



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Avaliação de Sobre Aquecimento Anômalos em Cabos Elétricos de Parque Eólicos

Ramon Araújo Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.
Prof. George Rossany Soares de Lira, D. Sc.
Orientador(es)

Campina Grande – PB
Agosto - 2018

D541a Dias, Ramon Araújo.
Avaliação de sobre aquecimento anômalos em cabos elétricos de
parque eólicos / Ramon Araújo Dias. – Campina Grande, 2018.
84 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática,
2018.

"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. George
Rossany Soares de Lira".

Referências.

1. Energia Elétrica – Qualidade. 2. Eficiência Energética. 3.
Distorções Harmônicas. 4. Parques Eólicos – Perdas por Harmônicos.
I. Costa, Edson Guedes da. II. Lira, George Rossany Soares de. II. Título.

CDU 621.316(043)

"AVALIAÇÃO DE SOBRE AQUECIMENTO ANÔMOLOS EM CABOS ELÉTRICOS DE PARQUE EÓLICOS"

RAMON ARAÚJO DIAS

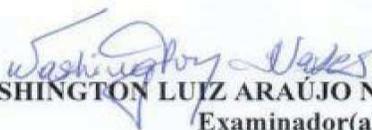
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/08/2018



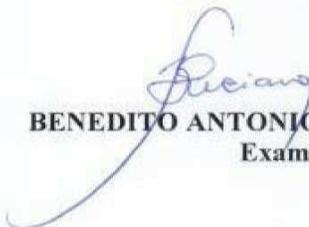
EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Examinador(a)



BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



KARCIUS MARCELUS COLAÇÃO DANTAS, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Agradecimentos

Agradeço:

Eternamente a minha mãe Verônica (*in memoriam*) por todo ensinamento e por ser minha referência de excelência.

A meu pai Ronaldo, minha irmã Talita e meu irmão Renan, pelo estímulo, apoio e por compartilharem de todos os momentos da minha vida me incentivando a buscar meus objetivos, alcançando meu melhor.

Aos professores George Lira e Edson Guedes, por todos os anos me orientando, por todos os ensinamentos passados e pela amizade construída.

Aos professores Benedito Antonio Luciano, Washington Araújo Neves e Karcius Dantas, por terem aceitado participar da banca e pelas sugestões e contribuições para a melhoria dissertação.

Aos meus amigos do Laboratório de Altas Tensões (LAT) e ao pessoal do grupo de QEE, por todo o convívio e apoio durante o mestrado. Em especial a Filipe Lucena e Regeli, pelas conversas, conselhos e amizade além do laboratório. A George Xavier e Arthur Francisco pela ajuda na correção e pelas sugestões.

Aos meus amigos Andreza, Carlos, Érica, Fideles, Juliana, Ilthon, Mariana, Raphael, Suzanne, Thales, Thamara, Thamiles e Yoge, por toda amizade, companheirismo e pelos momentos vividos. Ao Tom, pela amizade, por toda ajuda e por me lembrar do quanto sou capaz.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo suporte técnico.

Enfim, a todos que me ajudaram e que de alguma forma contribuíram para minha formação.

“CORAGEM, CORAGEM, SE O QUE VOCÊ QUER É AQUILO QUE PENSA E FAZ
CORAGEM, CORAGEM, QUE EU SEI QUE VOCÊ PODE MAIS”

RAUL SEIXAS

RESUMO

Neste trabalho foi avaliada a qualidade da energia elétrica e eficiência energética em parques eólicos, tendo como principal foco a análise do efeito pelicular provocado por harmônicos nos cabos da instalação de um parque eólico real. Utilizaram-se dados medidos em campo em estudo de qualidade da energia elétrica realizada para obtenção de acesso junto ao operador do sistema elétrico. Para a obtenção dos valores de distorções harmônicas das correntes medidas em campanha, utilizou-se o software HarmZs, comumente aplicado em estudos de qualidade. Os parques estudados apresentaram problemas na qualidade da energia entregue no ponto de conexão comum ao sistema elétrico interligado nacional. Nos cálculos das perdas adicionais ao sistema interno do parque, foi verificado um aumento de até 8% causado pelas correntes harmônicas na instalação do parque eólico. Com o auxílio do software COMSOL Multiphysics®, foi avaliada a distribuição da densidade de corrente resultante das correntes harmônicas nos cabos que conectam o aerogerador ao transformador elevador, cabos estes que apresentam maiores distorções de correntes harmônicas. Verificou-se que os cabos adjacentes interferem na distribuição de densidade de corrente e que o aumento da densidade de corrente na extremidade do cabo pode chegar a 68% quando comparado para o caso em que não há interferência de cabos adjacentes. Por fim, a análise térmica nos cabos indicou uma temperatura elevada, 136°C, para os condutores da fase B. O aumento de temperatura constatado pode ser atribuído, principalmente, às perdas decorrentes da corrente de componente fundamental e pelo processo de condução térmica entre fases.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica, eficiência energética, distorções harmônicas, efeito pelicular, perdas por harmônicos.

ABSTRACT

This work evaluates power quality and energy efficiency in wind farms. The main focus is the analysis of the skin effect caused by harmonics in the cables of real wind farm installation. Data presented in the study of power quality performed to obtain access to the electric system operator, was used for the development of this research. The software HarmZs, commonly used in power quality studies, was used to obtain the harmonic distortion values for currents measured at wind farm site. The wind farm presented problems in the power quality delivered at the point of common connection to the national electrical power system. The additional losses calculations for the wind farm internal system presented an increase of up to 8% caused by the harmonic currents in the installation of the wind farm. With the aid of the software COMSOL Multiphysics®, the current density distributions from the harmonic currents in the cables were evaluated. The cables used for this study are implemented in the connection between wind turbine and elevator transformer. These cables present greater harmonic current distortions. It has been found that adjacent cables interfere with current density distribution and that the current density increase at cable end can reach 68% when compared to the case where there is no interference from adjacent cables. Finally, the thermal analysis in the cables indicated an elevated temperature, 136°C, for the conductors of phase B. The increase of temperature observed can be mainly attributed to the losses due to the fundamental component current and the process of thermal conduction between phases.

Keywords: Power quality, energy efficiency, harmonic distortions, skin effect, harmonic losses.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Distúrbios associados à QEE. Em que: a) Tensão normal; b) Surto de Tensão; c) Transitório Oscilatório de Tensão; d) Subtensão Momentânea; e) Interrupção momentânea de Tensão; f) Sobretensão Momentânea g) Distorção Harmônica; h) Cortes na Tensão.	17
Figura 2: Decomposição de uma onda periódica não senoidal em seus componentes harmônicos.	19
Figura 3: Fluxo da corrente de harmônicos triplos em transformadores trifásicos.	24
Figura 4: Ilustração qualitativa a respeito da ocorrência do efeito pelicular em um condutor onde I é a corrente alternada, H o campo magnético e E o campo elétrico.	25
Figura 5: Ilustração do efeito pelicular e da profundidade de penetração pelicular onde J é a densidade de corrente, r o raio da esfera e δ a profundidade pelicular.	26
Figura 6: Diagrama esquemático de um parque eólico.	31
Figura 7: Configuração turbina eólica tipo 1.	32
Figura 8: Configuração turbina eólica tipo 2.	33
Figura 9: Configuração turbina eólica tipo 3.	34
Figura 10: Configuração turbina eólica tipo 4.	35
Figura 11: Diagrama unifilar do parque eólico.	45
Figura 12: Desenho técnico dos aerogeradores de 1,7 MW (à esquerda) e 1,85 MW (à direita).	45
Figura 13: Diagrama unifilar representativo dos parques eólicos utilizados.	46
Figura 14: Corte do cabo empregado nos aerogeradores.	47
Figura 15: Caixa de passagem localizada dentro da torre do aerogerador.	47
Figura 16: Interface EditCEPEL.	50
Figura 17: Secção transversal do cabo empregado nos parques eólicos.	53
Figura 18: Secções transversais dos cabos de uma fase: (a) aerogerador de 1,85 MW, (b) aerogerador de 1,70 MW.	54
Figura 19: Secções transversais dos cabos das 3 fases do parque com aerogerador de 1,85 MW.	54
Figura 20: Secções transversais dos cabos das 3 fases do parque 5.	55
Figura 21: Gráfico do nível de distorção harmônica mostrado no HarmZs.	58
Figura 22: Gráfico da densidade de corrente ao longo do raio do cabo para o parque 7.	62
Figura 23: Gráfico da densidade de corrente ao longo do raio do cabo para o parque 5.	62
Figura 24: Densidade de corrente para o cabo percorrido pela corrente de sétima ordem do parque 5.	63
Figura 25: Densidade de corrente para uma fase percorrido pela corrente do parque 7.	64
Figura 26: Gráfico da densidade para uma fase percorrido pela corrente do parque 5.	64
Figura 27: Densidade de fluxo magnético para uma fase percorrido pela corrente do parque 7.	65
Figura 28: Densidade de fluxo magnético para uma fase percorrido pela corrente do parque 5.	65
Figura 29: Gráfico da densidade de corrente do cabo 7 de uma fase do parque 7.	66
Figura 30: Gráfico da densidade de corrente para os cabos 1, 4 e 7 do parque 7.	67
Figura 31: Gráfico da densidade de corrente do cabo 6 de uma fase do parque 5.	67
Figura 32: Gráfico da densidade de corrente para os cabos 3 e 6 do parque 7.	68
Figura 33: Gráfico da densidade para uma fase percorrida pela corrente do parque 7.	69
Figura 34: Gráfico da densidade para uma fase percorrida pela corrente do parque 5.	69
Figura 35: Densidade de fluxo magnético para as fases do parque 7.	70
Figura 36: Densidade de fluxo magnético para as fases do parque 5.	70
Figura 37: Gráficos da densidade de corrente para as fases do parque 7.	71
Figura 38: Gráficos da densidade de corrente para as fases do parque 5.	73
Figura 39: Gráficos da distribuição de temperatura nos cabos do parque 7.	75
Figura 40: Gráficos da distribuição de temperatura nos cabos do parque 7 sob perspectiva.	76
Figura 41: Gráficos da distribuição de temperatura nos cabos do parque 5.	76
Figura 42: Gráficos da distribuição de temperatura nos cabos do parque 5 sob perspectiva.	77
Figura 43: Termovisão nos cabos do parque 5.	78

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 2 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 3 - Limites globais inferiores para os indicadores DTHI e DTHTS95%.</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 4 - Limites individuais para os indicadores DTHI e DTHTS95%</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 5 - Resumo das contribuições das pesquisas.</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 6 - Constantes dos materiais utilizados [COMSOL, 2018].</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 7 - Distorções harmônicas fornecidas pelo fabricante e medida em campo.</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 8 - Distorções harmônicas fornecidas pelo fabricante e medida em campo.</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 9 - Distorções harmônicas obtidas no HarmZs.</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 10 - Perdas nos cabos dos parques eólicos.</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 11 - Perdas considerando os harmônicos triplos.</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 12 - Contribuição das correntes harmônicas na densidade de corrente do parque 7.</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 13 - Contribuição das correntes harmônicas na densidade de corrente do parque 5.</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 14 - Máximas contribuições na densidade de corrente obtidas.</i>	<i>74</i>

LISTA DE ABREVIATURAS

ABEEólica	– Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	– Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CPTEC	– Centro de previsão de tempo e estudos climáticos
DTHI	– Distorção de Tensão Harmônica Individual
DTHT	– Distorção de Tensão Harmônica Total
DTHT95%	– Distorção de Tensão Harmônica Total Superada
GIDA	– Gerador de indução com dupla alimentação
GIRB	– Gerador de indução do tipo rotor bobinado
GIRG	– Gerador de indução rotor gaiola de esquilo
GSIP	– Gerador síncrono com ímã permanente
GSRB	– Gerador síncrono de rotor bobinado
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers
ONS	– Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	– Ponto de acoplamento comum
PDC	– Power Distribution Control
PRODIST	– Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PROINFA	– Programa de Incentivos às Fontes Alternativas
QEE	– Qualidade da Energia Elétrica
SIN	– Sistema elétrico interligado nacional

SUMÁRIO

1	Introdução	11
1.1	Motivação	12
1.2	Objetivo	13
1.3	Estrutura do texto	13
2	Fundamentação Teórica	15
2.1	Qualidade da Energia Elétrica	15
2.2	Harmônicos	18
2.2.1	Procedimentos Vigentes para a Análise de Harmônicos	20
2.2.2	Efeitos Causados por Harmônicos em condutores	25
2.3	Parques Eólicos	29
2.3.1	Velocidade Fixa	31
2.3.2	Velocidade Variável	32
2.3.2.1	Velocidade Variável Limitada	33
2.3.2.2	Velocidade Variável com Conversor de Frequência Parcial	34
2.3.2.3	Velocidade Variável com Conversor Total de Frequência	35
3	Revisão Bibliográfica	36
3.1	Evolução de Harmônicos no Sistema Elétrico	36
3.2	Evolução de Harmônicos em Parques Eólicos	38
4	Metodologia	44
4.1	Material	44
4.1.1	Parque Eólico	44
4.2	Métodos	48
4.2.1	Aquisição das Distorções Harmônicas e Cálculo das Perdas nos Cabos	48
4.2.2	Distribuição de Corrente e Temperatura em Cabos	52
5	Resultados e Discussões	56
5.1	Distorções Harmônicas e Perdas por Harmônicos nos Parques Eólicos	56
5.2	Análise do Efeito Pelicular nos Cabos dos Aerogeradores	61
5.2.1	Análise do Efeito Pelicular para Único Condutor	61
5.2.2	Análise do acoplamento magnético no Efeito Pelicular para os Cabos de uma Fase	64
5.2.3	Análise do acoplamento magnético no Efeito Pelicular para os Cabos das três Fases	69
5.2.4	Análise Térmica dos Cabos das três Fases	75
6	Conclusão	79
6.1	Trabalhos Futuros	81
6.2	Publicações	81
	Referências	82

1 INTRODUÇÃO

O aumento da contribuição de fontes de energias renováveis, nas matrizes energéticas de diversos países, é uma consequência da necessidade de complementariedade das fontes de energia já existentes, as quais têm enfrentado dificuldades técnicas, ambientais ou físicas (escassez de reservatórios de água, por exemplo) para atender a crescente demanda atual.

Dentre os tipos de fontes de energias renováveis que tiveram um aumento de participação na matriz energética, a energia eólica se destaca, principalmente pelos avanços tecnológicos que resultaram em maior eficiência e maior rentabilidade do investimento a curto e médio prazo.

No Brasil, o crescimento da capacidade de geração eólica teve como marco a criação do Programa de Incentivos às Fontes Alternativas (PROINFA) em 2002. O PROINFA visava aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de produtores independentes autônomos, concebidos com base em fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa no Sistema Elétrico Interligado Nacional (LEI Nº 10.438).

Com o incentivo do PROINFA, a capacidade eólica brasileira apresentou um crescimento significativo. Em 2017, a capacidade aumentou 2,06 GW em relação à 2016. Na metade de 2018 a capacidade instalada acumulada atingiu 13,3 GW. A expectativa é que a capacidade brasileira atinja 17,3 GW até o final de 2020. Há dias em que a energia eólica abastece mais de 60% do Nordeste e 12% do Brasil (Associação Brasileira de Energia Eólica –ABEEólica, 2018).

O crescimento contínuo da fonte eólica acarretou o desenvolvimento de novas normas e códigos de rede necessários para estabelecer as diretrizes da integração bem-sucedidas de parques eólicos ao sistema elétrico. Uma das principais preocupações a respeito da integração de um parque eólico é a importância de manter a qualidade da energia e da operação do sistema.

Assim como outras fontes de geração, os parques eólicos devem fornecer energia ao sistema elétrico dentro dos padrões de qualidade da energia estabelecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) ou pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Dentre estes padrões, destaca-se a manutenção dos valores

de tensão e frequência fornecidas pelo parque eólico dentro dos limites permitidos, bem como baixas emissões de harmônicas na rede. Tais exigências refletem em menores gastos com manutenções e garantem continuidade da operação, a confiabilidade e a estabilidade do sistema.

Distúrbios na qualidade da energia elétrica podem afetar a própria instalação do parque eólico, danificando equipamentos permanentemente ou reduzindo sua eficiência e vida útil. Além de problemas internos, os distúrbios podem interferir na operação do sistema elétrico em geral, visto que todo o sistema elétrico nacional está interligado.

1.1 MOTIVAÇÃO

O processo de conexão e os estudos pré-operacionais necessários para verificar se os parques eólicos estão aptos à conexão são especificados e fiscalizados pelo ONS ou pela ANEEL, cabendo aos agentes geradores a responsabilidade da realização dos estudos que indicarão o desempenho e os impactos de suas instalações ao sistema.

Os estudos realizados para a conexão visam analisar se os limites estipulados de qualidade da energia são excedidos para qualquer condição de operação. Caso sejam observados distúrbios além dos máximos permitidos, deverão ser realizadas medidas para correção, tais como o projeto e instalação de filtros.

As ações de correção normalmente são realizadas no ponto de acoplamento comum (PAC) entre o parque e o sistema elétrico, pois essa é a exigência mínima dos órgãos reguladores. Entretanto, os distúrbios ainda podem estar presentes no interior das instalações do parque eólico, causando danos às instalações e equipamento internos.

Entre os distúrbios que persistem nos parques, as distorções harmônicas são as mais comuns. O número elevado de conversores eletrônicos, presentes nos parques, tem efeito significativo na geração de harmônicos, causando impacto tanto ao parque eólico quanto ao sistema. Os impactos estão relacionados a problemas em diversos equipamentos, como cabos condutores, transformadores e bancos de capacitores, resultando em perdas adicionais, superaquecimento e sobrecarga.

A existência de elevado nível de distorção harmônica também afeta a eficiência energética de parques eólicos, uma vez que reduz a eficiência dos equipamentos, sua vida útil e causam perdas adicionais ao sistema. Em cabos condutores, as perdas ocasionadas por harmônicos ainda podem ser agravadas pela ocorrência do efeito

pelicular, o qual provoca concentrações de corrente na superfície do condutor, resultando em maiores perdas por aquecimento.

Pelo exposto, neste trabalho é investigado o efeito da presença de harmônicos na qualidade da energia elétrica e na eficiência energética de parques eólicos. A investigação será realizada com o intuito de encontrar uma correlação entre o aumento de perdas em condutores e as distorções harmônicas geradas nas turbinas eólicas. Para tanto, serão utilizadas ferramentas computacionais e dados reais de um complexo eólico.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa consiste na análise dos efeitos provocados por harmônicos em condutores de parques eólicos.

Como objetivos específicos foram estabelecidos:

- Identificar os níveis de distorções harmônicas de tensão no ponto de acoplamento comum no parque eólico;
- Obter as perdas adicionais causadas por correntes harmônicas nos cabos dos parques eólicos;
- Analisar o efeito pelicular causado no condutor para cada perfil de corrente com e sem as distorções harmônicas presentes no parque;
- Analisar o aumento da temperatura causado pelo efeito pelicular.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica com o objetivo de embasar o leitor, fornecendo informações sobre qualidade de energia, harmônicos, parques eólicos e efeito pelicular.

Em seguida, no Capítulo 3, é realizada uma breve revisão bibliográfica sobre harmônicos em sistemas elétricos, em parques eólicos e sobre o efeito pelicular.

No Capítulo 4 é descrita a metodologia da proposta, apresentando os dados reais de um parque eólico, o programa computacional utilizado na realização dos estudos de harmônicos e programas computacionais utilizados para a análise do efeito pelicular.

Posteriormente, no Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos, bem como as devidas análises.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões da pesquisa e as sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica necessária para auxiliar o leitor no entendimento do tema abordado, fornecendo informações sobre qualidade da energia, harmônicos, efeito pelicular e parques eólicos.

2.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) pode ser definida como um conjunto de limites elétricos que permitem o funcionamento de um determinado equipamento de acordo com suas especificações e sem a perda significativa de desempenho ou vida útil (SANKARAN, 2002).

Também é possível conceituar a QEE a partir de uma abordagem mais generalista, considerando, além do aspecto técnico, o meio ambiente e o consumidor final de energia. Neste sentido, a QEE está relacionada com um fornecimento de energia elétrica que garanta, a custos viáveis, o funcionamento adequado, seguro e confiável de equipamentos e processos industriais, sem afetar o meio-ambiente e o bem-estar das pessoas (BRONZEADO *et al.* 1996).

A QEE se tornou assunto de interesse de empresas de eletricidade e de usuários finais de energia elétrica. Isto se deve ao fato que parâmetros de QEE, dentro dos limites estabelecidos, garantem o funcionamento adequado dos equipamentos conectados ao sistema, evitando maiores perdas operacionais e reduzindo os custos com possíveis manutenções.

Pode-se expressar a QEE em termos de características físicas e propriedades da eletricidade, sendo geralmente descrita em termos de tensão, frequência e interrupções. Assim, qualquer desvio significativo na amplitude, frequência ou na forma de onda é um problema potencial de qualidade da energia (DUGAN *et al.*, 2004).

A seguir, enumeram-se as principais mudanças no sistema elétrico que levaram à preocupação com a QEE (DUGAN et al., 2004):

- A instalação de equipamentos com controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos de energia, resultando em maior sensibilidade às variações de qualidade de energia;
- O crescente investimento em eficiência energética, que se refere a técnicas e procedimentos que visam reduzir perdas e eliminar desperdícios, sem comprometer conforto e produção.
- O investimento em eficiência energética implicou em um aumento contínuo na aplicação de dispositivos de alta eficiência e no emprego da eletrônica de potência, resultando na elevação dos níveis de harmônicos inseridos no sistema elétrico;
- Maior conscientização dos consumidores finais em relação a problemas de qualidade de energia, tornando o mercado consumidor mais exigente;
- O aumento do número de equipamentos conectados ao sistema elétrico interligado. Com o sistema interligado, a falha de qualquer componente pode ter consequências em outro conectado a quilômetros de distância.

No sistema de potência só se pode controlar a qualidade da tensão, não tendo controle sobre as correntes que as cargas alimentadas podem demandar. Portanto, as normas na área de qualidade da energia são dedicadas a manter a tensão de alimentação dentro de certos limites. Contudo, destaca-se que distúrbios na corrente podem causar distúrbios na tensão.

As normas IEEE 1159-2009 (2009) e IEEE 519-2014 (2014) categorizam os distúrbios que causam problemas de QEE. As categorias são importantes para poder classificar diferentes resultados de medição e descrever os fenômenos eletromagnéticos relacionados aos problemas de qualidade da energia.

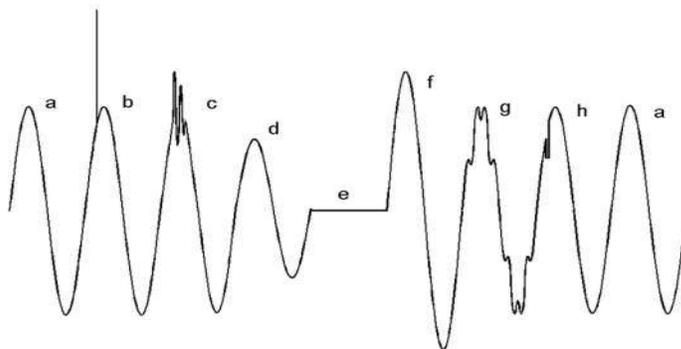
Uma das principais razões para categorizar os distúrbios é a existência de diferentes maneiras de solucionar os problemas de QEE. As soluções são propostas de acordo com a variação do parâmetro observado. As categorias de distúrbios de QEE são apresentadas a seguir:

- Variações Instantâneas de Tensão;
- Variações Momentâneas de Tensão;
- Variações Sustentadas de Tensão;

- Variações Momentâneas de Frequência;
- Distorções na Forma de Onda.

Na Figura 1 são representados os principais distúrbios associados à QEE.

Figura 1: Distúrbios associados à QEE. Em que: a) Tensão normal; b) Surto de Tensão; c) Transitório Oscilatório de Tensão; d) Subtensão Momentânea; e) Interrupção momentânea de Tensão; f) Sobretensão Momentânea g) Distorção Harmônica; h) Cortes na Tensão.



Fonte: Bronzeado et al (1997).

Variações instantâneas de tensão (**Transient Voltages**) são eventos indesejáveis e de natureza momentânea com duração inferior a $\frac{1}{2}$ ciclo que causam variações súbitas do valor instantâneo da tensão. Em geral, as variações dependem do montante de energia armazenada nos elementos do sistema no instante inicial da ocorrência e do comportamento transitório do sistema para atingir o seu novo ponto de operação.

Segundo a IEEE 1159-2009 (2009), os distúrbios que pertencem às variações instantâneas de tensão são os surtos de tensão (**Impulsive Transients**), Figura 1.b, e os transitórios oscilatórios de tensão (**Oscillatory Transients**), Figura 1.c.

Variações momentâneas de tensão são geralmente causadas por curtos-circuitos, pela energização de cargas que requerem altas correntes de partida ou conexões soltas na instalação elétrica. As variações podem ser de curtíssima duração (de $\frac{1}{2}$ ciclo a 30 ciclos), de curta duração (entre 30 ciclos e 3 segundos) e temporárias (entre 3 segundos e 1 minuto).

De acordo com a IEEE 1159-2009 (2009), a depender da localização do curto-circuito e das condições do sistema, as variações momentâneas de tensão podem ocorrer na forma de subtensões, ou afundamentos, momentâneos de tensão (**Voltage Sags**), Figura 1.d, interrupções momentâneas de tensão (**Short Duration Interruptions**), Figura 1.e, e sobretensões, ou elevações, momentâneas de tensão (**Voltage Swells**), Figura 1.f.

As variações sustentadas de tensão são variações do valor eficaz da tensão com duração maior ou igual a um minuto. Em geral, as variações sustentadas de tensão são causadas pela entrada e saída de grandes blocos de carga, linhas de transmissão e equipamentos de compensação de potência reativa.

De acordo com a norma IEEE 1159-2009, as variações sustentadas de tensão são classificadas como: subtensão sustentada (**Undervoltage**), interrupção sustentada de tensão (**Sustained Interruption**) e sobretensão sustentada (**Overvoltage**).

As Variações Momentâneas de Frequência (**Power Frequency Variations**) são desvios da frequência fundamental do sistema de potência a partir do seu valor nominal especificado, como por exemplo, 50 ou 60 Hz.

Flutuações de Tensão (**Voltage Fluctuation**) são variações sistemáticas de tensão, cuja amplitude normalmente fica entre 0,95 p.u. a 1,05 p.u.. Tais flutuações de tensão podem ser perceptíveis visualmente a partir de mudanças na intensidade da iluminação de lâmpadas.

A distorção da forma de onda é definida como um desvio entre a forma de onda de um sinal senoidal ideal e real de tensão. Os distúrbios dessa categoria são referidos como distúrbios “quase permanentes” e são causados pela operação de cargas não lineares. Dentre os distúrbios da categoria de distorção da forma de onda, destacam-se os cortes na tensão (**Notching**), Figura 1.h, nível CC (**DC offset**) e ruído (**Noise**).

Ainda fazem parte da categoria de distorção da forma de onda os harmônicos, Figura 1.g, objeto de estudo desta dissertação e que será abordado de forma mais detalhada no tópico seguinte.

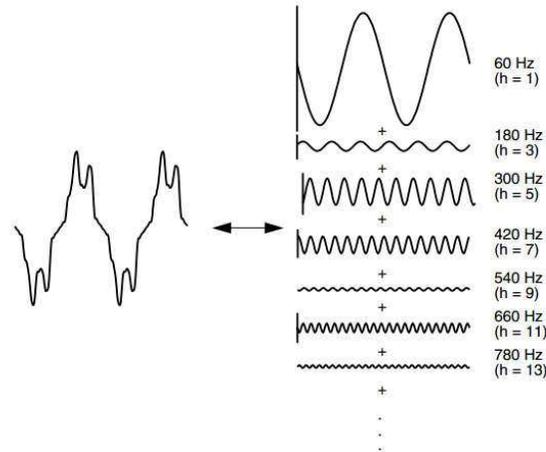
2.2 HARMÔNICOS

Os harmônicos são componentes cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental de um sinal, e são associados à operação contínua de uma carga em seu estado estacionário ou pelo menos por vários segundos.

Em um sistema elétrico, espera-se que as formas de onda da tensão geradas nas centrais elétricas não possuam distorções, sendo puramente senoidais. No entanto, são encontradas distorções oscilatórias na forma de onda, principalmente nas proximidades da carga. Geralmente, tais distorções têm como fonte as cargas não lineares.

Segundo o Teorema de Fourier, qualquer função periódica não senoidal, pode ser representada pela soma da componente sinusoidal com frequência fundamental, dos harmônicos e de uma eventual componente contínua. Na Figura 2, é ilustrado o Teorema de Fourier. Constata-se que a forma de onda distorcida é composta por várias componentes senoidais com frequência múltipla inteira da componente fundamental.

Figura 2: Decomposição de uma onda periódica não senoidal em seus componentes harmônicos.



Fonte: Dugan et al. (2004).

Na Equação (1) é mostrado o cálculo da série de Fourier para uma função periódica $x(t)$. Os coeficientes da série de Fourier podem ser obtidos a partir das Equações (2) e (3).

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(h\omega_0 t) + b_n \text{sen}(h\omega_0 t)], \quad (1)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{+\pi} x(t) \cos(k t) dt, \quad (2)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{+\pi} x(t) \text{sen}(k t) dt, \quad (3)$$

em que,

a_0 : valor médio ou nível CC de $x(t)$;

a_n e b_n : coeficientes da série;

ω_0 : frequência fundamental;

h : ordem harmônica de $x(t)$;

k : número inteiro até h .

Devido à possibilidade da decomposição de uma onda em várias componentes, o método de Fourier é aplicado de forma universal na análise de problemas harmônicos, possibilitando a análise em separado do sistema para cada componente harmônica.

Ao descrever o fenômeno harmônico é preciso ter cuidado. O uso do termo distorção harmônica deve ser qualificado em conformidade, referindo-se ao harmônico de tensão ou corrente, pois existem diferenças entre as causas e os efeitos das tensões e correntes harmônicas. De uma forma geral, considera-se que a distorção na tensão é o resultado de correntes distorcidas que passam pela impedância linear em série do sistema.

Na análise de harmônicos, é comum fazer referência a cada componente harmônica de acordo com sua ordem, h , que se refere aos elementos de frequência individuais que compõem uma forma de onda composta. Desta forma, a componente de ordem 5 refere-se à componente de frequência igual a 5 vezes a fundamental. Considerando o valor nominal de frequência do Brasil, 60 Hz, a componente de ordem 5 indica harmônico de 300 Hz.

Com o objetivo de minimizar os problemas relacionados aos harmônicos em sistemas elétricos e manter a qualidade da energia, o órgão regulador do sistema estipula diversos procedimentos para a análise de harmônicos. Os procedimentos vigentes para a análise de harmônicos no Brasil são apresentados a seguir.

2.2.1 PROCEDIMENTOS VIGENTES PARA A ANÁLISE DE HARMÔNICOS

Os dois índices mais utilizados para medir o conteúdo harmônico de uma forma de onda são a distorção harmônica total e a distorção harmônica individual. Ambas as distorções são medidas a partir do valor efetivo de uma forma de onda e podem ser aplicadas à tensão ou à corrente.

Os indicadores de QEE são determinados, nacionalmente, pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da ANEEL e o submódulo 2.8 do procedimento de rede do ONS. Os indicadores de distorção harmônica definidos pelos procedimentos citados são a Distorção de Tensão

Harmônica Individual (DTHI) e a Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT), cujos valores podem ser determinados como:

- DTHI corresponde ao valor obtido da relação percentual entre a tensão harmônica de ordem h , V_h , e a tensão à frequência fundamental, V_1 , ambas medidas em Volts, sendo expressa por:

$$DTHI_h = 100 \cdot \frac{V_h}{V_1} \quad (4)$$

- DTHT corresponde ao valor obtido da raiz quadrada do somatório quadrático das DTHI de ordens 2 a 50, sendo expressa por:

$$DTHT = \sqrt{\sum DTHI_h^2} \quad (5)$$

Os índices de distorção harmônica de corrente total e individual são definidos de modo análogo às Equações 4 e 5, relacionando valores de corrente harmônica de ordem h com o valor da componente fundamental.

O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica (ANEEL, 2010).

Os procedimentos da ANEEL e do ONS estipulam limites globais e individuais de harmônicos no âmbito de suas responsabilidades, a ANEEL para sistemas de distribuição e o ONS para sistemas de transmissão.

Os limites globais são obtidos por meio de campanhas de medição nos PAC do sistema. Já os limites individuais são determinados por meio de cálculos específicos para cada instalação que contenha equipamentos com características não lineares.

Nas Tabela 1 e Tabela 2 são especificados os valores de referência globais das distorções harmônicas totais e os níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão, respectivamente, segundo a ANEEL (2010).

Tabela 1 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.

Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (%)
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N \leq 230 \text{ kV}$	3

Tabela 2 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)				
	$VN \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < VN \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < VN \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < VN \leq 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5	
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	>9	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	>4	1	0,5	0,5	0,5

O ONS utiliza o indicador Distorção de Tensão Harmônica Total Superada (DTHTS95%). Este indicador pode ser obtido por meio da determinação do valor que foi superado em 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos. O valor do indicador DTHTS95% corresponderá ao maior entre os sete valores obtidos, em base diária, ao longo de 7 (sete) dias consecutivos.

Nas Tabela 3 e Tabela 4 são especificados os limites globais inferiores e limites individuais ambos para os indicadores DTHI e DTHTS95%, respectivamente.

Tabela 3 - Limites globais inferiores para os indicadores DTHI e DTHTS95%.

$V < 69 \text{ kV}$				$V \geq 69 \text{ kV}$			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par		DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,50%		
		≥ 8	1%			≥ 8	0,50%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥ 27	1%			≥ 27	0,50%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Tabela 4 - Limites individuais para os indicadores DTHI e DTHTS95%

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%			

Os harmônicos presentes no sistema elétrico são, majoritariamente, de ordem ímpar. A ocorrência deste tipo de harmônico é justificada pela simetria de meia onda da forma de onda senoidal, o que resulta no cancelamento de harmônicos de ordem par, oferecendo uma simplificação adicional para a maioria dos estudos do sistema de energia.

A presença de harmônicos pares é muitas vezes um indício da existência de problemas na carga ou com o transdutor utilizado para fazer a medição. Existem exceções, como retificadores de meia onda e fornos de arco aleatório (DUGAN *et al.*, 2004).

Em sistemas elétricos, o fluxo dos harmônicos presentes também é afetado significativamente pelos tipos de conexões dos enrolamentos do transformador que podem interferir no fluxo de correntes de harmônicos triplos.

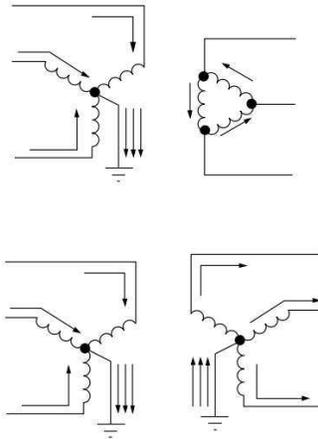
Para entender a influência dos transformadores no fluxo de harmônicos triplos, dois casos são mostrados na Figura 3. No transformador com ligação estrela-triângulo, representado no topo da imagem, as correntes harmônicas triplas são mostradas entrando no lado estrela e, uma vez que elas se encontram em fase, ocorrerá a soma no neutro dessas correntes.

O enrolamento em delta fornece um malha para que as correntes harmônicas triplas possam fluir, de modo que elas permanecem presas no delta e não aparecem como correntes de linha no lado delta. Quando as correntes são balanceadas, as correntes harmônicas triplas se comportam exatamente como correntes de sequência zero (DUGAN *et al.*, 2004).

O uso de enrolamentos em estrela aterrado em ambos os lados do transformador, representado na parte inferior da Figura 3, permite que as correntes harmônicas triplas fluam do sistema de baixa tensão para o sistema de alta tensão. Logo, estas correntes estarão presentes em igual proporção em ambos os lados.

Portanto, a depender do tipo de enrolamento dos transformadores utilizados, as correntes harmônicas triplas devem ser consideradas, ou não, no cálculo das perdas adicionais por harmônicos.

Figura 3: Fluxo da corrente de harmônicos tripos em transformadores trifásicos.



Fonte: (DUGAN et al., 2004).

A presença de harmônicos fora dos limites estabelecidos é um problema recorrente em sistemas elétricos de potência e afeta diretamente a eficiência energética, à medida que ocasiona sobrecargas e mau funcionamento dos equipamentos conectados ao sistema. Outros problemas também podem ser atribuídos à ocorrência de harmônicos, como:

- Aumento das perdas em motores, reduzindo sua vida útil;
- Sobrecorrentes em capacitores aplicados na correção de fator de potência, resultando em danos nos componentes;
- Aumento das perdas em transformadores, resultando em redução de capacidade e da vida útil;
- Efeito pelicular em cabos condutores.

Os problemas causados por harmônicos em cabos condutores são de interesse do presente trabalho e são discutidos, com mais detalhes, no tópico seguinte.

2.2.2 EFEITOS CAUSADOS POR HARMÔNICOS EM CONDUTORES

Os harmônicos causam efeitos nocivos aos componentes e equipamentos do sistema de energia e esses efeitos, na maioria das vezes, não são percebidos até a ocorrência de falhas. Desse modo, para evitar a ocorrência destas falhas, faz-se necessário o entendimento a respeito da interação entre os harmônicos e os componentes do sistema.

As correntes harmônicas aplicadas à impedância do sistema geram quedas de tensão para cada frequência harmônica com base na Lei de Ohm. A soma vetorial de todas as quedas de tensão individuais resulta na distorção de tensão total, cuja amplitude depende da impedância do sistema, dos níveis de corrente de falha do sistema e dos níveis de correntes harmônicas em cada componente harmônica de frequência.

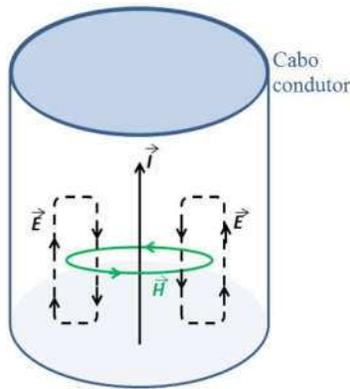
Nos parques eólicos, os cabos condutores são um dos principais componentes que podem ser afetados pelo efeito da circulação de correntes harmônicas.

A presença de harmônicos em cabos introduz perdas adicionais por efeito Joule além das causadas pela componente fundamental. Ademais, as correntes harmônicas intensificam a ocorrência do efeito pelicular na superfície dos condutores, resultando no aumento da resistência efetiva do cabo.

O aumento da resistência devido ao efeito pelicular é causado pelo fluxo desigual na seção transversal do condutor ocasionado por corrente alternada (\vec{I}), que produz um campo magnético rotacional (\vec{H}) dentro e ao redor do condutor. Quando a intensidade da corrente em um condutor varia, o campo magnético também varia.

A mudança no campo magnético, por sua vez, cria um campo elétrico (\vec{E}) que se opõe à mudança da intensidade de corrente. Na Figura 4 um esquema do efeito pelicular descrito é mostrado.

Figura 4: Ilustração qualitativa a respeito da ocorrência do efeito pelicular em um condutor onde \vec{I} é a corrente alternada, \vec{H} o campo magnético e \vec{E} o campo elétrico.

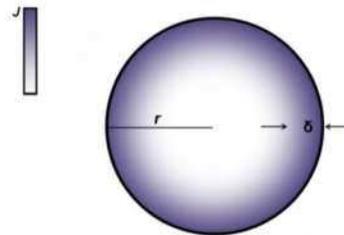


Fonte: O autor.

O campo elétrico que se opõe à variação da intensidade de corrente é chamado de força contra eletromotriz. Este campo elétrico possui maior intensidade no centro do condutor e tende a reduzir a densidade de corrente nesta região. Assim, a densidade de corrente se torna maior na superfície do condutor.

O aumento na densidade de corrente na borda externa do condutor é conhecida como efeito pelicular. Define-se também a profundidade de penetração pelicular como a profundidade do condutor que delimita a região na qual circula maior parte da corrente. Na Figura 5, o efeito pelicular e a profundidade pelicular (δ) são representados.

Figura 5: Ilustração do efeito pelicular e da profundidade de penetração pelicular onde J é a densidade de corrente, r o raio da esfera e δ a profundidade pelicular.



Fonte: O autor.

A densidade de corrente J em um condutor diminui exponencialmente do seu valor na superfície J_s de acordo com a profundidade r do condutor, da seguinte forma:

$$J = J_s e^{-\frac{r}{\delta}} \quad (6)$$

A profundidade pelicular também pode ser definida como a profundidade abaixo da superfície do condutor em que a densidade de corrente decai para $1/e$ (cerca de 0,37) de J_s . A profundidade pelicular pode ser expressa por:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (7)$$

em que, ρ corresponde à resistividade do condutor, ω à frequência angular e μ à permeabilidade do condutor.

Como grande parte dos condutores empregados em sistemas de média e alta tensão não são formados por um único condutor circular, para determinar o efeito pelicular é necessária a integração das equações eletromagnéticas ao longo do domínio de interesse (GRIFFITHS, 2013). Inicialmente, o campo magnético deve ser calculado por meio da lei de Ampère:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}. \quad (8)$$

Considerando um estudo no domínio da frequência, o campo elétrico induzido pode ser calculado utilizando:

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A}, \quad (9)$$

na qual, \vec{A} é o potencial vetor magnético, relacionado com a indução magnética \vec{B} de acordo com a Equação (10):

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}. \quad (10)$$

Além disso, as variáveis de campo são relacionadas por meio das relações constitutivas:

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (11)$$

e

$$\vec{J} = \sigma\vec{E}, \quad (12)$$

em que σ corresponde a condutividade elétrica dos materiais.

Como a área efetiva do condutor diminui com o efeito pelicular, a resistência desse condutor aumentará, implicando em maiores perdas por potência dissipada.

A resistência R de um fio, de comprimento l e área S da seção por onde efetivamente passa a corrente, é estimada como:

$$R = \frac{\rho l}{S}. \quad (13)$$

A partir das correntes harmônicas também é possível calcular a potência total dissipada no condutor. Considerando que a potência dissipada em forma de calor pela componente fundamental seja dada pela equação (14):

$$P_1 = R_1 I_1^2, \quad (14)$$

em que, P_1 é a potência dissipada, R_1 é a resistência equivalente à 60 Hz e I_1 é a componente fundamental da corrente. Pode-se expressar a potência dissipada em forma de calor pelas componentes harmônicas de acordo com a Equação (15).

$$P_h = R_h I_h^2, \quad (15)$$

na qual P_h é a potência dissipada. Levando-se em consideração que a taxa de distorção harmônica individual para corrente pode expressa pela Equação (16).

$$I_h = DCHI_h I_1, \quad (16)$$

em que DCHI é a taxa de distorção de corrente harmônica individual. Ao substituir a Equação (14) em (15), tem-se:

$$P_h = R_h (DCHI_h I_1)^2. \quad (17)$$

Dividindo a equação (17) pela (14), tem-se:

$$\frac{P_h}{P_1} = \frac{R_h}{R_1} (DCHI_h)^2. \quad (18)$$

A equação (18) permite analisar a influência do efeito térmico dos harmônicos em condutores cilíndricos devido ao efeito pelicular. Ainda é possível avaliar a proporção de calor produzido por cada harmônica em relação ao aquecimento devido à componente fundamental.

Dessa forma, a presença de harmônicos nos cabos do parque eólico pode comprometer o projeto inicial do parque, afetando sua eficiência energética, uma vez que a presença de correntes harmônicas agrava o efeito pelicular, podendo reduzir a ampacidade dos cabos e aumentar a potência dissipada por calor.

Além do efeito pelicular, quando na instalação é utilizado mais de um cabo condutor, ocorre o acoplamento eletromagnético. O acoplamento eletromagnético é um fenômeno comum em uma fiação elétrica. O campo magnético produzido pela passagem de corrente em um condutor resulta na indução de tensões em condutores paralelos.

Assim, quando dois ou mais condutores estão próximos, as correntes induzidas em um dos condutores terão como origem, além da variação do campo magnético do próprio condutor, a variação do campo magnético gerado pelos condutores vizinhos. Ocorre uma redistribuição nas densidades de corrente da mesma forma que no efeito pelicular. Este fenômeno é chamado de efeito de proximidade (BERLEZE, 1988).

A presença de correntes harmônicas contribui com o aumento das correntes e tensões induzidas, uma vez que, elas também serão responsáveis por produzir campo magnético que pode, por sua vez, induzir tensões nos condutores próximos como anteriormente explicado.

Efeito pelicular e de proximidade podem aumentar significativamente as perdas totais nos cabos. Uma vez que, agravam ainda mais a redução da área da seção

transversal do condutor em que a corrente é conduzida, aumentando as perdas e, conseqüentemente, a geração de calor (JIN *et al.*,2016).

As perdas dependem das propriedades do material condutor, como a condutividade elétrica, emissão térmica e coeficientes de convecção, enquanto o aumento de temperatura não depende somente das propriedades do material, mas é influenciado adicionalmente pelas condições ambientais.

A manifestação concreta das relações de acoplamento entre campo eletromagnético e campo térmico é que a distribuição do campo térmico é determinada por fatores ambientais externos e perdas eletromagnéticas que estão intimamente relacionadas às condutividades elétricas e permeabilidades dos materiais, e as condutividades elétricas também são influenciadas pela temperatura do material (RADEVA *et. al.*, 2014).

O aquecimento de condutores é comumente determinado pelas correntes de componente fundamental e suas temperaturas não excedem o normal para operação contínua. Contudo, quando considerado os efeitos pelicular e de proximidade, realizando uma análise de acoplamento eletromagnético-térmico, é possível que as temperaturas nos cabos excedam as temperaturas limites.

Dessa forma, análises mais detalhadas das perdas dos cabos e das condições de temperatura ambientais se faz necessário para determinar a temperatura operação dos cabos condutores.

2.3 PARQUES EÓLICOS

No Brasil existem 530 parques eólicos instalados (ABEEólica, 2018). Os parques são formados por geradores de grande porte, com potência maior do que 250 kW, e toda energia produzida é destinada ao sistema elétrico de transmissão ou de distribuição. A turbina eólica é o principal elemento do parque eólico, sendo responsável pela conversão da energia cinética contida no vento em energia elétrica.

O processo de construção de um parque eólico passa por etapas que visam garantir maior eficiência na conversão de energia. Dentre essas etapas, a escolha da localização deve garantir o máximo aproveitamento do vento. Para isso, são realizados estudos meteorológicos com o objetivo de definir o perfil da velocidade do vento de acordo com a altura.

O perfil da velocidade do vento pode ser influenciado pela rugosidade do terreno que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra, construções, pela presença de obstáculos nas redondezas e pelo relevo, o que pode resultar na aceleração ou desaceleração no escoamento do ar (DUTRA, 2001).

Além dos aspectos geográficos e ambientais da região que se deseja instalar o parque eólico, a caracterização da rede elétrica é fundamental na otimização da capacidade dos parques eólicos. Em termos de viabilidade de projeto, é vantajosa a instalação de parques próximos a pontos de integração do sistema. A necessidade de construção de linhas de transmissão longas e de subestações pode tornar o projeto pouco atrativo do ponto de vista econômico/fiduciário.

Após determinar a localização, devem-se considerar os aspectos de projeto do próprio parque eólico. A disposição de turbinas eólicas deve ser feita de modo que as interações entre turbinas adjacentes e o vento não comprometam a conversão de energia.

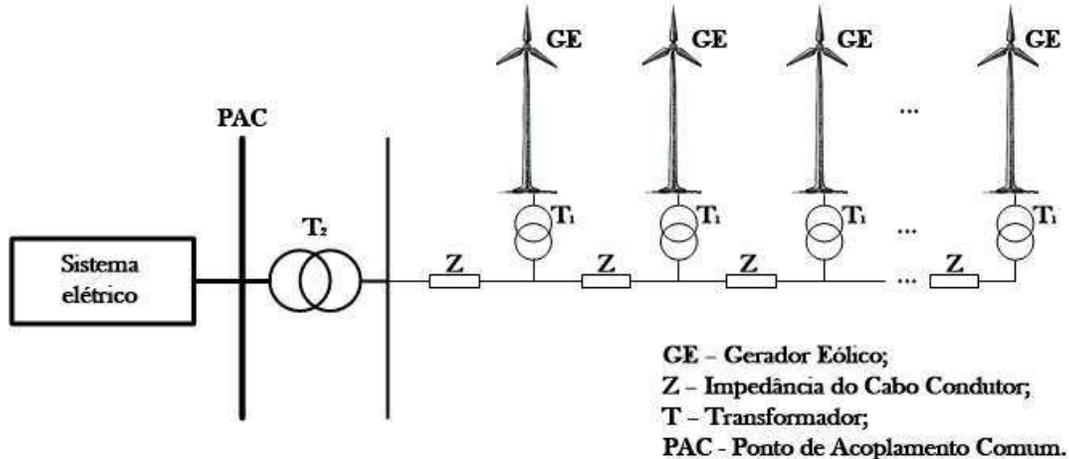
Ao interagir com as pás do rotor, a velocidade do vento reduz à medida que passa pela turbina, ou seja, a absorção de energia cinética afeta a velocidade do vento, caracterizando o efeito de sombreamento. Dessa forma, é necessário que a distância entre as turbinas seja tal que as alterações do vento causado em uma já estejam normalizadas ao interagir com outra turbina. Não considerar o efeito de sombreamento pode resultar em distúrbios de QEE, como variações de tensão, por exemplo.

O nível de tensão gerado pelas turbinas eólicas situa-se, normalmente, entre 380 V e 690 V, o que exige a instalação de um transformador elevador na saída de todas as turbinas eólicas. As saídas dos transformadores são conectadas ao barramento de uma subestação dedicada ao parque eólico.

A subestação cumpre o papel de interligar as turbinas eólicas do parque e conectá-las com um ou mais transformadores elevadores de tensão, ajustando o nível de tensão para a conexão com as linhas de transmissão ou distribuição às quais o parque será interligado.

A distribuição das turbinas eólicas implica em uma considerável quantidade de cabos necessários para transportar a energia convertida nas turbinas à subestação de interligação. O projeto dos cabos é de fundamental relevância, pois impacta no custo e eficiência do parque. Na Figura 6 é mostrado o diagrama esquemático de um parque eólico.

Figura 6: Diagrama esquemático de um parque eólico.



Fonte: O autor.

O diagrama mostrado na Figura 6 representa de forma geral as instalações de um parque eólico. A instalação de um parque pode ser realizada em solo firme, *onshore*, ou em plataformas marítimas distanciadas da costa, *offshore*. As condições de conversão de energia de parques do tipo *offshore* são melhores do que os do tipo *onshore*, devido à eliminação das condições adversas de terreno que impactam na qualidade dos ventos convertidos. Porém, os parques do tipo *onshore* apresentam facilidade na construção, instalação e manutenção.

Outra diferença entre os parques eólicos é o tipo de tecnologia utilizada nas turbinas eólicas, podendo ser de velocidade fixa ou de velocidade variável. O tipo de tecnologia utilizada para as turbinas eólicas pode ter influência na qualidade da energia convertida. Harmônicos podem ser gerados pelas turbinas que apresentem componentes não lineares empregados na sua estrutura. Dessa forma, se faz necessário o conhecimento de suas topologias, apresentadas a seguir.

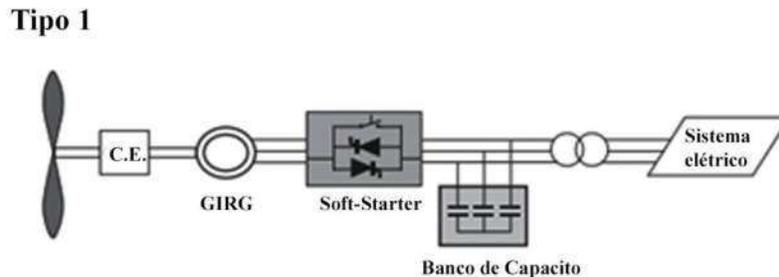
2.3.1 VELOCIDADE FIXA

Turbinas eólicas com velocidade fixa, conhecidas como tipo 1, operam com a mesma velocidade rotacional independentemente da velocidade do vento. A velocidade é determinada pela frequência da rede, da razão da caixa multiplicadora de velocidade e do modelo do gerador.

As turbinas deste tipo são compostas por uma caixa multiplicadora, responsável por elevar a velocidade de rotação das pás a valores nominais de velocidade de rotação

do gerador; um gerador de indução rotor gaiola de esquilo (GIRG); um banco de capacitores, destinado à compensação de potência reativa; e um **soft-Starter** utilizado para suavizar a conexão à rede, conforme esboçado na Figura 7. Por fim, esta turbina é conectada à rede por meio de um transformador (ACKERMANN, 2005).

Figura 7: Configuração turbina eólica tipo 1.



Fonte: Adaptado de Ackermann (2005).

As turbinas com velocidade fixa foram projetadas para obter maior eficiência para determinada velocidade do vento. Para aumentar a produção de energia, algumas delas apresentam dois conjuntos de enrolamento, sendo um utilizado para baixas velocidades de vento e o outro a velocidades de vento médias e altas.

Contudo, o consumo de energia reativa nesse tipo de turbina e o estresse mecânico são altos. Além disso, o controle da qualidade da energia é limitado, resultando em flutuações elétricas na rede para todas as flutuações na velocidade do vento. No caso de redes fracas, as flutuações de potência também podem levar a grandes flutuações de tensão, o que resultará em maiores perdas de linha (LARSSON, 2000).

2.3.2 VELOCIDADE VARIÁVEL

Atualmente, as turbinas de velocidade variável são as de uso mais comum em parques eólicos e com elas, diferentemente das turbinas com velocidade fixa, é possível manter a máxima eficiência em uma ampla faixa de velocidades do vento.

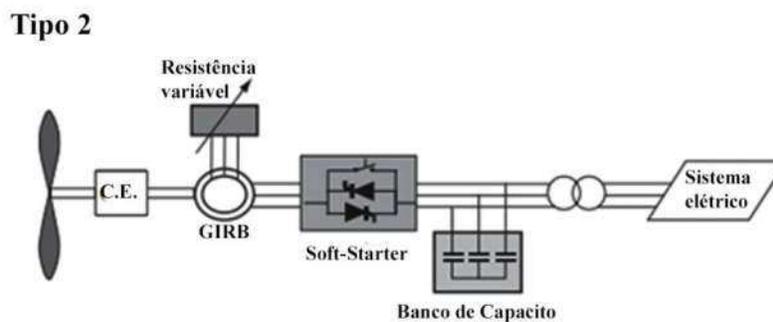
No entanto, a operação de velocidade variável oferece a possibilidade de usar a inércia da turbina como um armazenamento de energia em curto prazo, reduzindo assim a amplitude das flutuações de torque na caixa de engrenagens e no eixo do gerador que, de outra forma, apareceriam como consequência da turbulência e de outros fatores (TANDE, 2002).

A seguir serão discutidas as principais configurações de turbinas eólicas com velocidades variáveis.

2.3.2.1 VELOCIDADE VARIÁVEL LIMITADA

A turbina eólica de velocidade variável limitada, também conhecida como tipo 2, é composta por uma resistência variável no rotor do gerador; um gerador de indução do tipo rotor bobinado (GIRB) conectado diretamente à rede; caixa de engrenagens; **soft starter**; e um banco de capacitores, conforme visualizado na Figura 8.

Figura 8: Configuração turbina eólica tipo 2.



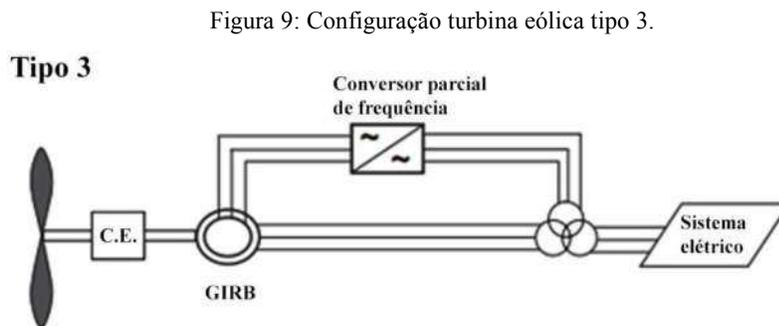
Fonte: Adaptado de Ackermann (2005).

O principal diferencial de uma turbina de velocidade variável limitada é a presença do resistor variável no rotor. Este resistor pode ser controlado por um conversor óptico montado no eixo do rotor, eliminando a necessidade de anéis deslizantes caros e escovas que precisam de manutenção.

A partir do controle da resistência total do rotor, é possível controlar o escorregamento e, conseqüentemente, a potência de saída. O alcance da regulação da velocidade dinâmica depende do tamanho da resistência variável do rotor. Normalmente, a faixa de velocidade é de 0% até 10% acima da velocidade síncrona do gerador (ACKERMAN, 2005).

2.3.2.2 VELOCIDADE VARIÁVEL COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA PARCIAL

Turbinas eólicas de velocidade variável com conversor de frequência parcial são caracterizadas pelo conceito de gerador de indução com dupla alimentação (GIDA), sendo categorizadas como turbinas do tipo 3. A turbina de velocidade variável é limitada por um gerador de indução de rotor bobinado (GIRB) em conjunto com um conversor de frequência com processamento parcial da potência (20% a 30% da potência nominal do gerador) no circuito do rotor. O esquemático de uma turbina do tipo 3 é apresentado na Figura 9.



Fonte: Adaptado de Ackermann (2005).

O termo dupla alimentação se refere ao fato de que a tensão no estator é solicitada pela rede e a tensão no rotor é induzida pelo conversor de potência. O conversor compensa a diferença entre a frequência mecânica e a frequência elétrica por meio da injeção de uma corrente no rotor com uma frequência variável. A compensação de potência reativa e a conexão de forma suave à rede são realizadas pelo conversor parcial de frequência.

O tipo 3 possui uma ampla faixa de controle dinâmico de velocidade em comparação ao tipo 2, mas depende do dimensionamento do conversor de frequência. Sua faixa de velocidade varia entre -40% a +30% da velocidade síncrona do gerador, o

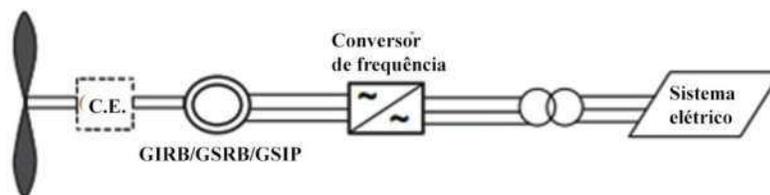
que lhe torna atraente economicamente. Porém, o uso de anéis de escorregamento e proteção no caso de faltas na rede se torna necessário (ACKERMAN, 2005).

2.3.2.3 VELOCIDADE VARIÁVEL COM CONVERSOR TOTAL DE FREQUÊNCIA

A turbina de velocidade variável com conversor total de frequência se refere à turbina com ampla variação de velocidade, com o gerador conectado à rede por meio de um conversor de frequência, sendo categorizadas como turbinas do tipo 4, conforme visualizado na Figura 10.

Figura 10: Configuração turbina eólica tipo 4.

Tipo 4



Fonte: Adaptado de Ackerman (2005).

A compensação de potência reativa e a conexão de forma suave à rede são realizadas pelo conversor total de frequência. O gerador pode ser excitado eletricamente, no caso do gerador síncrono de rotor bobinado (GSRB) e assíncrono de rotor bobinado (GIRB), ou excitado por um ímã permanente, no caso do gerador síncrono com ímã permanente (GSIP) (ACKERMANN, 2005).

Alguns sistemas de turbinas eólicas com ampla variação de velocidade não têm caixa de engrenagens. Nestes casos, um gerador síncrono multipolo de grande diâmetro é utilizado, o que permite uma operação com baixas rotações.

Neste capítulo foram descritas teorias sobre qualidade da energia, harmônicos, o efeito pelicular e os parques eólicos, necessária para o entendimento das discussões e análises dos resultados desta dissertação.

No próximo capítulo será realizado um levantamento bibliográfico de trabalhos com relevância para esta dissertação, de forma a fornecer suporte para a realização da pesquisa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados, de forma cronológica, os trabalhos com relevância para fundamentação da pesquisa. Os trabalhos abordados abrangem harmônicos no sistema elétrico bem como em parques eólicos, além do efeito pelicular agravado por harmônicos.

3.1 EVOLUÇÃO DE HARMÔNICOS NO SISTEMA ELÉTRICO

A presença de harmônicos no sistema elétrico é datada desde o início do século passado. Frank (1910) observou, com o auxílio de um oscilógrafo, os harmônicos de corrente e tensão em transformadores. Ele fez uso de um transformador de 185 kVA, 33 kV – 430 V e aplicou uma tensão com nível desprezível de distorção em um dos terminais do transformador. A partir da variação das porcentagens de tensão aplicada,

Frank obteve o sinal da corrente no segundo terminal utilizando uma carga resistiva. Foram obtidas formas de onda de corrente distorcidas devido à presença de harmônicos. Frank ressaltou que em qualquer sistema de distribuição são esperados distúrbios de corrente e tensão.

Na sua pesquisa, Blye e Kent (1934) identificaram os efeitos causados por retificadores de vapor de mercúrio na forma de onda da tensão e corrente do sistema elétrico. Os autores utilizaram um circuito equivalente e fórmulas empíricas para a obtenção dos resultados. Os autores concluíram que o funcionamento dos retificadores geralmente resulta em um aumento nas amplitudes das correntes harmônicas ímpares não múltiplas de 3 presentes no circuito de alimentação e que pode resultar em um aumento nas tensões harmônicas correspondentes. Embora os harmônicos gerados não sejam graves do ponto de vista do sistema elétrico, eles podem resultar em interferências nos circuitos de comunicação.

Whiteheded e Radley (1948) investigaram os harmônicos que circulam em sistemas de correntes alternadas e que são gerados por cargas que incorporam dispositivos de comutação. No estudo, o fluxo de harmônicos decorrentes dessas fontes foi considerado a partir de um aspecto teórico, usando redes equivalentes. Os autores ainda afirmaram que os projetos existentes de transformadores, máquinas e componentes similares, em geral, oferecem baixas tensões harmônicas e que a contribuição de retificadores e os inversores na distorção harmônica podem ser reduzidos ao aumentar o número de fases em operação efetiva. Ademais, foi verificado que uma diminuição considerável em efeitos harmônicos pode ser obtida em transformadores pelo uso de enrolamentos conectados em delta, evitando ressonâncias indesejáveis.

Phadke e Harlow (1967), por sua vez, investigaram, por meio de equacionamento, a geração de harmônicos em sistemas CA-CC de alta tensão. Eles mostraram que, com certos tipos de controles automáticos, os ângulos de disparo das válvulas do conversor podem sofrer alguns erros, o que, por sua vez, poderia gerar correntes harmônicas fora do padrão de um conversor no sistema de corrente.

Fulleret al. (1987) estudaram os efeitos das tensões e correntes não senoidais no desempenho de relés estáticos de subfrequência e de sobrecorrente de forma experimental. Os testes foram realizados de modo que a frequência, amplitude e mudança de fase de harmônicos individuais pudessem ser ajustadas. Os ajustes eram feitos empregando um gerador de forma de onda com um circuito de bloqueio de fase.

Os autores verificaram que, para amplitudes de tensão e corrente harmônicas, como ocorrem em sistemas de distribuição, os relés de baixa frequência e o tempo de resposta de relés de sobrecorrente mostraram uma deterioração acentuada em seu desempenho. As características operacionais instantâneas dos relés de sobrecorrente, no entanto, são pouco afetadas pela presença de correntes harmônicas.

3.2 EVOLUÇÃO DE HARMÔNICOS EM PARQUES EÓLICOS

Até o decênio de 1980, os problemas relacionados aos harmônicos já eram de conhecimento dos engenheiros do setor, e seus efeitos abrangiam do sistema de comunicação ao sistema de proteção. Uma vez conhecidos, amenizar os problemas causados pela presença de harmônicos se tornou uma atividade necessária. Novos casos de presença de harmônicos foram observados com o desenvolvimento do sistema elétrico, e a partir do decênio de 1990, trabalhos relacionando harmônicos em parques eólicos foram reportados.

Balcells e Gonzalez (1998) analisaram um parque eólico com um alto nível de harmônicos e condições de ressonância. As simulações realizadas a partir de um modelo equivalente resultaram em frequência de ressonância próxima dos valores medidos no caso prático. Uma combinação de um banco de capacitores com comutador de tiristores (TSC) e um filtro passivo foi usado com sucesso para evitar a ressonância e aumentar a eficiência total do sistema.

Tentzerakis e Papathanassiou (2007) discutiram o comportamento harmônico em turbinas eólicas. Para tal discussão, foram realizadas medições em turbinas comercialmente disponíveis e analisadas questões como a forma e a faixa de frequência do espectro de corrente harmônica, a variação dos harmônicos com o ponto de operação da turbina eólica e o efeito do agrupamento. Como conclusão, os autores observaram que a forma e a faixa de frequência do espectro dependem das características e do controle dos conversores de potência da turbina, bem como dos filtros harmônicos empregados. Foi observada também que a geração de harmônicos varia pouco com relação ao ponto de operação da turbina, e a aplicação do agrupamento de turbinas aumenta significativamente a amplitude dos harmônicos, em particular, nas frequências altas.

Badrzadeh et al. (2012) discutiram diferentes aspectos da análise harmônica do sistema elétrico em parques eólicos. Os autores abordaram metodologias para a modelagem de diferentes componentes do parque eólico, incluindo a turbina eólica, cabos e transformadores no sistema, e a rede equivalente. Também foram apresentadas propostas de simplificações para modelagens de grupos de equipamentos. Por fim, os autores simularam um sistema com e sem as simplificações propostas, constatando, a partir de comparativos entre os sistemas, que os resultados obtidos mediante as simplificações não destoaram de modo significativo em relação ao sistema detalhado, tornando as simplificações confiáveis para simulações.

Badrzadeh e Gupta (2012) realizaram estudos de caso usando simulação da análise harmônica de parques eólicos para o tipo de turbina 3 e 4 em condições de ressonância e de não ressonância. Os autores constataram que as turbinas eólicas desse tipo podem gerar um nível apreciável de harmônicos de baixa ordem e inter-harmônicos, além dos harmônicos de comutação de alta ordem. Para condições não ressonantes, foram verificados níveis de harmônicos inferiores aos limites legais estipulados. Já para as condições de ressonância, níveis de harmônicos elevados foram identificados. Os métodos de mitigação pertinentes foram estudados. Os autores chegaram a conclusão que o uso da compensação harmônica no nível da turbina fornece um mecanismo para lidar com inter-harmônicos e harmônicos de baixa ordem, evitando o risco de ressonâncias internamente na turbina ou externamente com a rede interligada.

Huan e Tayjasant (2013) realizaram um estudo de caso por meio de simulação de um parque eólico localizado na Tailândia em condição de ressonância. Os autores compararam os modelos agregados de parques eólicos propostos pela norma IEC 61000-3-6, pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) e um modelo obtido pelo método de redução. Os resultados das simulações dos modelos avaliados e os dados obtidos por medição no parque eólico foram comparados, indicando que o modelo proposto por NREL possuíam resultados mais fidedignos para estudo de ressonância harmônica.

Larose et al.(2013) estudaram, usando um modelo agregado, as emissões de harmônicos em turbina do tipo 3 em um parque eólico conectado ao sistema elétrico canadense. Os autores realizaram medições em campo que foram comparadas aos resultados de simulação do modelo detalhado e agregado do parque eólico. A comparação dos modelos simulados e os resultados obtidos nas medições em campo demonstraram que o modelo agregado do parque pode ser usado, na maioria dos casos,

para estudar qualitativamente harmônicos e inter-harmônicos no ponto de acoplamento com o sistema.

Arcega e Pardina (2014) estudaram o efeito térmico produzido por harmônicos em condutores cilíndricos de cobre e alumínio devido ao efeito pelicular. Os autores desenvolveram equações baseadas em fórmulas de Bessel para estimar o calor produzido pelo efeito. Em laboratório, correntes distorcidas foram aplicadas em cabos para obter as variáveis da equação desenvolvida e, em seguida, foi determinado o aumento de calor produzido por harmônico. Como resultado, foi obtido um aumento de até 10% do calor produzido em relação a componente fundamental. Este valor pode ser ainda maior, visto que os autores não consideraram o efeito de proximidade dos cabos.

Block *et al.* (2015) apresentaram uma análise comparativa dos resultados de diversas campanhas de medições dos indicadores de harmônicos de diferentes complexos de geração eólica (CGE) conectados ao sistema elétrico interligado nacional (SIN). Foram analisadas medições de 5 complexos de geração eólica, os quais utilizam as duas principais topologias difundidas nacionalmente (DFIG e Full Converter). Foram investigadas detalhadamente as relações entre as distorções harmônicas de tensão e corrente no PAC e nos aerogeradores, bem como da impedância equivalente do CGE. Os autores verificaram que a correlação das correntes harmônicas geradas nas máquinas do CGE e as distorções harmônicas de tensão no PAC são diretamente dependentes do valor da impedância equivalente do complexo eólico em faixa de frequência específica.

Desai *et al.* (2015) realizaram um estudo de caso no qual foram avaliadas as condições harmônicas em um parque eólico, localizado na Índia, composto por geradores de indução de gaiolas de esquilo (GIGE) e de indução duplamente alimentado (GIDA). Por meio de simulações, os autores obtiveram as distorções harmônicas do parque, as quais se encontravam superiores aos limites estabelecidos pelo código de rede indiano. Pelo estudo foi constatado que o parque com GIGE apresenta menores níveis de harmônicos do que os com GIDA, mesmo após a correção com filtro.

Schwanz *et al.* (2016) utilizaram filtros ativos como solução para mitigação do nível elevado de harmônicos e avaliaram a melhor localização para a conexão desses filtros. Por meio de simulações, os filtros ativos foram distribuídos em diferentes locais dentro de uma usina de energia eólica. A comparação da redução de harmônicos de ordem mais baixa indicou que a locação de filtro mais próximo da turbina apresenta melhor desempenho, pois evita a propagação harmônica dentro do parque eólico e na rede pública.

Jiang *et al.* (2016) estudaram as resistências equivalentes em linhas de transmissão quando harmônicos estão presentes. Os autores propuseram um método para o cálculo com mais precisão da perda harmônica da linha, considerando o efeito pelicular. Por fim, na pesquisa, foi utilizado um sistema trifásico de três condutores com comprimento de 50 km LGJ-185/25 ACSR como exemplo, em que, sua perda harmônica durante um ano é calculada pela fórmula convencional e pelo cálculo proposto em seu trabalho. As comparações dos resultados obtidos indicaram que o efeito pelicular contribuiu com um acréscimo de 10% na perda anual por harmônicos na linha de transmissão.

Chenying *et al.* (2016) consideraram a influência do efeito pelicular e do efeito de proximidade no cálculo das perdas e aumento de temperatura. Com o acoplamento mútuo do campo eletromagnético e do campo de temperatura, a perda harmônica dinâmica e a temperatura foram simuladas para análise. Como conclusão foi proposto um método de cálculo para perda de harmônicos de cabos e aumento de temperatura. Foi observado que as perdas harmônicas e o aumento da temperatura crescem com o aumento da amplitude e frequência harmônicas. Foi obtido um aumento de até 1,27°C na temperatura central do cabo utilizando o modelo proposto.

Shazly *et al.* (2017) modelaram o cabo subterrâneo trifásico usando o software COMSOL Multiphysics para avaliar o desempenho térmico estável e transitório. Um estudo de caso real de cabos de cobre de núcleo único trifásico de 220 kV e 340 MVA isolados por polietileno reticulado foi estudado. A capacidade de carregamento sob diferentes condições ambientais para umidade média do solo e solo seco com baixo teor de umidade também é avaliada, além do efeito da mudança do espectro de frequência da corrente de carga não linear envolvendo diferentes ordens harmônicas simultâneas. Como conclusão, foi observado o aumento da temperatura com o aumento da ordem harmônica. Portanto, o impacto geral dos harmônicos deve considerar todas as contribuições harmônicas para obter resultados precisos e não considerar apenas o THD. A configuração dos cabos afeta muito as temperaturas dos componentes do cabo. Verificou-se que a configuração do trevo (onde os condutores das 3 fases estão dispostos no formato triângulo) causa um aumento elevado das temperaturas dos componentes do cabo em comparação com o formato plano (onde os condutores das 3 fases estão dispostos em uma linha) no mesmo espectro de frequências. Por fim, avaliaram-se a alteração do tipo de dielétrico do isolamento do cabo e perceberam que o material tem uma grande influência nas temperaturas, devido à variação das

propriedades físicas térmicas. Para o isolamento polietileno reticulado, as temperaturas do cabo foram as mais elevadas.

Na Tabela 5 está apresentado um resumo das referências citadas e a contribuição do autor deste trabalho.

Tabela 5 - Resumo das contribuições das pesquisas.

Ano	Pesquisadores	Contribuição
1998	Balcells e Gonzalez	Analisaram um parque eólico com um alto nível de harmônicos e condições de ressonância, aplicando bancos de capacitores e filtros para evitar as ressonâncias.
2007	Tentzerakis e Papathanassiou	Realizaram medições em turbinas comercialmente disponíveis e analisaram a variação dos harmônicos de acordo com o ponto de operação da turbina eólica, o efeito do agrupamento e forma e a faixa de frequência do espectro de corrente harmônica.
2012	Badrzadeh et al	Propuseram simplificações para modelagens de grupos de equipamentos em parque eólico e descreveram as metodologias para modelagem de diferentes componentes do parque eólico.
2012	Badrzadeh e Gupta	Realizaram estudos de casos usando simulação da análise harmônica de parques eólicos para turbina do tipo 3 e 4 em condições de ressonância e de não ressonância. (Continuação)
2013	Huan e Tayjasant	Compararam os modelos agregados de parques eólicos, indicando que o modelo proposto por NREL possuiam resultados mais fidedignos para estudo de ressonância harmônica. (Continuação)
2013	Larose et al.	Verificaram se o modelo agregado de parque eólico pode ser usado para estudar qualitativamente harmônicos e inter-harmônicos no ponto de acoplamento com o sistema
2014	Arcega e Pardina	Propuseram equações baseadas em fórmulas de Bessel para estudar o efeito térmico em condutores cilíndricos de cobre e alumínio produzidos por correntes harmônicas devido ao efeito pelicular.
2015	Block et al.	Mostraram que as correntes harmônicas geradas nas máquinas do CGE e as distorções harmônicas de tensão no PAC são diretamente dependentes do valor da impedância equivalente do complexo eólico em faixa de frequência específica.
2015	Desai et al	Mostraram que o parque com GIGE apresenta desempenho harmônico melhor do que os com GIDA, mesmo após a correção com filtro.
2016	Schwanz et al.	Determinaram a melhor localização de filtros ativos como método de correção de harmônico em parques eólicos.
2016	Jiang et al.	Propuseram um método para o cálculo com mais precisão da perda harmônica da linha, considerando o efeito pelicular causado por harmônicos.
2016	Chenyng et al.	Consideraram a influência do efeito pelicular e do efeito de proximidade no cálculo das perdas e aumento de temperatura. Os resultados indicaram um

Ano	Pesquisadores	Contribuição
		aumento da temperatura com um aumento da distorção harmônica. Foi obtido acréscimo de até 1,27°C na temperatura do centro do cabo.
2017	Shazly et al.	Avaliaram a variação de temperatura sob efeito de diferentes condições ambientais e de harmônicos. Foi avaliado a disposições e tipos de isolamento dos cabos. Foi constatado um aumento da temperatura com um aumento dos harmônicos de corretes. Quanto à disposição, os cabos dispostos um ao lado do outro apresentaram menor interferência para o aumento da temperatura e o isolamento polietileno reticulado apresentou maior interferência para o aumento da temperatura nos cabos.
2018	Este trabalho.	Analizou o efeito provocado por harmônicos provenientes de turbinas eólicas em condutores de parques eólicos e como os harmônicos contribuem para o aumento do efeito pelicular, avaliando, principalmente, os acréscimos de perdas e diminuição da eficiência do parque eólico. O estudo foi realizado utilizando os softwares HarmZs e Comsol. Foi utilizado para análise um complexo eólico situado no nordeste brasileiro. Com os resultados obtidos, percebeu-se que os harmônicos agravam o efeito pelicular, provocando perdas adicionais que não são agravantes para o aumento de temperatura nos condutores.

Fonte: Próprio autor (2018).

Neste capítulo foi realizado um levantamento bibliográfico de trabalhos com relevância para esta dissertação, de forma a fornecer suporte para a realização da pesquisa.

No próximo capítulo será descrita a metodologia utilizada na pesquisa.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia aplicada para a concretização deste trabalho, enfatizando-se as características do parque eólico simulado e os programas computacionais utilizados para simulação.

4.1 MATERIAL

4.1.1 PARQUE EÓLICO

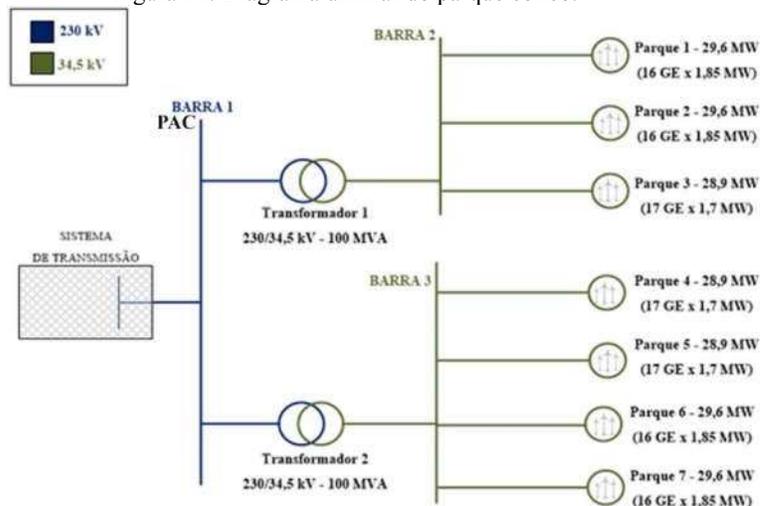
Para a análise do efeito provocado por harmônicos em condutores de parques eólicos, foram utilizados dados de parques eólicos *onshore*, presentes no Nordeste brasileiro, que compõem um complexo eólico conectado ao Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN).

O Ponto de acoplamento comum (PAC) que conecta os parques eólicos ao sistema elétrico foi considerado no barramento de 230 kV do sistema interligado nacional.

Além do barramento do PAC, o sistema interno do complexo eólico é constituído por dois barramentos de 34,5 kV que se conectam ao barramento do PAC por meio de dois transformadores de 34,5/230 kV de 100 MVA com enrolamento Δ -Y, um para cada barramento.

Um dos barramentos de 34,5 kV se conecta a três parques eólicos, enquanto o outro se conecta a quatro parques eólicos. Na Figura 11 é apresentado o diagrama unifilar do complexo eólico e a nomenclatura a ser utilizada nesta dissertação para cada elemento descrito anteriormente.

Figura 11: Diagrama unifilar do parque eólico.



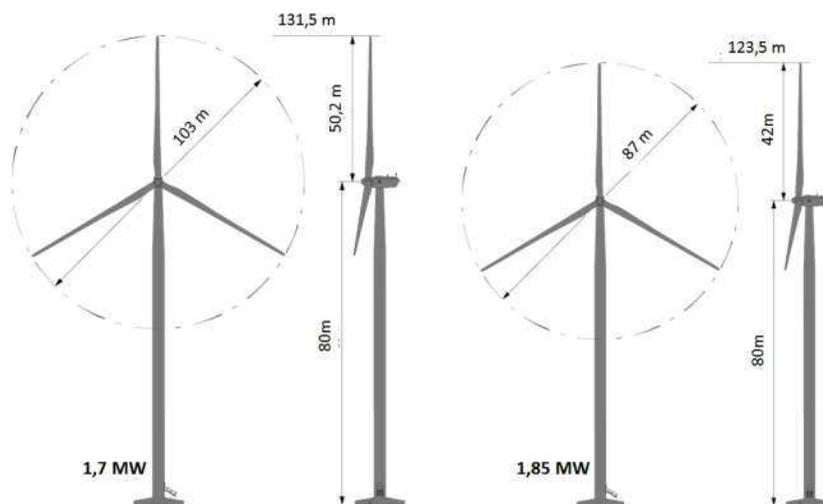
Fonte: O autor.

Os parques são constituídos por turbinas eólicas do tipo DFIG. No complexo eólico são empregados turbinas eólicas de duas potências instaladas. Assim, as características dos parques simulados são:

- Parques 1, 2, 6 e 7: potência instalada de 29,6 MW, 16 turbinas eólicas de 1,85 MW;
- Parques 3, 4 e 5: potência instalada de 28,9 MW, 17 turbinas eólicas de 1,7 MW.

Na Figura 12 são apresentados os desenhos técnicos com as dimensões das duas turbinas empregadas nos parques eólicos estudados.

Figura 12: Desenho técnico dos aerogeradores de 1,7 MW (à esquerda) e 1,85 MW (à direita).

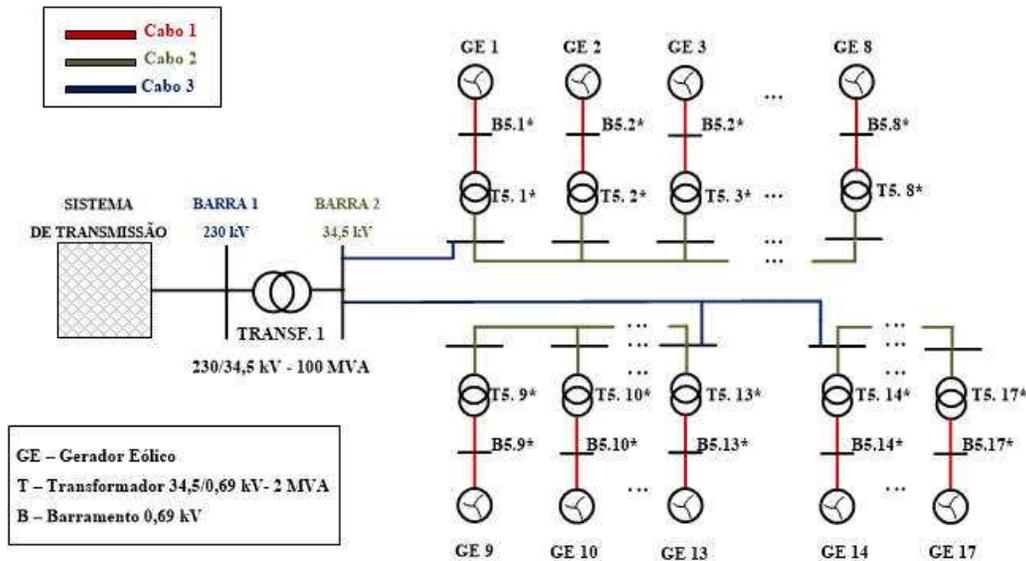


Fonte: GE (2018).

Como mencionado na Seção 2.3, as turbinas eólicas apresentam em sua saída um transformador elevador. Dessa forma, transformadores de 0,69/34,5 kV e 2 MVA com ligação Δ -Y foram utilizadas em todas as turbinas eólicas simuladas.

Na Figura 13 é mostrado o diagrama unifilar representativo dos parques usados na simulação.

Figura 13: Diagrama unifilar representativo dos parques eólicos utilizados.



*Ta.b: a corresponde ao número do parque eólico e b ao número da gerador eólico.

*Ba.b: a corresponde ao número do parque eólico e b ao número da gerador eólico.

Fonte: O autor.

A energia convertida nas turbinas eólicas é conduzida até o PAC por três tipos de cabeaço. A cabeaço dos parques é mostrada na Figura 13 e denomindo de Cabo 1, Cabo 2 e Cabo 3. O Cabo 1 é formado por um conjunto de cabos individuais cujas capacidades de condução de corrente foram calculadas para ambas as potências dos aerogeradores.

No projeto dos cabos 1 para o parque com aerogeradores de 1,7 MW, foi estipulado o uso de 6 cabos/fase. Foram empregados cabos de 400 mm², em alumínio, isolamento borracha de etileno propileno (EPR) e cobertura de cloreto de polivinila (PVC), a máxima corrente por fase é de 361 A conforme NBR 5410.

No projeto dos cabos 1 para o parque com aerogeradores de 1,85 MW, foi estipulado o uso de 7 cabos/fase. Foram empregados cabos de 400 mm², em alumínio, isolamento EPR e cobertura PVC, a corrente/fase é de 361 A conforme NBR 5410.

Segundo o fabricante, os cabos empregados possuem temperatura de operação em regime permanente de até 90°C no condutor, sobrecarga 130°C e curto-circuito 250°C. Na Figura 14 é mostrado o corte do cabo empregado.

Figura 14: Corte do cabo empregado nos aerogeradores.



Fonte: O autor.

O Cabo 1 sai do aerogerador, passa por uma caixa de passagem localizada dentro da torre do aerogerador e segue para o transformador elevador. Na Figura 15 é apresentada a caixa de passagem onde podem ser vistos os cabos das fases A, B e C.

Figura 15: Caixa de passagem localizada dentro da torre do aerogerador.



Fonte: O autor.

O Cabo 2 é formado por cabos CAA 1/0 AMG que possuem 321 mm² por fase e capacidade de 230 A. Já o Cabo 3 é formado por cabos CAA 336,4 MCM por fase que possui uma área transversal igual a 945,7 mm² e capacidade de 500 A. Os Cabos 2 e 3 são responsáveis por transmitir a energia na saída dos transformadores elevadores na saída dos aerogeradores até o PAC.

4.2 MÉTODOS

Com o intuito de alcançar todos os objetivos almejados nessa dissertação, a pesquisa desenvolvida foi dividida em duas partes. A primeira tem por objetivo determinar as perdas causadas pelas correntes harmônicas nos cabos dos parques eólicos e a segunda parte tem por objetivo verificar a influência das correntes harmônicas na distribuição de densidade de corrente nos Cabos 1, cabos estes com maiores distorções de corrente.

4.2.1 AQUISIÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS E CÁLCULO

DAS PERDAS NOS CABOS

Para determinar as distorções harmônicas no PAC e as resistências associadas a cada ordem harmônica, foi utilizado o programa computacional HarmZs.

O HarmZs (Estudos de Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas) é um programa computacional desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). O HarmZs pode efetuar diversos tipos de estudos relacionados à presença de harmônicos nas redes elétricas, como a determinação das distribuições de correntes e tensões harmônicas, a determinação de impedâncias harmônicas próprias de barras do sistema e de transferência entre elas.

Além disso, o HarmZs determina as impedâncias das linhas associadas a cada ordem harmônica, tornando possível, dessa forma, calcular a contribuição dos harmônicos para perdas de potências ativa nos condutores do parques.

Nas simulações, é necessário definir o sistema de transmissão ao qual o complexo eólico se encontra conectado. Também foi considerado o caso base do sistema interligado nacional que se refere às condições do sistema sem contingência. Os dados do sistema são de conhecimento público e são disponíveis no sítio eletrônico do ONS.

O sistema interno do complexo eólico foi descrito por meio dos dados dos equipamentos como transformadores, cabos condutores, banco de capacitores e dos dados de linha e de barra.

Para a simulação de análise harmônica nos programas HarmZs, foram utilizadas as componentes harmônicas da corrente de cada turbina eólica, obtidas por meio de campanha de medição de qualidade da energia elétrica.

A campanha de medição consistiu na instalação de analisadores de qualidade de energia (qualímetro) instalados no painel PDC (Power Distribution Control) das torres dos parques eólicos, a partir do barramento de tensão de 0,69 kV e dos terminais dos transformadores de corrente conectados às turbinas eólicas.

As campanhas de medição tiveram a duração de sete dias, conforme estabelecido pelas normas do ONS. Durante esse período de medição, foram coletadas as distorções harmônicas até a 50ª ordem para porcentagens de geração variando em 10% no intervalo de 10% a 100%. A variação de geração é feita em decorrência das condições de geração. Caso não seja atingida alguma porcentagem de geração, esta deverá ser ignorada.

Geralmente, os estudos prévios de acesso ao sistema antes da campanha de medição consideram as distorções harmônicas fornecidas pelo fabricante do aerogerador. As distorções fornecidas consistem em algumas ordens harmônicas que apresentam maiores valores, obtidas por modelo matemático, e assim são consideradas mais significativas.

Contudo, nem sempre as ordens significativas fornecidas pelo fabricante são compatíveis com as obtidas pela campanha de medição, dessa forma se faz necessário o estudo dos dados obtidos durante a campanha, e assim, caracterizar de forma mais realista os níveis de distorção harmônica levando em consideração as condições de geração encontradas no parque.

A distorção final para cada ordem harmônica, considerada para o estudo, corresponde à maior distorção obtida para cada intervalo de geração durante a campanha de medição. Por fim, considera-se que todas as turbinas do parque poderão contribuir com as distorções harmônicas obtidas.

Com os dados de distorções harmônicas de corrente, é possível realizar simulações no HarmZs e dessa forma obter a distorção do parque no ponto de PAC. Também é possível calcular as perdas por harmônicos nos condutores dos parques a partir dos valores das resistências para cada ordem harmônica obtida no HarmZs e pelas correntes obtidas na campanha de medição.

O EDITCepel é um **software** que auxilia na construção dos arquivos para simulação nos programas desenvolvidos pelo CEPEL como HarmZs, ANAREDE e

Além dos dados dos parques, a simulação leva em consideração os dados do sistema interligado nacional (dados de barra e linhas). Nas simulações foi considerado o caso base do SIN de 2017 com carga média e os dados dos parques eólicos.

Os dados do SIN são introduzidos no HarmZs por meio do arquivo SAVECASE gerado no software ANAREDE, programa responsável pela simulação do fluxo de potência. Também são consideradas as resistências de armadura e das reatâncias sub-transitórias das máquinas do sistema, introduzidos no HarmZs por meio do arquivo .stb gerado no software ANATEM, programa responsável pela análise de transitórios eletromecânicos.

O software HarmZs não possui uma interface amigável, não existe uma interface gráfica para descrever ou representar o sistema simulado, assim é imprescindível o uso do EditeCEPEL para realizar simulações no HarmZs.

Os dados escritos no EDITCepel são carregados no HarmZs juntamente com os dados do sistema conectado. No HarmZs, as linhas de transmissão têm seus parâmetros corrigidos hiperbolicamente, conforme recomendação do CEPEL, e são implementadas no próprio programa HarmZs utilizando a Equação 19.

$$R(f) = R(f_0) \left[A \left(\frac{f}{f_0} \right)^{Alfa} + B \left(\frac{f}{f_0} \right)^{Beta} + C \right]. \quad (19)$$

Em que:

$R(f)$: é a resistência corrigida para frequências superiores à fundamental;

$R(f_0)$: é a resistência para frequência fundamental;

$A, B, C, Alfa$ e $Beta$: São constantes que dependem do elemento modelado.

Os seguintes valores típicos para correção da resistência em cabos são recomendados pelo CEPEL, $A = -1,243$, $B = 1,549$, $C = 0,6$, $Alfa = 0,7316$ e $Beta = 0,7158$.

Nos estudos de qualidade da energia e nos cálculos das perdas foram consideradas as resistências na frequência fundamental fornecidas pelos proprietários dos parques para realização de estudos de acesso.

Além de considerar as resistências associadas a cada frequência, faz-se necessário considerar o tipo de enrolamento nos transformadores utilizados. Os resultados obtidos são discutidos no Capítulo 5.

4.2.2 DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE E TEMPERATURA EM CABOS

A fim de analisar o efeito dos harmônicos sob a perspectiva do efeito pelicular e da elevação de temperatura nos cabos, foi utilizado o **software** COMSOL Multiphysics®. O COMSOL é um ambiente computacional desenvolvido com o objetivo de modelar, projetar e analisar problemas regidos por equações diferenciais, como as equações de Maxwell, por exemplo, no campo da Engenharia Elétrica.

No ambiente do COMSOL, foram simulados os cabos entre o aerogerador e o transformador de 0,69/34,5 kV e 2 MVA, denominados neste trabalho como Cabo 1. A justificativa para a seleção destes cabos se dá diante das altas distorções harmônicas medidas, em relação aos demais cabos do parque, para todas as ordens consideradas no estudo de acesso do parque ao sistema.

Os cabos de um dos parques de 28,9 MW e outro de 29,6 MW dos quais apresentaram maiores perdas por harmônicos foram selecionados, conforme estudo de perdas realizadas nessa dissertação.

Além disso, foram considerados três tipos de arranjos para simulação no COMSOL. São eles:

1. Um único cabo, com o objetivo de analisar a distribuição da densidade de corrente no cabo sem a interferência de cabos adjacentes;
2. Apenas os cabos de uma fase, desse modo, é possível verificar a influência de cabos adjacentes na distribuição de densidade de corrente;
3. Cabos das três fases, assim, pode-se analisar a influência das fases adjacentes na distribuição de densidade de corrente.

A análise do efeito pelicular se baseou na comparação da distribuição de densidade de corrente quando o cabo é percorrido apenas pela corrente fundamental, e quando é percorrido pela corrente fundamental mais as correntes harmônicas.

Utilizando a física de campo magnético disponível no COMSOL, foi possível obter as curvas de densidade de corrente pelo raio do condutor. No COMSOL, a física de campo magnético é utilizada para calcular o campo magnético e as distribuições de corrente induzidas em e ao redor de bobinas, **drivers** e ímãs (COMSOL, 2015).

Os mesmos parâmetros de simulação serão utilizados para analisar o efeito térmico nos cabos. Para a análise térmica, foi considerado apenas o arranjo das três

fases juntas, uma vez que, no processo de transferência de calor, uma fase irá influenciar no aquecimento da outra.

As correntes utilizadas na simulação correspondem à máxima corrente para as quais os cabos foram dimensionados no projeto, 335 A para parques de 1,7 MW e 365 A para parques de 1,85 MW. Dessa forma, procurou-se simular os casos mais críticos.

Para obter o perfil da distribuição de corrente nos condutores, os parâmetros de entrada para a simulação do cabo foram as constantes relacionadas aos materiais dos cabos, como permeabilidade relativa, a condutividade elétrica e condutividade térmica. O COMSOL apresenta uma biblioteca com materiais e algumas de suas constantes, assim, valores das constantes dos materiais utilizados na simulação podem ser visto na Tabela 6.

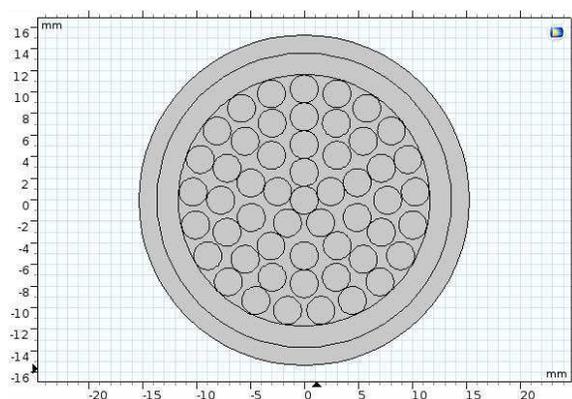
Tabela 6 - Constantes dos materiais utilizados [COMSOL, 2018].

Material	Alumínio	PVC	EPR
Permeabilidade Magnética Relativa	1,00021	2.9	1
Condutividade Elétrica [S/m]	$3,774 \cdot 10^7$	$10 \cdot 10^{-16}$	$10 \cdot 10^{-14}$
Condutividade Térmica [W/(m*K)]	238	0,1	0,05

A geometria do cabo e as correntes percorridas nos cabos também são parâmetros de entrada para a simulação. A seção transversal do cabo condutor foi desenhada no próprio COMSOL, respeitando suas dimensões, e a análise da densidade de corrente no condutor foi feita para os 3 arranjos.

Na Figura 17 é mostrada a seção transversal do cabo empregado na simulação do arranjo com um único cabo.

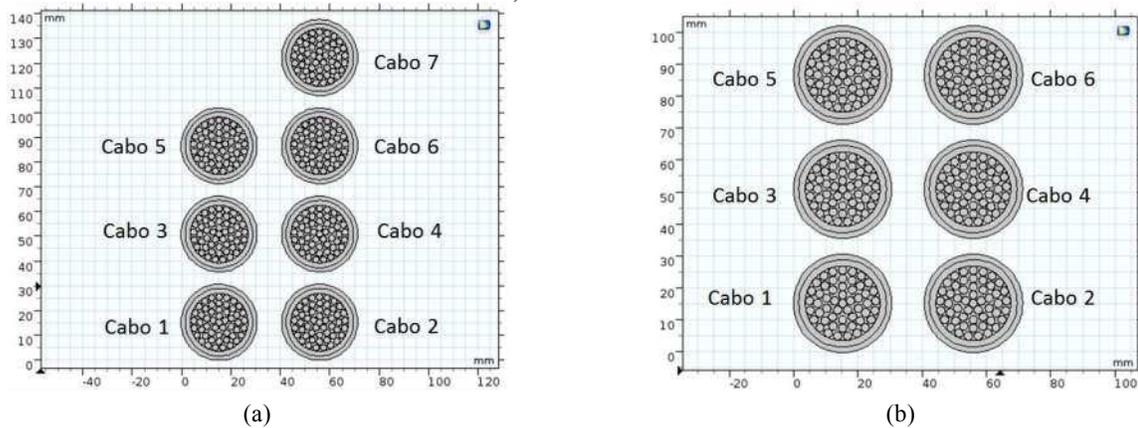
Figura 17: Seção transversal do cabo empregado nos parques eólicos.



Fonte: O autor.

Na Figura 18 é mostrada as seções transversais do arranjo com os cabos de uma única fase empregados no parque eólico. A disposição dos cabos difere entre os parques de 28,9 MW e 29,6 MW. Tal diferença se deve ao fato de que nos parques de maior potência são usados 7 condutores por fase, enquanto que, nos de menor potência, 6 condutores são empregados. Na Figura 18 também se encontra a numeração dos cabos que foram utilizados durante as análises dos resultados.

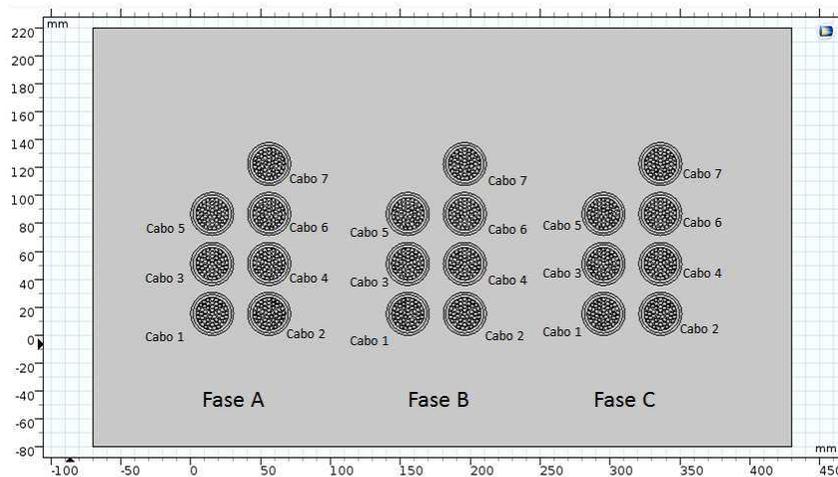
Figura 18: Seções transversais dos cabos de uma fase: (a) aerogerador de 1,85 MW, (b) aerogerador de 1,70 MW.



Fonte: O autor.

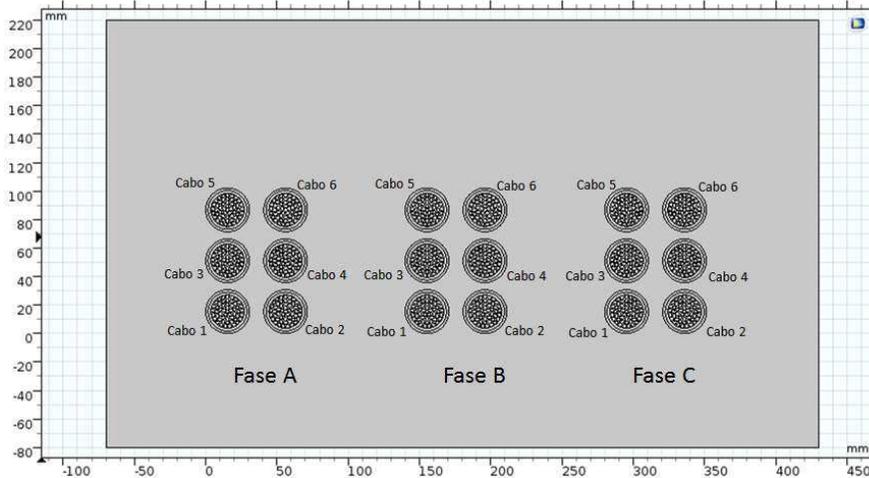
Nas Figuras 19 e 20 são mostradas as seções transversais dos cabos das 3 fases empregados no parque eólico aerogerador de 1,85 MW e 1,70 MW, respectivamente, e que foram simulados no COMSOL. Também se encontram nas Figuras 19 e 20 a numeração dos cabos e a indicação das fases que serão utilizados durante as análises dos resultados.

Figura 19: Seções transversais dos cabos das 3 fases do parque com aerogerador de 1,85 MW.



Fonte: O autor.

Figura 20: Seções transversais dos cabos das 3 fases do parque 5.



Fonte: O autor.

Com o objetivo de verificar o efeito pelicular no caso real, foi simulada no COMSOL a caixa de passagem que se encontra dentro da torre do aerogerador de forma a analisar a interação entre as fases A, B e C. Para a análise, foi considerada a corrente fundamental e os harmônicos defasados em 120° entre as fases.

A caixa de passagem está representada pelo retângulo que limita as fases nas Figuras 19 e 20. A caixa de passagem, por estar dentro da torre do aerogerador, não possui sistema de ventilação e, dessa forma, sua representação se resumiu a uma caixa metálica fechada.

Neste capítulo foram relatadas as metodologias utilizadas na pesquisa. No próximo capítulo serão discutidos os resultados obtidos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações usando o HarmZs que consistiram na análise da eficiência energética e das perdas nos cabos condutores e nas aquisições de distorções harmônicas nos cabos dos parques eólicos, e usando o COMSOL, para análise do efeito pelicular e térmico nos cabos dos aerogeradores.

5.1 DISTORÇÕES HARMÔNICAS E PERDAS POR HARMÔNICOS NOS PARQUES EÓLICOS

Com o intuito de verificar as perdas causada pelas correntes harmônicas nos parques, foram realizados simulação no HarmZs. O resultado obtido na simulação é discutido a seguir.

Na Tabela 7 e Tabela 8 são mostrados os valores das correntes harmônicas fornecidas pelo fabricante e as correntes de mesmas ordens obtidas em campo para os aerogeradores de 1,7 MW e 1,85 MW. Constatou-se que as correntes para ordens iguais e superiores à 30ª ordem, obtidas em campo, são menores do que as fornecidas pelo fabricante, sendo a maior diferença percentual verificada para a corrente harmônica de 50ª ordem no aerogerador de 1,7 MW e no aerogerador de 1,85 MW, atingindo valores de 99,29%.

Além das correntes fornecidas pelo fabricante, verificaram-se outras correntes harmônicas com valores de amplitude semelhantes aos fornecidos pelo fabricante, mas com ordens diferentes. Destacam-se, para os aerogeradores de 1,7 MW, as correntes de 3ª e 20ª ordem com valores máximos obtidos de 8,11 A e 7,03 A respectivamente e, para os aerogeradores de 1,85 MW, as correntes de 3ª e 20ª ordem com valores máximos obtidos de 9,26 A e 6,38 A respectivamente.

Tabela 7 - Distorções harmônicas fornecidas pelo fabricante e medida em campo.

Correntes para aerogerador 1,7 MW (A)				
Ordem	Fabricante	Parque 3	Parque 4	Parque 5
3 ^a	Não Significante	4,97	3,73	8,11
5 ^a	9,39	9,8	10,85	12,72
7 ^a	6,69	8,81	8,83	10,62
20 ^a	Não Significante	6,46	5,62	7,03
30 ^a	12,52	1,73	1,12	1,85
31 ^a	16,5	0,36	0,36	0,93
32 ^a	13,94	0,23	0,23	0,95
33 ^a	5,83	0,42	0,67	1,07
34 ^a	8,96	0,16	0,18	0,95
44 ^a	7,25	0,24	0,25	1,2
46 ^a	9,96	0,26	0,25	1,85
50 ^a	8,53	0,06	0,07	0,71

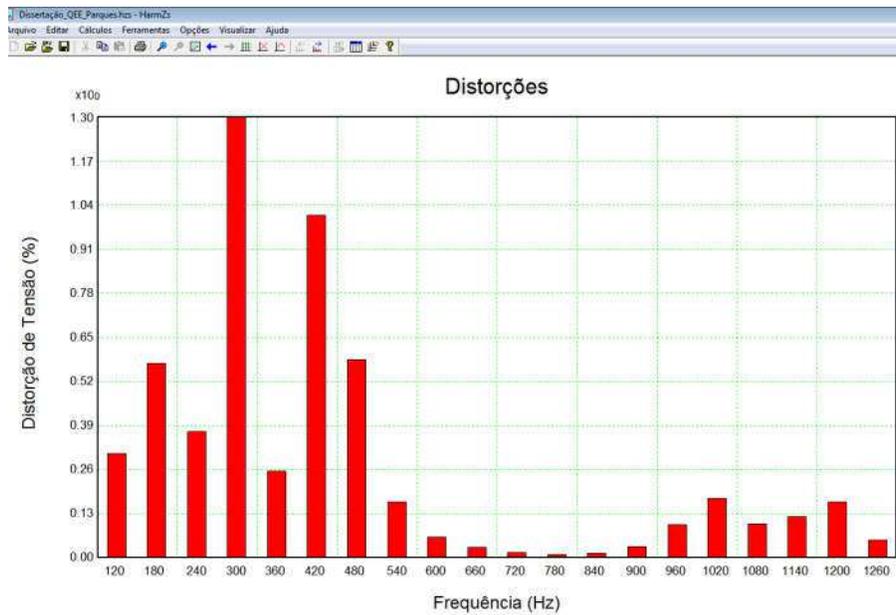
Tabela 8 - Distorções harmônicas fornecidas pelo fabricante e medida em campo.

Correntes para aerogerador 1,85 MW (A)					
Ordem	Fabricante	Parque 1	Parque 2	Parque 6	Parque 7
3 ^a	Não Significante	9,26	7,18	4,48	4,58
5 ^a	9,44	12,87	12,67	14,95	12,3
7 ^a	6,66	8,13	7,75	10,55	8,25
20 ^a	Não Significante	3,6	3,56	3,55	6,38
30 ^a	12,54	1,25	1,57	1,12	1,76
31 ^a	16,41	0,37	1,95	0,38	0,4
32 ^a	13,93	0,31	1,76	0,35	0,36
33 ^a	5,88	0,41	1,87	0,49	0,76
34 ^a	8,98	0,25	1,35	0,27	0,36
44 ^a	7,28	0,24	0,61	0,26	0,25
46 ^a	9,91	0,24	0,9	0,23	0,25
50 ^a	8,51	0,08	0,31	0,06	0,06

Quantificar distorções harmônicas de correntes elevadas é relevante, pois estas correntes, associadas à resistência equivalente na mesma frequência, contribuem com perdas adicionais nos cabos condutores, o que diminui a eficiência energética.

A partir da simulação realizada no HarmZs, foi possível identificar a distorção harmônica de tensão no PAC causado pela conexão dos parques ao sistema. O gráfico indicativo do nível de distorção no PAC é apresentado na Figura 21.

Figura 21: Gráfico do nível de distorção harmônica mostrado no HarmZs.



Fonte: O autor.

Na Tabela 9 são mostrados os valores das distorções de tensão obtidas na simulação do HarmZs e os valores limites estipulados pelo ONS. Foi obtido um DTHT% no PAC de 1,968%. O valor excede o limite de 1,5% estipulado pelo ONS. Além disso, é possível identificar, na Tabela 9, que os limites são excedidos para valores individuais nas frequências de 120 Hz, 240 Hz, 300 Hz, 420 Hz e 480 Hz.

A violação dos limites estipulados pelo operador nacional do sistema elétrico mostrou que os parques em estudo apresentaram problemas de QEE. Com isso, espera-se que os cabos desses parques também estejam submetidos a nível de distorção harmônica elevada.

Tabela 9 - Distorções harmônicas obtidas no HarmZs.

Ordem	Frequência (Hz)	Distorção Harmônica (%)	Limite ONS (%)	Ordem	Frequência (Hz)	Distorção Harmônica (%)	Limite ONS (%)
2	120	0,3112	0,3	27	1620	0,003	0,4
3	180	0,5763	0,6	28	1680	0,003	0,3
4	240	0,376	0,3	29	1740	0,0075	0,4
5	300	1,3035	0,6	30	1800	0,0045	0,3
6	360	0,2584	0,3	31	1860	0,0025	0,4
7	420	1,0149	0,6	32	1920	0,0053	0,3
8	480	0,5879	0,3	33	1980	0,0016	0,4
9	540	0,1687	0,6	34	2040	0,001	0,3
10	600	0,0635	0,3	35	2100	0,0065	0,4
11	660	0,0343	0,6	36	2160	0,0049	0,3
12	720	0,019	0,3	37	2220	0,0025	0,4
13	780	0,0127	0,6	38	2280	0,0018	0,3
14	840	0,0163	0,3	39	2340	0,0052	0,4
15	900	0,0353	0,6	40	2400	0,001	0,3
16	960	0,1017	0,3	41	2460	0,002	0,4
17	1020	0,1778	0,6	42	2520	0,0037	0,3
18	1080	0,103	0,3	43	2580	0,0173	0,4
19	1140	0,1252	0,6	44	2640	0,0039	0,3
20	1200	0,1669	0,3	45	2700	0,0122	0,4
21	1260	0,0543	0,6	46	2760	0,0043	0,3
22	1320	0,0595	0,3	47	2820	0,0139	0,4
23	1380	0,0667	0,6	48	2880	0,0011	0,3
24	1440	0,143	0,3	49	2940	0,0018	0,4
25	1500	0,0169	0,6	50	3000	0,0025	0,3
26	1560	0,0034	0,3				

Ainda foi possível obter com a simulação os valores das resistências de todas as linhas do parque, a partir da resistência de frequência fundamental, considerando o comprimento e a frequência dados. Associando tais resistências às correntes harmônicas (Equação 15 do Tópico 2.2.2) e considerando o enrolamento delta-estrela aterrado empregado nos transformadores na saída dos aerogeradores, foi possível calcular as perdas adicionais por harmônicos nos parques eólicos. Na Tabela 10 são mostradas as perdas causadas por harmônicos nas linhas dos parques eólicos, as perdas associadas à corrente fundamental e o comprimento total dos cabos nos parques eólicos.

Tabela 10 - Perdas nos cabos dos parques eólicos.

Parque	Potência instalada (MW)	Perda pela fundamental (MW)	Perdas por harmônicos (MW)	Perdas por harmônicos na perda total (%)	DTHI na saída dos aerogeradores (%)	Comprimento total dos cabos dos parques (km)
1	29,600	0,796	0,165	17,17	1,518	109,260
2	29,600	0,734	0,017	2,09	1,543	31,875
3	28,900	0,704	0,011	1,54	1,659	53,340
4	28,900	0,745	0,005	0,67	1,540	20,985
5	28,900	0,769	0,020	2,53	1,485	30,255
6	29,600	0,740	0,049	6,21	1,465	31,620
7	29,600	0,927	0,271	22,62	1,915	69,720

Com o resultado na Tabela 10, foi constatado que a parcela das perdas provocadas por correntes harmônicas é pequena quando comparada a perda causada pela corrente fundamental. A máxima contribuição das perdas harmônicas na perda total (perdas pelas correntes harmônicas mais a perda pela corrente fundamental) foi obtida no parque 7 que, embora não tenha apresentado maior comprimento, apresentou maior DTHI, equivalente à 1,915%.

O comprimento dos cabos também tem influência direta nas perdas obtidas. Quanto maior for o comprimento, maior será a resistência do cabo e, dessa forma, maiores as perdas. Tal influência pode ser verificada quando comparada as perdas pelas correntes nos parques 1 e 2, que possui aerogeradores de mesma potência, DTHI parecidas, mas comprimento de cabos empregados diferentes. Para esse caso o parque 1 apresentou maiores perdas total de 0,961 MW e maior comprimento do cabo com 109,26 km.

A disposição dos aerogeradores é feita de acordo com as condições ambientais que propiciam a maior conversão de energia eólica. Dessa forma, os cabos empregados em um empreendimento eólico possuem o comprimento necessário para conectar os aerogeradores até o PAC, resultando em um parâmetro fixo de projeto.

No âmbito das perdas, o uso de transformadores com enrolamento delta-estrela aterrado, empregados nos parques em estudo, implicou em uma significativa redução das perdas nos cabos.

Na Tabela 11, pode-se comparar a perda causada por correntes harmônicas, apresentada anteriormente, sem as correntes harmônicas triplas, e com as perdas levando em consideração todas as correntes harmônicas. A partir dos valores obtidos, tem-se que o uso de transformadores com enrolamento do tipo delta-estrela aterrado implicou em uma redução de até 0,076 MW nas perdas causadas por harmônicos.

Tabela 11 - Perdas considerando os harmônicos triplos.

Parque	Perdas por harmônicos (MW)	Perdas por harmônicos de todas as ordens (MW)	Redução nas perdas totais (MW)
1	0,165	0,241	0,076
2	0,017	0,025	0,008
3	0,011	0,014	0,003
4	0,005	0,006	0,001
5	0,020	0,029	0,009
6	0,049	0,062	0,013
7	0,027	0,038	0,011

Com as simulações utilizando o HarmZs foi possível analisar as condições de distorções harmônicas causado pelo complexo eólico ao sistema interligado. Foi identificado que o complexo contribui com harmônicos superiores aos limites estipulados. Foi possível também verificar a contribuição das correntes harmônicas nas perdas dos parques eólicos.

Nos tópicos seguintes serão abordados as análises do efeito pelicular e da interferências dos condutores adjacentes na distribuição da densidade de corrente nos cabos dos aerogeradores.

5.2 ANÁLISE DO EFEITO PELICULAR NOS CABOS DOS AEROGERADORES

A análise do efeito pelicular foi realizada a partir dos valores e do comportamento da densidade de corrente (A/mm^2) verificados na direção do raio da área transversal dos cabos entre o aerogerador e o transformador de 0,69/34,5 kV e 2 MVA. A densidade nos cabos foi obtida utilizando o **software** COMSOL, conforme descrito na metodologia.

Como dito na metodologia, optou-se por simular os cabos dos parques eólicos com maiores perdas harmônicas que representam os casos mais graves. Dessa forma, foi escolhido o parque 7 de 29,6 MW que possui um conjunto de 7 cabos por fase entre o aerogerador e o transformador, e o parque 5 de 28,9 MW que possui um conjunto de 6 cabos por fase entre o aerogerador e o transformador.

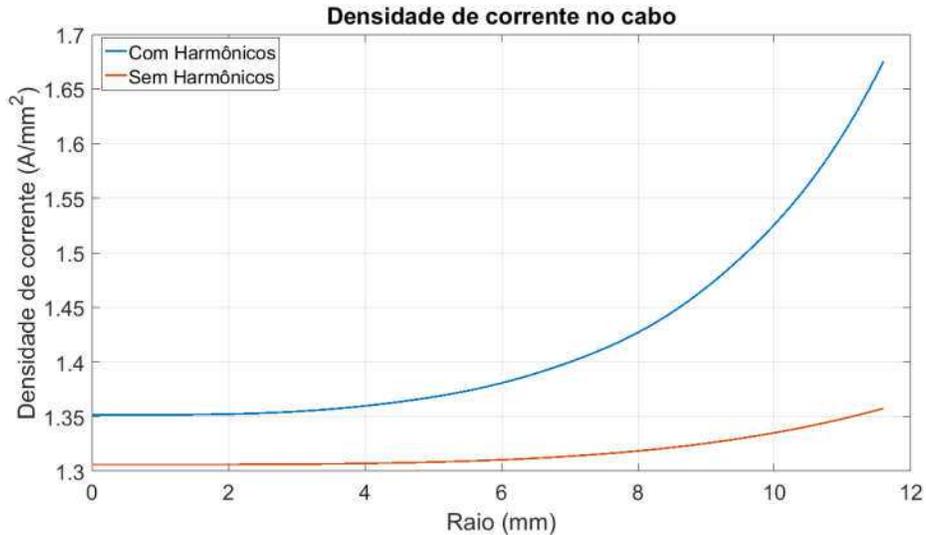
5.2.1 ANÁLISE DO EFEITO PELICULAR PARA ÚNICO CONDUTOR

Para realizar a análise do efeito pelicular em um único cabo, foi realizado simulação no Comsol de forma a obter a densidade de corrente na área transversal do condutor.

Após a simulação, obteve-se o resultado apresentado no gráfico da Figura 22, no qual é mostrada a variação da densidade de corrente ao longo do raio do cabo, a partir do centro até a superfície, para uma corrente sem harmônicos (corrente fundamental) e

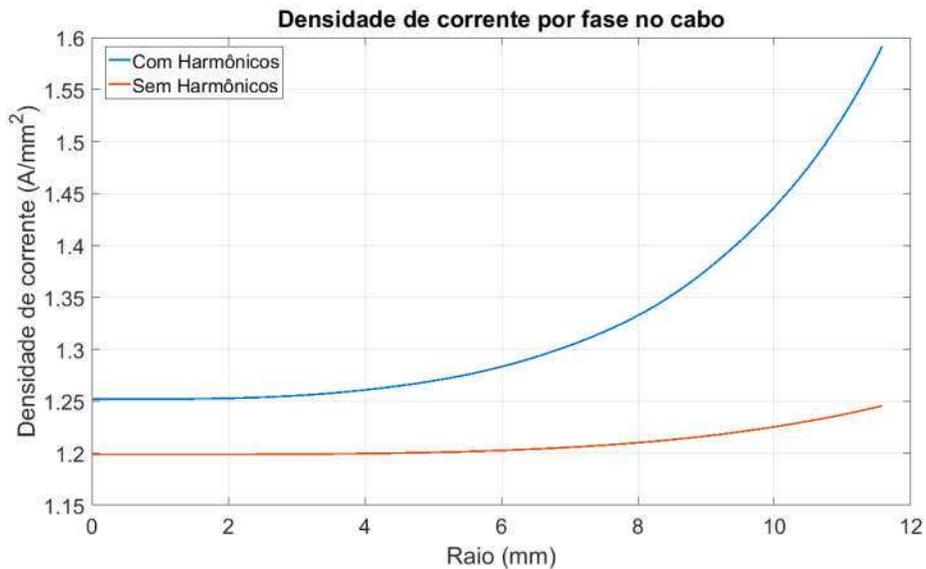
com os harmônicos obtidos na campanha de medição do parque 7. Gráfico análogo é apresentado para as correntes do parque 5 na Figura 23.

Figura 22: Gráfico da densidade de corrente ao longo do raio do cabo para o parque 7.



Fonte: O autor.

Figura 23: Gráfico da densidade de corrente ao longo do raio do cabo para o parque 5.



Fonte: O autor.

Para ambos os casos foi observado o crescimento da densidade de corrente do centro à superfície devido ao efeito pelicular. Como resultado da interação entre os campos elétricos criados, a densidade de corrente do condutor central é reduzida, o que caracteriza a ocorrência do efeito pelicular.

Para o parque 7, a diferença da densidade de corrente do centro à superfície, quando o condutor é percorrido apenas pela corrente fundamental, foi de $0,051 \text{ A/mm}^2$. Considerando as correntes harmônicas, tal diferença é de $0,322 \text{ A/mm}^2$. As correntes harmônicas contribuem com um aumento de $0,316 \text{ A/mm}^2$ na densidade de corrente na superfície do condutor.

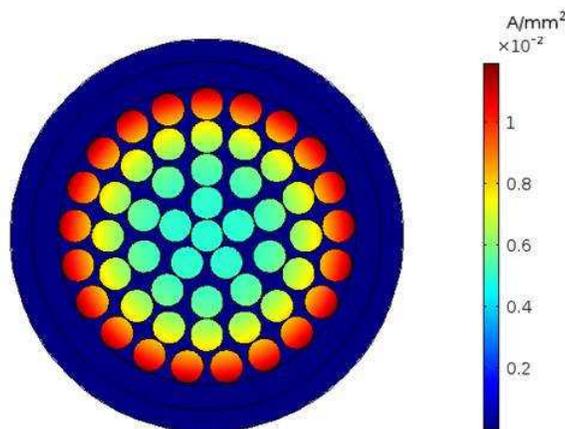
Quando se analisa o parque 5, observa-se que a diferença da densidade de corrente, do centro à superfície, para o condutor percorrido apenas pela corrente fundamental foi de $0,047 \text{ A/mm}^2$. Considerando as correntes harmônicas, a diferença passa a ser de $0,339 \text{ A/mm}^2$. Para o parque 5, as correntes harmônicas contribuem com um aumento de $0,346 \text{ A/mm}^2$ na densidade de corrente na superfície do condutor.

Com a presença de harmônicos, o efeito pelicular se torna mais intenso e a densidade de corrente tende a aumentar nas extremidades e diminuir no centro do cabo. O aumento da densidade de corrente na extremidade do cabo pode elevar as perdas do cabo e aumentar a temperatura na extremidade dos cabos.

A simulação de um único cabo resultou em uma distribuição de densidade de corrente uniforme, ao longo da secção transversal do cabo, para todas as correntes simuladas. Este resultado era esperado, visto que, a simulação de um único cabo não considera a interação de campos elétricos provenientes de outros condutores.

Com o intuito de demonstrar a distribuição da densidade de corrente na área transversal do condutor, foi escolhida uma corrente de 420 Hz do parque 5. Para uma melhor visualização e análise da variação da densidade de corrente, foi escolhida apenas uma corrente de frequência elevada. A distribuição pode ser vista na Figura 24.

Figura 24: Densidade de corrente para o cabo percorrido pela corrente de sétima ordem do parque 5.



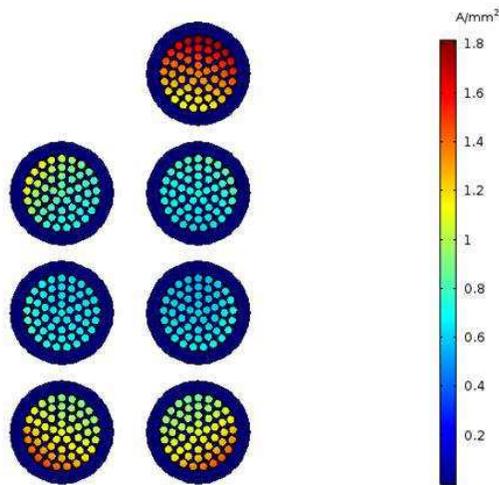
Fonte: O autor.

5.2.2 ANÁLISE DO ACOPLAMENTO MAGNÉTICO NO EFEITO

PELICULAR PARA OS CABOS DE UMA FASE

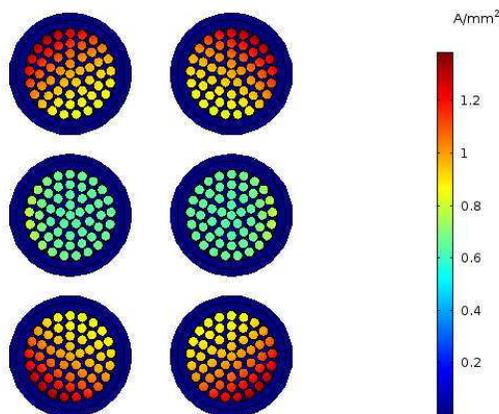
O resultado da distribuição de densidade de corrente pode ser visto na Figura 25 para o parque 7 e na Figura 26 para o parque 5. Diferente da simulação para um único condutor que não considera a influência dos cabos adjacentes, no resultado da simulação para os cabos da fase, foi possível observar que a distribuição de densidade de corrente não possui comportamento uniforme. Dessa forma, para uma fase, alguns condutores apresentam maiores densidades de correntes que outros.

Figura 25: Densidade de corrente para uma fase percorrido pela corrente do parque 7.



Fonte: O autor.

Figura 26: Gráfico da densidade para uma fase percorrido pela corrente do parque 5.



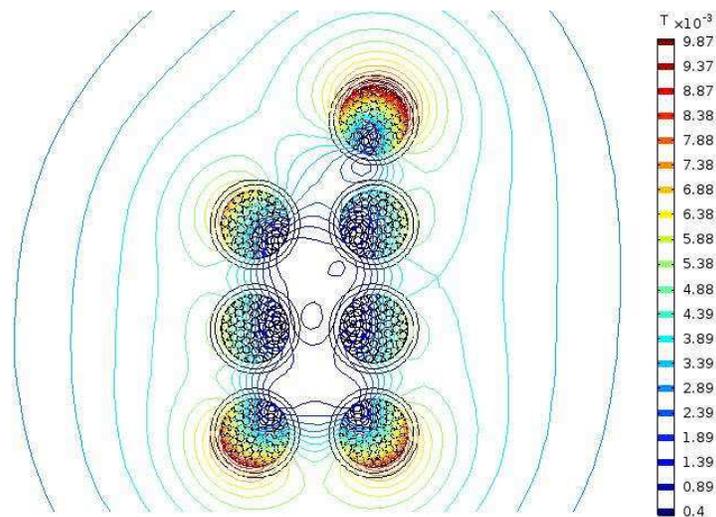
Fonte: O autor.

A distribuição não uniforme nos cabos da fase se deve à interação entre os campos magnéticos produzidos por cada cabo e os cabos adjacentes.

As interações de um condutor nos condutores adjacentes podem ser visualizadas de modo mais detalhado quando se analisa as linhas de campo magnético que surgem pela passagem de corrente na fase. Na Figura 27 e na Figura 28 é possível observar a interação das linhas de intensidade de fluxo magnético em uma fase para o parque 7 e para o parque 2, respectivamente.

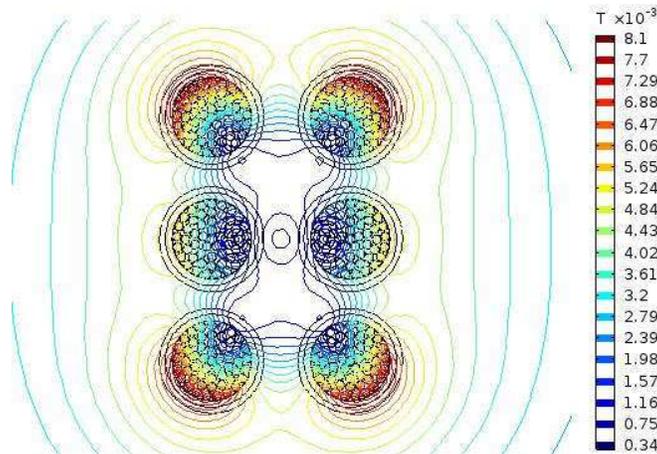
A variação desses campos induz campos elétricos que se opõem à mudança da intensidade de corrente nos cabos vizinhos e, dessa forma, alteram a distribuição da densidade de corrente.

Figura 27: Densidade de fluxo magnético para uma fase percorrido pela corrente do parque 7.



Fonte: O autor.

Figura 28: Densidade de fluxo magnético para uma fase percorrido pela corrente do parque 5.



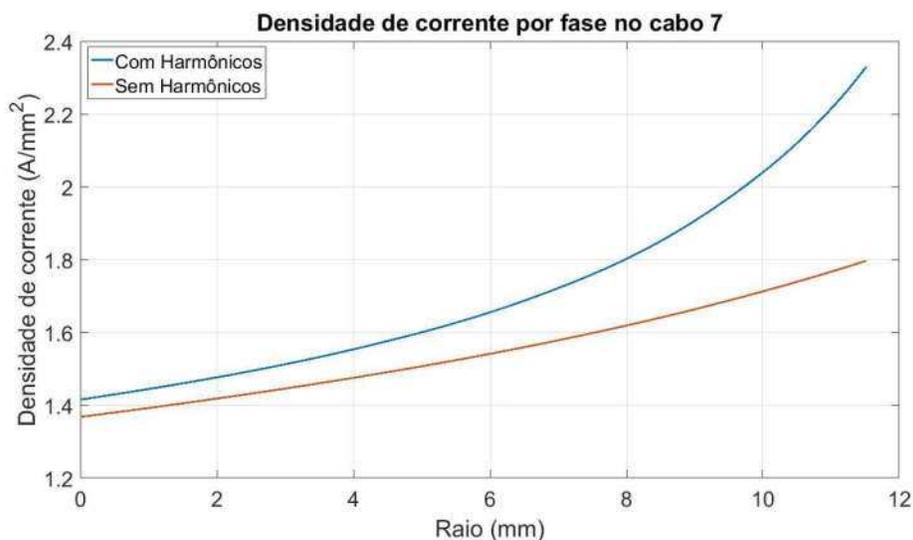
Fonte: O autor.

As linhas de contorno entre os cabos adjacentes indicam o acoplamento magnético entre os cabos. Na Figura 27 e Figura 28 é possível verificar que a densidade de fluxo magnético é maior nos condutores das extremidades, a saber, cabos 1, 2 e 7. Para o parque 7, a máxima densidade de fluxo magnético calculada foi 10,1 mT. Para o parque 5, a densidade de fluxo foi maior nos cabos 1, 2, 5 e 6, com máximo de 8,31 mT.

Devido ao efeito causado pela disposição dos cabos, foi verificada uma densidade de corrente diferente para os condutores da fase. Nos cabos do parque 7, o maior valor de 2,330 A/mm² é encontrado no cabo 7, posicionado na extremidade dos cabos da fase.

Na Figura 29 é mostrada a variação da densidade de corrente ao longo do raio do cabo 7, a partir do centro até a superfície, para uma corrente sem e com os harmônicos do parque 7.

Figura 29: Gráfico da densidade de corrente do cabo 7 de uma fase do parque 7.

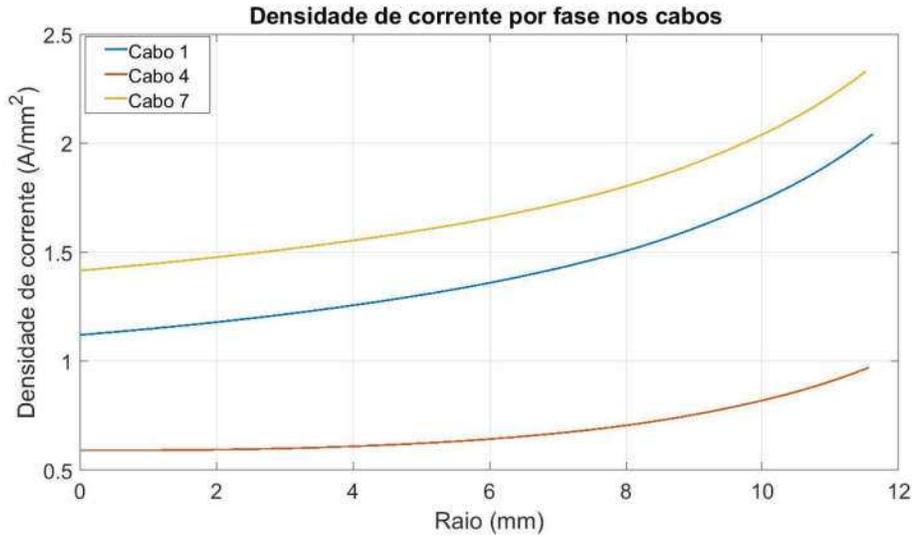


Fonte: O autor.

Para o cabo 7 de uma fase do parque 7, as correntes harmônicas contribuem com um aumento de 0,531 A/mm² na densidade de corrente na superfície do condutor. A menor contribuição das correntes harmônicas para a densidade de corrente ocorreu no cabo 4, com uma contribuição de 0,255 A/mm². No cabo 1, posicionado na extremidade oposta ao cabo 7, também houve uma elevação significativa de 0,510 A/mm².

Na Figura 30 é mostrada a variação da densidade de corrente nos cabos 1, 4 e 7 para uma fase do parque 7 para a corrente com distorções harmônicas.

Figura 30: Gráfico da densidade de corrente para os cabos 1, 4 e 7 do parque 7.

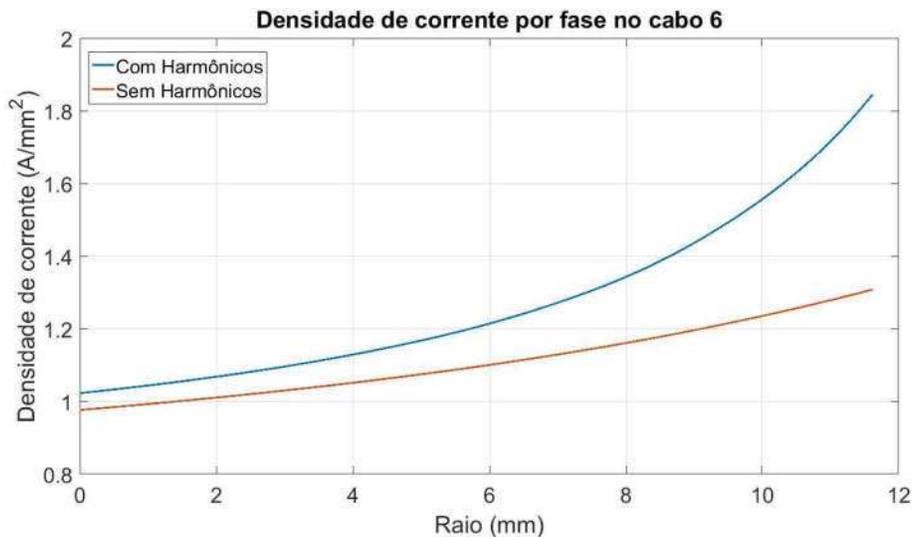


Fonte: O autor.

Para os cabos do parque 5, a distribuição da densidade de corrente teve o maior valor de $1,845 \text{ A/mm}^2$ nos cabos das extremidades (cabos 1,2,5 e 6). Devido à disposição simétrica dos cabos do parque 5, as densidades de corrente para os cabos da extremidade são semelhantes.

Na Figura 31 é mostrada a variação da densidade de corrente ao longo do raio do cabo 6, a partir do centro até a superfície, para uma corrente sem os harmônicos (corrente fundamental) e com os harmônicos do parque 5.

Figura 31: Gráfico da densidade de corrente do cabo 6 de uma fase do parque 5.

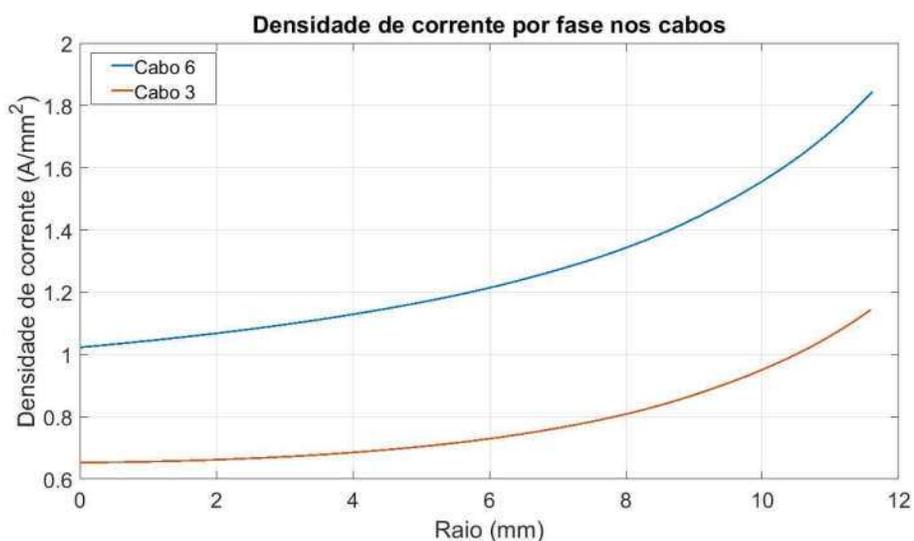


Fonte: O autor.

Para o cabo 6 de uma fase do parque 5, as correntes harmônicas contribuem com um aumento de $0,537 \text{ A/mm}^2$ na densidade de corrente na superfície do condutor. A menor contribuição das correntes harmônicas para a densidade de corrente ocorreu nos cabos 3 e 4, com uma contribuição de $0,348 \text{ A/mm}^2$.

Na Figura 32 é mostrado a variação da densidade de corrente nos cabos 1, 4 e 7 para uma fase do parque 7 para a corrente com distorções harmônicas.

Figura 32: Gráfico da densidade de corrente para os cabos 3 e 6 do parque 7.



Fonte: O autor.

Com as análises anteriores se percebe que a contribuição das correntes harmônicas na densidade de corrente da superfície dos cabos observada tem comportamento não uniforme em cada cabo, pois os campos magnéticos gerados pela corrente que passa no cabo influenciam a distribuição da densidade de corrente dos cabos nas proximidades.

A disposição dos cabos influencia na distribuição de densidade de corrente. Os cabos da fase do parque 5, por apresentarem uma simetria, possuem uma distribuição mais uniforme que os cabos do parque 7.

Quando comparados os resultados expostos para um único cabo e para o cabo da fase com maior densidade de corrente, pode-se verificar que a disposição e o número de condutores na fase agravam o efeito pelicular. Para o parque 7, a diferença entre a máxima densidade de corrente obtida na simulação para um único cabo e para os cabos da fase foi de $0,215 \text{ A/mm}^2$. Já para o Parque 5, obteve-se uma diferença de $0,476 \text{ A/mm}^2$.

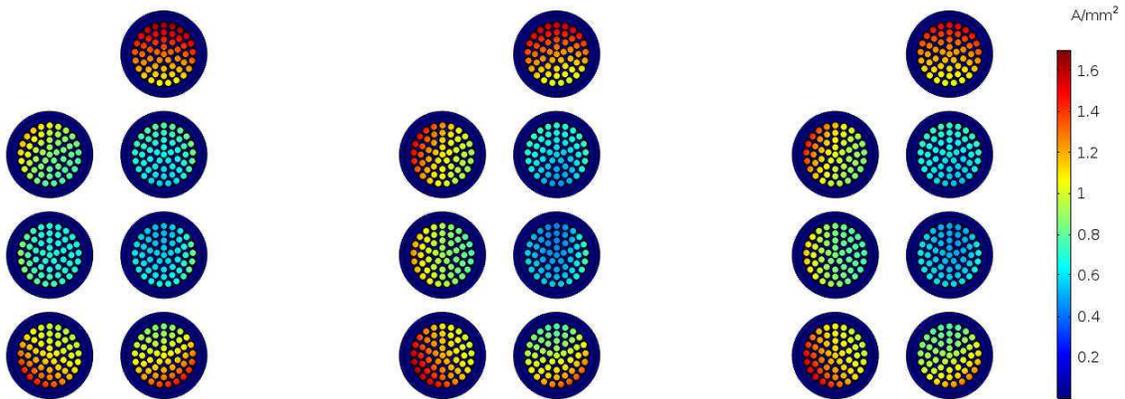
5.2.3 ANÁLISE DO ACOPLAMENTO MAGNÉTICO NO EFEITO

PELICULAR PARA OS CABOS DAS TRÊS FASES

Com o intuito de analisar o efeito das fases adjacentes na distribuição de densidade de corrente nos cabos, foi simulado todas as fases utilizando o Comsol.

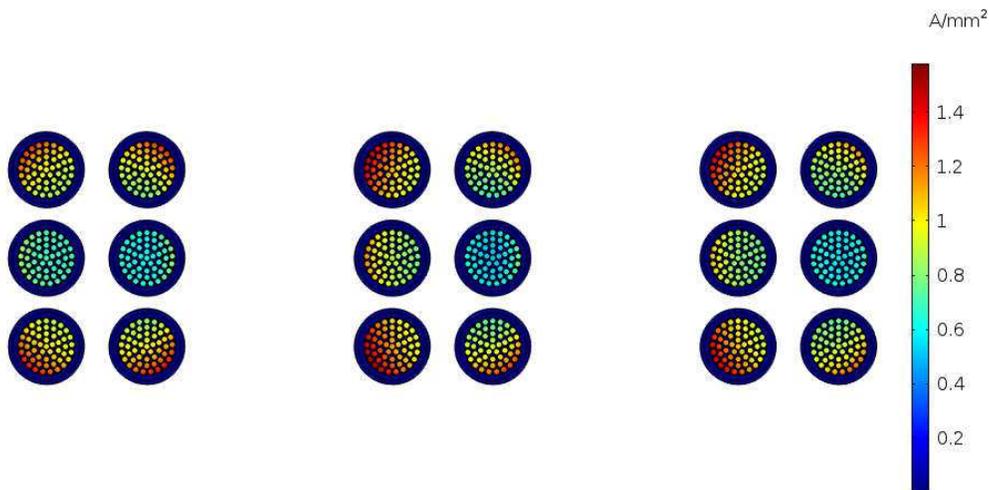
Assim como a simulação dos cabos de uma única fase, a distribuição de corrente obtida na simulação com os cabos das 3 fases não foi uniforme para todos os cabos. Nas Figura 33 e Figura 34 são mostradas as distribuições de densidade de corrente para os cabos das 3 fases dos parques 1 e 5, respectivamente.

Figura 33: Gráfico da densidade para uma fase percorrida pela corrente do parque 7.



Fonte: O autor.

Figura 34: Gráfico da densidade para uma fase percorrida pela corrente do parque 5.

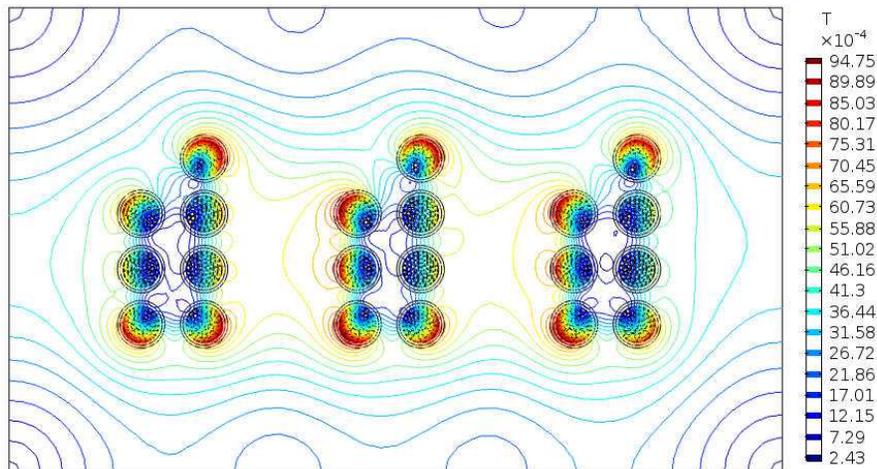


Fonte: O autor.

Para o caso das 3 fases, novamente foi verificada uma distribuição não uniforme na densidade de corrente. A interação entre os campos magnéticos gerados pela passagem de corrente em cada cabo e os cabos adjacentes justifica a distribuição obtida.

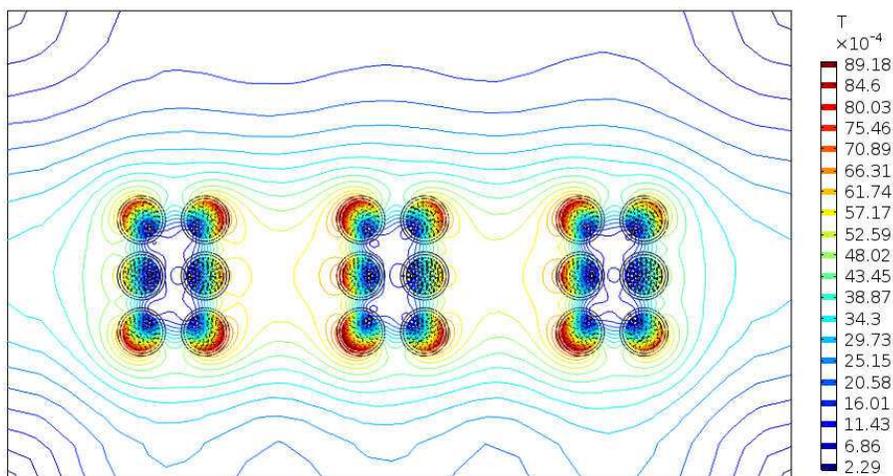
Na Figura 35 e na Figura 36 é possível identificar a interação entre as linhas de fluxo magnético para os condutores do parque 7 e parque 5, respectivamente.

Figura 35: Densidade de fluxo magnético para as fases do parque 7.



Fonte: O autor.

Figura 36: Densidade de fluxo magnético para as fases do parque 5.

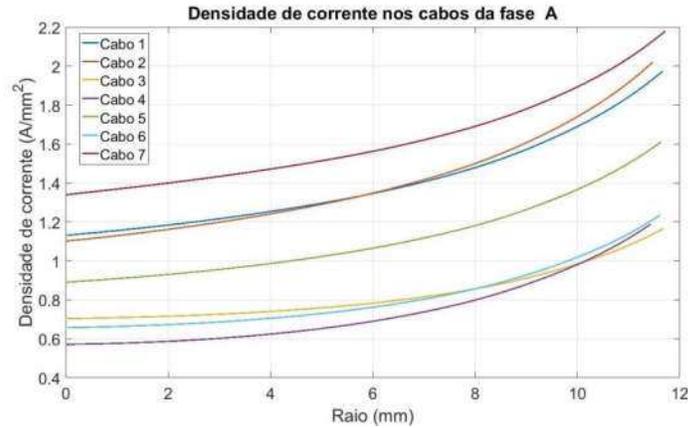


Fonte: O autor.

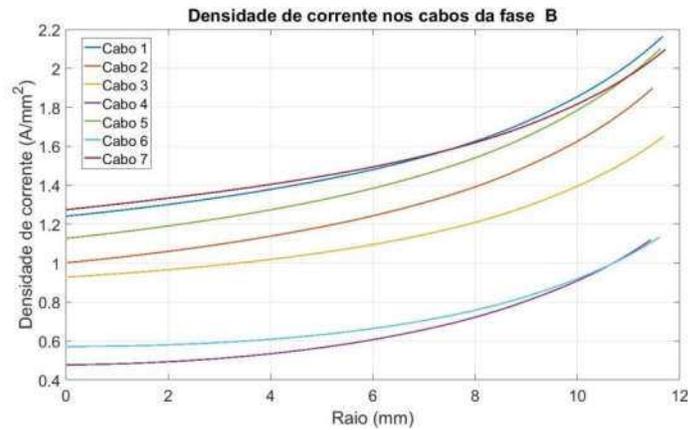
As linhas de contorno entre os cabos adjacentes indicam o acoplamento magnético entre os condutores e entre as fases. Na Figura 35 e Figura 36 é possível verificar que a densidade de fluxo magnético é maior nos condutores das extremidades (cabos 1, 2 e 7) para o parque 7, com valor máximo de 9,47 mT, e cabos 1, 2, 5 e 6 para o parque 5 com valor máximo de 8,91 mT.

A distribuição não uniforme nas fases do parque 7 pode ser identificada analisando a Figura 37, que mostra a variação da densidade de corrente para todos os cabos de cada fase para o parque 7, considerando a corrente com distorção harmônica.

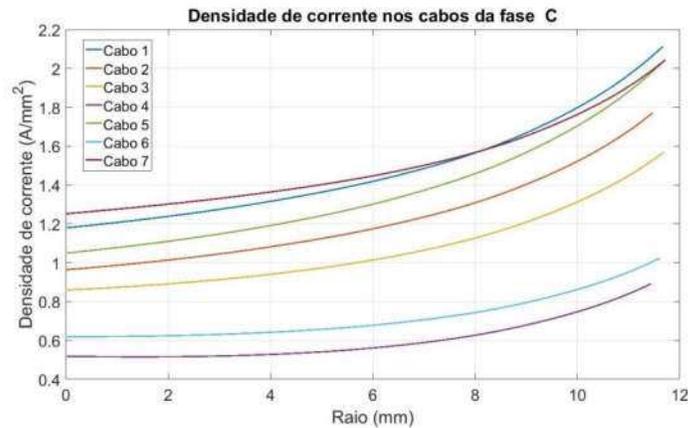
Figura 37: Gráficos da densidade de corrente para as fases do parque 7.



(a) Fase A.



(b) Fase B.



(c) Fase C.

Fonte: O autor.

Pelos gráficos da Figura 37, constatou-se que os cabos 1 e 7 apresentaram maiores densidades de corrente e, conseqüentemente, estes cabos apresentarão maiores perdas. Na fase B se obteve as duas maiores densidade de corrente que ocorreram nos cabos 1 e 7 com o valor de 2,164 A/mm² e 2,096 A/mm².

Na Tabela 12 Tabela 12 - Contribuição das correntes harmônicas na densidade de corrente do parque 7. é mostrada a contribuição das correntes harmônicas para a densidade de corrente obtida para cada cabo do parque 7 simulado. O maior aumento na densidade de corrente causada pelos harmônicos ocorreu no cabo 1 da fase C, com valor de 0,521 A/mm².

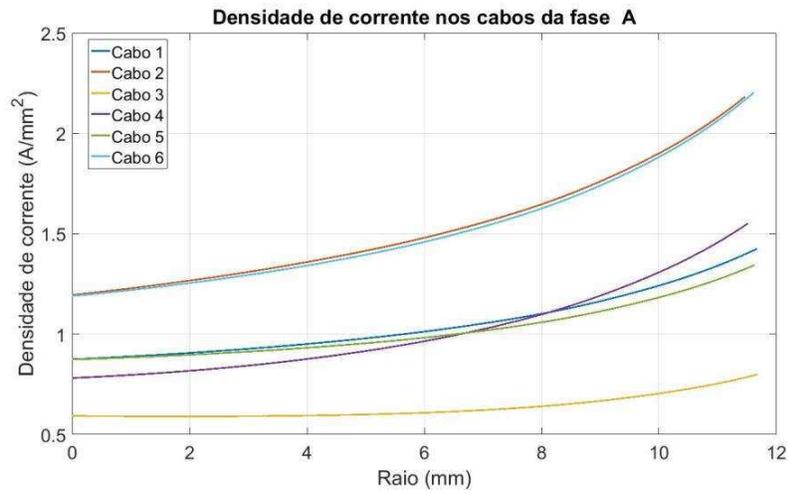
Tabela 12 - Contribuição das correntes harmônicas na densidade de corrente do parque 7.

	Densidade de Corrente (A/mm ²)		
	Fase A	Fase B	Fase C
Cabo 1	0,468	0,510	0,521
Cabo 2	0,508	0,496	0,451
Cabo 3	0,285	0,391	0,393
Cabo 4	0,361	0,358	0,252
Cabo 5	0,396	0,519	0,516
Cabo 6	0,351	0,347	0,262
Cabo 7	0,482	0,472	0,475

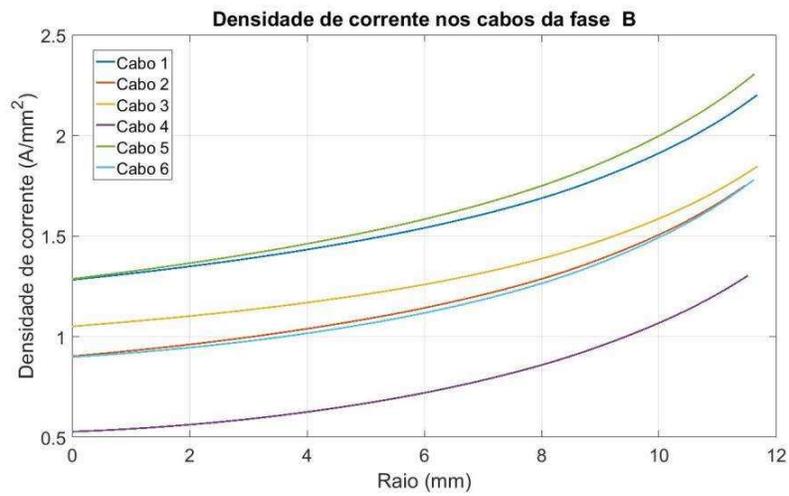
A fase com a maior contribuição total, soma de todas as contribuições das correntes harmônicas na densidade de corrente na extremidade do cabo, foi a fase B. Nessa fase, o aumento na intensidade de corrente na extremidade dos cabos decorrente do efeito pelicular e pela interferência dos cabos adjacentes é de 3,093 A/mm². Na fase A, este valor é de 2,854 A/mm², enquanto que na fase C, tem-se um valor de 2,87 A/mm². Isso mostra que a fase B sofre maior influência do efeito pelicular, provocado tanto pelas correntes harmônicas de alta frequência quanto pela influência dos cabos adjacentes.

A distribuição de densidade de corrente nas fases do parque 5 pode ser identificada a partir da análise do gráfico da Figura 38, que mostra a variação da densidade de corrente para todos os cabos de cada fase para o parque 5, considerando a corrente com distorção harmônica.

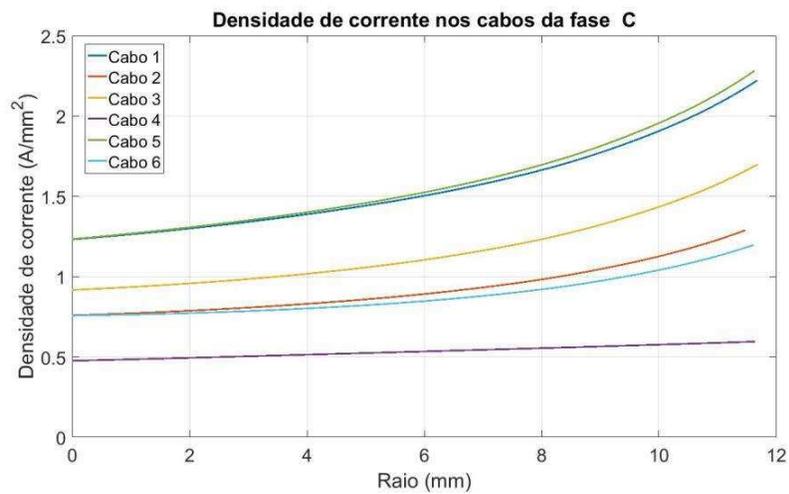
Figura 38: Gráficos da densidade de corrente para as fases do parque 5.



(a) Fase A.



(b) Fase B.



(c) Fase C.

Fonte: O autor.

A partir dos gráficos apresentados na Figura 38, constatou-se que, para o parque 5, os cabos 1 e 5 apresentaram maiores densidades de corrente nas fases B e C. A fase B apresentou uma densidade de corrente de 2,201 A/mm² e 2,306 A/mm² para os cabos 1 e 5, respectivamente, enquanto que as fase C e A apresentaram valores de 2,221 A/mm² e 2,281 A/mm² para os cabos 1 e 5, respectivamente. Na fase A, a densidade de corrente nos cabos 2 e 6 foram as maiores, com valores de 2,183 A/mm² e 2,202 A/mm² respectivamente.

Na Tabela 13 é mostrada a contribuição das correntes harmônicas obtidas para cada cabo do parque 7 simulado. A maior contribuição para a densidade de corrente causada pelos harmônicos ocorreu no cabo 5 da fase C, com valor de 0,555 A/mm².

Tabela 13 - Contribuição das correntes harmônicas na densidade de corrente do parque 5.

	Densidade de Corrente (A/mm ²)		
	Fase A	Fase B	Fase C
Cabo 1	0,311	0,484	0,531
Cabo 2	0,528	0,462	0,306
Cabo 3	0,162	0,408	0,416
Cabo 4	0,41	0,389	0,119
Cabo 5	0,286	0,519	0,555
Cabo 6	0,551	0,493	0,281

A fase com a maior contribuição total, soma de todas as contribuições das correntes harmônicas na densidade de corrente na extremidade do cabo, foi a fase B. Na fase B, o aumento na intensidade de corrente na extremidade dos cabos decorrente do efeito pelicular e pela interferência dos cabos adjacentes é de 2,755 A/mm², enquanto que nas fases A e C, esses valores são de 2,248 A/mm² e 2,208 A/mm², respectivamente.

Com o objetivo de quantificar a influência dos cabos adjacentes na contribuição da intensificação da densidade de corrente na extremidade dos cabos, comparou-se as maiores contribuições obtidas nas simulações realizadas para um único cabo, para os cabos de uma fase e para os cabos das 3 fases. Os valores podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 14 - Máximas contribuições na densidade de corrente obtidas.

Densidade de Corrente (A/mm ²)		Único cabo	Cabos de uma fase	Cabos das 3 fases
		Parque 7	0,316	0,531
Parque 5		0,346	0,537	0,555

Constatou-se, por meio dos valores obtidos nas simulações, um aumento de até 68% da densidade de corrente obtida quando consideramos os cabos adjacentes. Contudo, a máxima densidade de corrente, quando considerado o efeito dos cabos

adjacentes, não ocorre de forma simétrica em toda área transversal dos cabos, diferente dos resultados obtidos na simulação que não considera os cabos adjacentes.

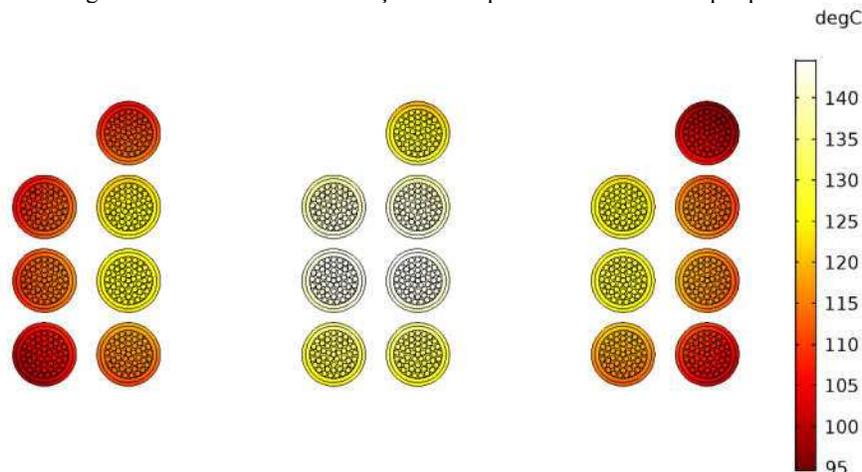
5.2.4 ANÁLISE TÉRMICA DOS CABOS DAS TRÊS FASES

Com o objetivo de analisar se as correntes harmônicas contribuíam de forma significativa com o aquecimento dos cabos, foi obtido o acréscimo das perdas causadas pelas correntes harmônicas nas perdas totais. Para o parque 7, obteve-se uma contribuição máxima de 0,05% causada pelas correntes harmônicas na máxima perda total por fase de 728,57 W. Já para o parque 5, obteve-se uma contribuição máxima de 0,09% causada pelas correntes harmônicas na máxima perda total por fase de 567,03 W.

Para os parques analisados neste trabalho, devido à baixa contribuição nas perdas totais, a contribuição das correntes harmônicas no aumento da temperatura não apresentou relevância quando comparada a contribuição da corrente de componente fundamental.

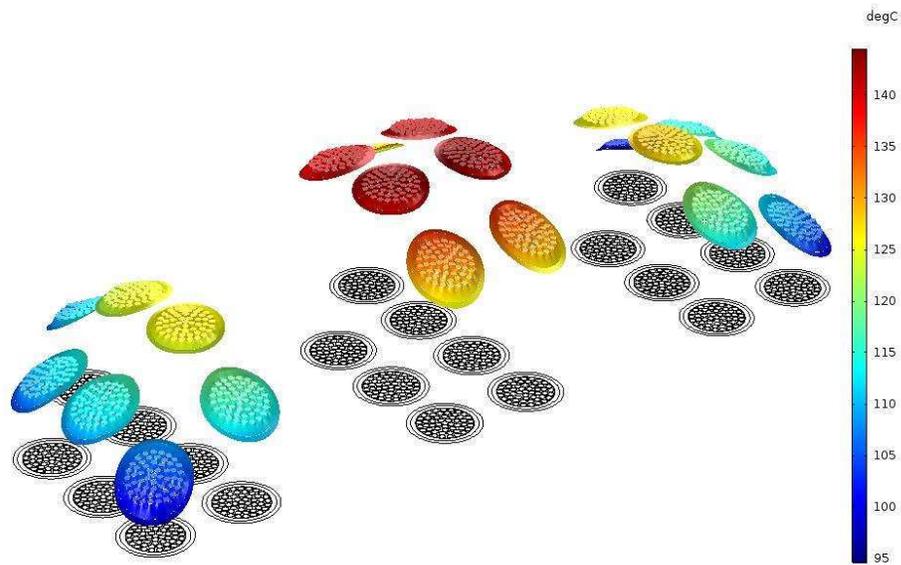
Contudo, considerando os relatos, por parte dos operadores do parque, de sobreaquecimento nos cabos localizados na caixa de passagem, foi realizada a simulação térmica. A simulação foi realizada no COMSOL considerando uma temperatura ambiente de 30°C. Na Figura 39, é possível ver a variação de temperatura nos cabos do parque 7. Na Figura 40, o mesmo gráfico é mostrado sob perspectiva, em que a altura dos pontos representa o nível de temperatura.

Figura 39: Gráficos da distribuição de temperatura nos cabos do parque 7.



Fonte: O autor.

Figura 40: Gráficos da distribuição de temperatura nos cabos do parque 7 sob perspectiva.

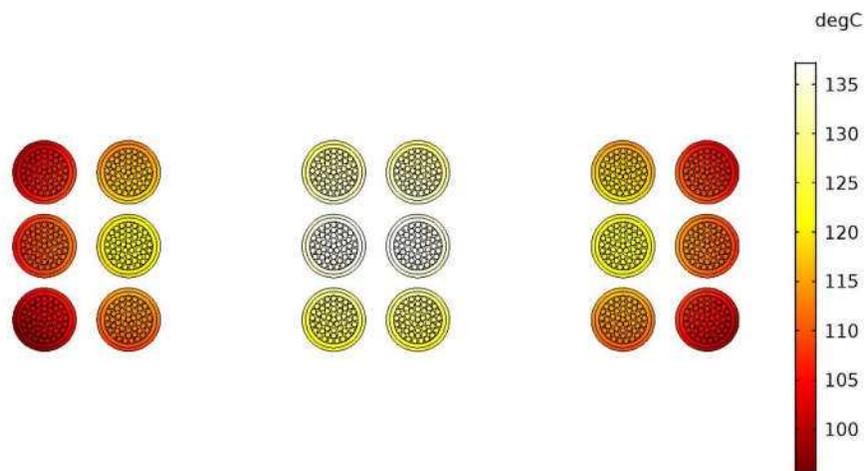


Fonte: O autor.

Para as condições simuladas, considerando a máxima corrente que pode ser conduzida, obteve-se uma temperatura máxima de 144,58°C, localizada nos cabos do centro da fase B, e uma temperatura mínima de 94,65°C. Ambas temperaturas são superiores as temperaturas permitidas em regime permanente fornecidas pelo fabricante.

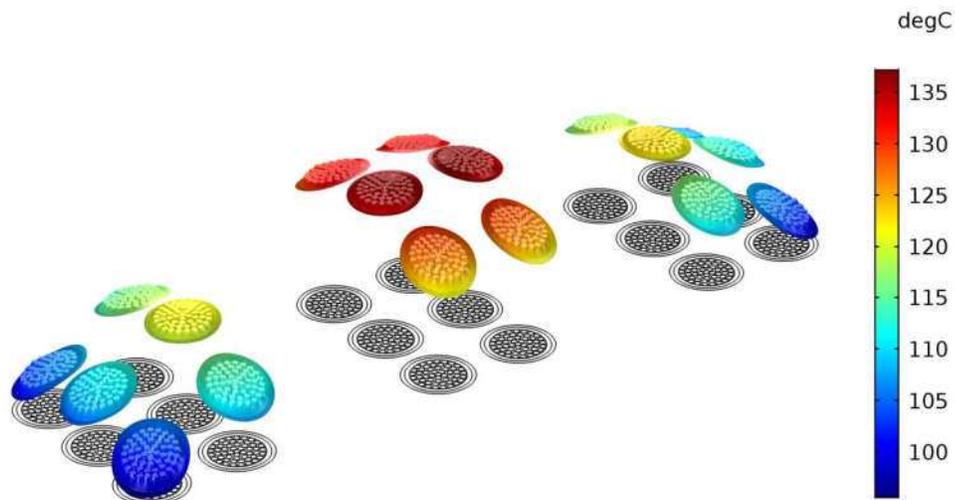
Na Figura 41, é possível ver a variação de temperatura nos cabos do parque 5. Na Figura 42, o mesmo gráfico é mostrado sob perspectiva, no qual os pontos nos cabos são elevados de forma proporcionais às maiores temperaturas obtidas.

Figura 41: Gráficos da distribuição de temperatura nos cabos do parque 5.



Fonte: O autor.

Figura 42: Gráficos da distribuição de temperatura nos cabos do parque 5 sob perspectiva.



Fonte: O autor.

Para as condições simuladas, considerando a máxima corrente que pode ser conduzida, obteve-se uma temperatura máxima de $137,2^{\circ}\text{C}$, localizada nos cabos do centro da fase B, e uma temperatura mínima de $95,57^{\circ}\text{C}$. Novamente, tem-se ambas as temperaturas superiores as temperaturas permitidas em regime permanente fornecidas pelo fabricante.

A partir da análise dos gráficos de distribuição de temperatura dos parques 1 e 5, evidenciou-se o comportamento da variação de tensão, em que os cabos da fase B tiveram maior aquecimento do que os cabos da fase A e C.

O aquecimento na fase B era esperado, considerando que pelos mecanismos de transferência de calor – condução, irradiação e convecção – os cabos da fase B são influenciados pelo calor gerado nos condutores das fases adjacentes e pelo meio. Além disso, os cabos da fase B sofrem maiores efeitos dos campos magnéticos do que as fases A e C e, dessa forma, mais correntes induzidas surgiram na fase B, agregando maiores perdas e agravando a temperatura.

Nos parques que apresentaram problemas nos condutores, devido ao aumento de temperatura, foram realizadas medições com equipamento de termovisão. Na Figura 43 é mostrado uma análise de termovisão realizada em um aerogerador do parque 5.

Figura 43: Termovisão nos cabos do parque 5.



Fonte: O autor.

Análises em campo foram realizadas e corroboram as simulações de transferência de calor realizadas. Na Figura 43 a máxima temperatura obtida foi de 136,9°C, valor próximo ao obtido na simulação.

Pode-se atribuir às temperaturas elevadas nos condutores, além das já citadas, a falta de ventilação nos cabos e as condições ambientais do local de instalação do parque, que tem temperaturas máxima de até 36°C segundo o centro de previsão de tempo e estudos climáticos (CPTEC).

A partir da análise prévia sobre as condições térmicas dos condutores, contramedidas como, o redimensionamento da caixa de passagem, redefinição da posição e tipo de condutores, podem ser adotadas ainda na etapa de projeto, resultando em menores perdas por aquecimento e na redução de custos de manutenção.

6 CONCLUSÃO

- Para identificar os níveis de distorções harmônicas de tensão no ponto de acoplamento comum foi utilizando o **software** HarmZs. O HarmZs possibilitou obter as distorções no ponto de acoplamento dos parques com o sistema. O resultado obtido indicou violação dos limites estipulados pelo operador nacional do sistema elétrico, mostrando que os parques em estudo apresentaram problemas de QEE. Como consequência, os cabos dos parques são submetidos a nível de distorção harmônica elevada;

- Para obter as perdas adicionais causadas por correntes harmônicas nos cabos dos parques eólicos, foi calculada a potência dissipada considerando as impedâncias associadas a cada frequência nos cabos dos parques. Com os resultados obtidos, foi constatado que as distorções de correntes harmônicas contribuíram com até 22,6% nas perdas totais nos cabos das instalações dos parques eólicos. Ainda foi possível identificar uma redução nas perdas harmônicas de até 0,076 MW causada pelo uso de transformadores com enrolamentos conectados na configuração delta estrela aterrado;

- A análise do efeito pelicular causado no condutor para cada perfil de corrente com e sem as distorções harmônicas presentes no parque foi realizada considerando três configurações.

- A primeira configuração analisada consistiu em um único cabo, sem qualquer interferência de cabos adjacentes. Nessa situação, foi possível verificar o comportamento do cabo quando uma corrente com distorções harmônicas era conduzida por ele. Obteve-se uma distribuição uniforme e um aumento de até $0,346 \text{ A/mm}^2$ na densidade de corrente na extremidade do cabo devido à existência de correntes harmônicas.
- A segunda situação simulada considerou a influência de cabos adjacentes. Para tanto, foram simulados os cabos que constituíam uma fase. Nessa situação foi verificada uma distribuição não uniforme de corrente nos cabos que formavam uma fase. Foi possível verificar a interação do campo magnético gerado pelas correntes que eram conduzidas pelos cabos e que interferem na distribuição de corrente. Para

essa situação, foram obtidos aumentos de até $0,537 \text{ A/mm}^2$ na densidade de corrente no extremo do cabo.

- Na terceira situação, foram simulado os cabos das 3 fases que saem dos aerogeradores. Essa situação representa o caso real encontrado nos parques e foi possível analisar os efeitos causados pelas fases na distribuição de corrente. Na simulação da situação três, a ocorrência de acoplamento magnético entre as fases foi constatada, o que interferiu na distribuição de corrente e, conseqüentemente, na máxima densidade de corrente obtida, que foi $0,555 \text{ A/mm}^2$. Quando analisadas as perdas para essa situação, constatou-se que os harmônicos contribuem com uma parcela de 0,09% das perdas totais, o que não contribui com acréscimos significativos na temperatura dos cabos.

- Para analisar o aumento da temperatura causado pelo efeito pelicular, foi utilizado o **software** Comsol para realizar simulações de transferência de calor nos cabos. Obteve-se temperaturas de até 54°C maiores que a temperatura permitida em regime permanente. Os valores de simulação são condizentes com os valores medidos com termovisão nos parques eólicos.

Destarte, na pesquisa realizada, foi mostrado que as distorções harmônicas de corrente contribuem com a diminuição da eficiência dos parques eólicos, atribuindo perdas adicionais nos cabos. Porém, tais perdas não são responsáveis por aquecimentos excessivos nos condutores. O aquecimento obtido se deve principalmente à componente fundamental da corrente e das condições térmicas da instalação do parque como a temperatura do ambiente, condições de vento, e da disposição em que se encontram os cabos, como distância entre fase e dimensões da caixa de passagem.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como continuação ao trabalho realizado, propõe-se:

- Realizar simulações no COMSOL em três dimensões de forma a analisar com mais detalhe os princípios de transferências de calor;
- Averiguar, com mais detalhes, o efeito térmico nos cabos levando em considerações mudanças nas variáveis além das correntes elétricas e das distorções harmônicas, como as temperaturas máximas e mínimas da região;
- Identificar a influência das dimensões da caixa de passagem para o efeito térmico observado e verificar o posicionamento dos cabos dentro da caixa de passagem, identificando para quais disposições o aquecimento diminui e dessa forma projetar modelos de caixa de passagem que garantam o funcionamento adequado dos cabos condutores.

6.2 PUBLICAÇÕES

Os estudos desta dissertação renderam uma publicação no 7º Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE) que ocorreu em Niterói – RJ, em maio de 2018. O artigo está disponível no IEEE Xplore sob o título **Skin effect comparative analysis in electric cables using computational simulations**.

Ainda é de interesse do autor e de seus orientadores, realizar publicações com os resultados obtidos na última etapa da dissertação, referentes às análises térmicas realizadas.

REFERÊNCIAS

- ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica. Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br/>. Acesso em: Julho, 2018.
- ABEEólica – Boletim de Dados Dezembro 2017. ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica. São Paulo. 2018.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 395/2009, vigência 2010.
- ARCEGA F. J., PARDINA A. Study of Harmonics Thermal Effect in Conductors Produced by Skin Effect. IEEE latinamerica transactions. 2014.
- ABEEólica– Associação Brasileira de Energia Eólica, Boletim Anual da Geração Eólica 2016, 2017.
- ACKERMANN, T. ed. Wind Power in Power Systems. West Sus-sex, UK: John Wiley & Sons, 2005.
- BADRZADEH B. GUPTA M., SINGH N., PETERSSON A. MAX L., HOGDAHL M., Power system harmonic analysis in wind power plants — Part I: Study methodology and techniques. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Las Vegas, NV, USA. 2012.
- BADRZADEH B. GUPTA M..Power system harmonic analysis in wind power plants — Part II: Practical Experiences and Mitigation Methods. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Las Vegas, NV, USA. 2012.
- BADRZADEH B., GUPTA M..Practical experiences and mitigation methods of harmonics in wind power plants. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Las Vegas, NV, USA. 2012.
- BALCELLS J., GONZALES D. Harmonics due to resonance in a wind power plant.8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Barcelona, Espanha. 1998.
- BERLEZE, S. L. M.. Efeito Pelicular e de Proximidade em Condutores não-Magnéticos. Dissertação, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1988.
- BLOCK P.B., RETORTA F. S., DAHLKE D. B., TEIXEIRA M. D.. Estudo Comparativo Do Desempenho Harmônico De Aerogeneradores. BrazilWindpowerConference. Rio de Janeiro, 2015.
- BLYE. P. W., KENT. H. E. Effects of Rectifiers om system Wave Shape. Symposium on Coordination Of Power and Telephone Plant. Nova York.Janeiro 23 - 26 , 1934.
- BRONZEADO, H. S.; RAMOS, A. J. P.; LIMA, M. V. B. C. Integração de ações entre consumidores e concessionárias na busca da qualidade. Revista Eletricidade Moderna. São Paulo: Aranda, p. 102-110. Dezembro/1996.
- BROZEADO H. S., RAMOS Á. J. P., OLIVEIRA J. C. ABREU J. P. G., ARRUDA A. A. C. BRANDÃO A. C. Uma Proposta de Nomenclatura Nacional de Termos e Definições Associados à Qualidade da Energia Elétrica. SeminárioBrasileirodequalidade da energiaElétrica–SBQEE, 1997.
- CHENYING L., JIE C., LIBIN H.; JINGYING C..Simulation and analysis of power cable harmonic loss and temperature rise. 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, 2016.
- CLIKER R. C. Harmonic Voltages And Currents in Y- and Delta-connected transformers. 296th Meeting of the American Institute of Electrical engineers, Pittsfield. Maio 29, 1914.
- COMSOL AB, *AC/DC Module User's Guide*.2015 COMS. . Disponível em: <https://br.comsol.com/model/cable-tutorial-series-43431>. Acesso em: janeiro, 2018.

COMSOL. Submarine Cable 6 — Thermal Effects.

DESAI S. G., MEHTRE V. V., BANKAR D. S., Harmonic Analysis and Mitigation in Wind Power Plants. Conference on Advances in Signal Processing, Pune, India. 2016.

DUGAN, C. R., MCGRANAGHAN, F. M., SANTOSO, S., BEATY, H. W.. Electrical Power Systems Quality. Second Edition, ed. McGraw-Hill, 2014.

DUTRA, R. M. Viabilidade Técnico-Econômica da Energia face ao novo marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro. UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2001.

FRANK J. J. Observation of Harmonic in Current and in Voltage wave shapes of Transformers. 248th Meeting of the American Institute of Electrical engineers, Pittsfield. Maio 5-7, 1910.

FULLER J. F., FUCHS E. F., ROESLER D. J.. Influence of Harmonics on Power Distribution System Protection. IEEE/PES 1987 winter Meeting, New Orleans, Louisiana. Fevereiro, 1987.
GE – Renewable Energy. 1.7-100/103 WIND TURBINE. Disponível em:
<https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/turbines/1-7-100-103>. Acesso em: junho, 2018.

GE – Renewable Energy. 1.85-87 WIND TURBINE. Disponível em:
<https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/turbines/185-87>. Acesso em: junho, 2018.

GRIFFITHS, D. J.. Introduction to Electrodynamics. 4. ed. [s.l.]: Pearson, 2013. 623 p

HUAN C., TAYJASANANT T. Modeling Wind Power Plants in Harmonic Resonance Study-A Case Study in Thailand. 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Krabi, Thailand. 2013.

IEEE Standard 1159-2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 2009.

IEEE Standard 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (ANSI), 2014.

JIANG L., YAN H., MENG J., YIN Z., WANG C.. Harmonic Loss Quantitative Model of Transmission Line Considering the Skin Effect. IEEE International Conference on Power and Renewable Energy. 2016.

JIN F., PENG C., WEI C., QI Y., XIAOURI H., QIAN W., FAN Y.. Investigation of the Effects of Insulation Defects on the 3-D Electromagnetic-Thermal Coupling Fields of Power Cable Joint. 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE, 2016.

LAROSE C., GAGNON R., PRUD'HOMME P., FECTEAU M., ASMINE M.. Type-III wind power plant harmonic emissions: Field measurements and aggregation guidelines for adequate representation of harmonics. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013.

LARSSON, Å. The Power Quality of Wind Turbines, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2000.

LEI Nº 10.438, DE 26 DE ABRIL DE 2002. Brasil.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de Rede. Submódulo 2.8 Gerenciamento dos Indicadores de qualidade da energia Elétrica da Rede Básica. Resolução Normativa nº 756/16, vigência 2017.

PHADKE A. G., HARLOW J. H. Generation of Abnormal Harmonics in High-Voltage AC-DC Power Systems. IEEE Summer Power Meeting, Portland, Ore., Julho 9-14, 1967.

RADEVA, T. R., YATCHEV, I. S., KARASTOYANOV D. N., STOIMENOV N. I., GYOSHEV D. S., Coupled Electromagnetic and Thermal Field Modeling of a Laboratory Busbar System. World

Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Electrical and Computer Engineering Vol:8, No:9, 2014

SANKARAN, C. Power Quality. [S.l.]: CRC PRESS, 2002.

SCHWANZ D., BOLLEN M., LARSSON A., KOCEWIAK L. H., Harmonic mitigation in wind power plants: Active filter solutions. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Belo Horizonte, Brasil. 2016.

SHAZLY J. H.; MOSTAFA M. A.; IBRAHIM D. K.; ZAHAB E. E. A.. Thermal analysis of high-voltage cables with several types of insulation for different configurations in the presence of harmonics. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017.

TANDE, J. O. G. Applying Power Quality Characteristics of Wind Turbines for Assessing Impact on Voltage Quality. WIND ENERGY - John Wiley & Sons, Ltd., 2002.

TENTZERAKIS S. T., PAPATHANASSIOU S. A.. An investigation of the harmonic emissions of wind turbines. IEEE transactions on energy conversion, vol. 22, no. 1, march 2007.

WHITEHEAD S., RADLEY W. G. Generation and Flow of Harmonics in Transmission Systems. Comite Consultatif International Telephonique (Fernsprech). Maio 2, 1948.

World Wind Energy Association – WWEA. World Wind Market Has Reached 486 GW From Where 54 GW Has Been Installed Last Year. Disponível em: <http://www.wwindea.org/11961-2/>. Acesso em: Agosto, 2017.