



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
NÚCLEO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**



UMA INVESTIGAÇÃO ACERCA DAS HARMÔNICAS NÃO CARACTERÍSTICAS NO CONTEXTO DA GERAÇÃO EÓLICA

Celso Rosa de Azevedo Júnior

Uberlândia
Janeiro de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
NÚCLEO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

**UMA INVESTIGAÇÃO ACERCA DAS HARMÔNICAS
NÃO CARACTERÍSTICAS NO CONTEXTO DA
GERAÇÃO EÓLICA**

Dissertação apresentada por Celso Rosa de Azevedo Júnior à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

Ivan Nunes Santos, Dr. (Orientador) – UFU
Arnaldo José Pereira Rosentino Junior, Dr. – UFTM
Camilla de Sousa Chaves, Dra. – IFTM

UMA INVESTIGAÇÃO ACERCA DAS HARMÔNICAS NÃO CARACTERÍSTICAS NO CONTEXTO DA GERAÇÃO EÓLICA

Celso Rosa de Azevedo Júnior

Dissertação apresentada por Celso Rosa de Azevedo Júnior à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia
Elétrica/Qualidade da Energia
Elétrica.

Prof. Ivan Nunes Santos – Dr.
Orientador – UFU

Prof. José Roberto Camacho – PhD.
Coordenador da Pós-Graduação – COPEL UFU

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

A994 Azevedo Junior, Celso Rosa de, 1986-
2020 Uma Investigação Acerca das Harmônicas não Características
no Contexto da Geração Eólica [recurso eletrônico] / Celso Rosa de
Azevedo Junior. - 2020.

Orientador: Ivan Nunes Santos.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.157>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

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



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 729, PPGEELT				
Data:	Trinta e um de janeiro de dois mil e vinte	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	12:20
Matrícula do Discente:	11722EEL003				
Nome do Discente:	Celso Rosa de Azevedo Júnior				
Título do Trabalho:	Uma Investigação Acerca das Harmônicas não Características no Contexto da Geração Eólica				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Qualidade e racionalização da energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Desenvolvimento de subestação subterrânea hermética, pressurizada, automatizada e isolada . Agência Financiadora: CEB (Companhia Energética de Brasília) através de P&D ANEEL . Início: 23/11/2018. Término: 23/11/2021. No. do Projeto na agência: PD-05160-1803/2018 (Código ANEEL do projeto). Professor Coordenador: Ivan Nunes Santos				

Reuniu-se no Anfiteatro 1E, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Arnaldo José Pereira Rosentino Junior - UFTM; Camilla de Sousa Chaves - IFTM; Ivan Nunes Santos - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

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

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

Aprovado.

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 31/01/2020, às 12:27, 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 **Camilla de Sousa Chaves, Usuário Externo**, em 31/01/2020, às 15:39, 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 **Arnaldo José Pereira Rosentino Junior, Usuário Externo**, em 31/01/2020, às 17:16, 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 **1792535** e o código CRC **CA0BB77F**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha querida esposa, por todo amor, amizade, cumplicidade, paciência e incentivos dispensados a mim durante esta etapa.

Dedico também à minha amada mãe, ponto de partida de toda minha vida acadêmica.

Aos meus afilhados, que este trabalho se materialize em um exemplo positivo e seja uma mola propulsora para a conquista de seus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, fico muito grato por todas oportunidades que tive e trouxeram-me até aqui... sem dúvida nenhuma sinto-me privilegiado diante da grande maioria, que devido a desigualdade social ululante em nosso país, cerceia e limita jovens potenciais! Espero vivenciar o tempo em que o ensino de qualidade seja realmente para todos e que as condições fundamentais para uma vida digna contemplem a cada um, sem exceções.

Agradeço ao meu Professor Orientador, *Ivan Nunes Santos*, por toda dedicação e apoio em todo percurso durante o desenvolvimento deste trabalho. Sinto-me extremamente grato por todas as oportunidades e projetos que confiou a mim, o tenho como um amigo. O trabalho ao lado do senhor, propiciou-me um aprendizado diário, pautados na competência e dedicação plena à pesquisa e ensino.

Com o reconhecimento de sua co-orientação, tipifico meus sinceros agradecimentos a minha amiga *Raquel Filiagi*, pelas contribuições contínuas nessa pesquisa e nos trabalhos técnicos ao longo do mestrado.

Estendo meus agradecimentos aos professores do Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica, *José Carlos de Oliveira, Botu, Paulo Henrique, Helder, Isaque e José Wilson*, bem como, os demais docentes da Pós-Graduação da FEELT, os quais possuem minha sincera estima por todo conteúdo técnico e humano compartilhado.

Lembro-me claramente das circunstâncias que vivenciei em minha vida e fomentaram minha busca por conhecimento e formação acadêmica, todavia, estas foram fundamentais para um desenvolvimento crítico e real enquanto pesquisador, alicerçando em mim quão importante é a busca pelo aprendizado contínuo. Nesse sentido, não consigo definir palavras para agradecer aquela que foi a força motriz de tudo, minha mãe, *Valéria!* A você, mãe... expresso toda minha gratidão! A senhora sempre foi e sempre será o esteio de tudo... te amo muito...

Certamente, aquela que me motivou intensamente, sendo sempre um espelho de competência e capacidade profissional, compartilhando e apoiando todos os momentos vivenciados em minha trajetória acadêmica no mestrado. Sem dúvida nenhuma, foi a pessoa que mais torceu por mim, sempre se mostrou solidaria e compreensiva aos inúmeros momentos que necessitei ausentar-me para dedicar à pesquisa... este trabalho, não seria concretizado sem você, minha amada esposa *Izabella*.

À minha irmã *Daiane*, expresso meus agradecimentos por toda atenção e carinho sempre dedicados a mim! Independente da distância você sempre se fez presente e disposta a ajudar-me no que fosse preciso.

Aos meus afilhados *Celso Valentin e Paulo Renato*, nada mais puro e sensível que poder presenciar o desenvolvimento de vocês, espero com este trabalho motiva-los a buscar seus sonhos, enfrentando as dificuldades e vencendo seus próprios limites.

Estendo meus agradecimentos aos amigos de trabalho diário do Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica, *Giordanni, Raquel, Arthur, Márcio, Fabrício, Camila, Bárbara, Vinicius, Luiz, Leonardo, Humberto, Abner e Adrian*. Pude aprender e amadurecer enquanto pesquisador com apoio e exemplo de vocês. Ter a oportunidade de compartilhar a pesquisa com tantos jovens talentos é algo extremamente gratificante e motivador. Vocês fizeram a diferença nesta minha caminhada.

Agradeço também à Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade, vale ressaltar a excelência do corpo docente e técnico aos quais estendo meus agradecimentos à *Cinara, João, Patrícia, Rubinho, Caio Guimarães e Caio Siqueira*.

Por fim expresso meus agradecimentos ao projeto de P&D 7284-0001/2016 (UFU/NEOENERGIA) e à FAPEMIG pelo fomento financeiro durante a pesquisa.

“Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda.”

(Mário Sérgio Cortella)

RESUMO

A partir das pesquisas recentes relacionadas à exploração sustentável de energia, é evidente que a energia eólica vem assumindo um papel importante na matriz energética brasileira e mundial. Portanto, ao considerar sua integração ao sistema elétrico, a literatura apresenta possíveis impactos na qualidade da energia, principalmente aqueles relacionados à injeção de correntes harmônicas no sistema por turbinas eólicas. Nesse contexto, as condições de operação da rede de conexão podem implicar o surgimento de conteúdo harmônico não característico no espectro de frequência da corrente da turbina eólica, especialmente aqueles com ordens harmônicas de baixa frequência. A partir desse cenário, este trabalho tem como foco a exploração dos principais fatores que impactam a geração, aumento, diminuição e propagação de distorções harmônicas de aerogeradores DFIG, que é a tecnologia mais utilizada na geração de energia eólica. Assim, primeiramente, a motivação e justificativa do tema são apresentadas, expondo as condições do sistema de transmissão brasileiro em relação ao nível de distorção harmônica. Em sequência, é detalhado o estado da arte do assunto, enfatizando a investigação de harmônicas não características e os principais fatores que influenciam seu surgimento. Posteriormente, também é realizada uma análise dos principais componentes com características não lineares em uma turbina eólica DFIG, a fim de destacar aspectos relevantes de seu controle e operação, com foco no conteúdo espectral harmônico verificado. Seguindo o desenvolvimento da pesquisa, é realizada uma modelagem computacional de um complexo eólico, que opera no nordeste do Brasil. Além disso, são apresentadas as principais condições para os estudos de caso computacionais, que têm como objetivo investigar a causa do surgimento de harmônicas não características no contexto da geração de energia eólica.

Palavras Chave: distorções harmônicas, qualidade da energia, harmônicas características, harmônicas não características, aerogerador DFIG, conversores *back-to-back*, modelagem computacional.

ABSTRACT

From the recent researches related to sustainable energy exploitation, it is evident that wind energy has been taking an important role in the Brazilian and world energy matrix. Therefore, when considering its integration into the electric system, the literature presents possible impacts on the power quality, especially those related to the injection of harmonic currents into the system by wind turbines. In this context, the operating conditions of the connecting network may imply the emergence of non-characteristic harmonic content in the wind turbine current frequency spectrum, especially those with low-frequency harmonic orders. From this scenario, this work focuses on the exploration of the main factors that impact the generation, increase, decrease and propagation of harmonic distortions from DFIG wind turbines, which is the most used technology in wind power generation. Thus, firstly, the motivation and justification of the theme are presented in general, exposing the Brazilian transmission system conditions concerning the level of harmonic distortions. Then, the-state-of-the-art of the subject is detailed, emphasizing the investigation of non-characteristic harmonics and the main factors that influence their emergence. Later, an analysis of the main components with nonlinear characteristics in a DFIG wind turbine is also performed in order to highlight relevant aspects of its control and operation, focusing on the verified harmonic spectral content. Following the development of the research, it is developed a computational modeling of a wind farm, which operates in the northeastern of Brazil. In addition, the main conditions for the computational case studies are presented, which aim to investigate the cause of the emergence of non-characteristic harmonics in the context of wind power generation.

Keywords: harmonic distortions, power quality, characteristic harmonics, non-characteristic harmonics, DFIG wind turbines, back-to-back converters, computational modeling.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL	21
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
1.2. PROBLEMATIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	26
1.3. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	32
1.4. CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS	33
1.5. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	33
CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE	36
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAS	37
2.2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	37
2.3. HARMÔNICAS NÃO CARACTERÍSTICAS	40
2.4. DIRETRIZES QUANTO ÀS DEMAIS DISTORÇÕES HARMÔNICAS	49
2.5. CONSIDERAÇÕES QUANTO AOS PROCESSOS DE MITIGAÇÃO HARMÔNICA.....	53
2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	54
CAPÍTULO 3. INVESTIGAÇÃO DAS HARMÔNICAS NÃO CARACTERÍSTICAS NO AEROGERADOR DFIG.....	55
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	56
3.2. PRINCIPAIS TOPOLOGIAS DE AEROGERADORES.....	56
3.3. ORIGENS DAS DIFERENTES CONTRIBUIÇÕES HARMÔNICAS NO DFIG.....	60
3.4. NORMATIVAS E RECOMENDAÇÕES NO QUE TANGE AOS NÍVEIS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA CORRELATOS À GERAÇÃO EÓLICA	69
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	74
CAPÍTULO 4. IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO E COMPLEXO EÓLICO	76
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	77
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA REDE INTERNA E REDE EXTERNA	78
4.3. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO COMPLEXO EÓLICO.....	79
4.4. PARAMETRIZAÇÃO DA REDE INTERNA E REDE EXTERNA MODELADOS	86
4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	93

CAPÍTULO 5. ESTUDOS DE CASOS COMPUTACIONAIS E ANÁLISES DE RESULTADOS	94
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	95
5.2. ESTUDOS DE CASOS	95
5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	120
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES	121
ANEXOS	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Fontes de aproveitamento energético da matriz brasileira.	25
Figura 1.2 Níveis de distorção de tensão harmônica total – DTHT.	28
Figura 1.3 Níveis de distorção de tensão harmônica total - DTHT - 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a ordens.	28
Figura 1.4 Níveis de distorção de tensão harmônica total - DTHT – 11 ^a e 13 ^a ordens.	29
Figura 1.5 Níveis de distorção de tensão harmônica total - DTHT - 2 ^a , 4 ^a e 6 ^a ordens.	30
Figura 1.6 Levantamento bibliográfico da temática com respeito as harmônicas não características.	31
Figura 2.1 Sinal periódico genérico de uma onda distorcida.	38
Figura 2.2 (a) Tensões de linha para uma retificador controlado de seis pulsos e tensão na carga resistiva (b) Corrente demandada fase A do retificador (c) Corrente demandada fase B do retificador (d) Corrente demandada fase C do retificador (e) Corrente na carga resistiva.	39
Figura 3.1 Desenvolvimento de turbinas eólicas entre 1980 a 2020.	57
Figura 3.2 Arranjo dos principais componentes de um aerogerador <i>full converter</i> (PMSG).	58
Figura 3.3 Arranjo dos principais componentes de um aerogerador modelo DFIG.	58
Figura 3.4 Principais elementos que contribuem para distorção harmônica injetada pelo DFIG.	60
Figura 3.5 Ilustração da tensão de linha na saída do GSC em operações distintas (a) tensão elo CC adequada (b) baixos níveis de tensão no elo CC.	62
Figura 3.6 Região de operação do conversor.	63
Figura 3.7 Região de operação do conversor GSC, sendo (a) linear, (b) sobremodulação e (c) saturação.	64
Figura 3.8 Tempo morto inserido no chaveamento de uma chave estática (S_1).	65
Figura 3.9 Inter-harmônicos no conversor <i>back-to-back</i> .	66
Figura 3.10 Arranjo do ponto de acoplamento comum entre o parque eólico e a Rede Básica.	71
Figura 3.11 Representação do Lugar Geométrico das admitâncias da Rede Básica pelo (a) Setor Anular e (b) Polígono de “n” Lados.	73
Figura 4.1 Arranjo completo do complexo eólico, transformadores de conexão e transformadores da subestação de fronteira com o SIN.	79
Figura 4.2 Gerador de indução duplamente alimentado com rotor bobinado disponibilizado no software Matlab/Simulink®.	82
Figura 4.3 Configuração do conversor back-to-back disponibilizado no software Matlab/Simulink®.	82
Figura 4.4 Estratégia operacional para a definição de referência para a corrente de eixo direto aplicada no rotor da máquina.	83
Figura 4.5 Estrutura de controle do RSC.	84
Figura 4.6 Descrição do sistema de chaveamento implementado RSC.	84
Figura 4.7 Estrutura de controle do RSC.	85

Figura 4.8 Descrição do sistema de chaveamento implementado GSC.	86
Figura 4.9 Arranjo rede interna Parque Eólico I.	87
Figura 4.10 Arranjo rede interna Parque Eólico II.	87
Figura 4.11 Arranjo rede interna Parque Eólico III.	87
Figura 4.12 Arranjo rede interna Parque Eólico IV.	88
Figura 4.13 Arranjo rede interna Parque Eólico V.	88
Figura 4.14 Arranjo rede externa – Equivalente SIN.	88
Figura 5.1 Sinais na saída do aerogerador (690V) (a)Tensões, (b) correntes, (c) potência ativa e reativa, (d) tensão contínua no barramento CC.	97
Figura 5.2 Forma de onda dos sinais no PAC (69 kV) - (a) Tensões de fase, (b) Correntes de linha.	98
Figura 5.3 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V.	98
Figura 5.4 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I.	99
Figura 5.5 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V - $S_{sc} = 25000$ MVA.	101
Figura 5.6 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 3%.	103
Figura 5.7 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 4%.	103
Figura 5.8 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 3%.	103
Figura 5.9 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 4%.	103
Figura 5.10 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 2% - Magnitude.	106
Figura 5.11 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% - Magnitude.	106
Figura 5.12 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 2% - Ângulo.	106
Figura 5.13 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% - Ângulo.	106
Figura 5.14 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 2% - Magnitude e Ângulo.	106
Figura 5.15 Espectro de tensões harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% - Magnitude e Ângulo.	106
Figura 5.16 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% e DTHT 4%.	108
Figura 5.17 Espectro de correntes harmônicas no PAC – Sem tempo morto – PEs I, II, III, IV e V.	109
Figura 5.18 Espectro de correntes harmônicas no PAC - PEs I, II, III, IV e V – SVPWM.	110
Figura 5.19 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 3% - SVPWM.	112
Figura 5.20 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 4% - SVPWM.	112
Figura 5.21 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 3% - SVPWM.	112
Figura 5.22 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 4% - SVPWM.	112
Figura 5.23 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 2% - Magnitude SVPWM.	114

Figura 5.24 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% - Magnitude SVPWM.	114
Figura 5.25 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 2% - Ângulo SVPWM.	114
Figura 5.26 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% - Ângulo SVPWM.	114
Figura 5.27 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V - FD 2% - Magnitude e Ângulo – SPWM.	114
Figura 5.28 Espectro de tensões harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V FD 3% - Magnitude e Ângulo – SVPWM.	114
Figura 5.29 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% e DTHT 4%.	115
Figura 5.30 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – 30% de potência.	117
Figura 5.31 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – 70% de potência.	117
Figura 5.32 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – 100% de potência.	117
Figura 5.33 Espectro de correntes harmônicas no PAC – 69kV – PE I, II, III, IV e V.	118
Figura 5.34 Espectro de correntes harmônicas no PAC – 230kV – PE I, II, III, IV e V.	118
Figura 5.35 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V- VTCD.	119
Figura 5.36 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V- Variação de Frequência	119

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – CAPACIDADE GERAÇÃO EÓLICA INSTALADA NO BRASIL – DADOS REFERENTES A 13/12/2019 (ABEEÓLICA).	24
TABELA 1.2 – CAPACIDADE GERAÇÃO EÓLICA INSTALADA – ANO BASE 2018 – CONTEXTO MUNDIAL.	24
TABELA 3.1 – LIMITES INDIVIDUAIS PARA OS INDICADORES DTHI E DTHT95%.	71
TABELA 3.2 – CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE CONCORDÂNCIA.	72
TABELA 4.1 – PARÂMETROS DOS AEROGERADORES DFIG UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.	89
TABELA 4.2 – PARÂMETROS DOS TRANSFORMADORES DO AEROGERADOR.	90
TABELA 4.3 – EQUIVALENTES ELÉTRICOS DOS TRANSFORMADORES DO AEROGERADOR IMPLEMENTADOS NA MODELAGEM.	90
TABELA 4.4 – PARÂMETROS DOS TRANSFORMADORES ELEVADORES – PÉS I, II, III, IV, V.	90
TABELA 4.5 – EQUIVALENTES ELÉTRICOS DOS TRANSFORMADORES ELEVADORES – PARQUES EÓLICOS II, IV E V.	91
TABELA 4.6 - EQUIVALENTES ELÉTRICOS DOS TRANSFORMADORES ELEVADORES – PARQUES EÓLICOS I E III.	91
TABELA 4.7 – PARÂMETROS DOS TRANSFORMADORES DA SUBESTAÇÃO.	92
TABELA 4.8 - EQUIVALENTES ELÉTRICOS DOS TRANSFORMADORES ELEVADORES – PARQUES EÓLICOS I E III.	92
TABELA 4.9 - NÍVEL DE CURTO - SUBESTAÇÃO 230 KV.	92
TABELA 4.10 - EQUIVALENTES ELÉTRICOS - SUBESTAÇÃO 230 KV.	92
TABELA 5.1 - DISTORÇÃO PRÉVIA NA MAGNITUDE E ÂNGULOS NULOS.	102
TABELA 5.2 - DISTORÇÃO PRÉVIA NA MAGNITUDE E ÂNGULOS NÃO NULOS.	102
TABELA 5.3 VALORES DE TENSÃO DE FASE PARAS OBTENÇÃO DO PERCENTUAL DE FD NO RESPECTIVO ESTUDO DE CASO.	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica;
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;
BIG – Banco de Informações de Geração;
CA – Corrente alternada;
CC – Corrente contínua;
CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica;
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica;
DFIG – *Double Fed Induction Generator*;
DTHT – Distorção Total Harmônica de Tensão;
GS – Geradores Síncronos;
FD – Fator de Desequilíbrio;
FMM – Força Magnetomotriz;
FEM – Força Eletromotriz;
GWEC – *Global Wind Energy Council*;
GSC – *Grid Side Converter*;
HVDC – *High Voltage Direct Current*;
LC – Indutor-Capacitor;
LCL – Indutor-Capacitor-Indutor;
LG - Lugar Geométrico;
MPPT – *Maximum Power Point Tracking*;
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*;
IEC – *International Electrotechnical commission*;
IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*;
IoT – *Internet of things*;
QEE – Qualidade da Energia Elétrica;
REV – Revisão;
RN – Rio Grande do Norte;
RSC – *Rotor Side Converter*;
SEP – Sistemas Elétricos de Potência;
SIN – Sistema Interligado Nacional;
SPWM – *Sinusoidal Pulse Width Modulation*;

SM – Submódulo;
SVPWM – *Space Vector Pulse Width Modulation*;
ONS – Operador Nacional do Sistema;
PAC – Ponto de Acoplamento Comum;
PMSG – *Permanent Magnet Synchronous Generator*;
PWM – *Pulse Width Modulation*;
LCL – Indutor-Capacitor-Indutor;
VSC – *Voltage Source Converter*;
VTCD – Variação de Tensão de Curta Duração;
WRSG – *Wound Rotor Synchronous Generator*;



NÚCLEO DE QUALIDADE
DA ENERGIA ELÉTRICA

CAPÍTULO 1

Neste capítulo inicial tem-se a problematização, justificativa e definição dos objetos que norteiam este trabalho, tais discussões são firmadas acerca das distorções harmônicas e seus níveis atuais na rede básica nacional. Nesse sentido, em um primeiro momento, explora-se a sua contextualização com atenção àquelas distorções atípicas do sistema elétrico. Em sequência, com esse foco, é firmada a importância da temática diante de um correlato levantamento bibliográfico. Por fim, apresenta-se as contribuições e a forma estrutural do texto.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O conceito físico de energia mostra-se um tanto abstrato em seu aspecto teórico, conquanto, perceptível ao toma-lo em suas várias formas, sobremaneira, no que se refere aos princípios de sua lei de conservação (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2006).

De fato, a energia elétrica ocupa lugar de destaque perante outras formas de energia, sobremaneira, por apresentar facilidade de transporte em longas distâncias, de forma limpa, contínua e segura, bem como, por ser um relevante instrumento de fomento às cadeias industriais em seus diversos nichos. Ademais, figura-se ainda como um ente fundamental ao desenvolvimento e uso dos modernos equipamentos eletrônicos, eletrodomésticos e eletroportáteis, notadamente presentes em um expressivo percentual de residências no país. Assim, inserido neste contexto, por certo, a energia elétrica caracteriza-se como um produto de extrema importância tecnológica, social e econômica.

Nesse sentido, aspectos operacionais relacionados à sua geração, transmissão, distribuição e consumo são de extrema importância perante a constante modernização dos sistemas elétricos de potência, os quais estão cada vez mais permeados com dispositivos não lineares (DRABEK, P., 2013). Diante desse cenário, avaliar e minimizar o impacto de tais equipamentos, sabidamente causadores de distúrbios nocivos à rede, passou a ser matéria de uma importante área da engenharia elétrica, propiciando o desenvolvimento e alicerces da então denominada Qualidade da Energia Elétrica (QEE) (DUGAN et al., 2004).

Com efeito, inserido na problemática dos distúrbios degradantes do sistema elétrico, tem-se o óbice das distorções harmônicas. Tal fenômeno, via de regra, caracteriza-se por deformações na forma de onda das tensões e/ou correntes, as quais são compostas por componentes de frequências múltiplas inteira da fundamental,



denominadas harmônicas características e não características (ARRILLAGA et al., 1997)(ARRILLAGA; WATSON, 2003).

Ademais, existem aquelas não múltiplas inteiras em relação ao sinal fundamental, chamadas de inter-harmônicas (TESTA et al., 2007) e sub-harmônicas (GNACIŃSKI et al., 2019), aquelas advindas dos processos de chaveamentos em alta frequência de conversores eletrônicos, nominadas supra-harmônicas (ALFIERI et al., 2019) e ainda as caracterizadas como harmônicas espaciais (GORGINPOUR; JANDAGHI; ORAEE, 2011), as quais relacionam-se com a disposição dos enrolamentos na topologia construtiva de máquinas elétricas.

Diante dessa temática, observa-se um crescente incremento de sistemas com características não lineares, atrelados com a modernização e diversificação dos meios de geração de energia elétrica (ZHONG; HORNIK, 2013)(BOLLEN et al., 2012), sobremaneira, através da inserção de complexos eólicos e fotovoltaicos. O primeiro está materializado em expressivos percentuais de crescimento no Brasil, conforme evidenciado pelo Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Tal órgão regulador aponta que, no mês de janeiro de 2020, os empreendimentos de geração eólica alcançaram 631 complexos em operação, ademais, tem-se um montante de 95 parques eólicos em construção e 142 previstos com obras ainda não inicializadas, correspondendo, respectivamente, a uma potência associada de 15.397.853 kW, 2.800.505 kW e 4.723.510 kW (ANEEL, 2020).

É relevante salientar, que a notória ampliação do número de empreendimentos na geração eólica propiciou um aumento de cerca de 14,6% de potência instalada no ano de 2018 (ABEEÓLICA, 2018), alcançando ainda uma produção recorde em agosto de 2019 (CCEE, 2019), com um crescimento médio de 22,7% de geração em relação ao mesmo mês do último ano, dados que ratificam a importância dos estudos porvir desta dissertação.

No tocante à localização dos parques eólicos brasileiros, em dezembro do ano de 2019, a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), por meio de seu informativo Infovento nº14, apontou sua maior concentração na região nordeste do país, sendo o estado do Rio Grande do Norte (RN) detentor da maior capacidade instalada em megawatts (4.159,5 MW), com um total de 154 parques. A Tabela 1.1 expõe a

concentração e distribuição dos parques eólicos no território brasileiro, bem como sua capacidade de potência instalada nos estados que as acomodam (ABEEÓLICA, 2019).

TABELA 1.1
CAPACIDADE GERAÇÃO EÓLICA INSTALADA NO BRASIL – DADOS REFERENTES A 13/12/2019 (ABEEÓLICA)

Estado Brasileiro	Potência (MW)	Número de Parques
Rio Grande do Norte	4.159,5	154
Bahia	4.074,4	165
Ceará	2.045,5	79
Rio Grande do Sul	1.831,9	80
Piauí	1.638,1	60
Pernambuco	782,0	34
Maranhão	426,0	15
Santa Catarina	238,5	14
Paraíba	157,2	15
Sergipe	34,5	1
Rio de Janeiro	28,1	1
Paraná	2,5	1

Alinhado às observações supracitadas, no cenário mundial, vê-se ainda uma posição de destaque do Brasil, tal fato alicerçado nos dados relatados pelo *Global Wind Energy Council* (GWEC) em abril de 2019 (WIND; COUNCIL, 2019), os quais indicam que o Brasil estava entre os seis países com maior capacidade de geração instalada em 2018. Denotando a expressiva participação brasileira no setor. A Tabela 1.2 apresenta as referidas informações.

TABELA 1.2
CAPACIDADE GERAÇÃO EÓLICA INSTALADA – ANO BASE 2018 – CONTEXTO MUNDIAL

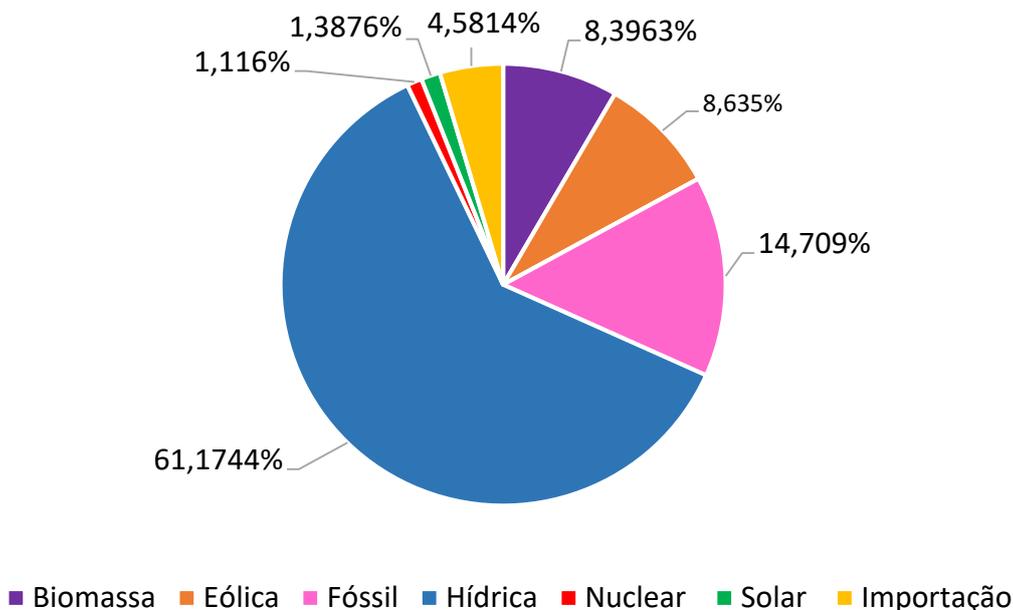
País	Potência (MW)
China	206.804
Estados Unidos	96.635
Alemanha	53.180
Índia	35.129
França	15.307
Brasil	14.707

Vale salientar que a matriz energética nacional é majoritariamente composta de meios de aproveitamento energético hídrico, com percentuais atuais de 61,1744%, outra parcela significativa corresponde a usinas termoelétricas por meio de combustíveis fósseis, atualmente com um 14,709% (ANEEL, 2020). A Figura 1.1 aponta a composição



e percentual dos meios de geração de energia elétrica que compõe, atualmente, a matriz energética brasileira.

Figura 1.1 Fontes de aproveitamento energético da matriz brasileira.



Fonte: Adaptado de BIG – ANEEL – 05/02/2020.

A expressiva geração por meio de hidroelétricas e termoelétricas conforme a figura anterior, por certo, é devido ao considerável potencial hídrico que o país possui, bem como pela rápida implementação de termoelétricas, somado ao alto custo de expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN). Todavia, de um modo geral, é notório o anseio mundial por meios de geração renováveis e sustentáveis, fomentando assim o mercado interno nacional para a expansão de complexos eólicos e outras fontes de energia limpa.

Embasados nos dados anteriormente apontados, é fato que estudos voltados à avaliação de impacto das tecnologias de geração de energia elétrica por meio da potência cinética dos ventos correspondem a uma demanda atual da engenharia elétrica.

Imerso nesse prisma de matização e expansão da capacidade de aproveitamento eólico na matriz energética brasileira, análises mostram-se extremamente necessárias, a fim de avaliar os efeitos decorrentes de sua inserção, principalmente com respeito ao perfil de correntes harmônicas injetadas na rede. Essa demanda materializa-se no fato de tal tecnologia de geração renovável viabilizar-se pelo interfaceamento e controle de

conversores advindos da moderna eletrônica de potência e dos dispositivos semicondutores que os compõem (SIMÕES; FARRET, 2016)(TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011).

Nesse sentido, vale ressaltar que as tecnológicas turbinas eólicas manifestam-se como potenciais fontes harmônicas de baixa frequência, expondo ainda em seu espectro ordens harmônicas atípicas, perante sua topologia e controle (LIU, Z. et al., 2017b)(XU et al., 2018)(PRECUP; KAMAL; HASSAN, 2019). Por certo, nessa seara, trabalhos voltados para tratativa das harmônicas denominadas características possuem uma sólida exploração no meio científico, de outro modo, nota-se lacunas e novos desafios no que se refere às harmônicas não características.

No tocante a esses desafios encontra-se a temática principal desta dissertação, a qual é centrada no campo das harmônicas não características e sua investigação no contexto da geração eólica, a fim de avaliar os diferentes aspectos que as originam e/ou intensificam, bem como, distinguir os principais fatores de influência e impactos quanto às condições prévias de operação da rede acessada e os aspectos correlatos à sua propagação. Para tanto, as análises dar-se-ão por meio de modelagens computacionais de um complexo eólico real em operação no estado do RN. Tais questões representam a temática principal deste trabalho.

Com intuito de propiciar um panorama da pesquisa a ser desenvolvida apresenta-se a seguir um delineamento da problematização, justificativa e objetivo geral do trabalho, subsequentemente, aborda-se fatores relevantes quanto aos níveis de distorção harmônica da rede básica, escopo dessa pesquisa acadêmica. Por fim, em complemento a esses itens principais, são apresentadas as contribuições alcançadas e a estrutura dos capítulos da presente pesquisa.

1.2. PROBLEMATIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA

Com atenção às questões supracitadas e diante da intensificação da inserção de geração renovável de energia por meio dos ventos, pontos cruciais permeiam os processos de gerenciamento correlatos à QEE. Nesse contexto destacam-se os níveis de pré-distorção em que se encontra a rede e sua relação com o surgimento e/ou intensificação de harmônicas não tipicamente encontrados no sistema.



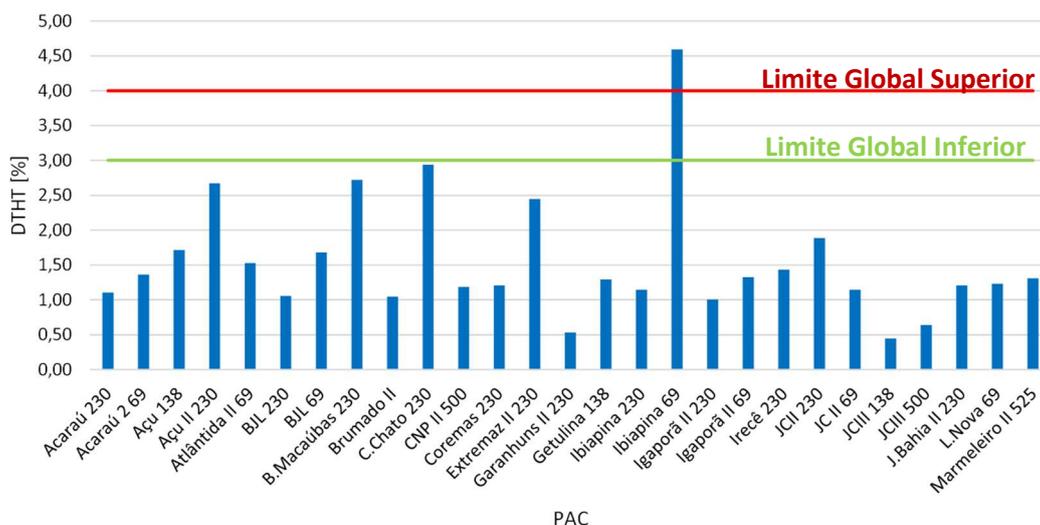
Tais questões merecem atenção e estão intimamente relacionadas com os objetivos aqui pretendidos, haja vista o comportamento distinto de aerogeradores quanto à contribuição harmônica de corrente injetada na rede acessada em função das características do ponto de conexão, devido ao seu dinamismo intrínseco. Outras questões que permeiam o limiar dessa pesquisa, de forma complementar, tipificam-se nas correntes certificadas fornecidas pelos fabricantes de aerogeradores. Essas, por sua vez, mostram-se extremamente questionáveis por serem baseadas em critérios ideais de operação, podendo divergir da realidade encontrada em campo (LIMA, 2019).

Cientes dos problemas ora apontados, com intuito de apresentar uma perspectiva mais realista da situação do SIN, as Figuras 1.2 a 1.5 denotam a situação atual da rede básica em termos de distorções totais de tensão. Estes dados são baseados em campanhas de medição de tensão e fazem parte do banco de dados do Operador Nacional do Sistema (ONS), os quais pode ser diretamente solicitados ao Operador (ONS, 2019).

Todavia, é de extrema importância ressaltar que parcela do perfil de distorção notado atualmente na rede básica, pode corresponder à propagação do conteúdo harmônico originado nos sistemas de distribuição de energia elétrica que possuem interface com os barramentos de competência do ONS. De fato, tal situação enseja cuidados e expõe quão necessário é a consideração dos níveis de pré-distorção de tensão e/ou corrente (*background distortion*) que se encontra os barramentos do SIN, justificando os estudos porvir.

Com base nas pontuações anteriores, apresenta-se na Figura 1.2, os níveis de distorção total harmônica de tensão (DTHT) para um conjunto de barramentos da rede básica. Nesse sentido, é esboçado em verde o limite global inferior (3%) e em vermelho o limite global superior (4%), obtidos através das campanhas de medição realizadas pelos agentes acessantes conforme o Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2016b), sendo que suas aplicações permeiam o ponto de acoplamento comum (PAC) entre a rede externa (rede básica) e a rede interna (agente eólico). A luz desses fatos, nota-se que certos barramentos se encontram com níveis de DTHT próximos ao limite global inferior, sendo que o barramento de Ibiapina superou o limiar estimado para o limite global superior.

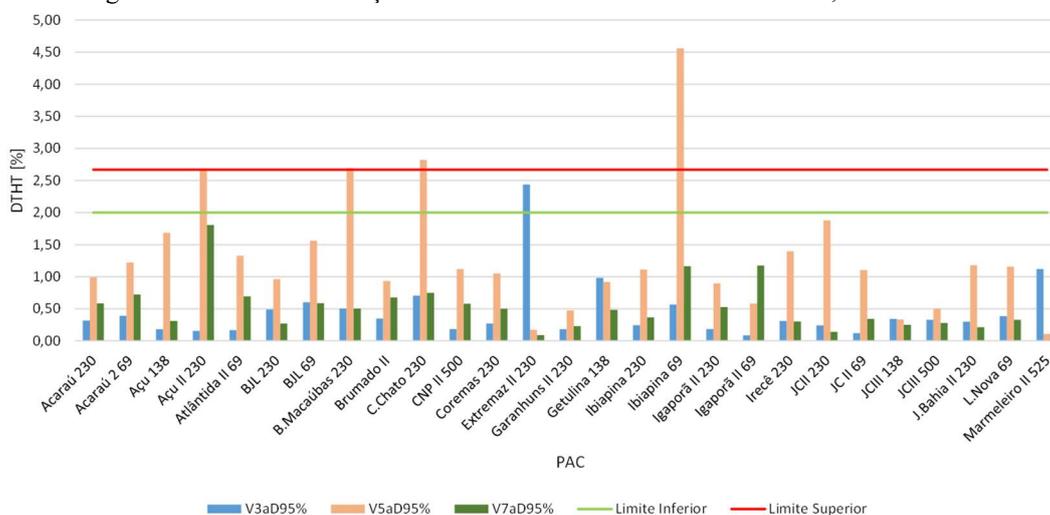
Figura 1.2 Níveis de distorção de tensão harmônica total – DTHT.



Fonte: Operador Nacional do Sistema - ONS.

No que se refere aos níveis de 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas, a Figura 1.3 denota uma expressiva poluição referente aos percentuais de 5ª ordem, cujos barramentos de Açu II, Brotas de Macaúbas, Cerro Chato e Ibiapina já superam os limites globais individuais inferiores, sendo que os dois últimos encontram-se acima dos limites de distorção global individual superior para tal ordem. Adido a essa situação, no que se refere aos percentuais de 7ª ordem, visualiza-se que o barramento de Açu II se encontra com nível próximo ao limite inferior. Destaca-se, ainda, níveis relevantes da 3ª ordem harmônica com violação do limite inferior no barramento de Extremaz II.

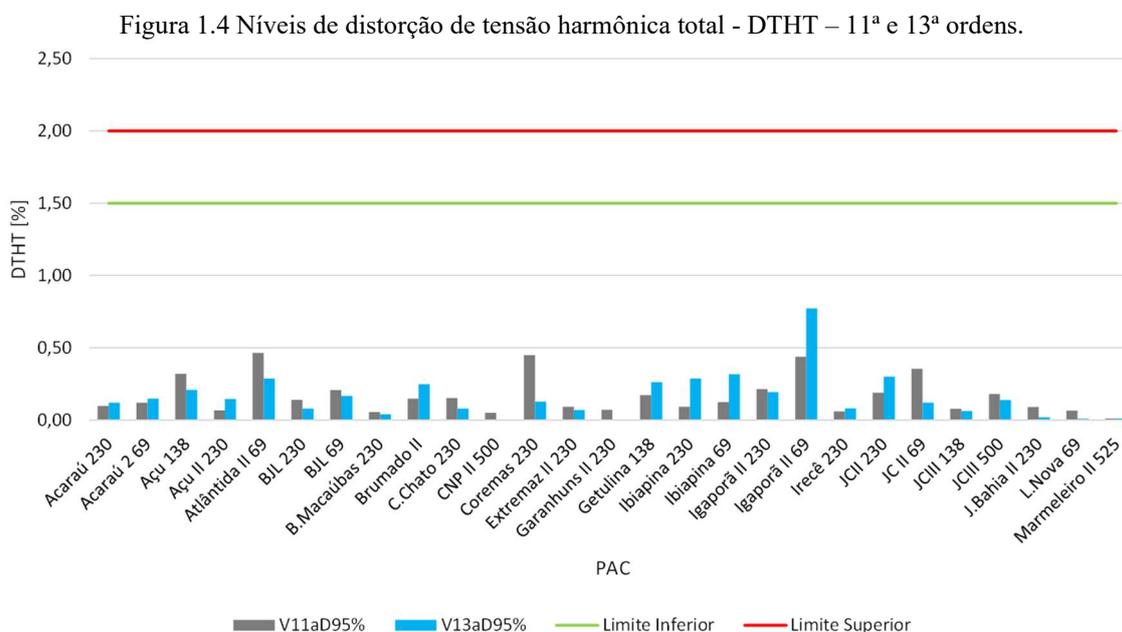
Figura 1.3 Níveis de distorção de tensão harmônica total - DTHT – 3ª, 5ª e 7ª ordens.



Fonte: Operador Nacional do Sistema - ONS.

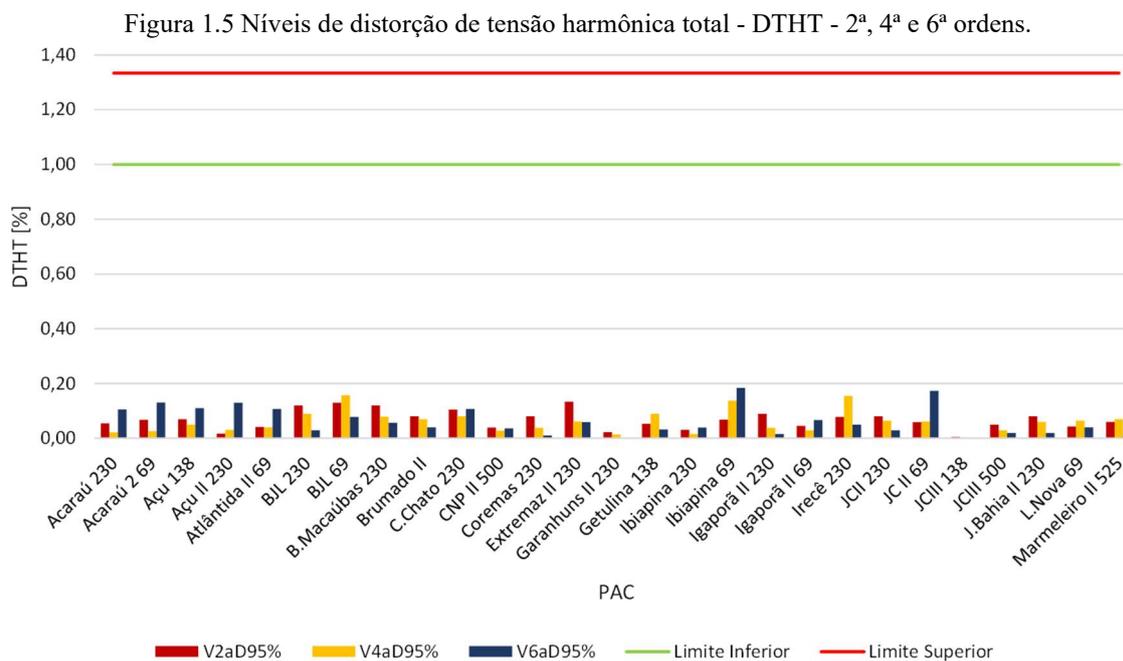


No que tange aos níveis de 11^a e 13^a ordens, constata-se que os percentuais totais de distorção de tensão não apresentam problemas para o sistema, conforme é denotado na Figura 1.4, a seguir.



Fonte: Operador Nacional do Sistema - ONS.

Com relação aos níveis mensurados de 2^a, 4^a e 6^a ordens, expostos na Figura 1.5, pode-se concluir que estes não possuem percentuais significativos. Todavia, vale ressaltar que a presença de tais perfis atípicos de distorção na tensão implica na presença de respectivas correntes de mesma ordem no PAC. Isto posto, a depender das características da rede, possíveis ressonâncias em tais ordens podem ser percebidas corroborando para problemas operativos e queima de equipamentos. Outro fator meritório de destaque relacionado a tais harmônicas não características de baixa frequência, denota-se na dificuldade em implementação de filtros harmônicos, esbarrando em termos financeiros e construtivos.

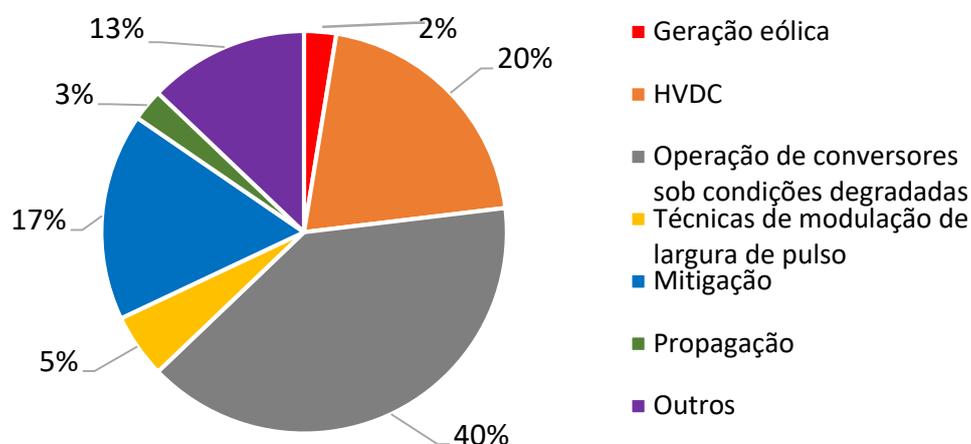


A partir dos dados apresentados nas Figuras 1.2 a 1.5, pode-se concluir que o perfil de distorção harmônica total de tensão nos barramentos analisados da rede básica encontra-se com níveis expressivos na 5^a ordem, apontando ainda consideráveis percentuais correspondentes à 7^a e 3^a ordens harmônicas. Conquanto, no que tange as ordens pares, nota-se a presença de uma composição em baixa frequência com percentuais pouco significativos, todavia, atenção à presença de tais frequências e sua influência devem ser ponderadas, principalmente pelo fato de sua pouca exploração no campo das distorções harmônicas nos sistemas elétricos de potência (SEP).

Nesse sentido, identifica-se que pesquisas e publicações a nível nacional e internacional têm sido realizadas acerca da geração e incremento das harmônicas ditas características, bem como, dos efeitos nocivos aos sistemas advindos da sua propagação. Contudo, no que se refere àquelas distorções entendidas como não características, conforme já pontuado, investigações e estudos mostram-se necessários, a julgar pelo conteúdo incipiente da temática contido na literatura atual, conforme é indicado na Figura 1.6.



Figura 1.6 Levantamento bibliográfico da temática com respeito às harmônicas não características.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A supracitada figura denota uma síntese do levantamento bibliográfico realizado na principal plataforma de pesquisa de trabalhos técnicos voltados à área de engenharia elétrica (IEEE, 2020). Ao ser pesquisado o termo “*non-characteristic harmonics*”, a referida plataforma, em janeiro de 2020, retorna um montante com pouco mais de 79 artigos técnicos específicos às investigações de distorções harmônicas não características em um contexto macro.

Imerso nesse cenário, reconhece-se que os trabalhos alicerçados neste viés, em sua maioria, tratam a operação de conversores eletrônicos sob diferentes perspectivas de operação, configuração e controle, sendo, de certa forma, incipiente a quantidade de trabalho dedicado especificamente à exploração harmônica não característica na geração eólica. Nesse sentido, conduzir-se-á no próximo capítulo uma avaliação dos principais trabalhos correlatos à temática principal desta dissertação e seu atual estado da arte.

Cabe pontuar que o distúrbio das distorções harmônicas, no que se refere à QEE, relaciona-se não somente com os processos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, mas também com o perfil de operação do sistema. Nessa perspectiva, de uma forma geral, será destacado no tópico em sequência os principais objetivos almejados neste trabalho.

1.3. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Diante das considerações anteriormente apontadas, o objetivo geral deste trabalho consiste em contribuir com os estudos relacionados à temática da injeção harmônica não característica provida por parques eólicos, em específico, com relação à operação de um aerogerador modelo *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) e investigar os fatores de influência e impacto, perante às condições da rede de acesso.

Cabe pontuar que o fenômeno das distorções harmônicas, no que se refere à QEE, relaciona-se não somente com os processos de suprimento elétrico, mas também com o perfil de carregamento do sistema, situação essa que elenca diversos fatores, a julgar as condições de operação não ideais do sistema. Nesse contexto, no que tange às condições de operação degradadas do sistema acessado, tratar-se-á uma gama de fatores de influência e impacto, a fim de avaliar aqueles com maior relevância quanto a origem, incremento/decremento do conteúdo harmônico não característico percebido no PAC entre o agente gerador e a rede básica. Assim sendo, os fatores degenerativos de operação versarão:

- Quanto a condições não degradadas de funcionamento;
- Quanto a influência do número de parques;
- Quanto ao nível de curto-circuito do sistema acessado;
- Quanto ao nível de distorção harmônica pré-existente na rede;
- Quanto ao nível de desequilíbrio pré-existente na rede;
- Quanto a influência da inserção do tempo morto no chaveamento;
- Quanto a influência do controle de chaveamento dos conversores;
- Quanto a potência de operação e despacho;
- Quanto a propagação harmônica;
- Quanto a fenômenos de variação momentânea e/ou temporária;



Com atenção às análises supracitadas que delimitam o objetivo geral desta pesquisa e cientes da necessidade dos estudos pertinentes, apresenta-se a seguir as principais contribuições oferecidas por esta dissertação, alinhados aos objetivos e aspectos anteriormente dissertados.

1.4. CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS

À luz da contextualização feita, deve-se reconhecer como contribuições oferecidas por este trabalho os pontos destacados a seguir:

- Uma complementação do estado da arte envolvendo as harmônicas não características em um contexto macro.
- Investigação da geração, incremento e propagação das harmônicas não características advindas de um aerogerador modelo DFIG.
- Avaliação de distintos fatores de impacto no que tange às condições de operação da rede perante à geração harmônica não característica, por meio de estudos de casos computacionais.

1.5. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Uma vez constatadas as implicações ora expostas, além do texto introdutório pautado na problematização, justificativa e alinhamento geral dos objetivos correlatos ao conteúdo principal desta dissertação, tem-se os demais capítulos estruturados da seguinte maneira:

Capítulo 2 – Estado da Arte

Neste capítulo será abordado o estado da arte das distorções harmônicas no contexto dos sistemas elétricos de potência, adicionado os aspectos teóricos de sua propagação. Tal tema mostra-se de extrema relevância nos estudos de QEE, a julgar pelo alto e crescente incremento de dispositivos com características não lineares providos pela modernização do sistema elétrico. Nesse sentido, aspectos relacionados às diversas classificações dos

sinais distorcidos serão abordados, integrando suas causas, principais fatores de influência e efeitos.

Capítulo 3 – Investigação das Harmônicas não Características no Aerogerador DFIG

O presente capítulo apresentará estudos correlatos a único aerogerador DFIG. Para tanto, os principais componentes de sua topologia são abordados, objetivando uma análise pormenorizada do espectro de correntes harmônicas gerado, com atenção àquelas ditas como não características e sua propagação pelos principais equipamentos que compõe a mencionada tecnologia, quais sejam, gerador de indução duplamente alimentado, conversor do lado do rotor (*Rotor Side Converter* - RSC), conversor do lado da rede (*Grid Side Converter* - GSC) e rede acessada.

Capítulo 4 – Identificação e Modelagem Computacional do Sistema Elétrico e Complexo Eólico

Este capítulo apresenta as principais premissas quanto a caracterização e modelagem do complexo eólico e rede de acesso implementados no software *Matlab/Simulink*®. Tendo por objetivo, atender aos estudos de caso relacionados e descritos no capítulo 5.

Capítulo 5 – Estudos de Casos Computacionais e Análises dos Resultados

Em sequência ao conteúdo dissertado nos capítulos anteriores, neste estágio, apresentar-se-á uma série de estudos de casos computacionais, com o objetivo de avaliar o impacto de distintos fatores de influência no conteúdo harmônico não característico gerado pela operação do complexo eólico. Assim, as premissas de cada caso serão discutidas, com posterior análises dos resultados mediante aos espectros de frequência harmônica que serão obtidos.

Capítulo 6 – Conclusões

Por fim, o capítulo em questão exhibe as principais conclusões quanto ao trabalho realizado, sintetizando as análises conclusivas apresentadas nos tópicos anteriores, bem como tecendo as principais contribuições alcançadas e possíveis sugestões de trabalhos futuros.



Anexos

Trata-se de informações correlatas aos capítulos anteriores.

Referências Bibliográficas

Neste é apontado o referencial bibliográfico utilizado no desenvolvimento desta dissertação.

CAPÍTULO 2

No presente capítulo, reconhecendo a importância da temática cerne deste trabalho, abordar-se-á o estado da arte acerca das origens das distorções harmônicas não características no contexto dos sistemas elétricos de potência. Tal tema mostra-se de extrema relevância nos estudos de QEE, a julgar pelo exponencial incremento de dispositivos não lineares com potencial de geração deste tipo de distorção. Nesse sentido, aspectos relacionados às diversas classificações dos sinais distorcidos serão abordados, integrando suas causas, principais fatores de influência e impacto, bem como, processos correlatos a mitigação harmônica.

CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAS

Face ao exposto no capítulo introdutório, no tocante à temática das distorções harmônicas, poder-se-ia caracteriza-las em distintos ramos da ciência. Sua presença, por exemplo, é comum nos sistemas mecânicos vibrantes, como nos vários modos naturais de oscilação de uma corda, os quais podem ser combinados em proporções distintas e bem definidas (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2006).

Reconhecendo que a teoria das distorções harmônicas se apresenta como um tema de grande interesse perante propriedades não lineares de supridores e consumidores da matriz energética, é importante salientar que esta matéria possui um sólido desenvolvimento no meio científico (ARRILLAGA et al., 1997)(ARRILLAGA; WATSON, 2003)(DUGAN et al., 2004). Não obstante, no que se refere as harmônicas não características, estudos mostram-se necessários devido a incipiência atual de resultados científicos, relacionados aos meios renováveis de geração de energia e os principais equipamentos de suas topologias. Alinhadas a essas observações, o presente capítulo tem por desígnio apresentar o estado da arte das distorções harmônicas na literatura atual, sobretudo, naquelas tipificadas como harmônicas não características.

2.2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

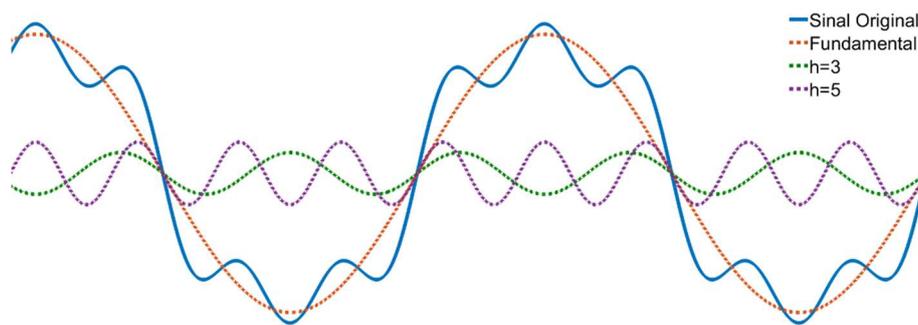
Face ao prisma inicial, vale ressaltar que tais distorções nos sinais de tensão e/ou corrente, podem ser decompostos em ondas periódicas com frequências múltiplas inteiras do sinal fundamental, com aplicação de teorias matemáticas amplamente alicerçadas no meio acadêmico, engendrando os estudos referentes às denominadas “componentes harmônicas”. Outrossim, tais distorções podem também ser decompostas em sinais com



frequências não múltiplas inteiras do sinal fundamental, as quais, de forma complementar, também serão abordadas nesta etapa.

Tendo o intuito de apresentar de forma didática o fenômeno das distorções harmônicas em um sinal genérico, apresenta-se na Figura 2.1 um sinal distorcido e as componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordens que o compõe, juntamente com a fundamental em 60 hertz. Denota-se que o sentido físico materializado na referida figura se configura no fato que a partir do somatório do sinal fundamental e demais componentes harmônicas consegue-se compor o sinal original distorcido, de mesmo modo, partindo do sinal distorcido obtém-se as componentes harmônicas.

Figura 2.1 Sinal periódico genérico de uma onda distorcida.



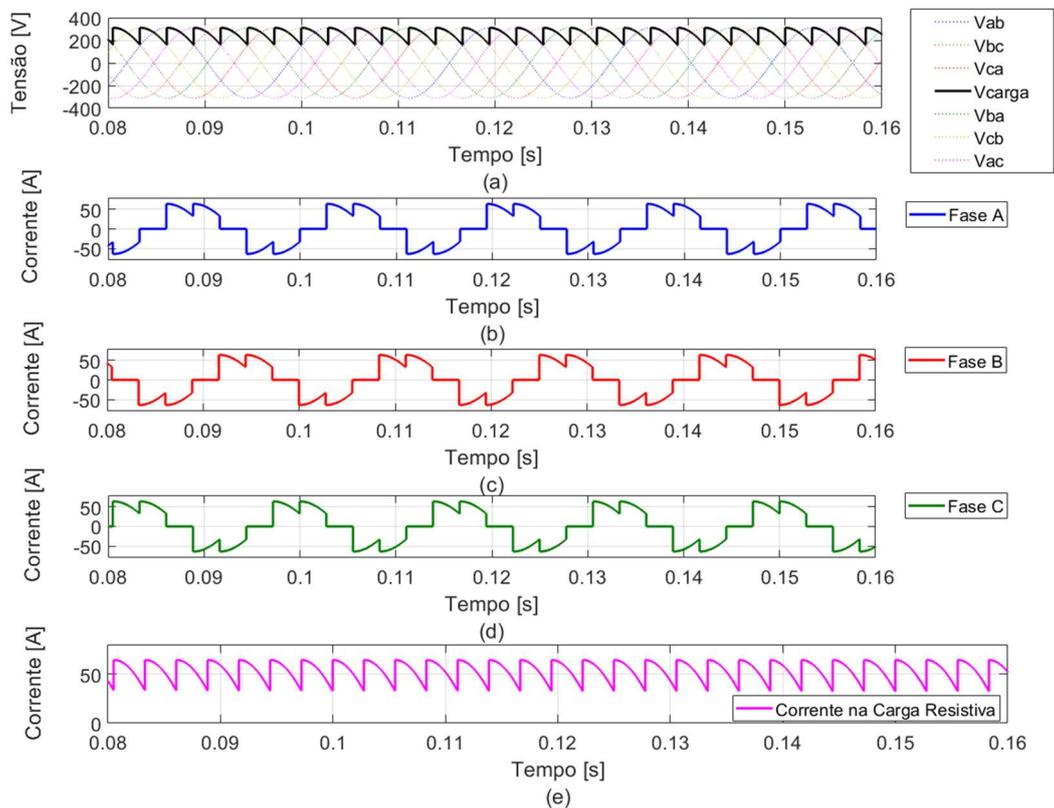
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Logo, diante de tais apontamentos, por certo, solidamente já estudados na academia, as componentes harmônicas oriundas de um determinado sinal causam efeitos prejudiciais aos entes que compõe o sistema elétrico, ensejando problemas relacionados principalmente a estresse térmico e dielétrico de equipamentos, dentre os quais, de forma geral, pode-se citar: mal funcionamento operacional, desligamentos não programados, sobreaquecimento, possíveis ressonâncias harmônicas, vibrações mecânicas, interferência em sistemas de controle, dentre outros fatores que podem prejudicar o desempenho operacional e vida útil de equipamentos (DUGAN et al., 2004), uma vez que estes são projetados para operar com um suprimento puramente senoidal.

Nesta seara, pode-se afirmar que, dentre os principais dispositivos degradantes das grandezas elétricas, encontram-se os equipamentos advindos da eletrônica de potência moderna que, via de regra, são responsáveis pela injeção de correntes altamente

distorcidas na rede. Deste modo, a fim de visualizar o efeito não linear em um sistema dotado por dispositivos eletrônicos, mostra-se oportuno uma análise no processo de funcionamento de uma chave estática semicondutora, elemento base para concepção dos conversores eletrônicos de potência. Para tanto, um circuito de um retificador controlado de seis pulsos é utilizado, o qual possui um carregamento perfeitamente linear (carga resistiva). Pontua-se que o disparo das chaves estáticas corresponde a um ângulo de 30 graus, tal como ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 (a) Tensões de linha para uma retificador controlado de seis pulsos e tensão na carga resistiva (b) Corrente demandada fase A do retificador (c) Corrente demandada fase B do retificador (d) Corrente demandada fase C do retificador (e) Corrente na carga resistiva.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Com atenção ao exemplo exposto na figura anterior, percebe-se que a corrente elétrica requerida pelo retificador possui uma característica de não linearidade intrínseca ao seu funcionamento, nesse sentido, a corrente requerida é pulsada e não constante, sendo intimamente relacionada com a topologia do conversor e o ângulo de disparo empregado.



Consequentemente, tal corrente distorcida afeta o perfil de tensão ao interagir com a impedância do sistema, se não houvesse a presença do conversor no sistema, ou seja, apenas a fonte supridora e carregamento resistivo, a corrente demanda pela carga seria perfeitamente linear. Em suma, o processo de controle de pulsos, alinhado à característica do chaveamento proporcionada pelo retificador controlado, viabiliza ou não o caminho da corrente demandada pela carga, resultando em um sinal de corrente altamente distorcido.

Tendo em mente essa característica é válido destacar, a grosso modo, o avanço tecnológico atual, impulsionado pelo maior acesso da população à bens de consumo tecnológicos. Destaca-se igualmente a modernização da matriz energética retratada em um aumento substancial dos processos de automação e controle, adidos à implementação de redes elétricas inteligentes (*Smart grids*), além dos novos desafios apresentados pela indústria 4.0 e tecnologias baseadas nos recursos de internet das coisas (*Internet of Things* - IoT)(GOMATHI et al., 2018), fazendo com que a cada dia a eletrônica de potência assuma ainda mais espaço no meio técnico e científico.

Cabe pontuar também que consideráveis desenvolvimentos percebidos nos sistemas de energia elétrica foram e são viabilizados com tecnologias advindas do beneficiamento de semicondutores e conversores eletrônicos de alta potência, a citar, os processos de armazenamento de energia (DÍAZ-GONZÁLEZ; SUMPER; GOMIS-BELLMUNT, 2016), a interligação por meio de linhas de transmissão de corrente contínua (K. SOOD, 2004), a geração renovável de energia por meio de complexos eólicos e fotovoltaicos (TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011), a inserção de veículos elétricos e infraestrutura da rede para os processos de seu carregamento (XUAN et al., 2019), reiterando a constante e expressiva penetração de dispositivos não lineares na rede.

2.3. HARMÔNICAS NÃO CARACTERÍSTICAS

Com o propósito de embasar o estado da arte da temática principal deste trabalho, realizou-se um levantamento sistêmico da literatura atinente ao tema. Conforme exposto no capítulo introdutório, grande percentual da bibliografia existente corresponde à operação de conversores sob diversas condições degradadas. Outra parcela significativa

aborda pesquisas voltadas para exploração das harmônicas não características no nicho de transmissão em corrente contínua. Assim sendo, é válido e justificável a contextualização dos sistemas ora apresentados, a fim de nortear aqueles que possuem uma relação íntima e contributiva com os estudos correlatos à geração harmônica não característica oriunda de parques eólicos, haja vista que tais tecnologias perfazem o uso de conversores em sua topologia.

Nesse sentido, alinhado às vertentes discorridas anteriormente, os tópicos que seguem apresentam as principais linhas de pesquisa relacionadas à geração harmônica não característica.

i. Em sistemas de transmissão em corrente contínua

Os primeiros estudos aplicados ao contexto das distorções harmônicas não características datam de meados da década de 70, com a viabilização da transmissão de energia em corrente contínua em alta tensão (*High Voltage Direct Current - HVDC*). O desenvolvimento dos elos em corrente contínua trouxe em seu escopo a preocupação com a degradação de requisitos relacionados à QEE, haja vista que tal tecnologia é viabilizada por conversores eletrônicos de alta potência. Nesse interim, estudos relacionados ao conteúdo harmônico característico e não característico injetados por tal tecnologia foram amplamente explorados. Isto posto, no que se refere às distorções harmônicas não características provenientes da operação da supracitada tecnologia, foram apresentados, em meados de 1976, estudos que correlacionam a origem do dito conteúdo harmônico sob a perspectiva da operação de transformadores com impedâncias de fase assimétricas e sua influência na operação dos conversores que compõe a tecnologia de transmissão em corrente contínua (SUBBARAO; REEVE, 1976)(LARSEN; BAKER; MCIVER, 1989).

Nesse mesmo escopo, um grande número de trabalhos permeiam aspectos correlatos a diferentes configurações e topologias de HVDC, com estudos diversos relacionados ao perfil harmônico não característico, quais sejam, exploração quanto aos alicerces matemáticos, simulações computacionais vinculando o surgimento de tal conteúdo a desequilíbrios e distorções de tensão do lado da rede alternada, técnicas de controle e erros de ângulo de disparo das chaves semicondutoras, intervalos assimétricos de pulsos de disparo do sistema de controle, desequilíbrio na operação de mais de uma



ponte de conversores, operação do transformador de conversão na região de saturação e também questões de instabilidade harmônica na transmissão de energia via elos de corrente contínua (SADEK; CHRISTL; LUTZELBERGER, 1992)(HOSSEINI; SAJADI; TEIMOURI, 2004)(KUMAR; DEVI, 2012)(SIDDIQUI; BHATT, 2013)(ZHOU et al., 2015). Percebe-se ainda estudos voltados para filtragem e compensação harmônica não característica (KULKARNI; GANDHARE; PARULKAR, 2009)(JIAZHU XU et al., 2010).

Muito embora o escopo do presente trabalho não englobe estudos de sistemas de transmissão de energia HVDC, avaliar as principais e possíveis causas relacionadas a distorção harmônica não características nesta tecnologia em particular, propicia um melhor entendimento e diretrizes àquelas relacionadas a operação e injeção harmônica atípica de aerogeradores, a julgar a presença de conversores eletrônicos controlados em ambas tecnologias.

ii. Em conversores eletrônicos com suprimento e operação degradada

É fato que o surgimento de harmônicas não características no sistema, oriundas de conversores eletrônicos decorre de uma série de condições não ideais de operação, as quais, de forma geral, podem relacionar-se com os aspectos pautados a seguir:

- Desequilíbrio prévio de tensão do sistema supridor;
- Desequilíbrio das impedâncias que compõe o sistema;
- Desequilíbrio de corrente devido ao carregamento;
- Estratégias de modulação de largura de pulso;
- Nível de curto-circuito do sistema;
- Distorções harmônicas prévias no sistema;

Por certo, em um número considerável de trabalhos, avalia-se a operação de conversores controlados CA-CC sob condições de suprimento desequilibrado. Essa situação não ideal de operação apresenta um alto índice de frequências harmônicas não

características nos espectros analisados (EMANUEL, 1981). Nesse sentido, os autores (DRABEK, P., 2013) (KUS; PEROUTKA; DRABEK, 2005) exploraram, ainda, aspectos relacionados a dinâmica do sistema e suas correlações com a geração inter-harmônica.

Similarmente, os trabalhos (SINGH; SINGH; MITRA, 2006a) e (SINGH; SINGH; MITRA, 2006b), apresentam uma minuciosa avaliação sobre a injeção harmônica de um retificador controlado submetido a um suprimento desequilibrado, adicionada à operação assimétrica do equipamento. Nesses trabalhos, o desequilíbrio da fonte supridora foi adotado com distintos e progressivos percentuais, avaliando, ainda, a sensibilidade das diferentes harmônicas características e não características em face à tal operação não ideal. Adicionalmente, foram investigadas as principais consequências do desequilíbrio prévio presente nas correntes a serem retificadas, os quais são resultantes de fatores como: distribuição de corrente irregular sobre a ponte retificadora, aumento das perdas de condução, falhas no processo de retificação e aumento da distorção harmônica total.

Inserido neste nicho de investigação, vários outros autores apontam o surgimento da 3ª ordem harmônica não característica e seus múltiplos nos processos em que conversores trifásicos operam em condições desequilibradas de suprimento. No entanto, estas não possuem característica de componente de sequência zero e, sim, mostram-se compostas por componentes de sequência positiva e/ou negativa (SINGH; SINGH; MITRA, 2006a) (SINGH; SINGH; MITRA, 2006a). Em complemento, conforme salienta Reineri et. al (REINERI; GOMEZ; CAMPETELLI, 2008) o surgimento de componentes de sequência em ordens harmônicas que são identificadas com um modo de sequência específico, ocorre não somente nas harmônicas atípicas da rede. Do mesmo modo, estas manifestam-se naquelas de frequência harmônica característica, por exemplo, a harmônica de 5ª ordem definida como de sequência negativa, possuirá uma parte de sequência positiva em sua composição na presença de desequilíbrio do sistema supridor. Todavia, fala ressaltar que na presença de desequilíbrio, todas as ordens harmônicas podem possuir resquícios de componentes de sequência, positiva, negativa e zero, sendo que a última só irá existir quando for viabilizado seu caminho no sistema.

O resquício de componentes de sequência percebido no espectro de um determinado sinal, devido a operação em uma rede de alimentação com desequilíbrio



prévio, revela-se como o um dos fatores principais, no que se refere ao surgimento de modulação em até duas vezes a frequência fundamental no sinal de tensão do elo de corrente contínua que compõe conversores *back-to-back*. Tal afirmativa alicerça-se em (YAZDANI; IRAVANI, 2006) (CAVALIERE; WATANABE; AREDES, 2002) (MORI et al., 1993) (KARIMI; YAZDANI; IRAVANI, 2008), comprometendo a operação do conversor e acarretando na injeção de correntes harmônicas não características.

No que se refere as harmônicas de ordem par geradas pela operação de conversores em operação degradada, os trabalhos (DRABEK, Pavel, 2007) (DRABEK, Pavel, 2011a) (DRABEK, Pavel, 2011b) (DRABEK, P., 2013) (DRABEK, Pavel; KUS, 2013) apontam, dentre outras contribuições, que o principal fator de influência condiz com assimetria nos pulsos de disparo do conversor. Estes afirmam que a não simetria provida pelo chaveamento possui uma relação praticamente linear com a geração de harmônicas pares na rede.

Um outro montante significativo de artigos explora as técnicas de modulação de largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) (GRAHAM, 2000) (PENA; CLARE; ASHER, 1996). Em (ABHAYASINGHE; BUCKNALL, 2009), é contemplado um abrangente estudo envolvendo os princípios da técnica de modulação PWM, de forma a relacionar sua operação com a geração harmônica. Análises experimentais, computacionais e matemáticas são também proferidas, com especial atenção a profundidade e largura dos micro-cortes de tensão (*notching*), acarretados pelo curto-circuito momentâneo no instante da comutação entre fases, bem como, considerações quanto a indutância da fonte e sua influência no processo.

Explorando as bases da teoria de modulação vetorial, encontram-se as referências (BOYS; HANDLEY, 1990) (MOYNIHAN; EGAN; MURPHY, 1998), sendo de grande valia para as análises aqui pretendidas. Os princípios correlatos à modulação de largura pulso, bem como, as distintas técnicas que podem ser implementadas, apontam como potenciais causadores de distorções harmônicas não esperadas no PAC. Tal situação relaciona-se como o modo operante dos conversores, assunto que será pormenorizado no capítulo seguinte.

Pautando-se ainda nas perspectivas de controle e métodos de modulação de largura de pulso, o foco abordado em (WEILAND; HEROLD; FREUDENSTEIN, 2010)

(WEILAND; FÖRST; HEROLD, 2009) consiste no desenvolvimento de um método de controle por meio de uma abordagem de fasores espaciais e equações diferenciais com ângulos de disparo assimétricos, afim de diminuir efeitos negativos quanto: a otimização do conversor, distorção da corrente contínua, distorção da corrente de linha e eliminação de componentes harmônicas.

Por certo, os trabalhos desenvolvidos em (NASCIMENTO et al., 2015) (NASCIMENTO; DIENE; WATANABE, 2017)(NASCIMENTO; DIENE; WATANABE, 2017) mostram-se como uma das mais atuais referências deste escopo. Neste, os autores apresentam um modelo de conversor de fonte de tensão (*Voltage Source Converters* - VSC) controlado por PWM trifásico, a fim de investigar a geração harmônica não característica quando suprido por uma tensão desequilibrada. Suas contribuições permeiam no estabelecimento de equações matemáticas para o cálculo das harmônicas não características, com validações computacionais e experimentais, baseando-se na teoria de potência instantânea e conceitos de funções de comutação (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007), além de abranger análises referentes ao sinal de tensão oscilante do elo CC e o dimensionamento ideal do capacitor que o compõe.

Análises envolvendo a propagação e penetração harmônica, no que se refere ao conteúdo harmônico não característico permeiam também a operação de conversores em situações não ideais, como evidenciado em (MASWOOD; SHEN WEI, 2003) (MASWOOD; SHEN WEI, 2005). Nestes trabalhos, um conversor operando sob condições de suprimento desequilibrado e distorcido é apresentado, verificando-se que a tensão no elo CC contém harmônicas não características no sinal contínuo quando alimentados com tensões previamente desequilibradas, em especial harmônicas de 2ª ordem que se propagam e influenciam as correntes alternadas de entrada e saída do conversor.

iii. Em complexos eólicos

De fato, as investigações das distorções harmônicas em complexos eólicos mostram-se também presentes na literatura. No entanto, as divergências encontradas em campanhas de medição frente às correntes certificadas apresentadas pelos fabricantes dos aerogeradores, adicionada a imprevisibilidade do espectro de frequência de turbinas



eólicas sob diferentes perspectivas de operação, demonstram a necessidade de estudos que busquem eximir tais cenários. Versados esses fatos, novos desafios voltados para o nicho das harmônicas não características de baixa frequência, verificadas na operação de complexos eólicos são latentes, principalmente pelo desenvolvimento exponencial que tal tecnologia apresenta.

Nas explorações aqui pretendidas, limitar-se-á às devidas análises na operação de aerogeradores de tecnologia DFIG, a julgar pela massiva presença nos complexos eólicos em funcionamento, apresentando percentuais significativamente maiores perante as demais tecnologias de turbinas eólicas (XU et al., 2018). Firmados os apontamentos em questão, será realizada uma revisão das principais bibliografias que exploram este modelo e suas principais contribuições, a fim de demonstrar a afirmativa inicial deste parágrafo.

Com atenção à literatura atual, evidencia-se que vários foram os trabalhos acerca da conversão de energia eólica por meio de aerogeradores tipo DFIG. Estes abrangem, em sua maioria, questões envolvendo a exploração dos princípios matemáticos, modelagens computacionais, técnicas de controle, medições em campo, aspectos pertinentes à QEE, dentre outros pontos relevantes à sua inserção e operação.

Nesse interim, cronologicamente, o trabalho de (YAMAMOTO; MOTOYOSHI, 1991) desvela-se no contexto do controle de potência ativa e reativa do gerador duplamente alimentado. Análises entre a propagação das correntes harmônicas que alimentam o rotor e sua transmissão ao estator são pautadas e verificadas por ensaios experimentais. Nesta linha, encontra-se, também, (TANG; XU, 1992), como um dos primeiros trabalhos pautados no controle do gerador duplamente alimentado orientado pelo campo do estator.

A abordagem das harmônicas espaciais ocasionados pela distribuição não senoidal da força magnetomotriz (FMM) na operação das máquinas elétricas rotativas é apresentada em (JOKSIMOVIC; DJUROVIC; PENMAN, 2001)(FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). No que se refere às análises da máquina de indução do DFIG, encontram-se os trabalhos de (LINGLING FAN; YUVARAJAN; KAVASSERI, 2010) (WILLIAMSON; DJUROVIC, 2009) (WILLIAMSON; DJUROVIC, 2010). Tal conteúdo harmônico, conforme pontuado, está intimamente relacionado com os aspectos construtivos da máquina, e ainda, são percebidos no espectro harmônico do DFIG na

forma de harmônicas no tempo (LIU, S. Y., 2015). Em (DJUROVIC; WILLIAMSON, 2010), uma avaliação quanto ao impacto de tensões distorcidas alimentando o estator do DFIG é realizada e os efeitos observados retratam que tal alimentação degradada interfere diretamente no espectro harmônico resultante do mencionado aerogerador. Simulações computacionais, desenvolvimento matemático e avaliação experimental são tratados nos trabalhos anteriores.

Nessa linha de avaliação dos harmônicos espaciais gerados pelo gerador de indução duplamente alimentado destaca-se a tese (LIU, S. Y., 2015). Suas análises permeiam, também, os harmônicos de baixa ordem, explorando, ainda, as harmônicas não características e inter-harmônicas. Nessa linha, um amplo desenvolvimento matemático é proposto e seus resultados comparados com simulações computacionais e experimentais em duas plataformas distintas. Os trabalhos de (YANG, 2012) (YANG, 2015) também propõe análises voltadas à emissão harmônica, propagação e processos de agregação de corrente, sendo referências importantes da temática cerne desta dissertação. Ademais, os estudos contemplam um processo investigativo dos harmônicos injetados por aerogerador DFIG e o modelo *Wound Rotor Synchronous Generator* (WRSG). Medições em campo são apresentadas, propiciando várias análises, incluído estatísticas. Trabalhos voltados para a exploração sub-harmônica também são encontrados em (GNACIŃSKI et al., 2019).

Com enfoque nos conversores eletrônicos empregados no aerogerador DFIG e seus métodos de controle de modulação de largura de pulso, o trabalho de (PENA; CLARE; ASHER, 1996), contribui com uma modelagem vetorial da máquina duplamente alimentada. No que tange ao chaveamento dos conversores, estes utilizam a modulação de largura de pulso vetorial (*Space Vector Pulse Width Modulation - SVPWM*), apontando as características de injeção harmônica na rede.

Um trabalho interessante baseado em uma usina eólica real localizada no Brasil, avalia o impacto de sua conexão, dedicado a modelagem dos componentes em termos dos efeitos de propagação harmônica (MENDONÇA; PEREIRA; SILVA, 2012) (LIU, S. Y. et al., 2014). Ainda na exploração da propagação harmônica no contexto eólico, alguns trabalhos abordam a reflexão de harmônicas entre estator e rotor, bem como, seus princípios matemáticos (SCHOSTAN et al., 2009) (LIU, S. Y., 2015).



Existem, ainda, vários trabalhos pautados em medições (LIANG; HU; LEE, 2012)(LIU, Z. et al., 2017a), os quais apontam a presença de harmônicas características e não características em espectros diversos, ressaltando os diversos parâmetros de influência, sobremaneira, técnicas de controle, impedâncias do sistema e frequência de chaveamento. Em (LAROSE et al., 2013), tem-se a apresentação e análise, por meio de medições em campo, das várias fontes harmônicas no DFIG.

Por certo, a literatura aponta uma quantidade significativa de trabalhos na exploração do nicho eólico atrelado às harmônicas tipicamente oriundas dessas instalações, todavia, na seara das harmônicas não características, várias são as demandas que permeiam as causas, principais fatores de influência e impacto, a fim de alicerçar a presente conjuntura.

iv. Aspectos relevantes relacionados à simetria do sinal

Deve-se reconhecer, naturalmente, que a análise quanto a simetria de sinais, proporciona uma correlação entre os princípios matemáticos da trigonometria alinhados aos processos físicos de funcionamento dos equipamentos, assim, pode-se caracterizar quais as ordens que estarão presentes em um sinal distorcido oriundo de um determinado sistema.

A título contextual, reconhece-se que um sinal não degradado de tensão e/ou corrente no domínio do tempo, pode ser caracterizado por uma onda periódica e senoidal, com magnitude e ângulo de fase constantes, a julgar uma operação ideal entre consumo e suprimento de energia elétrica. Por sua vez, quando a supracitada função corresponder a um sinal de tensão ou corrente não ideal, a partir da aplicação da série de Fourier (SANTOS, F. J., 2004; SAUTER; AZEVEDO, 2019), obter-se-á o espectro de frequências harmônicas múltiplas inteiras em relação ao sinal fundamental.

Voltando as análises para um sinal correspondente a forma de onda de corrente demandada por um conversor eletrônico de seis pulsos, no tocante a sua simetria, esse caracteriza-se como um sinal que apresenta uma “simetria de meia onda”, devido ao perfil equânime em relação ao eixo horizontal, ou seja, a meia onda positiva é igual a meia onda negativa, bem como a simetria em relação à origem do eixo cartesiano ($x = 0, y = 0$),

resultando na inexistência da componente de corrente contínua, das harmônicas de ordem par e múltiplas de 3.

Do exposto, de um modo geral, um massivo número de cargas perturbadoras, no que se refere à injeção de correntes harmônicas, apresentará simetria de meia onda devido aos processos de controle perfazerem os chaveamentos simétricos tanto no semiciclo positivo quanto no semiciclo negativo. Perfazendo em um espectro de frequência com ordens harmônicas ímpares relacionadas com o número de pulsos do conversor utilizado. Todavia, se o conversor estiver submetido a uma operação degradada da rede, tais harmônicas típicas necessariamente estarão presentes, no entanto, também surgirão frequências atípicas ao processo de comutação e chaveamento, condição já pormenorizada nos estudos pretensos.

2.4. DIRETRIZES QUANTO ÀS DEMAIS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Uma vez tecidas as implicações anteriores, cabe neste momento, de forma complementar, explorar os outros perfis de distorções harmônicas existentes na matriz energética. O desenvolvimento contínuo do sistema propicia uma maior interação entre os diversos perfis de frequência, e estes, por sua vez, mostram-se cada vez mais relacionados com problemas envolvendo a QEE, nos inúmeros processos fomentados pelo suprimento elétrico. Logo, os apontamentos na sequência são fundamentais para uma compreensão concisa dos estudos a serem desenvolvidos, abrangendo o conteúdo das harmônicas características, inter-harmônicas, sub-harmônicas, harmônicas espaciais e supra-harmônicas.

i. Harmônicas características

As harmônicas ditas características, naturalmente, originam-se na comutação inerente a operação de conversores eletrônicos nos diversos processos que estes são utilizados (ARRILLAGA; WATSON, 2003) (ARRILLAGA et al., 1997). Vale destacar que sua origem consiste na topologia e características operacionais dos equipamentos sob condições ideais de operação. Tipicamente, as diversas tecnologias que possuem conversores eletrônicos trifásicos em sua estrutura são viabilizadas pelo uso de



conversores de seis pulsos ou a sua associação série-paralela para maiores níveis de potência.

Face a essas considerações, um conversor eletrônico composto por um conjunto de seis chaves estáticas, alimentando um determinado carregamento e sendo suprido por um sistema trifásico ideal representado por uma fonte de tensão alternada trifásica e indutância equivalente, corresponde à configuração básica de um conversor de seis pulsos.

Com atenção à operação do dito conversor, comutado pela rede (60Hz), a título exemplificativo, tem-se que o funcionamento de uma determinada chave semicondutora (ABU-RUB; IQBAL; GUZINSKI, 2012) se dá no momento em que sua polaridade relativa entre ânodo e catodo esteja mais positiva e seja fornecido o pulso de disparo em um determinado ângulo, o qual denomina-se ângulo de disparo α . Nessa operação, devido a característica periódica do sistema alternado, haverá sempre um par de chaves em funcionamento. Esse processo correlato ao momento em que uma chave deixa de conduzir e outra entra em condução é denominado de comutação. Todavia, o processo de comutação entre as chaves não acontece de forma instantânea, a indutância do sistema supridor impede que o componente que está conduzindo a corrente ao carregamento seja comutado de forma imediata. Conseqüentemente, existirá nesse momento um período de transição em que a chave que está sendo fechada conduzirá ao mesmo tempo que a chave que está sendo aberta, logo, terá um tempo de atraso acarretado pela comutação, o qual é representado pelo ângulo de comutação μ . A extinção de todo o processo é representada pelo o ângulo de extinção δ que corresponde ao somatório de $\alpha + \mu$.

Cientes do processo de comutação do conversor trifásico controlado de seis pulsos comutado pela rede, ao ser aplicado à série de Fourier no sinal de corrente alternada demandado pelo descrito processo, pode-se estabelecer a seguinte lei de formação exposta na equação (2.1) (ARRILLAGA; WATSON, 2003).

$$h = 6k \pm 1 \tag{2.1}$$

Sendo:

h = ordem harmônica;

k = 1,2,3, ...;

Com isso, as ordens harmônicas que obedecem a tal lei de formação são denominadas de “harmônicas características” para um conversor trifásico de seis pulsos comutado pela rede.

O supracitado conteúdo harmônico, conforme já pontuado, está intimamente relacionado com o número de comutações não simultâneas de um conversor, logo, em situações que contemple associação de conversores, pode-se expressar a referida lei conforme a equação (2.2), a seguir:

$$h = pk \pm 1 \quad (2.2)$$

Sendo:

h = ordem harmônica;

$k = 1, 2, 3, \dots$;

p = número de pulsos do conversor eletrônico;

Todavia, destaca-se que conversores eletrônicos comutados em alta frequência possuem outro perfil de componente harmônica característica no seu espectro. Logo, em um contexto geral, vale enfatizar que harmônicas denominadas como características são aquelas esperadas devido ao modo de operação, controle e topologia de um determinado equipamento, em condições de operação ideal. Por sua vez, todo perfil harmônico que distinguem dessa premissa, ou seja, não se espera sua composição no espectro de frequência, é caracterizado como não característico.

ii. Inter-harmônicas, sub-harmônicas, harmônicas espaciais e supra-harmônicas

Tendo em vista os conceitos detalhados anteriormente e suas implicações no contexto da QEE, cabe ressaltar, de forma geral e complementar para os estudos em pauta, pontuações quanto as componentes de frequência não múltiplas inteiras do sinal fundamental. Estas, reconhecidas como inter-harmônicas, originam-se dos processos envolvendo a operação de conversores de frequência estáticos, cicloconversores, indução de motores, dispositivos a arco, dentre outros inúmeros processos. Por conseguinte, suas principais implicações na rede manifestam-se no fenômeno de cintilação luminosa (*flicker*), flutuação de tensão, torques de baixa frequência, aumento adicional da



temperatura em máquinas de indução e mau funcionamento de equipamentos (MACEDO JR., 2009)(ROSENTINO, 2014).

As distorções sub-harmônicas, por sua vez, caracterizam-se por apresentarem frequência não inteira abaixo da fundamental, as mesmas são notadas com uma rara presença nos sistemas de energia e sua origem está atrelada ao rápido controle implementado nas fontes de conversão eletrônicas, sistemas altamente indutivos e também aqueles com grandes capacitores, bem como situações ressonantes entre capacitâncias e indutâncias da rede (GNACIŃSKI et al., 2019).

As harmônicas ditas espaciais, referem-se ao conteúdo distorcido advindo de equipamentos eletromagnéticos rotativos, proporcionado pela assimetria dos enrolamentos do circuito do estator e rotor. Tal perfil harmônico está intimamente relacionado com os estudos correlatos à geração harmônica não característica no DFIG, assim, será tratado durante o desenvolvimento deste trabalho (MASOUM; FUCHS, 2015).

Por fim, é válido discutir sobre o conteúdo harmônico de alta frequência oriundo dos processos de comutação forçada em conversores eletrônicos controlados. A utilização de altas frequências nos processos de comutação apresenta-se como uma técnica amplamente utilizada na eletrônica de potência atual (TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011)(SIMÕES; FARRET, 2016). A título contextual, conversores moduladores de tensão, implementados no controle de motores elétricos, no interfaceamento de geração de energia eólica e fotovoltaica, dentre outros sistemas, perfazem a utilização as altas frequências de comutação para sintetizar os sinais alternados periódicos de tensão da forma mais senoidal possível. Isto posto, será percebido na saída dos mencionados equipamentos um conteúdo harmônico oriundo da contextualizada modulação em alta frequência, denominada como supra-harmônicas (ALFIERI et al., 2019)(ALFIERI et al., 2019)(ALFIERI et al., 2019).

2.5. CONSIDERAÇÕES QUANTO AOS PROCESSOS DE MITIGAÇÃO HARMÔNICA

No que se refere as técnicas de mitigação harmônica, atualmente, destacam-se três processos (PRECUP; KAMAL; HASSAN, 2019)(WEKERLE; OBERBAUER, 2009)(KAZMIERKOWSKI, 2015)(TRONCHA, 2019):

- Filtros passivos;
- Filtros ativos;
- Processos de modulação e chaveamento em conversores;

O emprego de filtros passivos consiste na viabilização de caminhos de baixa impedância e sintonizados em determinada ordem harmônica, ou um conjunto de ordens, a fim de manter a respectiva corrente harmônica dentro dos limites especificados pelas regulamentações vigentes. Naturalmente, tais filtros são implementados para as ordens típicas do sistema de potência, considerando que as ordens de frequências mais altas são amortecidas pelas impedâncias do sistema. No que tange as harmônicas de baixa ordem, o custo de implementação dos filtros passivos se torna um obstáculo. Isto, devido ao fato de que quanto mais próxima a frequência de sintonia do filtro está da frequência fundamental do sistema, maiores são os valores dos parâmetros elétricos do equipamento, tornando mais oneroso o projeto do mesmo (ANTAR et al., 2012)(PETER; SAHA, 2018)(MISRA; NAYAK, 2018).

Com relação ao emprego de filtros ativos, estes apresentam-se como uma realidade em níveis de baixa tensão. Em termos operativos, de forma geral, sua topologia consiste em um conversor eletrônico que tem a capacidade de injetar um certo sinal de corrente harmônica com defasagem oposta àquele que se deseja compensar. Vale ressaltar que sua aplicabilidade em média tensão contempla, ainda, vários desafios. No entanto, constitui um sistema promissor para essa área de atuação.

Já na perspectiva de atuação das técnicas de modulação de largura de pulso, adicionada com a compensação harmônica, tem-se uma gama significativa de trabalhos, apontando que, para um futuro próximo, esta será uma realidade presente em diversas tecnologias. Basicamente, nesse escopo, o uso de técnicas avançadas de chaveamento,



bem como teorias envolvendo os processos de modulação de pulso e potência harmônica perfazem as suas bases teóricas, operacionalizando a compensação harmônica direto na fonte.

No que tange especificamente aos processos de mitigação das harmônicas atípicas do sistema, normalmente encontradas com baixos níveis percentuais em comparação às demais distorções, independente dessa pequena injeção de corrente harmônica notada, quando em condições ressonantes, consideráveis níveis de distorção de tensão podem ser acarretados e possíveis danos ao sistema ocasionados, fato este que demandará a utilização dos processos de mitigação ora descritos.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O capítulo em questão centrou-se no levantamento do estado arte quanto as distorções harmônicas não características. Em um primeiro momento, explorou-se as principais bibliografias correlatas ao tema, com abordagem voltada àquelas tecnologias que sob diferentes perspectivas de operação mostram-se propensas à geração desse conteúdo harmônico atípico no sistema. Tais análises objetivavam esclarecer os principais fatores causadores de tal perfil distorcido, perante distintas situações de operação e controle.

Em sequência, deu-se seguimento nos estudos bibliográficos pautados ao nicho de geração eólica. Nesses, as atenções foram voltadas para as pesquisas dedicadas à operação do aerogerador modelo DFIG, objeto de estudos dos próximos capítulos. Cabe ressaltar que a exploração quanto a distorção harmônica injetada pelo modelo de aerogerador supracitado, mostrou-se intensa e crescente. Todavia, estudos referentes às contribuições não características e seus fatores de influência requerem atenção da academia. Complementarmente, uma revisão das demais classificações de distorções harmônicas e processos mitigatórios foi apreciada, haja vista o tema central deste trabalho.

Assim, cientes das principais argumentações consideradas, pautados no alicerce teórico averiguado, trabalhar-se-á no próximo capítulo uma investigação das contribuições harmônicas propiciadas pelo DFIG, de forma a estabelecer os princípios físicos e matemáticos diante do espectro harmônico do mesmo.

CAPÍTULO 3

Uma vez constatadas as implicações referentes à temática elencada neste trabalho, aborda-se, neste momento, uma investigação minuciosa das diferentes contribuições harmônicas injetadas pelo aerogerador modelo DFIG. As avaliações dar-se-ão sob os potenciais elementos causadores de injeção harmônica de forma a caracterizar o conteúdo produzido.

CAPÍTULO 3. INVESTIGAÇÃO DAS HARMÔNICAS NÃO CARACTERÍSTICAS NO AEROGERADOR DFIG

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

É certo que a exploração da geração de energia por meio da tecnologia empregada nos aerogeradores de parques eólicos tornou-se, nos últimos anos, matéria de grande importância no tocante à matriz energética brasileira e mundial, conforme enfatizado nos capítulos anteriores. Nessa perspectiva, atualmente, as tecnologias com maiores percentuais de utilização materializam-se naquelas baseadas em aerogeradores de velocidade variável. Nesse particular, duas tecnologias são meritórias de destaque, quais sejam, as providas de geradores de indução duplamente alimentados e aquelas que utilizam geradores síncronos a imã permanente (XU et al., 2018).

O capítulo em questão objetiva investigar os principais componentes que compõe a topologia e operação de um aerogerador modelo DFIG, com atenção às origens das correntes de frequências não características percebidas em seu espectro e as particularidades a respeito de sua propagação.

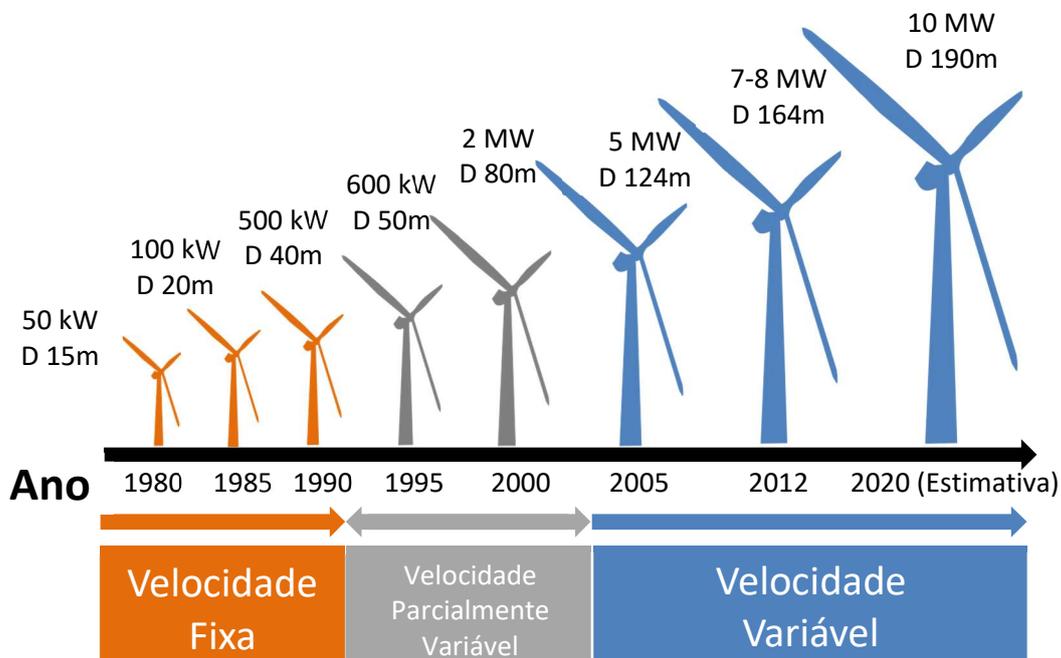
3.2. PRINCIPAIS TOPOLOGIAS DE AEROGERADORES

Após estabelecer os critérios a serem abordados nessa unidade, apresenta-se, a seguir, as principais tecnologias utilizadas nos dias atuais. Nesse sentido, percebe-se dois conceitos que se destacam na composição de complexos eólicos nacionais e internacionais, estes correspondem ao modelo *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) e *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) (MULJADI et al., 2016). Vale destacar que o desenvolvimento de tais tecnologias, por meio da associação de



conversores, propicia uma sólida expansão na capacidade de geração eólica, sendo uma realidade atual a sua associação em série e/ou paralelo para atingir maiores potências de geração. Esboça-se, na Figura 3.1, o desenvolvimento da capacidade de geração até os dias atuais, apontando o crescimento e expansão da tecnologia empregada (velocidade fixa ou velocidade variável) ao longo dos anos, contemplando estimativas para o ano 2020, bem como o aumento de potência e diâmetro (D) em relação a circunferência descrita pelas extremidades das pás por período.

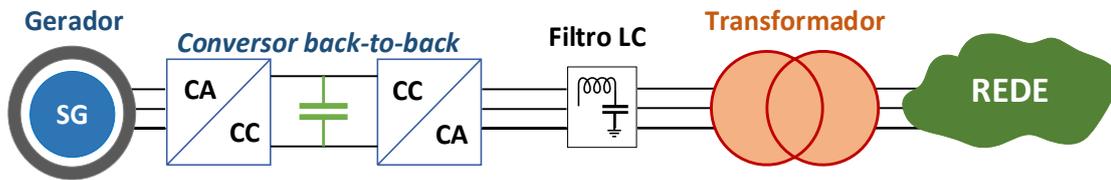
Figura 3.1 Desenvolvimento de turbinas eólicas entre 1980 a 2020.



Fonte: Adaptado de *Advanced Control of Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Systems* (XU et al., 2018).

Dentre as citadas tecnologias, no que se refere àquelas providas de conversor pleno de potência (*full converter*), vantagens, como menor sensibilidade a intercorrências nas condições de operação da rede, são percebidas. Todavia, atualmente, apontam para um custo final mais elevado, haja vista que o conversor deve ser projetado para a potência total do aerogerador. A título de ilustração, na Figura 3.2 é apresentado de forma simplificada os principais componentes de tal tecnologia, quais sejam: o gerador síncrono de ímã permanente, o conversor pleno *back-to-back*, o filtro harmônico LC e o transformador de conexão com a rede.

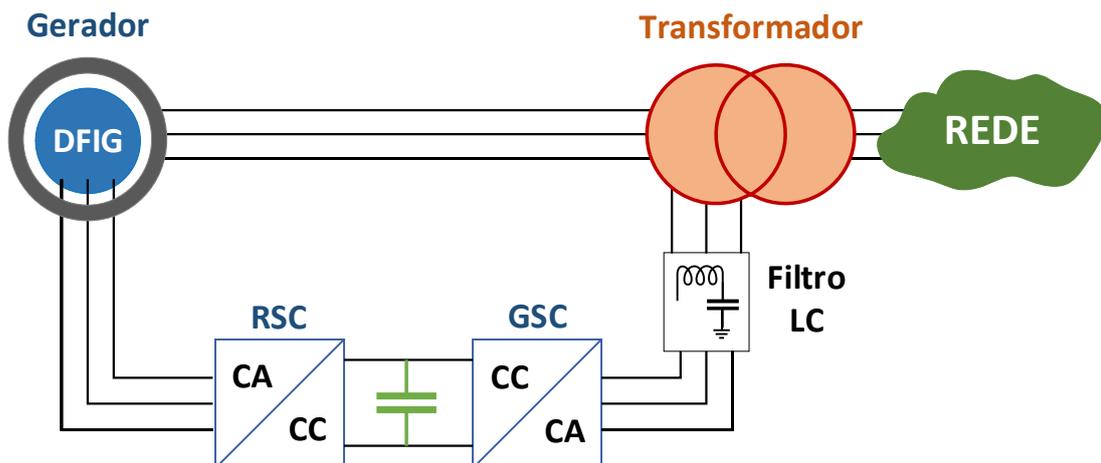
Figura 3.2 Arranjo dos principais componentes de um aerogerador *full converter* (PMSG).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Com referência à tecnologia DFIG, percebe-se que a mesma representa um maior percentual nas instalações. Basicamente, essa é viabilizada pelo uso de um gerador de indução duplamente alimentado, tendo o estator da máquina conectado diretamente na rede, enquanto a corrente de excitação do rotor é viabilizada por um conversor *back-to-back* com capacidade de potência parcial perante o aerogerador (cerca de 30%), visto que este é responsável apenas pela parcela de potência que flui pelo rotor (ABAD et al., 2011). Entre os principais componentes do DFIG tem-se, ainda, o transformador de interfaceamento com o sistema, que eleva a tensão gerada, e o filtro LC de mitigação dos harmônicos de alta frequência (RUAN et al., 2018). Isso posto, nota-se na Figura 3.3 a configuração simplificada do aerogerador modelo DFIG, com os principais equipamentos de sua composição.

Figura 3.3 Arranjo dos principais componentes de um aerogerador modelo DFIG.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O sistema de conversores *back-to-back* utilizados na supracitada tecnologia, compõe-se de dois conversores denominados por conversor do lado do rotor (*Rotor Side*



Converter - RSC) e conversor do lado da rede (*Grid Side Converter* - GSC). Sua alimentação, de forma geral, é realizada em um nível de baixa tensão por meio do transformador de conexão, sendo ainda utilizado um filtro harmônico. Por serem dimensionados com uma potência parcial, o custo do modelo mostra-se atrativo, todavia, a conexão direta do estator da máquina com o sistema acarreta em uma considerável sensibilidade perante as condições operacionais da rede acessada (XU et al., 2018).

No que se refere à estratégia de controle destinada ao RSC, esta tem a função de viabilizar o controle do fluxo de potência ativa e reativa, mesmo em condições de velocidade variável, de forma que o aerogerador sempre trabalhe no seu ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT). De forma geral, seu controle atua na magnitude e ângulo de fase das correntes que suprem o rotor.

No que se refere ao controle do conversor GSC, suas funções principais consistem em manter a tensão no elo CC próxima ao seu valor de referência e controle de potência reativa no ponto de acoplamento, o qual é realizado com o uso do filtro LC responsável por mitigar as altas frequências de chaveamento implementadas no PWM, esse ainda, propicia um acoplamento indutivo entre o aerogerador e a rede.

Em termos operacionais é válido pontuar, em uma análise geral do fluxo de potência do aerogerador, conceitos pertinentes a sua operação. Percebe-se que esta relação se dá com referência à velocidade síncrona (ω_s) da máquina e a velocidade mecânica do rotor (ω_r). Nesse sentido, quando o rotor possui ω_r inferior à ω_s o escorregamento da máquina (s) é positivo, nessa condição operativa o fluxo de potência é do conversor para o rotor, caracterizando uma operação sub-síncrona. De outro modo, quando a ω_r se encontra em velocidade maior que ω_s , obtém-se um escorregamento negativo, tornando o fluxo de potência do rotor para o conversor, operação denotada como super-síncrona.

Os estudos que seguem neste capítulo são dedicados às contribuições harmônicas oriundas de aerogeradores DFIG, com apresso àquelas classificadas como harmônicas atípicas no sistema em questão, justifica-se a escolha de exploração da referida tecnologia pelo fato, anteriormente pontuado, de sua ampla utilização no Brasil e no mundo devido, sobremaneira, a vantagens em termos comerciais.

3.3. ORIGENS DAS DIFERENTES CONTRIBUIÇÕES HARMÔNICAS NO DFIG

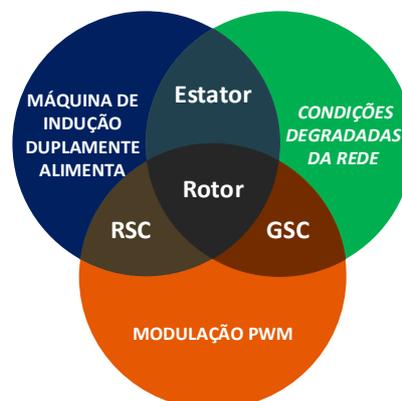
As diferentes contribuições harmônicas originadas no aerogerador modelo DFIG consistem da não linearidade de alguns elementos que o compõe, bem como das condições de controle, topologia e dinamismo inerente ao processo de transformação de energia por meios eólicos. Outro fator de extrema importância materializa-se nas condições operativas da rede de acesso, as quais estão intimamente relacionadas com espectros de frequências harmônicas de baixa ordem, presentes na saída do aerogerador.

Assim sendo, as diretrizes de interesse deste capítulo abrangerão os estudos na seguinte perspectiva de interação dos elementos do sistema:

- Características construtivas do rotor e estator da máquina;
- Interação entre o estator da máquina e as condições da rede;
- Interação entre a dinâmica estator-rotor;
- Influência das altas frequências de chaveamento no RSC e GSC;
- Interação entre o PWM do RSC com o rotor da máquina;
- Interação entre os conversores GSC e RSC;
- Influências operativas da rede de acesso no GSC;
- Propagação harmônica entre RSC, rotor e estator;

Nesse sentido, a Figura 3.4 ilustra a correlação entre os elementos anteriormente citados, os quais serão tratados em sequência.

Figura 3.4 Principais elementos que contribuem para distorção harmônica injetada pelo DFIG.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.



i. Conversor back-to-back

A tecnologia empregada nos conversores RSC e GSC, em sua maioria, consiste de chaves estáticas semicondutoras *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), dispostas em arranjos de seis pulsos interligados por um barramento de tensão em corrente contínua (SANTOS, J. E. C. dos; SILVA, 2015).

Tipicamente, a técnica utilizada para modulação corresponde a tradicional modulação por largura de pulsos *Pulse Width Modulation* (PWM). Em se tratando de conversores comerciais, um tempo de atraso, denominado de tempo morto, é inserido no chaveamento proporcionado pelo PWM, a fim de evitar um possível curto-circuito no elo CC quando dos processos de comutação (SANTOS, J. E. C. dos; SILVA, 2015). Todavia, vale destacar que a influência das condições operativas da rede sob o modo de operação dos conversores é um fator importante para as análises harmônicas aqui pretendidas.

Assim, destacam-se os seguintes fatores de influência na contribuição harmônica provida pelo GSC e RSC:

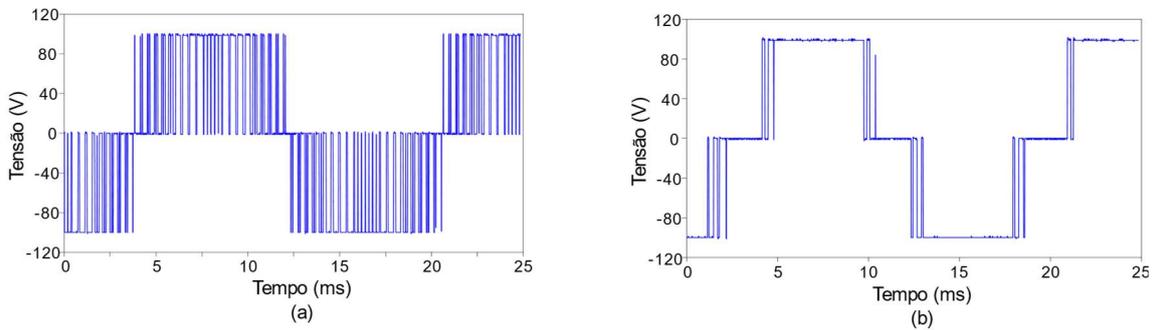
- Modulação por largura de pulso – PWM;
- Tempo morto das chaves;
- Interação entre os conversores GSC e RSC;
- Influências operativas da rede de acesso;

Conforme já enfatizado, o controle de chaveamento dos conversores RSC e GSC é tipicamente viabilizado por técnicas PWM em altas frequências de chaveamento, destas destaca-se *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) e *Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM) (RUAN, 2014).

Tal processo de modulação, considerando os conversores típicos empregados na geração eólica, quais sejam, conversores a fonte de tensão *Voltage Source Converter* (VSC), resultam em uma tensão de forma de onda retangular com conteúdo espectral próximo à frequência de chaveamento. Todavia, a técnica de chaveamento utilizada, a topologia dos conversores, a característica do chaveamento e condições operacionais da rede podem interferir de forma significativa no processo.

Nesse sentido, o processo de chaveamento PWM referente ao GSC possui a premissa básica de modular a tensão de saída do inversor, atendendo critérios de transferência de potência e interfaceamento com a rede alternada. Essa transferência de potência, ressaltada a topologia do DFIG, implica que o nível de tensão do elo de corrente contínua que interliga os conversores influencie a modulação de tensão na saída do inversor. Nessa situação operativa, quando tem-se níveis de tensão mais baixos no barramento CC, ou seja, menos potência advinda da turbina eólica, os pulsos de modulação da tensão de saída do inversor serão mais largos, de outra forma, quando os níveis de tensão contínua estiverem adequados, a tensão modulada na saída do conversor conterá pulsos menos largos e com melhores critérios de igualdade de áreas entre os semi-ciclos (PRECUP; KAMAL; HASSAN, 2019). Essa situação do modo de operação do conversor é exemplificada na Figura 3.5.

Figura 3.5 Ilustração da tensão de linha na saída do GSC em operações distintas (a) tensão elo CC adequada (b) baixos níveis de tensão no elo CC.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Como supracitado, nos processos operativos do GSC definem-se duas grandezas principais para quantificação do chaveamento PWM, quais sejam, o índice de modulação de frequência (m_f) e o índice de modulação de amplitude (m_a), conforme as equações (3.1) e (3.2), respectivamente.

$$m_f = \frac{f_p}{f_m} \quad (3.1)$$

$$m_a = \frac{V_m}{V_p} \quad (3.2)$$

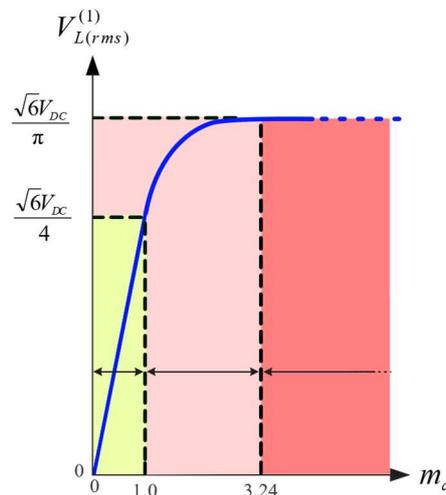


Sendo:

f_p = frequência onda portadora;
 f_m = frequência onda moduladora;
 V_m = amplitude da onda modulada;
 V_p = amplitude da onda portadora;

Essa característica de funcionamento denota três regiões para operação do inversor, quais sejam, região linear (amarela), região de sobremodulação (rosa), região de saturação (vermelha). A Figura 3.6 denota as regiões de operação do conversor atuando como inversor, em função de m_a e da tensão de linha na saída do inversor ($V_{L(rms)}^{(1)}$).

Figura 3.6 Região de operação do conversor.



Fonte: Adaptada de *Experimental Evaluation of Wind Turbines in the Generation of Harmonic Currents*.

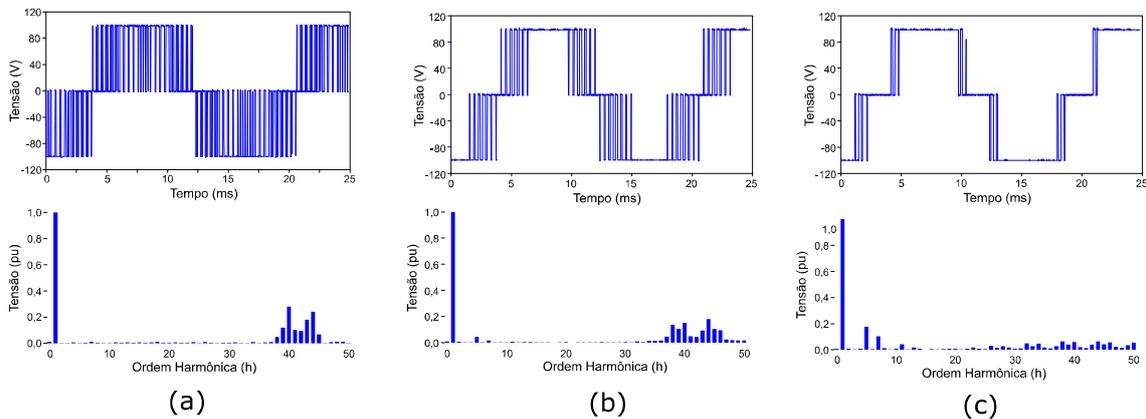
Diante desse princípio operativo, vale destacar que tecnicamente o inversor pode trabalhar nas três regiões supramencionadas, quais sejam, linear, sobremodulação e saturação. Todavia, dado a composição funcional do sistema, composto por conversores e seus respectivos controles, espera-se que este trabalhe em apenas uma região.

Normalmente quando da região linear, um menor conteúdo harmônico é proporcionado, permeando aqueles correlatos às altas frequências de chaveamento. À medida que o conversor, operando como inversor, vai entrando na região de sobremodulação e saturação, o conteúdo harmônico notado passa ser mais expressivo nas baixas frequências, ou seja, a onda modulada a ser sintetizada afasta-se de uma senoide e

aproxima-se de uma onda quadrada, perfazendo o surgimento de ordens de baixa frequência múltiplas da topologia do conversor.

A luz dessas considerações, cabe novamente pontuar que o conteúdo harmônico dito característico de um conversor, relaciona-se com a topologia e controle operativo do mesmo, naturalmente, em condições ideais de funcionamento. Com isso, qualquer conteúdo não esperado dentro dessas perspectivas irá portar-se como não característico. Assim, denota-se, na Figura 3.7, a forma de onda de tensão de fase no lado CA do GSC e seu respectivo espectro de frequência, quando em um processo de inversão (PRECUP; KAMAL; HASSAN, 2019).

Figura 3.7 Região de operação do conversor GSC, sendo (a) linear, (b) sobremodulação e (c) saturação.



Fonte: Adaptada de *Advanced Control and Optimization Paradigms for Wind Energy Systems* (PRECUP; KAMAL; HASSAN, 2019).

A seguir, na equação (3.3) apresenta a lei de formação do espectro de frequência operativo na região linear do inversor, correlatos a Figura 3.7(a). Estes constituem-se de espectros locais centrados em múltiplos da frequência de chaveamento contendo banda laterais múltiplas da frequência fundamental (XXX).

$$f_{ind,s} = |kf_c \pm mf_n| \quad (3.3)$$

Sendo:

$f_{ind,s}$ = frequências provenientes do efeito de chaveamento;

f_c = frequência de chaveamento;

$k = 0, 1, 2, 3, \dots$;

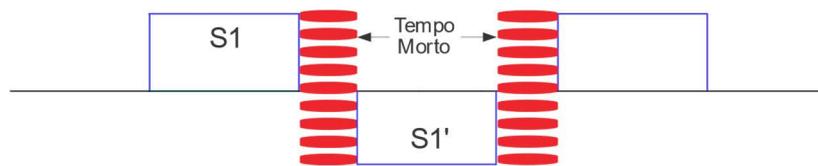
$m = 0, 1, 2, 3, \dots$;

f_n = frequência fundamental;



Outro fator de notória influência no espectro de frequência do DFIG, consiste na inserção do tempo morto nas chaves estáticas. Basicamente esse tempo inserido no processo de comutação do semiconductor garante critérios de segurança operativa do conversor, evitando que um possível curto-circuito no barramento CC do *back-to-back* possa vir a ocorrer no momento da comutação. Tal *delay* no processo de chaveamento altera de forma significativa o padrão de modulação de tensão na saída do conversor, ocasionando uma operação anormal e o aparecimento de componentes harmônicas indesejáveis (ANUCHIN et al., 2017)(KIM et al., 2017). A Figura 3.8 apresenta uma ilustração do sinal de corrente para uma única chave semicondutora (S_1) conduzindo nos dois semiciclos, em que se evidencia o *delay* no tempo inserido.

Figura 3.8 Tempo morto inserido no chaveamento de uma chave estática (S_1).

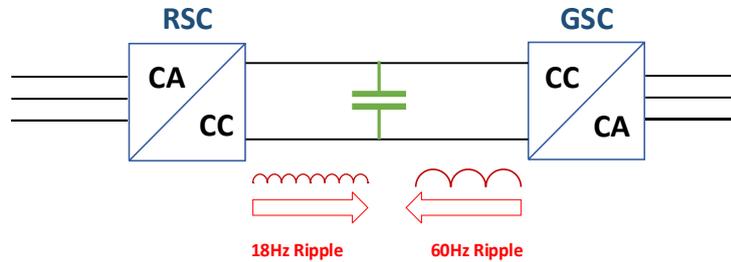


Fonte: Adaptada de *High Performance Control of Ac Drives With Matlab / Simulink Models High Performance Control of Ac Drives With Matlab / Simulink* (ABU-RUB; IQBAL; GUZINSKI, 2012).

Enfatizando o fato que topologicamente os conversores RSC e GSC são conectados entre si por meio de um barramento contínuo, o processo de funcionamento de um irá interferir no outro, podendo acarretar *ripples* na tensão do barramento CC. Tal fato propicia uma interação harmônica entre RSC e GSC.

Nessa perspectiva, tomando a referência de um observador no lado de corrente alternada, percebe-se que a frequência fundamental que alimenta o RSC é aquela definida pelo escorregamento da máquina. Por sua vez, o GSC tem como frequência fundamental a da rede (60Hz). Essa diferença entre as frequências fundamentais que alimentam os conversores, será propagada no barramento na forma de distintas ondulações, sua interação irá propiciar o surgimento de inter-harmônicas no lado alternado dos dois conversores (LIU, S. Y., 2015). Tal situação é exemplificada na Figura 3.9.

Figura 3.9 Inter-harmônicos no conversor *back-to-back*.



Fonte: Adaptado de *Estudo dos Harmônicos e Inter-harmônicos em Sistemas de Conversão de Energia Eólica com Gerador de Indução Duplamente Alimentado* (LIU, S. Y., 2015).

ii. *Máquina de indução duplamente alimentada*

Com atenção ao exposto, pode-se agora relacionar o processo físico que origina as harmônicas na máquina de indução duplamente alimentada, relacionando sua propagação entre a conexão dos elementos que a compõe e o controle provido pelo RSC. Assim, identifica-se os principais fatores de influência correlatos à máquina como sendo:

- Características construtivas da máquina de indução;
- Propagação harmônica entre RSC, rotor e estator;
- Influência das condições operacionais da rede de acesso;

As características construtivas de uma máquina de indução duplamente alimentada com rotor bobinado influenciam na composição harmônica do espectro de frequência do aerogerador DFIG (GORGINPOUR; JANDAGHI; ORAEE, 2011), providas pelas não linearidades proporcionadas por critérios construtivos da máquina que acarretaram em deformações na densidade de fluxo magnético do estator e rotor.

Nesse sentido, no que se refere ao processo construtivo do rotor e estator da máquina, sabe-se que este consiste na disposição física dos enrolamentos em ranhuras de material ferromagnético. Tais ranhuras alteram a relutância do caminho magnético do rotor e estator, provocando degraus em sua distribuição, que por sua vez irá interferir na força eletromotriz (FEM) induzida nos respectivos enrolamentos e na força magnetomotriz (FMM) no entreferro do estator e rotor, acarretando o surgimento de



harmônicas espaciais (CHAPMAN, 2013)(FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

Com isso, tais harmônicas espaciais irão manifestar-se nas correntes do estator da máquina via excitação do rotor por meio do campo no entreferro, como harmônicas temporais, conforme (3.5) (LIU, S. Y., 2015).

$$\delta\omega_n = |6k(1 - s) \pm 1| \omega_n \quad (3.5)$$

Sendo:

- $k = 1, 2, 3, \dots$;
- s = escorregamento;
- ω_n = frequência nominal da rede em radianos por segundo;
- $\delta\omega_n$ = frequência harmônica;

Percebe-se que, de forma geral, a definição adotada pelo referido trabalho demonstra a relação das harmônicas espaciais com o escorregamento da máquina. Como este é uma grandeza física e pode resultar em valores não inteiros, infere-se que as harmônicas espaciais podem manifestar-se como inter-harmônicas na saída da máquina.

A configuração do DFIG propicia uma alta gama de fatores de influência quanto à geração harmônica. Logo, a propagação harmônica entre RSC, rotor e estator mostra-se importante no processo de definição do espectro de frequência desse modelo de aerogerador.

Conforme apontado anteriormente, as harmônicas possíveis dos conversores utilizados na geração eólica correspondem aquelas correlatas à topologia e operação dos conversores. Assim, as altas frequências de chaveamento do RSC irão se propagar e refletir no rotor. Não obstante, relembra-se que o conteúdo harmônico produzido pelo conversor do lado do rotor é influenciado pelos *ripples* de tensão no barramento de origem do GSC, denotado na seção anterior.

No que se refere a frequência fundamental do rotor e estator, percebe-se que estas são distintas. No caso do rotor, a frequência fundamental corresponde à frequência de escorregamento da máquina, enquanto que no estator, por sua conexão direta à rede alternada, terá por referência a componente de frequência fundamental da rede. A interação dinâmica da máquina fará com que haja uma reflexão harmônica entre rotor-estator e estator-rotor, a qual está diretamente relacionada com o escorregamento. Assim,

segundo (LIU, S. Y., 2015), a composição harmônica refletida entre as partes supracitadas podem obedecer os seguintes princípios de formação, apontados nas equações (3.6) e (3.7).

$$f_{s,h} = f_{r,h} \pm (1 - s)f_n \quad (3.6)$$

$$f_{r,h} = f_{s,h} \mp (1 - s)f_n \quad (3.7)$$

Sendo:

$f_{s,h}$ = frequência harmônica no estator;

$f_{r,h}$ = frequência harmônica no rotor;

f_n = frequência fundamental;

s = escorregamento;

Nessa perspectiva, com atenção às formulações acima, ter-se-á que as harmônicas de sequência positiva no rotor irão se propagar na forma de harmônicas de sequência positiva no estator acrescidos da influência do escorregamento. Por outro lado, as distorções que se propagam do estator para o rotor, considerando ainda uma característica de sequência positiva, são refletidas como harmônicas de mesma sequência, subtraídas do escorregamento. A interação dessas pode, ainda, propiciar o surgimento de inter-harmônicas na máquina de sequências positiva e negativa. Ademais se houver propagação das harmônicas não características múltiplas de 3 em condições nas quais não existe caminho para a circulação das componentes de sequência zero, estas serão correspondentes às harmônicas de sequência positiva e/ou negativa.

iii. Influência das condições operativas da rede de acesso

Como visto, os capítulos anteriores demarcaram que o nível de distorção prévia de tensão é uma realidade e mostra-se em uma perspectiva crescente de incremento. Logo, a influência desses níveis de distorção na rede deve ser considerada na geração harmônica esboçada no espectro de frequência do DFIG. Além disso, outro fator de extrema importância consiste nos níveis de desequilíbrios pré-existentes do sistema, condição que aponta para um potencial incremento do conteúdo harmônico não característicos oriundo dos aerogeradores. Tais apontamentos serão avaliados no capítulo 5 porvir, demonstrando



por meio de estudos de casos, como as condições da rede de acesso influenciam diretamente conteúdo harmônico injetado no ponto de acoplamento.

3.4. NORMATIVAS E RECOMENDAÇÕES NO QUE TANGE AOS NÍVEIS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA CORRELATOS À GERAÇÃO EÓLICA

Dentre os aspectos merecedores de atenção, permeiam, sobremaneira, aqueles relacionados às questões de gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica, os quais, por certo, denotam uma gama de questões em nível nacional e internacional no que tange as normativas e orientações das entidades competentes.

Nesse contexto, mediante a exploração principal desta dissertação, o tratamento normativo associado às distorções harmônicas injetadas no sistema merece uma consideração especial devido ao seu conhecido efeito degenerativo dos processos de conversão de energia elétrica. Em vista disto, é inerente a participação sólida da academia e agentes normativos a fim de garantir parâmetros de desempenho aceitáveis correlatos ao acesso de novos sistemas de geração renovável na rede, de forma a garantir a segurança e integridade da mesma, com suprimento ininterrupto, confiável e adequado aos padrões estabelecidos e almejados.

Diante dessa conjuntura, no que se refere à origem e aos alicerces das primeiras normativas abrangendo aspectos correlatos à QEE, percebe-se instituições da Europa e Estados Unidos como sendo as precursoras. No contexto Europeu, as primeiras iniciativas relacionadas aos efeitos causados pela presença de harmônicas na rede originaram do *International Electrotechnical Commission* (IEC). Tal instituição consiste em um comitê normativo que tem por objetivo discutir assuntos correlatos à normas, recomendações e orientações das diversas temáticas que estruturam a engenharia elétrica.

No tocante ao desenvolvimento de normativas e orientação referentes as harmônicas no sistema elétrico de potência no continente americano, destaca-se aquelas oriundas do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Por certo, o IEEE mostra-se como um esteio sólido e comprometido com a participação atuante no que se refere à instrução e regulamentação dos vários nichos de atuação da engenharia elétrica, bem como, daqueles relacionados com as distorções harmônicas aqui tratadas.

No contexto nacional, os procedimentos técnicos, normativas, regulamentações, critérios e metodologias competem à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL),

enquanto o gerenciamento da Rede Básica é de responsabilidade do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Finalmente, vale destacar que a presente seção desvelar-se-á nas análises de documentos normativos e orientações nacionais e internacionais referentes às distorções harmônicas provenientes de complexos eólicos. Enfatiza-se que especial atenção será dada às normativas de âmbito nacional, a fim de firmar pontos ainda pendentes às questões atreladas aos requisitos de acesso de parques eólicos e demais complexos com características perturbadoras à Rede Básica. Assim, apresenta-se, a seguir, uma abordagem sistêmica pormenorizada dos documentos nacionais apresentados pelo ONS, quais sejam, Nota Técnica ONS NT 009/2016 REV. 02 e Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede.

i. Nota Técnica NT 009/2016 e Submódulo 2.8 dos Procedimento de Rede

Dentro do contexto anteriormente relatado nesta dissertação, apontou-se a importância dos critérios e índices de conformidade no que tange à problemática das distorções harmônicas, apresentando, ainda, de forma inicial, as principais e pioneiras entidades a tratar o tema aqui estudado.

No que tange à regulamentação de novos agentes acessantes da Rede Básica, compete ao ONS, por meio do Submódulo 2.8 (SM 2.8) dos Procedimentos de Rede (ONS, 2016b) e da Nota Técnica ONS NT 009/2016 (ONS NT 009/2016 - REV.02, 2018), gerenciar e estipular, aos acessantes detentores de carregamento não linear, os critérios de conexão e limites quanto aos indicadores de conformidade relacionados aos fenômenos da QEE.

No que concerne aos requisitos dos estudos demandados na ONS NT 009/2016, estes têm a finalidade de avaliar tanto os possíveis impactos dos complexos eólicos à rede acessada, quanto as distorções harmônicas e flutuação de tensão que o supracitado acessante pode causar ao ser inserido na rede básica. Cabe pontuar, que as análises referentes à flutuação de tensão em unidades de geração eólica não compõem o escopo deste trabalho, razão pela qual estas não serão aqui tratadas em suas particularidades.

Relativo aos níveis toleráveis de conteúdo harmônico em um determinado barramento, para limitar a difusão de tais distúrbios, quando do acesso de novas



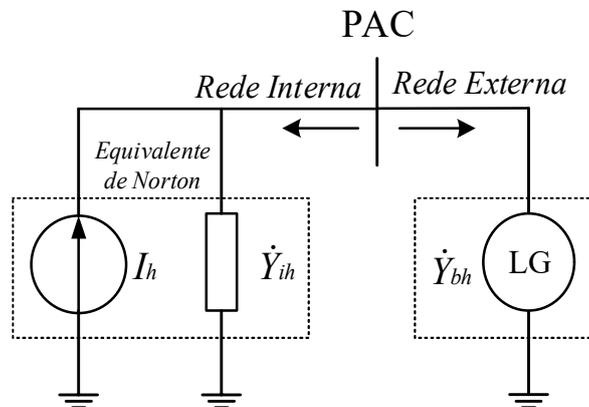
instalações, o ONS solicita aos agentes acessantes a elaboração de um relatório contendo estudos atinentes aos indicadores de conformidade no tocante às distorções harmônicas, os quais devem obedecer aos limites apresentados na Tabela 3.1 (ONS, 2016a), em consonância com a nota técnica NT 009/2016 – REV 02.

TABELA 3.1
LIMITES INDIVIDUAIS PARA OS INDICADORES DTHI E DTHT95%

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par		DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95% = 1,5%			

As mencionadas orientações são embasadas no cálculo de parâmetros críticos, ou seja, considerando as situações nas quais as distorções de tensão no PAC são máximas. Visando o atendimento a este quesito, a rede interna deve ser modelada a partir do circuito equivalente de Norton para cada ordem harmônica significativa, considerando todas as possíveis condições de operação do parque e que este se encontra desconectado da Rede Básica. Por outro lado, a impedância da rede externa é obtida pelo lugar geométrico (LG) no plano complexo das admitâncias. A Figura 3.10 ilustra o circuito equivalente representativo a ser considerado nos estudos em questão.

Figura 3.10 Arranjo do ponto de acoplamento comum entre o parque eólico e a Rede Básica



Fonte: Adaptada de Nota Técnica 009/2016 REV 2.0.

Sendo:

I_h = fonte de corrente harmônica equivalente, de ordem h, rede interna;

\dot{Y}_{ih} = admitância harmônica equivalente, de ordem h, rede interna;

\dot{Y}_{bh} = admitância harmônica equivalente, de ordem h, rede básica;

A admitância equivalente da Rede Interna (\dot{Y}_{ih}) é obtida a partir dos parâmetros constituintes do acessante, a exemplo dos cabos, transformadores, bancos de capacitores e filtros harmônicos. Para o cálculo da fonte de corrente equivalente (I_h), a qual representa o conjunto de aerogeradores a serem operados, emprega-se a expressão enunciada em (3.7), em consonância com a IEC 61000-3-6 (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

$$I_h = \left(\sum_{i=1}^m I_{n,i}^a \right)^{\frac{1}{a}} \quad (3.7)$$

Sendo:

n = ordem harmônica;

m = número total de fontes;

a = fator de agregação;

Quanto ao mencionado fator de agregação, este se trata de um parâmetro constante para cada ordem harmônica e os pesos a ele atribuídos encontram-se apresentados na Tabela 3.2.

TABELA 3.2
CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE CONCORDÂNCIA

Fator de Agregação	Ordem Harmônica
1	$n < 5$
1,4	$5 \leq n \leq 10$
2	$n > 10$

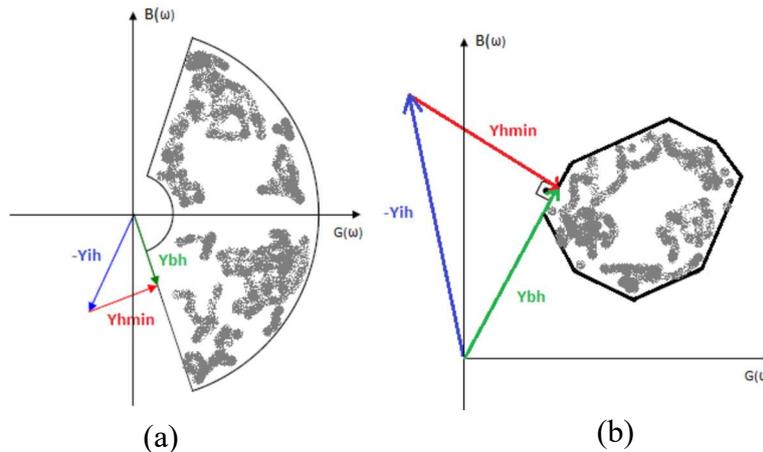
Embora reconheça-se que o fator de agregação permite, em certas situações, abrandar a intensidade das correntes harmônicas oriundas dos aerogeradores, vale salientar que, por vezes, as características de propagação de tais fenômenos não são consideradas nos estudos requisitados, visto que as correntes individuais não se propagam



analogamente entre os terminais primário e secundário dos transformadores. Tal premissa se apresenta como base para os estudos de desempenho harmônico no programa HarmZs do CEPEL, o qual é recomendado pelo ONS.

A admitância representativa da Rede Externa (\dot{Y}_{bh}) para cada ordem harmônica é calculada a partir do lugar geométrico das admitâncias no plano complexo, visando a minimização da admitância resultante entre o parque e a Rede Básica. O ONS recomenda o uso do Polígono de “n” Lados ou do Setor Anular para a representação do denominado LG, o qual contempla uma infinidade de pontos obtidos a partir do contingenciamento das linhas de transmissão e transformadores conectados ao PAC até a terceira vizinhança. Isso resultará em uma nuvem de pontos no plano complexo, tal como ilustra a Figura 3.11(a) e (b) (ONS NT 009/2016 - REV.02, 2018).

Figura 3.11 Representação do Lugar Geométrico das admitâncias da Rede Básica pelo (a) Setor Anular e (b) Polígono de “n” Lados.



Fonte: Nota Técnica 009/2016 REV 2.0.

Portanto, a admitância mínima equivalente (Y_{hmin}), a qual é responsável pela maximização da tensão no PAC, pode ser estimada em conformidade com (3.8).

$$Y_{hmin} = |Y_{ih} + Y_{bh}| \quad (3.8)$$

Ressalta-se que, caso a rede externa apresente um perfil pré-desequilibrado ou pré-distorcido, isso pode propiciar a atenuação ou a intensificação dos harmônicos

manifestados PAC. Tais considerações refletem diretamente na capacidade de difusão das correntes distorcidas pela rede e, caso ela seja tratada como um equivalente ideal e perfeitamente equilibrado, isso pode acarretar um comportamento divergente da realidade física esperada.

Cientes disso, a título complementar sem intensão de pormenoriza-las, apresenta-se as principais normativas que versam a operação de complexos eólicos em cada uma dessas instituições.

A IEC consiste em uma organização mundial que objetiva por meio de uma cooperação internacional promover e discutir questões relativas a normas, orientações e recomendações no contexto dos sistemas de energia elétrica. Nesse sentido, por meio de suas orientações, constitui-se como uma instituição amplamente consultada para elaboração de normativas correlatas ao assunto das distorções harmônicas por diversos países. Em uma avaliação macro, a IEC 61000-4-7 constitui-se como uma referência principal nas tratativas de medições, equipamentos e instrumentos para aferição de conteúdo harmônico e inter-harmônico na rede. Em relação àqueles que tratam especificamente sobre a conexão de aerogeradores a série 61400, versa sobre os principais pontos relativos a inserção de parques eólicos e é citada como referência nos Procedimentos de Rede do ONS. Nesse sentido, a IEC 61400-21 (IEC 61400-21-1:2019, 2019), atualizada e disponibilizada em setembro de 2019, corresponde a uma importante diretriz aos critérios correlatos à QEE em complexos eólicos, todavia, sua exploração versará em desenvolvimentos futuros desta pesquisa.

Por fim, o instituto americano, por meio do guia normativo IEEE Standard 519 (IEEE STD. 519-2014, 2014), mostra-se como a mais conceituadas e citadas fonte da temática referente as distorções harmônicas. Um conciso material é tratado neste padrão, abrangendo aspectos desde de a geração, efeitos, formas de medição e indicadores de limites.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

No presente capítulo foi investigado os diversos fatores que influenciam na geração harmônica no aerogerador DFIG. Para tanto, os principais elementos pretensos a contribuir com tais conteúdos harmônicos foram de algum modo abordados, bem como



os processos operativos e de controle que influenciam diretamente nas análises harmônicas aqui pretendidas. Nesse sentido, identificou-se que estes são oriundos, entre outras razões, dos aspectos construtivos da máquina, da interação entre rotor, estator, conversor *back-to-back* e sua propagação entre tais elementos, podendo ainda, sofrer influência de aspectos elétricos do ponto de conexão (desequilíbrios, distorções prévias, etc.).

Constatou-se também que a operação do conversor *back-to-back* é um pretense causador de ordens harmônicas de alta frequência devido ao processo de chaveamento, todavia sua operação na região de sobremodulação e saturação, esboçam uma gama de conteúdo harmônico em baixa frequência. Percebeu-se também que a interação entre conversores pelo barramento de corrente contínua, entre o RSC e rotor da máquina e ainda entre a propagação no entreferro existentes entre rotor e estator, adidos com o movimento do rotor, são pretensos causadores de frequências harmônicas não inteiras em relação a fundamental.

Por fim, as principais normativas atuais no cenário brasileiro foram tratadas em seus pormenores a fim de relacionar o conteúdo cerne deste trabalho e suas diligências, sobremaneira, aquelas relacionadas com os limites de conformidade harmônica e modelagem do sistema.

Feitas as investigações pertinentes ao referido capítulo, dar-se-á, em sequência, a caracterização do sistema e modelagem computacional para desenvolvimentos dos estudos de caso aqui almejados.

CAPÍTULO 4

Este capítulo apresenta as principais premissas para a caracterização, parametrização e modelagem da rede de acesso e dos aerogeradores DFIGs implementados no software *Matlab/Simulink*®. Isso tem por objetivo atender aos estudos de caso relacionados, no que se refere à geração, incremento e propagação das distorções harmônicas não características no contexto da geração eólica de energia.

CAPÍTULO 4. IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO E COMPLEXO EÓLICO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A necessidade de estudos que analisem e relacionem os principais fatores de influência correlatos às distorções harmônicas, sabidamente nocivas aos partícipes da cadeia de geração, transmissão, distribuição e consumo do produto energia elétrica, conforme afirmado nos capítulos anteriores, demanda estudos e análises prévias para inserção de acessantes com características não lineares.

Para tanto, o principal instrumento utilizado nesses estudos constitui-se de modelagens computacionais que representem o ente em questão com o maior nível de fidelidade possível. Estes, ainda, são requeridos pelo ONS nos estudos de acesso de novos entes geradores, permeando avaliações individuais impostas ao agente acessante e avaliações de desempenho proferidas na rede acessada.

Com este foco, em um primeiro momento, trabalhar-se-á, nesta unidade, as principais características do complexo eólico adotado para o desenvolvimento desta dissertação, em conjunto com o a rede elétrica de acesso na qual este será conectado. Cabe aqui ressaltar que o arranjo equivalente a ser descrito é condizente com instalações reais existentes no nordeste brasileiro, as quais são matéria atual de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) realizado em parceria com no Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Salienta-se, ainda, que os devidos acordos de confidencialidade entre a entidade de fomento e a executante foram



rigidamente respeitados e mantidos, no que se refere ao uso dos dados no presente trabalho.

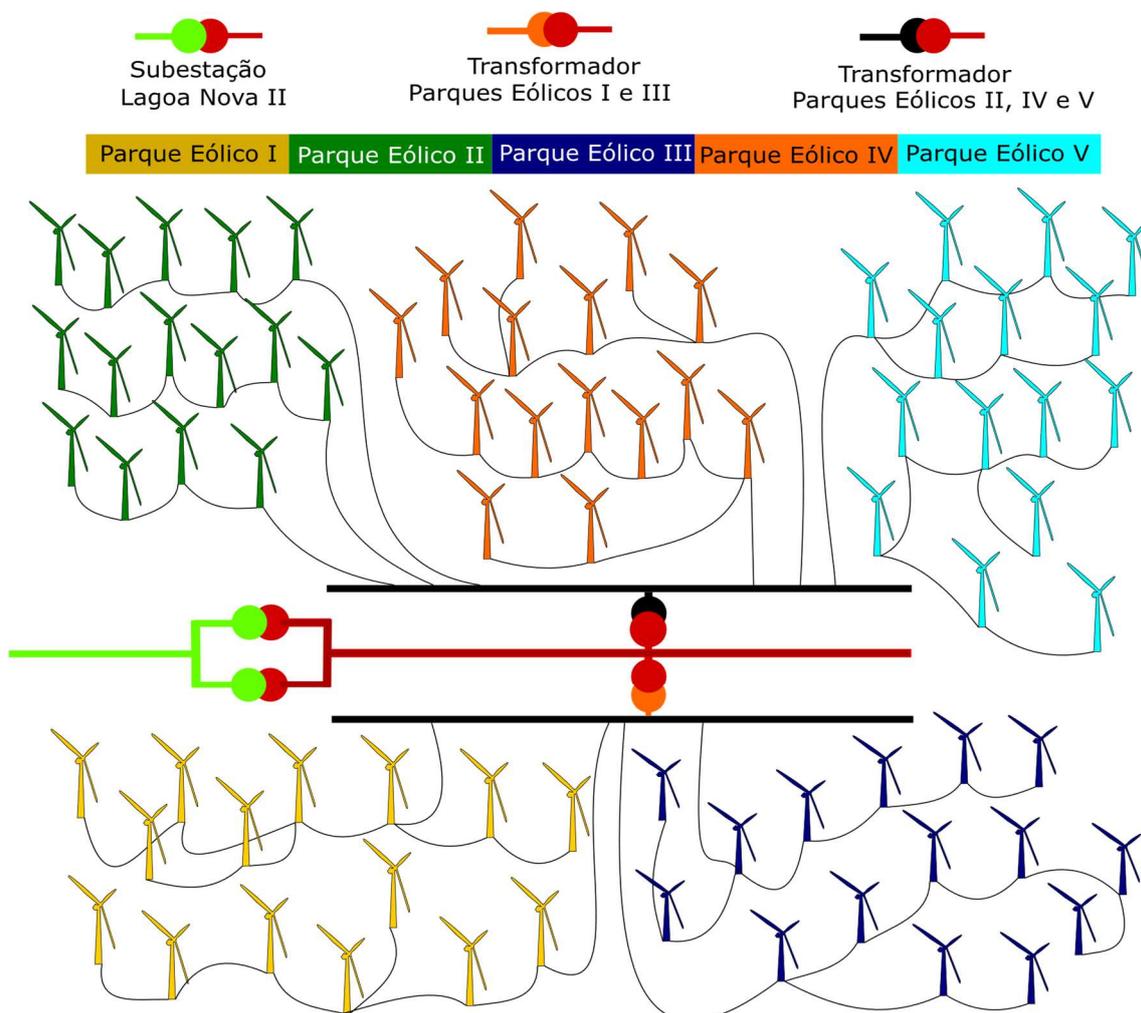
Nesse sentido, após as necessárias tratativas quanto aos parâmetros, arranjos, composição, tecnologias e demais características do sistema real adotado, procedeu-se com a implementação em ambiente computacional utilizando a plataforma *Matlab/Simulink*®, *software* amplamente empregado no contexto acadêmico e com sólido reconhecimento nas análises voltada à área de engenharia e ciências.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA REDE INTERNA E REDE EXTERNA

Nos capítulos precedentes, ressaltou-se a crescente expansão de sistemas de conversão de energia eólica no cenário energético brasileiro, sobremaneira, no nordeste do país. Nessa perspectiva, o sistema elétrico real aqui utilizado materializa-se a partir do leilão de energia promovido pela ANEEL em 2010, o qual propiciou a criação de cinco centrais geradoras distintas, estas, neste trabalho, serão denominadas de Parques Eólicos (PEs) I, II, III, IV e V. Tais PEs constituem um empreendimento com capacidade instalada de 150 MW, dotadas com 75 aerogeradores modelo DFIG com potência de 2MW. Os processos de construção deste complexo iniciaram-se em 2014, passando a operar comercialmente no ano de 2016 (“NEOENERGIA”, 2019).

A fim de ilustrar o arranjo do sistema de geração eólico aqui tratado, apresenta-se, na Figura 4.1, o sistema completo contendo todos os parques modelados. Vale ressaltar que os parâmetros de cada equipamento são descritos nos itens subsequentes e nos anexos contidos neste trabalho, correlacionando-os com os modelos comerciais instalados em campo. Toda modelagem implementada constitui-se da disposição real dos aerogeradores no complexo, sem premissas equivalentes, respeitando a configuração real do parque.

Figura 4.1 Arranjo completo do complexo eólico, transformadores de conexão e transformadores da subestação de fronteira com o SIN.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

4.3. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO COMPLEXO EÓLICO

A fim de viabilizar as análises e estudos propostos nesta dissertação de mestrado, são utilizados os modelos computacionais desenvolvidos pelo *Hydro Quebec* que se encontram disponíveis no *Matlab/Simulink*®, especificamente, na biblioteca *Simscape Electrical*, conteúdo *Specialized Power Systems*, categoria *Renewable Energy Systems*. Tais modelos baseiam-se em (GAGNON, R. et al., 2012)(GAGNON, R. et al., 2010).

O referido modelo computacional da unidade de geração eólica, conforme evidenciado em (GAGNON, R. (MathWorks D., 2010), qualifica-se como um instrumento computacional detalhado, abrangendo seus componentes de forma realística,



a saber, topologia e controle dos conversores, características físicas dos dispositivos semicondutores utilizados e o dinamismo inerente à alta tecnologia dos sistemas de conversão de energia eólica, viabilizando, assim, de forma aderente e coesa as análises de interesse aqui pretendidas. Todavia, muito embora o modelo utilizado se mostre adequado e satisfatório para as análises e estudos dissertados neste documento, adequações foram realizadas a fim de representar o complexo eólico sob estudo. Tais refinamentos serão detalhados nos tópicos em sequência.

À luz dessas informações, é apresentada, nos itens subsequentes, a parametrização dos equipamentos utilizados na modelagem computacional alinhados aos modelos reais em campo, com especial atenção àqueles que estão intimamente relacionados com o perfil da corrente harmônica injetada pelo aerogerador tipo DFIG.

i. Gerador de indução duplamente alimentado com rotor bobinado

Para representação da máquina de indução com rotor bobinado utilizar-se-á o modelo baseado nos fluxos magnéticos concatenados, modelado no domínio do tempo, sendo a relação entre as grandezas tensões, fluxos magnéticos e correntes do gerador representadas no sistema $dq0$ (KLEBER DE ARAÚJO LIMA et al., 2011) e dadas pelas equações (4.1) a (4.4). E ainda, sendo os fluxos magnéticos definidos por (4.5) a (4.8).

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \quad (4.1)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \quad (4.2)$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_{rotor} \psi_{rq} \quad (4.3)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} - \omega_{rotor} \psi_{rd} \quad (4.4)$$

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (4.5)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (4.6)$$

$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (4.7)$$

$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (4.8)$$

Sendo:

$v_{sd}, v_{sq}, v_{rd}, v_{rq}$ = tensão de eixo direto do estator, tensão de eixo em quadratura do estator, tensão de eixo direto do rotor, tensão em eixo em quadratura do rotor, respectivamente;

$i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$ = corrente de eixo direto do estator, corrente de eixo em quadratura do estator, corrente de eixo direto do rotor, corrente de eixo em quadratura do rotor, respectivamente;

$\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_{rd}, \psi_{rq}$ = fluxo de eixo direto do estator, fluxo de eixo em quadratura do estator, fluxo de eixo direto do rotor, fluxo de eixo em quadratura do rotor, respectivamente;

R_s, R_r = resistência dos enrolamentos do estator e rotor;

L_s, L_r, L_m = indutâncias estator, indutâncias do rotor, indutância de magnetização;

ω_s = velocidade angular elétrica no estator;

No que se refere ao conjugado eletromagnético (T_{em}) da máquina de indução duplamente alimentada, tem-se sua definição conforme a equação (4.9), a seguir.

$$T_{em} = \frac{3n_p L_m}{2L_s} (\psi_{sq} i_{sd} - \psi_{sd} i_{sq}) \quad (4.9)$$

Sendo:

n_p = número de polos da máquina de indução;

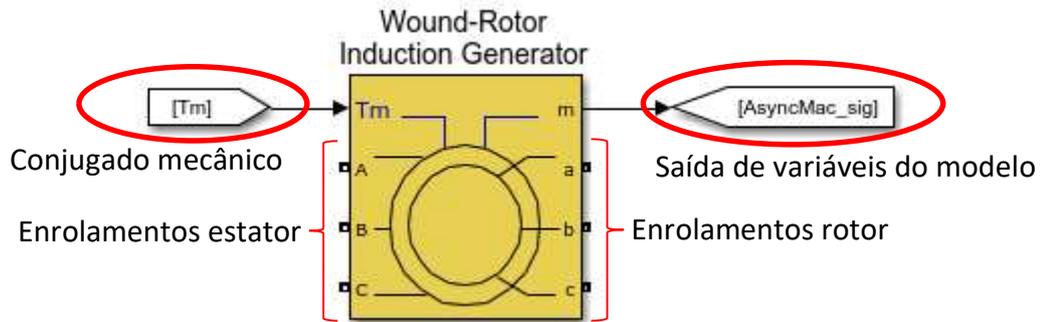
Adido as supracitadas definições, apresenta-se em (4.10) a relação entre o conjugado mecânico do sistema de transmissão, o conjugado eletromagnético, a velocidade do rotor e o momento de inércia do gerador.

$$J_{rotor} \frac{d\omega_{rotor}}{dt} = T_{torção} - T_{em} \quad (4.10)$$

Exposto os princípios matemáticos que definem o gerador de indução duplamente alimentado, apresenta-se na Figura 4.2 o modelo utilizado na implementação da unidade geradora do DFIG.



Figura 4.2 Gerador de indução duplamente alimentado com rotor bobinado disponibilizado no software Matlab/Simulink®.

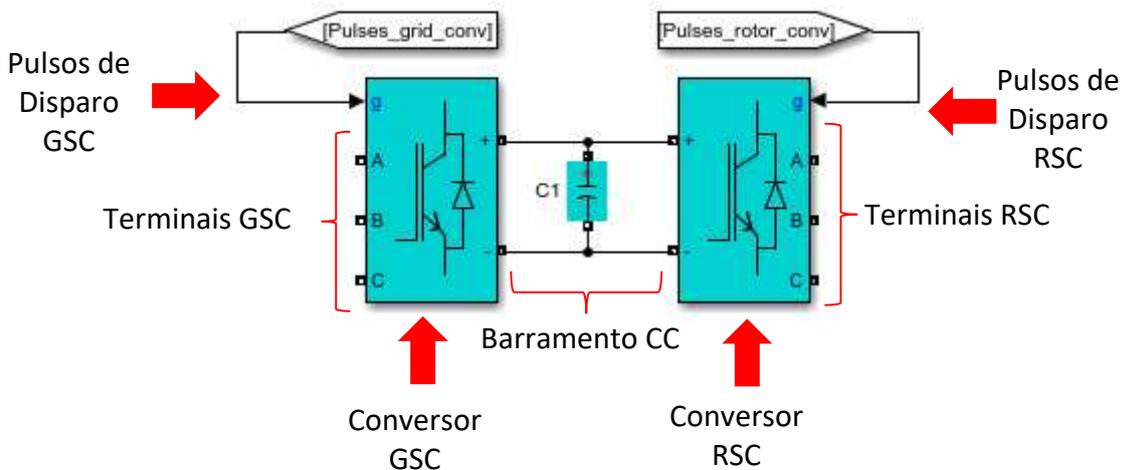


Fonte: Adaptada de Matlab/Simulink®, biblioteca SimPowerSystem.

ii. *Conversor back-to-back*

Conforme discutido em momentos anteriores, os conversores utilizados no aerogerador DFIG são conversores de tensão (*Voltage Source Converter - VSC*), bidirecionais, dois níveis, seis pulsos, com chaves semicondutoras tipo IGBT, interligados por um barramento CC em topologia *back-to-back*, sendo um ligado ao rotor da máquina (RSC) e outro realizando a interface com o sistema (GSC). A Figura 4.3, apresenta o arranjo de conversores utilizados na modelagem, os quais consistem em modelos disponibilizados na biblioteca *SimPowerSystem* do *Simulink*®.

Figura 4.3 Configuração do conversor *back-to-back* disponibilizado no software Matlab/Simulink®.

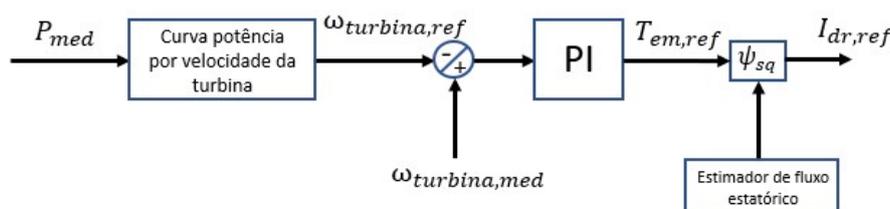


Fonte: Adaptada de Matlab/Simulink® biblioteca SimPowerSystem.

Pautados agora na análise do conversor do lado do rotor RSC, o qual, conforme discutido no capítulo anterior, possui as funções de controle do rotor da máquina de indução a fim de estabelecer o rastreamento MPPT, viabilizando a transferência de energia gerada para a rede elétrica, bem como, o ajuste de potência reativa e regulação de tensão no PAC.

O regime operacional da máquina, de forma geral, pressupondo que a turbina tenha sua operação sempre no ponto de máxima potência (ABDULLAH et al., 2012), por meio do sistema de controle do conjugado eletromagnético irá propiciar os valores de referência para corrente de eixo direto ($I_{dr,ref}$), conforme é ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Estratégia operacional para a definição de referência para a corrente de eixo direto aplicada no rotor da máquina.



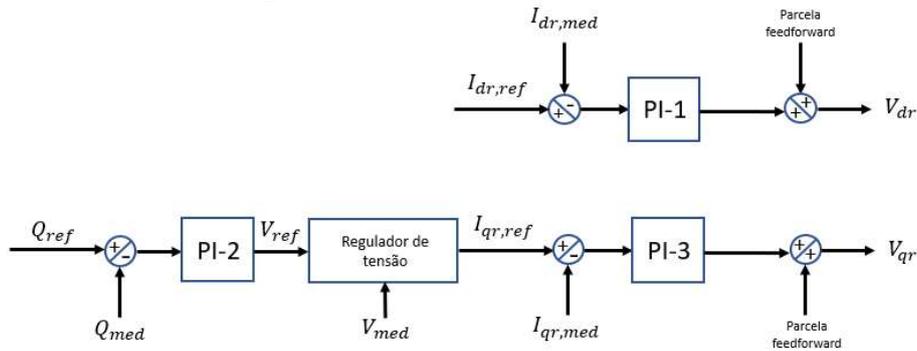
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

De posse da referência de corrente de eixo direto ($I_{dr,ref}$), a estratégia de controle descrita na Figura 4.5, a seguir, pode ser executada de forma que, $I_{dr,ref}$ é comparada com a corrente de eixo direto medida ($I_{dr,med}$), o erro obtido é submetido ao controlador ($PI - 1$), que propicia a geração da tensão de eixo direto no rotor (V_{dr}). Simultaneamente na malha de controle de reativo, o valor de potência reativa de referência (Q_{ref}) é comparado com a potência reativa medida ($Q_{f,med}$), alimentando o controlador ($PI - 2$), que por sua vez, irá produzir um sinal de entrada para o regulador de tensão (V_{ref}). O regulador de tensão, nesse momento, baseado na tensão de referência (V_{ref}) e na tensão de saída do aerogerador (V_{med}) irá gerar a referência de corrente de eixo em quadratura ($I_{qr,ref}$), que deve ser injetada na rede a fim de realizar a compensação de potência reativa do sistema. O sinal originado entre a comparação do ($I_{qr,ref}$) com ($I_{qr,med}$), alimenta o controlador ($PI - 3$), que irá produzir a tensão de eixo em quadratura direto (V_{qr}) a qual é aplicada no rotor da máquina de indução.



Conforme verificado toda estratégia de controle baseia-se na teoria de controle vetorial ($dq0$), assim, os termos de acoplamento entre as malhas de controle são inseridos como parcelas *feedforward*, buscando a melhoria dinâmica do mecanismo de controle.

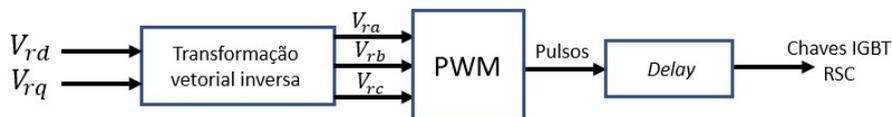
Figura 4.5 Estrutura de controle do RSC.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Definidas, de forma geral, as malhas de controle correlatas ao RSC, as quais propiciam os sinais de tensão V_{dr} e V_{qr} , realiza-se, neste momento, a transformação vetorial inversa obtendo tensões trifásicas de referência V_{ra} , V_{rb} e V_{rc} que correspondem ao sinal de entrada do sistema de chaveamento das chaves estáticas que compõem a topologia do conversor. Todavia, vale destacar que um *delay* correlato ao tempo morto, explanado no capítulo anterior, foi inserido no modelo de aerogerador DFIG disponibilizado no *Simulink*®, haja vista que este não contemplava tal método em sua modelagem. A Figura 4.6 ilustra de forma didática o procedimento ora descrito.

Figura 4.6 Descrição do sistema de chaveamento implementado RSC.



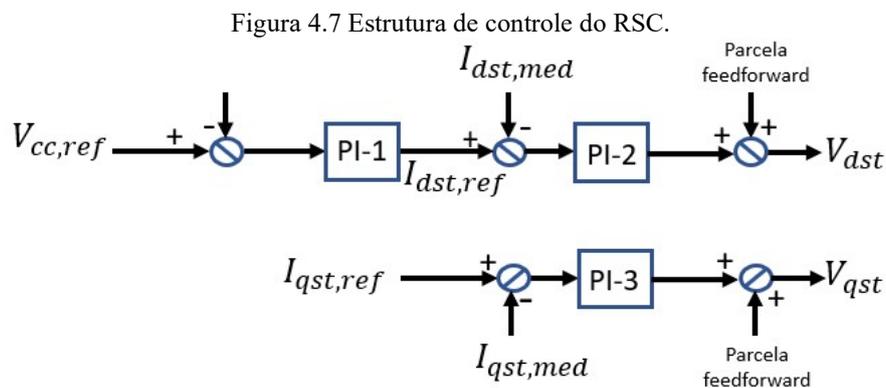
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Com atenção aos critérios de controle implementados no conversor do lado da rede, conforme apontado no capítulo anterior, basicamente, este possui a função de controlar os níveis de tensão do barramento em corrente contínua próximos a seu valor de referência, além de viabilizar o controle de potência reativa no ramo que está acoplado.

Nesse sentido, a partir do valor de referência estabelecido para tensão do elo de corrente contínua ($V_{CC,ref}$), compara-se o mesmo com o valor de tensão contínuo no barramento ($V_{CC,med}$), possíveis erros dessa comparação alimentam o controlador ($PI - 1$), que fornecerá a referência de corrente de eixo direto ($I_{dst,ref}$), logo, essa corrente é comparada com a corrente de eixo direto medida ($I_{dst,med}$), sendo a diferença proveniente dessa comparação provida ao controlador ($PI - 2$), esse, por sua vez, produzirá a tensão de eixo direto (V_{dst}) nos terminais de saída do conversor GSC.

Complementarmente, a função de controle de potência reativa do conversor do lado rede, é viabilizada a partir da referência de corrente do eixo em quadratura ($I_{qst,ref}$) comparada com a respectiva grandeza medida ($I_{qst,med}$), o resultado é fornecido ao controlador ($PI - 3$), que irá sintetizar a tensão de eixo em quadratura (V_{qst}) na saída do GSC.

Finalmente, como no controle do RSC, é verificado que toda estratégia de controle do GSC é baseada na teoria de controle vetorial ($dq0$), assim, os termos de acoplamento entre as malhas de controle são inseridos como parcelas *feedforward*. A Figura 4.7 representa o esquemático do controle anteriormente descrito.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

No que tange aos critérios do acionamento das chaves estáticas do GSC, de posse das tensões V_{dst} e V_{qst} sintetizadas, é aplicado a transformação vetorial inversa, obtendo as tensões de referência V_{ast} , V_{bst} e V_{cst} que serão a entrada do controle PWM, viabilizando o acionamento das chaves, neste também é inserido o tempo morto no processo de chaveamento. A Figura 4.8 denota o processo anteriormente descrito. Vale



ressaltar que duas técnicas de modulação de largura de pulsos foram utilizadas na modelagem computacional em momentos distintos, maiores informações estão disponibilizadas na seção de anexos desta dissertação.

Figura 4.8 Descrição do sistema de chaveamento implementado GSC.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

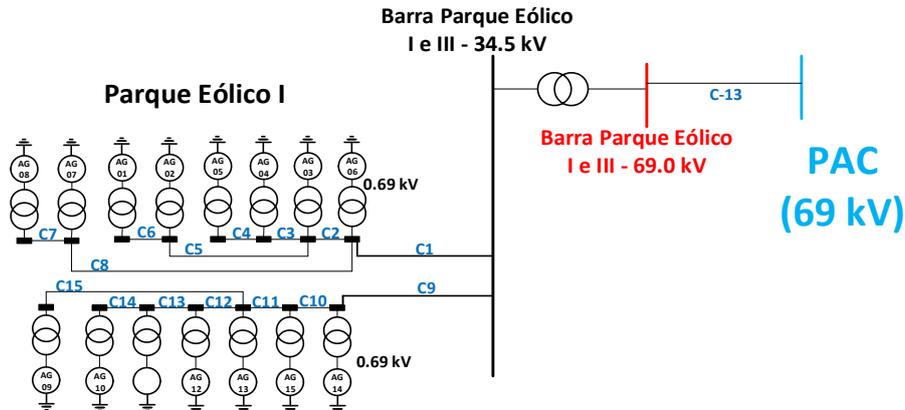
Por fim, reitera-se que demais informações referentes a modelagem computacional utilizada encontra-se nos anexos deste trabalho.

4.4. PARAMETRIZAÇÃO DA REDE INTERNA E REDE EXTERNA MODELADOS

Neste momento, apresenta-se nos tópicos seguintes os parâmetros utilizados na modelagem computacional implementada, nos elementos que compõe a rede interna, quais sejam, turbina eólica, gerador de indução duplamente alimentado, RSC, barramento CC do conversor *back-to-back*, GSC, transformado do aerogerador, cabos de conexão dos aerogeradores e aqueles que compreendem a rede externa, sendo o transformador elevador, cabos de conexão da rede externa, transformador de fronteira e equivalente do SIN.

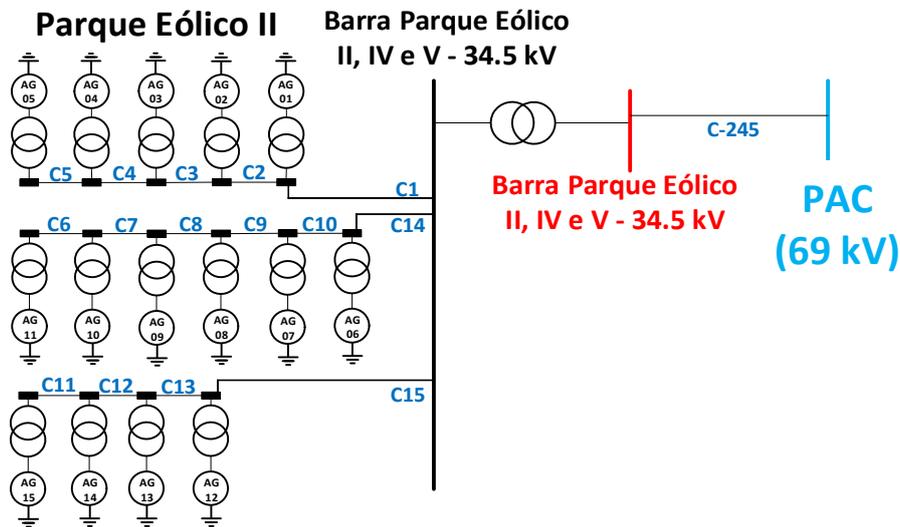
Tais elementos são representados nas Figuras 4.9 a 4.13, contemplando o arranjo elétrico modelado correlatos a rede interna e rede externa utilizadas neste trabalho. Esses versão os respectivos circuitos unifilares dos PEs I, II, III, IV e V, bem como o equivalente da rede externa. Vale destacar que os índices em “C” e “AG”, correspondem a cabos e aerogeradores, respectivamente.

Figura 4.9 Arranjo rede interna Parque Eólico I.



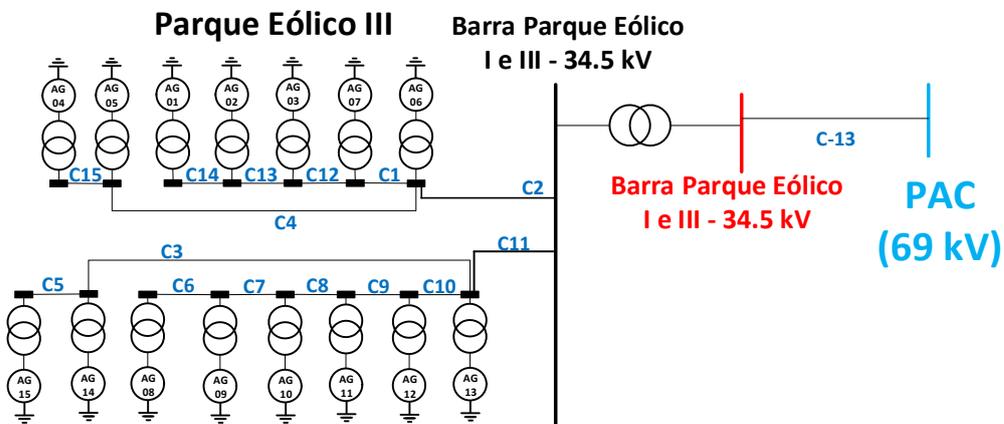
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 4.10 Arranjo rede interna Parque Eólico II.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

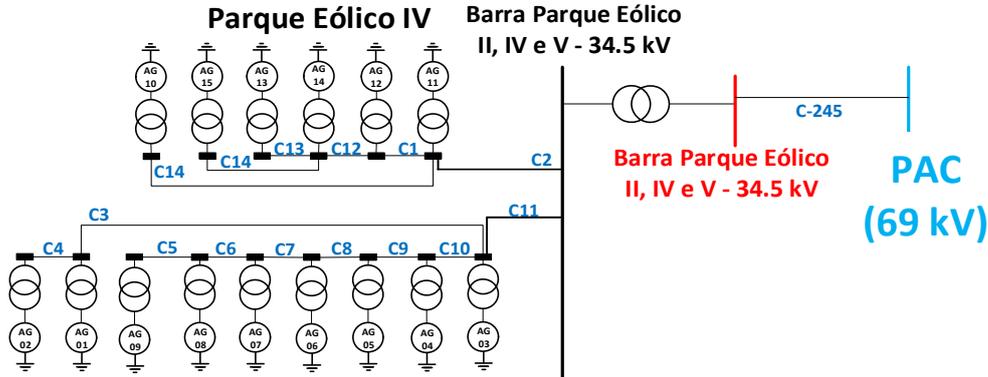
Figura 4.11 Arranjo rede interna Parque Eólico III.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

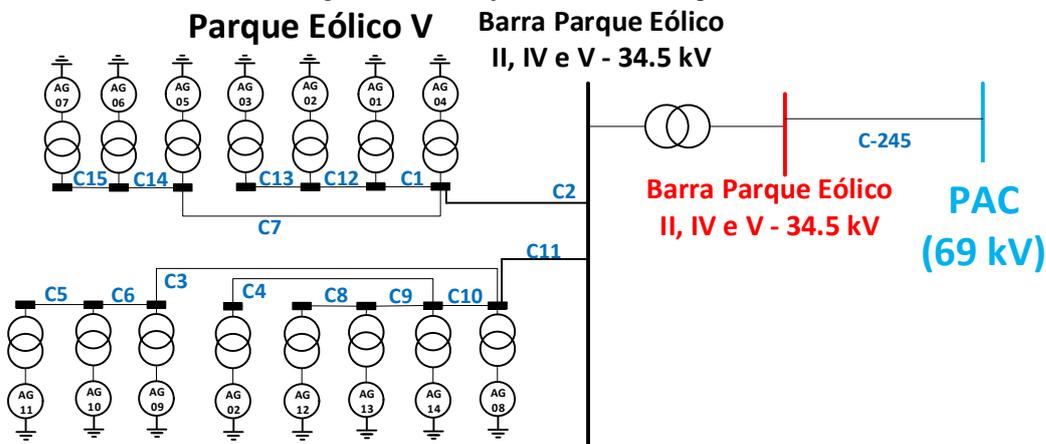


Figura 4.12 Arranjo rede interna Parque Eólico IV.



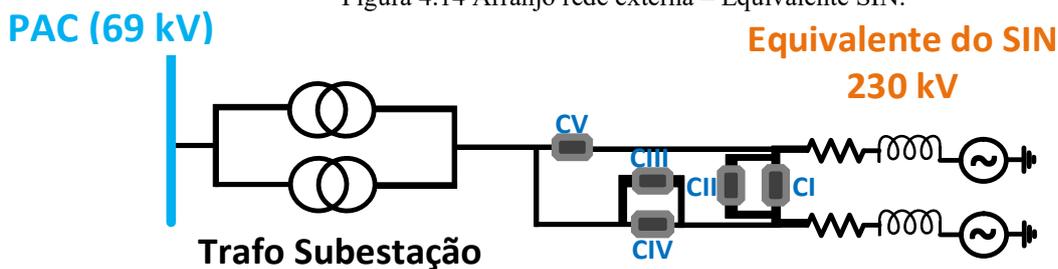
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 4.13 Arranjo rede interna Parque Eólico V.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 4.14 Arranjo rede externa – Equivalente SIN.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

i. Rede interna

As Tabelas 4.1 e 4.2, apresentam os dados utilizados nos elementos que compõe a rede interna dos PEs inseridos na modelagem computacional. Ressalta-se que a disposição destes elementos corresponde àquelas expostas nas Figuras 4.9 a 4.13.

TABELA 4.1
PARÂMETROS DOS AEROGERADORES DFIG UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

TURBINA EÓLICA	
Velocidade nominal [m/s]	13
Velocidade de Cut in [m/s]	6
Velocidade de Cut out [m/s]	30
Constante de Inércia da turbina [s]	4,32
GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO	
Tipo	Rotor bobinado e anéis coletores
Potência Nominal (estator + rotor) [MW]	2
Potência Nominal [MVA]	2,040
Tensão Vac[V]	690
Frequência nominal [Hz]	60
Número de polos	4
Resistência do estator [pu]	0.023
Reatância do estator [pu]	0.18
Resistência do rotor [pu]	0.016
Reatância do rotor [pu]	0.16
Indutância mútua [pu]	2.9
Inércia do gerador [s]	0.685
RSC	
Técnica de Modulação	SPWM
Frequência de chaveamento [Hz]	2500
Tempo morto [μs]	5
Ganho proporcional para controle de corrente	0.6
Ganho integral para controle de corrente	8
Ganho integral para regulador de potência reativa	800
Ganho integral para regulador de tensão	20
Ganho proporcional para MPPT	3
Ganho integral para MPPT	0,6
BARRAMENTO TENSÃO CC	
Capacitância [F]	133333
Tensão nominal [V]	1200
GSC	
Técnica de Modulação	SPWM
Frequência de chaveamento [Hz]	2500
Tempo morto [μs]	5
Resistência de acoplamento do lado da rede [pu]	0,009
Indutância de acoplamento do lado da rede [pu]	0,9
Filtro LC – Capacitância [kvar]	160
Ganho proporcional para controle de corrente	0,83
Ganho integral para controle de corrente	5
Ganho proporcional para controle da tensão no barramento contínuo	8
Ganho integral para controle da tensão no barramento contínuo	400



Os transformadores do aerogerador têm a função de viabilizar o interfaceamento da geração em baixa tensão com o sistema de média tensão. As especificações do transformador utilizado nas simulações pertencentes à rede interna são disponibilizadas na Tabela 4.2 a 4.6, e conseqüentemente, sua parametrização na modelagem computacional realizada. Vale destacar seus parâmetros em [pu] ou [%] correspondem aos valores bases de 100 MVA e 69kV.

TABELA 4.2
PARÂMETROS DOS TRANSFORMADORES DO AEROGERADOR.

TRANSFORMADOR DO AEROGERADOR	
Tipo	Trifásico a seco
Relação de transformação [kV]	0,69/34,5
Potência Nominal	2040 kVA
Frequência [Hz]	60
Grupo de ligação	Dyn11
Classe de Isolação	F
Nível de Isolamento [kV]	24
Reatância (%) – Base Própria	11,6

TABELA 4.3
EQUIVALENTES ELÉTRICOS DOS TRANSFORMADORES DO AEROGERADOR IMPLEMENTADOS NA MODELAGEM

TRANSFORMADOR DO AEROGERADOR	
Relação de transformação [kV]	0,69/34,5
Potência Nominal [kVA]	2040
Frequência [Hz]	60
Resistência enrolamento primário [pu]	0,00116
Indutância enrolamento primário [pu]	0,058
Resistência enrolamento secundário [pu]	0,00116
Indutância enrolamento secundário [pu]	0,058
Resistência de magnetização [pu]	500

TABELA 4.4
PARÂMETROS DOS TRANSFORMADORES ELEVADORES – PARQUES EÓLICOS I, II, III, IV, V.

Subestação	Ligação AT/BT	Grupo de ligação	Relação de Tensão (kV)	Potência ONAN/ONAF (MVA)	Reatância Percentual (%)
Parque Eólico II, IV e V	Delta/ Estrela com neutro acessível	Dyn1	69/34,5	80/100	12,5
Parque Eólico I e III	Delta/ Estrela com neutro acessível	Dyn1	69/34,5	55/70	12,5

TABELA 4.5

EQUIVALENTES ELÉTRICOS DOS TRANSFORMADORES ELEVADORES – PARQUES EÓLICOS II, IV E V.

TRANSFORMADOR DO AEROGERADOR	
Relação de transformação [kV]	34,5/69
Potência Nominal [MVA]	100
Frequência [Hz]	60
Resistência enrolamento primário [pu]	0,00125
Indutância enrolamento primário [pu]	0,0625
Resistência enrolamento secundário [pu]	0,00125
Indutância enrolamento secundário [pu]	0,0625
Resistência de magnetização [pu]	50000

TABELA 4.6

EQUIVALENTES ELÉTRICOS DOS TRANSFORMADORES ELEVADORES – PARQUES EÓLICOS I E III.

TRANSFORMADOR DO AEROGERADOR	
Relação de transformação [kV]	34,5/69
Potência Nominal [MVA]	70
Frequência [Hz]	60
Resistência enrolamento primário [pu]	0,00178
Indutância enrolamento primário [pu]	0,089
Resistência enrolamento secundário [pu]	0,00178
Indutância enrolamento secundário [pu]	0,089
Resistência de magnetização [pu]	50000

Os condutores de conexão são constituídos de cabos comerciais de 150 a 630 mm² dispostos em eletrodutos subterrâneos que possuem uma passagem no fundo da torre. Vale ressaltar que as longas distâncias e forma de disposição dos cabos, influenciam de forma significativa as condições referentes à indutância total enxergada pelos equipamentos que a compõe. Os dados completos referentes às características dos cabos parametrizado na modelagem computacional da rede interna e rede externa são disponibilizados na seção de anexos deste trabalho.

ii. Rede externa

A subestação elevadora, que realiza a conexão junto à rede básica consiste em dois transformadores em paralelo, conforme anteriormente apresentado (Figura 4.14). As Tabela 4.7 e 4.8 apresenta os dados do equipamento em questão, e conseqüentemente, sua parametrização na modelagem computacional realizada.



TABELA 4.7
PARÂMETROS DOS TRANSFORMADORES DA SUBESTAÇÃO

Relação de Tensão (kV)	Ligação AT/BT	Grupo de ligação	Potência (MVA)	Reatância (%)*
230 / 69	Delta/ Estrela com neutro acessível	Dyn1	150	8,8

TABELA 4.8
EQUIVALENTES ELÉTRICOS DOS TRANSFORMADORES ELEVADORES – PARQUES EÓLICOS I E III.

TRANSFORMADOR DO AEROGERADOR	
Relação de transformação [kV]	69/230
Potência Nominal [MVA]	150
Frequência [Hz]	60
Resistência enrolamento primário [pu]	0,00132
Indutância enrolamento primário [pu]	0,066
Resistência enrolamento secundário [pu]	0,00132
Indutância enrolamento secundário [pu]	0,066
Resistência de magnetização [pu]	50000

No que se refere às premissas dos equivalentes elétricos para níveis de curto-circuito correlatos ao sistema de transmissão, utilizou-se o software Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS 6.5), desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Com relação à base de dados, tem-se que estas correspondem à Base de Dados para Estudos de Curto-Circuito (BDCC), disponibilizada e desenvolvida pela Empresa de Pesquisas Energética (EPE), relativa ao período 2019-2026, empregando o cenário do ano de 2019. As Tabelas 4.9 e 4.10, expõe os valores implementados.

TABELA 4.9
NÍVEL DE CURTO - SUBESTAÇÃO 230 KV

Nível de curto	Ano	Trifásico [kA]	Monofásico [kA]	Bifásico-terra [kA]
Máximo	2019	8,77∠ – 82,75	9,98∠ – 83,93	9,76∠43,55

TABELA 4.10
EQUIVALENTES ELÉTRICOS - SUBESTAÇÃO 230 KV

Nível de curto	Ano	Impedância de sequência positiva [pu]	Impedância de sequência negativa [pu]
Máximo	2019	0.0286∠82.75	0.0183∠87.62

4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os parâmetros implementados na modelagem computacional desenvolvida no *software Matlab/Simulink*® correspondentes aos dados do complexo eólico real em operação no RN. Desenvolveu-se também os principais conceitos referentes a modelagem computacional ora destacada, permeando aspectos de controle e sua topologia. Neste sentido, informações relevantes do aerogerador DFIG foram apresentadas, com posteriores detalhamentos e informações disponibilizadas nos anexos deste trabalho dissertativo. Assim, de posse do sistema, tem-se, na sequência, a apresentação dos estudos de casos e a correspondente análise dos resultados alcançados.



NÚCLEO DE QUALIDADE
DA ENERGIA ELÉTRICA

CAPÍTULO 5

Neste estágio apresentar-se-á uma série de estudos de casos computacionais com o objetivo de avaliar os impactos de distintos fatores de influência no conteúdo harmônico não característico injetado pela operação do complexo eólico, o qual fora caracterizado anteriormente. Assim, as premissas de cada caso são tratadas, com posterior análise dos resultados, mediante os espectros de frequências harmônica obtidos.

CAPÍTULO 5. ESTUDOS DE CASOS COMPUTACIONAIS E ANÁLISES DE RESULTADOS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez tratados os objetivos ora elencados nesta dissertação, esta seção ocupará de uma série de estudos de casos, os quais, por certo, buscam contribuir para a análise da origem e incremento das harmônicas não características percebidas na geração eólica e seus impactos no que tange à sua propagação na rede. Nesse sentido, é importante destacar que os estudos serão norteados pelas análises das magnitudes e ângulos das correntes harmônicas não características geradas pelo complexo eólico conectado à rede de acesso, o qual, conforme exposto anteriormente, corresponde a um sistema real em operação na região nordeste do Brasil, sendo constituído por aerogeradores comerciais modelo DFIG.

Para tanto, com o intuito de avaliar a aderência do modelo utilizado frente a correntes reais de medição, é exposto nos anexos deste trabalho as correntes medidas do aerogerador 14 do PE III, frente as correntes advindas da simulação computacional implementada no respectivo aerogerador. Os resultados demonstram uma aderência satisfatória e ainda estão alinhados com a literatura atual (LIU, Z. et al., 2017b)(XU et al., 2018).

5.2. ESTUDOS DE CASOS

Neste momento é conveniente salientar que os espectros de frequência harmônica gerados a partir dos estudos de casos possuem sua referência em relação a base de potência de 100 MVA e tensão de 69 kV. Buscando, pois, as análises correlatas às harmônicas não



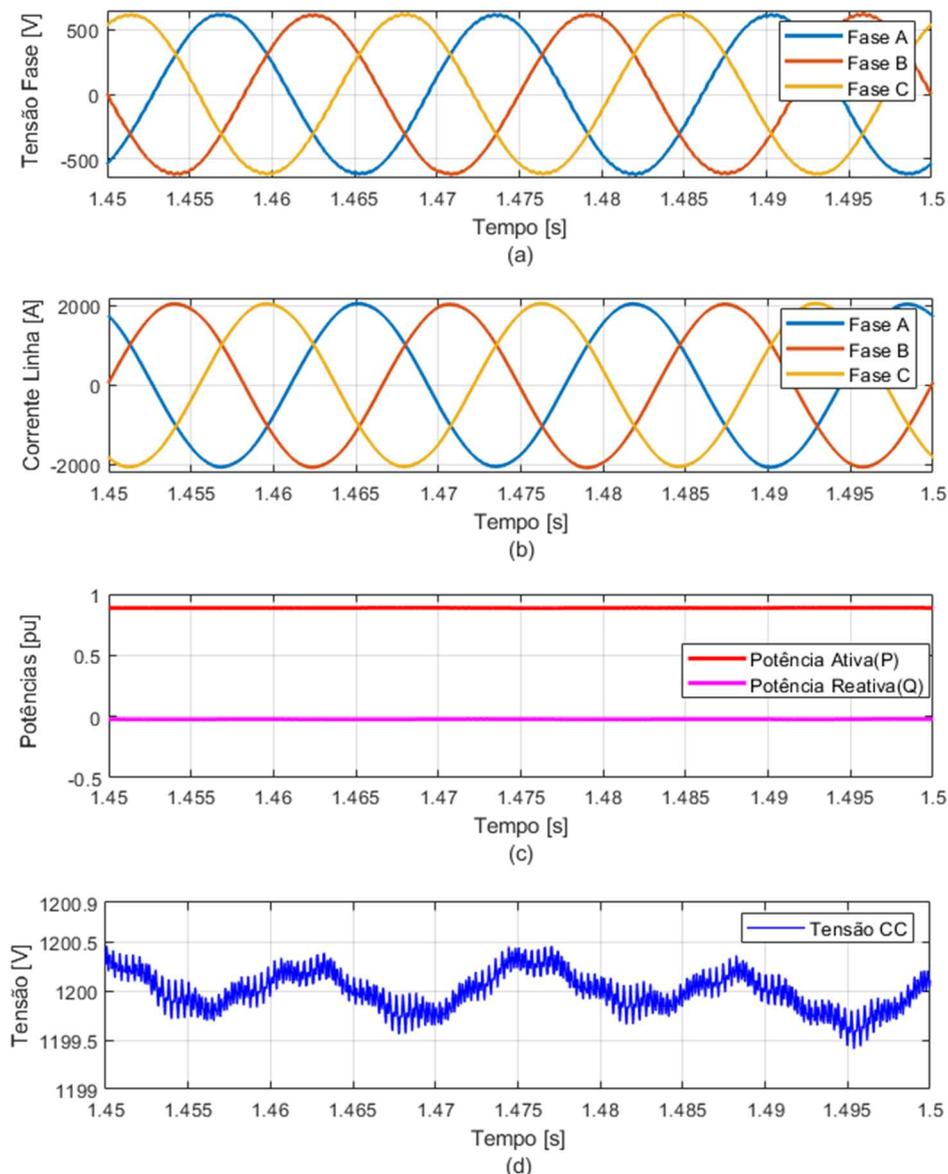
características, omitiu-se do espectro de frequência a componente fundamental, de forma a viabilizar uma melhor visualização para identificação do conteúdo harmônico atípico presente no sistema, haja vista que esses, naturalmente, possuem menores percentuais de magnitude. Outro ponto a ser destacado consiste na caracterização do vento incidente, o qual é aqui modelado supondo um vento base igual a 15 m/s em todos os aerogeradores do parque. Nesses termos, as considerações a priori foram mantidas para as análises que seguem em todos os estudos de casos. Ressalta-se, ainda, que as análises dar-se-ão no PAC (69kV) na subestação de fronteira com o SIN. Nesse âmbito é descrito cada caso a ser investigado adido com as premissas pertinentes. Em sequência, é apresentado os resultados valendo-se do espectro de frequência harmônica de corrente aferida no PAC, com posterior análises e considerações apuradas.

Caso 1. Sistema sob condições normais de funcionamento e suprimento da rede de acesso ideal

Nesse primeiro momento, apresenta-se o funcionamento do complexo eólico sob condições ideais, quais sejam, níveis nulos de desequilíbrios e de distorções pré-existentes na tensão de suprimento, com controle de chaveamento dos conversores SPWM e inserção de tempo morto nos processos de comutação das chaves e demais características correspondem àquelas denotadas no capítulo anterior. É sabido que as análises referentes às componentes harmônicas são tratadas quando um determinado sistema dinâmico atinge suas respostas em um estado de regime permanente.

Com atenção à operação de um único aerogerador, a Figura 5.1 contempla os sinais de tensão de fase e correntes de linha mensurados na barra de 690V do transformador de conexão do aerogerador, bem como a potência ativa, reativa e tensão no barramento CC em condições operacionais normais.

Figura 5.1 Sinais na saída do aerogerador (690V) (a) Tensões, (b) correntes, (c) potência ativa e reativa, (d) tensão contínua no barramento CC.

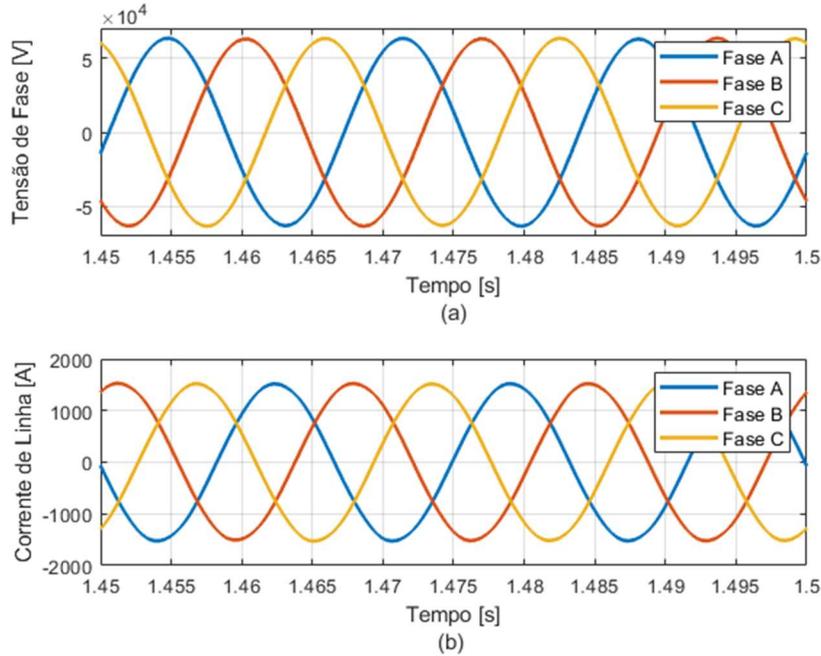


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Nessa lógica, apresenta-se, na Figuras 5.2, os sinais de tensão de fase e correntes no PAC (69kV). Em complemento, tem-se na Figura 5.3, o espectro das correntes harmônicas no PAC (69kV), os quais correspondem àqueles de interesse perante os estudos de casos aqui elencados.

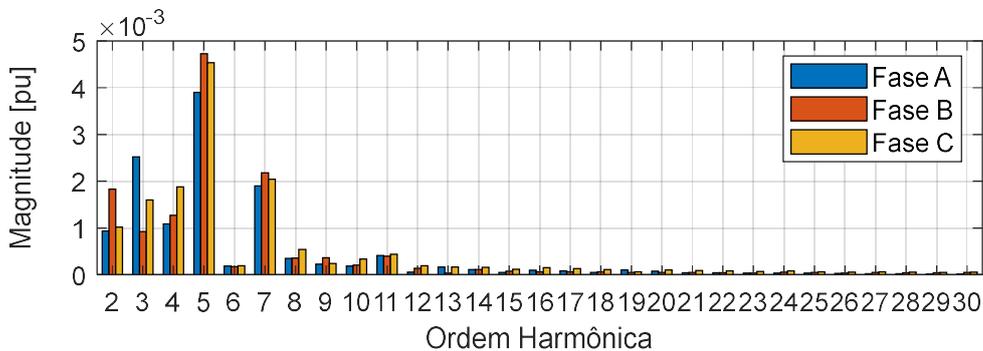


Figura 5.2 Forma de onda dos sinais no PAC (69 kV) - (a) Tensões de fase, (b) Correntes de linha.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 5.3 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Por fim, salienta-se que as investigações dos demais estudos de caso, serão pautadas em comparações com os resultados apresentados nas supracitadas figuras, a julgar por essas serem respostas da operação do sistema eólico em condições ideais da rede de conexão e funcionamento mais adequado do parque.

Caso 2. Quanto à influência do número de parques conectados ao mesmo barramento

Esta avaliação inicial consiste na apuração da influência de um único Parque Eólico (PE I) conectado ao barramento da subestação enquanto os demais parques encontram-se desconectados. Nesse sentido, apresenta-se, na Figura 5.4, o espectro harmônico das correntes para esta condição operativa, em comparação com aquele desenvolvido no caso 1, sob condições normais de operação (Figura 5.3).

Figura 5.4 – Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I.

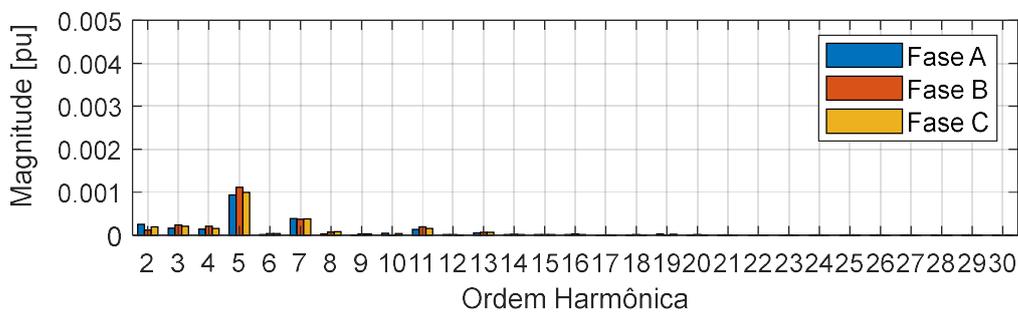
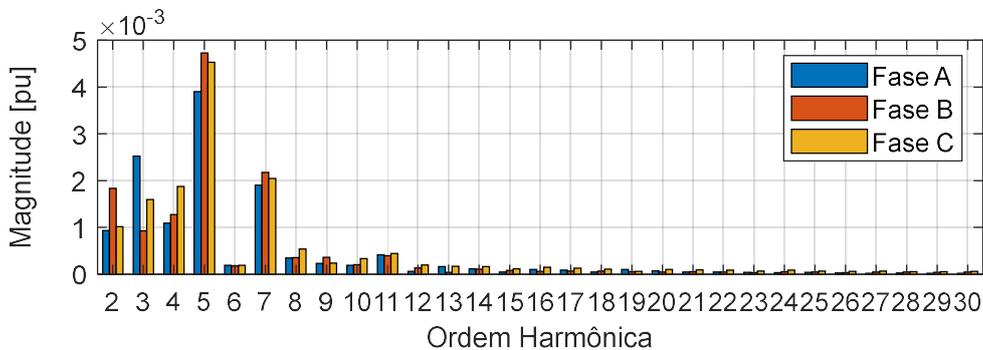


Figura 5.3 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V.



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.

Com respeito às Figuras 5.3 e 5.4, é possível perceber que os espectros de frequências apresentados nos casos 1 e 2 permeiam níveis consideráveis de harmônicas em baixa frequência, com contribuições em ordens atípicas, quais sejam, 2ª, 3ª e 4ª. Todavia, nessa condição operativa as harmônicas características de 5ª e 7ª ordem foram aquelas de maior magnitude. Comparando a Figura 5.3 que representa a inserção de todos os parques eólicos, com a Figura 5.4 que apresenta o resultado de apenas um parque eólico conectado no barramento, percebe-se, conforme esperado, menores níveis percentuais de todas as ordens, haja vista a diminuição de potência instalada. Todavia vale destacar que



o decremento percentual das respectivas ordens não possui uma correlação linear com o número de parques, evidenciando que a interação entre os diversos aerogeradores pode influenciar no processo de composição harmônica no PAC, devido, até mesmo à influência na distorção harmônica nos barramentos internos dos parques. De qualquer forma, estudos adicionais mostram-se necessários a fim de delinear como se dá os processos de agregação de corrente entre os diversos entes eólicos de um mesmo barramento. Vale ainda destacar, mesmo não sendo escopo de estudos neste momento, que desenvolvimentos relacionados à atribuição de responsabilidade harmônica podem contribuir de forma significativa nas análises pertinentes a este estudo de caso, caracterizando quem são os reais entes emissores de determinado conteúdo harmônico percebido no PAC.

Caso 3. Quanto à influência do nível de curto-circuito do sistema acessado

Neste estudo de caso, é avaliada a geração harmônica não característica perante o acesso do complexo eólico a uma rede com níveis de curto-circuito (S_{sc}) maiores que o do PAC analisado. Vale ressaltar que o nível de curto-circuito para o ponto de conexão em questão é consideravelmente baixo (6051,3 MVA em 230 kV) perante a níveis típicos internacionais como os apresentados na normativa EUA IEEE C57.12.00 2006. Nesse sentido, utilizou-se de um nível de curto-circuito trifásico de 25000 MVA (no PAC em 230 kV), tendo como referência a supracitada normativa e mantendo as condições normais expostas no primeiro caso. Apresenta-se na Figura 5.5, o espectro harmônico de corrente em relação ao nível de curto modificado, em comparação com aquele desenvolvido no caso 1, sob condições normais de operação (Figura 5.3).

Figura 5.5 Espectro das correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V - $S_{sc} = 25000 \text{ MVA}$.

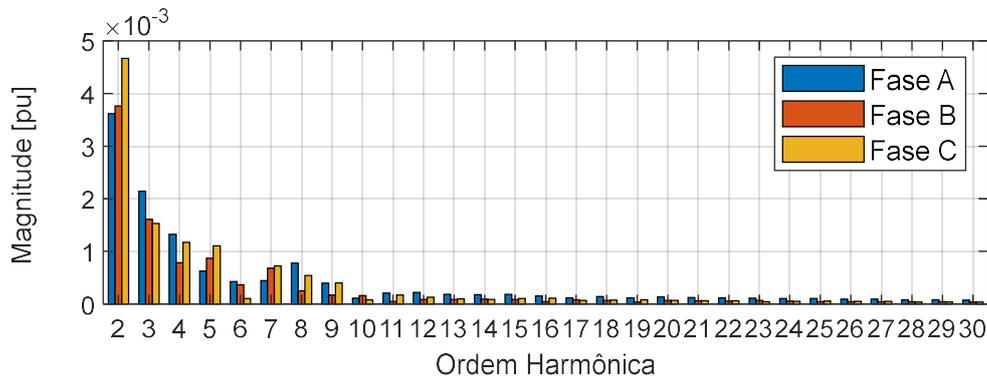
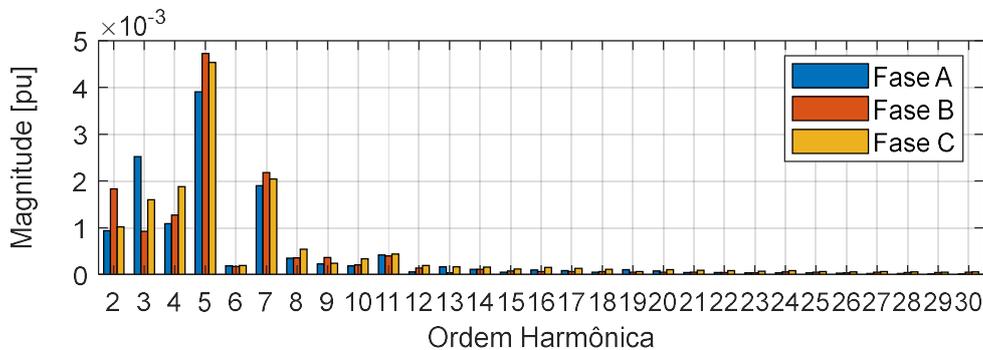


Figura 5.3 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V - $S_{sc} = 6051,3 \text{ MVA}$.



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.

No que tange aos níveis de circuito de um determinado ponto do sistema, vale ressaltar que quando sistemas em corrente alternada possuem características de baixos níveis de curto circuito, rotulando-os como sistemas elétricos fracos, esboçam-se em uma alta de impedância equivalente da rede analisada. Em contrapartida, equivalentes elétricos com características de baixa impedância se portam com níveis elevados de potência de curto-circuito. Assim sendo, em atenção aos resultados providos na Figura 5.5, pode-se perceber, ao compará-lo à Figura 5.3, que o espectro harmônico de correntes apontou para um aumento considerável da 2ª ordem e um decremento das ordens de 5ª e 7ª harmônicas. Tais resultados esboçam a influência direta do nível de curto-circuito na geração harmônica em baixa frequência provida pelo parque, todavia, novos estudos devem ser considerações para uma visualização alicerçada dessa interferência, de forma a relacionar o incremento específico da segunda ordem não característica, perante as demais.



Caso 4. Quanto ao nível de distorção harmônica prévia (background distortion) presente na rede de acesso

Nesta etapa, níveis de pré distorção de tensão da rede de suprimento foram considerados em percentuais distintos, orientando-se pelos limites de tensão no que se refere a distorção de tensão harmônica total (DTHT) estipulados pelo ONS (ONS, 2016c)

Salienta-se que os percentuais prévios de DTHT foram obtidos com o aumento progressivo apenas nas tensões harmônicas características (5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordens). Destaca-se, ainda, que o progressivo aumento foi inserido, primeiramente, nas magnitudes do conteúdo citado, mantendo seus respectivos ângulos nulos. Na sequência, foram inseridos ângulos não nulos e mantidas as alterações nas magnitudes das frequências harmônicas mencionadas anteriormente. Naturalmente, o objetivo, neste momento, consiste em avaliar a influência do conteúdo harmônico característico prévio na rede sob a geração harmônica não característica do complexo e, ainda, sua sensibilidade às condições de ângulo nulo e não nulo do conteúdo pré-existente. Nesse sentido, as ordens características correspondentes às inseridas no conteúdo prévio foram omitidas dos espectros em questão, a fim de elucidar suas influências sobre as demais ordens. Dessa forma, apresenta-se, nas Figuras 5.6 a 5.9, os espectros harmônicos de correntes para o caso em questão, bem como, suas comparações com aquele desenvolvido no caso 1 sob condições normais de operação (Figura 5.3). E ainda, apresenta-se nas Tabelas 5.1 e 5.2 os percentuais em relação a componente fundamental de corrente injetados no sistema para compor o descrito conteúdo prévio de distorção harmônica.

TABELA 5.1
DISTRORÇÃO PRÉVIA NA MAGNITUDE E ÂNGULOS NULOS

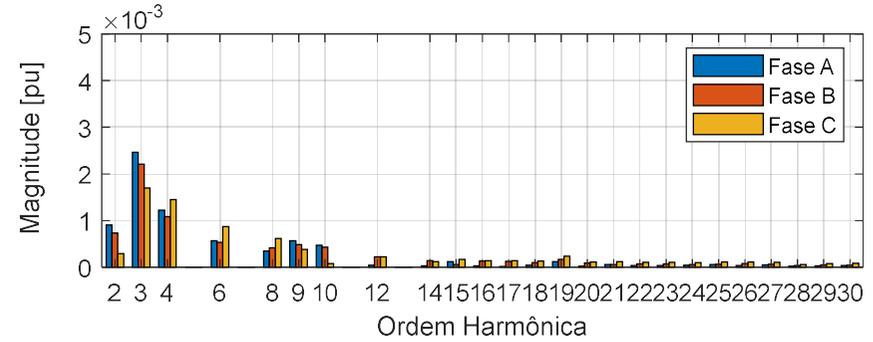
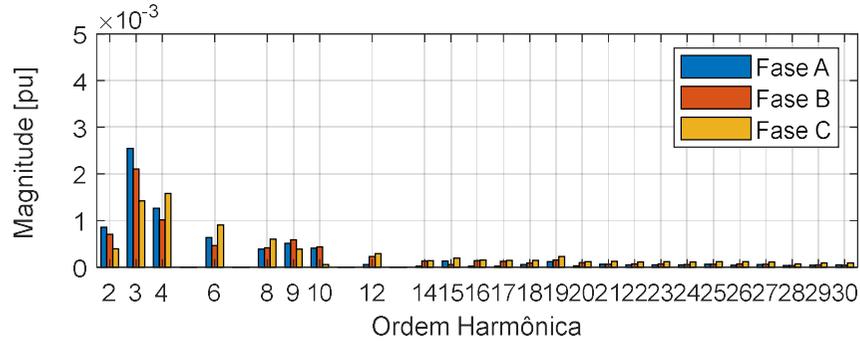
Ordem Harmônica	DTHT 3%		DTHT 4%	
	Magnitude (%)	Ângulo(°)	Magnitude (%)	Ângulo(°)
5 ^a	0,1	0	0,1	0
7 ^a	0,06	0	0,08	0
11 ^a	0,05	0	0,06	0
13 ^a	0,03	0	0,05	0

TABELA 5.2
DISTRORÇÃO PRÉVIA NA MAGNITUDE E ÂNGULOS NÃO NULOS

Ordem Harmônica	DTHT 3%		DTHT 4%	
	Magnitude (%)	Ângulo(°)	Magnitude (%)	Ângulo(°)
5 ^a	0,1	35	0,1	35
7 ^a	0,06	120	0,08	120
11 ^a	0,05	165	0,06	165
13 ^a	0,03	-60	0,05	-60

Considerando ângulos nulos em relação à corrente base

Figura 5.6 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V - DTHT 3% Figura 5.7 Espectro de correntes harmônicas no PAC - PE I, II, III, IV e V - DTHT 4%



Considerando magnitude e ângulos não nulos em relação à corrente base

Figura 5.8 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 3% Figura 5.9 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 4%

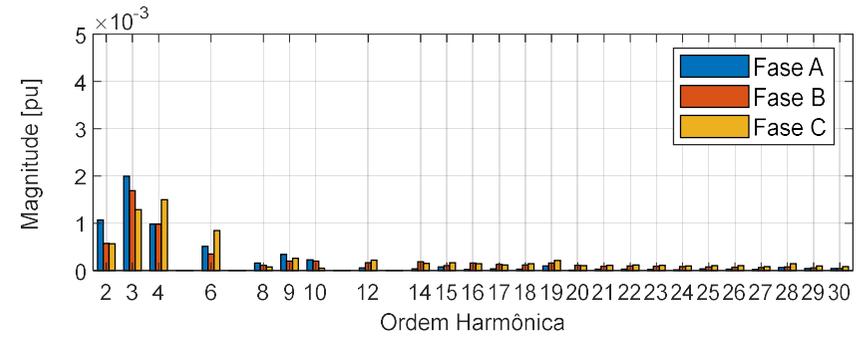
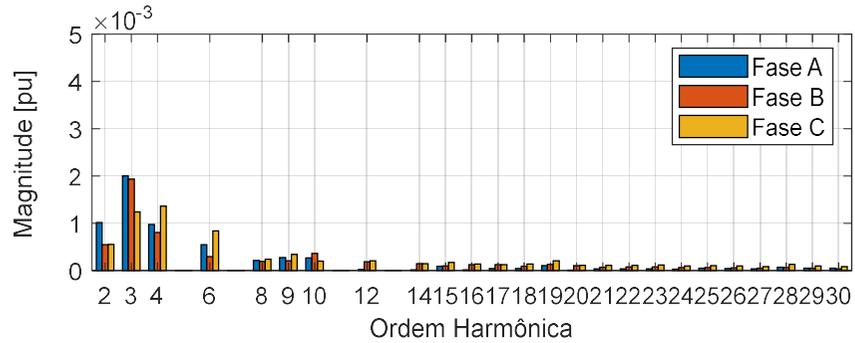
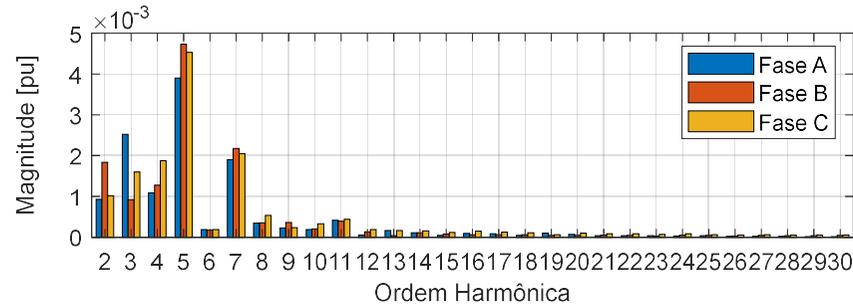


Figura 5.3 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.



Os resultados supracitados nas Figuras 5.6 e 5.7 demonstraram que níveis de distorção harmônica total de 3% e 4% na magnitude das harmônicas características sendo seu ângulo nulo, não apresentam influências significativas nas ordens correlatas ao conteúdo harmônico não característicos. Conquanto, as Figuras 5.8 e 5.9 apresentaram valores ligeiramente inferiores aos das condições anteriores.

Tal situação pode ter ocorrido devido a consideração do ângulo no perfil prévio da rede, o qual, a partir de sua interação com os demais sinais de mesma frequência, pode gerar o incremento ou decremento das respectivas ordens, nesse sentido a consideração do ângulo nos estudos correlatos a distorções pré existentes deve ser investigado em trabalhos futuros a fim de ratificar se tal efeito possui uma formação definida.

Em comparação ao caso base, Figura 5.3, é possível inferir que o conteúdo harmônico prévio das ordens não característicos, propiciou um incremento na 3ª ordem e um decremento na 2ª harmônica, ambos da Fase B, não sendo possível atribuir um comportamento esperado para tal situação.

Caso 5. Quanto ao nível de desequilíbrio prévio (background imbalance) da rede de acesso

No que tange aos níveis de pré-desequilíbrios presentes no sistema, estes serão analisados quanto ao desequilíbrio das magnitudes e/ou ângulos da tensão da rede acessada, todavia, neste momento, sem a presença de pré-distorções. Para tanto, utilizou-se de fatores de desequilíbrios (FD) em percentuais de 2% e 3%, calculados via o Método Cigrée e alinhado com o Submodulo 2.8 da ONS, sendo o primeiro percentual o limite estipulado por norma e o segundo uma extrapolação. Isto posto, objetiva-se analisar a sua influência quanto a assimetrias da rede nas harmônicas não característicos oriundas do parque. Neste ainda, analisar-se-á se tal conteúdo harmônico é mais sensível ao desequilíbrio na magnitude e/ou ângulo da tensão de suprimento. Dessarte, apresenta-se, nas Figuras 5.10 a 5.15, o espectro harmônico de corrente dos seguintes casos:

- Pré-desequilíbrio na magnitude da tensão de suprimento – FD 2%;
- Pré-desequilíbrio na magnitude da tensão de suprimento – FD 3%;
- Pré-desequilíbrio no ângulo da tensão de suprimento – FD 2%;
- Pré-desequilíbrio no ângulo da tensão de suprimento – FD 3%;

- Pré-desequilíbrio na magnitude e ângulo da tensão de suprimento – FD 2%;
- Pré-desequilíbrio na magnitude e ângulo da tensão de suprimento – FD 3%;

A Tabela 5.3 denota os valores de tensão de fase inseridos no equivalente do SIN a fim de obter o FD prévio desejado para as análises.

TABELA 5.3
VALORES DE TENSÃO DE FASE PARA OBTENÇÃO DO PERCENTUAL DE FD NO RESPECTIVO ESTUDO DE CASO.

Análises do FD	Tensão de Suprimento	FD 2%		FD 3%	
		Magnitude (kV)	Ângulo(°)	Magnitude (kV)	Ângulo(°)
Magnitude	Va	$215/\sqrt{3}$	0	$250/\sqrt{3}$	0
	Vb	$232/\sqrt{3}$	-120	$225/\sqrt{3}$	-120
	Vc	$245/\sqrt{3}$	120	$210/\sqrt{3}$	120
Ângulo	Va	$230/\sqrt{3}$	7	$230/\sqrt{3}$	15
	Vb	$230/\sqrt{3}$	-115	$230/\sqrt{3}$	-110
	Vc	$230/\sqrt{3}$	120	$230/\sqrt{3}$	125
Magnitude e Ângulo	Va	$228/\sqrt{3}$	0	$222/\sqrt{3}$	9
	Vb	$232/\sqrt{3}$	-122	$234/\sqrt{3}$	-113
	Vc	$226/\sqrt{3}$	124	$225/\sqrt{3}$	122

Figura 5.10. Espectro de correntes harmônicas no PAC – 69kV – PE I, II, III, IV e V – FD 2% - Magnitude.

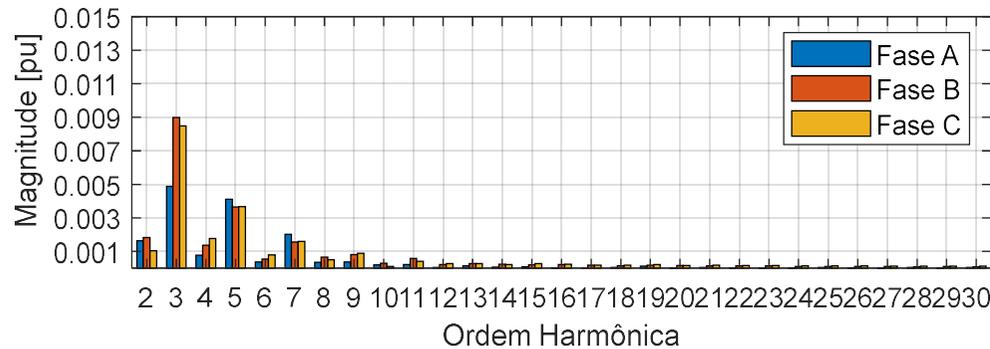


Figura 5.12 Espectro de correntes harmônicas no PAC – 69kV – PE I, II, III, IV e V – FD 2% - Ângulo.

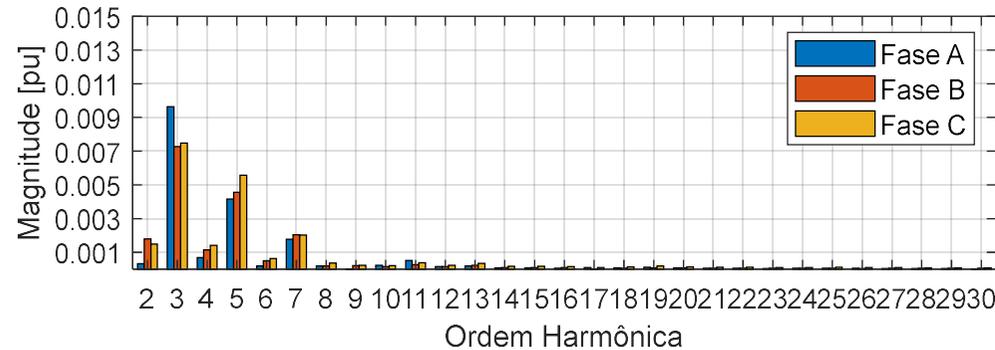


Figura 5.14 Espectro de correntes harmônicas no PAC – 69kV – PE I, II, III, IV e V – FD 2% - Magnitude e Ângulo.

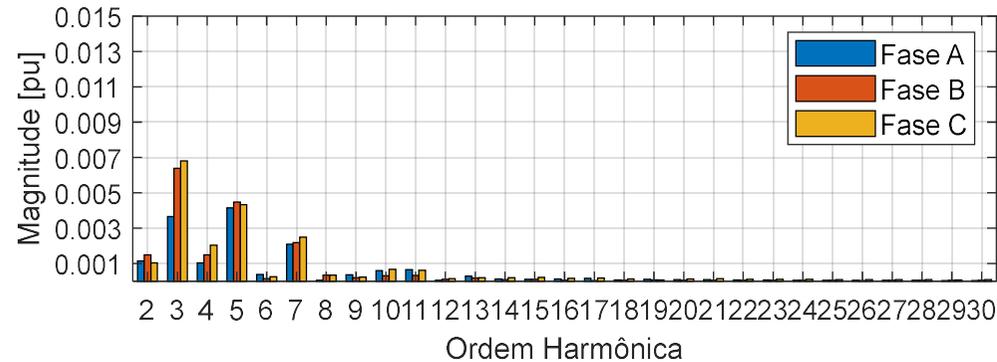


Figura 5.11 Espectro de correntes harmônicas no PAC – 69kV – PE I, II, III, IV e V – FD 3% - Magnitude.

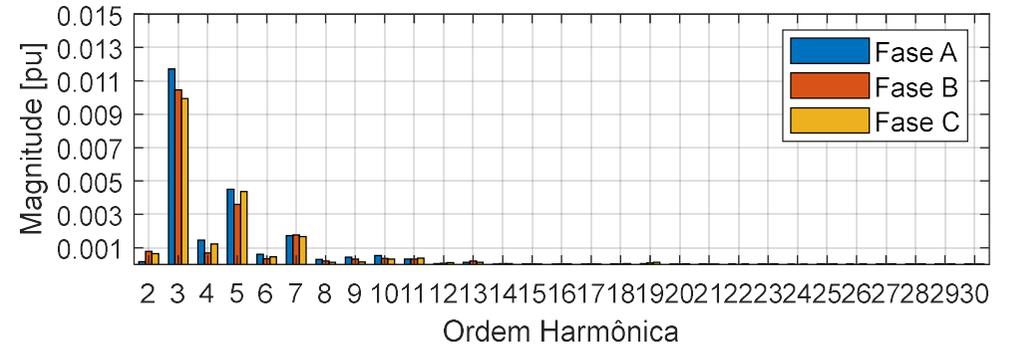


Figura 5.13 Espectro de correntes harmônicas no PAC – 69kV – PE I, II, III, IV e V – FD 3% - Ângulo.

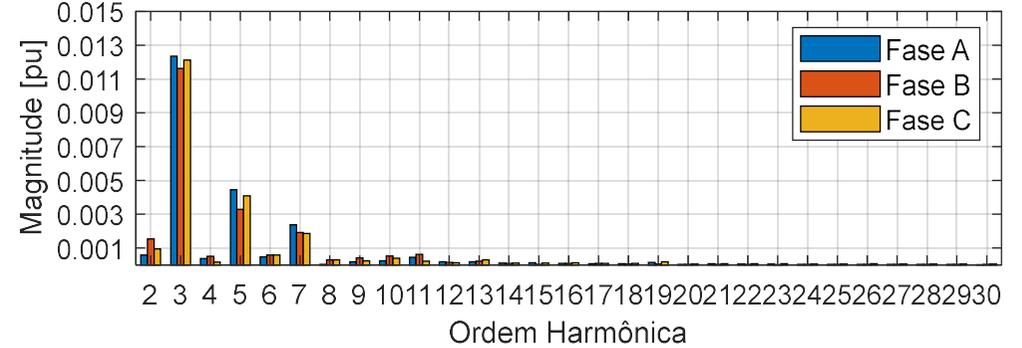
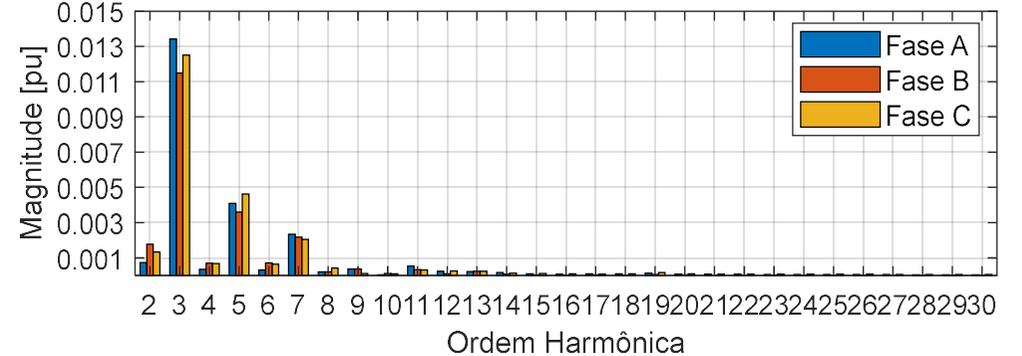


Figura 5.15 Espectro de tensões harmônicas no PAC – 69kV – PE I, II, III, IV e V – FD 3% - Magnitude e Ângulo.



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.

Em relação aos resultados compreendidos desse estudo de caso, para todas situações distintas de desequilíbrio, é evidente um aumento percentual da 3ª ordem em relação ao caso 1 (Figura 5.3). Tal situação está fisicamente aderente, haja vista que o desequilíbrio prévio se esboça no incremento das referidas frequências. Ressalta-se que na presença de desequilíbrio as ordens harmônicas não obedeceram a critérios de sequência anteriormente estipulados, nessa situação, cada ordem será representada por uma composição de sequência positiva, negativa e zero (sequência zero quando houver caminho para mesma). Ainda em comparação com o primeiro caso, observou-se que as demais ordens não resultaram em mudanças significativas, sendo observado ainda que para a pior condição de análise (Figura 5. 15), a 3ª ordem harmônica atingiu percentuais de magnitude quase 3 vezes maior.

No que se refere à avaliação do incremento percentual de desequilíbrio prévio, conforme esperado, a medida que esse é aumentado, maiores níveis de conteúdo harmônico são percebidos, perfazendo a importância do controle dessa situação degradada perante o surgimento das harmônicas não características no parque eólico.

As avaliações pertinentes às sensibilidades de magnitude (Figuras 5.10 e 5.11), perante aquelas com desequilíbrio prévio apenas nos ângulos (Figuras 5.12 e 5.13), demonstraram que os resultados no conteúdo harmônico não diferem de forma significativa perante as distintas condições. Essa situação também foi observada quando tratada a condição de desequilíbrio prévio tanto em magnitude quanto no ângulo da tensão de suprimento

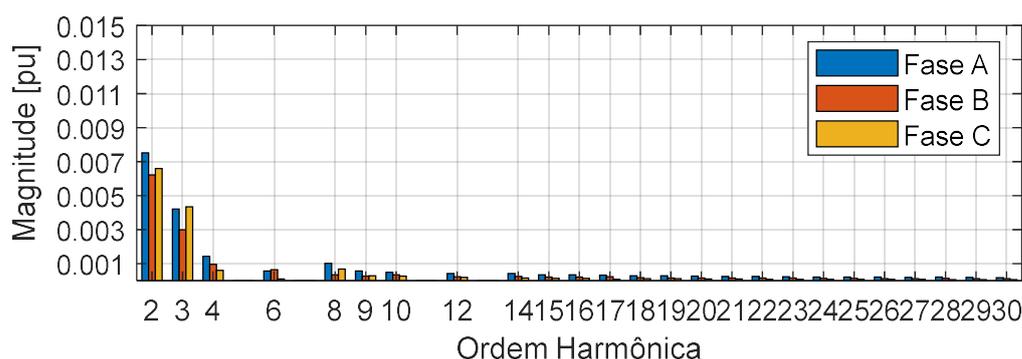
Caso 6. Quanto ao nível de desequilíbrio e distorções prévias na tensão de suprimento da rede de acesso

Em complemento aos estudos anteriores, a presente etapa avaliará as harmônicas não características da corrente aferida no PAC, considerando a rede acessada com níveis prévios de distorção (DTHT 4%) e desequilíbrio (FD 3%). Os dados utilizados para composição do conteúdo degradado correspondem àqueles das Tabelas 5.1 a 5.3, anteriormente apresentadas. Pontua-se que, neste momento, o desequilíbrio imposto no sistema contempla tanto a magnitude quanto o ângulo da tensão de suprimento e, ao mesmo tempo, os níveis de DTHT foram obtidas com o incremento da magnitude nas ordens harmônicas típicas do sistema (5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens) e com respectivos ângulos



não nulos. Novamente, conforme casos anteriores envolvendo distorção prévia na rede, o espectro de frequência das mencionadas harmônicas características foi omitido nos gráficos. Apresenta-se na Figura 5.16, o espectro harmônico de corrente do caso em questão:

Figura 5.16 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% e DTHT 4%.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Para o caso em questão, percebe-se que, perante aqueles que tratam de níveis prévios de desequilíbrio (Caso 5) ou distorção (Caso 4), este aponta para um nível percentual menor das frequências múltiplas de 3, além de um aumento considerável na segunda ordem. De forma geral, ressalta-se que todas as ordens podem conter componentes de sequência positiva, negativa e zero em seu espectro quando se trata de um circuito desequilibrado.

A situação analisada, aponta para aquela comumente encontrada em sistemas reais, quais sejam, presença de pré-distorção e pré-desequilíbrio nos distintos barramentos que interligam a rede básica. Com o resultado da Figura 5.16, pode-se perceber que quando da consideração de ambas condições deprecativas, resultados bem distintos são percebidos na composição harmônica não característica.

Caso 7. Quanto à influência da inserção do tempo morto nas chaves estáticas

Conforme explicado nos capítulos prévios, a inserção de um tempo morto, a fim de evitar curto circuito momentâneo nos processos de comutação dos semicondutores, materializa-se como uma das fontes consideráveis de geração harmônica. Nesse interim, avalia-se, neste momento, o espectro de frequência harmônica de um sistema sem a

inserção de tempo morto no chaveamento, perante os resultados do Caso 1 (Figura 5.3), no qual foi inserido o referido *delay* nas chaves estáticas. Apresenta-se, na Figura 5.17, o espectro harmônico de corrente do seguinte caso:

Figura 5.17 Espectro de correntes harmônicas no PAC – Sem tempo morto – PEs I, II, III, IV e V.

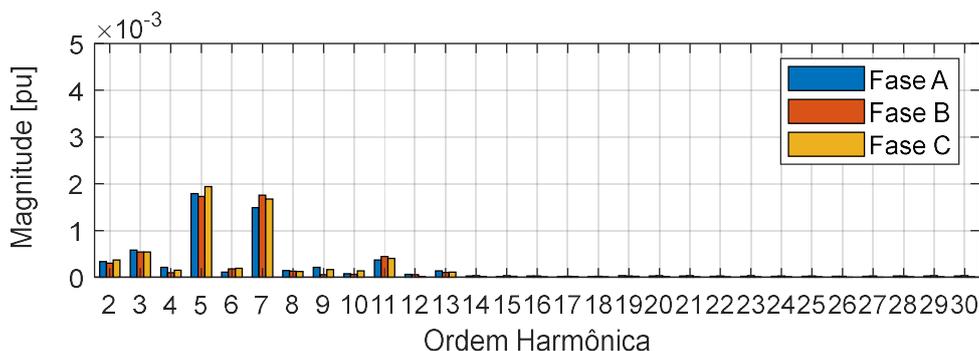
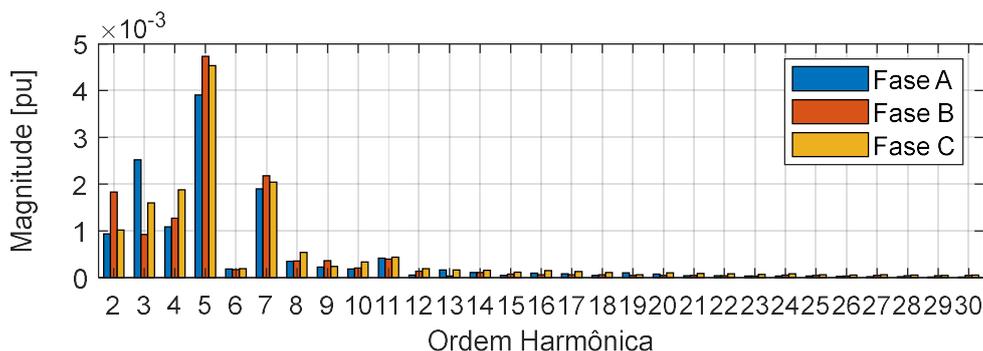


Figura 5.3 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V.



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.

Com os resultados expostos na Figura 5.17, perante o caso base que foi considerado o tempo morto no chaveamento (Figura 5.3), percebe-se que, de forma concisa, há um decremento significativo do percentual harmônico aferido quando da não inserção de tempo morto. Pode-se inferir, ainda, que o impacto da inserção do atraso no tempo de comutação das chaves mostrou-se evidente em todo espectro analisado, sobretudo na 2^a, 3^a, 4^a e 5^a ordens. Tais resultados esboçam quão influente é a inserção de tempo morto nas harmônicas de baixa frequência do aerogerador, permitido concluir que para os casos até então aqui relatados, esse apresenta-se como o de maior impacto e influência na geração e incremento harmônico não característicos no espectro harmônico provido pelos aerogeradores dotados de conversor eletrônicos em sua topologia.



O desenvolvimento de resultados experimentais e avaliação perante outras técnicas de modulação de largura de pulso, podem contribuir de forma significativas a tais análises e serão objetos de trabalhos futuros.

Caso 8. Quanto à influência da técnica de modulação por largura de pulso

Tais análises, no momento, dar-se-ão em condições normais da tensão da rede de acesso, ou seja, níveis pré-existent de desequilíbrio e distorção nulos. Nesse interim, a partir da implementação computacional simulações foram realizadas com a alteração do controle de modulação por largura de pulso implementado no chaveamento dos conversores RSC e GSC. Apresenta-se, na Figura 5.18, o espectro harmônico de corrente quando implementado o chaveamento SVPWM, e na Figura 5.3, aquele com a técnica SPWM.

Figura 5.18 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V – SVPWM.

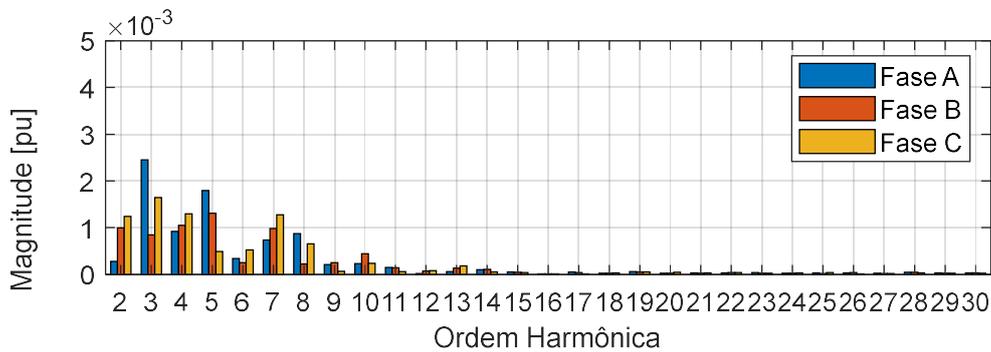
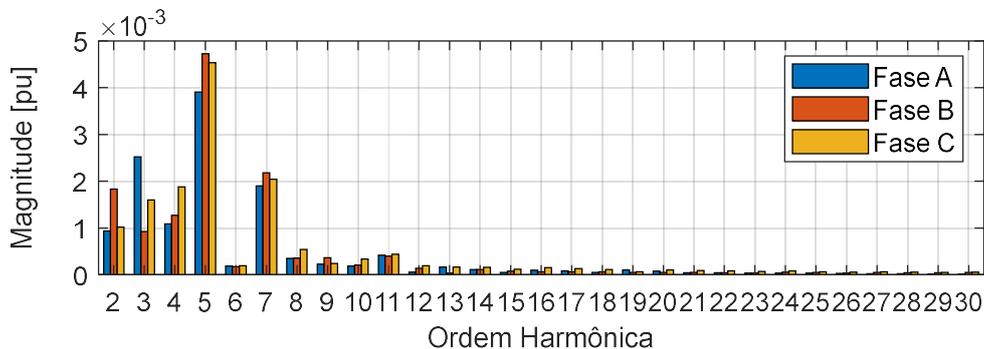


Figura 5.3 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V – SPWM.



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.

A Figura 5.18, perante o resultado do chaveamento SPWM (Figura 5.3), aponta de forma clara que o perfil harmônico injetado a partir do controle de chaveamento

vetorial SVPWM mostra-se com percentuais menores, principalmente nas ordens harmônicas características. Todavia a harmônica de 3ª ordem não esboçou mudanças perceptíveis, diferentemente das frequências de 2ª e 4ª ordem, as quais sofreram redução em algumas das fases. Assim, é notório que a técnica de chaveamento utilizada propicia influência direta no conteúdo harmônico do aerogerador e por conseguinte no PAC do complexo eólico. Essa situação propicia uma importante conclusão correlata ao modo de operação e controle dos conversores que compõe a topologia construtiva das turbinas eólicas, haja vista que aponta para uma relação dos níveis de baixa frequência percebidos no espectro com o tipo de técnica de controle utilizada no processo de chaveamento dos semicondutores e sua influência nas distintas ordens, demonstrando ainda a sua alta sensibilidade na composição de tal perfil harmônico em baixa frequência.

Caso 9. Quanto ao nível de distorção harmônica prévia (background distortion) presente na rede de acesso sob a técnica de modulação de largura de pulso SVPWM

Em sequência, neste caso será abordado a sensibilidade do controle de chaveamento SVPWM perante distorções prévias da tensão da rede acessada, com níveis de pré-desequilíbrios nulos. Novamente, os percentuais de DTHT foram obtidos com o aumento progressivo apenas nas tensões harmônicas características (5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens), conforme as Tabelas 5.1 e 5.2 anteriormente apresentadas. Destaca-se, ainda, que o progressivo aumento foi inserido nas magnitudes e/ou ângulo do conteúdo citado. Dessa forma, nas Figuras 5.19 a 5.22, são apresentados os espectros harmônicos de corrente dos seguintes casos:

Considerando ângulos nulos em relação à corrente base

Figura 5.19 Espectros de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 3% - SVPWM.

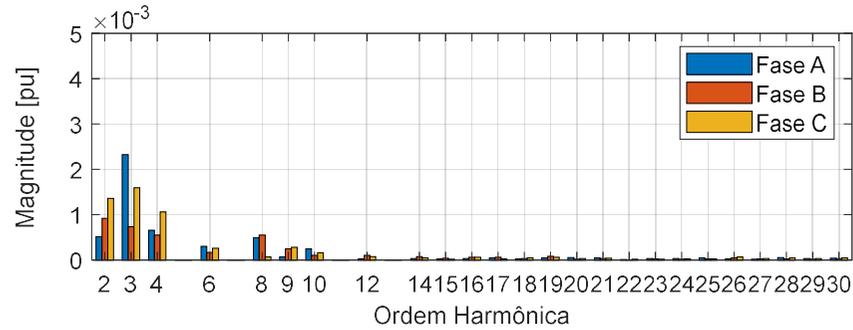
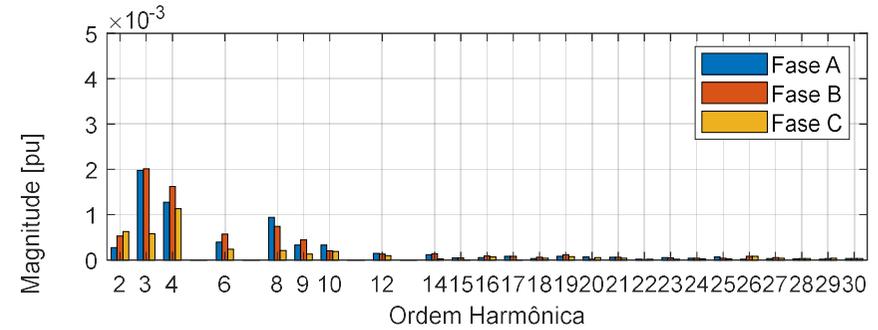


Figura 5.20 Espectros de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 4% - SVPWM.



Considerando magnitude e ângulos não nulos em relação à corrente base

Figura 5.21 Espectros de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 3% - SVPWM.

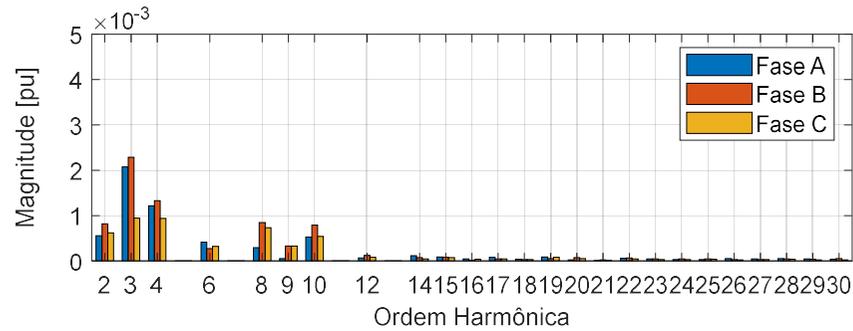


Figura 5.22 Espectros de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – DTHT 4% - SVPWM.

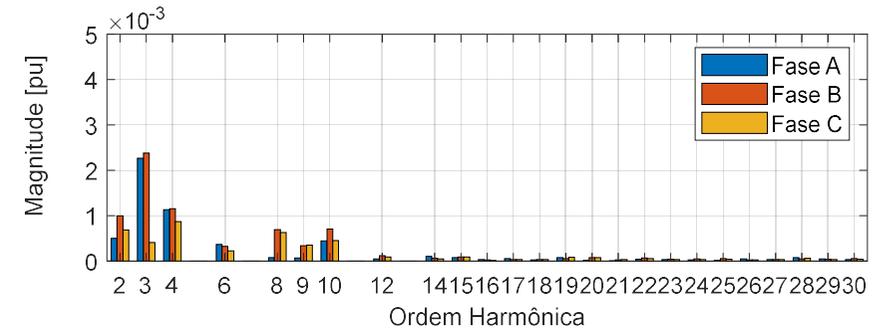
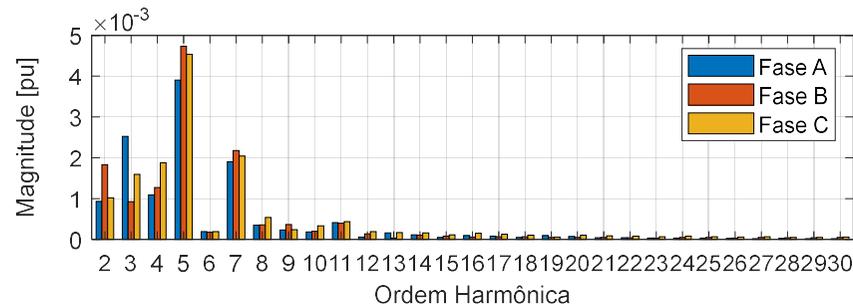


Figura 5.3 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PEs I, II, III, IV e V



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.

Com base nas figuras supramencionada, comparando os resultados concernentes ao chaveamento SPWM aos apresentados nas Figuras 5.6 a 5.9, é perceptível um menor percentual nas magnitudes harmônicas do caso presente em todas as variações consideradas. Logo, os resultados reiteram que a técnica SVPWM mostra-se menos sensível ao conteúdo harmônico prévio tipicamente encontrado na rede de acesso, mais uma vez, o modo de operação e controle dos conversores denotou-se como um fator de influência significativo no processo de geração e incremento das harmônicas em baixa frequência.

Caso 10. Quanto ao nível de desequilíbrio prévio (background imbalance) da rede de acesso sob a técnica de modulação por largura de pulso SVPWM

Novamente, no que tange aos níveis de pré-desequilíbrio da rede acessada, inserido conforme as Tabelas 5.3 anteriormente apresentadas, estes serão analisados, nesta etapa, perante a técnica de controle de chaveamento SVPWM, sob as mesmas perspectivas de análises do Caso 5. Assim, apresenta-se, nas Figuras 5.23 a 5.28, o espectro harmônico de corrente dos seguintes casos:

- Pré-desequilíbrio na magnitude da tensão de suprimento – FD 2% - SVPWM;
- Pré-desequilíbrio na magnitude da tensão de suprimento – FD 3% - SVPWM;
- Pré-desequilíbrio no ângulo da tensão de suprimento – FD 2% - SVPWM;
- Pré-desequilíbrio no ângulo da tensão de suprimento – FD 3% - SVPWM;
- Pré-desequilíbrio na magnitude e ângulo da tensão de suprimento – FD 2% - SVPWM;
- Pré-desequilíbrio na magnitude e ângulo da tensão de suprimento – FD 3% - SVPWM;

Figura 5.23 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 2% - Magnitude - SVPWM.

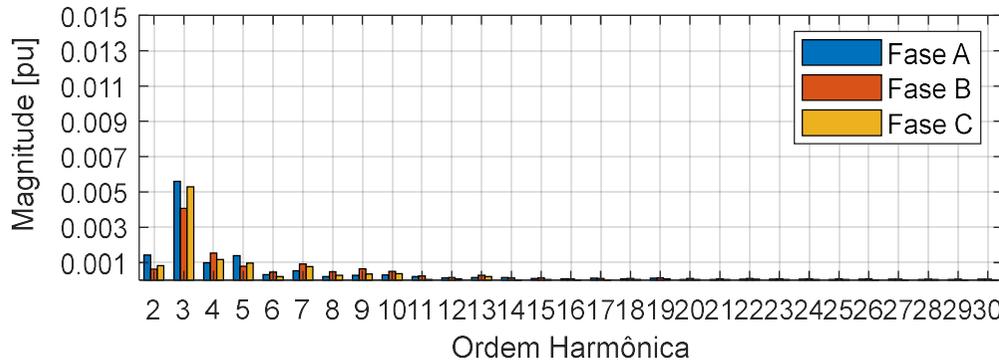


Figura 5.24 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% - Magnitude - SVPWM.

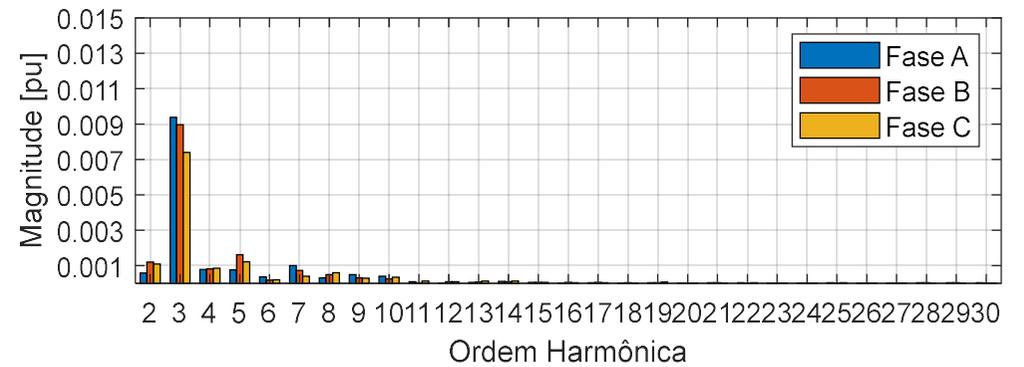


Figura 5.25 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 2% - Ângulo - SVPWM.

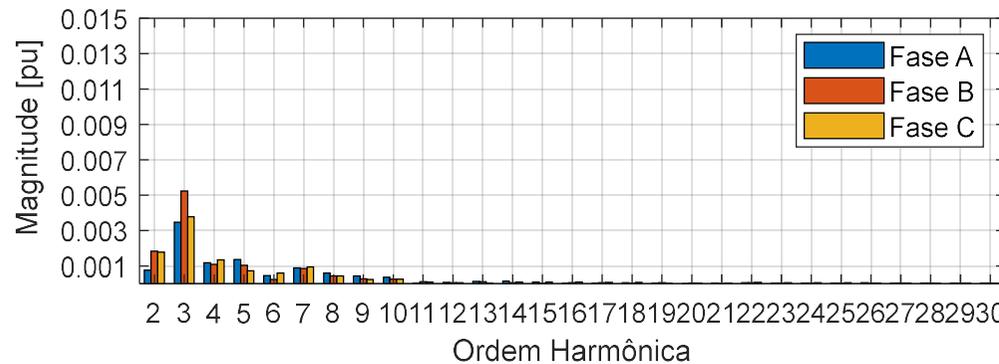


Figura 5.26 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% - Ângulo - SVPWM.

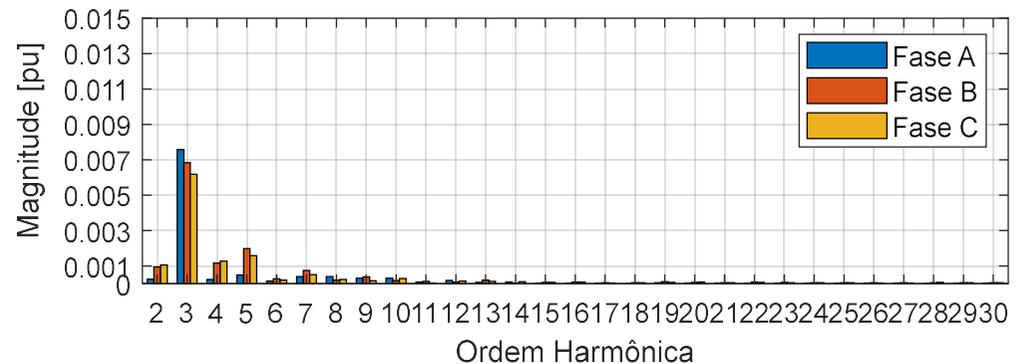


Figura 5.27 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V - FD 2% - Magnitude e Ângulo - SPWM.

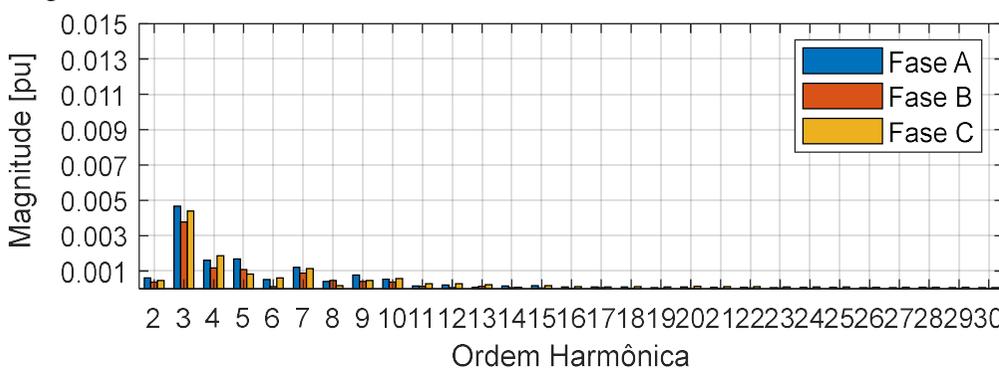
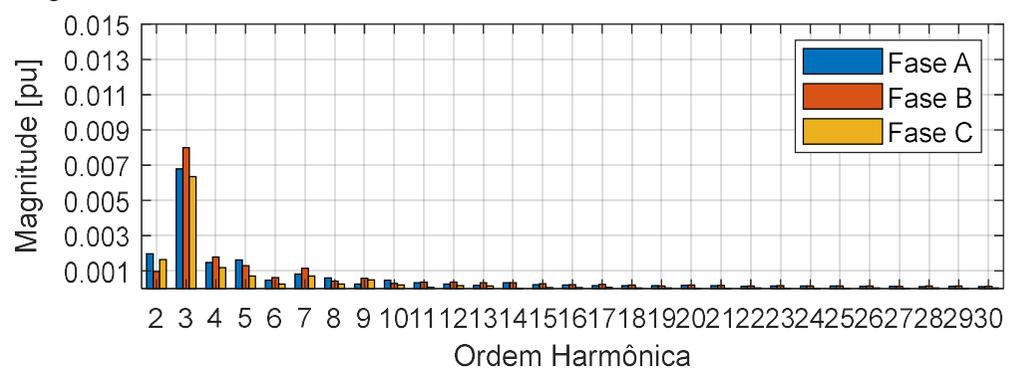


Figura 5.28 Espectro de tensões harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V - FD 3% - Magnitude e Ângulo – SVPWM.



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.

O estudo de caso em questão, nesse momento, denotou que o controle SVPWM, foi menos sensível a todos perfis e formas de desequilíbrios aqui relacionadas, perante o controle SPWM. Tal conclusão solidifica-se nos baixos percentuais expostos nos resultados apresentados nas Figuras 5.23 a 5.28, em contraponto àqueles apresentados em Figuras 5.10 a 5.15. Vale destacar, que a partir da comparação entre as duas técnicas de modulação de largura pulso, percebeu-se que mesmo sobre condições degradadas de desequilíbrio, os níveis de 3ª ordem foram significativamente mais baixos quando da utilização do controle vetorial e ainda, as harmônicas características de 5ª e 7ª ordens apresentaram resultados bem abaixo quando do controle SVPWM.

Caso 11. Quanto ao nível de desequilíbrio e distorções prévias na tensão de suprimento da rede de acesso - SVPWM

Neste caso, as mesmas condições operativas do Caso 6 (Tabelas 5.1 a 5.3, anteriormente apresentadas) foram adotadas, todavia agora com o controle de chaveamento SVPWM implementados nos conversores. Apresenta-se, na Figura 5.29, o espectro harmônico de corrente para a condição SVPWM e aquele anteriormente tratado para a modulação SPWM exposto na Figura 5.16.

Figura 5.29 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% e DTHT 4% - SVPWM.

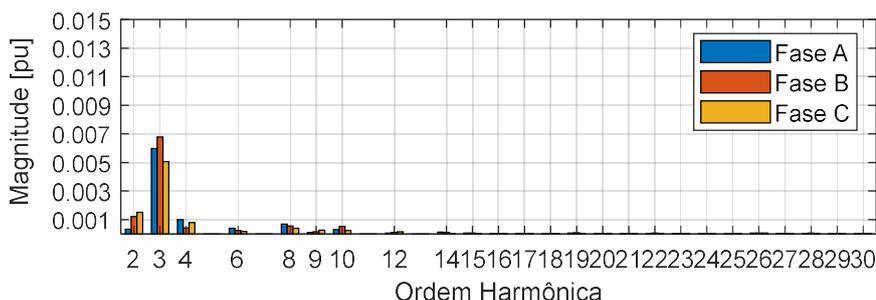
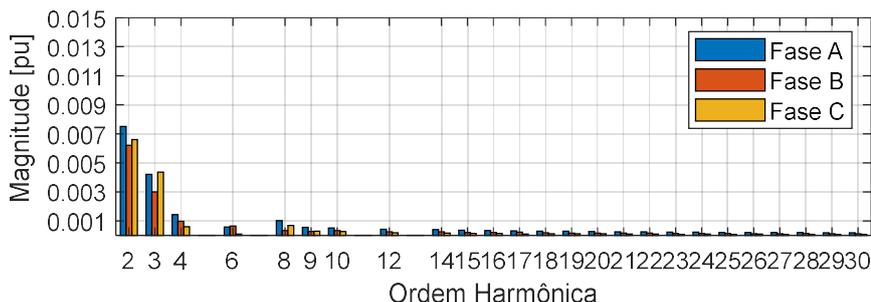


Figura 5.16 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – FD 3% e DTHT 4% - SPWM.



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.



Novamente, os resultados denotam a menor sensibilidade do controle SVPWM em comparação ao SPWM, apresentando percentis razoavelmente menores em todos os casos. Todavia a presença do desequilíbrio fica evidente nos percentuais da 3ª ordem, situação já mencionada, que permeia a composição de tais frequências harmônicas em componentes de sequência positiva e negativa, em comparação a um caso equilibrado, em que, tipicamente, seriam de sequência zero. Vale destacar que como não há caminho para as componentes de sequência zero no circuito estudo, esta não poderá existir.

Caso 12. Quanto a condição de operação do aerogerador

Para as análises pertinentes nesta etapa, avaliar-se-á condição de operação de um único aerogerador, com operação em níveis percentuais distintos de potências. Nesse sentido, apresenta-se, nas Figuras 5.30 a 5.32, o espectro harmônico de corrente dos seguintes casos:

- Operação com 30% de potência;
- Operação com 70% de potência;
- Operação com 100% de potência;

Figura 5.30 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – 30% de potência.

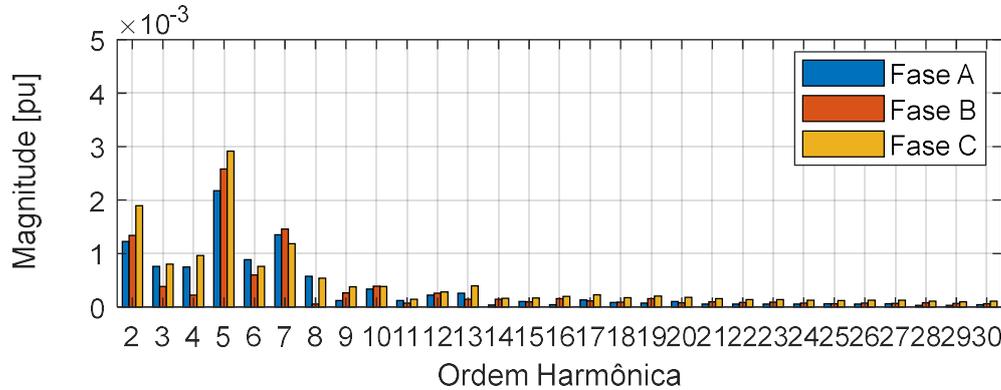


Figura 5.31 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – 70% de potência.

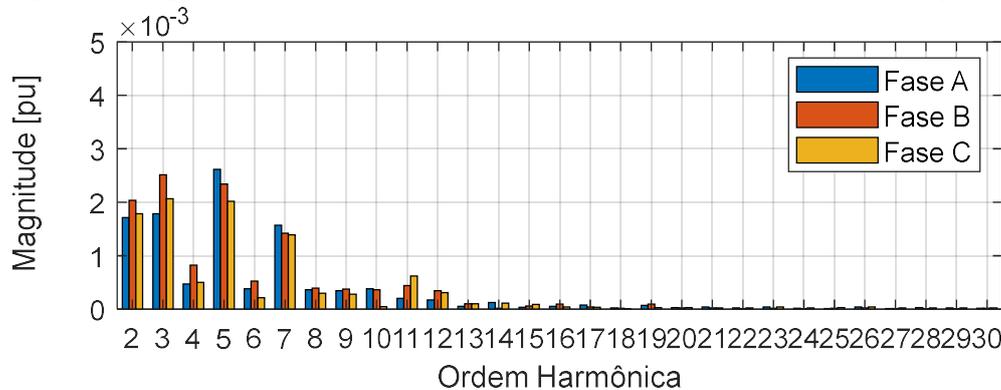
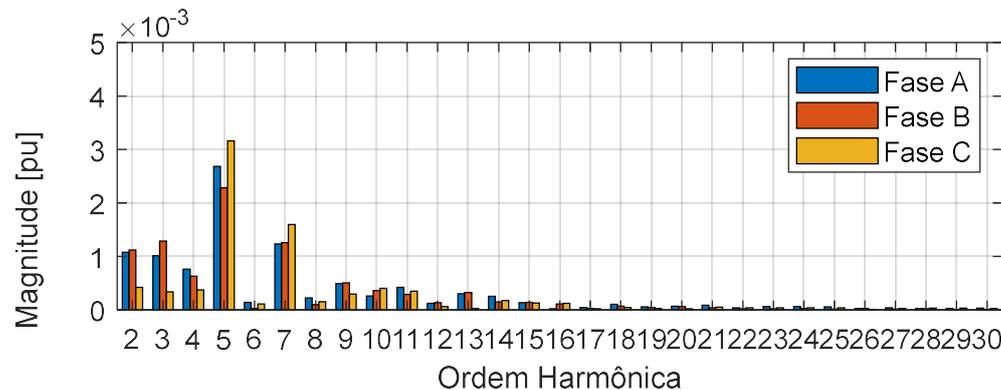


Figura 5.32 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V – 100% de potência.



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.

Percebe-se, pelos resultados apresentados nas figuras anteriores que a potência de operação do aerogerador influencia de forma concisa na contribuição do espectro harmônico do aerogerador. É fato, a luz dos resultados, que de acordo com a potência operativa causará uma aleatoriedade maior em ordens não características de baixa frequência.



Caso 13. Quanto a propagação harmônica

A fim de avaliar a propagação harmônica entre os elementos que compõe o sistema, realiza-se, agora, uma avaliação da propagação nos transformadores da subestação de conexão (69kV/230kV) ramal que contempla a conexão de todo complexos ao SIN. Destaca-se que a Figura 5.33 corresponde a mesma situação operacional da Figura 5.3. Com isso, apresenta-se, nas Figuras 5.33 a 5.34, o espectro harmônico de corrente obtido:

Figura 5.33 Espectro de correntes harmônicas no PAC – 69kV – PE I, II, III, IV e V.

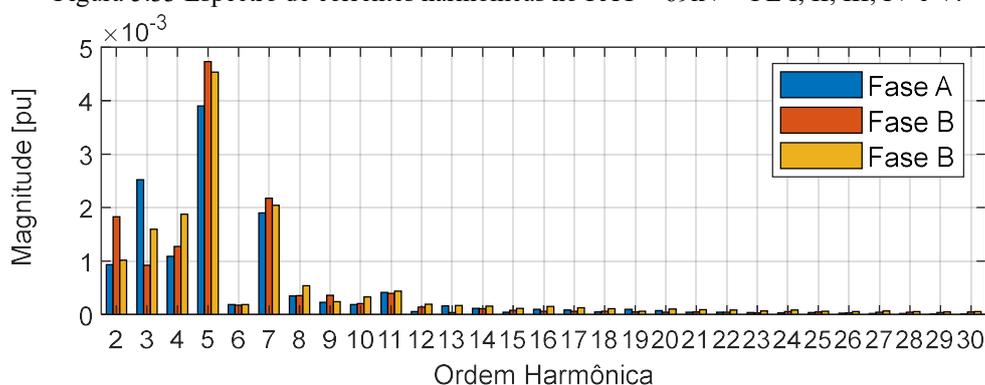
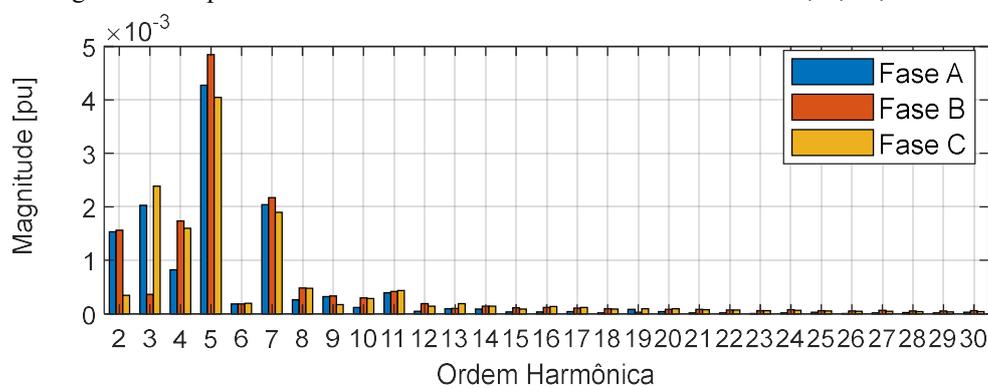


Figura 5.34 Espectro de correntes harmônicas no PAC – 230kV – PE I, II, III, IV e V.



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.

Com atenção aos resultados supra expostos, percebe-se que a propagação harmônica do lado de baixa tensão (69kV) em estrela não aterrada, Figura 5.33, para o lado de alta tensão (230 kV) em delta, Figura 5.34, aponta para uma mudança percentual nas ordens não características de baixa frequência, em diferentes percentuais entre fases para uma mesma ordem. Esta esboça-se ainda com o incremento em algumas fases e decrementos em outras fases, não sendo possível visualizar uma lei de formação para tal fenômeno. Vale destacar que as componentes múltiplas de 3 visualizadas, não correspondem a ordens de sequência zero, haja vista a topologia do transformador

analisado, estás, como já mencionado em casos anteriores, constituem-se de resquícios de sequência positiva e negativa geradas em alguma condição assimétrica de operação do aerogerador, conquanto, estudos adicionais mostram-se necessários para definir sua real origem.

Caso 14. Quanto à fenômenos de variação momentânea e/ou temporária

Voltando a avaliação para um prisma de fenômenos momentâneos e/ou temporários, neste momento, investiga-se o espectro harmônico gerado pelo aerogerador quando da ocorrência em uma variação de tensão de curta duração (VTCD) e uma variação de frequência, ambos com uma duração de 0.5 segundos, todavia em momentos distintos. Estes caracterizam uma situação de VTCD trifásico de 0.7 pu e uma variação de frequência na rede de menos 0.2 pu, em relação aos valores de tensão de linha (230kV) e frequência fundamental (60Hz). Os resultados são expostos nas Figuras 5.35 e 5.36.

Figura 5.35 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V- VTCD.

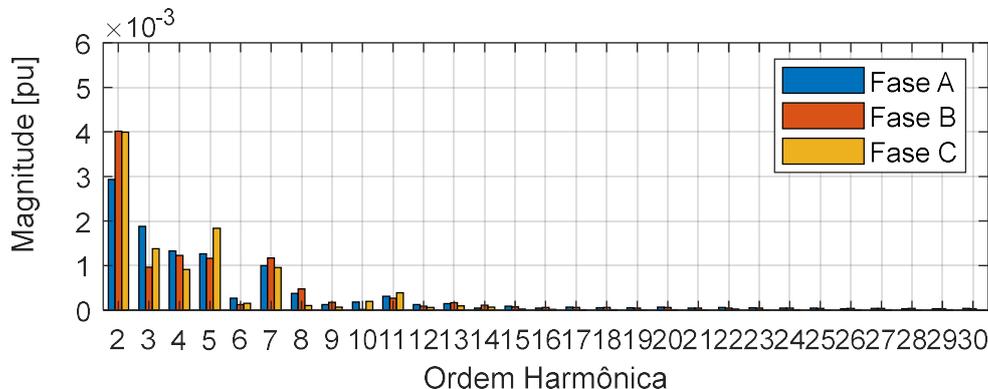
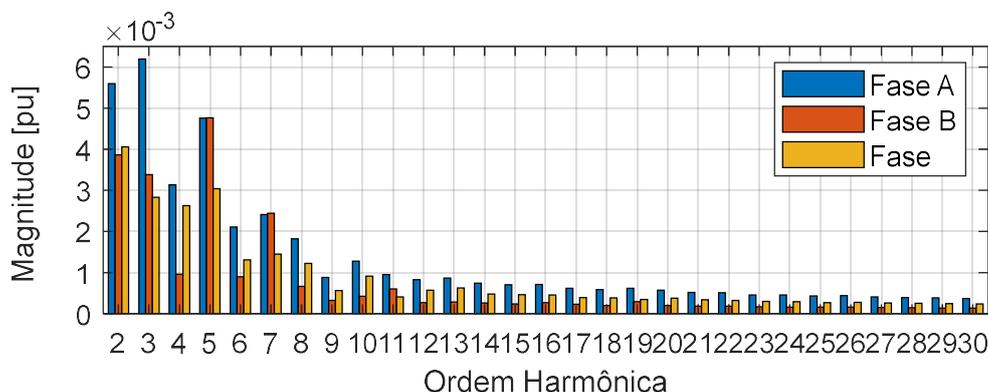


Figura 5.36 Espectro de correntes harmônicas no PAC – PE I, II, III, IV e V- Variação de Frequência de menos 0.2 pu.



Fonte: Elaboradas pelo próprio autor.



Os resultados correlatos das avaliações supracitadas, vão de encontro a análises voltadas a possíveis ressonâncias com o sistema, denotando uma linha importante a ser considerada na continuação da pesquisa. Nesse sentido a Figura 5.35, correlata a variação de curta duração nas três fases do sistema em 230 kV, apontou que o perfil do espectro é impactado, sobretudo na 2ª ordem harmônica. Todavia, em termos percentuais, houve um decremento de ordens antes predominantes, como a 5ª e 7ª. Vale destacar ainda que para outras composições de VTCD, principalmente aqueles que possuem desequilíbrios entre as fases, o comportamento harmônico é ainda mais influenciado.

No que se refere a variação de frequência no sistema, Figura 5.36, pode-se identificar uma sensibilidade mais expressiva nas harmônicas não características perante o caso base (Figura 5.3), com um aumento considerável em todas as ordens atípicas.

5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Considerando os vários fatores de impacto e influência ora investigados no capítulo em questão, aludindo aqueles mais incidentes e, conseqüentemente, mais expressivos, percebe-se que estes são fatores predominantes na influência do conteúdo harmônico injetado por complexos eólicos dotados de aerogeradores DFIG.

De forma geral, pode-se concluir que fenômenos como desequilíbrio e tipo de controle PWM utilizado, mostram-se mais contributivos na geração e/ou incremento de harmônicas atípicas no sistema. Destaca-se ainda, que a influência do tempo morto nas análises aponta-se de forma extremamente significativa na geração harmônica não características. Em suma, os fatores analisados apontaram para uma influência considerável no processo de composição harmônica, nessa seara, no capítulo conclusivo maiores detalhes serão abordados.



NÚCLEO DE QUALIDADE
DA ENERGIA ELÉTRICA

CAPÍTULO

6

O presente capítulo denota as principais conclusões a partir dos estudos anteriormente tratados. Este ainda realiza uma síntese dos trabalhos futuros a partir da pesquisa em questão.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

Adido às constatações apontadas ao longo do texto, o capítulo final destina-se a tecer comentários conclusivos sobre o trabalho dissertativo em questão. Dessa forma, apresenta-se nesta seção as principais conclusões advindas dos estudos realizados em todo o texto dissertativo, bem como a continuação da pesquisa em desenvolvimentos futuros.

A partir da bibliografia revisada, conclui-se que os conteúdos harmônicos atípicos das cargas se manifestam, em sua maioria, na operação degradada de conversores eletrônicos, mas especificamente, condições não ideais de seu ponto de conexão. Com atenção a essa afirmação, e, obviamente, ciente que em um contexto real, premissas ideais de operação não são encontradas, tais injeções de harmônicas não características se tornam comumente factíveis, mesmo em percentuais pouco significativos. Assim, os aspectos conclusivos, da referida etapa, consistem em um alicerce fundamental para as demais análises desenvolvidas em sequência, perfazendo-se como uma das contribuições oferecidas no trabalho.

Pode-se perceber, com o desenrolar da pesquisa, que o processo de composição do espectro harmônico do DFIG é extremamente iterativo e multifatorial, haja vista sua própria composição topológica, perfazendo a interação entre conversores, máquina de geração duplamente alimentada e rede de conexão, levando a conclusão que os fatores de influência e impacto na geração harmônica não característica, no contexto eólico, mostram-se diversos e, entre si, interligados. Nesse sentido, com atenção ao número de parques em um mesmo barramento do SIN, conclui-se que os processos de agregação de corrente entre as diversas turbinas eólicas que compõe o complexo podem influenciar na composição harmônica percebida no PAC, demandando estudos adicionais para uma melhor definição de tal processo.

As análises correlatas à influência da geração harmônica não característica devido ao típico perfil prévio de distorção da rede, qual seja, harmônicas de ordem características (5^a, 7^a, 11^a e 13^a), permitem concluir que a consideração do ângulo das respectivas ordens harmônicas pode influenciar na composição das ordens atípicas. No entanto, novos estudos devem ser também realizados a fim de solidificar essa situação.

Outro ponto meritório de destaque permeia a avaliação do estudo de caso com distintos níveis de curto-circuito, os resultados apontaram que sua influência no processo de geração harmônica não característica é expressiva. Com aumentos percentuais significativos, por exemplo, na segunda ordem. Todavia, investigações físicas desse processo de geração devem ser realizadas em trabalhos futuros, buscando relacionar qual o processo físico e operativo ocorrido na dinâmica do aerogerador, a fim de alinhar esse surgimento quando na presença de níveis de curto circuito distintos.

As avaliações do conteúdo prévio de desequilíbrio na tensão de suprimento da rede acessada, levaram a conclusão de que essa situação de degradação da rede apresenta-se como a mais significativa no incremento harmônico de 3^a ordem, materializando-se no fenômeno principal do incremento de tal perfil distorcido, junto às condições operativas da rede.

No que tange ao caso envolvendo condições operativas com desequilíbrio e distorção prévia, pode-se concluir, que quando da consideração de ambas situações depreciativas, resultados bem distintos são percebidos na composição harmônica não característica, alicerçando ainda mais a consideração de tais situações em estudos pertinentes.

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que as frequências harmônicas não características possuem uma relação íntima com uma gama de processos, sendo que em uma análise voltada para a 2^a ordem harmônica correspondeu situações com maiores percentuais em um sistema com um nível de curto circuito mais rígido, bem como, em situações em que o aerogerador opera com potências abaixo da nominal e até quando o sistema esboçava níveis distorção e desequilíbrio. Seu resultado também foi considerável quando de variações momentâneas e/ou temporárias, sobretudo em condições de variação de frequência da rede acessada. Isto posto, análises voltadas para a citada ordem harmônica são requeridas em estudos futuros, a fim de delinear como se dá o surgimento perante tais condições operativas.



Outro ponto conclusivo meritório de destaque, contempla as condições operativas do controle de chaveamento, onde percebeu-se, de forma clara, que a técnica vetorial SVPWM foi consideravelmente menos contributiva na geração harmônica não característica e característica, em todos os casos estudados, em detrimento da técnica SPWM. Vale ainda destacar que o tempo morto inserido nas chaves estáticas se comporta como um fator extremamente contributivo na geração harmônica do DFIG, perfazendo como um dos fatores de maior influência.

Outrossim, reconhece-se que os estudos e investigações aqui realizados mostraram-se extremamente aderentes às causas de geração, incremento/decremento e propagação das harmônicas não características no sistema, todavia, a multiplicidade de fatores leva à necessidade de trabalhos futuros, visando uma definição clara quanto a geração de tal conteúdo. Assim, os pontos a seguir são elencados como sugestões de trabalhos a serem desenvolvidos:

- Otimização de controle PWM utilizando algoritmos genéticos e inteligência artificial para mitigar o conteúdo harmônico devido a tais chaveamentos.
- Estudos correlatos às inter-harmônicas advindas na interação entre os conversores RSC e GSC;
- Modelagem do rotor e estator da máquina de indução em *software* de elementos finitos, a fim de avaliar sua distribuição de fluxo magnético e por conseguinte a interação harmônica pelas distorções espaciais do fluxo;
- Modelagem do transformador de conexão e cabos de baixa e média tensão em *software* de elementos finitos para uma melhor compreensão da propagação harmônica injetada no sistema;
- Estudos correlatos ao surgimento de inter-harmônicas e sub-harmônicas no gerador de indução duplamente alimentado;
- Análises quanto aos processos de agregação de correntes em parques eólicos e propagação harmônica;
- Validação, em ambiente experimental, dos resultados obtidos neste trabalho por meio da implementação de um protótipo de escala reduzida.

Por fim, não obstante à necessidade de estudos adicionais, é preciso pontuar que os desenvolvimentos aqui relacionados se materializam em consistentes resultados computacionais perante medições reais, sendo este uma abordagem pormenorizada das condições operativas da rede correlacionando-a com o surgimento de conteúdo harmônico não esperado no sistema. Assim, o trabalho em questão, apresenta contribuições relevantes para alicerçar futuros estudos.

ANEXOS

As Tabelas a seguir, apresentam os parâmetros inseridos na modelagem dos cabos utilizados no desenvolvimento computacional. Vale ressaltar que um modelo cabo tipo π , disponível na biblioteca do *Simulink* foi utilizado, sendo que, para as Tabela 1 a 5, os parâmetros correlatos a sequência zero foram considerados cinco vezes maior que os de sequência positiva.

TABELA 1
PARÂMETROS DA REDE INTERNA CENTRAL ELÉTRICA I

Nomenclatura	Extensão (Km)	R (%)	X (%)	B (Mvar)
CABO 14 - C14	2,785	1,493	2,621	0,425
CABO 6 - C6	0,405	0,548	0,439	0,047
CABO 5 - C5	0,800	1,781	0,961	0,136
CABO 1 - C1	1,200	0,810	1,210	0,168
CABO 4 - C4	0,510	0,690	0,553	0,059
CABO 2 - C2	0,410	0,555	0,444	0,048
CABO 3 - C3	0,425	0,946	0,511	0,072
CABO 7 - C7	0,415	1,499	0,776	0,036
CABO 15 - C15	1,680	0,901	1,581	0,256
CABO 12 - C12	0,400	0,891	0,481	0,068
CABO 11 - C11	0,400	0,541	0,434	0,046
CABO 10 - C10	0,590	0,798	0,639	0,069
CABO 13 - C13	0,795	1,770	0,955	0,135
CABO 9 - C9	1,045	0,705	1,540	0,146
CABO 8 - C8	0,620	0,418	0,625	0,087

TABELA 2
PARÂMETROS DA REDE INTERNA CENTRAL ELÉTRICA II

Nomenclatura	Extensão (Km)	R (%)	X (%)	B (Mvar)
CABO 1 - C1	3,510	2,978	3,539	0,491
CABO 4 - C4	0,445	0,378	0,449	0,062
CABO 5 - C5	0,420	0,568	0,455	0,049
CABO 6 - C6	0,410	0,913	0,493	0,070
CABO 7 - C7	0,410	0,555	0,444	0,713
CABO 2 - C2	2,730	1,842	2,752	0,382
CABO 8 - C8	0,415	0,352	0,418	0,058
CABO 3 - C3	3,160	2,681	3,186	0,442
CABO 9 - C9	0,420	0,356	0,423	0,059
CABO 10 - C10	0,420	0,568	0,455	0,049
CABO 11 - C11	0,415	0,561	0,450	0,048
CABO 12 - C12	0,420	0,568	0,455	0,049
CABO 14 - C14	0,475	0,643	0,515	0,055
CABO 15 - C15	0,420	0,568	0,455	0,049
CABO 13 - C13	0,475	0,643	0,515	0,055

TABELA 3
PARÂMETROS DA REDE INTERNA CENTRAL ELÉTRICA III

Nomenclatura	Extensão (Km)	R (%)	X (%)	B (Mvar)
CABO 6 – C6	0,400	0,891	0,481	0,068
CABO 5 – C5	0,395	0,534	0,428	0,046
CABO 4 – C4	1,305	1,765	1,414	0,152
CABO 8 – C8	0,405	0,902	0,487	0,069
CABO 3 – C3	0,535	0,454	0,539	0,075
CABO 13 – C13	0,430	0,957	0,517	0,073
CABO 12 – C12	0,400	0,541	0,434	0,046
CABO 11 – C11	0,460	0,622	0,499	0,053
CABO 10 – C10	0,410	0,348	0,413	0,057
CABO 9 – C9	0,401	0,277	0,413	0,057
CABO 15 – C15	1,005	2,238	1,207	0,171
CABO 1 – C1	1,630	0,874	1,534	0,249
CABO 7 – C7	0,400	0,541	0,434	0,046
CABO 2 – C2	0,375	0,201	0,353	0,057
CABO 14 – C14	0,395	0,534	0,428	0,046

TABELA 4
PARÂMETROS DA REDE INTERNA CENTRAL ELÉTRICA IV

Nomenclatura	Extensão (Km)	R (%)	X (%)	B (Mvar)
CABO 1 - C1	4,525	3,053	4,562	0,633
CABO 6 – C6	0,580	0,785	0,629	0,067
CABO 2 – C2	2,125	1,139	2,000	0,324
CABO 8 – C8	0,570	0,385	0,575	0,080
CABO 14 – C14	0,910	1,231	0,986	0,106
CABO 15 – C15	0,435	0,588	0,471	0,051
CABO 9 – C9	0,475	0,320	0,479	0,066
CABO 10 – C10	0,480	0,407	0,484	0,067
CABO 11 – C11	0,415	0,561	0,450	0,048
CABO 12 – C12	0,425	0,575	0,461	0,049
CABO 13 – C13	0,425	0,575	0,461	0,049
CABO 3 – C3	0,550	0,467	0,555	0,077
CABO 5 – C5	0,405	0,548	0,439	0,047
CABO 4 – C4	1,180	1,596	1,279	0,137
CABO 7 – C7	0,525	0,710	0,569	0,061

TABELA 5
PARÂMETROS DA REDE INTERNA CENTRAL ELÉTRICA V

Nomenclatura	Extensão (Km)	R (%)	X (%)	B (Mvar)
CABO 1 - C1	1,225	0,657	1,153	0,187
CABO 6 – C6	0,405	0,548	0,439	0,047
CABO 2 – C2	0,425	0,228	0,400	0,065
CABO 12 – C12	0,440	0,595	0,477	0,051
CABO 3 – C3	1,115	1,508	1,208	0,130
CABO 4 – C4	0,465	0,629	0,504	0,054
CABO 5 – C5	0,475	0,643	0,515	0,055
CABO 7 – C7	0,430	0,582	0,466	0,050
CABO 8 – C8	0,565	0,764	0,612	0,066
CABO 13 – C13	0,415	0,561	0,450	0,048
CABO 14 – C14	0,650	0,879	0,704	0,076
CABO 11 – C11	0,400	0,541	0,434	0,046
CABO 10 – C10	0,415	0,561	0,450	0,048
CABO 9 – C9	1,410	1,196	1,422	0,197
CABO 15 – C15	0,435	0,588	0,471	0,074

TABELA 6
PARÂMETROS LINHAS DE CONEXÃO EM 69 KV

Subestação	R1 (%)	X1 (%)	B1 (%)	R0 (%)	X0 (%)	B0 (%)
LT 69KV Central Elétrica 2,4 e 5 – SE 5.2 km – Cabo 636 MCM	1,113	4,882	0,092	3,054	18,557	0,051
LT 69KV Central Elétrica 1 e 3 – SE 3 km – Cabo 336,4 MCM	1,198	2,906	0,051	2,318	10,795	0,029

*Potência Base 100 MVA e Tensão Base de 69 kV.

TABELA 7
PARÂMETROS CABOS DE CONEXÃO REDE EXTERNA

Nomenclatura	R1	R0	L1	L0	C1	C0	Extensão (km)
	(ohms/km)		(H/km)		(F/km)		
CABO - CI	7,2156	3*7,2156	0,0916	3*0,0916	6,0371e ⁻⁷	3*6,0371e ⁻⁷	1
CABO - CII	2,5392	3*2,5392	0,04967	3*0,04967	1,1713e ⁻⁶	3*1,1713e ⁻⁶	1
CABO - CIII	7,1944	3*7,1944	0,1014	3*0,1014	6,6889e ⁻⁷	3*6,6889e ⁻⁷	1
CABO - CIV	12,8018	3*12,8018	0,1755	3*0,1755	1,1643e ⁻⁶	3*1,1643e ⁻⁶	1
CABO - CV	13,0663	3*13,0663	0,1793	3*0,1793	1,1864e ⁻⁶	3*1,1864e ⁻⁶	1

As Tabelas 6 e 7, a seguir, apresentam respectivamente as correntes advindas de uma campanha de medição no parque eólico real e as correntes provenientes da simulação computacional implementada nesse trabalho. Com os resultados, percebe-se que o modelo implementado possui uma grande aderência às medições realizadas em campo. Nesse sentido, tal comparação alicerceia os resultados gerados dos estudos computacionais de forma satisfatória.

TABELA 6
CORRENTES ADVINDAS DE CAMPANHA DE MEDIÇÃO REAL – PE III – AEROGERADOR 14

Potência de Operação (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Ih máximo (%)
Ordem Harmônica*	Ih (%)											
2	0,00	0,40	0,69	0,63	0,63	0,64	0,69	0,53	0,68	0,56	0,57	0,69
3	0,11	0,62	0,64	0,65	0,56	0,42	0,37	0,40	0,38	0,37	0,37	0,65
4	0,00	0,24	0,39	0,39	0,31	0,29	0,30	0,28	0,26	0,26	0,27	0,39
5	0,00	0,38	0,65	0,76	0,69	0,57	0,53	0,54	0,51	0,52	0,53	0,76
6	0,00	0,21	0,41	0,33	0,29	0,35	0,38	0,34	0,38	0,39	0,39	0,41
7	0,00	0,54	1,05	1,15	1,00	0,82	0,71	0,49	0,46	0,36	0,32	1,15
8	0,00	0,12	0,20	0,18	0,21	0,21	0,26	0,26	0,30	0,31	0,32	0,32
9	0,00	0,17	0,32	0,32	0,28	0,20	0,16	0,20	0,22	0,18	0,18	0,32
10	0,00	0,15	0,27	0,24	0,21	0,21	0,22	0,20	0,18	0,16	0,18	0,27
11	0,00	0,14	0,16	0,17	0,16	0,13	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17
12	0,00	0,12	0,14	0,13	0,15	0,16	0,18	0,19	0,20	0,22	0,22	0,22
13	0,00	0,14	0,17	0,19	0,19	0,15	0,13	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19
14	0,00	0,11	0,00	0,00	0,12	0,14	0,16	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,13	0,15	0,15	0,15
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,14	0,20	0,23	0,21	0,17	0,15	0,16	0,15	0,14	0,14	0,23
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,11	0,14	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,29	0,28	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29
25	0,00	0,12	0,26	0,31	0,29	0,19	0,17	0,19	0,19	0,18	0,19	0,31
26	0,00	0,00	0,11	0,14	0,00	0,00	0,11	0,00	0,13	0,00	0,00	0,14
27	0,00	0,00	0,13	0,17	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
31	0,00	0,11	0,18	0,21	0,18	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,12	0,21
32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	0,00	0,00	0,10	0,11	0,11	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11
34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37	0,00	0,00	0,26	0,28	0,27	0,20	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,28
38	0,00	0,00	0,11	0,12	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
39	0,00	0,28	0,29	0,33	0,31	0,30	0,33	0,33	0,34	0,34	0,32	0,34
40	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
41	0,00	0,00	0,25	0,26	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26
42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43	0,00	0,19	0,20	0,24	0,22	0,21	0,22	0,23	0,23	0,23	0,22	0,24
44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
45	0,00	0,00	0,15	0,15	0,14	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

*Ordem harmônica múltipla inteira da fundamental em 60 Hz.

TABELA 7
CORRENTES GERADAS PELA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – PE III – AEROGERADOR 14

Potência de Operação (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Ih máximo (%)
Ordem Harmônica	Ih (%)											
2	0,00	0,13	0,07	0,44	0,73	0,31	0,42	0,11	0,11	0,09	0,07	0,73
3	0,00	0,07	0,03	0,18	0,55	0,10	0,35	0,31	0,10	0,10	0,13	0,55
4	0,00	0,04	0,03	0,13	0,30	0,04	0,22	0,04	0,07	0,08	0,07	0,3
5	0,00	0,29	0,30	0,04	0,25	0,19	0,20	0,19	0,25	0,30	0,23	0,3
6	0,00	0,01	0,03	0,06	0,24	0,02	0,11	0,01	0,02	0,02	0,05	0,24
7	0,00	0,18	0,18	0,10	0,17	0,18	0,09	0,18	0,07	0,16	0,16	0,18
8	0,00	0,02	0,03	0,04	0,14	0,04	0,12	0,01	0,04	0,03	0,07	0,14
9	0,00	0,02	0,03	0,06	0,16	0,04	0,07	0,02	0,01	0,02	0,04	0,16
10	0,00	0,01	0,02	0,04	0,11	0,01	0,10	0,01	0,04	0,01	0,02	0,11
11	0,00	0,02	0,03	0,04	0,10	0,03	0,06	0,06	0,02	0,02	0,03	0,1
12	0,00	0,00	0,02	0,04	0,11	0,03	0,07	0,04	0,01	0,01	0,03	0,11
13	0,00	0,03	0,03	0,03	0,08	0,01	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,08
14	0,00	0,01	0,01	0,04	0,09	0,01	0,04	0,01	0,01	0,02	0,04	0,09
15	0,00	0,01	0,01	0,03	0,08	0,00	0,05	0,01	0,02	0,01	0,02	0,08
16	0,00	0,01	0,01	0,03	0,08	0,02	0,04	0,01	0,00	0,01	0,01	0,08
17	0,00	0,01	0,01	0,03	0,07	0,01	0,04	0,00	0,01	0,01	0,00	0,07
18	0,00	0,01	0,01	0,02	0,07	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01	0,01	0,07
19	0,00	0,01	0,00	0,02	0,07	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,01	0,07
20	0,00	0,01	0,01	0,02	0,06	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,06
21	0,00	0,01	0,01	0,02	0,06	0,01	0,04	0,00	0,01	0,01	0,01	0,06
22	0,00	0,01	0,01	0,02	0,06	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
23	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,01	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,05
24	0,00	0,00	0,01	0,02	0,05	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
25	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
26	0,00	0,01	0,00	0,02	0,05	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
27	0,00	0,01	0,00	0,02	0,04	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
28	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
29	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
30	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04

*Ordem harmônica múltipla inteira da fundamental em 60 Hz.

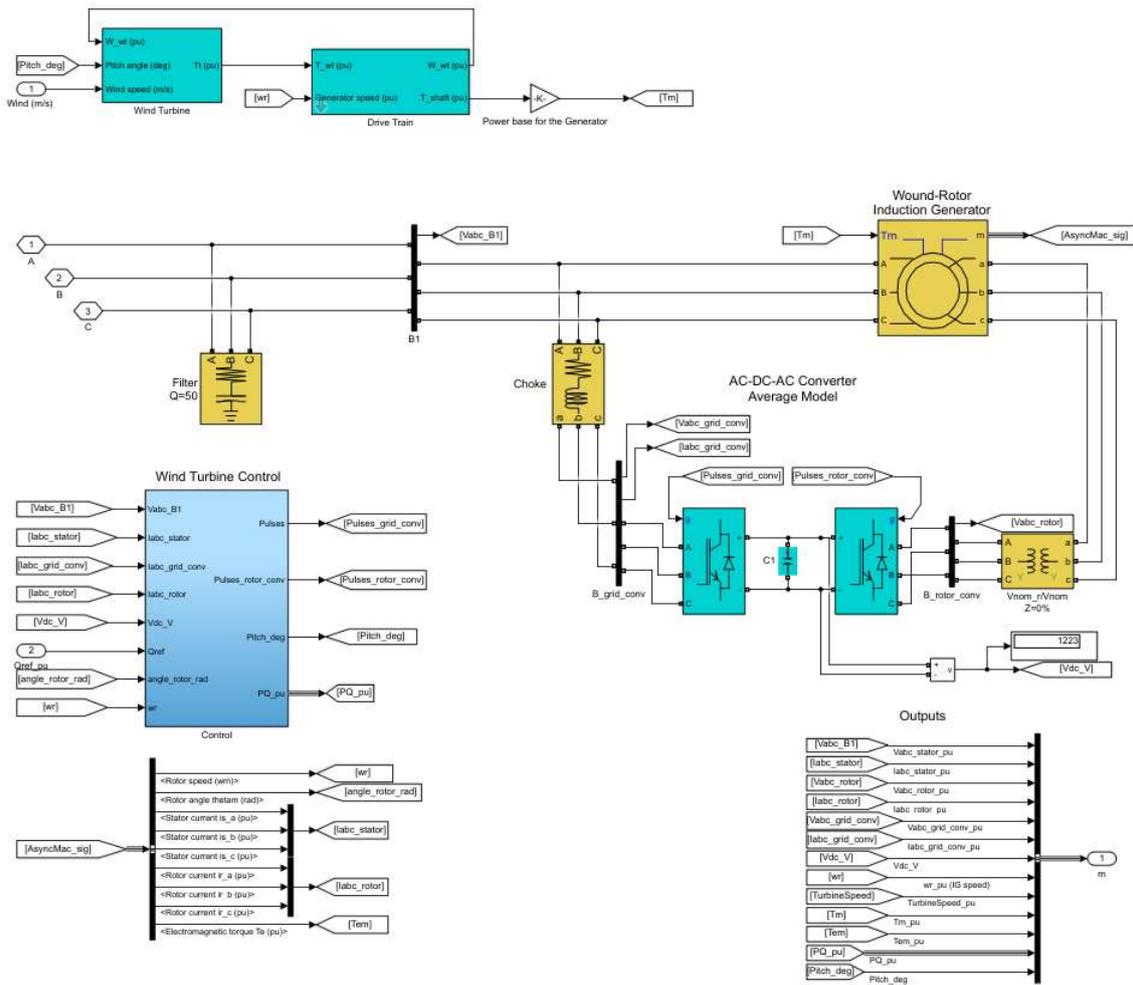
As Figuras 1 a 4 ilustram a modelagem implementada nos estudos anteriormente desenvolvidos.

Figura 1 - Anexo - Arranjo do complexo eólico e rede externa modelados no *matlab/simulink*.



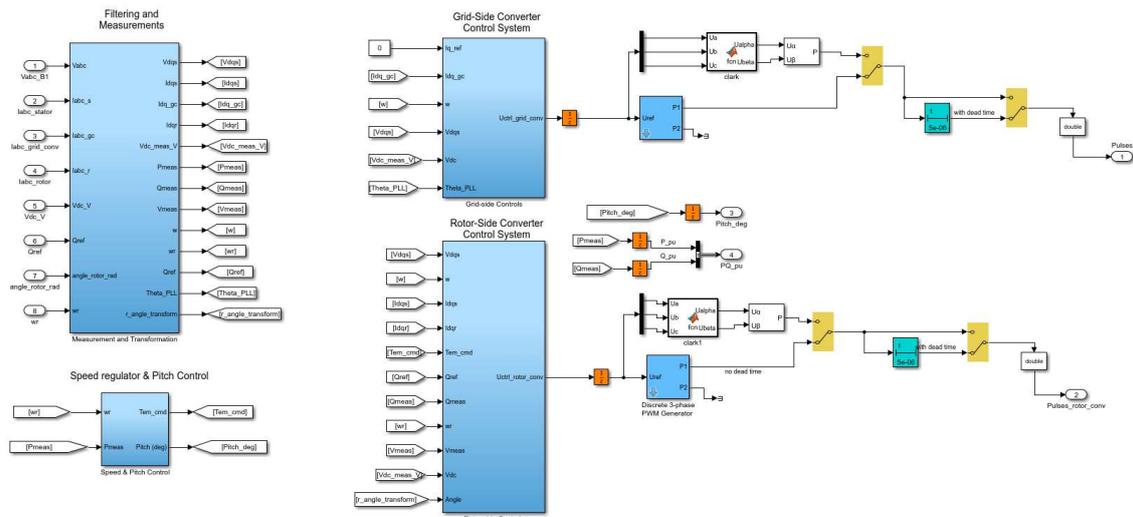
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 2 - Anexo - Arranjo do aerogerador modelado no *matlab/simulink*®.



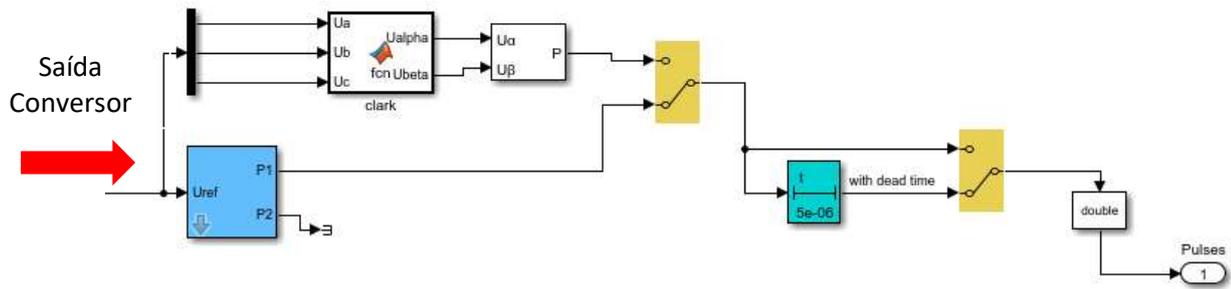
Fonte: Adaptado de *matlab/simulink*®.

Figura 3 - Anexo – Saída do sistema de controle modelado no *matlab/simulink*®.



Fonte: Adaptado de *Matlab/Simulink*®.

Figura 4 - Anexo – Detalhe do tempo morto e técnicas de modulação de largura de pulsos inseridas no modelo do *matlab/simulink*®.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAD, G. et al. **Doubly Fed Induction Mach.** Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781118104965>>. <https://doi.org/10.1002/9781118104965>
- ABDULLAH, M. A. et al. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3220–3227, jun. 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112001098>>. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.016>
- ABEEÓLICA. Boletim Anual de Geração Eólica 2018. **ANEEL/ ABEEólica**, São Paulo, 2018. , p. 1–15 Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf>.
- ABEEÓLICA. **InfoVento nº 14.** , nº 14. [S.l: s.n.], 2019.
- ABHAYASINGHE, S. P.; BUCKNALL, R. R. W. G. Analysis of overlap in power electronic drives in marine networks. **2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**, p. 1–5, 2009.
- ABU-RUB, H.; IQBAL, A.; GUZINSKI, J. **High Performance Control of Ac Drives With Matlab / Simulink Models High Performance Control of Ac Drives With Matlab / Simulink.** [S.l.]: WILEY, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781119969242>
- AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. **Instantaneous Power Theory and Applications To Power Conditioning.** Mew Jersey, Canada: IEEE PRESS, 2007. <https://doi.org/10.1002/0470118938>
- ALFIERI, L. et al. Methods for Assessment of Supraharmonics in Power Systems. Part I: Theoretical Issues. jul. 2019, [S.l.]: IEEE, jul. 2019. p. 110–115. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8890176/>>. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2019.8890176>
- ANEEL. **Fontes de Energia Exploradas no Brasil.** Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>>.
- ANTAR, R. K. et al. HVDC link power quality improvement using a modified active power filter. set. 2012, [S.l.]: IEEE, set. 2012. p. 1–5. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6398631/>>. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2012.6398631>
- ANUCHIN, A. et al. Modeling of AC voltage source inverter with dead-time and voltage drop compensation for DPWM with switching losses minimization. jun. 2017, [S.l.]: IEEE, jun. 2017. p. 1–6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7974401/>>. <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974401>

ARRILLAGA, J. et al. **Power System Harmonic Analysis**. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand: [s.n.], 1997. <https://doi.org/10.1002/9781118878316>

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power System Harmonics**. Second ed. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand: [s.n.], 2003. <https://doi.org/10.1002/0470871229>

BOLLEN, M. H. J. et al. Continuity of supply and voltage quality in the electricity network of the future. jun. 2012, [S.l.]: IEEE, jun. 2012. p. 375–377. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6381161/>>. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2012.6381161>

BOYS, J. T.; HANDLEY, P. G. Harmonic analysis of space vector modulated PWM waveforms. **IEE PROCEEDINGS**, v. 137, n. N, 1990. <https://doi.org/10.1049/ip-b.1990.0023>

CAVALIERE, C. A. C.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. Multi-pulse STATCOM operation under unbalanced voltages. 2002, [S.l.]: IEEE, 2002. p. 567–572. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/985066/>>. <https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985066>

CCEE. **InfoPLD - Informação do Preço de Liquidação das Diferenças**. . [S.l.]: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. , 2019

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill Education, 2013.

DÍAZ-GONZÁLEZ, F.; SUMPER, A.; GOMIS-BELLMUNT, O. Generating Systems Based on Renewable Power. **Energy Storage Power Syst**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2016. p. 25–59. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781118971291.ch2>>. <https://doi.org/10.1002/9781118971291.ch2>

DJUROVIC, S.; WILLIAMSON, S. Influence of supply harmonic voltages on DFIG stator current and power spectrum. set. 2010, [S.l.]: IEEE, set. 2010. p. 1–6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5608246/>>. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2010.5608246>

DRABEK, P. Power electronic converters and their negative influence. jun. 2013, [S.l.]: IEEE, jun. 2013. p. 679–685. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6586927/>>. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2013.6586927>

DRABEK, Pavel. EMC issues of controlled rectifiers. 2007, [S.l.]: IEEE, 2007. p. 1–7. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4417618/>>. <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417618>

DRABEK, Pavel. EMC problems of power electronic converters. ago. 2011a, [S.l.]: IEEE, ago. 2011. p. 734–739. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6038406/>>.

DRABEK, Pavel. Harmonics of power electronic converters. out. 2011b, [S.l.]: IEEE, out. 2011. p. 1–6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6128810/>>.

DRABEK, Pavel; KUS, V. EMC Issues of Low Frequency Interference of Power Electronic Converters. **Applied Mechanics and Materials**, v. 284–287, p. 2516–2520, jan. 2013. Disponível em: <<https://www.scientific.net/AMM.284-287.2516>>. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.2516>

DUGAN, R. C. et al. **Electrical Power System Quality**. 2. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2004.

EMANUEL, A. E. Current harmonics injected in three-phase power systems by chopper controlled DC loads. jun. 1981, [S.l.]: IEEE, jun. 1981. p. 284–291. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7083651/>>. <https://doi.org/10.1109/PESC.1981.7083651>

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **The Feynman Lectures on Physics**. 2ª edition ed. California: Pearson Education, 2006. v. 1. Disponível em: <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_04.html>.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7ª ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill Education, 2014.

GAGNON, R. et al. Hydro-Québec Strategy to Evaluate Electrical Transients Following Wind Power Plant Integration in the Gaspésie Transmission System. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 3, n. 4, p. 880–889, out. 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6236288/>>. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2200304>

GAGNON, R. et al. Large-Scale Real-Time Simulation of Wind Power Plants into Hydro-Québec Power System. 2010, [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <https://cn.mathworks.com/tagteam/65833_Hydro_Quebec_Large-Scale_Real-Time_Simulation_FINAL.pdf>.

GAGNON, R. (MathWorks D. **Wind Farm - DFIG Detailed Model**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/examples/wind-farm-dfig-detailed-model.html?searchHighlight=dfig&s_tid=doc_srchtile>.

GNACIŃSKI, P. et al. The effects of voltage subharmonics on cage induction machine. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 111, n. August 2018, p. 125–131, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.009>

GOMATHI, R. M. et al. A Survey on IoT Technologies, Evolution and Architecture. **2nd International Conference on Computer, Communication, and Signal Processing: Special Focus on Technology and Innovation for Smart Environment, ICCSP 2018**, n. Iccsp, p. 1–5, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2018.8452820>

GORGINPOUR, H.; JANDAGHI, B.; ORAEE, H. Time and space harmonics in brushless doubly-fed machine. **2011 19th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2011**, p. 1–6, 2011.

GRAHAM, A. D. Non characteristic line harmonics of PWM AC-DC converters. 2000, [S.l.]: IEEE, 2000. p. 955–960. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/896858/>>. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2000.896858>

HOSSEINI, S. H.; SAJADI, A.; TEIMOURI, M. Three phase harmonic load flow in an unbalanced AC system including HVDC link. **Conference Proceedings - IPEMC 2004: 4th International Power Electronics and Motion Control Conference**, v. 3, p. 1726–1730, 2004.

IEC/TR 61000-3-6. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 38: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems**. . [S.l: s.n.], 2008.

IEC 61400-21-1:2019. **IEC 61400-21-1:2019 - Wind energy generation systems - Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics - Wind turbines**. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/29528>>. , 2019

IEEE. **Institute of Electrical and Electronic Engineers**. Disponível em: <[https://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?queryText=non-characteristic harmonics&highlight=true&returnFacets=ALL&returnType=SEARCH&sortType=newest](https://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?queryText=non-characteristic%20harmonics&highlight=true&returnFacets=ALL&returnType=SEARCH&sortType=newest)>.

IEEE STD. 519-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. **IEEE Std. 519-2014**, v. 2014, 2014.

JIAZHU XU et al. Research on suppression of harmonic instability adopting even harmonic filters in FCC-HVDC. out. 2010, [S.l.]: IEEE, out. 2010. p. 1–4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5666424>>. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666424>

JOKSIMOVIC, G.; DJUROVIC, M.; PENMAN, J. Cage Rotor MMF: Winding Function Approach. **IEEE Power Engineering Review**, n. April, p. 2–4, 2001. <https://doi.org/10.1109/39.916355>

K. SOOD, V. (FEIC). **HVDC and FACTS Controllers Applications of Static Converters in Power Systems**. Boston: [s.n.], 2004.

KARIMI, H.; YAZDANI, A.; IRAVANI, R. Negative-Sequence Current Injection for Fast Islanding Detection of a Distributed Resource Unit. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 23, n. 1, p. 298–307, jan. 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4399648>>. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.911774>

KAZMIERKOWSKI, M. P. Power Quality: Problems and Mitigation Techniques [Book News]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 9, n. 2, p. 62–62, jun. 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7128811>>. <https://doi.org/10.1109/MIE.2015.2430111>

KIM, E.-S. et al. Compensation of dead time effects in grid-tied single-phase inverter using SOGI. mar. 2017, [S.l.]: IEEE, mar. 2017. p. 2633–2637. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7931070>>. <https://doi.org/10.1109/APEC.2017.7931070>

KLEBER DE ARAÚJO LIMA, F. et al. Simplified Model For Wind Turbines Equipped With Doubly-fed Induction Generator. **Eletrônica de Potência**, v. 16, n. 1, p. 47–55, 1 fev. 2011. Disponível em: <<https://sobraep.org.br/artigo/modelo-simplificado-para-aerogeradores-equipados-com-gerador-de-inducao-duplamente-alimentado>>. <https://doi.org/10.18618/REP.2011.1.047055>

- KULKARNI, M. V. A.; GANDHARE, W. Z.; PARULKAR, R. S. Performance evaluation of AC-DC filters for chandrapur-padghe bipolar HVDC link. dez. 2009, [S.l.]: IEEE, dez. 2009. p. 314–319. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5398627/>>. <https://doi.org/10.1109/ICEENVIRON.2009.5398627>
- KUMAR, K. S. S.; DEVI, A. R. Harmonic analysis of Hybrid Capacitor Commutated Converter in HVDC system. dez. 2012, [S.l.]: IEEE, dez. 2012. p. 1–6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6479545/>>. <https://doi.org/10.1109/PowerI.2012.6479545>
- KUS, V.; PEROUTKA, Z.; DRABEK, P. Non-characteristic harmonics and interharmonics of power electronic converters. 2005, [S.l.]: IEE, 2005. p. v2-35-v2-35. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp_20051030>. <https://doi.org/10.1049/cp:20051030>
- LAROSE, C. et al. Type-III Wind Power Plant Harmonic Emissions: Field Measurements and Aggregation Guidelines for Adequate Representation of Harmonics. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, n. 3, p. 797–804, jul. 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6490074/>>. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2252209>
- LARSEN, E. V.; BAKER, D. H.; MCIVER, J. C. **Lower Order Harmonic Interaction in AC/DC Systems**. **IEEE Transactions on Power Delivery**. [S.l.: s.n.], 1989 <https://doi.org/10.1109/61.19239>
- LIANG, S.; HU, Q.; LEE, W. J. A survey of harmonic emissions of a commercially operated wind farm. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 3, p. 1115–1123, 2012. <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2190702>
- LIMA, M. da S. **Mestrado em Engenharia Elétrica**. 2019. 1–94 f. UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, UBERLÂNDIA, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/25739>>.
- LINGLING FAN; YUVARAJAN, S.; KAVASSERI, R. Harmonic analysis of a Doubly Fed Induction Generator. 2010, [S.l.]: IEEE, 2010. p. 1–1. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5484195/>>. <https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484195>
- LIU, S. Y. et al. Aggregated dfig wind farm harmonic propagation analysis. n. September, 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.3148.0326>
- LIU, S. Y. **Estudo dos Harmônicos e Interharmônicos em Sistemas de Conversão de Energia Eólica com Gerador de Indução Duplamente Alimentado**. 2015. 1–199 f. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2015.
- LIU, Z. et al. Harmonic Assessment for Wind Parks Based on Sensitivity Analysis. v. 8, n. 4, p. 1373–1382, 2017a. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2680461>
- MACEDO JR., J. R. **Uma Contribuição à Análise das Componentes Inter-Harmônicas e seus Efeitos nos Indicadores de Flutuação de Tensão**. 2009. 1–201 f. Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.

MASOUM, M. A. S.; FUCHS, E. F. **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines**. 2^a ed. USA: Elsevier, 2015.

MASWOOD, A. I.; SHEN WEI. A twelve-pulse converter under unbalanced input voltages. 2005, [S.l.]: IEEE, 2005. p. 809-814 Vol. 2. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1627308/>>. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2005.207019>

MASWOOD, A. I.; SHEN WEI. Harmonic propagation in high power converter under unbalanced and distorted input voltages. 2003, [S.l.]: IEEE, 2003. p. 1486–1491. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1267375/>>. <https://doi.org/10.1109/PES.2003.1267375>

MENDONÇA, G. A.; PEREIRA, H. A.; SILVA, S. R. Wind Farm and System Modelling Evaluation in Harmonic Propagation Studies Key words. 2012, Spain: [s.n.], 2012. <https://doi.org/10.24084/repqj10.415>

MISRA, B.; NAYAK, B. Understanding the control of 12-pulse thyristor converters in VSC-based HVDC system with passive filters. mar. 2018, [S.l.]: IEEE, mar. 2018. p. 1–6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8376729/>>. <https://doi.org/10.1109/ICSESP.2018.8376729>

MORI, S. et al. Development of a Large Static Var Generator Using Self-Commutated Inverters for Improving Power System Stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 8, No. 1, February 1993, v. 8, n. 1, 1993. <https://doi.org/10.1109/59.221218>

MOYNIHAN, J. F.; EGAN, M. G.; MURPHY, J. M. D. Theoretical spectra of space-vector-modulated waveforms. **IEE**, 1998. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19981564>

MULJADI, E. et al. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant. set. 2016, [S.l.]: IEEE, set. 2016. p. 1–5. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7855542/>>. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855542>

NASCIMENTO, C. F. et al. Non-characteristic harmonics and DC side capacitor calculation in VSC connected to a distribution system with unbalanced voltage. jun. 2015, [S.l.]: IEEE, jun. 2015. p. 349–354. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7281493/>>. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2015.7281493>

NASCIMENTO, C. F.; DIENE, O.; WATANABE, E. H. Analytical model of three-phase four-wire VSC operating as grid forming power converter under unbalanced load conditions. dez. 2017, [S.l.]: IEEE, dez. 2017. p. 1,219-1,224. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8289287/>>. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2017.8289287>

NEOENERGIA. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/pt-br/sobre-nos/linhas-de-negocios/renovaveis/renovaveis-eolica/Paginas/calango.aspx>>.

ONS. **Operador Nacional do Sistema**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>.

ONS. **Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica**. Operador Nacional do Sistema. [S.l.: s.n.], 2016a.

ONS NT 009/2016 - REV.02. **Instruções para a Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras**. Rio de Janeiro, RJ, Brazil: [s.n.], 2018.

PENA, R.; CLARE, J. C.; ASHER, G. M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. **IEEE Proceedings - Electric Power Applications**, v. 143, n. 3, p. 231, 1996. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-epa_19960288>. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19960288>

PETER, A. G.; SAHA, K. A. Comparative study of harmonics reduction and power factor enhancement of six and 12-pulses HVDC system using passive and shunt APFs harmonic filters. abr. 2018, [S.l.]: IEEE, abr. 2018. p. 1–10. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8384395/>>. <https://doi.org/10.23919/DUE.2018.8384395>

PRECUP, R.; KAMAL, T.; HASSAN, S. Z. **Advanced Control and Optimization Paradigms for Wind Energy Systems**. [S.l.: s.n.], 2019. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-5995-8>

REINERI, C. A.; GOMEZ, J. C.; CAMPETELLI, N. G. Adjustable speed drives supplied with unbalanced voltages: Study under complex voltage unbalance factor parameter. ago. 2008, [S.l.]: IEEE, ago. 2008. p. 1–8. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4641735/>>. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2008.4641735>

ROSENTINO, A. J. **Uma Contribuição para Análise do Fenômeno das Flutuações de Tensão nos Sistemas Elétricos de Potência** Arnaldo José Pereira Rosentino Junior **Uma Contribuição para Análise do Fenômeno das Flutuações de Tensão nos Sistemas Elétricos**. 2014. 1–156 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14345>>.

RUAN, X. et al. **Control Techniques for LCL-Type Grid-Connected Inverters**. CPSS Power ed. Singapore: Springer Singapore, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-4277-5>>. (CPSS Power Electronics Series). <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4277-5>

RUAN, X. **Soft-Switching PWM Full-Bridge Converters**. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, China: WILEY, 2014.

SADEK, K.; CHRISTL, N.; LUTZELBERGER, P. AC/DC Harmonic Interaction in HVDC Systems. 1992, Germany: IEEE, 1992. p. 196–201. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/559036/>>. <https://doi.org/10.1109/ICHPS.1992.559036>

SANTOS, J. E. C. dos; SILVA, E. R. C. da. **Advanced Power Electronics Converters**. [S.l.]: IEEE PRESS, 2015.

SANTOS, F. J. **Introdução às Séries de Fourier Sumário**. [S.l.: s.n.], 2004.

SAUTER, E. (UFRGS); AZEVEDO, F. S. de (UFRGS). **Análise de Fourier um Livro Colaborativo**. Brasil: [s.n.], 2019.

SCHOSTAN, S. et al. Harmonic propagation in a doubly fed induction generator of a wind energy converter. maio 2009, [S.l.]: IEEE, maio 2009. p. 101–108. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5156020/>>. <https://doi.org/10.1109/CPE.2009.5156020>

SIDDIQUI, M.; BHATT, C. Comparative study of the effect of different gate firing schemes on the operation of a prototype HVDC transmission system. nov. 2013, [S.l.]: IEEE, nov. 2013. p. 1–6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6780156/>>. <https://doi.org/10.1109/NUiCONE.2013.6780156>

SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. **Model. Power Electron. Interfacing Energy Convers. Syst.** Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2016. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781119058458>>. <https://doi.org/10.1002/9781119058458>

SINGH, A. K.; SINGH, G. K.; MITRA, R. Evaluation of Harmonic Distortion under Unbalanced Supply Conditions. 2006a, [S.l.]: IEEE, 2006. p. 2569–2574. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4237939/>>. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2006.372617>

SINGH, A. K.; SINGH, G. K.; MITRA, R. Impact of Source Voltage Unbalance on AC-DC Rectifier Performance. nov. 2006b, [S.l.]: IEEE, nov. 2006. p. 96–101. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4147791/>>. <https://doi.org/10.1109/PESA.2006.343078>

SUBBARAO, T.; REEVE, J. Harmonics Caused By Imbalanced Transformer Impedances and Imperfect Twelve-Pulse Operation in HVDC Conversion. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-95, no. 5, September/October 1976, v. PAS-95 n^o, n. 5, p. 1732–1737, 1976. <https://doi.org/10.1109/T-PAS.1976.32272>

TANG, Y.; XU, L. Stator field oriented control of doubly-excited induction machine in wind power generating system. 1992, [S.l.]: IEEE, 1992. p. 1446–1449. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/271024/>>. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.1992.271024>

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**. New Delhi, India: IEEE Wiley, 2011. <https://doi.org/10.1002/9780470667057>

TESTA, A. et al. Interharmonics: Theory and Modeling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 4, p. 2335–2348, out. 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4302786/>>. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905505>

TRONCHA, G. da S. **Uma contribuição à aplicação dos filtros ativos em sistemas elétricos de potência**. 2019. 1–157 f. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24297>>.

WEILAND, M.; FÖRST, B.; HEROLD, G. Investigation of six-pulse three-phase converters in unsymmetrical operation. **2009 13th European Conference on Power**

Electronics and Applications, EPE '09, 2009. <https://doi.org/10.1109/PQ.2010.5550005>

WEILAND, M.; HEROLD, G.; FREUDENSTEIN, T. Investigation of line-commutated three-phase converters with impedance unbalance. jun. 2010, [S.l.]: IEEE, jun. 2010. p. 137–142. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5550005/>>. <https://doi.org/10.1109/PQ.2010.5550005>

WEKERLE, T.; OBERBAUER, R. **Power Quality VAR Compensation in Power Systems**. [S.l: s.n.], 2009.

WILLIAMSON, S.; DJUROVIC, S. Investigation of the impact of speed-ripple and inertia on the steady-state current spectrum of a DFIG with unbalanced rotor. 2010, [S.l.]: Institution of Engineering and Technology, 2010. p. 5–5. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2010.0076>>. <https://doi.org/10.1049/cp.2010.0076>

WILLIAMSON, S.; DJUROVIC, S. Origins of stator current spectra in DFIGs with winding faults and excitation asymmetries. maio 2009, [S.l.]: IEEE, maio 2009. p. 563–570. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5075262/>>. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2009.5075262>

WIND, G.; COUNCIL, E. **Global Wind Report 2018**. . [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <<https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>>.

XU, D. et al. **Advanced Control of Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Systems**. New Jersey, Canada, USA: [s.n.], 2018.

XUAN, Y. et al. A Three-Level Dual-Active-Bridge Converter With Blocking Capacitors for Bidirectional Electric Vehicle Charger. **IEEE Access**, v. 7, p. 173838–173847, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957022>

YAMAMOTO, M.; MOTOYOSHI, O. Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 6, n. 4, p. 624–629, out. 1991. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/97761/>>. <https://doi.org/10.1109/63.97761>

YANG, K. **On Harmonic Emission, Propagation and Aggregation in Wind Power Plants**. 2015. 1–186 f. Lulea University of Technology, 2015. Disponível em: <www.ltu.se>.

YANG, K. **Wind-Turbine Harmonic Emissions and Propagation through A Wind Farm**. 2012. 1–146 f. Lulea University of Technology, 2012.

YAZDANI, A.; IRAVANI, R. A Unified Dynamic Model and Control for the Voltage-Sourced Converter Under Unbalanced Grid Conditions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 3, p. 1620–1629, jul. 2006. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1645209/>>. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874641>

ZHONG, Q.-C.; HORNIK, T. **Control of Power Inverters In Renewable Energy and Smart Grid Integration**. UK: WILEY - IEEE PRESS, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118481806>

ZHOU, G. et al. Principle research on suppressing harmonic instability of HVDC transmission by using an inductive filtering method. nov. 2015, [S.l.]: IEEE, nov. 2015. p. 1710–1714. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7432509/>>. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2015.7432509>