas tensão constante, que depende diretamente das características da fonte CA do eletrolisador [38].

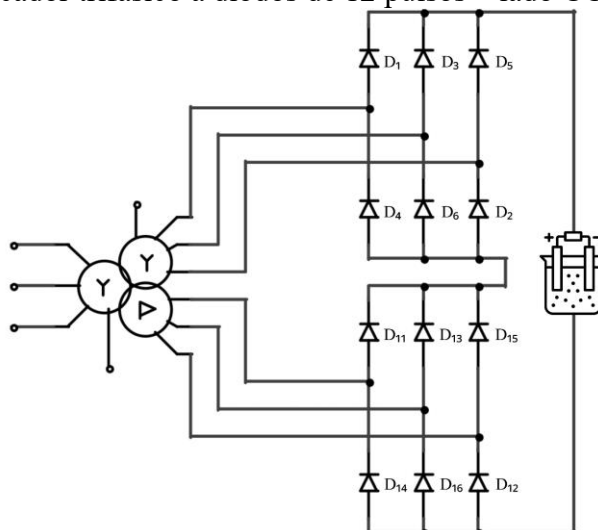
Para aplicações que exigem maior qualidade de energia e menor ondulação, pode-se empregar o retificador em ponte de diodos de doze pulsos (12D). Essa topologia é formada por duas pontes de seis pulsos com o lado CC conectados em série ou em paralelo, com condução, em cada ponte, de 60° por conjunto de diodos em um período de 360° [39], [38]. Para viabilizar o defasamento de 30° , necessário à formação do sistema de 12 pulsos, pode-se utilizar dois transformadores defasadores ou, ainda, um transformador com dois enrolamentos secundários, um conectado em delta e outro em estrela, gerando um defasamento natural de 30° entre as tensões que alimentam as pontes [39], [38]. A escolha entre conexão, da saída CC das pontes de 6 pulsos, em série (para maior tensão de saída) ou em paralelo (para maior corrente de saída) é feita de acordo com as especificações do fabricante do eletrolisador. A Figura 11 apresenta um retificador trifásico a diodos de 12 pulsos com o lado CC conectado em paralelo, enquanto a Figura 12 mostra o mesmo arranjo, porém com o lado CC conectado em série.

Figura 11 – Retificador trifásico a diodos de 12 pulsos – lado CC com conexão paralela.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – Retificador trifásico a diodos de 12 pulsos – lado CC com conexão série.



Fonte: Autoria própria.

A saída em corrente contínua de um retificador de seis pulsos apresenta ondulações a seis vezes a frequência fundamental, enquanto um retificador de doze pulsos apresenta ondulações de doze vezes essa frequência [39]. O aumento do número de pulsos reduz a amplitude das ondulações, resultando em uma tensão de saída quase contínua. Essa característica faz com que os retificadores de doze pulsos forneçam menor ondulação de tensão e corrente [39], [38]. Outra questão relevante é o fato que os sistemas de 12 pulsos geram menos harmônicos característicos em seu ponto de conexão (CA) que os sistemas de 6 pulsos.

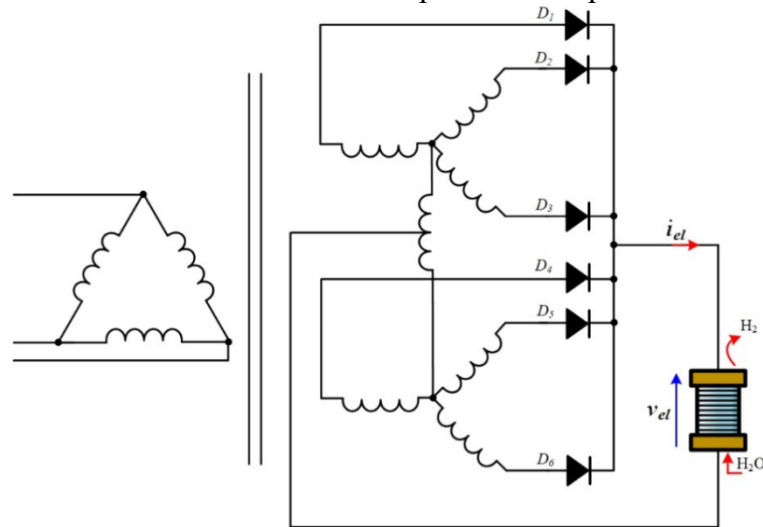
Apesar de características favoráveis, como bom fator de retificação e fator de forma, ondulação reduzida, menores perdas e melhor qualidade de energia, a topologia de doze pulsos

implica maior custo e volume devido à sua complexidade [38]. Além disso, conversores baseados unicamente em diodos não permitem o controle da tensão e corrente de saída, sendo mais apropriados para módulos de eletrólise com potência fixa [39].

2.4.1.2. Retificador trifásico de 6 e 12 pulsos em dupla estrela a diodos

Outra aplicação para baixa tensão é o retificador em ponte dupla estrela. Essa topologia, apresentada na Figura 13, utiliza dois retificadores trifásicos em estrela, cujos os nós de neutro são interconectados por meio de um transformador de interfase, esse transformador de fase intermediária tem como objetivo fazer com que a tensão de saída, V_{el} , seja a média dos valores retificados [2].

Figura 13 – Retificador trifásico de 6 pulsos em dupla estrela a diodos.

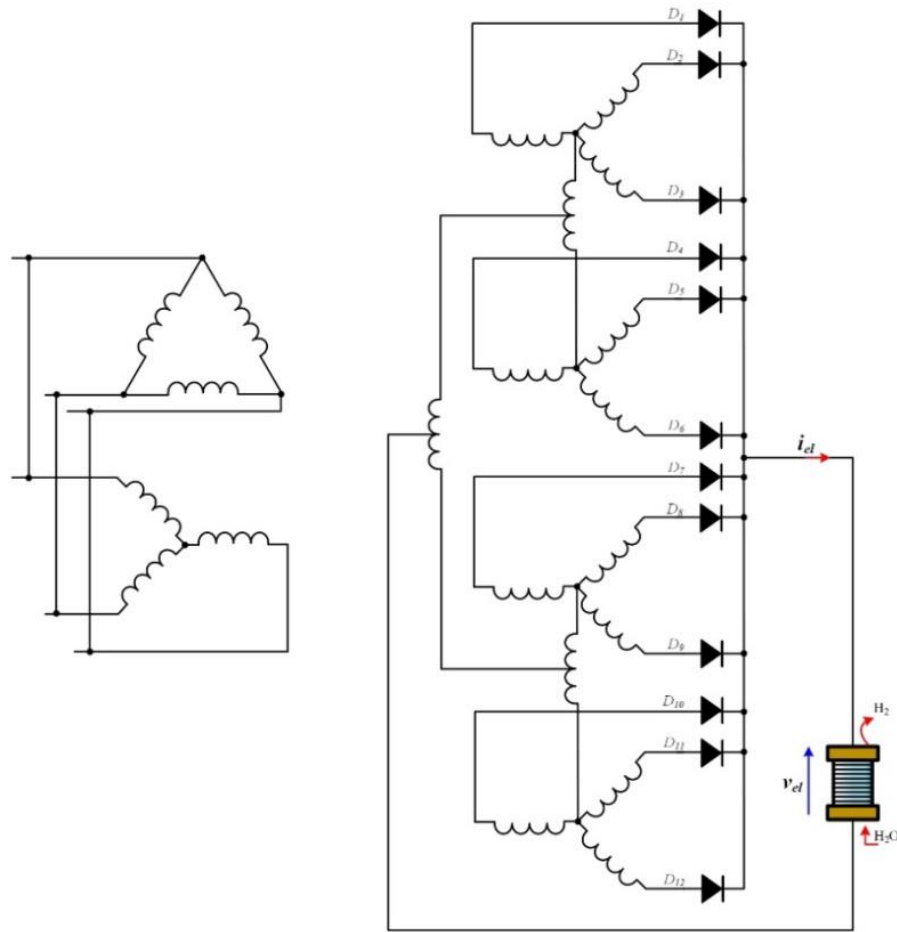


Fonte: [38].

A principal vantagem dessa configuração, em relação à topologia clássica do 6D, é a redução de 50% da corrente média e RMS dos diodos, o que melhora a eficiência energética. Fora isso, mantém os mesmos benefícios e limitações da configuração convencional [38].

Com base nessa estrutura, dois retificadores de ponte dupla estrela podem ser acoplados em paralelo para formar um retificador de doze pulsos em ponte dupla estrela. Conforme o diagrama da Figura 14, nessa topologia os nós de neutro dos dois retificadores são conectados por dois transformadores de interfase, e um terceiro transformador adicional conecta esses dois primeiros à polaridade negativa do eletrólizador [38].

Figura 14 – Retificador trifásico de 12 pulsos em dupla estrela a diodos.



Fonte: [38].

Em comparação à versão de seis pulsos, reduz ainda mais a corrente média e RMS nos diodos, aumentando a eficiência energética. Entretanto, sua maior complexidade construtiva eleva o custo e o volume do sistema, o que limita sua atratividade para aplicação em plantas de eletrólise [38].

2.4.2. Retificadores controlados

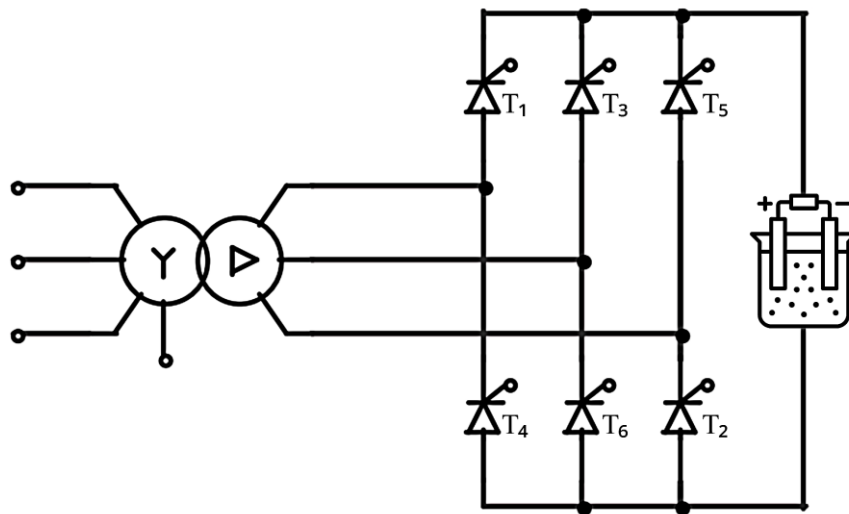
2.4.2.1. Retificador trifásico controlado de 6 pulsos a tiristor

Conversores de potência baseados em tiristores são soluções mais maduras e amplamente utilizadas em aplicações de retificação de alta potência [40]. Nesses conversores, os diodos são substituídos por tiristores, permitindo o controle da tensão e da corrente de saída.

Um retificador controlado de seis pulsos opera com base no princípio da retificação controlada. Ele consiste em uma ponte de seis tiristores, com três na meia-ponte superior e três

na meia-ponte inferior, cada um sincronizado com a tensão de pico das três fases da rede AC. Esse arranjo, indicado na Figura 15, permite o disparo controlado dos tiristores por meio de um circuito de bloqueio de fase (PLL, na sigla em inglês), que detecta os cruzamentos por zero da tensão AC, garantindo que os pulsos de disparo ocorram nos pontos corretos. A inclusão do ângulo de disparo α permite controlar o momento em que os tiristores conduzem, regulando o fluxo de corrente para o eletrolisador [39].

Figura 15 – Ponte tiristorizada de 6 pulsos.



Fonte: Autoria própria.

A operação de um retificador de seis pulsos a tiristor (6TR) pode ser dividida em quatro etapas principais [41]:

- **Retificação:** Durante a metade positiva do ciclo AC, os tiristores superiores conduzem, permitindo a passagem de corrente em uma direção;
- **Comutação natural:** À medida que as tensões do sistema AC variam entre as fases, ocorre a comutação natural entre os tiristores. Quando um novo tiristor é disparado e se torna diretamente polarizado, a corrente é gradualmente transferida do tiristor anteriormente em condução, que se desliga quando sua corrente se anula. Essa transição garante a continuidade da tensão e da corrente na saída em CC;
- **Saída CC pulsante:** A combinação da retificação e da comutação resulta em uma tensão de saída pulsante, ainda contendo ondulações devido à comutação dos tiristores;

- **Suavização:** Capacitores podem ser conectados em paralelo à carga para armazenar energia nos picos de tensão e liberar nos vales, reduzindo a ondulação e suavizando a saída CC.

O controle do 6TR é realizado principalmente através de [41]:

- **Controle do ângulo de disparo:** Ajusta o momento de condução dos tiristores, permitindo regular a tensão média de saída. Um ângulo menor resulta em tensão mais alta, enquanto um ângulo maior reduz a tensão;
- **Controle de realimentação de tensão e corrente:** Sensores monitoram a saída e ajustam os ângulos de disparo para manter os valores desejados.

Entre as vantagens do 6TR destacam-se o baixo custo, a construção simples e confiável, a manutenção facilitada e a boa eficiência energética [39]. O valor médio da tensão de saída, desconsiderando elementos parasitas e considerando corrente CC constante, é dado em função do ângulo de disparo α [38].

Para $\alpha = 0^\circ$, a tensão máxima de saída CC é equivalente à de um 6D. Aumentar o ângulo de disparo diminui a tensão de saída, sendo que, para operação no modo retificador, α não deve ultrapassar 90° [38].

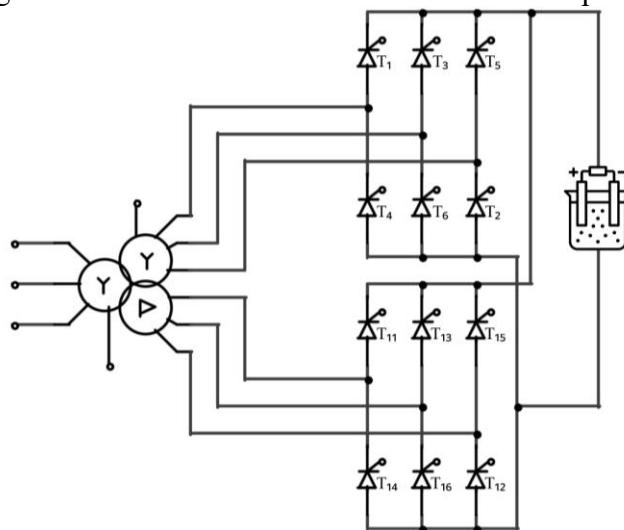
Apesar de sua eficiência, esta topologia apresenta desvantagens: o surgimento de potência reativa a qual aumenta com a elevação do ângulo de disparo, consequente diminuição do fator de potência e intensificação do conteúdo harmônico. Além disso, o fator de ondulação pode variar muito, dependendo da faixa de carga, sendo a operação em baixa carga desfavorável, quanto maior a carga, menor a ondulação de corrente [38]. A ondulação de corrente também influencia a produção de hidrogênio, podendo reduzir a quantidade produzida para a mesma energia de entrada e afetar a qualidade do gás. Conversores mais complexos, como retificadores de 12 pulsos ou choppers CC, podem ser utilizados para melhorar a ondulação e a qualidade da energia [38].

2.4.2.2. Retificador trifásico controlado de 12 pulsos a tiristor

O retificador tiristorizado de 12 pulsos (12TR) é uma solução bastante consolidada para atenuar problemas relacionados à qualidade da energia e ao baixo fator de potência [40]. A Figura 16 esquematiza essa topologia formada por dois retificadores de seis pulsos defasados

em 30° , interligados por meio de um transformador de três enrolamentos [39]. Cada retificador de seis pulsos, por sua vez, utiliza uma ponte de tiristores composta por três dispositivos na meia-ponte superior e três na meia-ponte inferior, totalizando doze tiristores no sistema [41]. A conexão entre os dois retificadores pode ser feita em série, para aumentar a tensão de saída, ou em paralelo, para elevar a corrente. Do ponto de vista construtivo, o transformador fornece dois secundários independentes, cada um alimentando uma ponte de seis pulsos e proporcionando, ao mesmo tempo, o defasamento de 30° imprescindível à esta tecnologia de conversão [39].

Figura 16 – Retificador trifásico a tiristor de 12 pulsos.



Fonte: Autoria própria.

A operação de um retificador retificador tiristorizado de 12 pulsos envolve 4 etapas principais [41]:

- **Retificação:** Durante a metade positiva do ciclo CA, um conjunto de tiristores é acionado para condução, permitindo que a corrente flua em uma direção. Isso leva à retificação da metade positiva da tensão CA;
- **Comutação natural:** Conforme a forma de onda da tensão CA muda de polaridade, a corrente é transferida naturalmente do conjunto de tiristores em condução para o conjunto seguinte, previamente disparado. Esse processo, imposto pela própria rede elétrica, garante a continuidade da saída CC. O processo de comutação sincroniza a operação dos dois retificadores de seis pulsos para manter uma saída CC suave e contínua;

- **Saída CC Pulsante:** A combinação das fases de retificação e comutação resulta em uma tensão de saída CC pulsante. Embora a saída seja unidirecional, ela ainda apresenta algum grau de ondulação devido à comutação dos tiristores;
- **Suavização:** Para reduzir a ondulação da tensão de saída, um capacitor de suavização pode ser conectado em paralelo à carga. O capacitor armazena energia durante os períodos de pico de tensão e a libera durante os períodos de menor tensão, suavizando efetivamente a saída CC.

Além do princípio de operação, diferentes estratégias de controle são empregadas para regular tensão e corrente de saída, aumentar a eficiência e mitigar distorções [41]. A principal técnica é o controle do ângulo de disparo, no qual a regulação da tensão média de saída é feita ajustando o ponto de condução dos tiristores: ângulos menores aumentam a tensão média, enquanto ângulos maiores a reduzem [41]. Outro recurso é o uso de transformadores de deslocamento de fase, responsáveis por introduzir a defasagem de 30° entre os dois conjuntos de tiristores, o que melhora o balanceamento da corrente extraída da rede e reduz a distorção harmônica [41].

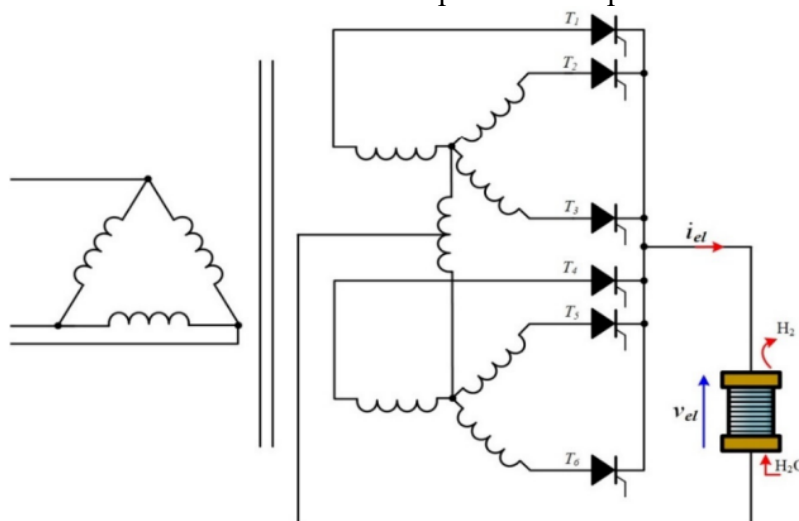
Do ponto de vista de desempenho, os retificadores de 12 pulsos apresentam menor ondulação na corrente CC, o que reduz o consumo específico de energia e resulta em hidrogênio de maior qualidade [39]. Essa configuração também é capaz de suprimir naturalmente os harmônicos de 5ª e 7ª ordens graças ao transformador de três enrolamentos [42]. Entretanto, harmônicos de ordem superior (11ª, 13ª, etc.) ainda permanecem e podem exigir medidas adicionais, como filtros passivos sintonizados ou filtros passa-altas em derivação, dependendo dos limites estabelecidos em normas [43]. Além disso, o funcionamento em ângulos de disparo mais elevados tende a agravar a demanda por potência reativa, reduzindo o fator de potência e aumentando a distorção da forma de onda. Nesses casos, torna-se necessária a integração de compensadores VAR estáticos ou síncronos para assegurar o fornecimento adequado de potência reativa [42]. Essas medidas aumentam a complexidade, o custo e o tamanho do sistema.

2.4.2.3. Retificador trifásico de 6 e 12 pulsos em dupla estrela à tiristor

Para aplicações de alta corrente e para eliminar harmônicos, pode ser empregado um retificador em estrela dupla com tiristores de seis pulsos [38]. Nessa configuração, como se

observa na Figura 17, dois retificadores de meia onda à tiristor são defasados em 180° e seus nós neutros secundários são interligados por meio de um transformador interfásico, o qual conecta simultaneamente os dois neutros e a polaridade negativa do eletrolisador [38].

Figura 17 – Retificador trifásico de 6 pulsos em dupla estrela à tiristor.

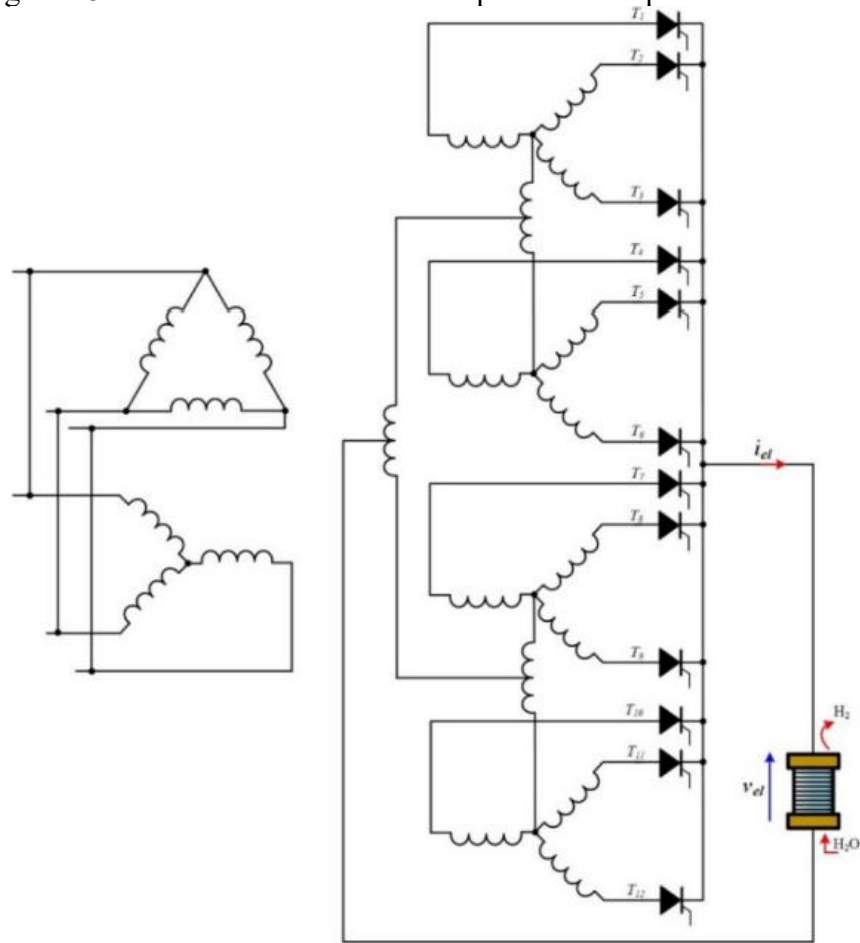


Fonte: [38].

A principal vantagem do uso deste retificador estrela dupla em comparação com a topologia básica do 6TR é a redução da corrente média e eficaz do tiristor, aproximadamente 50% menor, e também da ondulação da corrente de saída. Como consequência, observa-se a melhoria no consumo específico de energia do processo e, portanto, maior qualidade do hidrogênio produzido. Além disso, do ponto de vista da qualidade da energia, a atenuação do conteúdo harmônico de corrente contribui para um melhor desempenho da rede [38].

A partir da configuração do retificador duplo em estrela com tiristores de seis pulsos, pode-se evoluir para a configuração em estrela dupla com 12 pulsos, cuja configuração pode ser vista na Figura 18. Obtida pela associação em paralelo de dois conjuntos idênticos, a topologia resulta em quatro grupos de retificação baseados em tiristores, associados a estruturas de meia onda, cujos intervalos de condução são distribuídos ao longo do ciclo elétrico com um deslocamento de 90° entre si. Os nós dos neutros secundários são conectados por meio de dois transformadores interfásicos. Um transformador interfásico adicional permite a interconexão dos dois transformadores interfásicos e a polaridade negativa do eletrolisador, completando a estrutura [38].

Figura 18 – Retificador trifásico de 12 pulsos em dupla estrela à tiristor.



Fonte: [38].

Esta configuração apresenta uma corrente média e RMS do tiristor 50% menor em relação ao retificador duplo em estrela com tiristores de seis pulsos. Devido ao deslocamento de fase de 90° entre os quatro retificadores baseados em tiristores, a ondulação da corrente de saída é muito pequena, permitindo otimizar o consumo específico de energia e a qualidade do hidrogênio produzido. Adicionalmente, a topologia permite a compensação da potência reativa, reforçando a melhoria da qualidade da energia fornecida ao sistema [38].

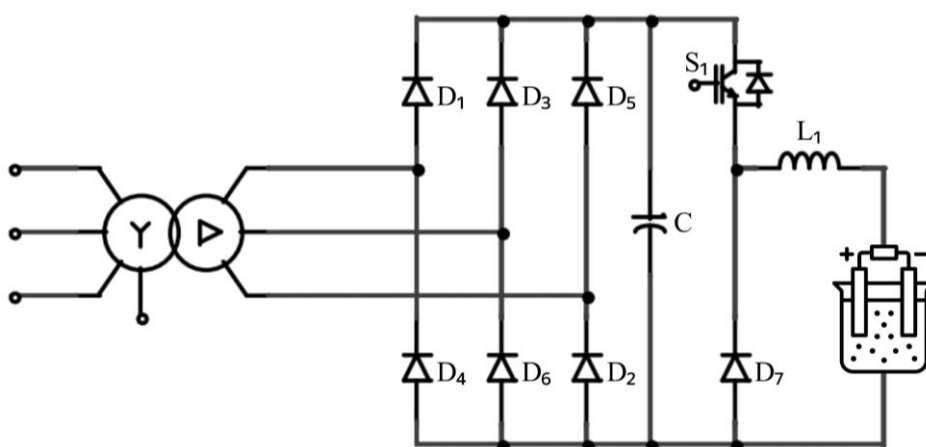
2.4.3. Retificadores Choppers

2.4.3.1. Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com conversor buck

Os conversores desta categoria operam com base em um barramento CC de tensão fixa associado a um estágio de conversão por comutação em alta frequência. A ondulação residual do barramento CC na tensão de saída pode ser eliminada mediante uma escolha adequada do

sistema de controle aplicado ao estágio de comutação [38]. O 6D realiza a conversão da tensão CA em CC, fornecendo uma tensão média determinada pelas especificações da fonte de alimentação. Como essa topologia não é controlável em função do uso de diodos, torna-se necessária a utilização de um conversor CC-CC abaixador, que permite o controle da corrente por meio de um único interruptor de potência (IGBT), diretamente associado à vazão de hidrogênio e à eficiência energética do processo [38]. O arranjo completo está representado na Figura 19.

Figura 19 – Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com conversor buck (6D+B).



Fonte: Autoria própria.

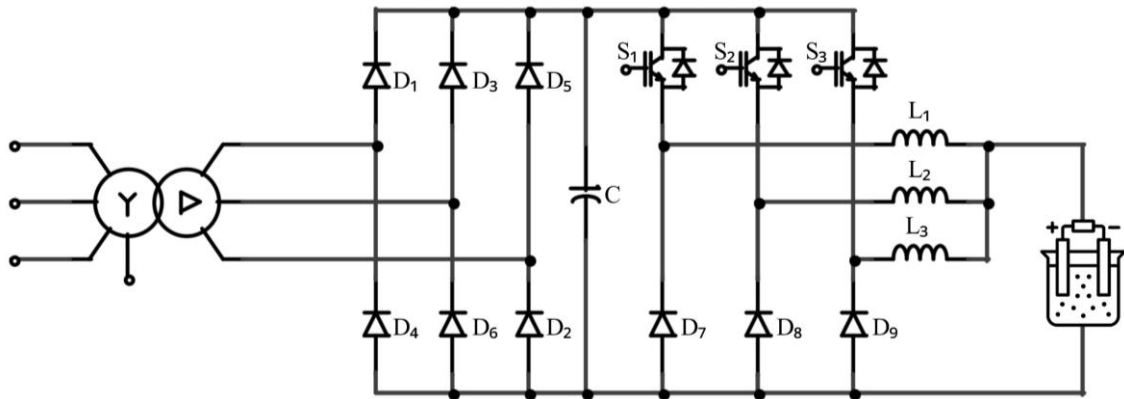
O conversor CC-CC abaixador apresenta como vantagens o baixo custo e a simplicidade construtiva, visto que requer poucos componentes. A ondulação de corrente diminui com o aumento do valor do indutor e da frequência de chaveamento. Essa baixa ondulação é fundamental para otimizar o consumo específico de energia e a confiabilidade de eletrolisadores. Entretanto, o aumento do indutor implica maior custo e volume, além de representar um limite de projeto em aplicações de alta corrente, já que toda a corrente percorre o indutor. Uma alternativa é reduzir L_1 e, em contrapartida, elevar a frequência de comutação; contudo, frequências mais altas também acarretam maiores perdas de chaveamento [38].

Outra característica desta topologia é a possibilidade de operar com altas correntes de saída, já que o conversor abaixador reduz a tensão, favorecendo a eficiência energética. Por outro lado, em aplicações de alta potência, a chave de potência é submetida a elevado estresse de tensão, e a limitação do sistema a uma única chave compromete sua tolerância a falhas [38].

2.4.3.2. Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com conversor buck de 3 níveis

A fim de reduzir a ondulação da corrente de saída, pode-se adotar a configuração de um retificador a diodos de 6 pulsos associado a um conversor buck de 3 níveis (6D+3B). Nesse arranjo, exibido na Figura 20, cada chave de alimentação (S_1 , S_2 e S_3) é acionada com defasagem de 120° , o que diminui a ondulação da corrente de saída e reduz o volume dos indutores [38]. Embora o retificador de ponte de seis pulsos seja uma solução consolidada e eficiente, ele pode introduzir harmônicos na corrente da rede e apresentar limitações em termos de qualidade de energia. Já o conversor buck multinível é projetado para regular a tensão CC de saída e reduzir a ondulação, utilizando múltiplos estágios buck em paralelo, operando defasados entre si. Esse arranjo resulta em menor ondulação, melhor compartilhamento de corrente e maior eficiência global [41].

Figura 20 – Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com buck de 3 estágios.



Fonte: Autoria própria.

O controle desta configuração, baseado nas Regras de Ziegler-Nichols para ajuste de controladores Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID), aliado à operação do retificador de ponte de seis pulsos com conversor buck de 3 estágios, constitui uma abordagem coordenada que permite alcançar conversão CA/CC de alto desempenho com melhor qualidade de energia [41]. Os principais aspectos de controle e operação incluem [41]:

- **Controle de Intercalação:** No conversor buck de 3 braços, a operação dos estágios individuais do conversor buck é sincronizada, mas ligeiramente fora de fase. Isso garante que a corrente de carga seja distribuída uniformemente entre os estágios, reduzindo o estresse em componentes individuais e melhorando a confiabilidade geral;

- **Compartilhamento de Corrente:** Para manter o compartilhamento de corrente equilibrado entre os estágios do conversor buck de 3 estágios, estratégias de controle são empregadas. Essas estratégias monitoram e ajustam a operação de cada estágio para garantir que a corrente de carga seja distribuída uniformemente;
- **Controle de Realimentação de Tensão e Corrente:** Loops de controle de realimentação são frequentemente usados para manter níveis precisos de tensão e corrente. Sensores monitoram a tensão e a corrente de saída, e o sistema de controle ajusta o ângulo de disparo e a operação dos estágios do conversor buck para atender aos parâmetros de saída desejados;
- **Mitigação de Harmônicos:** A configuração intercalada dos estágios do conversor buck ajuda a reduzir a ondulação de tensão e minimiza os harmônicos na corrente de saída. Isso resulta em melhor qualidade de energia e menor distorção harmônica na corrente de linha CA.

A utilização de três fases estabelece um equilíbrio entre ondulação reduzida, eficiência energética, confiabilidade e volume do sistema. A melhora da eficiência resulta da distribuição da corrente entre diversos indutores, uma vez que as perdas por efeito Joule são proporcionais ao quadrado da corrente [38]. Uma vantagem adicional do conversor buck multinível é sua redundância estática: mesmo em caso de falha de uma chave, o eletrolisador pode continuar operando sem interrupção [38].

Contudo, a ocorrência de falhas em um dos ramos de comutação compromete a defasagem originalmente adotada entre as fases, deixando de ser ideal. Nessas condições podem surgir correntes adicionais e maior ondulação no lado CC. Como alternativa para mitigar esses efeitos, o ângulo de defasagem pode ser ajustado para 180° , fazendo o sistema operar como um conversor buck de 2 níveis. Apesar de sofrer com ganho de conversão limitado e estresse de tensão elevado, essa configuração é especialmente apropriada para aplicações de alta potência, devido ao compartilhamento da corrente de entrada entre fases [38].

A eficiência energética pode ser superior à de um conversor buck clássico; entretanto, em situações de baixa tensão CC de entrada, o elevado valor do ciclo de trabalho resulta em perdas significativas. Além disso, o custo tende a ser maior devido à necessidade de elementos adicionais, embora a disponibilidade e o custo de indutores possam justificar a escolha da

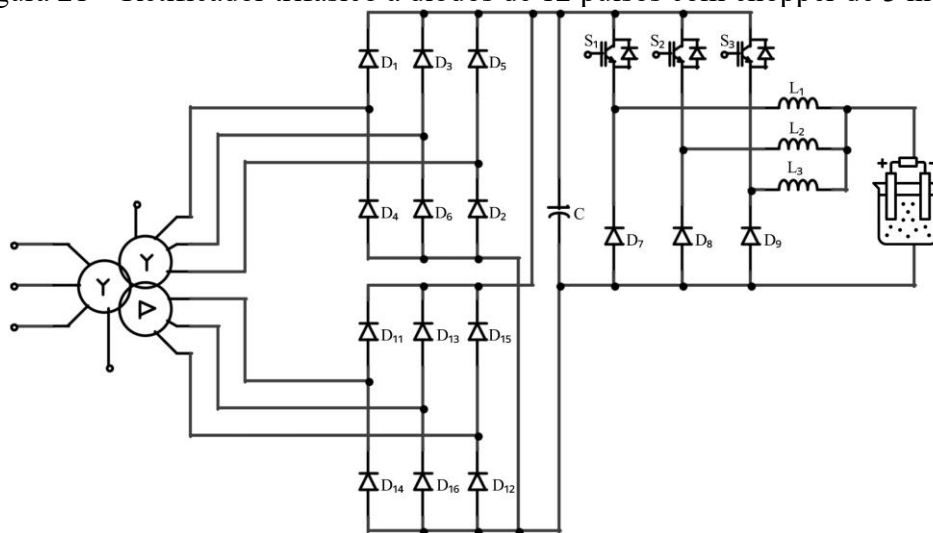
versão intercalada. Ainda assim, o conversor buck de 3 estágios oferece benefícios semelhantes ao buck clássico no que diz respeito à qualidade de energia [38].

Essa configuração é amplamente aplicada em cenários que demandam energia CC de alta qualidade, como fontes para dispositivos eletrônicos sensíveis, acionamentos de motores industriais e sistemas de energia renovável [41]. Assim, em aplicações que demandam níveis mais elevados de corrente e menor distorção harmônica, o retificador de seis pulsos pode ser substituído por um retificador de ponte de diodos de doze pulsos nesse arranjo [38].

2.4.3.3. Retificador trifásico a diodos de 12 pulsos com conversor chopper de 3 braços

No contexto de aplicações em eletrolisadores, o retificador de 12 pulsos em configuração multifásica apresenta-se como uma solução promissora, especialmente em sistemas de média e alta potência. Para ampliar o desempenho, integra-se ao sistema um chopper multifásico, implementado com IGBTs e diodos de roda livre em configuração intercalada. O ajuste da razão cíclica dos IGBTs permite controlar de forma eficiente a corrente e a potência do eletrolisador, assegurando elevado fator de potência em toda a faixa de operação [42]. Essa associação de conversores pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 – Retificador trifásico a diodos de 12 pulsos com chopper de 3 níveis.



Fonte: Autoria própria.

O conversor buck de 3 braços é composto por múltiplos estágios conectados em paralelo e operando defasados entre si. Essa configuração reduz significativamente a ondulação da tensão de saída, melhora o compartilhamento de corrente e aumenta a eficiência global da

conversão [41]. Além disso, a defasagem entre os estágios diminui o estresse sobre os componentes, eleva a confiabilidade do sistema e garante continuidade de fornecimento mesmo em caso de falha de algum estágio, graças à redundância estática [42].

A integração entre o retificador de 12 pulsos e o conversor buck multinível possibilita uma conversão CA/CC altamente eficiente, com tensão estável, ondulação reduzida, distorção harmônica minimizada e maior robustez [41], [42]. Do ponto de vista do controle e operação, destacam-se os seguintes aspectos [41]:

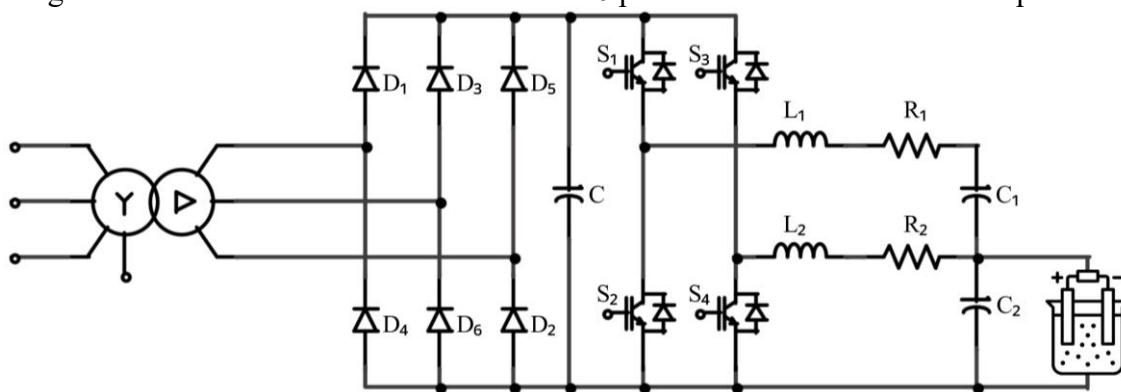
- **Controle intercalado:** Nos estágios do conversor buck, a operação é sincronizada, porém defasada, de modo a distribuir uniformemente a corrente de carga entre eles. Esse processo reduz o estresse em cada componente e aumenta a confiabilidade do sistema;
- **Compartilhamento de corrente:** Estratégias de controle específicas asseguram que a corrente seja dividida equilibradamente entre os estágios do conversor, monitorando e ajustando continuamente sua operação;
- **Controle por realimentação de tensão e corrente:** Loops de controle fechados, baseados em sensores, monitoram os níveis de saída. O sistema ajusta dinamicamente o ângulo de disparo e a operação dos estágios buck para atender aos parâmetros estabelecidos;
- **Mitigação de harmônicas:** A combinação do retificador de 12 pulsos com o conversor buck de 3 estágios reduz de forma significativa a ondulação da tensão e a distorção harmônica, garantindo maior qualidade de energia e menor conteúdo harmônico na corrente de linha.

Assim, a atuação conjunta do retificador de 12 pulsos e do conversor buck promove sinergia no sistema [42]. Enquanto o retificador otimiza a qualidade da energia, o conversor multinível fornece controle preciso de potência e corrente, reduz a ondulação, melhora a eficiência e assegura maior confiabilidade [42].

2.4.3.4. Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com conversor buck empilhado de 2 níveis

Outra configuração interessante consiste em acoplar um 6D a um conversor buck intercalado empilhado bifásico (SIBC), disposto na Figura 22. A primeira vez que essa topologia foi introduzida o objetivo foi o de controlar o eletrolisador de acordo com a potência disponível de um sistema de conversão de turbina eólica [38].

Figura 22 – Retificador trifásico a diodos de 6 pulsos com conversor buck empilhado.



Fonte: Autoria própria.

Nos casos em que se deseja reduzir as perdas de condução, os diodos podem ser substituídos por IGBTs, uma vez que sua resistência no estado ligado é menor; para aplicações de baixa potência, MOSFETs também podem ser utilizados [38]. Além disso, um capacitor adicional inserido entre a primeira e a segunda fase para bloquear o componente CC da corrente que flui pela segunda fase, permitindo que apenas o componente CA a atravesse [38]. O par de IGBTs (S_1 , S_4 e S_2 , S_3) é controlado de forma oposta, em vez de 180° como em um conversor buck de 2 níveis convencional. Dessa forma, os componentes CA da corrente nas duas fases se cancelam, e apenas uma corrente CC pura flui através do eletrolisador, otimizando sua confiabilidade e eficiência energética [38].

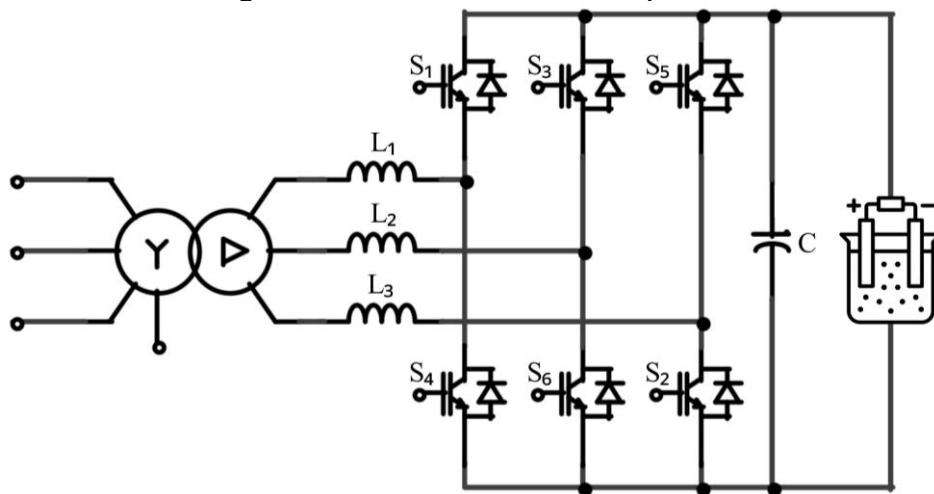
Do ponto de vista da operação, o SIBC pode continuar funcionando mesmo em caso de falhas em um dos interruptores de alimentação, no entanto, a ondulação de corrente é maior [38]. Além disso, essa topologia compartilha algumas desvantagens com o conversor buck de três braços, particularmente as perdas em baixas tensões CC de entrada. Apesar disso, é possível garantir um bom fator de potência, embora a qualidade da energia CA ainda seja influenciada pela forma pulsante da corrente. O desenvolvimento de novas topologias de retificadores ativos surge, portanto, como o desafio futuro para melhorar esses aspectos [38].

2.4.4. Retificadores ativos

2.4.4.1. Retificador AFE de dois níveis

O Retificador Frontal Ativo (AFE, sigla em inglês) é a topologia do conversor CA-CC que pode melhorar o fator de potência e a mitigação harmônica no lado CA sem utilizar nenhum filtro passivo ou dispositivo de compensação do tipo STATCOM [39]. O diagrama típico de um retificador AFE de dois níveis é o conversor B6, como apresentado na Figura 23, essa topologia é composta por seis chaves ativas, indutores no lado CA e um capacitor de filtro no lado CC [42]

Figura 23 – Retificador AFE do tipo B6.



Fonte: Autoria própria.

Essa topologia é conhecida por sua simplicidade, robustez e ampla aceitação, podendo ser facilmente construída com pontes H comerciais. Apesar de exigir indutores de entrada maiores e apresentar limitações na frequência máxima de chaveamento em comparação com conversores de três níveis, as seis chaves ativas permitem melhor modelagem de corrente e controle de tensão, reduzindo a distorção harmônica. No entanto, essa topologia requer atenção ao limite inferior da tensão do barramento CC devido à sua característica inerente de reforço [42].

Nos sistemas AFE, a corrente CA do lado de entrada pode ser tornada senoidal ajustando-se a razão de trabalho dos IGBTs de silício, resultando em uma distorção harmônica de corrente significativamente menor [39]. Os retificadores AFE, caracterizados por alta eficiência e confiabilidade, desempenham papel crucial na minimização de perturbações, redução da distorção harmônica e operação próxima ao Fator de Potência Unitário (FPU) [42].

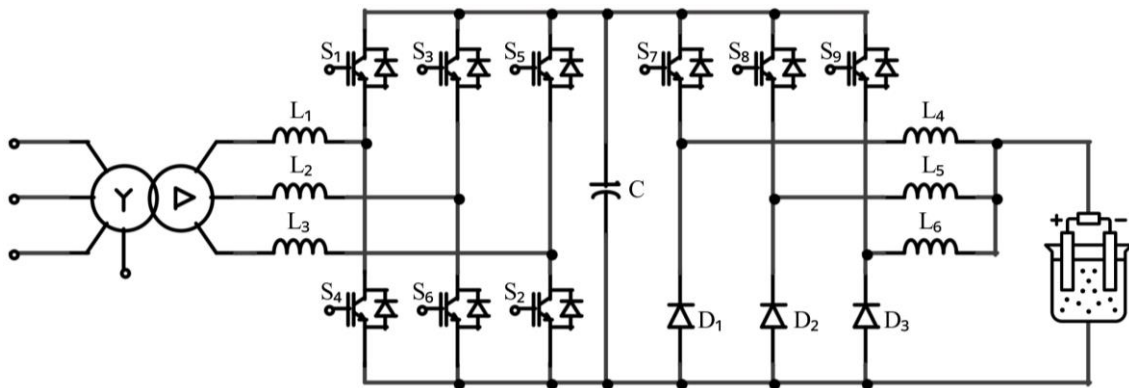
Apesar de suas vantagens, a tensão relativamente baixa e a alta corrente dos eletrolisadores de alta potência podem não ser ideais para a topologia AFE convencional [40]. Para operação em ampla faixa, entretanto, uma arquitetura B6 mais chopper pode ser usada para ajustar a corrente e a tensão de saída [39].

2.4.4.2. Retificador AFE de dois níveis com conversor buck de 3 estágios

Os conversores baseados em AFE combinado com um chopper multifásico apresentam características semelhantes às do AFE em termos de qualidade da energia [40]. A adição de um conversor CC-CC permite adaptar propriedades do sistema, como tensão e corrente, às características do dispositivo de energia do AFE, melhorando a compatibilidade com o eletrolisador de hidrogênio e garantindo maior qualidade da CC [40].

Nesta configuração, disposta na Figura 24, um transformador de baixa frequência (LFT) com um único secundário é suficiente para atender aos padrões de conexão à rede. Entretanto, essa topologia é menos eficiente que o AFE de dois níveis, já que a energia precisa passar por dois conversores (AFE e CC-CC), resultando em aumento do tamanho e do custo do sistema [40].

Figura 24 – Retificador AFE B6 + chopper trifásico.



Fonte: Autoria própria.

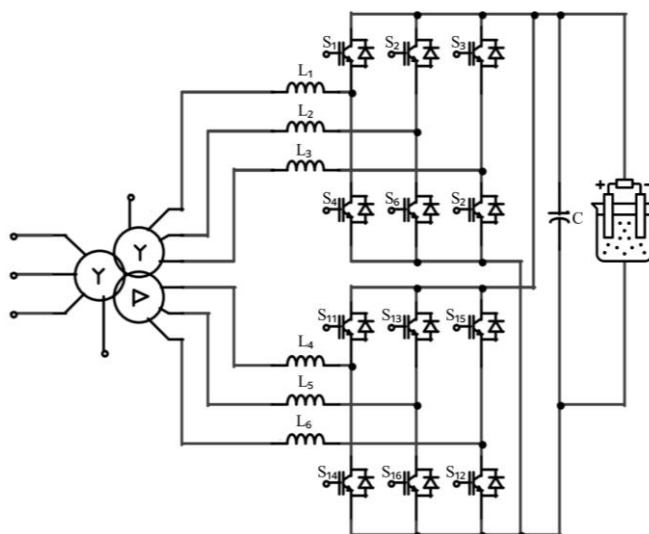
2.4.4.3. Retificador AFE de 12 pulsos

O retificador de 12 pulsos baseado em AFE é uma solução adequada para sistemas de alta potência, especialmente quando existem limites de corrente nos IGBTs comerciais. Para aplicações em níveis de potência da ordem de 10 MW, como eletrolisadores, múltiplas pilhas de conversores B6 (≥ 2) configuradas em paralelo são necessárias [39]. Além disso, LFTs de três enrolamentos, utilizados em retificadores de 6/12 pulsos, podem ser empregados para

fornecer isolamento galvânico e mitigar os harmônicos de ordem $6k \pm 1$ ($k=1, 3, 5, \dots$), embora esses harmônicos representem componentes menores em um sistema B6-AFE [39], [43].

O projeto requer várias unidades conversoras, o arranjo exposto na Figura 25, por exemplo, temos uma conectada ao lado estrela e outra ao lado delta do transformador de deslocamento de fase [42]. Cada unidade possui seis chaves ativas, indutores de reforço no lado CA e um capacitor de filtro no lado CC [42].

Figura 25 – Retificador AFE de 12 pulsos.



Fonte: Autoria própria.

No sistema retificador AFE, a corrente CA do lado de entrada pode ser controlada para ser senoidal modelando a razão de trabalho dos IGBTs, de modo que uma distorção harmônica de corrente muito menor seja esperada para tais sistemas retificadores AFE [43]. Além disso, o deslocamento de fase da corrente CA em relação à tensão da rede também pode ser manipulado ajustando o sinal de modulação de cada conversor B6 de modo que um alto valor de fator de potência possa ser alcançado simultaneamente [43].

Essa topologia é reconhecida por sua simplicidade, durabilidade e familiaridade. Apesar de exigir indutores de entrada maiores e apresentar limitações na frequência máxima de comutação, garante estabilidade da tensão de saída com níveis de ondulação inferiores a 1%, baixa distorção harmônica da corrente no lado da rede mesmo em plena carga, fator de potência próximo de 1 e eficiência superior a 98% no conversor [42].

2.5. DIRETRIZES NORMATIVAS E SÍNTESE DOS CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA CONEXÃO À REDE ELÉTRICA BÁSICA BRASILEIRA

Do ponto de vista da literatura técnica, observa-se que os estudos dedicados à avaliação dos impactos de plantas de eletrólise da água no âmbito da QEE ainda são relativamente escassos, sobretudo quando comparados a outras tecnologias intensivas em conversores eletrônicos de potência, como parques eólicos e sistemas fotovoltaicos. De modo geral, os trabalhos disponíveis concentram-se na modelagem dos conversores associados aos eletrolisadores ou em análises experimentais pontuais, com foco na caracterização das distorções harmônicas introduzidas no ponto de conexão com a rede elétrica.

O trabalho apresentado em [44] realiza uma análise experimental dos impactos do processo de produção de hidrogênio com baixa emissão de carbono sob a ótica da QEE, a partir de medições realizadas em uma planta de hidrogênio verde com capacidade nominal de 60 Nm³/h. As medições foram conduzidas em nível de baixa tensão, com alimentação em 220 V, potência máxima da ordem de 300 kVA e corrente nominal aproximada de 440 A. Para as condições avaliadas, os níveis de distorção harmônica de tensão permaneceram abaixo dos limites usualmente adotados, sendo observado um valor máximo da ordem de 1,7%.

Embora os resultados apresentados em [44] indiquem um impacto harmônico relativamente baixo para a instalação analisada, o próprio escopo do estudo evidencia limitações importantes no que diz respeito à extrapolação desses resultados para plantas de maior porte. Em particular, trata-se de uma instalação conectada em baixa tensão, com capacidade e níveis de corrente significativamente inferiores àqueles associados a sistemas de eletrólise em escala industrial.

Em aplicações de maior porte, os eletrolisadores são tipicamente alimentados com correntes da ordem de milhares de amperes, podendo inclusive envolver a agregação de múltiplos módulos e diferentes arranjos topológicos. Ademais, encontram-se atualmente em operação ou em fase de planejamento plantas piloto e projetos de eletrólise com capacidades da ordem de gigawatts, cujos impactos sobre a rede elétrica podem não ser adequadamente representados por estudos conduzidos em instalações de pequena escala.

Pode-se afirmar que há alguns poucos estudos envolvendo a temática da qualidade da energia elétrica e sistemas de hidrogênio verde, porém voltados para sistemas isolados [45], [46].

Dessa forma, embora os estudos experimentais disponíveis na literatura forneçam informações relevantes sobre o comportamento harmônico de sistemas de eletrólise em condições específicas, bem como algumas análises considerando microgrids, observa-se que eles não abordam, de maneira sistemática, os cenários típicos de acesso à Rede Básica,

tampouco consideram a multiplicidade de condições operativas do sistema elétrico ou critérios de contingência. Nesse contexto, para a avaliação do impacto harmônico de empreendimentos de maior porte conectados ao SIN, torna-se necessária a adoção de metodologias normativas consolidadas, capazes de incorporar diferentes cenários operativos e fornecer resultados conservadores no Ponto de Acomplamento Comum (PAC).

Atualmente, a nota técnica responsável pelas instruções para realização de estudos e medições de qualidade de energia relacionados aos acessos à rede básica é a NT 009/2016. Basicamente, os estudos tratam das avaliações de desempenho quanto à distorção harmônica e flutuação de tensão [47]. Entretanto, no que diz respeito à flutuação de tensão, a norma define o processo de avaliação apenas para Centrais Geradoras Eólicas e Fornos a Arco (Consumidor Livre), por isso essa seção focará no estudo harmônico.

2.5.1. Estudo de distorção harmônica

Considerando que o objetivo do estudo de desempenho harmônico restringe-se a avaliar o impacto da nova instalação no PAC, e diante das limitações ainda presentes nos estudos de “fluxo de harmônicos”, quer seja do ponto de vista da validade dos modelos adotados para toda faixa de frequência de interesse, quer seja pela disponibilidade de dados, principalmente no que diz respeito à modelagem das cargas lineares, o método do Lugar Geométrico (LG) da impedância harmônica da Rede Básica no plano complexo X versus R é o procedimento recomendado pelo ONS [47].

Para calcular os piores valores de tensão harmônica no PAC, não é prático efetuar um cálculo de fluxo harmônico para cada ponto do LG a fim de escolher valores máximos. A forma tradicional de avaliação consiste em determinar os “equivalentes Norton” (I_h , Z_{ih}) da Rede Interna do Agente acessante, vistos do PAC (instalação desconectada da Rede Básica), para cada harmônica significativa, considerando as condições operativas possíveis desta instalação [47].

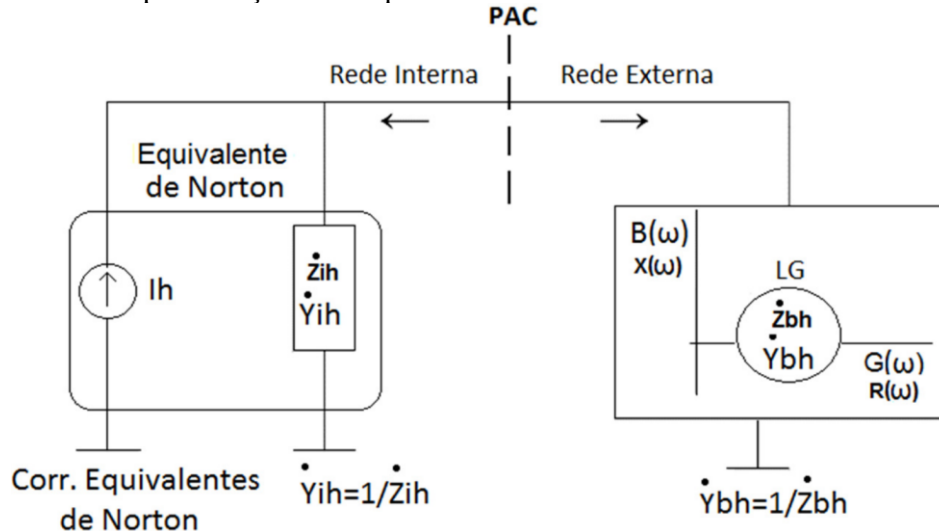
Note-se que um LG de impedância (Z_{ih}) pode ser convertido a LG de admitância (Y_{ih}), no plano complexo B versus G , mediante inversão matemática do LG de impedância entre planos complexos. O valor da impedância representativa da Rede Básica pertencente ao LG que maximiza o valor da tensão harmônica no PAC, para cada ordem harmônica (h), é obtido por cálculo geométrico no plano complexo de admitâncias, sendo a tensão harmônica máxima [47]:

$$V_{hmax} = \frac{I_h}{Y_{hmin}} \quad (21)$$

O denominador Y_{hmin} é o módulo da soma vetorial, em paralelo, da admitância Norton equivalente da rede do Agente ($\dot{Y}_{ih} = 1/\dot{Z}_{ih}$) com a admitância correspondente ao ponto do envelope do LG de admitância da Rede Básica ($\dot{Y}_{bh}$) que minimiza Y_{hmin} [47]. O ponto no envelope que corresponde esse menor módulo é encontrado geometricamente como a menor distância entre o extremo do vetor $-\dot{Y}_{ih}$ e o LG de admitância harmônica da Rede Básica [47].

Independentemente da metodologia adotada para o LG que representa a Rede Externa, a Rede Interna é representada por um equivalente de Norton (I_h e $\dot{Y}_{ih}$) e a Rede Externa por um LG representativo das admitâncias harmônicas da Rede Básica ($\dot{Y}_{bh}$) vistas do PAC [47]. O diagrama da Figura 26 apresenta esse arranjo.

Figura 26 – Representação do “Equivalente de Norton” com o LG da Rede Básica.



Fonte: [47].

2.5.1.1. Determinação do “Equivalente Norton”

A Rede Interna do empreendimento é representada através de um “Equivalente de Norton”, composto pelas cargas geradoras de harmônicas, transformadores abaixadores, cabos aéreos e/ou subterrâneos, representados por seus componentes capacitivos/indutivos, além dos filtros de correntes harmônicas existentes na instalação [47].

Como exemplo de carga geradora de harmônicas, pode-se citar o caso de um aerogerador (conversor) ligado diretamente ao PAC, conforme mostra a Figura 26. Nesta condição, o valor de I_h corresponde à corrente harmônica injetada pelo conversor e $\dot{Z}_{ih}$

corresponde à impedância equivalente dos filtros, incluindo eventuais capacitores, etc. Assim, as correntes harmônicas (I_h) utilizadas no cálculo de V_{hmax} podem ser determinadas a partir dos valores de correntes harmônicas geradas por cada equipamento não linear presente na instalação, sendo normalmente fornecidos pelos fabricantes [47]

Em geral, esses equipamentos incluem pontes conversoras a tiristores de 6, 12 ou mais pulsos, cicloconversores, inversores tipo *Voltage Source Converter* (VSC) utilizados em parques eólicos e conversores CC-CA empregados em sistemas fotovoltaicos [47].

Nos conversores VSC com chaveamento *Pulse Width Modulation* (PWM), utilizados em parques eólicos e fotovoltaicos, as correntes harmônicas injetadas costumam ser obtidas por medição [47]. Em alguns casos, os fabricantes fornecem modelos matemáticos representativos do aerogerador, embora esses modelos dependam do tipo e das particularidades tecnológicas de cada fabricante [47].

No caso de conversores do tipo pontes de 6, 12 ou mais pulsos ou cicloconversores destaca-se que os valores das correntes harmônicas geradas por equipamentos tipo ponte conversora a tiristores, quando obtidos por simulação, devem corresponder aos máximos individuais por harmônico, considerando a faixa de potência, os modos de operação (normal ou degradada), eventuais desequilíbrios de impedâncias e transformações, além de erros relacionados com os ângulos de disparo e/ou extinção, e o máximo desequilíbrio de tensão (sequência negativa) [47]. Tais valores são, normalmente, informados pelo fabricante do equipamento.

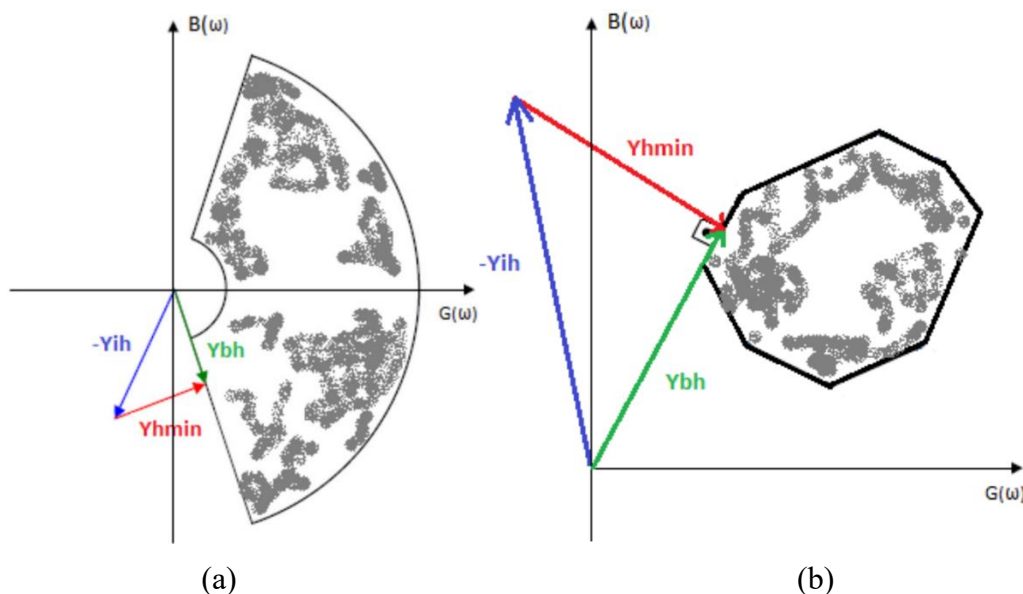
Caso o equipamento não linear corresponda a uma ponte conversora de 36 pulsos, por exemplo, deve-se considerar a possibilidade de operação desbalanceada, ou seja, sem a presença de uma de suas pontes de 6 pulsos. Tal condição, contudo, poderá ser menos crítica, se houver mecanismo de proteção que retire de operação a ponte de 6 pulsos remanescente, responsável pelas correntes harmônicas $6n \pm 1$ (n inteiro), restando apenas correntes harmônicas $12n \pm 1$ (n par) e as não características [47]. Cada caso deve ser tratado conforme suas particularidades operacionais.

2.5.1.2. Determinação da Rede Externa (Rede Básica)

No estudo de desempenho harmônico, a Rede Externa ao PAC é representada por um “Lugar Geométrico”. O LG ($\dot{Z}_{bh}$) pode, na literatura internacional, ser tradicionalmente representado por círculos, setores anulares, polígonos, áreas limitadas por retas e arcos de circunferências, de modo a envolver com folga todos os pontos de impedância/admitância

calculados para cada harmônica ou conjuntos de harmônicas vizinhas [47]. Dentre os tipos de LG utilizados em estudos de desempenho harmônico, o ONS recomenda o LG do tipo Setor Anular ou, alternativamente, o do tipo Polígono de “n” Lados [47]. A Figura 27 apresenta esses dois modelos de LG recomendados.

Figura 27 – Lugares Geométricos recomendados pelo ONS. (a) Setor Anular. (b) Polígono de “n” lados.



Fonte: [47].

Para estabelecer o LG, determinam-se inicialmente as impedâncias/admitâncias harmônicas vistas do PAC com sua conexão desligada, ou seja, desconsiderando o efeito do circuito interno da instalação. Dentre os diversos tipos de LG, o Polígono de “n” lados é uma das alternativas que produzem resultados menos conservadores em estudos de distorção harmônica [47]. Ainda assim, o ONS o considera seguro, garantindo a integridade e proteção do sistema elétrico na conexão de novos acessos à Rede Básica.

O conjunto de impedâncias/admitâncias obtido considera diferentes cenários da Rede Básica, contemplando horizontes atuais e futuros no período de 2026 a 2030, bem como variações sazonais e operativas associadas às condições de carga de inverno e verão, nos períodos diurno e noturno, abrangendo situações de carregamento máximo e mínimo. Esses cenários correspondem aos 33 casos de referência disponibilizados no âmbito do PAR/PEL do ONS. Adicionalmente, são consideradas situações de operação degradada do sistema, segundo o critério N-1. A combinação desses elementos compõe os lugares geométricos no plano complexo da impedância harmônica da Rede Externa ($\hat{Z}_{bh}/\hat{Y}_{bh}$) vista do PAC [47].

A justificativa para essa representação é que a impedância/admitância harmônica da Rede Básica vista do PAC varia ao longo do tempo, formando nuvens de pontos no plano complexo durante a vida útil da instalação [47]. Considerar apenas alguns pontos não captaria as condições de ressonância mais críticas que produzem maior distorção da tensão do PAC. Outro motivo para considerar o LG é a imprecisão inerente dos cálculos de impedâncias/admitâncias harmônicas em função dos dados, modelos e metodologias de cálculo [47].

Os requisitos de distorção harmônica de tensão devem ser atendidos para qualquer ponto dentro do LG, sendo que, pela própria filosofia de construção, somente os pontos que compõem o contorno do LG (envelope) são de interesse [47]. Para determinar o conjunto de admitâncias (“nuvem de pontos”) que dará origem ao LG, seja na forma de Setor Anular ou de Polígono de “n” Lados, deve-se utilizar intervalos e passos harmônicos bem definidos [47]:

- LG tipo Setor Anular: Intervalo $(h-1, h, h+1)$, sem passo harmônico.
- LG tipo Polígono de “n” Lados: Intervalo $(h-0,5, h, h+0,5)$, com passo harmônico de $\pm 0,1$ (ou ± 6 Hz em relação à frequência).

Os critérios de aceitação dessa nova instalação quanto aos limites para avaliação dos níveis de qualidade de energia estão estabelecidos no Submódulo 2.9 dos Procedimentos de Rede [48]. Caso o estudo resulte em valores de distorção harmônica superiores aos estabelecidos pela normativa, o Agente acessante deverá apresentar solução, normalmente relacionada com a instalação de filtragem, que levem ao adequado desempenho da instalação no PAC [47].

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL E SIMULAÇÃO DE DISTINTAS TOPOLOGIAS DE ELETROLISADORES

3.1. ESTABELECIMENTO DE PREMISSAS, APRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS NORMATIVOS E SELEÇÃO DAS TOPOLOGIAS

Apesar da NT 009/2016 não apresentar requisitos específicos para sistemas de produção de H₂V, essa normativa estabelece os critérios para o tratamento das correntes harmônicas (I_h) empregadas no cálculo da tensão máxima admissível (V_{max}) nos estudos harmônicos para cargas não lineares de uma forma geral, podendo, então, ser aplicada a plantas de geração de H₂V.

Dessa forma, visando garantir a conformidade com a NT 009/2016 e tendo em vista a ausência de dados acerca de correntes certificadas de equipamentos eletrolisadores, este capítulo concentra-se na modelagem, simulação computacional e obtenção das correntes harmônicas certificadas associadas a cada topologia de conversor analisada. Esta é uma etapa indispensável para a realização dos estudos harmônicos – Capítulo 4. A realização de simulações é uma estratégia comumente empregada quando da ausência de informações providas por ensaios laboratoriais ou aplicações em campo, permitindo-se, assim, a determinação das correntes certificadas em consonância com a norma. Além disso, tem-se que a modelagem computacional possibilita avaliar o comportamento elétrico dos eletrolisadores, sua interação com diferentes topologias de retificação e do desempenho dinâmico do sistema sob distintos regimes operativos.

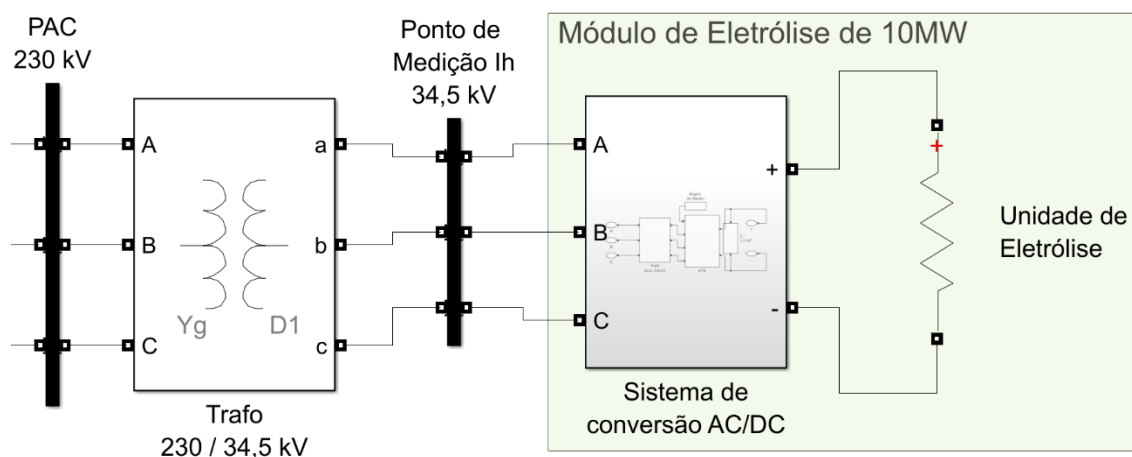
Com o objetivo de assegurar critérios de comparação consistentes entre as topologias de conversão investigadas, todos os modelos foram desenvolvidos e implementados sob um mesmo conjunto de parâmetros operacionais. Todas as modelagens e simulações deste estudo foram desenvolvidas na plataforma MATLAB/Simulink®, ambiente no qual se implementou a configuração padrão da planta de eletrólise adotada para todos os cenários. Neste caso, utilizou-se como referência em termo de potência, um módulo de eletrólise equivalente ao sistema comercial da Aqualyzer™ [49], onde cada unidade modular é constituída por um conjunto de células de eletrólise que apresenta uma potência total típica de 10 MW.

Para fins de modelagem elétrica e obtenção das correntes harmônicas, a carga do eletrolisador foi representado por uma resistência equivalente no lado em corrente contínua. Tal abordagem é amplamente adotada em estudos de eletrônica de potência quando o foco reside na análise do comportamento elétrico do sistema de conversão e de sua interação com a rede

elétrica, não sendo objetivo deste trabalho a modelagem eletroquímica detalhada do processo de eletrólise.

Para a determinação das correntes harmônicas a serem utilizadas no estudo harmônico, adota-se a modelagem de um único módulo de 10 MW, o qual serve como unidade base para a caracterização elétrica dos diferentes sistemas de conversão modelados e implementados. A Figura 28 apresenta o arranjo específico utilizado no MATLAB/Simulink® para a obtenção das correntes harmônicas certificadas. O circuito inclui um transformador de 230/34,5 kV, o sistema de conversão da topologia em análise e uma unidade de eletrólise de 10 MW conectado ao barramento CC. Sendo o ponto de medição para obtenção das I_h , localizado no lado de média tensão, indicado na representação do arranjo.

Figura 28 – Arranjo padrão para obtenção das correntes referente a um módulo de 10MW.



Fonte: Autoria própria.

A seleção das topologias de conversão, consideradas neste estudo, foi conduzida com base na revisão do estado da arte apresentada no Capítulo 2. No contexto de aplicações voltadas a eletrolisadores, um requisito fundamental é que o conversor seja capaz de regular, de forma adequada, tanto a tensão quanto a corrente de saída, uma vez que o processo de eletrólise pode demandar variações controladas da potência fornecida ao sistema eletroquímico.

A necessidade de controle preciso da corrente decorre do fato de que a taxa de produção de hidrogênio verde é diretamente proporcional à densidade de corrente aplicada às células eletrolíticas. Dessa forma, topologias conversoras capazes de operar com elevados níveis de corrente, de maneira estável e com baixa ondulação, são particularmente mais adequadas a esse tipo de aplicação.

De forma complementar, o controle da tensão aplicada ao eletrolisador é igualmente relevante, visto que esta se relaciona diretamente ao consumo energético específico do

processo. Assim, a capacidade de ajuste da tensão em função das condições de carga contribui para a otimização da eficiência energética, além de favorecer o desempenho e a segurança operacional do sistema.

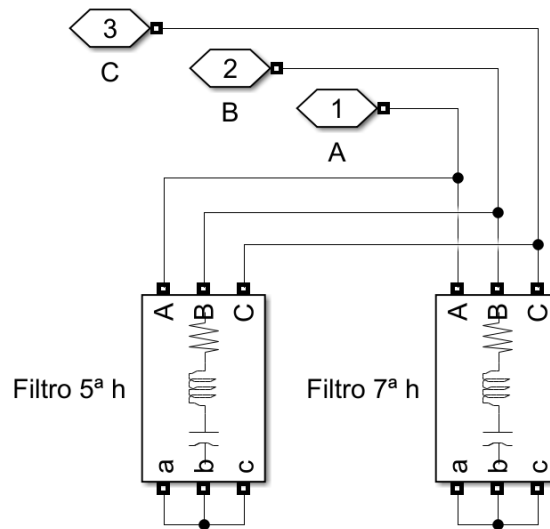
Considerando os critérios supra-mencionados, as seguintes topologias de conversão AC/DC para emprego em eletrolisadores foram selecionadas:

- 1) Ponte Retificadora Controlada de 6 Pulsos;
- 2) Ponte Retificadora Controlada de 12 Pulsos;
- 3) Ponte Retificadora Não-controlada de 6 Pulsos com 01 Unidade Buck;
- 4) Ponte Retificadora Não-controlada de 6 Pulsos com 03 Unidades Buck;
- 5) Ponte Retificadora Não-controlada de 12 Pulsos com 03 Unidades Buck.

Ressalta-se, ainda, que conversores de potência comerciais empregados em plantas industriais de eletrólise usualmente incorporam sistemas de filtragem harmônica integrados ao próprio equipamento. No entanto, no âmbito deste trabalho, não se dispôs de acesso às especificações técnicas, metodologias de projeto ou parâmetros detalhados dessas soluções internas de filtragem. Diante dessa limitação, e com o objetivo de aproximar os modelos computacionais das condições observadas na prática industrial, optou-se por considerar, para cada topologia analisada, dois cenários distintos: um modelo sem a inclusão de filtros harmônicos e outro com a implementação de filtro na entrada do retificador.

Para os subcasos que contemplam a inclusão de filtragem harmônica no lado CA, adotou-se a utilização de filtros passivos do tipo RLC sintonizado, ou seja, filtros sintonizados em uma frequência. Conforme apresentado na Figura 29, o arranjo de filtragem é constituído por dois ramos RLC série conectados em paralelo ao sistema, projetados para atenuar as principais componentes harmônicas associadas a cada topologia de retificação. Nos sistemas de 6 pulsos, os filtros foram sintonizados nas ordens harmônicas de 5ª e 7ª, enquanto, nos sistemas de 12 pulsos, a filtragem foi direcionada às ordens de 11ª e 13ª. A escolha dessas ordens baseia-se no espectro harmônico teórico característico de cada configuração, permitindo uma mitigação seletiva das componentes dominantes e uma representação mais próxima das soluções de filtragem tipicamente incorporadas a conversores comerciais. Cada filtro sintonizado possui uma potência individual de cerca de 300 kVAr para sistemas de 6 pulsos (02 filtros, sendo um de 5ª ordem e um de 7ª ordem) e 150 kVAr para sistemas de 12 pulsos (04 filtros, sendo dois de 11ª ordem e dois de 13ª ordem), totalizando, em cada topologia simulada, 600 kVAr em sistemas de filtragem harmônica.

Figura 29 – Estrutura geral do filtro passivo RLC sintonizado empregado na mitigação de harmônicas no lado CA dos conversores.



Fonte: Autoria própria.

Essa abordagem metodológica possibilita avaliar, de forma isolada, o comportamento harmônico intrínseco de cada topologia de conversão, ao mesmo tempo em que permite a análise de um cenário mais representativo da realidade operacional, no qual a presença de filtragem harmônica busca reproduzir, de maneira aproximada, os efeitos das soluções adotadas em equipamentos comerciais. Dessa forma, torna-se possível analisar a redução das distorções harmônicas e o atendimento aos requisitos normativos de acesso ao sistema elétrico.

Com base nesses critérios, definiram-se as topologias de conversão investigadas neste capítulo. A Tabela 3 apresenta os casos considerados para simulação, contemplando não apenas os aspectos técnicos discutidos, mas também fatores relacionados à maturidade tecnológica, à disponibilidade comercial e à ampla adoção dessas soluções em aplicações industriais de eletrólise.

Tabela 3 – Casos definidos para simulação.

Caso	Subcaso	Estágio AC/DC	Tipo de Dispositivo	Pulsos	Filtro AC	Estágio DC-DC	Filtro DC	Sigla
I	a	Ponte retificadora	Tiristores	6	-	-	C	6TR
	b	Ponte retificadora	Tiristores	6	FPS*	-	C	6TR+F
II	a	Ponte retificadora	Tiristores	12	-	-	C	12TR
	b	Ponte retificadora	Tiristores	12	FPS	-	C	12TR+F

III	a	Ponte retificadora	Diodos	6	-	Buck 1B	LC	6D+B
	b	Ponte retificadora	Diodos	6	FPS	Buck 1B	LC	6D+B+F
IV	a	Ponte retificadora	Diodos	6	-	Buck 3B	LC	6D+3B
	b	Ponte retificadora	Diodos	6	FPS	Buck 3B	LC	6D+3B+F
V	a	Ponte retificadora	Diodos	12	-	Buck 3B	LC	12D+3B
	b	Ponte retificadora	Diodos	12	FPS	Buck 3B	LC	12D+3B+F

*FPS = Filtro Passivo Sintonizado.

Fonte: Autoria própria.

As correntes obtidas a partir destas distintas topologias serão posteriormente utilizadas na etapa conduzida com a ferramenta HarmZs, onde os módulos serão conectados ao PAC correspondente para compor um sistema multimódulo hipotético, considerando as distintas topologia selecionadas para avaliação. Contudo, neste capítulo, o foco permanece exclusivamente na apresentação das topologias de conversão de interesse, bem como na aplicação da metodologia para a determinação das correntes certificadas.

3.2. MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE DISTINTAS TOPOLOGIAS DE ELETROLISADORES

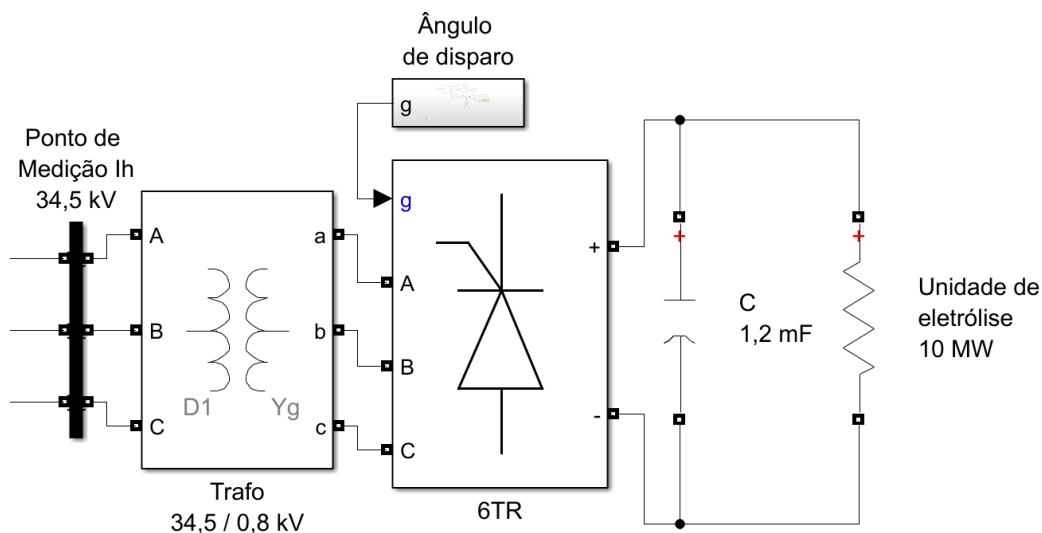
Tendo em vista as topologias de conversão anteriormente elencadas, tem-se, nesta seção, um detalhamento da modelagem e de sua correspondente implementação computacional em software no domínio do tempo, conforme na sequência apresentado. Vale, ainda, salientar que os 10 sistemas implementados – 05 Casos sem sistema de filtragem e outros 05 com filtro – seguem a nomenclatura introduzida na Tabela 3, supra-apresentada.

3.2.1. Caso I – Ponte retificadora de 6 pulsos a tiristores – 6TR e 6TR+F

A topologia analisada neste caso baseia-se no princípio da retificação controlada, sendo constituída por uma ponte retificadora trifásica a tiristores de seis pulsos. Os subcasos I.a e I.b foram modelados na MATLAB/Simulink® por meio do bloco *Universal Bridge* arranjado com tiristores, amplamente empregado em estudos de eletrônica de potência. A disposição detalhada dos tiristores que compõem a ponte, bem como a configuração geral do estágio AC/DC, foram previamente apresentadas no Capítulo 2, especificamente expostas na Figura 15.

O sistema é alimentado por um transformador abaixador, responsável pela adaptação do nível de tensão do sistema de média tensão, de 34,5 kV para 0,8 kV, valor compatível com a alimentação do estágio de conversão e da unidade de eletrólise considerada. No lado em corrente contínua do retificador, é empregado um banco de capacitores C com 1,2 mF de capacitância, conectado em paralelo com a unidade de eletrólise de 10 MW, com a finalidade de reduzir a ondulação de tensão, melhorar a estabilidade do barramento CC e facilitar a avaliação dos parâmetros elétricos na saída do conversor. A Figura 30 apresenta o arranjo elétrico completo da topologia 6TR correspondente ao subcaso I.a.

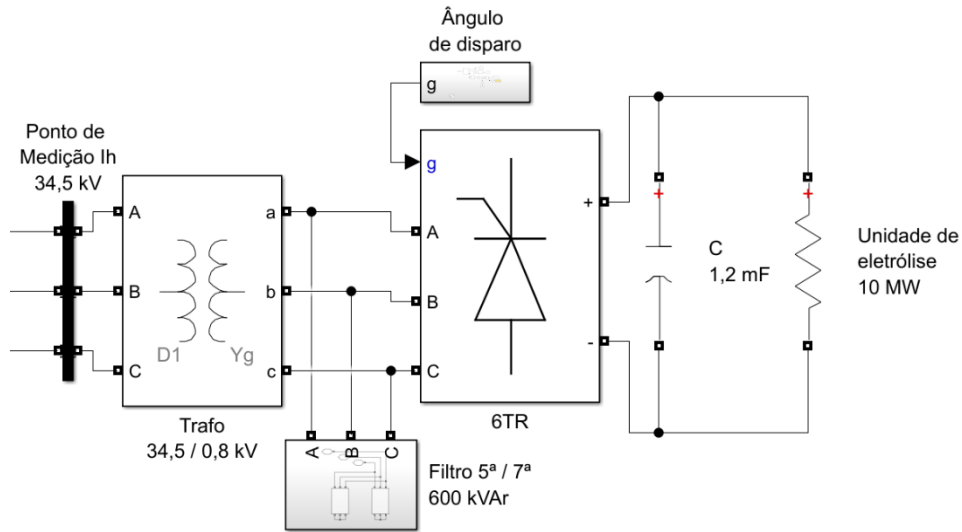
Figura 30 – Arranjo elétrico da topologia 6TR implementado no MATLAB/Simulink®



Fonte: Autoria própria.

No subcaso I.b, introduz-se um sistema de filtragem harmônica no lado CA do conversor, de modo a mitigar as componentes dominantes de distorção características da topologia de seis pulsos. Considerando que, nesse arranjo, as correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens apresentam maior magnitude no ponto de conexão com a rede, adotou-se um filtro passivo do tipo RLC sintonizado nessas frequências específicas. A Figura 31 apresenta o arranjo elétrico da topologia 6TR com a inclusão do filtro harmônico no lado de entrada em corrente alternada, conectado em paralelo no lado AC do retificador.

Figura 31 – Arranjo elétrico da topologia 6TR+F.

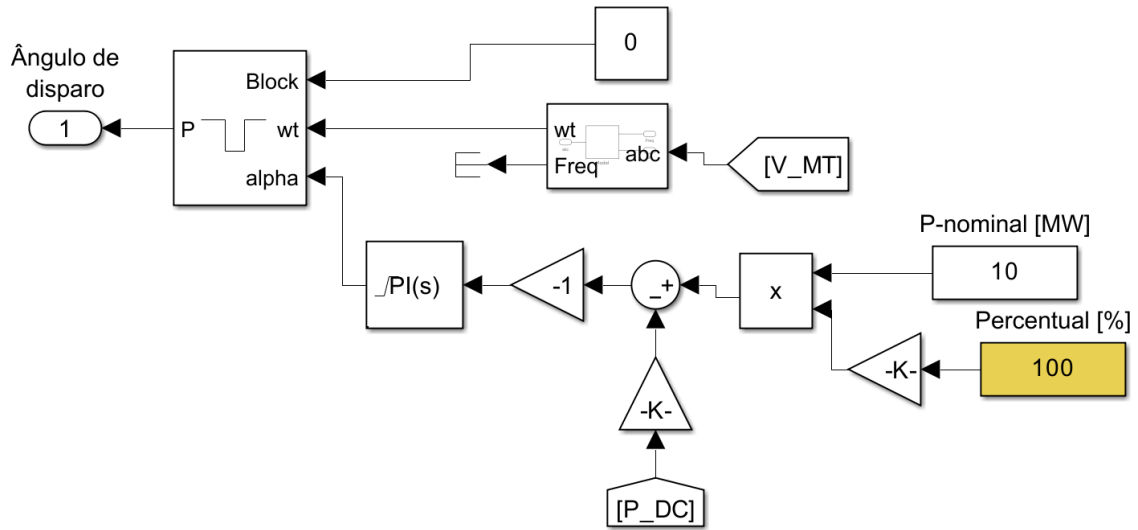


Fonte: Autoria própria.

Uma característica relevante da ponte retificadora de 6 pulsos é a possibilidade de controle do ângulo de disparo dos tiristores, o que permite a regulação da tensão média no barramento CC e, conseqüentemente, da potência fornecida ao eletrolisador. Para tal, o sistema de controle implementado utiliza um PLL para sincronização com a rede elétrica, garantindo o disparo adequado dos dispositivos semicondutores.

O ângulo de disparo é ajustado em função da potência requerida pela unidade de eletrólise. A Figura 32 ilustra o diagrama funcional do sistema de controle empregado para o acionamento dos tiristores e regulação da potência entregue à carga, sendo V_{MT} a tensão no nível de média tensão e P_{DC} a potência fornecida à carga.

Figura 32 – Diagrama do sistema de controle para 6TR e 6TR+F.



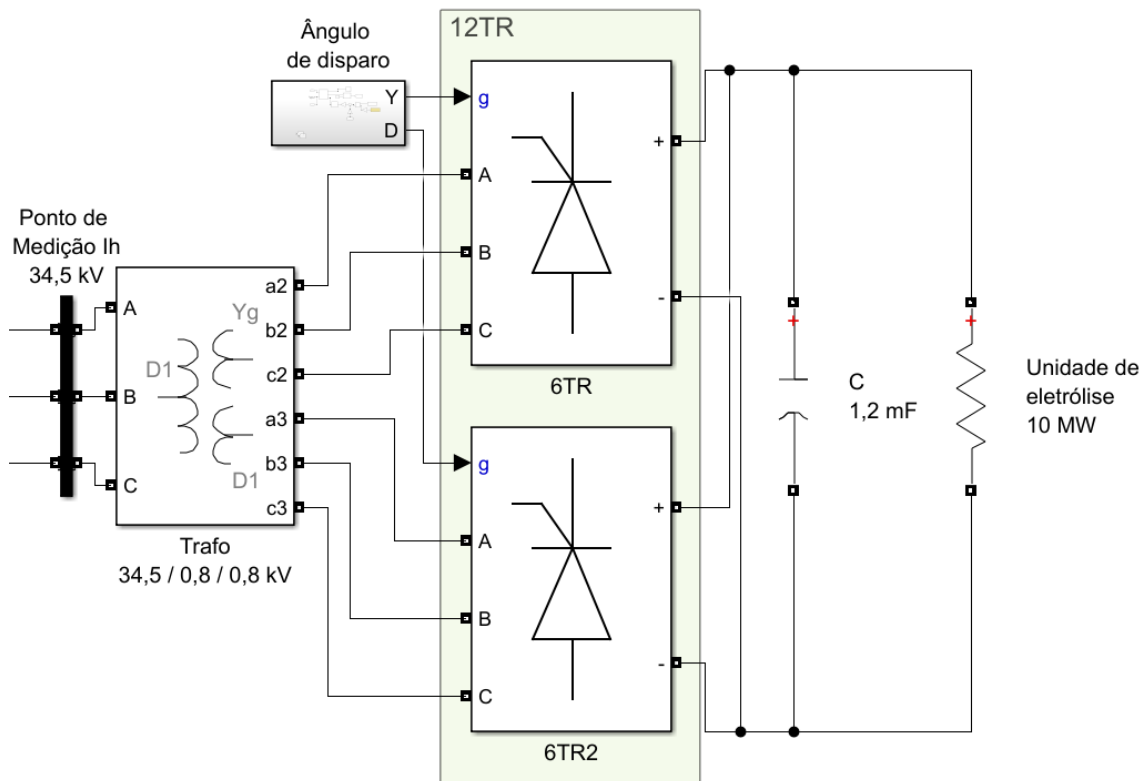
Fonte: Autoria própria.

3.2.2. Caso II – Ponte retificadora de 12 pulsos a tiristores – 12TR e 12TR+F

A topologia analisada neste caso constitui uma extensão direta da configuração apresentada no Caso I, mantendo o princípio da retificação controlada por tiristores, porém com uma estrutura multipulsos. A topologia foi implementada por meio da associação de dois blocos *Universal Bridge* configurados com tiristores, cujas saídas em corrente contínua são conectadas em paralelo no barramento CC. Cada uma das pontes é alimentada por um secundário independente do transformador, projetado para fornecer um defasamento angular de 30° entre as tensões de entrada, caracterizando assim o sistema de 12 pulsos adotado nesse estudo.

Essa configuração permite a supressão natural das componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordens na corrente do lado AC, resultado amplamente reportado na literatura para retificadores multipulsos. De maneira análoga ao Caso I, o barramento em corrente contínua é equipado com um capacitor C, conectado em paralelo com a unidade de eletrólise de 10 MW, a fim de reduzir a ondulação de tensão, melhorar a estabilidade do barramento CC e assegurar condições adequadas para a extração das correntes harmônicas. O arranjo completo da topologia 12TR, conforme implementado no MATLAB/Simulink®, é apresentado na Figura 33.

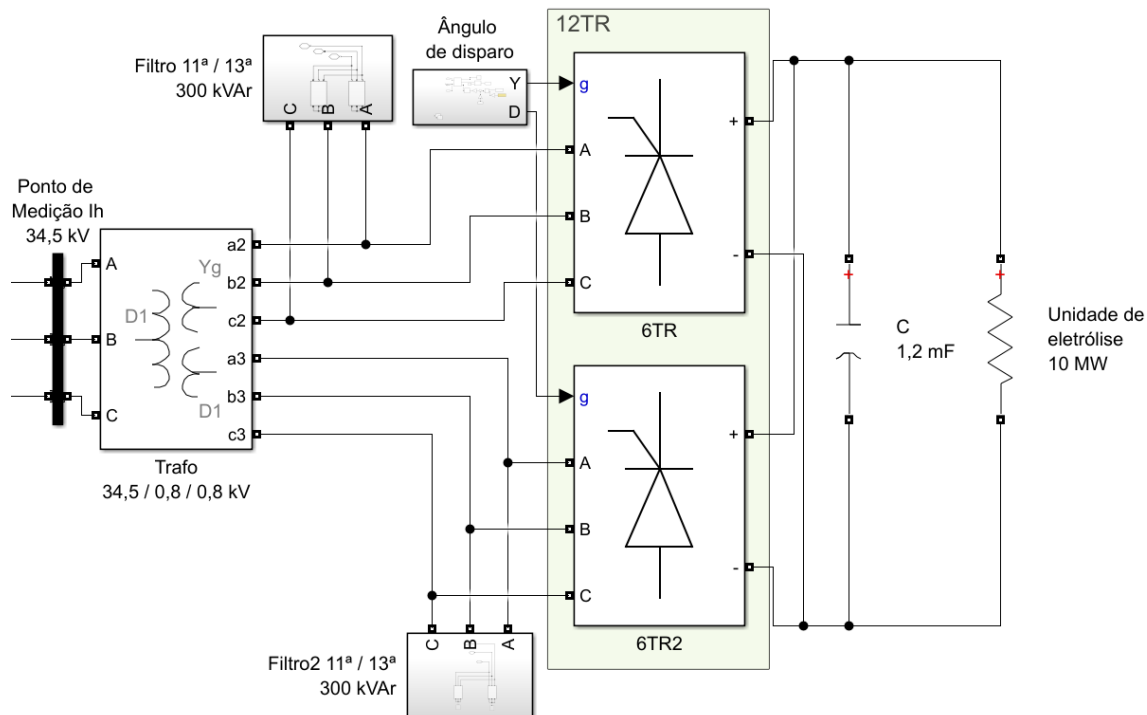
Figura 33 – Diagrama da topologia 12TR implementada no MATLAB/Simulink®.



Fonte: Autoria própria.

Para o subcaso II.b, a inclusão de filtragem harmônica no lado CA assume caráter complementar, uma vez que a própria configuração de 12 pulsos promove a supressão natural das componentes de 5ª e 7ª ordens. Nesse contexto, a filtragem externa tem como finalidade principal atenuar as componentes residuais de ordem superior que permanecem no espectro de corrente. Assim, foi adotado um filtro passivo do tipo RLC, sintonizado nas ordens harmônicas de 11ª e 13ª, compatíveis com o comportamento espectral típico dessa topologia. O arranjo elétrico correspondente à topologia 12TR-F é apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Diagrama da topologia 12TR+F com filtro harmônico para a 11ª e 13ª ordem.

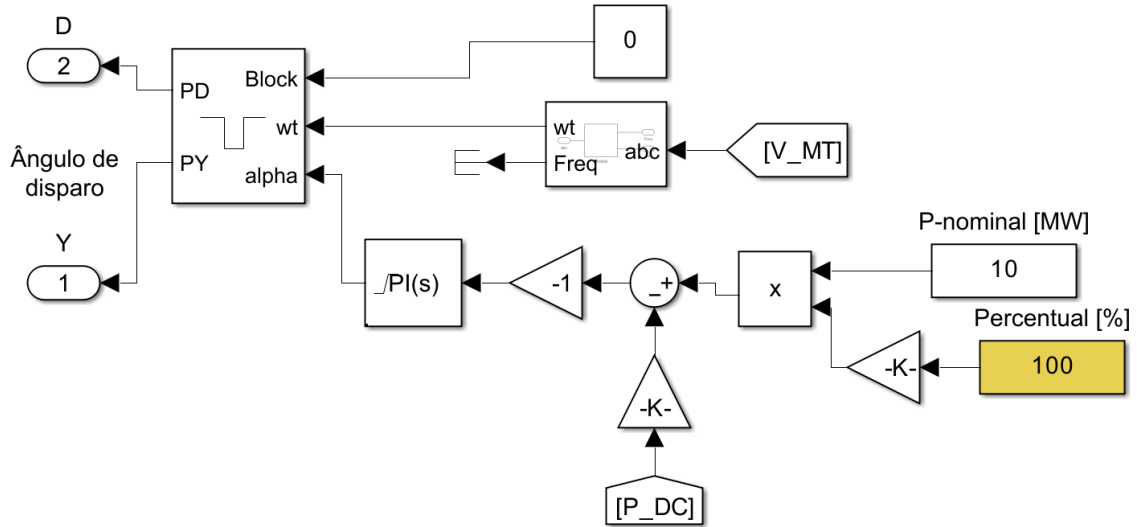


Fonte: Autoria própria.

O sistema de controle adotado para ambas as topologias apresentadas segue a mesma filosofia adotada no Caso I, sendo responsável pela regulação da tensão média no barramento CC por meio do ajuste do ângulo de disparo dos tiristores. O controle é implementado de forma integrada para ambas as pontes, utilizando um PLL para sincronização com a rede elétrica e geração adequada dos sinais de disparo.

A Figura 35 ilustra o diagrama funcional do sistema de controle implementado para este caso, sendo V_{MT} a tensão no nível de média tensão e P_{DC} a potência entregue à carga.

Figura 35 – Diagrama do sistema de controle para 12TR e 12TR+F.



Fonte: Autoria própria.

3.2.3. Caso III – Ponte retificadora de 6 pulsos a diodos com conversor buck – 6D+B e 6D+B+F

A topologia 6D+B caracteriza-se pela presença de dois estágios de conversão de energia. O primeiro estágio corresponde à conversão AC/DC não controlada, enquanto o segundo estágio realiza a conversão DC/DC controlada, permitindo a regulação da tensão e da potência fornecidas à unidade de eletrólise.

O estágio AC/DC é constituído por uma ponte retificadora trifásica de 6 pulsos a diodos, implementada no MATLAB/Simulink® por meio do bloco *Universal Bridge* configurado com dispositivos do tipo diodo. Este bloco incorpora os seis diodos necessários para a formação da ponte retificadora (6D), cuja disposição e princípio de funcionamento já foram detalhados no Capítulo 2, especificamente na Figura 10. A ponte é alimentada por um transformador abaixador responsável pela adaptação do nível de tensão do sistema, de 34,5 kV para 0,8 kV, valor compatível com a alimentação do estágio em corrente contínua subsequente.

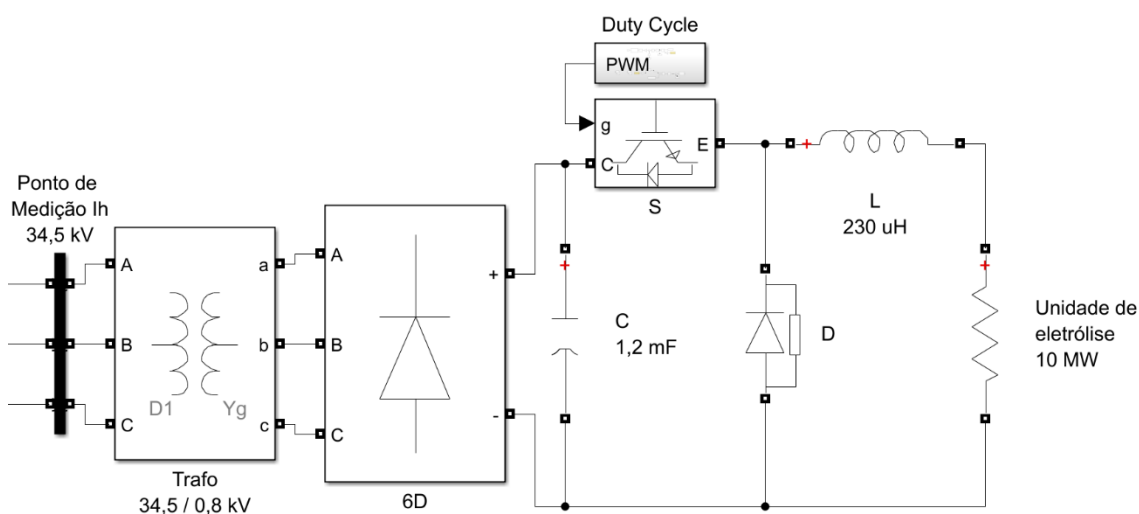
No lado em corrente contínua do retificador a diodos, é empregado um banco de capacitores C, conectado em paralelo com o estágio DC/DC, com a finalidade de reduzir a ondulação de tensão resultante da retificação não controlada e fornecer um barramento CC mais estável para a operação do conversor buck.

O segundo estágio de conversão consiste em um conversor buck (B), abaixador de tensão, responsável pela regulação da tensão e da corrente aplicadas na unidade de eletrólise. Este conversor é composto por um semicondutor do tipo IGBT identificado como S, um diodo

de roda livre D e um indutor L, configurados de acordo com a topologia clássica do conversor buck, sendo sua saída conectada à unidade de eletrólise de 10 MW. A presença deste estágio torna-se necessária uma vez que o retificador a diodos não permite controle direto da tensão média no barramento CC, cabendo ao conversor buck a função de ajuste da potência fornecida à carga.

A Figura 36 apresenta o arranjo completo da topologia 6D+B, incluindo o transformador de entrada, o retificador a diodos, o capacitor e o estágio DC/DC buck conectado à unidade de eletrólise.

Figura 36 – Diagrama da topologia 6D+B implementada no MATLAB/Simulink®.

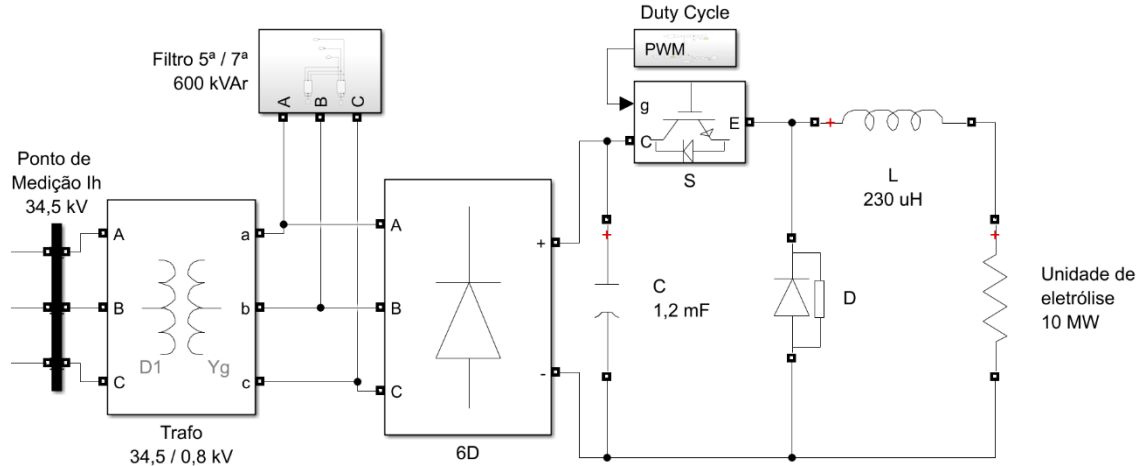


Fonte: Autoria própria.

No subcaso III.b, a topologia 6D+B é avaliada com a inclusão de filtragem harmônica no lado CA, com o objetivo de mitigar as componentes dominantes de distorção introduzidas pelo estágio de retificação a diodos de seis pulsos. Considerando que o espectro harmônico desse arranjo é caracterizado principalmente pelas correntes de 5ª e 7ª ordens, adotou-se um filtro passivo do tipo RLC sintonizado nessas frequências. Ressalta-se que a atuação do filtro restringe-se ao estágio AC/DC, não alterando a estrutura nem a estratégia de controle do conversor buck, o qual permanece responsável pela regulação da tensão e da potência fornecidas à unidade de eletrólise.

A Figura 37 apresenta o arranjo elétrico da topologia 6D+B+F correspondente ao subcaso III.b, com a adição do filtro harmônico sintonizado nas ordens de 5ª e 7ª, conectado em paralelo no lado de entrada em corrente alternada.

Figura 37 – Diagrama da topologia 6D+B+F implementada no MATLAB/Simulink®.

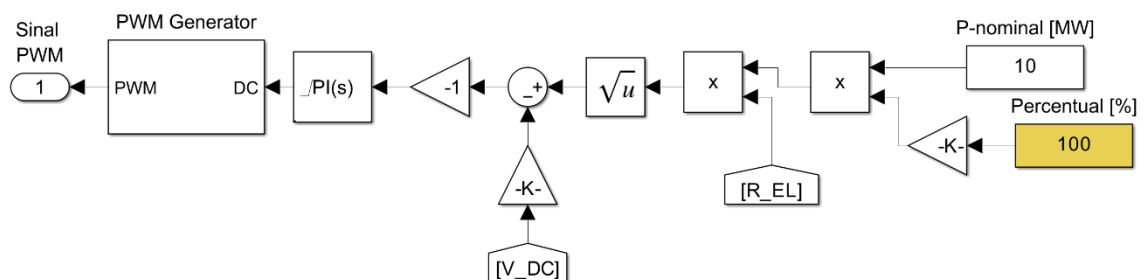


Fonte: Autoria própria.

O sistema de controle associado ao conversor buck é comum aos subcasos III.a e III.b, sendo implementado de forma a permitir a regulação da tensão e, conseqüentemente, da potência entregue ao eletrolisador. Para tal, é empregado um controlador Proporcional-Integral (PI), cuja saída define o *duty cycle* do sinal de comando aplicado ao modulador PWM, responsável pela geração do sinal de comando aplicado ao IGBT do conversor.

A Figura 38 apresenta o diagrama funcional do sistema de controle adotado para a topologia 6D+B, destacando a malha de controle em tensão e o modulador PWM responsáveis pela regulação da tensão de saída do conversor buck, sendo R_{EL} a resistência equivalente à unidade do eletrolisador e V_{DC} a tensão contínua aplicada à carga.

Figura 38 – Diagrama do sistema de controle para o conversor buck.



Fonte: Autoria própria.

3.2.4. Caso IV – Ponte retificadora de 6 pulsos a diodos com conversor buck de 3 interruptores – 6D+3B e 6D+3B+F

A topologia 6D+3B constitui uma extensão direta das configurações apresentadas no Caso III, mantendo a estrutura de dois estágios de conversão de energia. O primeiro estágio

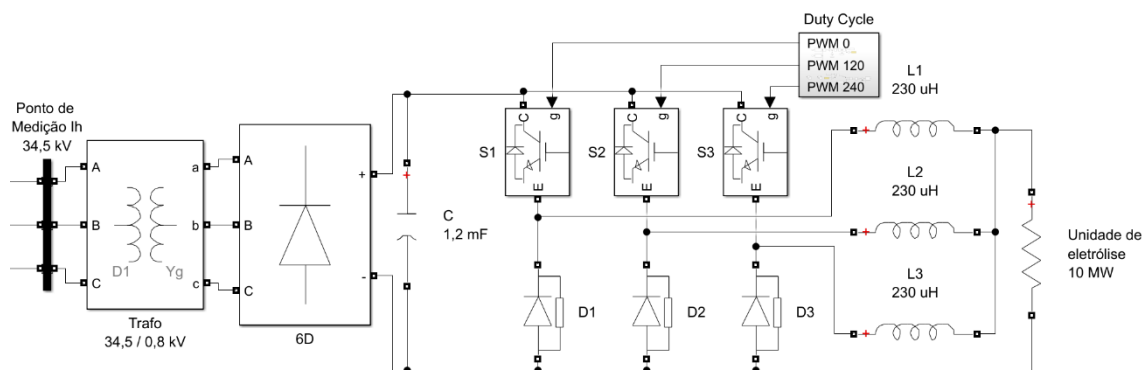
corresponde à conversão AC/DC não controlada, baseada em uma ponte retificadora trifásica de 6 pulsos a diodos (6D), enquanto o segundo estágio realiza a conversão DC/DC controlada, sendo responsável pela regulação da tensão e da potência fornecidas para a unidade de eletrólise. A principal diferença em relação ao Caso III reside na implementação do estágio DC/DC, que, nesta topologia, é realizado por meio de um conversor buck trifásico intercalado.

O estágio AC/DC da topologia 6D+3B é idêntico ao apresentado no Caso III, sendo constituído por uma ponte retificadora trifásica de 6 pulsos a diodos, implementada no MATLAB/Simulink® por meio do bloco *Universal Bridge* e alimentada por um transformador abaixador de 34,5 kV para 0,8 kV. O barramento CC mantém o capacitor C com capacitância de 1,2 mF, com a função de reduzir a ondulação de tensão proveniente da retificação não controlada.

O segundo estágio de conversão é composto por um conversor buck de três braços (3B), no qual a função de regulação da tensão e da corrente aplicadas à unidade de eletrólise é realizada por três ramos de comutação operando de forma intercalada. Cada fase do conversor é constituída por um interruptor semicondutor do tipo IGBT (S_1 , S_2 e S_3), um diodo de roda livre correspondente (D_1 , D_2 e D_3) e um indutor (L_1 , L_2 , e L_3), configurados de acordo com a topologia clássica do conversor buck. Os três barramentos são conectados à unidade de eletrólise de 10 MW, permitindo o compartilhamento da corrente entre as fases.

A Figura 39 apresenta o arranjo completo da topologia 6D+3B conforme implementado no MATLAB/Simulink®, incluindo o transformador de entrada, o retificador a diodos, o barramento CC com o capacitor e o estágio DC/DC buck trifásico conectado à unidade de eletrólise.

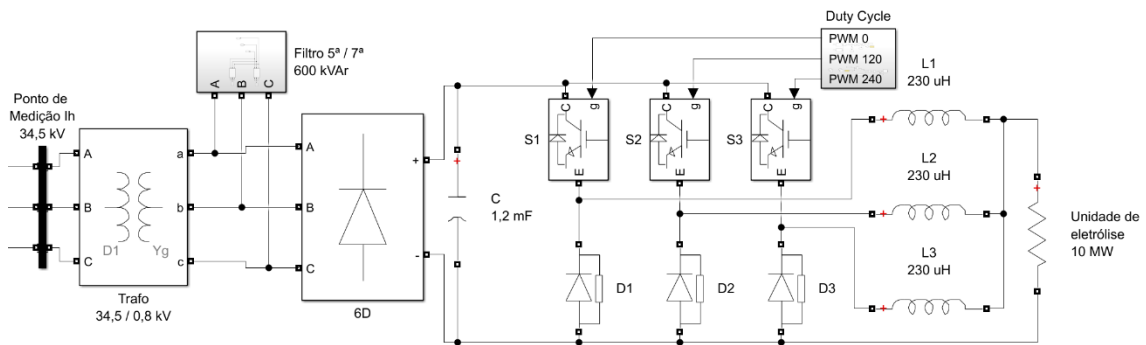
Figura 39 – Configuração da topologia 6D+3B.



Fonte: Autoria própria.

Para o subcaso IV.b, a topologia 6D+3B é avaliada com a inclusão de um sistema de filtragem harmônica no lado CA, com o objetivo de mitigar as componentes dominantes de distorção associadas à retificação a diodos de seis pulsos. Assim como nos demais casos de 6 pulsos analisados neste trabalho, adotou-se um filtro passivo do tipo RLC sintonizado nas ordens harmônicas de 5ª e 7ª, conectado em paralelo no lado de entrada em corrente alternada. A Figura 40 apresenta o arranjo elétrico da topologia 6D+3B correspondente ao subcaso IV.b.

Figura 40 – Configuração da topologia 6D+3B+F.



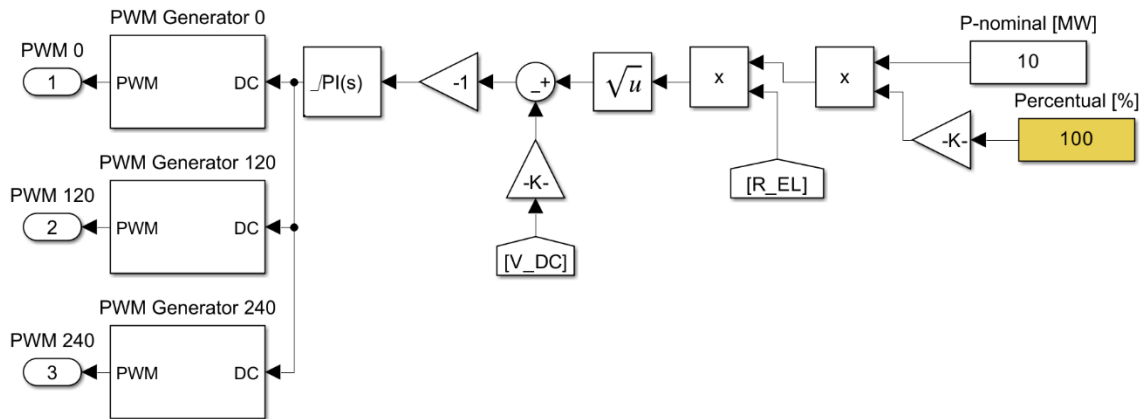
Fonte: Autoria própria.

O sistema de controle adotado é idêntico para os subcasos IV.a e IV.b, mantendo a mesma filosofia adotada no Caso III, sendo responsável pela regulação da tensão no barramento CC e, conseqüentemente, da potência fornecida ao eletrolisador por meio do controle do estágio DC/DC do tipo buck. Para tal, é empregado um controlador Proporcional-Integral (PI) atuando na malha de controle de tensão, cuja saída estabelece o valor de referência do *duty cycle* utilizado na modulação PWM.

Os sinais PWM são gerados por três moduladores independentes, defasados em 120° entre si, de modo a promover a operação intercalada das três fases do conversor buck trifásico. Essa estratégia possibilita o compartilhamento da corrente entre os ramos de comutação, contribuindo para a redução da ondulação no barramento CC e para a melhoria do desempenho dinâmico do sistema.

A Figura 41 apresenta o diagrama funcional do sistema de controle implementado no conversor buck de 3 braços, destacando a malha de controle em tensão e os moduladores PWM defasados entre si responsáveis pela regulação da tensão de saída do conversor buck, sendo R_{EL} a resistência equivalente à unidade de eletrólise e V_{DC} a tensão contínua aplicada à carga.

Figura 41 – Diagrama do sistema de controle para 6D+3B e 6D+3B+F.



Fonte: Autoria própria.

3.2.5. Caso V – Ponte retificadora de 12 pulsos a diodos com conversor buck de 3 estágios – 12D+3B e 12D+3B+F

A topologia 12D+3B representa uma evolução da configuração apresentada no Caso IV, incorporando um estágio de retificação multipulsos com o objetivo de melhorar a qualidade da energia no lado AC. Para isso, o retificador trifásico de 6 pulsos a diodos é substituído por uma configuração de 12 pulsos, enquanto o estágio DC/DC baseado em um conversor buck trifásico é mantido, preservando a capacidade de controle preciso da potência fornecida à unidade de eletrólise.

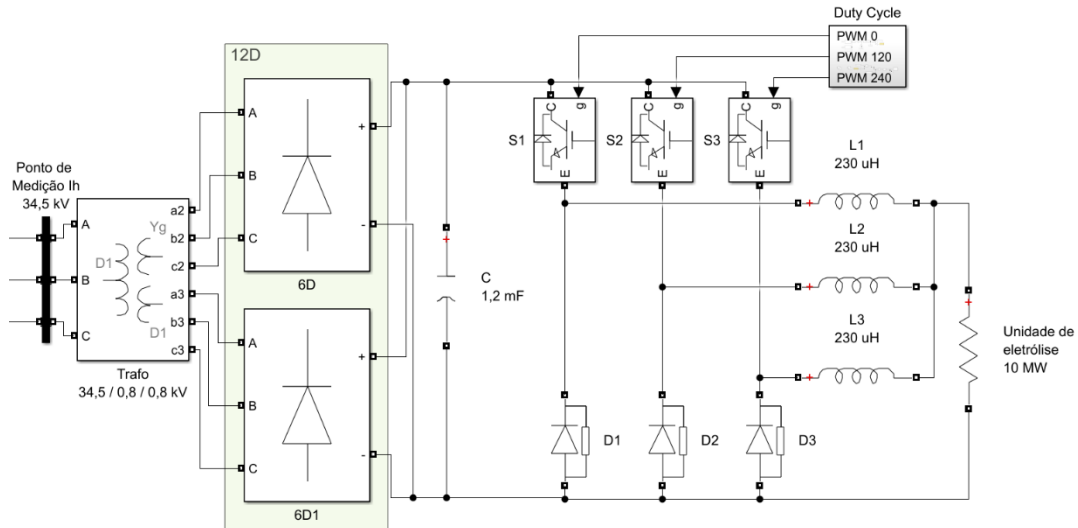
O estágio AC/DC é implementado por meio da associação de duas pontes retificadoras trifásicas de 6 pulsos a diodos, alimentadas por um transformador com dois secundários independentes defasados em 30°. Essa configuração caracteriza um sistema de 12 pulsos (12D), cuja principal vantagem é a supressão natural das componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordens nas correntes do lado AC, resultando em uma redução significativa da distorção harmônica quando comparada às topologias de 6 pulsos.

No barramento em corrente contínua, o banco de capacitores C é mantido com a função de atenuar a ondulação de tensão resultante do processo de retificação multipulsos e fornecer um nível de tensão adequado para o estágio DC/DC subsequente, que por sua vez é constituído por um conversor buck de 3 estágios (3B), responsável pela regulação da tensão e da potência aplicadas à unidade de eletrólise. A operação intercalada dos três ramos de comutação é defasada entre si em 120°.

A Figura 42 apresenta a configuração completa da topologia 12D+3B conforme implementada no MATLAB/Simulink®, incluindo o transformador com dois secundários

independentes, o retificador de 12 pulsos a diodos, o capacitor do elo DC e o conversor buck de 3 braços conectado à unidade de eletrólise.

Figura 42 – Configuração da topologia 12D+3B implementada no MATLAB/Simulink®.

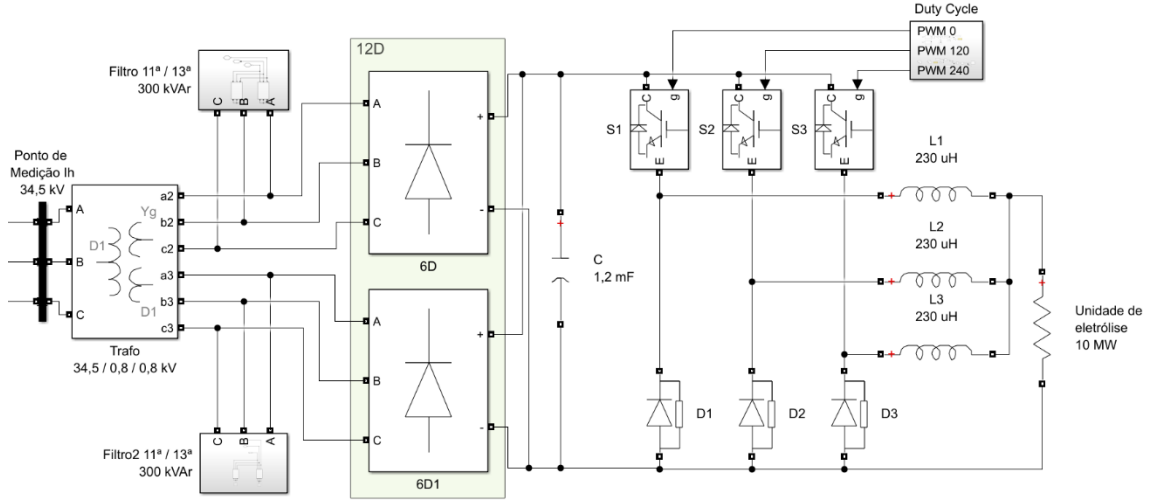


Fonte: Autoria própria.

No subcaso V.b, a topologia 12D+3B é avaliada considerando a presença de um estágio adicional de mitigação harmônica no lado CA, de modo a reproduzir um cenário mais próximo das aplicações industriais associadas a retificadores multipulsos. Nessa condição, a análise passa a contemplar não apenas o efeito da retificação em 12 pulsos, mas também a contribuição de um sistema externo de filtragem na conformidade das correntes de entrada.

Dado o perfil espectral típico dessa configuração, no qual as componentes harmônicas de menor ordem já são naturalmente atenuadas pela própria estrutura de 12 pulsos, o filtro passivo empregado é dimensionado para atuar sobre as harmônicas remanescentes de ordens superiores, sendo adotada uma estrutura RLC sintonizada nas frequências correspondentes à 11ª e à 13ª ordens harmônicas. A Figura 43 apresenta o arranjo completo da topologia 12D+3B+F, destacando a inclusão do sistema de filtragem harmônica no lado de alimentação em corrente alternada da ponte retificadora.

Figura 43 – Configuração da topologia 12D+3B+F.

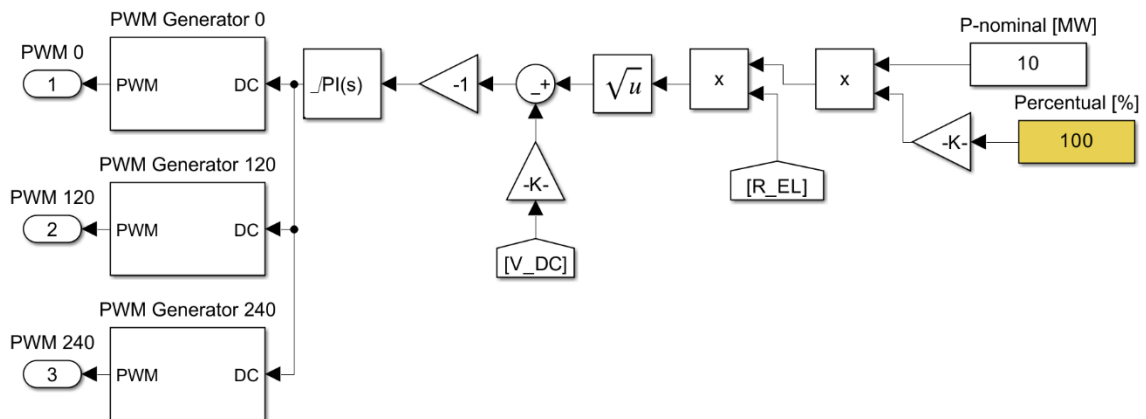


Fonte: Autoria própria.

O sistema de controle associado aos subcasos V.a e V.b segue a mesma filosofia adotada no Caso IV, sendo implementado exclusivamente no estágio DC/DC. Um controlador Proporcional-Integral (PI) atua na malha de controle de tensão do barramento CC, definindo o valor de referência do *duty cycle* utilizado na modulação PWM dos três ramos do conversor buck trifásico.

Os sinais PWM são gerados de forma defasada em 120° , garantindo a operação intercalada do conversor e o compartilhamento equilibrado da corrente entre as fases. A Figura 44 ilustra o diagrama funcional do sistema de controle adotado, destacando a malha de controle em tensão e os moduladores PWM, sendo R_{EL} a resistência equivalente da unidade de eletrólise e V_{EL} a tensão contínua aplicada à carga.

Figura 44 – Diagrama do sistema de controle para 12D+3B e 12D+3B+F.



Fonte: Autoria própria.

3.3. EXECUÇÃO DE SIMULAÇÕES PARA OBTENÇÃO DAS CORRENTES CERTIFICADAS DOS ELETROLISADORES

Após a implementação das topologias de conversão descritas no subtópico 3.2, foram realizadas simulações computacionais com o objetivo de obter as correntes harmônicas certificadas associadas a cada arranjo analisado. As simulações foram conduzidas no ambiente MATLAB/Simulink®, sob diferentes condições de operação, de modo a garantir a aplicação do procedimento estabelecido na norma IEC 61400-21-1.

Para cada topologia, a potência ativa entregue à unidade de eletrólise foi variada em incrementos de 10% da potência nominal, conforme prática adotada em normas internacionais para caracterização elétrica de sistemas baseados em conversores eletrônicos de potência. Embora a norma IEC 61400-21-1 seja originalmente destinada à medição e avaliação das características elétricas de turbinas eólicas conectadas à rede, sua metodologia é amplamente empregada como referência em estudos envolvendo conversores não lineares, os quais também são utilizados em aplicações eólicas e em sistemas de conversão de energia de grande porte. Diante da inexistência, até o momento, de normativas específicas para a avaliação harmônica de eletrolisadores de hidrogênio, a adoção desses procedimentos permite estabelecer um critério técnico consistente para a obtenção das correntes harmônicas neste estudo.

Considerando que o módulo de eletrólise modelado possui potência nominal unitária de 10 MW, as simulações foram realizadas para níveis de potência compreendidos entre 10 MW e 1 MW, correspondendo a variações de 100% a 10% da potência nominal, respectivamente, conforme preconizado na IEC em questão. Para cada condição de operação, o sistema foi simulado em regime permanente, assegurando a estabilização das grandezas elétricas antes da extração das correntes harmônicas.

As correntes harmônicas foram avaliadas no lado de média tensão do sistema, em 34,5 kV, a montante do transformador de acoplamento ao estágio AC/DC, de forma a caracterizar o impacto das diferentes topologias sobre o ponto de interface com a rede elétrica. Essa escolha visa representar o comportamento do conjunto formado pelo conversor e pelo transformador, tal como ocorre em aplicações reais, nas quais o transformador de acoplamento constitui parte integrante do sistema de conexão.

A adoção do nível de média tensão como ponto de medição permite, ainda, assegurar uniformidade metodológica entre todos os casos analisados, incluindo os subcasos com e sem sistemas de filtragem harmônica, possibilitando uma comparação direta e consistente dos

resultados. Dessa forma, a análise concentra-se nos efeitos harmônicos efetivamente injetados no sistema elétrico a partir do arranjo completo de conversão.

A NT 009/2016, referente aos requisitos de acesso à Rede Básica, estabelece como espectro harmônico de interesse as ordens compreendidas entre a 2ª e a 50ª, para avaliação das correntes injetadas. Assim, para garantir consistência com essa normativa, as correntes harmônicas foram obtidas considerando esse mesmo intervalo, correspondente à faixa de frequência de 120 Hz a 3000 Hz para sistemas de 60 Hz.

Para cada ordem harmônica analisada, as correntes harmônicas foram extraídas para todos os níveis de potência simulados. Em seguida foi adotado o valor máximo de I_h observado ao longo das diferentes condições de operação, isto feito para cada ordem. Este procedimento assegura uma abordagem conservadora, mas alinhada às práticas normativas para estudos de acesso e avaliação de impacto harmônico e instruídas pela normativa IEC em questão. Esses valores máximos constituem as correntes harmônicas certificadas, as quais serão utilizadas nas etapas subsequentes deste documento dissertativo.

Adicionalmente, foi aplicado um critério de filtragem das ordens harmônicas consideradas, em consonância com a IEC 61400-21-1. Assim, foram selecionadas apenas as ordens harmônicas cujas magnitudes individuais superam 0,1% da corrente nominal do módulo de eletrólise. Correntes harmônicas abaixo desse limiar apresentam, em geral, valores da mesma ordem de grandeza da incerteza de medição, podendo ser interpretadas como ruído e, portanto, não sendo representativas do comportamento harmônico efetivo do sistema. Dessa forma, apenas as componentes harmônicas consideradas significativas foram mantidas.

Visando a clareza e a objetividade do texto principal, os resultados completos das correntes harmônicas obtidas para todas as variações de potência e para cada topologia são apresentados no Apêndice A. Já a Tabela 4 reúne, de forma sintética, os valores máximos de I_h por ordem harmônica para cada caso analisado, já considerando a aplicação do critério de filtragem estabelecido.

Tabela 4 – Correntes certificadas dos eletrolisadores obtidas para cada topologia de conversão.

h	Caso I (%)		Caso II (%)		Caso III (%)		Caso IV (%)		Caso V (%)	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
2	-	-	-	-	0,746	0,952	0,462	-	0,630	-
3	-	-	-	-	0,506	-	-	-	0,706	-
4	-	-	-	-	0,765	1,028	0,376	-	0,791	-
5	26,609	9,847	-	-	23,906	9,794	23,285	9,724	1,358	-

6	-	-	-	-	0,197	0,185	-	-	0,725	-
7	14,815	3,570	-	-	13,951	3,001	13,249	2,977	1,375	-
8	-	-	-	-	0,745	0,925	1,112	-	0,231	-
9	-	-	-	-	0,358	-	-	-	0,280	0,109
10	-	-	-	-	0,995	0,581	0,803	-	0,412	0,222
11	11,322	11,184	13,166	1,393	12,432	7,018	9,977	6,257	6,004	0,914
12	-	-	-	-	0,479	0,140	0,101	-	0,717	0,221
13	8,180	8,245	9,243	1,041	6,584	4,917	6,462	4,308	5,041	0,498
14	-	-	-	-	4,562	3,629	5,675	0,160	1,101	-
15	-	-	-	-	2,638	0,272	0,266	0,110	1,399	-
16	-	-	-	-	4,290	3,326	5,294	0,112	2,492	-
17	6,278	6,860	-	-	4,989	6,852	5,275	9,343	12,482	-
18	-	-	-	-	0,894	0,520	0,131	0,146	7,194	-
19	4,595	4,887	-	-	3,672	6,416	4,164	8,640	12,359	-
20	-	-	-	-	0,689	1,141	0,816	-	5,862	0,200
21	-	-	-	-	0,327	0,104	-	-	1,776	0,121
22	-	-	-	-	0,628	0,507	0,171	-	1,152	0,682
23	3,607	3,993	3,883	4,187	2,074	0,893	2,029	0,888	2,427	6,641
24	-	-	-	-	-	0,114	-	-	0,654	0,443
25	2,610	2,770	2,611	2,566	1,759	1,501	1,273	1,800	1,549	5,934
26	-	-	-	-	0,198	0,233	0,203	-	0,627	0,200
27	-	-	-	-	-	-	-	-	0,413	-
28	-	-	-	-	0,170	0,400	0,323	-	0,318	-
29	2,282	2,502	-	-	0,915	0,838	0,755	0,711	0,851	-
30	-	-	-	-	0,105	-	-	-	0,503	-
31	1,610	1,686	-	-	0,632	0,416	0,665	0,582	0,514	-
32	-	-	-	-	0,122	-	-	-	0,617	-
33	-	-	-	-	0,182	-	-	-	0,367	-
34	-	-	-	-	0,308	0,173	0,316	-	0,326	-
35	1,576	1,713	1,529	1,541	0,528	0,506	0,469	0,551	0,562	0,484
36	-	-	-	-	-	-	-	-	0,246	-
37	1,071	1,117	1,257	1,168	0,423	0,399	0,521	0,478	0,547	0,534
38	-	-	-	-	0,124	-	-	-	0,387	-
39	-	-	-	-	-	-	-	-	0,262	-
40	-	-	-	-	0,199	0,101	0,153	-	0,232	-
41	1,155	1,251	-	-	0,365	0,298	0,303	0,277	0,427	-
42	-	-	-	-	-	-	-	-	0,335	-
43	0,814	0,848	-	-	0,311	0,308	0,295	0,334	0,529	-
44	-	-	-	-	0,152	-	0,104	-	0,111	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-	0,171	-
46	-	-	-	-	0,127	-	-	-	0,174	-
47	0,881	0,955	0,817	0,761	0,239	0,203	0,264	0,231	0,280	0,285

48	-	-	-	-	-	-	-	-	0,170	-
49	0,676	0,683	0,728	0,713	0,197	0,191	0,192	0,184	0,267	0,218
50	-	-	-	-	0,130	-	-	-	0,149	-

*Valores referidos a Vbase = 34,5 kV e Sbase = 10 MVA.

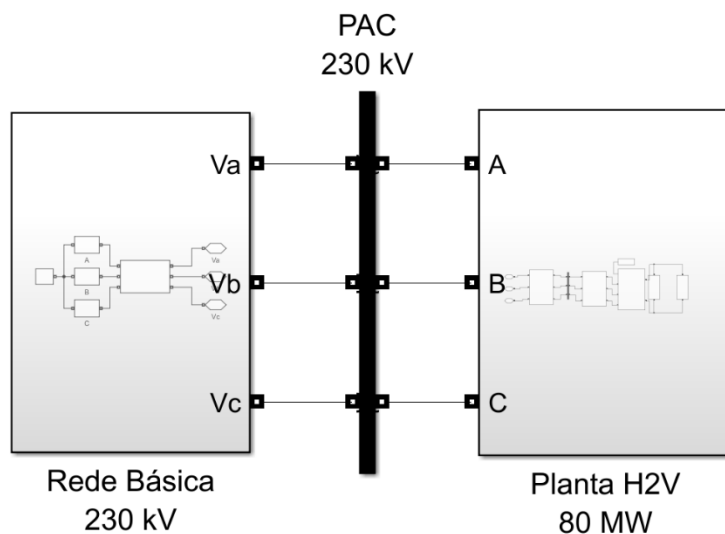
Fonte: Autoria própria.

4. ESTUDO DE ACESSO DE UMA PLANTA HIPOTÉTICA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO À REDE BÁSICA BRASILEIRA: ANÁLISE HARMÔNICA DE DISTINTAS TOPOLOGIAS DE ELETROLISADOR

Este capítulo apresenta a análise de caso hipotético para a avaliação do impacto harmônico associado à conexão de uma planta de produção de hidrogênio verde à Rede Básica do SIN, considerando, para tanto, distintas topologias de eletrolisador. O estudo tem como objetivo avaliar o comportamento harmônico em um barramento do SIN, o qual será considerado como um Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre uma planta de geração de hidrogênio e a rede básica brasileira.

Assim, para este estudo, adota-se uma planta hipotética de eletrólise com potência de 80 MW. O estudo será realizado considerando um PAC em 230 kV, conforme na sequência justificado. Então, a configuração genérica do sistema elétrico adotado, contemplando a Rede Básica e a planta de produção de hidrogênio verde, encontra-se sintetizada na Figura 45.

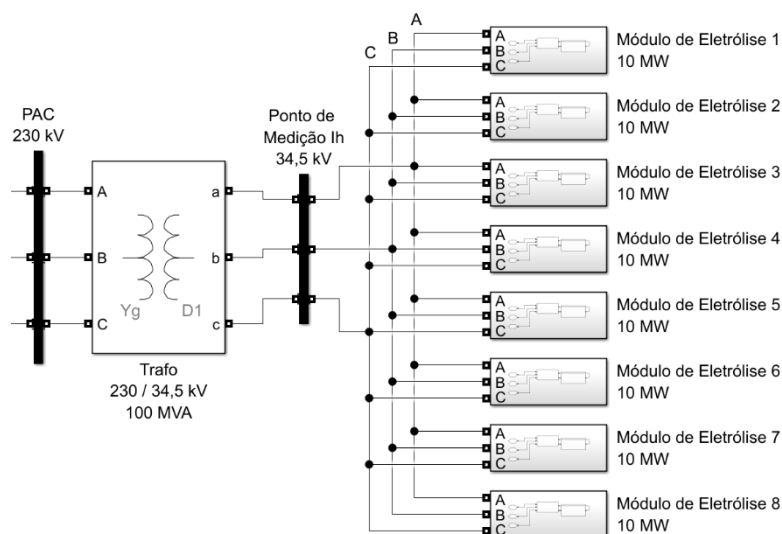
Figura 45 – Configuração genérica do ponto de conexão considerada no estudo de acesso.



Fonte: Autoria própria.

No que diz respeito à planta hipotética de produção de hidrogênio verde, tem-se que a mesma será definida como uma associação de 08 módulos de potência 10 MW, cada um. Estes módulos individuais serão assim considerados de modo a refletir as unidades de eletrolisadores modeladas na seção anterior desta dissertação. Assim as correntes certificadas obtidas nas simulações das distintas topologias de conversão poderão ser empregadas nos estudos harmônicos deste capítulo. A Figura 46 apresenta uma visão geral desta planta de eletrólise.

Figura 46 – Arranjo padrão da planta de H2V considerada para o estudo.



Fonte: Autoria própria.

4.1. DEFINIÇÃO DO PONTO DE CONEXÃO COM O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA BRASILEIRO

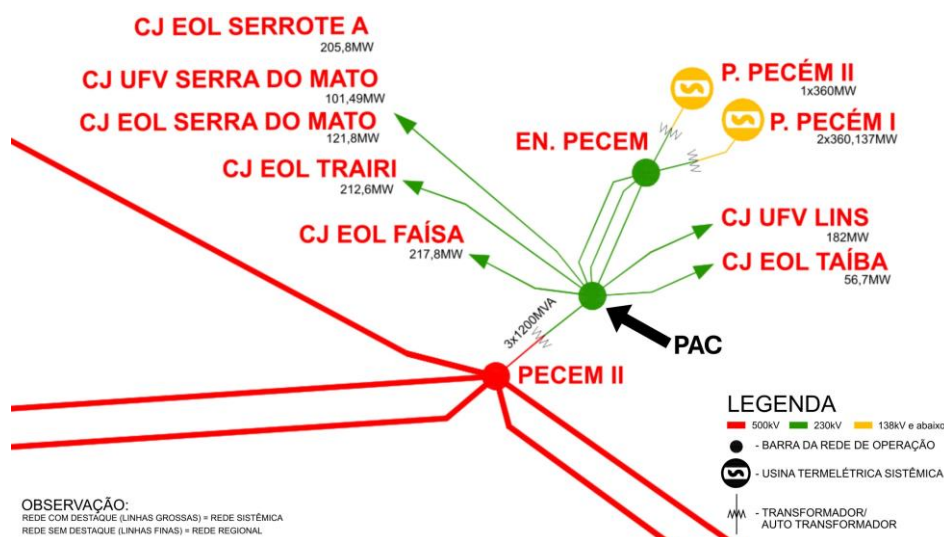
O presente estudo será feito considerando a conexão da planta hipotética de hidrogênio em um ponto da rede básica brasileira nas proximidades do Porto do Pecém, no estado do Ceará, em 230kV. A região, em questão, abriga o Hub de Hidrogênio Verde do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, lançado em 2021 com o objetivo de consolidar o Ceará como polo estratégico de produção e exportação de hidrogênio verde [50]. O complexo concentra os primeiros projetos dessa natureza no Brasil e foi o local de produção da primeira molécula de hidrogênio verde do país, reforçando a pertinência do sistema elétrico selecionado para a análise proposta [51], [52]. Além disso, trata-se de uma área de elevada relevância do SIN, a qual é caracterizada por uma infraestrutura robusta de transmissão, elevada concentração de cargas industriais e expressiva inserção de empreendimentos de geração, com destaque para fontes renováveis eólicas e fotovoltaicas.

Sob a perspectiva de qualidade da energia e mais especificamente sob a óptica das distorções harmônicas, a coexistência de geração convencional e renovável, associada à presença de longos corredores de transmissão em alta tensão, pode resultar em maior variabilidade das impedâncias harmônicas observadas a partir do PAC, tornando a avaliação do impacto de novas cargas não lineares particularmente relevante. Nesse contexto, a escolha do sistema elétrico da região do Porto do Pecém mostra-se especialmente adequada para a

avaliação do impacto harmônico associado à inserção de plantas de produção de hidrogênio verde.

A Figura 47 apresenta o arranjo das linhas de transmissão, subestações e unidades de geração localizadas nas proximidades do Porto do Pecém. Observa-se a convergência de cinco linhas de transmissão em 500 kV na Subestação Pecém II, a qual opera na relação de transformação 500 kV/230 kV. A partir dessa subestação, tem-se um barramento em 230 kV que alimenta diretamente diversos empreendimentos conectados à rede, incluindo complexos eólicos e fotovoltaicos, refletindo a elevada penetração de fontes renováveis na região. Desse mesmo barramento derivam-se três linhas de transmissão em 230 kV, responsáveis pelo suprimento da Subestação de Entrada Pecém, que, por sua vez, alimenta as UTEs Porto de Pecém I e Porto de Pecém II.

Figura 47 – Configuração do sistema elétrico de interesse.



Fonte: Modificado de [53].

Diante dessa configuração, o barramento de 230 kV, oriundo da Subestação Pecém II (veja indicação feita no arranjo anterior), foi definido como o PAC. Portanto, este é o ponto adotado para o presente estudo harmônico.

Uma vez definido o PAC e a planta hipotética de produção de hidrogênio, tem-se na sequência a apresentação do estudo harmônico no software HarmZs, em conformidade com aquilo que é preconizado na atualidade nas normatizações brasileira.

4.2. IMPLEMENTAÇÃO DO ESTUDO HARMÔNICO NO HARMZS

Seguindo o procedimento recomendado pelo ONS, conforme sintetizado no subtópico 2.5 do Capítulo 2 desta dissertação, não é prático determinar os piores valores de tensão harmônica no PAC por meio do cálculo de fluxo harmônico para cada ponto do LG (lugar geométrico das admitâncias). Assim, a abordagem tradicional consiste, primeiramente, na determinação do Equivalente de Norton da rede interna do agente acessante (planta de eletrólise), visto a partir do PAC, considerando a instalação desconectada da Rede Básica, para cada ordem harmônica significativa e para as diferentes condições operativas possíveis da instalação.

Neste estudo, a Rede Básica é representada por meio de um LG, a partir do qual é calculado o vetor resultante da interação entre a rede externa e a rede interna. Esse vetor, combinado com a corrente harmônica equivalente de Norton, permite identificar a condição que acarreta o maior valor de distorção harmônica de tensão no PAC.

Para a realização desse estudo, o ONS recomenda a utilização do programa HarmZs, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), o qual é indicado como ferramenta para a avaliação do impacto harmônico decorrente de novas conexões ao sistema elétrico [47], [54].

Nesse contexto, os subtópicos a seguir apresentam os critérios e metodologias adotados para a implementação do equivalente externo e para a modelagem da rede interna, conforme utilizado nas simulações realizadas no software HarmZs.

4.2.1. Implementação do equivalente da rede externa – Rede Básica

Para a representação do equivalente externo por meio do Lugar Geométrico (LG), o ONS recomenda a utilização do LG do tipo setor anular ou, alternativamente, do tipo polígono de n lados. Este último, conforme indicado pelo próprio ONS, apresenta resultados menos conservadores, sendo, portanto, o tipo de LG adotado neste estudo.

O estabelecimento do LG baseia-se na determinação das impedâncias (ou admitâncias) harmônicas vistas a partir do PAC, considerando a instalação desconectada da Rede Básica e desconsiderando o efeito do circuito interno da planta, uma vez que esse efeito é devidamente representado pelo Equivalente de Norton da rede interna. As impedâncias harmônicas da rede externa são obtidas por meio da avaliação de diferentes condições operativas do sistema

elétrico, contemplando cenários presentes e futuros, bem como distintos níveis de carregamento e eventuais deteriorações do sistema (contingenciamentos).

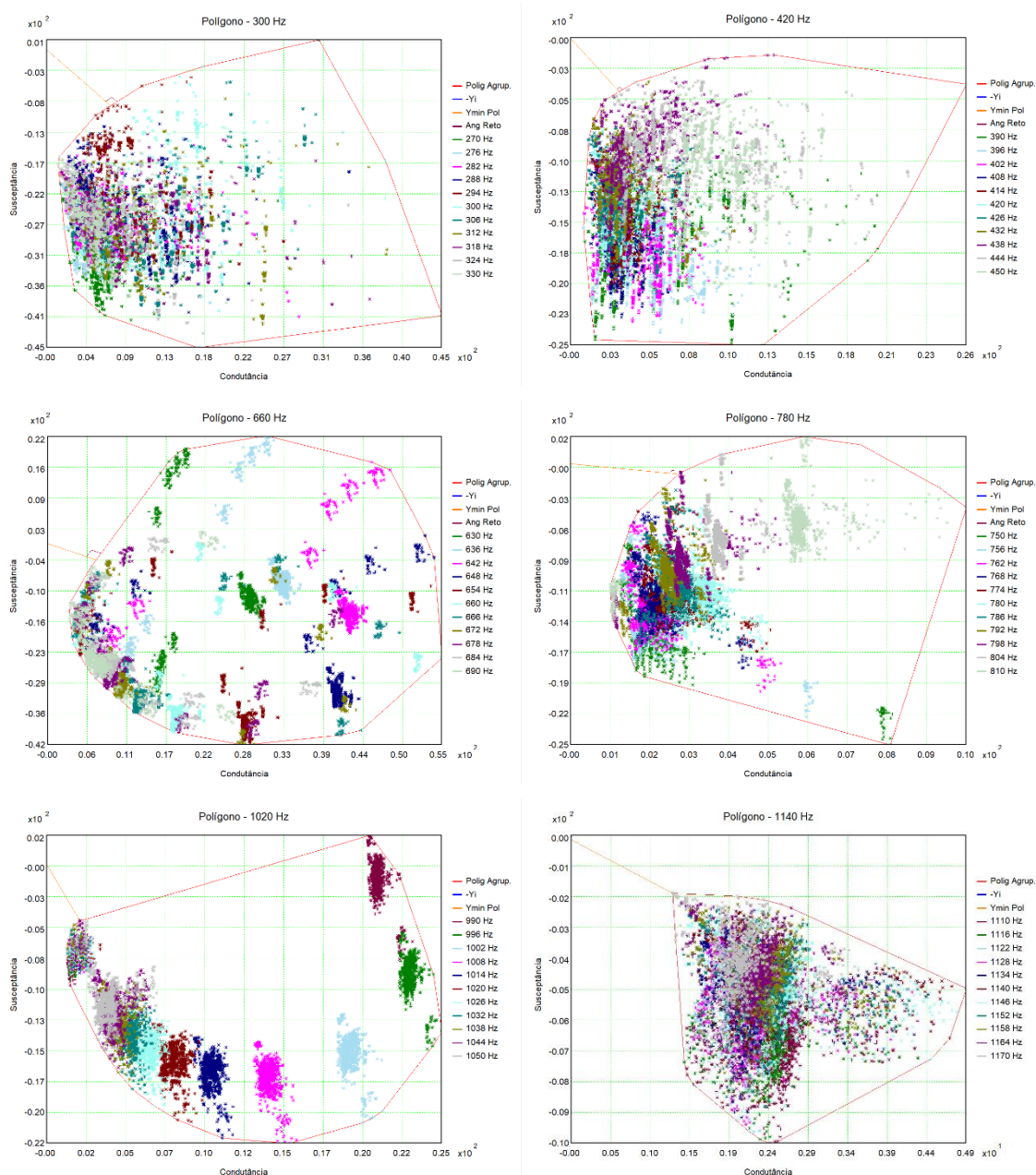
Esses cenários correspondem aos 33 casos de referência definidos pelo ONS, contemplando um horizonte de planejamento de cinco anos, no período de 2026 a 2030, e disponibilizados no âmbito dos estudos PAR/PEL. A esses casos somam-se condições de operação degradada do sistema (critérios N-1), associadas à indisponibilidade de elementos da Rede Básica eletricamente próximos ao PAC, conforme os critérios normativos estabelecidos. As grandezas harmônicas são observadas no PAC da instalação, correspondente à barra “PECEM2-CE230”.

A combinação dos 33 casos de referência com as contingências N-1 consideradas até a 3ª vizinhança elétrica do PAC resultou, no presente estudo de acesso, na avaliação de 1.869 contingências. Para cada contingência, foram analisadas 481 frequências, em função da adoção do lugar geométrico (LG) do tipo polígono de n lados, considerando, para cada ordem harmônica h , o intervalo $h \pm 0,5$. Tal abordagem implica a avaliação de uma faixa de ± 30 Hz em torno da frequência central da ordem harmônica, de modo que, por exemplo, para a 3ª ordem (180 Hz), são analisadas frequências compreendidas entre 150 Hz e 210 Hz. O passo de integração adotado foi de $\pm 0,1$, o que, considerando a frequência fundamental do SIN, de 60 Hz, corresponde a um incremento de ± 6 Hz, em conformidade com a normativa vigente. Como resultado desse processo, obteve-se uma nuvem de pontos de admitâncias harmônicas da rede externa, disponibilizada no formato .prx, a qual constitui a representação final do equivalente externo a ser utilizada nas análises harmônicas desenvolvidas neste estudo.

Com o objetivo de manter o texto principal mais didático e fluido, optou-se por disponibilizar no Apêndice B o conjunto completo dos Lugares Geométricos obtidos, contemplando as ordens harmônicas da 2ª à 50ª. Assim, no presente capítulo são apresentados apenas os LGs correspondentes às ordens harmônicas mais representativas para as topologias de conversão analisadas.

Para fins ilustrativos, a Figura 48 apresenta os Lugares Geométricos obtidos para as ordens 5, 7, 11, 13, 17 e 19.

Figura 48 – Lugares Geométricos obtidos para as ordens 5ª (300Hz), 7ª (420Hz), 11ª (660Hz), 13ª (780Hz), 17ª (1020Hz) e 19ª (1140).



Fonte: Autoria Própria.

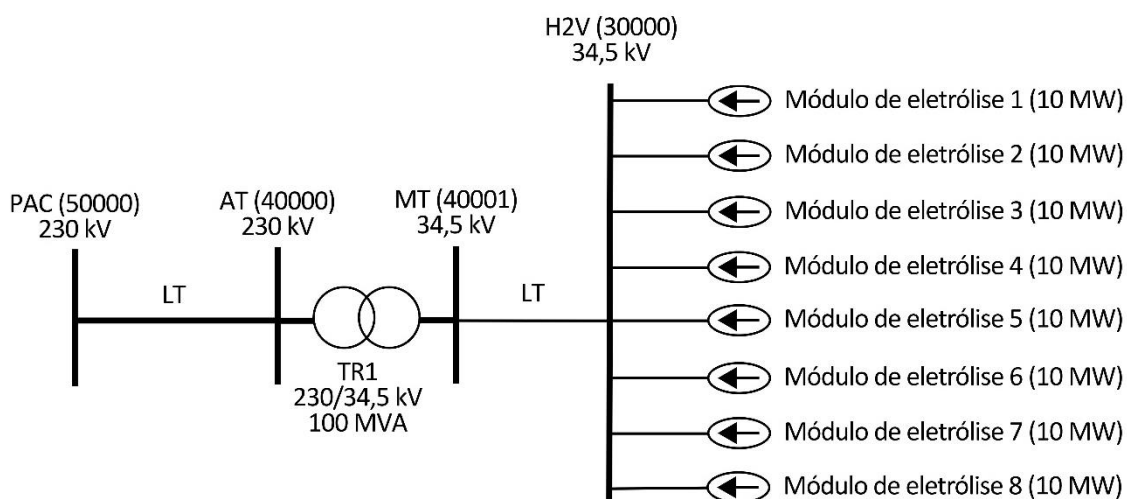
4.2.2. Implementação da rede interna – Planta de Hidrogênio

As correntes harmônicas utilizadas no cálculo de V_{hmax} podem ser determinadas a partir dos valores de correntes harmônicas geradas por cada um dos equipamentos não lineares presentes na instalação. Vale ressaltar que, conforme definido na Equação 21, V_{hmax} é obtida pela razão entre a corrente harmônica equivalente de Norton e o valor de Y_{hmin} . Este último corresponde ao módulo da soma vetorial, em paralelo, entre a admitância Norton equivalente

da rede interna do agente ($\dot{Y}_{ih}$) e a admitância associada ao ponto do envelope do LG de admitância da Rede Básica ($\dot{Y}_{bh}$) que minimiza Y_{hmin} . Neste contexto, no presente estudo, as correntes harmônicas foram obtidas a partir de medições/simulações específicas realizadas para os módulos de eletrólise considerados.

A modelagem da rede interna foi realizada com o auxílio do software EditCepel, por meio da representação das barras elétricas e dos principais elementos constituintes do sistema da planta de hidrogênio verde. Com o objetivo de preservar a clareza e a didática do texto principal, os detalhes da modelagem do equivalente de Norton da rede interna para todos os casos simulados são apresentados no Apêndice C. A Figura 49 ilustra o diagrama unifilar simplificado da rede interna correspondente à planta de produção de hidrogênio verde implementada.

Figura 49 – Diagrama da Rede Interna.



Fonte: Autoria Própria.

As correntes harmônicas determinadas no Capítulo 3 referem-se a um único módulo de eletrólise. Considerando que a planta em estudo é composta por 08 módulos idênticos operando de forma independente, torna-se necessária a agregação das correntes harmônicas individuais para a obtenção da corrente harmônica total injetada no ponto de conexão da instalação.

Nesse contexto, a NT 009/2016, baseando-se na IEC 61000-3-6, recomenda a utilização de um método estatístico de agregação das correntes de Norton associadas a múltiplas fontes harmônicas, tendo em vista a dificuldade prática de se estabelecer os ângulos de fase relativos entre correntes harmônicas geradas por fontes controladas de forma independente. A corrente harmônica total de ordem h é então obtida conforme a Equação [47]:

$$I_{h, \text{total}} = \sqrt[a]{\sum_{i=1}^m I_{h,i}^a} \quad (21)$$

Onde,

h = ordem harmônica

m = número total de fontes

a = fator de agregação

O expoente “a” está associado ao processo de agregação estatística das correntes harmônicas provenientes de múltiplas fontes. Sua definição é influenciada pelo critério probabilístico adotado para limitar a não excedência do valor calculado e pelo grau de aleatoriedade das magnitudes e dos ângulos de fase das correntes harmônicas individuais, as quais não são controladas de forma coordenada [55].

Na prática, esse expoente permite representar o efeito da combinação de correntes harmônicas que apresentam comportamentos distintos ao longo do tempo. Para harmônicas de baixa ordem, as correntes tendem a exibir maior estabilidade em magnitude e menor dispersão dos ângulos de fase, o que favorece uma soma mais coerente entre as contribuições individuais. Em contrapartida, as harmônicas de ordem mais elevada apresentam maior variabilidade tanto em magnitude quanto em fase, o que resulta em uma agregação menos direta, com maior efeito de cancelamento entre as correntes [55].

Dessa forma, a adoção de diferentes valores do expoente a em função da ordem harmônica permite representar a contribuição conjunta das correntes harmônicas individuais na corrente total resultante [55]. A Tabela 5 apresenta os expoentes a serem adotados para a agregação das contribuições harmônicas, na ausência de informações mais específicas.

Tabela 5 – Expoentes correspondentes para o fator de agregação.

h	a
$h < 5$	1
$5 \leq h \leq 10$	1,4
$h > 10$	2

Fonte: [55].

A partir dos valores individuais de corrente harmônica associados a cada módulo de eletrólise e da aplicação do método de agregação estatística descrito anteriormente, foram

determinadas as correntes harmônicas equivalentes correspondentes à operação simultânea dos oito módulos que compõem a planta em estudo.

As correntes harmônicas agregadas, por ordem harmônica, são apresentadas na Tabela 6 e representam as contribuições totais injetadas no ponto de conexão da instalação para cada todos os casos de estudo considerados, com ou sem filtro harmônico. Para fins de compatibilidade com a modelagem do sistema elétrico e com o ambiente de simulação adotado, esses valores encontram-se referidos à base de potência do sistema, de 100 MVA, correspondente à base utilizada no HarmZs. Esses dados foram, então, empregados como fontes harmônicas de corrente na modelagem da rede interna.

Tabela 6 – Correntes harmônicas agregadas correspondentes aos 08 módulos de eletrólise e às distintas topologias de eletrólise sob avaliação.

h	Caso I (%)		Caso II (%)		Caso III (%)		Caso IV (%)		Caso V (%)	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
2	-	-	-	-	0,597	0,762	0,369	-	0,504	-
3	-	-	-	-	0,405	-	-	-	0,565	-
4	-	-	-	-	0,612	0,822	0,301	-	0,633	-
5	11,751	4,349	-	-	10,558	4,325	10,283	4,295	0,600	-
6	-	-	-	-	0,087	0,082	-	-	0,320	-
7	6,543	1,577	-	-	6,161	1,325	5,851	1,315	0,607	-
8	-	-	-	-	0,329	0,409	0,491	-	0,102	-
9	-	-	-	-	0,158	-	-	-	0,124	0,048
10	-	-	-	-	0,439	0,257	0,354	-	0,182	0,098
11	3,202	3,163	3,724	0,394	3,516	1,985	2,822	1,770	1,698	0,258
12	-	-	-	-	0,136	0,040	0,029	-	0,203	0,063
13	2,314	2,332	2,614	0,294	1,862	1,391	1,828	1,219	1,426	0,141
14	-	-	-	-	1,290	1,026	1,605	0,045	0,312	-
15	-	-	-	-	0,746	0,077	0,075	0,031	0,396	-
16	-	-	-	-	1,213	0,941	1,497	0,032	0,705	-
17	1,776	1,940	-	-	1,411	1,938	1,492	2,643	3,531	-
18	-	-	-	-	0,253	0,147	0,037	0,041	2,035	-
19	1,300	1,382	-	-	1,039	1,815	1,178	2,444	3,496	-
20	-	-	-	-	0,195	0,323	0,231	-	1,658	0,057
21	-	-	-	-	0,092	0,029	-	-	0,502	0,034
22	-	-	-	-	0,177	0,143	0,048	-	0,326	0,193
23	1,020	1,129	1,098	1,184	0,587	0,253	0,574	0,251	0,686	1,878
24	-	-	-	-	-	0,032	-	-	0,185	0,125
25	0,738	0,783	0,739	0,726	0,498	0,425	0,360	0,509	0,438	1,678
26	-	-	-	-	0,056	0,066	0,057	-	0,177	0,057
27	-	-	-	-	-	-	-	-	0,117	-

28	-	-	-	-	0,048	0,113	0,091	-	0,090	-
29	0,645	0,708	-	-	0,259	0,237	0,214	0,201	0,241	-
30	-	-	-	-	0,030	-	-	-	0,142	-
31	0,455	0,477	-	-	0,179	0,118	0,188	0,164	0,145	-
32	-	-	-	-	0,035	-	-	-	0,175	-
33	-	-	-	-	0,052	-	-	-	0,104	-
34	-	-	-	-	0,087	0,049	0,089	-	0,092	-
35	0,446	0,485	0,433	0,436	0,149	0,143	0,133	0,156	0,159	0,137
36	-	-	-	-	-	-	-	-	0,070	-
37	0,303	0,316	0,355	0,330	0,120	0,113	0,147	0,135	0,155	0,151
38	-	-	-	-	0,035	-	-	-	0,109	-
39	-	-	-	-	-	-	-	-	0,074	-
40	-	-	-	-	0,056	0,029	0,043	-	0,066	-
41	0,327	0,354	-	-	0,103	0,084	0,086	0,078	0,121	-
42	-	-	-	-	-	-	-	-	0,095	-
43	0,230	0,240	-	-	0,088	0,087	0,083	0,094	0,150	-
44	-	-	-	-	0,043	-	0,029	-	0,031	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-	0,048	-
46	-	-	-	-	0,036	-	-	-	0,049	-
47	0,249	0,270	0,231	0,215	0,067	0,057	0,075	0,065	0,079	0,080
48	-	-	-	-	-	-	-	-	0,048	-
49	0,191	0,193	0,206	0,202	0,056	0,054	0,054	0,052	0,075	0,062
50	-	-	-	-	0,037	-	-	-	0,042	-

*Valores referidos a $V_{base} = 34,5$ kV e $S_{base} = 100$ MVA.

Fonte: Autoria própria.

Com a definição do sistema elétrico de referência, a implementação do equivalente externo e a modelagem da rede interna, estabelecem-se as bases necessárias para a realização do estudo harmônico da planta de produção de hidrogênio verde no PAC. Na subseção seguinte, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no ambiente do software HarmZs.

4.3. RESULTADOS OBTIDOS E CORRESPONDENTES ANÁLISES CRÍTICAS

Os resultados apresentados a seguir são organizados de forma a permitir a identificação das ordens harmônicas críticas associadas a cada caso de estudo. Para esse fim, são considerados apenas os resultados correspondentes às ordens harmônicas que apresentaram valores de distorção harmônica individual de tensão (DHIT) superiores a zero.

Antes da apresentação dos resultados específicos de cada caso, são inicialmente fornecidos os parâmetros elétricos associados à rede interna e à rede externa que intervêm

diretamente no cálculo da tensão harmônica máxima no ponto de acoplamento comum. Em particular, são apresentados os valores da admitância equivalente de Norton da rede interna, $\dot{Y}_{ih}$, bem como os valores de Y_{hmin} . Ressalta-se que esses parâmetros dependem exclusivamente das características elétricas das redes interna e externa e, portanto, não se alteram entre os diferentes casos de estudo. Assim, seus valores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Admitâncias $\dot{Y}_{ih}$ e Y_{hmin} obtidas por ordem harmônica.

h	$\dot{Y}_{ih}$ (pu)	Y_{hmin} (pu)	h	$\dot{Y}_{ih}$ (pu)	Y_{hmin} (pu)	h	$\dot{Y}_{ih}$ (pu)	Y_{hmin} (pu)
2	0,0000+j0,0126	12,000	19	0,0083+j0,1445	2,204	36	0,3161+j0,3884	2,009
3	0,0000+j0,0189	6,452	20	0,0106+j0,1556	1,219	37	0,3713+j0,3768	1,424
4	0,0000+j0,0253	8,201	21	0,0133+j0,1674	1,117	38	0,4268+j0,3518	1,143
5	0,0001+j0,0317	11,154	22	0,0168+j0,1799	1,196	39	0,4777+j0,3128	0,975
6	0,0001+j0,0383	8,993	23	0,0210+j0,1933	1,416	40	0,5190+j0,2613	1,026
7	0,0002+j0,0449	5,361	24	0,0262+j0,2075	4,224	41	0,5467+j0,2013	1,027
8	0,0003+j0,0517	3,373	25	0,0326+j0,2226	5,348	42	0,5590+j0,1381	1,011
9	0,0004+j0,0587	2,265	26	0,0406+j0,2388	3,462	43	0,5565+j0,0771	1,013
10	0,0006+j0,0659	3,346	27	0,0504+j0,2559	3,320	44	0,5419+j0,0223	1,010
11	0,0009+j0,0733	7,543	28	0,0625+j0,2739	4,942	45	0,5190-j0,0241	1,010
12	0,0012+j0,0809	5,910	29	0,0774+j0,2928	8,027	46	0,4910-j0,0614	1,025
13	0,0017+j0,0888	2,907	30	0,0958+j0,3122	6,372	47	0,4609-j0,0903	1,291
14	0,0023+j0,0971	3,296	31	0,1184+j0,3317	5,525	48	0,4305-j0,1119	1,757
15	0,0030+j0,1057	2,362	32	0,1459+j0,3505	5,171	49	0,4013-j0,1274	2,042
16	0,0039+j0,1147	2,228	33	0,1791+j0,3675	4,123	50	0,3739-j0,1382	2,877
17	0,0051+j0,1241	4,943	34	0,2186+j0,3811	3,252			
18	0,0065+j0,1340	4,062	35	0,2645+j0,3889	2,631			

Fonte: Autoria própria.

Na sequência, para cada topologia de conversão analisada, bem como para os respectivos subcasos com e sem a utilização de sistemas de filtragem harmônica, são apresentados os índices de DHIT (por ordem harmônica) e a distorção harmônica total de tensão (DHTT). Para cada conjunto de resultados, realiza-se, simultaneamente, a análise crítica do comportamento harmônico observado e a verificação de conformidade com os limites individuais estabelecidos pelo Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede do ONS, conforme a classe de tensão do PAC ($V \geq 69$ kV). A Tabela 8 apresenta os limites normativos adotados neste estudo.

Tabela 8 – Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental.

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
h	VALOR (%)	h	VALOR (%)	h	VALOR (%)	h	VALOR (%)
3 a 25	1,5			3 a 25	0,6		
		todos	0,6			todos	0,3
≥ 27	0,7			≥ 27	0,4		
DHTT = 3 %				DHTT = 1,5 %			

Fonte: [48].

4.3.1. Resultados para o Caso I – Ponte retificadora de 6 pulsos a tiristores – 6TR e 6TR+F

O Caso I corresponde à topologia de conversão baseada em uma ponte retificadora controlada de 6 pulsos, implementada com tiristores, sendo analisados dois subcasos: operação sem sistema de filtragem harmônica para o subcaso I.a e operação com a inclusão de filtro harmônico no lado CA, para o subcaso I.b.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações para I.a. e I.b.

Tabela 9 – Resultados obtidos para as topologias 6TR + 6TR+F.

h	I _h (pu)		DHIT Máx (%)	
	a	b	a	b
5	0,119	0,044	1,069	0,396
7	0,067	0,016	1,256	0,303
11	0,034	0,034	0,456	0,450
13	0,026	0,026	0,880	0,887
17	0,021	0,023	0,429	0,468
19	0,016	0,017	0,738	0,785
23	0,014	0,016	1,013	1,121
25	0,011	0,012	0,208	0,221
29	0,012	0,013	0,143	0,157
31	0,009	0,009	0,161	0,169
35	0,011	0,011	0,400	0,435
37	0,008	0,008	0,540	0,564
41	0,009	0,009	0,824	0,893
43	0,006	0,006	0,548	0,571
47	0,005	0,005	0,367	0,397
49	0,003	0,003	0,155	0,157

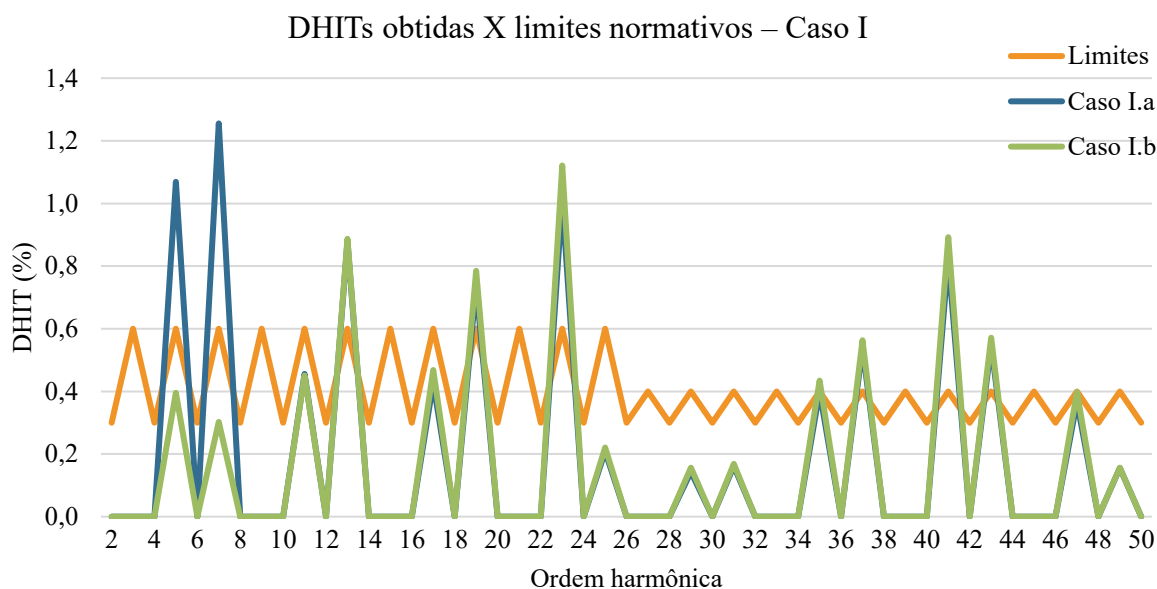
Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 8, observa-se que, no subcaso I.a, sem a utilização de sistema de filtragem harmônica, os maiores níveis de distorção ocorrem nas ordens 5ª, 7ª e 23ª, com valores de DHIT máximos de 1,069%, 1,256% e 1,013%, respectivamente. Esse comportamento é consistente com o espectro harmônico característico de pontes retificadoras controladas de 6 pulsos.

No subcaso I.b, com a inclusão dos filtros harmônicos sintonizados nas ordens 5ª e 7ª, verifica-se uma redução significativa dos valores de DHIT associados a essas componentes, passando de 1,069% para 0,396% na 5ª ordem e de 1,256% para 0,303% na 7ª ordem. Como consequência da atenuação das componentes dominantes de baixa ordem, nota-se que as harmônicas filtradas passam a apresentar maior representatividade relativa no espectro, com destaque para a 23ª ordem, que registra valor de DHIT máximo de 1,121%. Esse comportamento reflete a redistribuição do conteúdo harmônico após a mitigação.

Com o objetivo de facilitar a visualização do atendimento aos limites normativos de distorção harmônica individual de tensão, a verificação de conformidade é apresentada por meio da Figura 50, comparando-se os valores de DHIT obtidos em cada ordem harmônica com os respectivos limites estabelecidos pelo Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede do ONS.

Figura 50 – Distorções harmônicas individuais obtidas para as topologias 6TR + 6TR+F.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise do gráfico apresentado na Figura 50, observa-se que, no subcaso I.a, diversas ordens harmônicas apresentam valores de distorção harmônica individual de tensão

superiores aos limites estabelecidos para $V \geq 69$ kV. Em particular, verificam-se violações nas ordens 5ª, 7ª, 13ª, 19ª, 23ª, 37ª, 41ª e 43ª, caracterizando a não conformidade do arranjo.

Para o subcaso I.b, constata-se que a inclusão dos filtros sintonizados nas ordens 5ª e 7ª resulta na adequação dessas componentes aos limites normativos, evidenciando a efetividade da filtragem sobre as harmônicas de baixa ordem. Entretanto, as demais ordens que já apresentavam violações no subcaso I.a permanecem com valores superiores aos limites individuais estabelecidos, em especial a 23ª ordem, indicando que, embora a filtragem mitigue as componentes dominantes de baixa frequência, subsistem distorções relevantes em ordens superiores, mantendo o arranjo em condição de não conformidade.

De forma global, essas distorções individuais resultam em valores de DHTT de 2,671% para o subcaso I.a e 2,290% para o subcaso I.b, refletindo o impacto da filtragem harmônica sobre a redução das componentes dominantes de baixa ordem, sem, contudo, eliminar completamente as contribuições de ordens superiores.

4.3.2. Resultados para o Caso II – Ponte retificadora de 12 pulsos a tiristores – 12TR e 12TR+F

O Caso II refere-se à topologia de conversão baseada em uma ponte retificadora controlada de 12 pulsos, implementada com tiristores. Assim como no caso anterior, são analisadas duas condições operativas: o subcaso II.a, correspondente à operação sem sistema de filtragem harmônica, e o subcaso II.b, no qual é considerada a inserção de filtro no lado CA.

Os resultados das simulações para os subcasos II.a e II.b são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados obtidos para as topologias 12TR e 12TR+F.

h	I _h (pu)		DHIT Máx (%)	
	a	b	a	b
11	0,040	0,004	0,530	0,056
13	0,029	0,003	0,994	0,112
23	0,015	0,017	1,090	1,176
25	0,011	0,011	0,208	0,205
35	0,010	0,010	0,388	0,391
37	0,009	0,008	0,634	0,589
47	0,004	0,004	0,340	0,317
49	0,003	0,003	0,167	0,164

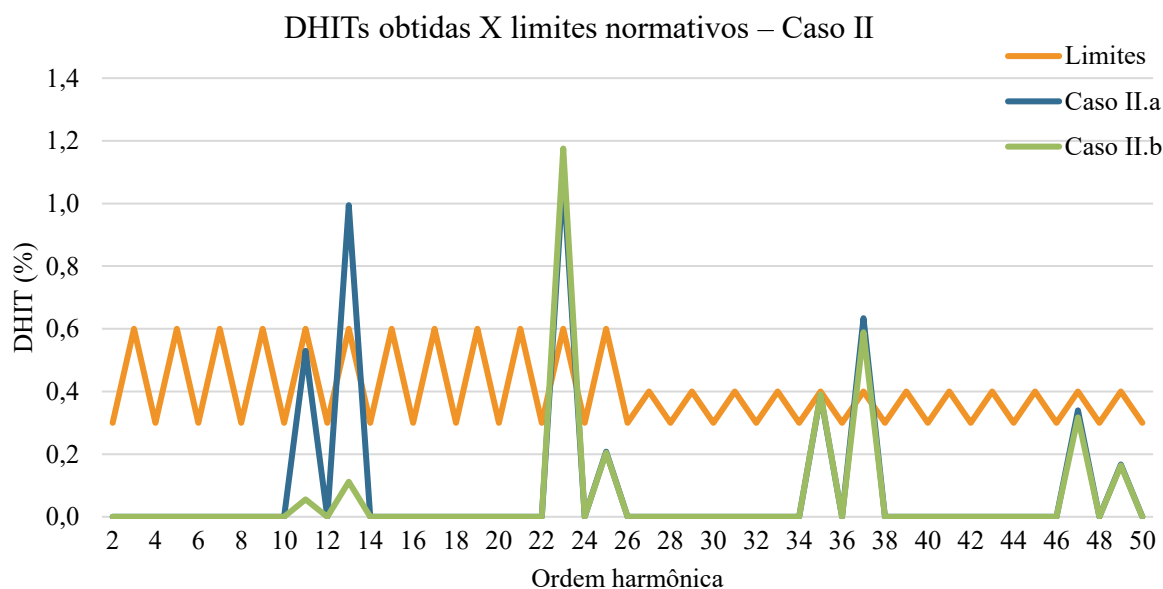
Fonte: Autoria própria.

No subcaso II.a, as maiores contribuições de distorção harmônica individual de tensão concentram-se nas ordens 13^a e 23^a, com valores máximos de 0,994% e 1,090%, respectivamente. Esse comportamento decorre da própria configuração da topologia de 12 pulsos, na qual os secundários do transformador de alimentação são defasados entre si, promovendo o cancelamento natural das harmônicas de 5^a e 7^a ordem geradas por cada ponte de 6 pulsos. Dessa forma, o espectro harmônico passa a ser composto pelas ordens características $12k \pm 1$, deslocando a concentração das distorções para componentes de ordem mais elevada.

No subcaso II.b, há redução significativa das distorções nas ordens 11^a e 13^a, que passam a apresentar valores de DHIT de 0,056% e 0,112%, respectivamente, devido à atuação dos filtros harmônicos sintonizados para essas ordens. Após a filtragem, as harmônicas de ordem superior tornam-se as principais responsáveis pelas distorções, com destaque para a 23^a ordem, que registra DHIT máximo de 1,176%.

Para verificar a conformidade das distorções harmônicas individuais com os critérios normativos, apresenta-se na Figura 51 a comparação entre os valores de DHIT obtidos para cada ordem harmônica e os limites correspondentes.

Figura 51 – Distorções harmônicas individuais obtidas para as topologias 12TR e 12TR+F.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise do gráfico apresentado na Figura 51, observa-se que, no subcaso II.a, apenas as ordens harmônicas 13^a, 23^a e 37^a apresentam valores de distorção harmônica

individual de tensão superiores aos limites aplicáveis. No subcaso II.b, a inclusão dos filtros harmônicos sintonizados nas ordens 11^a e 13^a resulta na adequação da componente de 13^a aos limites normativos, evidenciando a efetividade da filtragem. Entretanto, a 23^a e 37^a ordem permanecem acima do limite, indicando que, embora a filtragem mitigue as componentes dominantes para a topologia 12TR, perduram distorções relevantes em ordens superiores.

No que diz respeito às distorções totais de tensão, verifica-se uma DHTT de 1,788% para o subcaso II.a e de 1,438% para o subcaso II.b, evidenciando o efeito combinado entre o cancelamento harmônico inerente à topologia de 12 pulsos e a ação seletiva da filtragem na redução das distorções de tensão no PAC.

4.3.3. Resultados para o Caso III – Ponte retificadora de 6 pulsos a diodos com conversor buck – 6D+B e 6D+B+F

No Caso III, avalia-se uma configuração de conversão composta por uma ponte retificadora não controlada de 6 pulsos à base de diodos, implementada com diodos, associada a um estágio DC-DC do tipo buck, caracterizando uma arquitetura de dupla conversão. Assim como nos casos anteriores, são analisadas duas condições operativas: o subcaso III.a, referente à operação sem sistema de filtragem harmônica, e o subcaso III.b, no qual é considerada a inclusão de filtros harmônicos no lado CA.

Os resultados provenientes das simulações realizadas para cada uma dessas configurações são consolidados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados obtidos para as topologias 6D+B e 6D+B+F.

h	 I_h (pu)		DHIT Máx (%)	
	a	b	a	b
2	0,006	0,008	0,050	0,064
3	0,004	-	0,063	-
4	0,006	0,008	0,075	0,101
5	0,107	0,044	0,960	0,393
6	0,001	0,001	0,010	0,009
7	0,063	0,014	1,182	0,254
8	0,003	0,004	0,101	0,126
9	0,002	-	0,073	-
10	0,005	0,003	0,139	0,081
11	0,038	0,021	0,501	0,283
12	0,002	0,000	0,025	0,007
13	0,021	0,015	0,708	0,529

14	0,015	0,012	0,440	0,350
15	0,009	0,001	0,362	0,037
16	0,014	0,011	0,636	0,493
17	0,017	0,023	0,341	0,468
18	0,003	0,002	0,076	0,044
19	0,013	0,023	0,590	1,030
20	0,003	0,004	0,205	0,340
21	0,001	0,000	0,109	0,035
22	0,002	0,002	0,202	0,163
23	0,008	0,004	0,582	0,251
25	0,008	0,006	0,140	0,120
26	0,001	0,001	0,025	0,030
28	0,001	0,002	0,017	0,039
29	0,005	0,004	0,057	0,053
30	0,001	-	0,009	-
31	0,004	0,002	0,063	0,042
32	0,001	-	0,014	-
33	0,001	-	0,027	-
34	0,002	0,001	0,061	0,034
35	0,004	0,003	0,134	0,128
37	0,003	0,003	0,213	0,201
38	0,001	-	0,080	-
40	0,002	0,001	0,144	0,073
41	0,003	0,002	0,260	0,213
43	0,002	0,002	0,210	0,207
44	0,001	-	0,097	-
46	0,001	-	0,071	-
47	0,001	0,001	0,099	0,085
49	0,001	0,001	0,045	0,044
50	0,001	-	0,020	-

Fonte: Autoria própria.

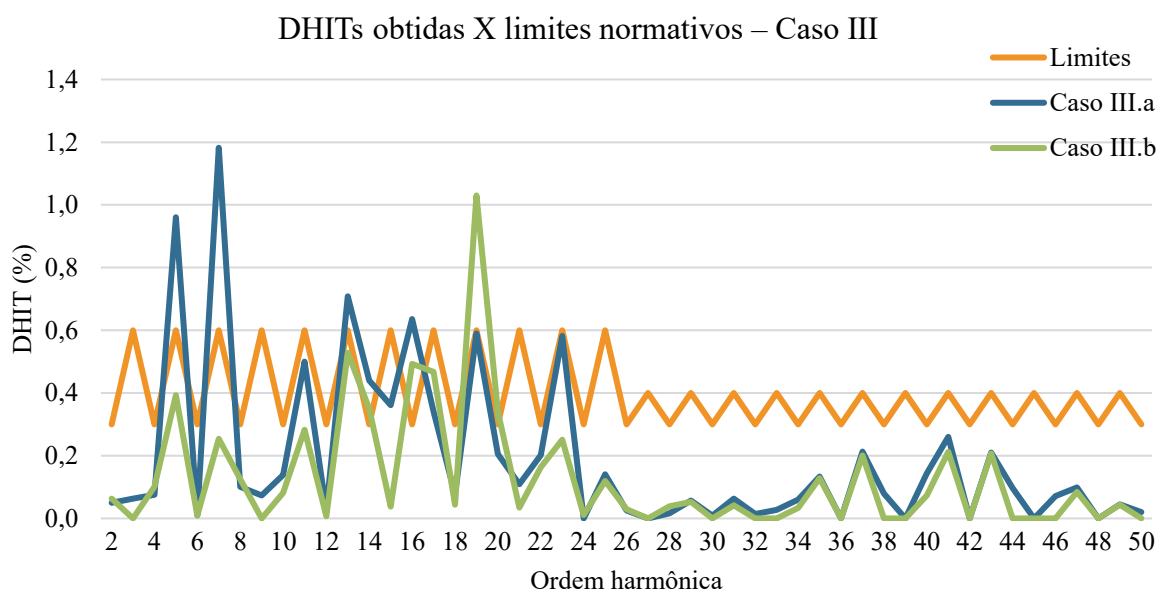
No subcaso III.a, as maiores contribuições individuais de distorção harmônica de tensão concentram-se nas harmônicas características de menor ordem para um retificador de 6 pulsos. As ordens 5^a e 7^a apresentam os maiores valores de DHIT máximo, iguais a 0,960% e 1,182%, respectivamente, configurando-se como as principais responsáveis pela DHTT no PAC. As harmônicas de 11^a e 13^a ordens também apresentam contribuições relevantes, com DHIT máximos de 0,501% e 0,708, indicando a presença de conteúdo harmônico significativo em ordens superiores. Além dessas componentes características, pode-se observar que a ocorrência de harmônicas de ordem mais elevada, com amplitudes menores porém distribuídas ao longo

do espectro, associadas principalmente ao estágio DC-DC do tipo buck, cuja operação em alta frequência introduz componentes adicionais de comutação refletidas no lado CA.

Com a inclusão do sistema de filtragem harmônica no subcaso III.b, projetado para mitigar as componentes de 5ª e 7ª ordens, têm-se uma redução expressiva dessas distorções. Os valores de DHIT máximo passam para 0,393% na 5ª ordem e 0,254% na 7ª ordem, confirmando a efetividade da sintonia do filtro. Como consequência da atenuação das componentes dominantes de menor ordem, as harmônicas de ordens mais elevadas ganham maior relevância relativa no espectro, com destaque para a 13ª ordem, com uma DHIT máxima de 0,529%, e a 11ª ordem, com 0,283%. Ainda assim, os valores observados permanecem inferiores aos do subcaso sem filtragem.

Para facilitar a interpretação dos resultados, a Figura 52 apresenta os valores de DHIT obtidos em cada ordem harmônica em comparação com os limites máximos aceitáveis, permitindo uma análise mais clara.

Figura 52 – Distorções harmônicas individuais obtidas para as topologias 6D+B e 6D+B+F.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise do gráfico, verifica-se que, no subcaso III.a, as ordens harmônicas 5ª, 7ª, 13ª, 14ª e 16ª apresentam valores superiores aos limites estabelecidos pelo Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede. Vale ressaltar que algumas ordens pares, decorrentes do estágio DC-DC do tipo buck, não apenas aparecem no espectro, mas também ultrapassam os limites

normativos, evidenciando a influência desse conversor na formação de distorções não características.

Com a introdução do sistema de filtragem harmônica no subcaso III.b, há adequação das ordens 5ª e 7ª aos limites normativos, confirmando a eficácia da filtragem sobre as componentes dominantes de baixa ordem. Curiosamente, a 13ª ordem também sofre uma redução, passando de 0,708% no subcaso III.a para 0,529% com a filtragem e assim, ficando dentro dos limites permitidos. De forma geral, nota-se uma ligeira atenuação em grande parte do espectro, exceto para a 19ª ordem, que apresenta aumento de 0,590% para 1,030%.

Observa-se, ainda, que as ordens pares 14ª e 16ª apresentam apenas uma pequena redução de aproximadamente 0,1%, permanecendo acima do limite, e surge uma nova violação na 20ª ordem, reforçando a contribuição do estágio buck para a dispersão de pequenas distorções pelo espectro. Apesar dessas exceções, as harmônicas não características, embora reduzidas, continuam presentes, evidenciando a propagação de pequenas distorções ao longo de múltiplas ordens e a complexidade da interação entre os dois estágios de conversão.

A composição dessas distorções individuais resulta em uma DHTT máxima de 2,239% no subcaso III.a e de 1,629% no subcaso III.b, evidenciando a influência direta da filtragem harmônica na redução da distorção total de tensão no PAC.

4.3.4. Resultados para o Caso IV – Ponte retificadora de 6 pulsos a diodos com conversor buck de 3 interruptores – 6D+3B e 6D+3B+F

O Caso IV contempla uma arquitetura de conversão baseada em uma ponte retificadora não controlada de 6 pulsos com diodos, acoplada a um conversor DC-DC do tipo buck composto por três estágios, caracterizando uma configuração de múltiplos níveis no processamento da energia no elo contínuo. Essa estrutura visa avaliar os impactos da segmentação do estágio DC-DC sobre o comportamento harmônico refletido no lado CA.

De forma análoga aos casos anteriores, o estudo é conduzido considerando duas situações operativas distintas: o subcaso IV.a, no qual o sistema opera sem a utilização de filtragem harmônica no lado CA, e o subcaso IV.b, em que se analisa a influência da inclusão de filtros harmônicos conectados ao sistema de alimentação.

Os resultados obtidos a partir das simulações realizadas para essas duas condições são reunidos na Tabela 12, que sintetiza os valores das correntes de Norton e os respectivos índices máximos de distorção harmônica individual de tensão no PAC.

Tabela 12 – Resultados obtidos para as topologias 6D+3B e 6D+3B+F.

h	 I_h (pu)		DHIT Máx (%)	
	a	b	a	b
2	0,004	-	0,031	-
4	0,003	-	0,037	-
5	0,104	0,044	0,935	0,391
7	0,060	0,014	1,123	0,252
8	0,005	-	0,151	-
10	0,004	-	0,112	-
11	0,030	0,019	0,402	0,252
12	0,000	-	0,005	-
13	0,020	0,014	0,695	0,463
14	0,018	0,001	0,548	0,015
15	0,001	0,000	0,037	0,015
16	0,018	0,000	0,785	0,017
17	0,018	0,032	0,360	0,638
18	0,001	0,001	0,011	0,012
19	0,015	0,031	0,669	1,387
20	0,003	-	0,243	-
22	0,001	-	0,055	-
23	0,008	0,004	0,570	0,249
25	0,005	0,008	0,102	0,144
26	0,001	-	0,026	-
28	0,002	-	0,032	-
29	0,004	0,004	0,047	0,045
31	0,004	0,003	0,067	0,058
34	0,002	-	0,062	-
35	0,003	0,004	0,119	0,140
37	0,004	0,003	0,263	0,241
40	0,001	-	0,111	-
41	0,002	0,002	0,216	0,198
43	0,002	0,002	0,199	0,225
44	0,001	-	0,067	-
47	0,001	0,001	0,110	0,096
49	0,001	0,001	0,044	0,042

Fonte: Autoria própria.

No subcaso IV.a, o espectro de distorção harmônica de tensão mantém como principais contribuintes as harmônicas características associadas à ponte retificadora de 6 pulsos. As ordens 5ª e 7ª apresentam novamente os maiores valores de DHIT máximo, iguais a 0,935% e 1,123%, respectivamente, configurando-se como as componentes dominantes na composição

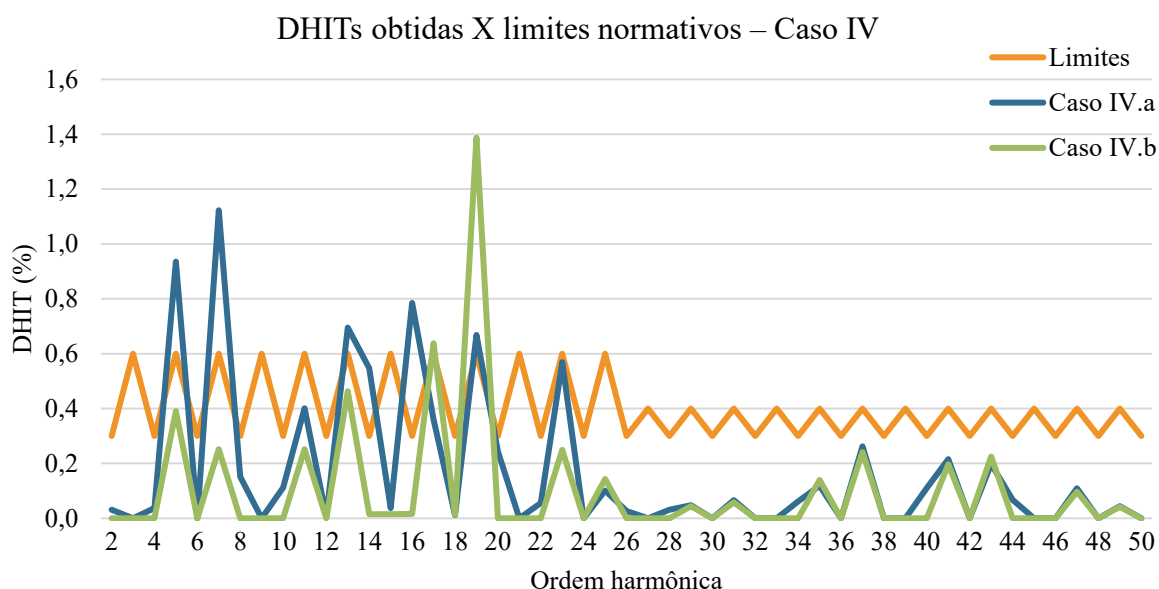
da DHTT no PAC. As harmônicas de 11ª e 13ª ordens também apresentam contribuições relevantes, com DHIT máximos de 0,402% e 0,695%, indicando que o conteúdo harmônico de ordens superiores permanece significativo.

Além disso, a presença de diversas componentes harmônicas distribuídas ao longo do espectro, inclusive em ordens não características do retificador. Esse comportamento está associado ao ripple de corrente introduzido pelo estágio DC-DC multinível no elo contínuo, o qual modula a corrente absorvida pela ponte retificadora e se reflete na presença de componentes harmônicas adicionais no lado CA.

No subcaso IV.b, com a introdução de filtros harmônicos sintonizados para as ordens dominantes de baixa frequência (5ª e 7ª), ocorre uma redução marcante dessas distorções, com DHIT máximo de 0,391% na 5ª ordem e 0,252% na 7ª. Como efeito da mitigação das ordens predominantes, as componentes de maior ordem ganham maior relevância relativa, especialmente a 17ª e a 19ª ordens, com DHIT de 0,638% e 1,387%, respectivamente.

Com o objetivo de visualizar o atendimento aos limites normativos de distorção harmônica individual de tensão, a Figura 53 apresenta a comparação entre os valores de DHIT obtidos para cada ordem harmônica e os respectivos limites estabelecidos pelos Procedimentos de Rede do ONS.

Figura 53 – Distorções harmônicas individuais obtidas para as topologias 6D+3B e 6D+3B+F.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise gráfica, observa-se que, no subcaso IV.a, ocorrem violações dos limites individuais principalmente nas ordens características da ponte de 6 pulsos, como 5^a, 7^a, 13^a e 19^a. Adicionalmente, nota-se a presença de violações em ordens não características, como a 14^a e a 16^a, evidenciando a influência do estágio buck de três níveis na introdução de componentes pares no espectro harmônico. De maneira geral, o comportamento observado é semelhante ao identificado para a topologia analisada no Caso III, embora com valores de distorção ligeiramente inferiores na maioria das ordens.

Para o subcaso IV.b, verifica-se que as ordens não características praticamente desaparecem, resultando em valores de DHIT próximos de zero. O espectro harmônico passa a apresentar de forma mais evidente o padrão teórico $6k \pm 1$, característico de pontes de 6 pulsos. As violações passam a ocorrer apenas nas ordens 17^a e 19^a, ambas características do conversor. Destaca-se ainda que as ordens 14^a e 16^a passam a apresentar valores de DHIT da ordem de 0,01%, não infringindo mais os limites normativos. Esse comportamento indica que a interação entre o filtro harmônico e o conversor buck de três estágios conduz o espectro harmônico a uma configuração próxima da condição ideal esperada.

A composição das distorções individuais resulta em valores de DHTT de 2,218% no subcaso IV.a e de 1,759% no subcaso IV.b, evidenciando que a filtragem harmônica permanece efetiva na redução das distorções totais de tensão no PAC. Ademais, a atuação do filtro contribui para a regularização do espectro harmônico, que passa a se aproximar do comportamento característico de um retificador de 6 pulsos, sem interferência do 2º estágio de conversão.

4.3.5. Resultados para o Caso V – Ponte retificadora de 12 pulsos a diodos com conversor buck de 3 estágios – 12D+3B e 12D+3B+F

No Caso V, investiga-se uma topologia de maior complexidade, composta por uma ponte retificadora não controlada de 12 pulsos, implementada com diodos, associada a um conversor DC-DC do tipo buck de três níveis. Assim como nos demais estudos de caso, são consideradas duas condições de operação: o subcaso V.a, correspondente à ausência de filtragem harmônica no lado CA, e o subcaso V.b, com a inserção de filtros harmônicos no lado AC do sistema de conversão. Os resultados consolidados das simulações harmônicas realizadas para ambas as condições são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados obtidos para as topologias 12D+3B e 12D+3B+F.

h	 I_h (pu)		DHIT Máx (%)	
	a	b	a	b
2	0,005	-	0,042	-
3	0,006	-	0,088	-
4	0,006	-	0,078	-
5	0,006	-	0,055	-
6	0,003	-	0,036	-
7	0,006	-	0,117	-
8	0,001	-	0,031	-
9	0,001	0,001	0,057	0,022
10	0,002	0,001	0,058	0,031
11	0,018	0,003	0,242	0,037
12	0,002	0,001	0,037	0,012
13	0,016	0,002	0,542	0,054
14	0,004	-	0,106	-
15	0,005	-	0,192	-
16	0,008	-	0,369	-
17	0,042	-	0,852	-
18	0,025	-	0,611	-
19	0,044	-	1,984	-
20	0,021	0,001	1,747	0,060
21	0,007	0,001	0,594	0,041
22	0,004	0,003	0,371	0,220
23	0,010	0,026	0,681	1,865
24	0,003	0,002	0,064	0,043
25	0,007	0,025	0,124	0,473
26	0,003	0,001	0,080	0,026
27	0,002	-	0,057	-
28	0,002	-	0,031	-
29	0,004	-	0,053	-
30	0,003	-	0,042	-
31	0,003	-	0,051	-
32	0,004	-	0,069	-
33	0,002	-	0,054	-
34	0,002	-	0,064	-
35	0,004	0,003	0,143	0,123
36	0,002	-	0,085	-
37	0,004	0,004	0,276	0,269
38	0,003	-	0,249	-
39	0,002	-	0,200	-
40	0,002	-	0,168	-

41	0,003	-	0,305	-
42	0,002	-	0,236	-
43	0,004	-	0,357	-
44	0,001	-	0,071	-
45	0,001	-	0,103	-
46	0,001	-	0,098	-
47	0,002	0,002	0,117	0,118
48	0,001	-	0,049	-
49	0,001	0,001	0,061	0,050
50	0,001	-	0,023	-

Fonte: Autoria própria.

No subcaso V.a, as componentes harmônicas de baixa ordem típicas de retificadores de 6 pulsos, como a 5ª e a 7ª ordens, apresentam valores de DHIT reduzidos, refletindo o efeito esperado da configuração de 12 pulsos, na qual o defasamento de 30° entre os secundários do transformador promove o cancelamento dessas harmônicas características.

Destacam-se, nesse cenário, as harmônicas de 19ª e 20ª ordens, que apresentam valores máximos de DHIT de 1,984% e 1,747%, respectivamente, configurando-se como as principais contribuições individuais para a distorção global de tensão no ponto de acoplamento comum. Também verifica-se valores elevados nas ordens 17ª, 18ª, 21ª e 23ª, indicando que, embora o retificador de 12 pulsos mitigue significativamente as harmônicas características de menor ordem, a interação com o estágio DC-DC multinível introduz conteúdo harmônico adicional em faixas de frequência mais elevadas.

A presença dessas componentes não características está associada ao ripple de corrente imposto pelo conversor buck multinível no elo contínuo. Esse ripple modula a corrente processada pela ponte retificadora, resultando em um espalhamento espectral das correntes absorvidas da rede e, conseqüentemente, na manifestação de harmônicas adicionais no lado CA.

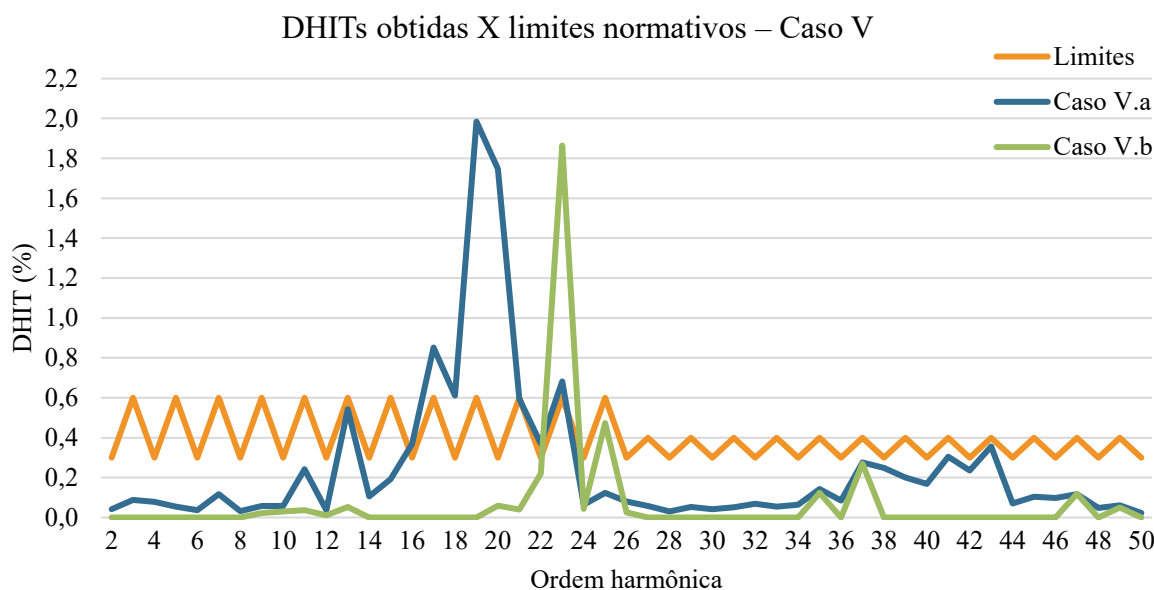
No subcaso V.b, com a inserção dos filtros harmônicos no lado CA, observa-se uma atenuação significativa das componentes harmônicas de ordens mais baixas que permaneciam presentes no espectro, como as ordens 11ª e 13ª, cujos valores de DHIT passam a 0,037% e 0,054%, respectivamente. Além disso, percebe-se redução expressiva das distorções em diversas ordens intermediárias, como as harmônicas de 20ª e 21ª ordens, cujos DHIT máximos passam para 0,06% e 0,041%.

Por outro lado, permanecem componentes de maior ordem associadas ao retificador de 12 pulsos, com destaque para a 23ª ordem, que apresenta DHIT máxima de 1,865%, e a 25ª ordem, com 0,473%. Esse comportamento indica que, após a mitigação das componentes de

menor frequência pelo sistema de filtragem, as distorções residuais passam a concentrar-se em ordens mais elevadas.

Com a finalidade de avaliar o enquadramento das distorções harmônicas individuais de tensão aos critérios regulatórios vigentes, a Figura 54 apresenta o confronto entre os valores de DHIT calculados para cada ordem harmônica e os limites correspondentes.

Figura 54 – Distorções harmônicas individuais obtidas para as topologias 12D+3B e 12D+3B+F.



Fonte: Autoria própria.

No subcaso V.a, a violação dos limites normativos em sete ordens praticamente consecutivas, correspondentes às harmônicas de 16ª, 17ª, 18ª, 19ª, 20ª, 22ª e 23ª ordem, a 21ª não viola mas corresponde a uma DHIT de 0,594%, extremamente próxima do limite de 0,6%. Esse resultado mostra-se particularmente relevante, pois, para uma topologia de 12 pulsos, espera-se que as principais violações ocorram predominantemente nas ordens características 11ª e 13ª. Entretanto, tal comportamento não é observado neste subcaso, indicando a presença de fenômenos adicionais que alteram a distribuição espectral esperada.

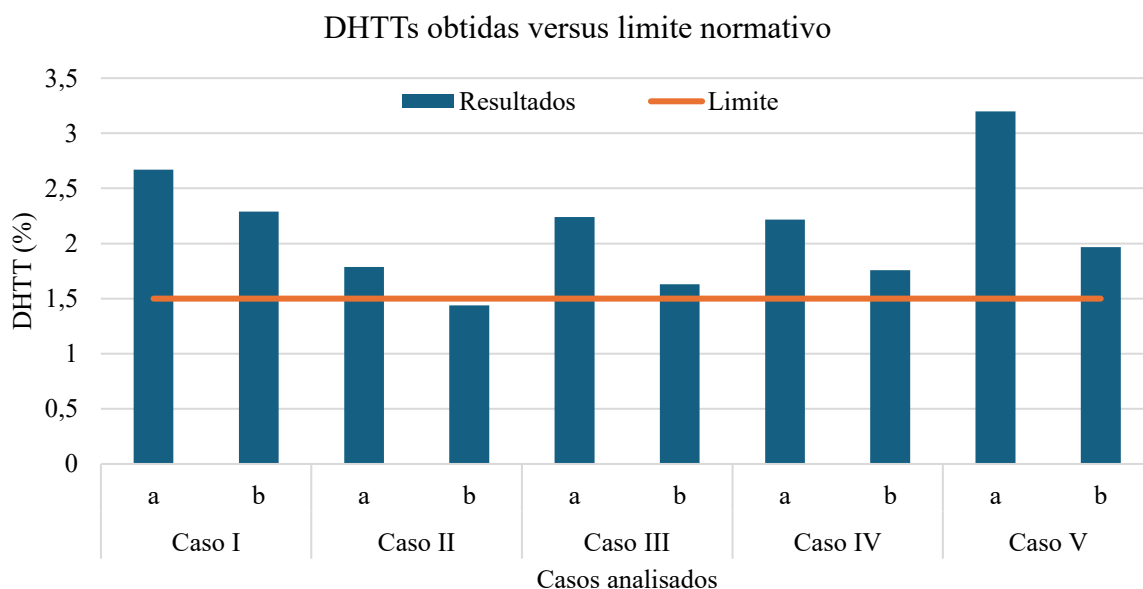
No subcaso V.b, a inclusão dos filtros harmônicos sintonizados nas ordens 11ª e 13ª reduz significativamente o número de ordens em violação, passando de sete para apenas uma, correspondente à 23ª ordem. Contudo, nota-se que o valor de DHIT associado a essa componente sofre um aumento expressivo, passando de 0,681% no subcaso V.a para 1,865% no subcaso V.b. Esse comportamento evidencia que, embora a filtragem seja eficaz na mitigação das ordens de sintonia, ocorre uma amplificação localizada em ordens superiores.

A elevação acentuada da distorção na 23ª ordem, associada à supressão das demais componentes, sugere a ocorrência de um fenômeno de interação entre o filtro harmônico e a impedância equivalente da rede, levantando indícios de ressonância no sistema. E, com base nos valores de DHIT máximo por ordem harmônica, determina-se a distorção harmônica total de tensão, resultando em DHTT de 3,198% para o subcaso V.a e de 1,966% para o subcaso V.b.

Após a análise detalhada das distorções harmônicas individuais de tensão em cada topologia e subcaso, faz-se necessário avaliar o impacto combinado dessas componentes sobre a qualidade total da tensão no PAC. Além do atendimento aos limites individuais de distorção harmônica por ordem, estabelecidos pelo Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede do ONS, a conformidade normativa também requer que os níveis de distorção harmônica total de tensão permaneçam abaixo do limite global especificado.

Com esse objetivo, a Figura 55 apresenta um gráfico de barras contendo os valores de DHTT obtidos para todos os subcasos analisados, sendo cada barra associada a uma condição operacional específica. Adicionalmente, é indicada no gráfico uma linha de referência correspondente ao limite normativo de 1,5%, permitindo uma visualização do atendimento ou não conformidade de cada arranjo quanto ao critério global de distorção harmônica de tensão.

Figura 55 – Distorções harmônicas totais obtidas para todos os casos.



Fonte: Autoria própria.

Todos os casos analisados violam o limite normativo de DHTT, exceto o subcaso II.b, correspondente à topologia de 12 pulsos a tiristores com filtragem harmônica. Averigua-se,

ainda, que em todas as configurações avaliadas a introdução dos filtros harmônicos resulta na redução dos níveis de distorção total de tensão, evidenciando a efetividade da estratégia de filtragem adotada.

No que se refere aos Casos I e II, compostos por topologias com único estágio de conversão CA-CC, verifica-se a presença do cancelamento natural das harmônicas de 5^a e 7^a ordens na topologia de 12 pulsos, refletido na redução da DHTT de 2,671% no subcaso I.a para 1,788% no subcaso II.a, mesmo na condição sem filtragem. Esse resultado evidencia a vantagem inerente da topologia multipulso na redução das componentes harmônicas de baixa ordem.

Ao comparar os Casos III e IV, fica claro que ambos apresentam níveis de DHTT muito próximos na condição sem filtragem, indicando que a segmentação do estágio CC-CC não altera significativamente a distorção total quando não há mitigação harmônica. Entretanto, na condição com filtragem, embora o Caso IV apresente menor número de ordens em violação nas distorções individuais, o valor de DHTT obtido no subcaso IV.b mostra-se superior ao do subcaso III.b. Esse resultado evidencia que a DHTT não depende apenas da quantidade de ordens em violação, mas também da distribuição espectral e da magnitude relativa das componentes remanescentes.

Por fim, ao comparar os Casos IV e V, que apresentam estruturas semelhantes baseadas em retificação a diodos associada a um estágio CC-CC em três níveis, pode-se notar que tanto na condição sem filtragem quanto com filtragem os níveis de DHTT permanecem superiores aos verificados na topologia de 12 pulsos com único estágio de conversão. Entretanto, os resultados obtidos indicam que a inserção do estágio CC-CC em três níveis modifica a condição ideal de cancelamento harmônico esperada, introduzindo interações adicionais no espectro de frequências. Adicionalmente, a amplificação localizada de determinadas ordens pode estar associada à ocorrência de fenômenos ressonantes entre o sistema de filtragem e a impedância equivalente da rede, hipótese que surge como explicação plausível para os níveis elevados de distorção total verificados no Caso V.

Portanto, pode-se concluir que a pior situação, em termos de DHTT, foi obtida a partir do Caso V sem filtro (Caso V.a), enquanto o melhor resultado foi encontrado no Caso II com filtragem interna (Caso II.b).

Atualmente, caso o estudo de desempenho harmônico indique a necessidade de filtros harmônicos, o ONS recomenda que o empreendimento preveja, ainda na fase de planejamento, a reserva de recursos financeiros destinados a essa finalidade. Dessa forma, caso a campanha

de medições posterior à conexão confirme a necessidade dos filtros indicados no estudo de acesso, o capital requerido para sua implementação já estará previamente alocado.

Por fim, a Tabela 14 apresenta uma síntese das exigências estabelecidas pelo ONS, à luz da Nota Técnica 009/2016, aplicáveis ao empreendimento hipotético avaliado, considerando as dez topologias de conversão analisadas no presente trabalho dissertativo..

Tabela 14 – Síntese das exigências de mitigação harmônica previstas pela NT 009/2016 para o empreendimento avaliado, considerando as topologias analisadas.

Caso	Possibilidade de Exigência de Filtragem após a Campanha de Medição de Correntes
I.a – 6TR	Mitigação para as ordens 5 ^a , 7 ^a , 13 ^a , 19 ^a , 23 ^a , 37 ^a , 41 ^a e 43 ^a
I.b – 6TR+F	Mitigação para as ordens 13 ^a , 19 ^a , 23 ^a , 37 ^a , 41 ^a e 43 ^a
II.a – 12TR	Mitigação para as ordens 13 ^a , 23 ^a e 37 ^a
II.b – 12TR+F	Mitigação para as ordens 23 ^a e 37 ^a
III.a – 6D+B	Mitigação para as ordens 5 ^a , 7 ^a , 13 ^a , 14 ^a e 16 ^a
III.b – 6D+B +F	Mitigação para as ordens 14 ^a , 16 ^a , 19 ^a e 20 ^a
IV.a – 6D+3B	Mitigação para as ordens 5 ^a , 7 ^a , 13 ^a , 14 ^a , 16 ^a e 19 ^a
IV.b – 6D+3B +F	Mitigação para a 19 ^a ordem
V.a – 12D+3B	Mitigação para as ordens 16 ^a , 17 ^a , 18 ^a , 19 ^a , 20 ^a , 22 ^a e 23 ^a
V.b – 12D+3B +F	Mitigação para a 23 ^a ordem

Fonte: Autoria própria.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho foi desenvolvido com o propósito de analisar estratégias de conversão de energia aplicadas a plantas de eletrólise voltadas à produção de hidrogênio verde, com ênfase nos impactos dessas estruturas sobre a qualidade da energia elétrica quando conectadas ao sistema elétrico brasileiro. Embora cada etapa do estudo tenha sido apresentada detalhadamente nos capítulos anteriores, esta seção reúne uma síntese dos procedimentos realizados e conclusões a partir dos resultados obtidos.

No Capítulo 1, foi apresentada a contextualização que fundamenta a relevância do tema. Inicialmente, discutiu-se o panorama global das emissões de gases de efeito estufa e os compromissos climáticos internacionais, estabelecendo o papel estratégico do hidrogênio verde no processo de descarbonização. Em seguida, discutiu-se o contexto internacional recente do setor energético, destacando o aumento do interesse estratégico pelo hidrogênio de baixo carbono no cenário decorrente do conflito entre Rússia e Ucrânia. Nesse contexto, evidenciou-se o potencial brasileiro para a produção de hidrogênio verde, decorrente da predominância de fontes renováveis na matriz elétrica nacional. Na sequência, foram apresentados os principais programas e políticas nacionais associados ao hidrogênio de baixo carbono, bem como iniciativas de plantas-piloto em curso no país. Por fim, ponderam-se os desafios técnicos relacionados à inserção de plantas de eletrólise no sistema elétrico, em especial sob a ótica da qualidade da energia, estabelecendo-se os objetivos centrais da pesquisa.

O Capítulo 2 apresentou o estado da arte, iniciando-se com a caracterização do hidrogênio como vetor energético e das diferentes rotas de produção existentes, com destaque para o hidrogênio obtido por eletrólise da água. Foram descritas as principais tecnologias de eletrólise e os respectivos conversores de potência associados, contemplando retificadores controlados e não controlados, conversores CC-CC e conversores ativos. Posteriormente, foram apresentadas as diretrizes normativas aplicáveis aos estudos de acesso ao SIN, com ênfase nos critérios associados à qualidade da energia elétrica. Embora ainda não existam regulamentações específicas voltadas a plantas de eletrólise, essa análise possibilitou a definição da base regulatória adotada na condução dos estudos desenvolvidos neste trabalho.

No Capítulo 3, foi desenvolvida a modelagem computacional das topologias de conversão selecionadas. Inicialmente, definiram-se as premissas de simulação e os parâmetros normativos adotados. A partir disso, foram modeladas, no ambiente MATLAB/Simulink®, cinco topologias representativas de eletrolisadores, cada uma avaliada em duas condições operativas: sem filtragem harmônica e com filtragem harmônica. As simulações permitiram

obter as correntes certificadas injetadas no ponto de conexão. Os resultados alcançados demonstraram a viabilidade da modelagem computacional proposta, fornecendo dados consistentes para os estudos seguintes.

O Capítulo 4 tratou do estudo de acesso de uma planta hipotética de produção de hidrogênio verde ao SIN, com o objetivo de avaliar o desempenho harmônico das topologias previamente estabelecidas. Para isso, foi definido um ponto de conexão em um sistema real em operação no SIN. A partir dessa definição, implementou-se no software HarmZs o equivalente externo da rede básica e o equivalente interno da planta de eletrólise, empregando-se como fontes emissoras as correntes certificadas obtidas no Capítulo 3. Foram então conduzidas dez simulações harmônicas, correspondentes aos cinco casos analisados, cada um em condição sem e com filtragem. Subsequentemente, apresentaram-se os resultados de distorções harmônicas individuais e totais de tensão, acompanhados de análises críticas sobre o desempenho bem como à respeito da conformidade aos limites normativos vigentes.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que plantas de eletrólise conectadas ao SIN apresentam potencial significativo de impacto sobre a qualidade da energia, especialmente no que se refere às distorções harmônicas. O estudo mostrou que, para praticamente todas as topologias analisadas, inclusive aquelas equipadas com sistemas de filtragem harmônica equivalentes aos empregados em conversores comerciais, foram observadas violações dos limites normativos atualmente estabelecidos. Destaca-se que a única condição que atendeu plenamente aos critérios de distorção total de tensão foi a topologia de 12 pulsos a tiristores com filtragem harmônica; entretanto, mesmo nesse caso, ainda foi observada pequena violação pontual dos limites de distorção harmônica individual.

Cabe ressaltar que o estudo foi conduzido considerando uma planta de porte relativamente modesto quando comparada a empreendimentos atualmente em planejamento, que preveem capacidade instalada na ordem de gigawatts de potência. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que, em cenários futuros de maior penetração dessas plantas, a necessidade de soluções adicionais de mitigação harmônica tende a se tornar ainda mais relevante.

Além disso, as normas atualmente vigentes tratam majoritariamente de fontes geradoras conectadas ao sistema, prevendo procedimentos de agregação de emissões harmônicas entre múltiplas unidades de geração. No entanto, sob a perspectiva do PAC, a planta de eletrólise comporta-se predominantemente como uma carga, convertendo energia elétrica em energia química. Nesse contexto, os mecanismos de agregação harmônica atualmente previstos podem

não representar adequadamente o comportamento real dessas instalações, indicando a necessidade de investigação se esse comportamento se aplica a eletrolisadores.

Outra limitação identificada neste estudo refere-se à indisponibilidade de informações detalhadas sobre os filtros harmônicos integrados a conversores comerciais. A ausência desses dados impôs a necessidade de empregar modelos de filtragem representativos, o que pode diferir das soluções industriais efetivamente utilizadas.

Diante dos resultados alcançados e das limitações identificadas, recomenda-se como continuidade deste trabalho o aprofundamento da modelagem dos filtros harmônicos associado a conversores de potência comerciais, bem como desenvolvimento de estudos experimentais ou em escala piloto para validação dos modelos propostos. Recomenda-se, ainda, a investigação específica dos critérios de agregação aplicáveis a plantas de eletrólise, com vistas a fornecer subsídios técnicos para futuras discussões sobre a adequação da NT 009/2016 a esse novo contexto tecnológico.

De forma geral, o desempenho da pesquisa permitiu alcançar os objetivos propostos, fornecendo contribuição original ao tema da integração de plantas de hidrogênio verde ao sistema elétrico brasileiro, especialmente no que se refere à avaliação de impactos harmônicos. Os resultados obtidos evidenciam que, embora o hidrogênio verde represente um vetor energético promissor para a transição energética, sua integração em larga escala ao SIN exigirá avanços tecnológicos e regulatórios adicionais para assegurar a operação segura e a manutenção dos padrões de qualidade da energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] A. del Pino, “Os países que mais emitiram gases de efeito estufa”, WRI Brasil. Acessado: 12 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/os-paises-que-mais-emitiram-gases-de-efeito-estufa>
- [2] Ministério do Meio Ambiente, “Protocolo de Quioto”. Acessado: 12 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>
- [3] Senado Federal, “Protocolo de Kyoto”. Acessado: 12 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto>
- [4] Ministério do Meio Ambiente, “Acordo de Paris”. Acessado: 12 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>
- [5] D. Waskow *et al.*, “Balanço da COP29: a nova meta global de financiamento climático e outros resultados”, WRI Brasil. Acessado: 12 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/balanco-resultados-cop29-meta-financiamento-climatico>
- [6] UNFCCC, “Conference of the Parties (COP)”. Acessado: 12 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>
- [7] S. Ahmed, “The Geopolitics of Energy: How oil and Gas Shape Diplomacy”, Modern Diplomacy. Acessado: 8 de janeiro de 2026. [Online]. Disponível em: <https://moderndiplomacy.eu/2025/02/17/the-geopolitics-of-energy-how-oil-and-gas-shape-diplomacy/>
- [8] S. Muhammad, C. Hoffmann, e F. Müsgens, “Assessing energy security risks: Implications for household electricity prices in the EU”, *Energy*, vol. 327, p. 136201, jul. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136201>.
- [9] IEA, “Russia’s War on Ukraine”. Acessado: 13 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/russias-war-on-ukraine>

- [10] V. sakthimurugan, G. Lakshmikanth, N. Balaji, R. Roopashree, D. Kumar, e Y. Devarajan, “Green hydrogen revolution: Advancing electrolysis, market integration, and sustainable energy transitions towards a net-zero future”, *Results in Engineering*, vol. 26, p. 104849, jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104849>.
- [11] A. Franco, “Green Hydrogen and the Energy Transition: Hopes, Challenges, and Realistic Opportunities”, *Hydrogen*, vol. 6, nº 2, p. 28, abr. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/hydrogen6020028>.
- [12] K. Schelling, “Green Hydrogen to Undercut Gray Sibling by End of Decade”, BloombergNEF. Acessado: 18 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/green-hydrogen-to-undercut-gray-sibling-by-end-of-decade/>
- [13] A. Montenegro, “Hidrogênio verde e sustentabilidade: uma visão integrada para o desenvolvimento global de energias renováveis”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção/CE, 2025. Acessado: 18 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/handle/123456789/7300>
- [14] N. Machado, “Hidrogênio limpo deve movimentar US\$ 28 bi no Brasil até 2030, mas precisa de política pública”, Eixos. Acessado: 18 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/hidrogenio-limpo-deve-movimentar-us-28-bi-no-brasil-ate-2030-mas-precisa-de-politica-publica/>
- [15] EPE, “Matriz Energética e Elétrica”. Acessado: 18 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>
- [16] EPE, “Balanço Energético Nacional 2025: Ano base 2024”, Rio de Janeiro/RJ, 2025. Acessado: 18 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>
- [17] WEF, “Accelerating the Clean Hydrogen Economy in Latin America”, ago. 2024. Acessado: 18 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.weforum.org/publications/accelerating-the-clean-hydrogen-economy-in-latin-america/>

- [18] C. E. Driemeier *et al.*, “Electrolytic hydrogen in a large-scale decarbonized grid with energy reservoirs: An assessment of carbon intensity and integrity”, *Applied Energy*, vol. 391, ago. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125938>.
- [19] M. Carvalho, “Regulação do hidrogênio verde no Brasil: perspectivas e marcos legais”, IDP. Acessado: 19 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://pos.idp.edu.br/idp-learning/blog/direito-e-regulacao-do-setor-eletrico/regulacao-do-hidrogenio-verde-no-brasil/>
- [20] Ministério de Minas e Energia, “Programa Nacional de Hidrogênio - PNH2”. Acessado: 19 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>
- [21] Ministério de Minas e Energia, “Plano de Trabalho Trienal 2023-2025 – Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)”, ago. 2023. Acessado: 19 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/planodetrabalhotrienalpnh2.pdf>
- [22] *Lei nº 14.948*. Brasil, 2024. Acessado: 19 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.948-de-2-de-agosto-de-2024-576003914>
- [23] Ministério de Minas e Energia, “H2Brasil - Expansão do Hidrogênio Verde”. Acessado: 19 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/h2-brasil>
- [24] G. Chiappini, “Hidrogênio verde: conheça 16 projetos promissores em desenvolvimento no Brasil”, Eixos. Acessado: 19 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/hidrogenio-verde-conheca-16-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil/>
- [25] G. Vitale, “Power Converters for Green Hydrogen: State of the Art and Perspectives”, *Electronics (Basel)*, vol. 13, nº 22, p. 4565, nov. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics13224565>.
- [26] IEA, “The Future of Hydrogen”. Acessado: 1º de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [27] M. M. Hossain Bhuiyan e Z. Siddique, “Hydrogen as an alternative fuel: A comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and

- transportation”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 102, p. 1026–1044, jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.033>.
- [28] D. Santana *et al.*, *Rotas de produção de hidrogênio e os principais tipos de eletrolisadores*, vol. 2. Brasília/DF: LaSUS FAU UnB, 2023. Acessado: 8 de janeiro de 2026. [Online]. Disponível em: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2024/06/Livro-02-Col-1_final_JTF.pdf
- [29] SENAI e GIZ, “Mercado de Hidrogênio Verde e Power to X: Demanda por capacitações profissionais”, Brasília, fev. 2023. Acessado: 1º de setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2023/3/mercado-de-hidrogenio-verde-e-power-x-demanda-por-capacitacoes-profissionais/>
- [30] T. Hu *et al.*, “A mini review for hydrogen production routes toward carbon neutrality”, *Propulsion and Energy*, vol. 1, nº 1, p. 1, jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s44270-024-00004-4>.
- [31] X. Duan *et al.*, “Performance analysis and comparison of the spark ignition engine fuelled with industrial by-product hydrogen and gasoline”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 424, p. 138899, out. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138899>.
- [32] X. Xu, Q. Zhou, e D. Yu, “The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, nº 79, p. 33677–33698, set. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.261>.
- [33] J. Cha *et al.*, “An efficient process for sustainable and scalable hydrogen production from green ammonia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 152, p. 111562, dez. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111562>.
- [34] S. Chatterjee, R. K. Parsapur, e K.-W. Huang, “Limitations of Ammonia as a Hydrogen Energy Carrier for the Transportation Sector”, *ACS Energy Letters*, vol. 6, nº 12, p. 4390–4394, dez. 2021, doi: <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c02189>.
- [35] I. Esteves, “Desvendando Desafios: Os 5 Principais Riscos Relacionados à Amônia”, Noveltec. Acessado: 19 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.noveltec.com.br/post/desvendando-desafios-riscos-relacionados-amnia>

- [36] IRENA, “Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5⁰C Climate Goal”, Abu Dhabi, dez. 2020. Acessado: 20 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>
- [37] M. C. Machado, “Projetos de hidrogênio da Fortescue e Solatio recebem aval para acesso à rede”, MegaWhat. Acessado: 19 de outubro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://megawhat.energy/destaques-do-diario/projetos-de-hidrogenio-da-fortescue-e-solatio-recebem-aval-para-aceso-a-rede/>
- [38] B. Yodwong, D. Guilbert, M. Phattanasak, W. Kaewmanee, M. Hinaje, e G. Vitale, “AC-DC Converters for Electrolyzer Applications: State of the Art and Future Challenges”, *Electronics (Basel)*., vol. 9, n° 6, p. 912, maio 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics9060912>.
- [39] M. Hossain, *Power Converters for Hydrogen Electrolysis in the frame of Renewable Energy Sources Integration*. 2025. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24664.40965>.
- [40] L. Sánchez, D. Reigosa, A. Bilbao, I. Peña-Gonzalez, e F. Briz, “Comparative Analysis of Power Converter Topologies for Hydrogen Electrolyzers”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 12, n° 5, p. 4325–4341, out. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2024.3417258>.
- [41] S. Tripathi, “A comparative assessment of AC/DC converter configurations for grid integration of a proton exchange membrane electrolyzer.”, Tesi di laurea magistrale in Electrical Engineering Ingegneria Elettrica, Politecnico di Milano, Milão, 2023. Acessado: 20 de outubro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/214143>
- [42] A. Hassan, O. Abdel-Rahim, M. Bajaj, e I. Zaitsev, “Power electronics for green hydrogen generation with focus on methods, topologies, and comparative analysis”, *Scientific Reports*, vol. 14, n° 1, p. 24767, out. 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76191-6>.
- [43] M. Chen, S.-F. Chou, F. Blaabjerg, e P. Davari, “Overview of Power Electronic Converter Topologies Enabling Large-Scale Hydrogen Production via Water Electrolysis”, *Applied Sciences*, vol. 12, n° 4, p. 1906, fev. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app12041906>.

- [44] Y. Cury, “Análise de impactos do processo de produção de hidrogênio com baixa emissão de carbono na qualidade da energia elétrica”, Universidade Federal de Uberlândia, 2025. doi: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.228>.
- [45] H. G. Murtza Qamar, X. Guo, E. Seif Ghith, M. Tlija, e A. Siddique, “Assessment of energy management and power quality improvement of hydrogen based microgrid system through novel PSO-MWWO technique”, *Scientific Reports*, vol. 15, nº 1, p. 863, jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78153-4>.
- [46] L. P. Van, K. Do Chi, e T. N. Duc, “Review of hydrogen technologies based microgrid: Energy management systems, challenges and future recommendations”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, nº 38, p. 14127–14148, maio 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.345>.
- [47] ONS, “NT 009/2016 - Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos acessos à Rede Básica ou aos barramentos de fronteira com a Rede Básica para parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras.”, Brasil, NT 009/2016-REV. 03, abr. 2019.
- [48] ONS, “Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes”, Brasil, Procedimentos de Rede, jul. 2008.
- [49] “Aqualyzer™: Large-scale alkaline water electrolyzer system”, Asahi Kasei. Acessado: 11 de dezembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://ak-green-solution.com/assets/pdf/brochure_en.pdf
- [50] Complexo Industrial e Portuário do Pecém, “Hub de Hidrogênio Verde do Complexo do Pecém”. Acessado: 6 de janeiro de 2026. [Online]. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/hubh2v/>
- [51] Ministério de Portos e Aeroportos, “Complexo do Pecém (CE) abriga os primeiros projetos de hidrogênio verde do Brasil”. Acessado: 6 de janeiro de 2026. [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/noticias/2025/09/complexo-do-pecem-ce-abriga-os-primeiros-projetos-de-hidrogenio-verde-do-brasil>
- [52] Complexo Industrial e Portuário do Pecém, “Primeira molécula de Hidrogênio Verde produzida no Brasil é lançada no Ceará”. Acessado: 6 de janeiro de 2026. [Online].

Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-produzida-no-brasil-e-lancada-no-ceara/>

- [53] ONS, “Diagrama de Rede de Operação e Áreas Elétricas do ONS”, dez. 2025. Acessado: 16 de dezembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://sintegre.ons.org.br/sites/4/50/paginas/servicos/produtos-pasta.aspx?RootFolder=%2Fsites%2F4%2F50%2FProdutos%2F515%2F08%2D12%2D2025%5F111000%2FDiagrama%20COSR%20Nordeste&FolderCTID=0x01200094A8230C82B6DD4C9F6AFAC77254832400E07A89E8FF7C7A4A99963FFBE491585B&View=%7BAC4BDAF7%2D71C0%2D4EC7%2DAED3%2DBCCF6E34765A%7D>
- [54] CEPEL, “HarmZs – Estudos de Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas”. Acessado: 8 de fevereiro de 2026. [Online]. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/harmzs-2/>
- [55] “IEC 610003-6: Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems”, Switzerland, 2008.

APÊNDICE A

Este apêndice reúne os resultados completos das correntes harmônicas para todas as variações de potência e topologias analisadas.

Tabela 15 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso I.a.

P (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)
2	0,004	0,008	0,009	0,002	0,009	0,005	0,017	0,012	0,008	0,005
3	0,002	0,002	0,003	0,004	0,004	0,005	0,011	0,012	0,002	0,006
4	0,005	0,006	0,007	0,005	0,007	0,007	0,014	0,015	0,009	0,005
5	38,403	43,347	44,151	44,445	44,529	44,423	44,115	43,587	42,715	40,307
6	0,017	0,022	0,022	0,022	0,019	0,021	0,001	0,002	0,016	0,002
7	24,792	23,582	22,562	21,757	21,062	20,445	19,881	19,282	18,450	15,375
8	0,004	0,005	0,004	0,006	0,006	0,005	0,014	0,013	0,006	0,004
9	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,011	0,010	0,003	0,004
10	0,005	0,004	0,005	0,007	0,007	0,008	0,015	0,014	0,007	0,002
11	13,225	17,673	18,613	18,921	18,948	18,699	18,128	17,143	15,435	11,043
12	0,019	0,021	0,022	0,021	0,021	0,019	0,003	0,003	0,013	0,002
13	12,573	13,689	12,532	11,442	10,470	9,613	8,887	8,248	7,553	4,631
14	0,004	0,005	0,005	0,004	0,004	0,005	0,012	0,011	0,004	0,003
15	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004	0,009	0,008	0,001	0,001
16	0,004	0,004	0,006	0,007	0,007	0,008	0,013	0,011	0,004	0,001
17	7,446	9,124	10,053	10,416	10,505	10,307	9,752	8,704	6,778	3,303
18	0,016	0,018	0,019	0,018	0,016	0,014	0,004	0,003	0,010	0,001
19	5,944	7,690	6,713	5,696	4,830	4,196	3,913	3,999	4,223	2,040
20	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,004	0,008	0,008	0,003	0,002
21	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,003	0,007	0,006	0,001	0,000
22	0,004	0,004	0,004	0,006	0,006	0,007	0,010	0,008	0,002	0,002
23	4,612	4,780	5,555	5,912	6,035	5,904	5,444	4,514	2,780	1,861
24	0,012	0,013	0,014	0,012	0,011	0,010	0,003	0,003	0,007	0,001
25	3,395	4,368	3,648	2,841	2,251	2,063	2,344	2,840	3,057	0,649
26	0,003	0,003	0,002	0,002	0,003	0,003	0,006	0,006	0,003	0,000
27	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,003	0,005	0,004	0,001	0,001
28	0,003	0,002	0,004	0,005	0,006	0,006	0,008	0,006	0,000	0,001
29	2,748	2,760	3,384	3,703	3,819	3,700	3,279	2,429	0,925	1,248
30	0,009	0,010	0,010	0,009	0,009	0,008	0,003	0,002	0,005	0,001
31	2,357	2,695	2,164	1,543	1,232	1,421	1,884	2,271	2,097	0,759
32	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,006	0,005	0,003	0,001
33	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,003	0,005	0,003	0,002	0,001
34	0,002	0,002	0,003	0,004	0,005	0,005	0,006	0,004	0,001	0,000
35	1,607	1,765	2,270	2,548	2,637	2,501	2,081	1,275	0,160	0,609
36	0,007	0,008	0,008	0,008	0,007	0,006	0,003	0,002	0,002	0,000
37	1,618	1,792	1,393	0,918	0,854	1,207	1,608	1,777	1,267	0,682
38	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,005	0,004	0,003	0,001
39	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,003	0,004	0,003	0,002	0,000
40	0,002	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,003	0,002	0,001
41	1,082	1,226	1,638	1,877	1,933	1,771	1,340	0,575	0,505	0,409
42	0,006	0,006	0,007	0,006	0,005	0,005	0,002	0,002	0,001	0,000
43	1,046	1,262	0,955	0,601	0,714	1,079	1,362	1,332	0,610	0,351
44	0,001	0,002	0,000	0,001	0,003	0,003	0,005	0,003	0,002	0,000
45	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,000
46	0,001	0,002	0,002	0,004	0,004	0,004	0,004	0,002	0,002	0,001
47	0,898	0,910	1,246	1,451	1,475	1,285	0,845	0,137	0,673	0,433
48	0,005	0,006	0,006	0,005	0,005	0,004	0,002	0,002	0,001	0,000
49	0,723	0,926	0,686	0,436	0,648	0,967	1,131	0,942	0,133	0,270
50	0,001	0,002	0,001	0,001	0,003	0,004	0,004	0,003	0,001	0,000

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso I.b.

P (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)
2	0,009	0,016	0,001	0,017	0,016	0,008	0,008	0,008	0,008	0,002
3	0,013	0,008	0,007	0,009	0,017	0,013	0,005	0,005	0,004	0,001
4	0,014	0,015	0,005	0,016	0,011	0,009	0,008	0,008	0,007	0,004
5	15,233	15,871	15,969	16,041	16,120	16,230	16,386	16,386	16,478	16,422
6	0,011	0,011	0,024	0,003	0,009	0,017	0,014	0,014	0,015	0,014
7	5,850	5,881	5,954	5,974	5,973	5,962	5,750	5,750	5,517	4,749
8	0,008	0,013	0,001	0,014	0,015	0,005	0,005	0,005	0,004	0,002
9	0,009	0,010	0,002	0,010	0,013	0,008	0,005	0,005	0,005	0,001
10	0,012	0,012	0,005	0,013	0,012	0,011	0,007	0,007	0,006	0,000
11	16,364	18,348	18,676	18,716	18,546	18,153	16,544	16,544	15,006	11,155
12	0,010	0,010	0,022	0,007	0,003	0,016	0,016	0,016	0,014	0,005
13	13,799	13,522	12,902	12,309	11,691	11,064	9,622	9,622	8,622	5,826
14	0,014	0,014	0,005	0,015	0,019	0,010	0,006	0,006	0,005	0,002
15	0,010	0,011	0,001	0,012	0,019	0,008	0,005	0,005	0,003	0,001
16	0,013	0,015	0,007	0,016	0,014	0,012	0,008	0,008	0,006	0,001
17	9,169	10,925	11,341	11,481	11,419	11,129	9,657	9,657	8,061	3,946
18	0,010	0,010	0,020	0,008	0,001	0,013	0,013	0,013	0,012	0,004
19	8,179	8,178	7,372	6,641	5,947	5,331	4,423	4,423	4,178	2,980
20	0,012	0,013	0,003	0,012	0,015	0,008	0,005	0,005	0,003	0,002
21	0,008	0,010	0,001	0,009	0,014	0,006	0,004	0,004	0,002	0,002
22	0,011	0,012	0,006	0,012	0,009	0,010	0,007	0,007	0,003	0,002
23	4,997	6,062	6,468	6,659	6,683	6,518	5,390	5,390	4,038	1,134
24	0,007	0,008	0,015	0,006	0,001	0,010	0,009	0,009	0,009	0,002
25	4,436	4,635	3,927	3,315	2,803	2,471	2,592	2,592	2,891	1,687
26	0,008	0,009	0,002	0,009	0,012	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003
27	0,006	0,007	0,001	0,007	0,010	0,004	0,004	0,004	0,001	0,002
28	0,008	0,008	0,005	0,009	0,005	0,007	0,006	0,006	0,002	0,002
29	3,034	3,581	3,943	4,136	4,186	4,078	3,151	3,151	2,002	0,979
30	0,005	0,006	0,011	0,005	0,001	0,009	0,006	0,006	0,007	0,001
31	2,582	2,822	2,242	1,774	1,474	1,450	2,052	2,052	2,253	0,555
32	0,006	0,007	0,001	0,006	0,010	0,003	0,005	0,005	0,003	0,001
33	0,005	0,006	0,001	0,005	0,008	0,003	0,004	0,004	0,001	0,001
34	0,006	0,007	0,004	0,007	0,004	0,005	0,005	0,005	0,001	0,001
35	2,062	2,328	2,645	2,819	2,867	2,768	1,921	1,921	0,904	0,944
36	0,004	0,005	0,009	0,004	0,001	0,008	0,005	0,005	0,005	0,002
37	1,680	1,869	1,390	1,046	0,942	1,120	1,719	1,719	1,690	0,243
38	0,005	0,006	0,001	0,005	0,008	0,002	0,004	0,004	0,003	0,000
39	0,004	0,004	0,001	0,004	0,006	0,002	0,003	0,003	0,001	0,000
40	0,005	0,005	0,004	0,006	0,004	0,004	0,004	0,004	0,001	0,000
41	1,494	1,632	1,912	2,064	2,094	1,988	1,168	1,168	0,260	0,665
42	0,004	0,003	0,007	0,003	0,000	0,007	0,004	0,004	0,003	0,002
43	1,217	1,322	0,920	0,683	0,734	0,985	1,419	1,419	1,189	0,501
44	0,004	0,005	0,001	0,004	0,007	0,001	0,004	0,004	0,003	0,000
45	0,003	0,004	0,001	0,004	0,004	0,001	0,003	0,003	0,002	0,000
46	0,004	0,005	0,003	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001	0,000
47	1,113	1,211	1,459	1,588	1,598	1,477	0,672	0,672	0,128	0,316
48	0,003	0,003	0,006	0,003	0,000	0,007	0,003	0,003	0,002	0,001
49	0,953	0,983	0,641	0,498	0,645	0,894	1,142	1,142	0,763	0,475
50	0,004	0,004	0,000	0,004	0,007	0,001	0,003	0,003	0,002	0,001

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso II.a.

P (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)
2	0,005	0,009	0,012	0,015	0,004	0,005	0,008	0,008	0,007	0,005
3	0,006	0,013	0,008	0,006	0,005	0,004	0,007	0,007	0,003	0,003
4	0,009	0,009	0,007	0,006	0,001	0,000	0,004	0,004	0,002	0,002
5	0,007	0,003	0,005	0,006	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002
6	0,004	0,003	0,007	0,004	0,002	0,001	0,004	0,004	0,001	0,001
7	0,006	0,007	0,005	0,005	0,002	0,001	0,004	0,003	0,002	0,001
8	0,009	0,014	0,007	0,006	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001
9	0,007	0,018	0,009	0,008	0,003	0,002	0,006	0,005	0,003	0,002
10	0,003	0,012	0,016	0,013	0,008	0,007	0,008	0,006	0,005	0,003
11	22,033	21,803	20,816	19,418	17,705	15,714	13,492	11,212	9,568	10,244
12	0,018	0,002	0,003	0,007	0,017	0,014	0,004	0,001	0,001	0,002
13	15,468	13,505	11,639	9,854	8,217	6,876	6,060	5,901	5,432	1,951
14	0,003	0,012	0,013	0,009	0,004	0,003	0,006	0,005	0,004	0,001
15	0,008	0,015	0,008	0,006	0,001	0,001	0,003	0,003	0,002	0,001
16	0,008	0,010	0,005	0,005	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001
17	0,006	0,005	0,005	0,003	0,000	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001
18	0,005	0,001	0,004	0,003	0,001	0,001	0,002	0,001	0,000	0,001
19	0,007	0,004	0,004	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
20	0,008	0,009	0,004	0,003	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001
21	0,005	0,011	0,005	0,004	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001
22	0,004	0,006	0,009	0,008	0,002	0,002	0,000	0,002	0,002	0,001
23	6,499	6,351	5,422	4,055	2,396	0,774	1,818	3,383	2,487	2,735
24	0,011	0,001	0,003	0,001	0,007	0,005	0,007	0,007	0,003	0,001
25	4,370	2,743	1,710	2,051	3,039	3,855	4,047	2,907	0,754	1,182
26	0,004	0,009	0,004	0,005	0,004	0,006	0,004	0,003	0,001	0,001
27	0,007	0,008	0,003	0,003	0,002	0,003	0,002	0,000	0,001	0,001
28	0,007	0,004	0,002	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
29	0,006	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,001	0,000	0,001	0,000
30	0,005	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
31	0,006	0,004	0,001	0,002	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	0,000
32	0,007	0,006	0,002	0,002	0,001	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000
33	0,005	0,006	0,002	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
34	0,003	0,003	0,004	0,003	0,002	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001
35	2,559	2,341	1,533	0,492	0,626	1,530	1,910	1,104	1,096	0,931
36	0,005	0,000	0,003	0,003	0,005	0,004	0,005	0,001	0,002	0,001
37	1,633	0,688	1,152	1,825	2,103	1,822	0,849	0,673	0,628	0,781
38	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,001	0,002	0,001	0,001
39	0,006	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
40	0,006	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
41	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
42	0,005	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
43	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
44	0,006	0,003	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
45	0,005	0,003	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
46	0,002	0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001	0,000	0,000
47	1,367	1,067	0,353	0,508	1,050	1,144	0,557	0,556	0,178	0,434
48	0,003	0,000	0,002	0,004	0,003	0,003	0,001	0,003	0,001	0,001
49	0,790	0,466	1,033	1,219	0,929	0,230	0,598	0,673	0,570	0,422
50	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso II.b.

P (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)
2	0,010	0,008	0,014	0,011	0,016	0,014	0,011	0,006	0,005	0,003
3	0,005	0,008	0,008	0,007	0,007	0,005	0,005	0,004	0,001	0,002
4	0,006	0,010	0,009	0,009	0,006	0,007	0,006	0,004	0,001	0,002
5	0,004	0,009	0,004	0,009	0,006	0,005	0,003	0,004	0,001	0,002
6	0,004	0,008	0,008	0,008	0,006	0,004	0,004	0,005	0,001	0,001
7	0,005	0,010	0,008	0,010	0,005	0,007	0,005	0,003	0,001	0,001
8	0,007	0,006	0,005	0,005	0,009	0,009	0,004	0,001	0,001	0,001
9	0,003	0,005	0,016	0,001	0,014	0,010	0,006	0,006	0,003	0,001
10	0,030	0,021	0,025	0,019	0,020	0,021	0,012	0,007	0,004	0,000
11	2,331	2,056	1,849	1,664	1,546	1,488	1,499	1,551	1,403	1,484
12	0,014	0,008	0,008	0,011	0,004	0,005	0,009	0,006	0,001	0,000
13	1,741	1,655	1,551	1,422	1,277	1,099	0,884	0,598	0,130	0,655
14	0,003	0,009	0,005	0,005	0,004	0,001	0,002	0,002	0,001	0,000
15	0,003	0,007	0,004	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,000	0,000
16	0,004	0,008	0,003	0,004	0,002	0,004	0,001	0,001	0,001	0,000
17	0,002	0,008	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,001	0,000	0,001
18	0,003	0,007	0,003	0,004	0,002	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001
19	0,004	0,007	0,005	0,004	0,003	0,004	0,002	0,001	0,000	0,001
20	0,003	0,008	0,005	0,004	0,003	0,004	0,001	0,002	0,001	0,001
21	0,006	0,006	0,006	0,002	0,003	0,001	0,001	0,002	0,000	0,001
22	0,010	0,001	0,009	0,003	0,004	0,004	0,002	0,003	0,001	0,001
23	7,007	6,251	5,170	3,911	2,527	1,209	1,377	2,653	1,572	2,590
24	0,011	0,007	0,002	0,003	0,002	0,003	0,004	0,003	0,001	0,001
25	4,295	3,033	2,048	1,626	1,993	2,698	3,255	2,938	0,756	0,642
26	0,006	0,003	0,004	0,004	0,004	0,002	0,005	0,004	0,001	0,000
27	0,003	0,005	0,003	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001	0,000
28	0,003	0,004	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,001	0,000
29	0,001	0,004	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000
30	0,002	0,004	0,002	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
31	0,002	0,004	0,002	0,002	0,001	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000
32	0,002	0,004	0,002	0,001	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001	0,000
33	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,000	0,000
34	0,006	0,002	0,003	0,002	0,001	0,001	0,004	0,002	0,002	0,001
35	2,579	2,037	1,287	0,459	0,388	1,152	1,633	1,192	0,857	0,801
36	0,006	0,003	0,003	0,002	0,005	0,003	0,002	0,001	0,001	0,000
37	1,318	0,709	1,023	1,545	1,903	1,954	1,482	0,171	0,337	0,661
38	0,003	0,003	0,003	0,001	0,004	0,002	0,003	0,002	0,000	0,001
39	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,001	0,000	0,000
40	0,001	0,002	0,001	0,003	0,001	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000
41	0,001	0,002	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
42	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
43	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000
44	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000
45	0,002	0,001	0,001	0,003	0,001	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000
46	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,001	0,001	0,000
47	1,274	0,780	0,220	0,445	0,884	1,085	0,822	0,161	0,318	0,340
48	0,004	0,002	0,002	0,002	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000
49	0,518	0,566	0,983	1,193	1,132	0,751	0,068	0,612	0,372	0,349
50	0,001	0,002	0,003	0,000	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso III.a.

P (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)
2	0,046	0,051	0,141	0,065	0,089	1,248	0,668	0,034	0,084	0,005
3	0,031	0,052	0,033	0,195	0,427	0,847	0,116	0,096	0,124	0,004
4	0,061	0,047	0,108	0,048	0,141	1,281	0,693	0,050	0,058	0,005
5	9,610	13,256	16,524	19,120	21,085	23,551	25,243	29,170	32,071	40,007
6	0,045	0,084	0,057	0,031	0,200	0,161	0,330	0,059	0,097	0,004
7	8,488	11,355	13,481	15,391	17,418	18,742	19,603	23,346	22,782	14,874
8	0,071	0,046	0,124	0,008	0,018	1,246	0,791	0,084	0,098	0,003
9	0,045	0,072	0,072	0,143	0,563	0,599	0,081	0,141	0,131	0,002
10	0,082	0,062	0,193	0,070	0,129	1,665	0,614	0,208	0,052	0,003
11	3,552	4,835	6,155	7,164	8,090	9,332	9,143	20,804	16,904	10,687
12	0,098	0,024	0,056	0,183	0,283	0,802	0,470	0,056	0,123	0,002
13	5,553	5,539	5,870	5,908	6,041	6,118	7,510	11,019	5,756	4,133
14	0,099	0,112	0,461	0,274	0,970	5,065	7,635	0,151	0,042	0,002
15	0,462	0,232	0,409	1,025	2,311	4,414	0,826	0,022	0,138	0,001
16	0,060	0,082	0,620	0,329	1,067	4,836	7,180	0,067	0,055	0,002
17	3,674	3,727	4,655	5,233	5,332	8,349	6,257	6,818	1,423	3,389
18	0,037	0,123	0,259	0,221	0,527	1,496	0,265	0,086	0,131	0,001
19	2,587	3,856	4,862	5,266	5,052	5,357	5,562	6,145	3,395	1,672
20	0,048	0,096	0,096	0,098	0,398	1,153	0,945	0,009	0,016	0,001
21	0,011	0,031	0,039	0,078	0,286	0,547	0,069	0,022	0,090	0,001
22	0,021	0,011	0,118	0,020	0,204	1,050	0,607	0,088	0,049	0,001
23	0,812	0,960	1,206	1,467	1,624	1,846	1,906	1,858	3,471	1,872
24	0,011	0,030	0,030	0,019	0,055	0,046	0,114	0,050	0,067	0,001
25	1,239	1,595	1,698	1,735	1,630	1,263	1,402	2,944	0,990	0,792
26	0,017	0,052	0,071	0,021	0,060	0,331	0,232	0,063	0,016	0,001
27	0,005	0,015	0,026	0,040	0,060	0,117	0,082	0,016	0,044	0,001
28	0,008	0,030	0,058	0,025	0,016	0,198	0,284	0,002	0,019	0,001
29	0,525	0,733	0,948	1,082	1,215	1,138	1,206	1,532	0,693	1,083
30	0,020	0,024	0,033	0,011	0,030	0,176	0,106	0,026	0,035	0,000
31	0,626	0,640	0,649	0,651	0,667	0,590	0,559	0,060	1,057	0,792
32	0,008	0,022	0,012	0,038	0,006	0,120	0,205	0,030	0,009	0,001
33	0,014	0,016	0,041	0,072	0,085	0,305	0,032	0,020	0,004	0,001
34	0,010	0,021	0,007	0,035	0,068	0,054	0,516	0,033	0,010	0,001
35	0,435	0,605	0,685	0,762	0,763	0,884	0,660	0,670	0,610	0,604
36	0,010	0,025	0,014	0,016	0,043	0,139	0,068	0,015	0,010	0,000
37	0,325	0,387	0,490	0,554	0,667	0,707	0,568	0,683	0,536	0,542
38	0,014	0,004	0,022	0,016	0,066	0,207	0,098	0,022	0,007	0,001
39	0,009	0,023	0,019	0,026	0,046	0,151	0,013	0,014	0,011	0,000
40	0,012	0,002	0,020	0,008	0,045	0,124	0,333	0,020	0,008	0,001
41	0,343	0,398	0,424	0,443	0,404	0,610	0,399	0,557	0,519	0,491
42	0,004	0,011	0,017	0,023	0,076	0,150	0,044	0,019	0,004	0,000
43	0,258	0,369	0,429	0,443	0,463	0,521	0,376	0,359	0,316	0,361
44	0,007	0,004	0,011	0,007	0,068	0,254	0,203	0,008	0,004	0,001
45	0,007	0,013	0,017	0,005	0,042	0,087	0,005	0,005	0,022	0,000
46	0,010	0,010	0,023	0,008	0,049	0,212	0,165	0,010	0,005	0,001
47	0,244	0,244	0,281	0,320	0,319	0,399	0,306	0,347	0,399	0,369
48	0,007	0,006	0,007	0,008	0,053	0,090	0,022	0,012	0,006	0,000
49	0,237	0,298	0,283	0,273	0,265	0,267	0,298	0,246	0,329	0,329
50	0,002	0,004	0,011	0,008	0,048	0,218	0,218	0,007	0,002	0,000

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso III.b.

P (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)
2	0,025	0,046	0,129	0,133	0,023	0,139	0,130	1,594	0,021	0,004
3	0,017	0,069	0,044	0,022	0,064	0,004	0,049	0,075	0,112	0,003
4	0,022	0,020	0,107	0,089	0,017	0,094	0,100	1,720	0,050	0,002
5	4,316	5,995	7,461	8,532	9,695	10,554	11,402	12,067	14,208	16,390
6	0,046	0,098	0,076	0,181	0,041	0,310	0,169	0,173	0,040	0,002
7	1,986	2,462	2,876	3,179	3,747	3,992	4,352	4,802	5,022	4,437
8	0,013	0,042	0,078	0,042	0,040	0,092	0,026	1,549	0,018	0,002
9	0,011	0,045	0,024	0,043	0,059	0,013	0,031	0,110	0,070	0,002
10	0,025	0,029	0,086	0,052	0,055	0,132	0,112	0,973	0,040	0,002
11	2,635	3,224	3,693	4,302	4,980	5,421	5,850	6,046	11,744	9,838
12	0,038	0,080	0,077	0,235	0,073	0,217	0,064	0,175	0,135	0,003
13	5,779	5,653	5,188	4,833	4,467	4,782	5,269	8,228	5,585	4,458
14	0,060	0,080	0,194	0,048	0,081	0,174	0,417	6,073	0,046	0,001
15	0,030	0,175	0,184	0,029	0,280	0,087	0,272	0,455	0,221	0,001
16	0,171	0,232	0,405	0,979	0,245	0,957	0,446	5,565	0,069	0,001
17	7,860	11,466	11,300	11,087	9,828	8,533	7,280	7,949	4,729	3,241
18	0,133	0,110	0,520	0,870	0,279	0,828	0,432	0,335	0,173	0,001
19	4,457	9,303	10,136	10,738	10,303	9,644	8,443	5,859	6,048	1,846
20	0,070	0,049	0,285	0,129	0,207	0,211	0,189	1,910	0,077	0,001
21	0,035	0,050	0,108	0,016	0,174	0,075	0,155	0,153	0,078	0,001
22	0,044	0,026	0,117	0,071	0,096	0,087	0,196	0,848	0,026	0,001
23	0,699	0,787	0,826	0,976	1,127	1,117	1,115	1,279	1,329	1,494
24	0,041	0,031	0,140	0,191	0,143	0,151	0,061	0,065	0,017	0,001
25	1,051	2,016	2,321	2,463	2,512	2,327	2,035	0,781	1,096	0,723
26	0,015	0,005	0,020	0,050	0,040	0,041	0,057	0,390	0,026	0,001
27	0,003	0,014	0,017	0,011	0,031	0,021	0,012	0,047	0,043	0,001
28	0,014	0,014	0,013	0,044	0,025	0,030	0,011	0,670	0,024	0,001
29	0,475	0,735	0,893	1,001	1,074	1,093	1,059	0,898	1,403	1,046
30	0,019	0,029	0,028	0,056	0,029	0,068	0,012	0,083	0,048	0,000
31	0,522	0,642	0,648	0,697	0,681	0,653	0,594	0,578	0,331	0,500
32	0,023	0,009	0,057	0,002	0,034	0,027	0,015	0,145	0,011	0,000
33	0,006	0,018	0,034	0,001	0,022	0,018	0,027	0,033	0,001	0,000
34	0,011	0,016	0,020	0,036	0,033	0,041	0,025	0,290	0,021	0,001
35	0,375	0,602	0,727	0,790	0,831	0,847	0,789	0,582	0,678	0,599
36	0,003	0,012	0,017	0,050	0,062	0,053	0,070	0,039	0,011	0,000
37	0,285	0,280	0,376	0,429	0,466	0,602	0,668	0,562	0,524	0,525
38	0,005	0,022	0,037	0,011	0,033	0,052	0,027	0,070	0,022	0,000
39	0,003	0,006	0,017	0,010	0,048	0,009	0,009	0,016	0,023	0,000
40	0,011	0,004	0,038	0,054	0,034	0,016	0,026	0,169	0,007	0,000
41	0,288	0,392	0,413	0,469	0,499	0,449	0,389	0,310	0,351	0,354
42	0,007	0,004	0,033	0,026	0,034	0,060	0,045	0,017	0,003	0,000
43	0,216	0,335	0,396	0,435	0,493	0,513	0,515	0,298	0,445	0,346
44	0,009	0,006	0,008	0,025	0,016	0,011	0,013	0,084	0,015	0,001
45	0,006	0,010	0,007	0,016	0,017	0,009	0,025	0,015	0,013	0,000
46	0,007	0,010	0,014	0,032	0,016	0,036	0,019	0,068	0,013	0,000
47	0,211	0,204	0,225	0,233	0,273	0,276	0,304	0,340	0,249	0,322
48	0,009	0,011	0,013	0,016	0,028	0,032	0,027	0,004	0,010	0,000
49	0,178	0,266	0,306	0,308	0,320	0,300	0,278	0,154	0,298	0,229
50	0,003	0,007	0,016	0,012	0,006	0,021	0,005	0,021	0,003	0,001

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso IV.a.

P (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)
2	0,047	0,007	0,103	0,017	0,043	0,057	0,772	0,065	0,008	0,005
3	0,011	0,035	0,085	0,062	0,079	0,129	0,091	0,052	0,015	0,004
4	0,054	0,013	0,022	0,019	0,055	0,025	0,629	0,064	0,022	0,005
5	9,602	13,237	16,343	18,886	21,160	23,238	25,001	28,367	31,743	38,967
6	0,066	0,030	0,039	0,012	0,006	0,027	0,015	0,027	0,016	0,004
7	8,358	11,141	13,182	14,984	16,558	18,101	19,136	21,333	22,172	14,660
8	0,041	0,054	0,065	0,018	0,033	0,039	1,861	0,097	0,017	0,003
9	0,072	0,040	0,101	0,072	0,067	0,119	0,116	0,115	0,030	0,002
10	0,049	0,015	0,110	0,033	0,044	0,065	1,343	0,039	0,022	0,003
11	3,838	4,919	5,946	6,840	7,567	8,515	9,274	16,556	16,696	10,601
12	0,117	0,112	0,169	0,025	0,017	0,095	0,139	0,076	0,023	0,002
13	5,437	5,454	5,492	5,526	5,608	5,746	8,356	10,814	4,716	4,072
14	0,131	0,017	0,209	0,087	0,091	0,048	9,498	0,026	0,024	0,002
15	0,356	0,284	0,111	0,261	0,238	0,445	0,027	0,112	0,029	0,001
16	0,248	0,134	0,327	0,071	0,043	0,150	8,860	0,014	0,027	0,002
17	4,653	4,140	4,851	5,169	5,484	6,297	8,688	8,827	0,805	3,383
18	0,214	0,123	0,201	0,054	0,090	0,219	0,078	0,066	0,024	0,001
19	2,772	4,081	5,174	5,835	6,423	6,742	6,088	6,969	3,482	1,676
20	0,081	0,052	0,109	0,050	0,033	0,018	1,366	0,011	0,024	0,001
21	0,077	0,037	0,075	0,006	0,024	0,045	0,089	0,067	0,017	0,001
22	0,039	0,025	0,095	0,024	0,023	0,013	0,287	0,014	0,014	0,001
23	0,921	0,990	1,122	1,303	1,459	1,701	2,030	1,864	3,395	1,839
24	0,009	0,017	0,018	0,010	0,047	0,065	0,018	0,027	0,013	0,001
25	1,274	1,620	1,768	1,833	1,954	1,887	1,172	2,130	0,806	0,769
26	0,009	0,030	0,023	0,004	0,018	0,033	0,340	0,009	0,020	0,001
27	0,019	0,017	0,009	0,008	0,019	0,048	0,022	0,016	0,006	0,001
28	0,022	0,007	0,022	0,005	0,006	0,023	0,541	0,013	0,008	0,001
29	0,553	0,766	0,895	1,042	1,141	1,264	1,094	1,154	0,840	1,082
30	0,029	0,028	0,031	0,013	0,011	0,020	0,029	0,019	0,008	0,000
31	0,609	0,650	0,639	0,641	0,670	0,709	0,399	0,678	1,113	0,768
32	0,027	0,015	0,008	0,007	0,012	0,024	0,117	0,009	0,012	0,001
33	0,012	0,018	0,010	0,008	0,008	0,045	0,015	0,006	0,003	0,001
34	0,022	0,012	0,009	0,003	0,017	0,015	0,529	0,010	0,004	0,001
35	0,444	0,607	0,694	0,728	0,770	0,785	0,596	0,581	0,563	0,597
36	0,010	0,011	0,013	0,007	0,011	0,008	0,017	0,007	0,006	0,000
37	0,302	0,381	0,480	0,553	0,629	0,651	0,578	0,871	0,522	0,545
38	0,008	0,009	0,019	0,007	0,016	0,011	0,035	0,007	0,008	0,001
39	0,024	0,001	0,013	0,006	0,009	0,020	0,010	0,010	0,003	0,000
40	0,004	0,005	0,001	0,007	0,012	0,008	0,256	0,013	0,001	0,001
41	0,363	0,409	0,416	0,420	0,418	0,426	0,326	0,403	0,506	0,477
42	0,011	0,004	0,008	0,007	0,009	0,013	0,008	0,003	0,004	0,000
43	0,249	0,359	0,418	0,471	0,478	0,493	0,363	0,340	0,325	0,353
44	0,005	0,004	0,005	0,003	0,010	0,008	0,174	0,004	0,004	0,000
45	0,011	0,007	0,018	0,004	0,008	0,016	0,008	0,006	0,003	0,000
46	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,011	0,088	0,005	0,002	0,001
47	0,252	0,256	0,245	0,283	0,311	0,368	0,343	0,442	0,412	0,369
48	0,011	0,002	0,004	0,005	0,005	0,004	0,004	0,005	0,003	0,000
49	0,226	0,292	0,295	0,299	0,299	0,292	0,254	0,214	0,308	0,321
50	0,012	0,004	0,003	0,003	0,002	0,004	0,133	0,002	0,001	0,000

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso IV.b.

P (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)
2	0,050	0,019	0,009	0,033	0,015	0,031	0,045	0,108	0,011	0,004
3	0,031	0,025	0,009	0,024	0,007	0,052	0,074	0,044	0,027	0,003
4	0,028	0,024	0,026	0,025	0,013	0,010	0,036	0,118	0,048	0,002
5	4,465	6,186	7,481	8,608	9,591	10,576	11,475	12,150	13,899	16,273
6	0,034	0,029	0,014	0,025	0,057	0,045	0,048	0,009	0,033	0,002
7	2,047	2,577	2,886	3,199	3,510	3,935	4,392	4,675	4,982	4,411
8	0,019	0,017	0,012	0,005	0,024	0,023	0,039	0,092	0,014	0,002
9	0,009	0,022	0,014	0,025	0,027	0,048	0,061	0,039	0,055	0,002
10	0,037	0,055	0,010	0,024	0,042	0,024	0,025	0,071	0,002	0,002
11	2,870	3,425	3,841	4,290	4,691	5,152	5,594	5,663	10,471	9,806
12	0,069	0,063	0,006	0,044	0,060	0,048	0,045	0,054	0,029	0,003
13	6,430	6,089	6,038	5,518	5,005	4,656	5,655	7,210	5,907	4,438
14	0,027	0,035	0,048	0,027	0,113	0,083	0,109	0,268	0,042	0,001
15	0,038	0,034	0,013	0,044	0,129	0,144	0,184	0,108	0,053	0,001
16	0,164	0,139	0,063	0,187	0,097	0,125	0,169	0,170	0,020	0,001
17	10,060	11,877	14,725	14,960	15,635	13,259	10,771	8,190	5,813	3,245
18	0,207	0,127	0,043	0,203	0,050	0,244	0,015	0,177	0,044	0,001
19	5,853	9,131	12,319	13,270	14,460	13,032	10,286	6,662	5,862	1,846
20	0,140	0,090	0,060	0,082	0,095	0,104	0,111	0,083	0,033	0,001
21	0,058	0,037	0,059	0,029	0,026	0,018	0,093	0,053	0,013	0,001
22	0,027	0,032	0,033	0,071	0,040	0,059	0,053	0,048	0,041	0,001
23	0,637	0,798	0,876	1,009	1,112	1,084	0,890	0,632	1,262	1,486
24	0,031	0,047	0,038	0,036	0,022	0,007	0,017	0,032	0,027	0,001
25	1,013	1,890	2,424	2,732	3,012	2,755	1,810	0,759	0,663	0,733
26	0,021	0,012	0,014	0,012	0,031	0,008	0,036	0,021	0,031	0,001
27	0,016	0,009	0,005	0,032	0,013	0,016	0,051	0,011	0,030	0,001
28	0,017	0,014	0,018	0,016	0,026	0,023	0,009	0,044	0,018	0,001
29	0,489	0,723	0,945	1,071	1,190	1,161	0,966	0,711	1,170	1,041
30	0,015	0,002	0,004	0,007	0,008	0,025	0,015	0,010	0,009	0,000
31	0,448	0,546	0,562	0,636	0,686	0,636	0,652	0,973	0,565	0,494
32	0,006	0,013	0,005	0,010	0,013	0,014	0,019	0,012	0,014	0,000
33	0,006	0,008	0,007	0,006	0,002	0,007	0,026	0,008	0,004	0,000
34	0,016	0,007	0,006	0,007	0,003	0,016	0,020	0,021	0,019	0,001
35	0,358	0,574	0,730	0,834	0,921	0,876	0,696	0,540	0,710	0,600
36	0,009	0,006	0,009	0,016	0,016	0,014	0,020	0,013	0,014	0,000
37	0,250	0,273	0,331	0,393	0,484	0,584	0,760	0,800	0,604	0,522
38	0,009	0,003	0,004	0,008	0,008	0,003	0,004	0,027	0,014	0,000
39	0,007	0,009	0,006	0,007	0,006	0,013	0,015	0,015	0,001	0,000
40	0,006	0,003	0,003	0,006	0,006	0,011	0,014	0,009	0,010	0,000
41	0,270	0,356	0,385	0,423	0,463	0,457	0,410	0,391	0,335	0,352
42	0,002	0,007	0,005	0,009	0,005	0,011	0,002	0,004	0,008	0,000
43	0,197	0,322	0,395	0,448	0,489	0,531	0,558	0,442	0,356	0,348
44	0,003	0,004	0,004	0,003	0,009	0,007	0,007	0,002	0,007	0,001
45	0,005	0,003	0,005	0,001	0,005	0,005	0,011	0,020	0,006	0,000
46	0,005	0,004	0,005	0,010	0,006	0,004	0,015	0,006	0,012	0,000
47	0,192	0,183	0,188	0,207	0,241	0,282	0,382	0,387	0,337	0,320
48	0,002	0,006	0,010	0,008	0,011	0,015	0,009	0,012	0,006	0,000
49	0,180	0,253	0,263	0,302	0,308	0,296	0,222	0,203	0,245	0,228
50	0,010	0,008	0,003	0,005	0,008	0,006	0,012	0,011	0,011	0,001

Fonte: Autoria própria.

Tabela 23 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso V.a.

P (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)
2	0,010	0,034	0,108	0,082	1,055	0,739	0,170	0,597	0,011	0,004
3	0,012	0,031	0,114	0,105	1,181	0,845	0,256	0,669	0,045	0,002
4	0,083	0,038	0,126	0,180	1,323	1,167	0,323	0,835	0,016	0,001
5	0,020	0,055	0,219	0,506	2,273	1,999	1,523	1,570	0,018	0,001
6	0,029	0,017	0,007	0,232	1,213	1,141	0,252	0,242	0,017	0,001
7	0,028	0,021	0,113	0,309	2,020	2,301	1,244	1,111	0,048	0,001
8	0,009	0,043	0,047	0,227	0,387	0,305	0,085	0,257	0,036	0,000
9	0,009	0,066	0,056	0,105	0,469	0,198	0,079	0,172	0,062	0,001
10	0,055	0,045	0,072	0,105	0,689	0,479	0,143	0,099	0,067	0,002
11	3,967	5,344	6,537	6,191	6,675	6,820	7,491	6,600	6,705	10,048
12	0,078	0,032	0,079	0,124	1,201	1,057	0,208	0,724	0,132	0,003
13	3,580	3,700	3,634	4,657	4,091	6,767	6,413	7,469	8,436	2,116
14	0,044	0,106	0,143	0,172	1,843	1,664	0,265	0,833	0,110	0,001
15	0,102	0,099	0,160	0,234	2,341	2,199	0,370	1,276	0,171	0,001
16	0,347	0,231	0,263	0,298	4,170	3,750	0,920	3,280	0,093	0,001
17	0,174	0,198	0,615	1,421	10,714	20,889	17,576	8,011	0,123	0,001
18	0,388	0,191	0,799	2,097	12,038	7,728	1,154	4,412	0,050	0,001
19	0,046	0,348	0,780	1,633	11,104	20,683	16,934	7,146	0,120	0,001
20	0,223	0,079	0,623	1,895	9,810	5,762	0,662	1,945	0,095	0,001
21	0,060	0,079	0,295	0,484	2,973	2,671	0,390	1,077	0,063	0,001
22	0,036	0,048	0,268	0,373	1,928	1,781	0,275	0,786	0,090	0,002
23	1,613	2,080	2,233	2,304	2,706	3,701	3,322	2,980	4,061	2,764
24	0,045	0,035	0,090	0,204	0,710	1,095	0,006	0,257	0,071	0,001
25	1,695	1,854	1,804	1,572	2,136	2,232	2,592	1,137	1,734	1,154
26	0,012	0,017	0,032	0,107	1,048	0,880	0,152	0,458	0,044	0,001
27	0,029	0,027	0,037	0,093	0,691	0,635	0,074	0,296	0,049	0,000
28	0,029	0,025	0,026	0,054	0,533	0,464	0,054	0,290	0,028	0,000
29	0,023	0,052	0,025	0,034	0,263	0,502	1,425	0,973	0,038	0,000
30	0,041	0,044	0,049	0,167	0,842	0,831	0,091	0,581	0,023	0,000
31	0,028	0,042	0,018	0,028	0,380	0,860	0,720	0,458	0,044	0,000
32	0,019	0,029	0,091	0,240	1,033	0,816	0,097	0,318	0,041	0,000
33	0,019	0,017	0,038	0,115	0,614	0,613	0,099	0,339	0,017	0,000
34	0,001	0,012	0,045	0,101	0,458	0,546	0,101	0,370	0,026	0,001
35	0,573	0,561	0,676	0,753	0,274	0,920	0,903	0,855	0,832	0,941
36	0,022	0,020	0,038	0,069	0,359	0,411	0,083	0,075	0,010	0,000
37	0,384	0,513	0,560	0,622	0,263	0,610	0,453	0,915	0,728	0,776
38	0,007	0,009	0,025	0,060	0,350	0,647	0,046	0,236	0,008	0,001
39	0,007	0,013	0,043	0,059	0,356	0,438	0,039	0,246	0,009	0,001
40	0,017	0,009	0,030	0,078	0,364	0,389	0,029	0,212	0,007	0,000
41	0,009	0,007	0,023	0,041	0,490	0,714	0,442	0,196	0,013	0,000
42	0,005	0,023	0,034	0,091	0,168	0,561	0,053	0,233	0,003	0,000
43	0,009	0,010	0,015	0,043	0,498	0,886	0,315	0,073	0,010	0,000
44	0,023	0,012	0,025	0,074	0,054	0,186	0,013	0,114	0,007	0,000
45	0,007	0,013	0,028	0,052	0,128	0,286	0,023	0,130	0,014	0,000
46	0,004	0,009	0,020	0,036	0,141	0,291	0,023	0,170	0,002	0,001
47	0,224	0,305	0,371	0,435	0,387	0,130	0,346	0,469	0,438	0,437
48	0,002	0,007	0,012	0,041	0,230	0,285	0,055	0,173	0,009	0,000
49	0,249	0,246	0,293	0,395	0,348	0,177	0,026	0,446	0,423	0,420
50	0,003	0,004	0,008	0,035	0,238	0,250	0,020	0,079	0,007	0,000

Fonte: Autoria própria.

Tabela 24 – Correntes harmônicas obtidas para o Caso V.b.

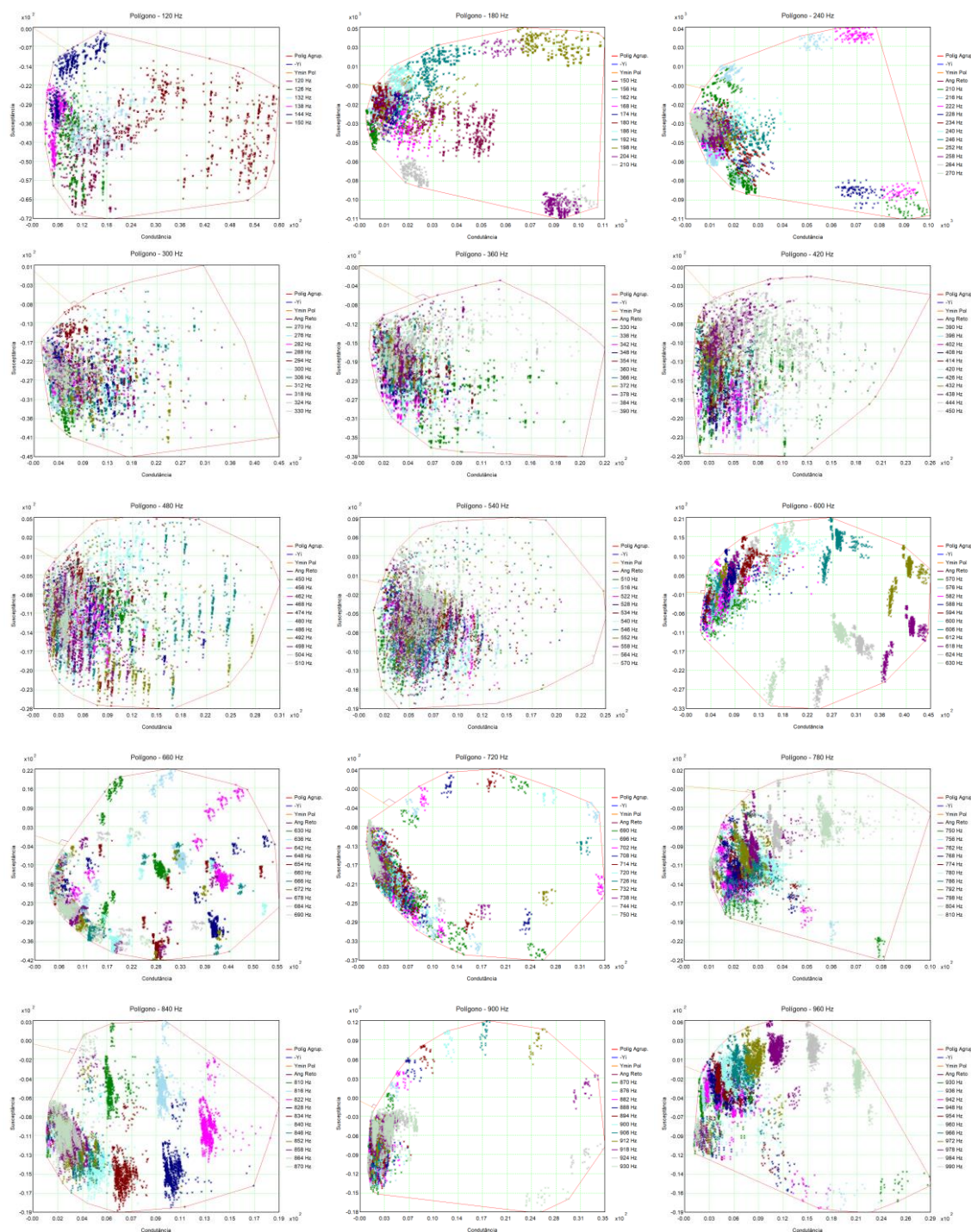
P (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)	Mag. (A)
2	0,030	0,013	0,081	0,018	0,041	0,026	0,024	0,147	0,031	0,004
3	0,050	0,066	0,069	0,033	0,060	0,035	0,057	0,071	0,027	0,002
4	0,105	0,034	0,033	0,029	0,018	0,011	0,025	0,019	0,023	0,001
5	0,023	0,016	0,048	0,025	0,023	0,023	0,037	0,040	0,015	0,001
6	0,066	0,043	0,065	0,017	0,029	0,012	0,053	0,048	0,037	0,001
7	0,103	0,064	0,097	0,037	0,033	0,017	0,049	0,035	0,016	0,001
8	0,139	0,118	0,037	0,029	0,043	0,029	0,116	0,122	0,060	0,001
9	0,119	0,070	0,138	0,071	0,098	0,086	0,154	0,183	0,096	0,001
10	0,371	0,210	0,166	0,032	0,181	0,157	0,229	0,226	0,119	0,001
11	0,452	0,703	0,914	0,961	0,980	0,945	1,003	1,088	1,182	1,529
12	0,032	0,020	0,043	0,024	0,060	0,179	0,096	0,370	0,025	0,001
13	0,311	0,335	0,409	0,571	0,614	0,669	0,731	0,785	0,834	0,671
14	0,033	0,004	0,003	0,003	0,046	0,015	0,021	0,056	0,015	0,000
15	0,011	0,021	0,018	0,002	0,018	0,014	0,015	0,009	0,010	0,000
16	0,048	0,014	0,018	0,024	0,020	0,033	0,012	0,060	0,031	0,000
17	0,060	0,019	0,018	0,036	0,020	0,017	0,028	0,016	0,027	0,000
18	0,074	0,016	0,019	0,002	0,058	0,042	0,029	0,051	0,097	0,000
19	0,081	0,073	0,037	0,065	0,038	0,082	0,011	0,160	0,031	0,000
20	0,335	0,071	0,018	0,016	0,051	0,036	0,089	0,129	0,193	0,001
21	0,078	0,078	0,203	0,018	0,036	0,133	0,167	0,202	0,128	0,001
22	0,313	0,083	0,209	0,138	0,036	0,212	0,129	1,141	0,195	0,001
23	2,365	3,240	5,541	9,593	11,114	11,018	11,067	8,636	5,729	2,562
24	0,103	0,056	0,217	0,146	0,047	0,251	0,169	0,741	0,045	0,001
25	2,519	3,312	4,754	8,294	9,931	9,626	9,565	6,742	3,540	0,695
26	0,026	0,041	0,041	0,050	0,015	0,051	0,042	0,335	0,124	0,001
27	0,025	0,033	0,036	0,055	0,045	0,014	0,092	0,027	0,042	0,000
28	0,071	0,015	0,012	0,051	0,057	0,038	0,028	0,030	0,090	0,000
29	0,045	0,012	0,034	0,025	0,025	0,040	0,053	0,057	0,009	0,000
30	0,025	0,014	0,024	0,018	0,017	0,024	0,020	0,096	0,020	0,000
31	0,018	0,005	0,011	0,009	0,048	0,021	0,041	0,035	0,011	0,000
32	0,051	0,016	0,025	0,030	0,023	0,026	0,005	0,023	0,016	0,000
33	0,011	0,023	0,008	0,010	0,031	0,034	0,000	0,052	0,024	0,000
34	0,045	0,009	0,020	0,019	0,011	0,032	0,007	0,110	0,018	0,001
35	0,625	0,748	0,508	0,284	0,472	0,552	0,611	0,641	0,602	0,811
36	0,032	0,009	0,042	0,015	0,008	0,027	0,031	0,051	0,015	0,000
37	0,445	0,461	0,689	0,893	0,883	0,866	0,892	0,761	0,714	0,655
38	0,013	0,010	0,011	0,005	0,020	0,011	0,012	0,036	0,012	0,001
39	0,012	0,006	0,014	0,016	0,021	0,015	0,015	0,013	0,015	0,000
40	0,016	0,002	0,016	0,012	0,016	0,006	0,033	0,039	0,016	0,000
41	0,009	0,006	0,009	0,009	0,018	0,019	0,016	0,028	0,014	0,000
42	0,007	0,005	0,002	0,010	0,021	0,004	0,009	0,021	0,022	0,000
43	0,008	0,014	0,005	0,005	0,010	0,007	0,017	0,027	0,005	0,000
44	0,024	0,007	0,010	0,002	0,014	0,011	0,008	0,029	0,031	0,000
45	0,005	0,016	0,013	0,008	0,015	0,013	0,003	0,015	0,021	0,000
46	0,011	0,007	0,026	0,008	0,021	0,010	0,029	0,034	0,023	0,000
47	0,185	0,201	0,117	0,258	0,292	0,338	0,438	0,471	0,476	0,349
48	0,011	0,002	0,011	0,004	0,008	0,018	0,013	0,048	0,012	0,000
49	0,190	0,263	0,365	0,274	0,354	0,351	0,324	0,366	0,356	0,343
50	0,005	0,002	0,011	0,006	0,019	0,009	0,004	0,027	0,012	0,000

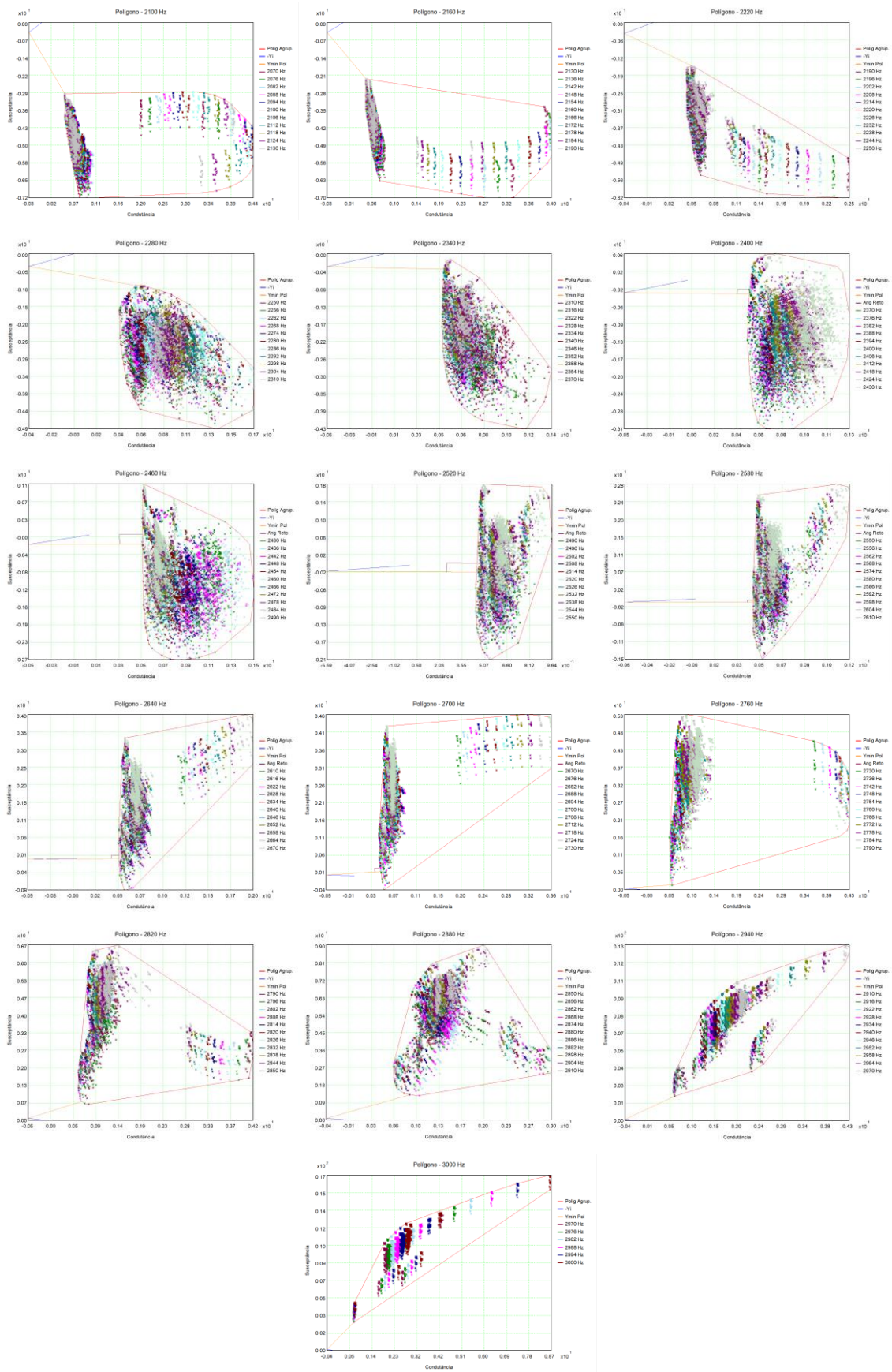
Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B

Este apêndice apresenta os Lugares Geométricos correspondentes a todas as ordens harmônicas do espectro estabelecido pelas normativas, abrangendo da 2ª à 50ª ordem.

Figura 56 – Lugares Geométricos obtidos para todas as ordens do espectro harmônico normativo.





Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C

Este apêndice apresenta a modelagem da rede interna utilizada no estudo de acesso da planta hipotética no HarmZs. A estrutura da modelagem é comum a todos os casos simulados, variando apenas o campo “DRSC”, no qual são inseridas as correntes certificadas referentes a cada topologia analisada. Destaca-se que o modelo apresentado a seguir corresponde ao Caso I.a, sendo este representativo da estrutura adotada nos demais cenários avaliados. Assim, o campo “DRSC” constitui o único elemento modificado entre os diferentes casos simulados.

DGERAIS

FREQUENCIA	60
SBASE	100
DADOS	PU
INTERFACE	PU
METODOLOGIA	YS
TITULO	EXERCICIO
IDBARRA	NUMERO

FIM

DGBT

%Grupo	Tensão (kV)
1	230
2	34.5

FIM

DARE

%Area	Nome
1	AREA

FIM

DFCF

%Ident	Modelo	Alfa	Beta	A	B	C
1	1	0.7316	0.7158	-1.243	1.549	0.6
2	1	1.909	1.5	0.1431	-0.08121	0.91
3	1	0.8802	0.8069	-0.8222	1.37	0.6

FIM

DBAR

%Num	Nome	Tensao	Angulo	Base	Area
50000	"PAC"	1	0	1	1
40000	"AT"	1	0	1	1
40001	"MT"	1	0	2	1
30000	"H2V"	1	0	2	1

FIM

DLIN

%De	Para	Circ	Est	Resist	Reat	Suscep/Capac	Comp	PI	Id
50000	40000	1	1	0.00344	0.02679	0.000062	0.606	0	1
40001	30000	1	1	0.01113	0.01194	0.001046	5.95	0	1

FIM

DTR2

%De	Tensao_De	Ang_De	Para	Tensao_Para	Ang_Para	Resist	Reat
S_Base	Circ	Est	Id				
40000	1	0	40001	1	0	0.01	0.04
100	1	1	2				

FIM

DSRC

%De	Para	Tipo	Circ	Est
30000	0	I	1	1

%Freq	Módulo	Ângulo
300	0.117513183644258	0
420	0.0654280653697999	0
660	0.0320248387308189	0
780	0.0231371569346565	0
1020	0.0177557631262702	0
1140	0.0129968181060751	0
1380	0.0102007409875443	0
1500	0.00738325433675672	0
1740	0.00645462700756669	0
1860	0.00455426002341737	0
2100	0.0044568029002528	0
2220	0.00302895695989091	0
2460	0.0032677197016903	0
2580	0.00230179316957432	0
2820	0.00249288203652398	0
2940	0.00191214578024133	0
FIMP		

FIM