

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

Aplicação de um Modelo Computacional para Predição de Distorções Harmônicas em Sistemas de Geração Eólica: Um estudo de caso da planta de Casa Nova Eletrobras CHESF.

Pedro Gomes da Cruz Filho

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
MODELAGEM COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL**

Pedro Gomes da Cruz Filho

**Aplicação de um Modelo Computacional para Predição de
Distorções Harmônicas em Sistemas de Geração Eólica:
Um estudo de caso da planta de Casa Nova Eletrobras
CHESF.**

Dissertação de Mestrado

Salvador, 2024

PEDRO GOMES DA CRUZ FILHO

**APLICAÇÃO DE UM MODELO COMPUTACIONAL PARA
PREDIÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE
GERAÇÃO EÓLICA: UM ESTUDO DE CASO NA PLANTA DE CASA
NOVA Eletrobras CHESF.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Centro
Universitário SENAI CIMATEC como requisito para a obtenção do título de Mestre em
MODELAGEM COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL.

Orientadora: Prof^aDr^a Bruna Aparecida Souza Machado
Coorientador: Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos
Coorientadora: Prof^aDr^a. Maria Cristina Tenório

Salvador, 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

C955a Cruz Filho, Pedro Gomes da

Aplicação de um modelo computacional para predição de distorções harmônicas em sistemas de geração eólica: um estudo de caso da planta de Casa Nova Eletrobras CHESF / Pedro Gomes da Cruz Filho. – Salvador, 2024.

84 f. : il. color.

Orientadora: Prof.^a Dra. Bruna Aparecida Souza Machado.

Coorientador: Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos.

Coorientadora: Prof.^a Dra. Maria Cristina Tenório.

Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2024.


Inclui referências.

1. Monitoramento harmônico. 2. Modelagem computacional. 3. Redes neurais. 4. Qualidade de energia. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Machado, Bruna Aparecida Souza. III. Santos, Alex Álisson Bandeira. IV. Tenório, Maria Cristina. V. Título.

CDD 620.0013

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC**Mestrado Acadêmico em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada “**Aplicação de um Modelo Computacional para Predição de Distorções Harmônicas Monitoradas em Sistema Geração Eólica: Um estudo de caso da planta de Casa Nova CHESF**” apresentada no dia 15 de agosto de 2024, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Electronically signed by:
Bruna Aparecida Souza Machado
CPF: ***.830.795-**
Date: 8/15/2024 3:01:02 PM -03:00 

Orientadora: **Prof.^a Dr.^a Bruna Aparecida Souza Machado**
SENAI CIMATEC

Electronically signed by:
Alex Álisson Bandeira Santos
CPF: ***.191.765-**
Date: 8/15/2024 2:57:08 PM -03:00 

Coorientador: **Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos**
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Maria Cristina Tenório Cavalcante
CPF: ***.227.054-**
Data: 15/08/2024 21:51:58 -03:00 

Coorientadora: **Prof.^a Dr.^a Maria Cristina Tenório Cavalcante Escarpini**
UFAL

Assinado eletronicamente por:
Roberto Luiz Souza Monteiro
CPF: ***.881.935-**
Data: 15/08/2024 17:14:15 -03:00 

Membro Interno: **Prof. Dr. Roberto Luiz Souza Monteiro**
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
José Bione de Melo Filho
CPF: ***.655.604-**
Data: 15/08/2024 14:57:48 -03:00 

Membro Externo: **Prof. Dr. José Bione de Melo Filho**
CHESF

Dedico este trabalho à Chesf, que fornece o arcabouço energético para a produção científica. Outras pessoas contribuíram à sua própria maneira para este projeto e merecem um reconhecimento individual.

Agradecimentos

Quando recebi um e-mail com o título de inscrição para o mestrado, percebi que já estava com este projeto em mente há muito tempo. O interesse pelo mestrado não começou com meu desejo de analisar o comportamento de um sistema elétrico. Na verdade, tudo começou com minha atuação no sistema de geração de uma unidade, de codinome Luiz Gonzaga, da Chesf, localizada em Jatobá, Pernambuco. Aprendi a analisar e a garantir a qualidade da energia gerada. Meus agradecimentos a José Bione, que lidera o departamento de inovação, e aos professores Oberdan, Alex, Cristina, Bruna, Daniella, Roberta e à minha mãe, Maria Lima da Cruz, bem como a meus irmãos, irmãs e ao meu nobre sobrinho, Vinicius Cezar. Cada um, à sua maneira, ensinou-me algo diferente sobre o significado da importância da qualidade em tudo o que se faz.

Com minha mãe, aprendi que a qualidade é essencial em tudo o que fazemos. Um serviço bem-feito, segundo ela, pode evitar muitas situações difíceis, dada sua habilidade em construir, reparar e manter, que ela desenvolveu ao longo da vida. Com os professores citados, desenvolvi a capacidade de raciocinar. A inteligência artificial pode questionar, arrumar e direcionar a metodologia e gerar uma quantidade de informações para discussões com uma clareza espetacular; obrigado, professor Oberdan. E com as professoras doutoras Bruna, Cristina, Roberta, Allana e Daniella, a quem dedico esta dissertação, aprendi que pequenas expressões podem representar um sistema: uma pesquisa, uma palavra-chave, uma boa revisão bibliográfica e um toque suave na hora certa podem elucidar o que se quer comprovar.

Elas e todos os professores acadêmicos da instituição Cimatec ensinaram-me, a cada encontro, a montar essa produção científica. Ao fazê-lo, prepararam-me para observar o quanto posso mudar o mundo ao meu redor de forma mais apropriada. Seus ensinamentos, bem como os de muitas outras pessoas, estão nestas

páginas.

Resumo

Em um cenário ideal, os sistemas de energia devem operar com correntes constantes, balanceadas e ininterruptas, tanto em amplitude, quanto em frequência. No entanto, a realidade, muitas vezes, apresenta variações significativas devido a múltiplos fatores, impactando a qualidade da energia. Este estudo teve como objetivo desenvolver um modelo eficaz para predição de distorções harmônicas usando uma abordagem de rede neural de Memória de Curto Prazo Longa (LSTM), combinada com técnicas de Dropout para mitigar o overfitting.

Na primeira fase, focada na linha de transmissão 04S3 de 230 kV da Subestação Sobradinho (Eletrobras Chesf), dados foram coletados entre julho e outubro de 2023 a cada 10 minutos usando o qualímetro ION7650. Após correções, registrou-se distorções harmônicas de 4,00% (DTHa), 4,56% (DTHb) e 1,04% (DTHc), com fases A e B ultrapassando o limite de 1,5% do ONS. Propôs-se o uso de Filtros Ativos de Potência (APFs), seguindo estudos de Akagi (2005).

Na segunda fase, desenvolveu-se um modelo preditivo em laboratório, utilizando Python e Keras em um sistema com processador Intel® Core™ i7 e placa NVIDIA GeForce RTX 3060. Os dados passaram por pré-processamento e foram divididos em 80% para treinamento e 20% para avaliação. Com duas camadas ocultas e 95 neurônios cada, o modelo foi treinado por 500 épocas, apresentando erro total inferior a 5%.

Os resultados mostram alta precisão na previsão das distorções harmônicas, com coeficientes de correlação próximos de 0,99 e erros absolutos médios de 0,0067 (DTHa), 0,0085 (DTHb) e 0,0062 (DTHc). As métricas indicam bom desempenho em precisão relativa. Portanto, o modelo LSTM com Dropout mostrou-se eficaz na predição de distorções harmônicas, com erro médio de 0,0067, sugerindo potencial para aplicações práticas em sistemas de potência.

No entanto, mais pesquisas são necessárias para aprimorar essas técnicas e adaptá-las a diversos cenários operacionais. Os resultados primários demonstram que o modelo baseado em LSTM fornece predições confiáveis de distorções harmônicas, estabelecendo sua efetividade em sistemas de geração eólica.

Palavras-chave: Monitoramento Harmônico; Modelagem Computacional; Redes Neurais; Qualidade de Energia.

Abstract

In an ideal scenario, power systems should operate with constant, balanced, and uninterrupted currents, both in amplitude and frequency. However, reality often presents significant variations due to multiple factors, impacting power quality. This study aimed to develop an effective model for predicting harmonic distortions using a Long Short-Term Memory (LSTM) neural network approach, combined with Dropout techniques to mitigate overfitting.

In the first phase, focused on the 04S3 230 kV transmission line of the Sobradinho Substation (EletrobrasChesf), data were collected between July and October 2023 every 10 minutes using the ION7650 power quality meter. After corrections, harmonic distortions of 4.00% (THDa), 4.56% (THDb), and 1.04% (THDc) were recorded, with phases A and B exceeding the 1.5% limit set by ONS. The use of Active Power Filters (APFs) was proposed, following studies by Akagi (2005).

In the second phase, a predictive model was developed in the laboratory using Python and Keras on a system with an Intel® Core™ i7 processor and an NVIDIA GeForce RTX 3060 graphics card. The data underwent preprocessing and were split into 80% for training and 20% for evaluation. With two hidden layers and 95 neurons each, the model was trained for 500 epochs, presenting a total error of less than 5%.

The results show high accuracy in predicting harmonic distortions, with correlation coefficients close to 0.99 and mean absolute errors of 0.0067 (THDa), 0.0085 (THDb), and 0.0062 (THDc). The metrics indicate good performance in relative accuracy. Therefore, the LSTM model with Dropout proved effective in predicting harmonic distortions, with an average error of 0.0067, suggesting potential for practical applications in power systems.

However, further research is needed to improve these techniques and adapt them to various operational scenarios. The primary results demonstrate that the LSTM-based model provides reliable predictions of harmonic distortions, establishing its effectiveness in wind power generation systems.

Keywords: Harmonic Monitoring, Computational Analysis, LSTM, Energy Quality, Active Filters

Lista de Figuras

Figura 1 - Classificação da Qualidade de Energia	21
Figura 2 - Formulação de ondas.	23
Figura 3 - Sinal periódico.	24
Figura 4 - Distorção da forma de onda.	24
Figura 5 - Distorção de Sinais Periódicos.	25
Figura 6 - Filtro Harmônico Sintonizado.	34
Figura 7 - Impedância de um circuito RLC série versus frequência.....	36
Figura 8 - Módulo e Ângulo.....	36
Figura 9 - Corrente versus frequência para o circuito série.....	37
Figura 10 - Filtros amortecidos: (a) 1ª Ordem. (b) 2ª Ordem. (c) 3ª Ordem. (d) Tipo "C".	38
Figura 11 - Estrutura de um perceptron multicamadas (MLP).	48
Figura 12 - Unifilar SE CASA NOVA.	55
Figura 13 - Localização SMF.	56
Figura 14 - ION 7650.	57
Figura 15 - Vista frontal e traseira do ION 7650.....	57
Figura 16 - Diagrama Genérico de ligação do ION 7650.	58
Figura 17 - TPC Trench TCVT 245.	58
Figura 18 - Conexões do TPC Trench TCVT 245. (Adaptada de [6]).	59
Figura 19 - Relação dos terminais X1-X3 do TPC Trench TCVT 245 com a frequência.	60
Figura 20 - Tabela de dados brutos.....	60
Figura 21 - Medição da DTHT na fase A.	63
Figura 22 - Medição da DTHT na fase B.	63
Figura 23 - Medição da DTHT na fase C.	64
Figura 24 - Medições da DHTI na fase A para a quinta ordem harmônica.	67
Figura 25 - Medições da DHTI na fase B para a quinta ordem harmônica.	67
Figura 26 - Medições da DHTI na fase C para a quinta ordem harmônica.	68
Figura 27 - ION 7650.	70
Figura 28 - Avaliação dos dados.	71
Figura 29 - Resultado das previsões da variável DTHa.	74
Figura 30 - Resultado das previsões da variável DTHb.	75
Figura 31 - Resultado das previsões da variável DTHc.	75

Listas de tabelas

Tabela 1 - Representação dos componentes Harmônicos.....	25
Tabela 2 - Limites globais inferiores para os indicadores DTHI e DTHTS95%	29
Tabela 3 - Distorções Harmônicas - Limites Globais Recomendados	30
Tabela 4 - PRODIST - Módulo 08	30
Tabela 5 - PROREDE - Submódulo 2.8.....	30
Tabela 6 - Métodos Paramétricos e Não Paramétricos.....	44
Tabela 7 - Dados de placa do Transformador	54
Tabela 8 - Resposta em frequência dos terminais X1-X3 do TPC Trench TCVT 245	59
Tabela 9 - Limites globais inferiores para o indicador DTHI	64
Tabela 10 - Sumário avaliação DTHa.....	72
Tabela 11 - Sumário avaliação DTHb.....	73
Tabela 12 - Sumário avaliação DTHc.....	73

Lista de Siglas e Abreviaturas

AG - Algoritmo Genético

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco

DEC - Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora

DITh% - Distorção Harmônica individual de tensão ordem h

DITT% - Distorção Harmônica total de tensão

DITT3% - Distorção Harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3

DITT95% - Valor do indicador DITT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas

DITT395% - Valor do indicador DITT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas

DITTi% - Distorção Harmônica total de tensão para componentes ímpares não múltiplas de 3

DITTi95% - Valor do indicador DITT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas

DITTp% - Distorção Harmônica total de tensão para componentes pares não múltiplas de 3

DITTp95% - Valor do indicador DITT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas

DTHI - Distorção de Tensão Harmônica Individual

DTHT - Distorção de Tensão Harmônica Total

h - Ordem harmônica hmax: Ordem harmônica máxima

hmin - Ordem harmônica mínima

ONS - Operador Nacional do Sistema

SGH - Sistema de Geração Híbrida

Vn - Tensão Harmônica de ordem h

Sumário

Resumo.....	7
Abstract.....	8
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 Organização do Documento.....	18
2 DISCUSSÃO TEÓRICA	20
2.1 Origens e Impactos das Distorções Harmônicas	20
2.2 Classificação da Qualidade de Energia.....	20
2.2.1 Fator de Qualidade (Q).....	22
2.3 Definição de Harmônicos.....	23
2.3.1 Série de Fourier.....	24
2.3.1.1 Medida da Distorção da Forma de Onda.....	24
2.3.1.2 Determinação da Distorção de Sinais Periódicos	25
2.3.1.3 Componentes Harmônicas: Ordem - Frequência – Sequência	25
2.3.2 Caracterização de Harmônicos em Sistema de Geração Eólica	26
2.3.2.1 Origem das Harmônicas:	26
2.3.2.2 Comportamento Variável:	26
2.3.3 Impacto das Distorções Harmônicas na Rede Elétrica:	27
2.3.4 Efeitos das Distorções Harmônicas:.....	27
2.4 Avaliação da Distorção Harmônica de Tensão	28
2.5 Estratégias de Mitigação de Distorções Harmônicas	31
2.6 Estratégias de Mitigação de Distorções Harmônicas	32
2.7 Utilização de Filtros Ativos.....	33
2.7.1 Classificação dos Filtros	33
2.7.2 Filtros Sintonizados	33
2.7.3 Filtros Amortecidos.....	37
2.8 Procedimentos de Medições e Estudos.....	38
2.8.1 Medições de Harmônicas nos Sistemas Elétricos de Potência	38
2.9 Estudos de Harmônicos e Simulação Computacional de Sistemas Elétricos de Potência	39
2.9.1 Parâmetros Elétricos do Sistema	39
2.9.2 Distorções de Tensão e Corrente.....	39
2.10 Caso de Estudo: Campo Eólico de Casa Nova - Eletrobras Chesf.....	41
2.11 Premissas Básicas para Procedimentos de Medições e Estudos de Harmônicos	41

2.11.1	Medições de Harmônicas nos Sistemas Elétricos de Potência	41
2.11.2	Medição através de Analisadores de Harmônicos e de Espectro	41
2.11.3	Estudos de Harmônicos e Simulação Computacional de Sistemas Elétricos de Potência	42
2.12	Métodos De Previsão Em Séries Temporais	42
2.12.1	Algoritmo de Retropropagação e Método da Descida do Gradiente	48
2.12.2	Desafios e Prática	49
2.12.3	Implicações para a Análise Harmônica	49
2.13	Revisão Crítica e Comparativa das Aplicações de Redes Neurais Artificiais	49
3	METODOLOGIA	52
3.1	Primeira Fase: Coleta de Dados e Preparação	52
3.2	Segunda Fase: Análise e Modelagem	52
3.3	Detalhe da Metodologia	53
3.3.1	Escolha dos Ativos	53
3.3.2	Qualímetro	56
3.3.3	TPC Transformador de Potencial Capacitivo	58
3.4	Configuração da Máquina	60
3.5	Preparação de Dados	61
3.6	Premissas para as Simulações e Análise das Medições de Distorções Harmônicas	61
3.7	Análise da Distorção Harmônica Total (DTHT) e individual (DTHI)	62
3.7.1	Medição da Distorção Total de Tensão Harmônica (DTHT)	63
3.7.2	Análise dos Valores de Distorção Harmônica Total Individual (DTHI)	64
3.8	Análise de Distorção Total de Tensão Harmônica (DTHT)	68
3.8.1	Maiores Valores de DTHI Corrigidos	68
3.8.2	Implicações e Recomendações	69
3.9	Recomendações e Ações Futuras	69
3.10	Procedimentos de Simulação Implementados em LSTM	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5	CONCLUSÕES	76
5.1	Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros	78
5.1.1	Sugestões Específicas para Trabalhos Futuros:	79
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

A análise das distorções harmônicas é importante devido à ampliação do número de cargas não lineares em sistemas elétricos e à natureza intermitente e variável das fontes de energia renovável (Paracha et al., 2009). Essas distorções podem comprometer o funcionamento adequado do sistema elétrico e dos equipamentos conectados a ele (Rao et al., 2022). Portanto, esta análise é fundamental para identificar as fontes de variações e desenvolver estratégias de mitigação, além de permitir a compreensão dos impactos dessas variações no desempenho do sistema elétrico e de seus equipamentos. No contexto de sistemas de geração híbrida, a análise dessas distorções é essencial para compreender e, conseqüentemente, mitigar os impactos dessas variações no desempenho do sistema elétrico (Carvalho, 2023).

Em um cenário ideal, os sistemas de energia deveriam operar com tensões e correntes constantes, equilibradas e sem interrupções, tanto em amplitude quanto em frequência (Kundur, 2007). No entanto, na realidade enfrentamos variações significativas dessas grandezas devido a múltiplos fatores, o que compromete a qualidade da energia. O sistema elétrico brasileiro é regido pelas “regras e procedimentos de distribuição (PRODIST)”¹ propostos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pelos Submódulos do Operador Nacional do Sistema (ONS)². O cumprimento desses requisitos garante os perfis senoidais de tensão e corrente sem alterações em sua frequência e amplitude padrão.

Além disso, vem ocorrendo uma ampliação do número de cargas não lineares em todos os níveis de fornecimento. A utilização dessas cargas constitui uma das maiores preocupações tanto das concessionárias quanto dos consumidores, além de ser motivo de constantes problemas para o sistema elétrico como um todo e seus usuários. Tais cargas, provocam distorções de tensão e/ou corrente nas redes elétricas, comprometendo, em muitos casos, o perfeito funcionamento do sistema e de seus equipamentos (Brito; Gianesini; Santos, 2021).

¹BRASIL. Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist). Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>>. Acesso em: 13 fev. 2024.

²BRASIL. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de Rede. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acesso em: 13 mar. 2024.

A geração de energia eólica, por exemplo, possui características intrínsecas que podem levar à introdução de distorções harmônicas no sistema elétrico, o que pode impactar negativamente a qualidade da energia fornecida (Almohaimeed; Abdel-Akher, 2020). Dessa maneira, conhecer o comportamento dessas distorções através do monitoramento, permite a elaboração de protocolos para garantir a operação segura do sistema de geração eólico. Utilizando os dados de monitoramento, é possível desenvolver um modelo computacional de predição de perturbações na rede de distribuição, possibilitando a tomada de decisão antecipada e a manutenção preventiva nos mecanismos de distribuição.

Tendo em vista isso, a aplicação de um modelo computacional para a predição de distorções harmônicas elétricas em sistemas de geração híbrida tem se tornado cada vez mais importante devido ao aumento da participação de fontes de energia renovável no mercado de energia elétrica. Com essa finalidade, neste trabalho foi realizado um estudo de caso na planta de Casa Nova Chesf, onde foram monitoradas as distorções harmônicas elétricas em um sistema de geração híbrida de energia eólica.

Este estudo, portanto, buscou contribuir com a identificação e análise das distorções harmônicas elétricas em um sistema de geração eólica, bem como estabelecer um modelo computacional para sua predição (modelagem computacional LSTM), visando aprimorar a operação e manutenção da planta de Casa Nova Chesf e servir de referência para outros sistemas de geração híbrida de energia.

Adicionalmente, as conclusões obtidas neste estudo de caso poderão servir de referência para outros sistemas de geração híbrida de energia, contribuindo para o aprimoramento das práticas de monitoramento e predição de distorções harmônicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é aplicar a modelagem computacional LSTM (*Long Short-TermMemory*) para o estudo e predição de distorções harmônicas elétricas em sistemas de geração de energia eólica de Casa Nova, visando enriquecer a base tecnológica da Chesf para o desenvolvimento de soluções capazes de mitigar esses problemas em sistemas de energia Elétrica de geração Eólico.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Investigar as técnicas e métodos de predição aplicáveis ao monitoramento e mitigação de distorções harmônicas elétricas em sistemas de geração de energia eólica, analisando sua eficácia e adaptabilidade.
- Estabelecer e implementar um modelo preditivo baseado em LSTM para otimização e predição dessas distorções, contribuindo para o aprimoramento da operação e manutenção da planta em questão.
- Fornecer uma referência para outros sistemas de geração híbrida, auxiliando no monitoramento e mitigação de distorções harmônicas.

1.3 Organização do Documento

A estrutura desta dissertação é apresentada da seguinte maneira:

Após a introdução, no segundo capítulo, será feita uma discussão teórica sobre qualidade de energia, distorções harmônicas e métodos de previsão em séries temporais. Serão abordadas a importância de manter a qualidade de energia, os efeitos das distorções harmônicas e as técnicas usadas para prevê-las, como redes neurais e modelos estatísticos.

No terceiro capítulo, detalha-se a metodologia adotada em duas fases:

A primeira fase descreve a instalação na linha 230kV "04S3" de alimentação do Complexo Eólico Casa Nova, especificamente na SE Sobradinho 500/230kV, através de conexões em cada fase dos secundários de TPCs a um qualímetro ION7650.

A segunda fase envolve a preparação de uma máquina com as seguintes especificações: processador Intel(R) Core(TM) i7-11800H de 11ª geração, 2.30GHz, memória RAM de 16 GB, placa de vídeo NVIDIA GeForce RTX 3060 com 6GB de memória dedicada e sistema operacional Windows 11 Pro.

Em suma, este capítulo cobre as etapas de coleta e pré-processamento de dados, normalização para facilitar o aprendizado da máquina e concepção da configuração do modelo, incluindo o uso de camadas LSTM e técnicas de *Dropout* para evitar o *overfitting*.

O quarto capítulo apresenta os resultados alcançados com a metodologia, divididos em duas fases:

Na primeira fase, são detalhadas as medições de distorções harmônicas de tensão realizadas na conexão em 230kV do Complexo Eólico Casa Nova, na SE Sobradinho 500/230kV.

Na segunda fase, é descrito o desenvolvimento de um modelo LSTM treinado com a base de dados das medições realizadas na primeira fase. A métrica utilizada foi a raiz do erro médio quadrático, mostrando que, em média, os desvios das variações do modelo em relação aos valores reais são muito pequenos. Esta métrica, comumente usada para avaliar o desempenho de modelos de regressão, sugere que o modelo captura a variação nos dados de forma precisa e geral.

Este capítulo examina os resultados da primeira fase e, por último, os resultados da segunda fase, avaliando a capacidade de previsão do modelo em relação às distorções harmônicas. Discute-se a eficácia e as limitações da abordagem, bem como as ameaças à validade dos resultados e como eles se alinham às expectativas teóricas.

Concluindo, o quinto capítulo recapitula as contribuições significativas do estudo, refletindo sobre a transição dos algoritmos genéticos para redes neurais na análise de distorções harmônicas. São discutidas propostas para pesquisas futuras e aplicações práticas dos resultados, com ênfase no impacto potencial deste trabalho na gestão operacional e na tomada de decisões em contextos reais, exemplificado pelo caso do sistema elétrico de geração eólico de Casa Nova.

2 DISCUSSÃO TEÓRICA

Este capítulo explora os fatores que influenciam a qualidade da energia, com foco particular nas distorções harmônicas, suas causas, impactos e estratégias de mitigação. O entendimento desses elementos é essencial para o desenvolvimento e a implementação de soluções eficazes que assegurem a integridade e a eficiência da rede elétrica.

Este trabalho busca contribuir para esse objetivo, através da criação de uma Rede Neural Artificial (RNA) capaz de identificar e prever as distorções harmônicas na geração eólica. A crescente demanda por energia elétrica com qualidade e a necessidade de eficiência energética tornam essencial o desenvolvimento de tecnologias que permitam a gestão inteligente do consumo.

2.1 Origens e Impactos das Distorções Harmônicas

Distorções harmônicas são fenômenos gerados por cargas não lineares que modificam a forma de onda da corrente e da tensão elétricas. Equipamentos como conversores de frequência, inversores de energia solar e eólica, e grandes cargas industriais são exemplos típicos de geradores de harmônicos. Essas distorções podem acarretar diversos problemas, incluindo:

- Aquecimento excessivo de motores e transformadores, o que reduz sua vida útil e eficiência;
- Interferências em sistemas de comunicação e mau funcionamento de dispositivos eletrônicos;
- Aumento no consumo de energia devido a eficiências reduzidas.

2.2 Classificação da Qualidade de Energia

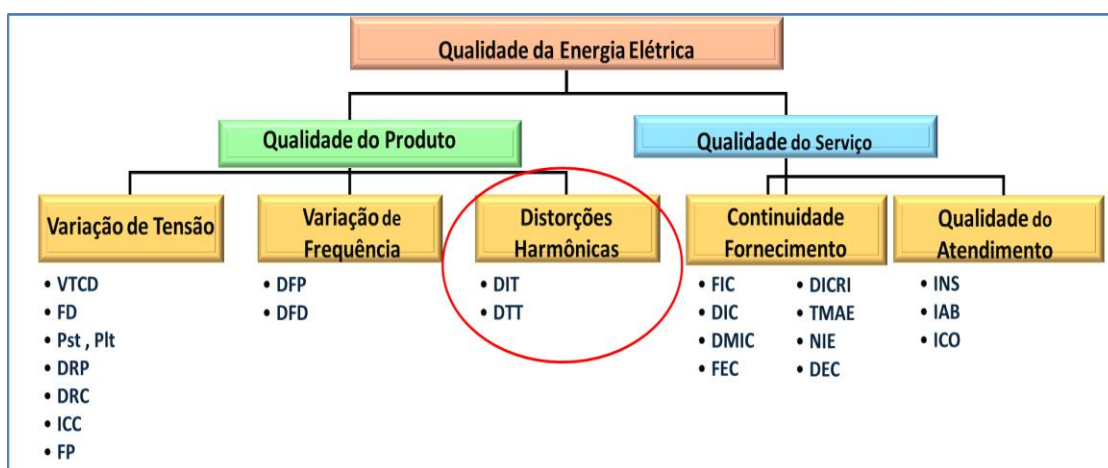
O crescimento das fontes alternativas de geração de energia, como a eólica e a solar, na matriz energética brasileira ressalta a importância dos estudos de qualidade de energia. Tais estudos são cruciais para identificar e mitigar distúrbios que possam comprometer a operação de equipamentos ligados à Rede Básica. Segundo Dugan et al. (2004), a qualidade de energia engloba a análise de variações na tensão, corrente, frequência ou distorções harmônicas que podem ocasionar falhas ou interferências.

Variáveis frequentemente originadas por cargas não lineares podem desviar a forma ideal de onda de tensão ou corrente, resultando em degradação da qualidade de energia. Entre os fatores contribuintes para tais desvios estão curtos-circuitos, manobras operacionais, falhas em equipamentos, erros humanos e fenômenos externos como descargas atmosféricas. Estes eventos podem causar interrupções, perda de qualidade de energia, paradas não planejadas e elevados custos de manutenção e substituição de equipamentos, afetando diretamente a produtividade das empresas e a estabilidade das redes elétricas.

Cargas como dispositivos de eletrônica de potência e equipamentos ferromagnéticos introduzem múltiplas frequências da frequência fundamental na rede, complicando a manutenção da qualidade energética. Com o aumento do uso de cargas especiais, também conhecidas como fontes harmônicas, e os efeitos adversos dos harmônicos nas instalações elétricas, torna-se imprescindível a adoção de medidas para controlar e minimizar os níveis de distorção harmônica.

A Figura 1 a seguir, ilustra a classificação dos diferentes tipos de problemas de qualidade de energia e sua prevalência, proporcionando uma visão clara dos desafios enfrentados.

Figura 1 - Classificação da Qualidade de Energia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha dos valores recomendados para a Distorção Harmônica Total (DHT) e a Distorção Harmônica Individual (DHI) de tensão é baseada nos critérios de qualidade da energia elétrica. Isso não só padroniza a terminologia associada ao tema como também reforça a necessidade de uma gestão eficaz dessas distorções,

sendo fundamental para garantir a qualidade da energia entregue. Essa percepção leva à definição de um parâmetro crucial, conhecido como fator de qualidade, que será explorado a seguir.

2.2.1 Fator de Qualidade (Q)

O fator de qualidade é um parâmetro adimensional definido (tanto para circuitos como para componentes) através da relação entre a máxima energia armazenada e a energia total dissipada por período. Assim, designando-se tal parâmetro pelo símbolo Q, sua definição, conforme a referência, é dada por:

$$Q = 2. \pi. \left[\frac{\text{m.ximaenergiaarmazenadanocircuito}}{\text{energiatotaldissipadaporperiodo}} \right] \text{ [01]}$$

O fator Q, conforme demonstrado, significa uma medida do grau de pronunciamento das curvas de resposta dos circuitos ressonantes. Conseqüentemente, dada a importância do fator de qualidade no estudo de filtros, a partir da definição, serão obtidas relações úteis que envolvem a frequência de ressonância e os parâmetros do circuito. Pode-se expressar o fator de qualidade, à frequência de ressonância, em função dos valores dos componentes, conforme mostra a equação abaixo:

$$Q = \frac{Z_0}{R} = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ [02]}$$

Onde:

- Q = Fator de qualidade;
- Z_0 = Impedância natural do sistema;
- L, C e R = Elementos do filtro.

Entretanto, vale ressaltar que é comum referir-se a fatores de qualidade de reatores ou de capacitores como elementos isolados, sendo, portanto, outra equação. O fator de qualidade dos filtros sintonizados também pode ser visto como uma medida do grau de seletividade desses circuitos quanto às frequências harmônicas. Quanto maior for o fator Q, mais seletivo será o filtro, ou seja, ele impedirá cada vez mais a absorção das correntes harmônicas de frequências diferentes daquela de sintonia.

O sistema elétrico tem experimentado um aumento significativo na capacidade de geração, transmissão e distribuição, juntamente com a ampliação das

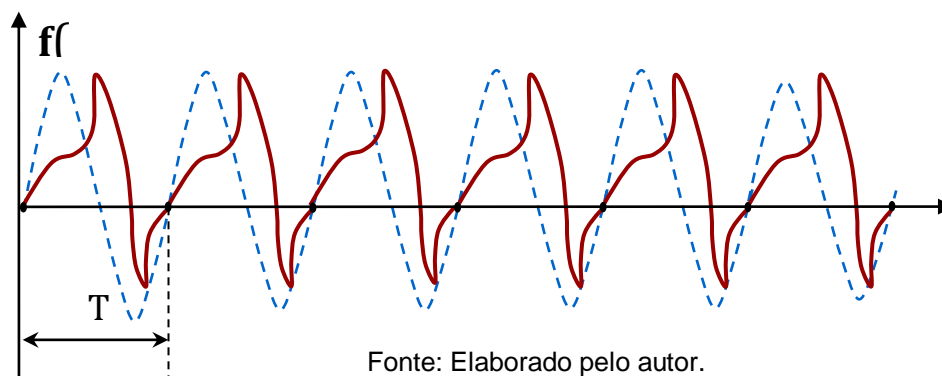
cargas não lineares em todos os níveis de fornecimento. Essas cargas não lineares, também conhecidas como "cargas elétricas especiais", provocam distorções de tensão e/ou corrente harmônica nas redes elétricas, comprometendo o funcionamento do sistema e de seus equipamentos. A presença de harmônicos é indesejável em sistemas elétricos, pois causa perdas financeiras e operacionais tanto para operações quanto para consumidores.

2.3 Definição de Harmônicos

As distorções harmônicas são perturbações nas formas de onda de tensão e corrente, que ocorrem devido à presença de diversas frequências além da frequência fundamental de um sistema elétrico. Essas distorções são causadas por cargas não lineares, que incluem dispositivos eletrônicos e equipamentos industriais, como inversores de frequência, fontes de alimentação ininterrupta (UPS) e variadores de velocidade (Bollen; Gu, 2006).

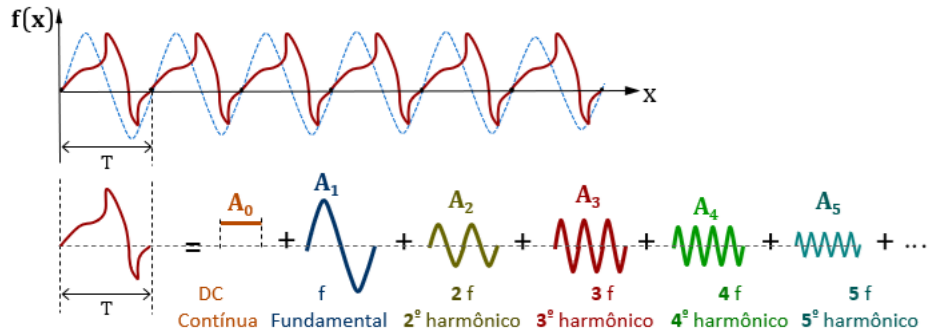
Os harmônicos são distorções nas formas de onda de tensão e corrente que ocorrem com frequências múltiplas da frequência fundamental. A formulação de uma onda distorcida em componentes harmônicos é feita utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Figura 2 - Formulação de ondas.



2.3.1 Série de Fourier

Figura 3 - Sinal periódico.



Fonte: Elaborado pelo autor

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega t + a_1) + A_2 \cos(2\omega t + a_2) + \dots$$

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega t + a_1) + A_2 \cos(2\omega t + a_2) + A_3 \cos(3\omega t + a_3) + \dots$$

A_0 : Componente Contínua do Sinal Periódico

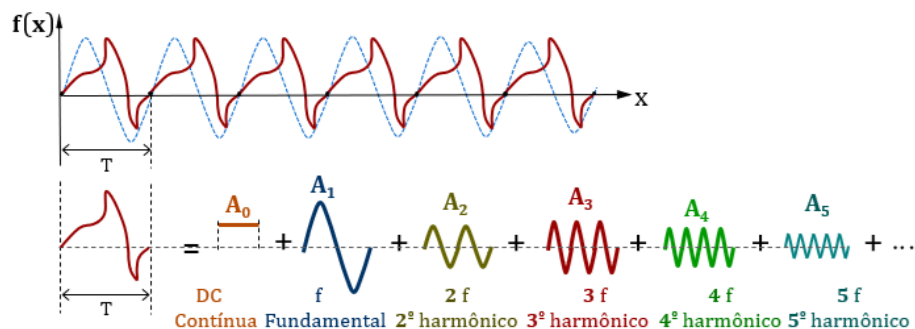
A_1, A_2, A_3, \dots : Amplitudes das Componentes Harmônicas

a_1, a_2, a_3, \dots : Fases das Componentes Harmônicas

Um sinal periódico poderá ser composto pela sobreposição de um número elevado de sinais senoidais de frequências múltiplas da frequência do sinal original, acrescido de um sinal constante, que poderá ser nulo.

2.3.1.1 Medida da Distorção da Forma de Onda

Figura 4 - Distorção da forma de onda.

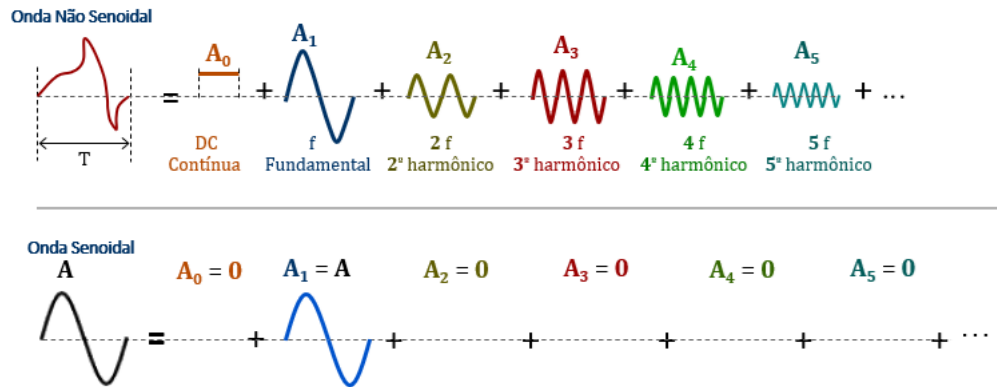


$$THD = \left(\frac{1}{A_1} \right) \cdot \sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + A_5^2 + \dots + A_n^2} \cdot 100 \% \text{ Distorção Harmônica}$$

Fonte: Elaborado pelo autor

2.3.1.2 Determinação da Distorção de Sinais Periódicos

Figura 5 - Distorção de Sinais Periódicos.



Fonte: Elaborado pelo autor

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega t + a_1) + A_2 \cos(2\omega t + a_2) + A_3 \cos(3\omega t + a_3) + \dots$$

$$THD = (1/A_1) \cdot \sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + A_5^2 + \dots + A_H^2} \cdot 100\% = 0$$

2.3.1.3 Componentes Harmônicas: Ordem - Frequência – Sequência

Tabela 1 - Representação dos componentes Harmônicos

Componentes Harmônicas		
Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+

5	300	-
6	360	0
7	420	+
...
h	60 x h	

- Positiva → $h = 3k + 1$
- Negativa → $h = 3k - 1$
- Zero → $h = 3k$

2.3.2 Caracterização de Harmônicos em Sistema de Geração Eólica

A variação harmônica em sistemas de geração eólica refere-se a alterações indesejadas na forma de onda de tensão ou corrente elétrica, ocasionadas pela presença de múltiplas frequências além da frequência fundamental (60 Hz). Tais distorções são principalmente introduzidas pelos seguintes elementos:

2.3.2.1 Origem das Harmônicas:

- **Conversores Eletrônicos:** Turbinas eólicas frequentemente utilizam conversores eletrônicos, como inversores e retificadores, para adaptar a energia gerada para a forma necessária para transmissão ou armazenamento.
- **Controladores de Potência:** Os sistemas de controle ajustam a operação das turbinas para otimizar a geração de energia, influenciando também o perfil harmônico devido às variações de carga.

2.3.2.2 Comportamento Variável:

- **Intermitência do Vento:** A natureza variável e intermitente do vento provoca flutuações diretas na geração de energia, resultando em variações na qualidade da energia produzida.

- **Mudanças na velocidade do Rotor:** Alterações rápidas na velocidade do rotor, devido a variações de vento ou operações específicas como a partida do gerador, podem introduzir distorções harmônicas adicionais.

2.3.3 Impacto das Distorções Harmônicas na Rede Elétrica:

O entendimento do impacto das distorções harmônicas é crucial para avaliar a performance de sistemas de geração híbrida. As consequências incluem:

- **Superaquecimento e Perdas de Potência:** O aquecimento excessivo em componentes elétricos devido a harmônicos pode levar a perdas de potência aumentadas.
- **Interferência Eletromagnética:** Harmônicos podem interferir com sistemas de comunicação e outros equipamentos eletrônicos, degradando a operação geral do sistema.
- **Queda de Eficiência Energética:** A presença de frequências harmônicas pode reduzir a eficiência dos sistemas de geração e conversão de energia.
- **Degradação de Equipamentos:** Equipamentos submetidos a uma alta carga de distorções harmônicas podem sofrer degradações mais rápidas, resultando em falhas prematuras.

Além das causas mencionadas, é crucial entender o impacto das distorções harmônicas no desempenho dos sistemas de geração híbrida. Elas podem causar superaquecimento, aumento de perdas de potência, interferência eletromagnética e queda de eficiência energética, afetando a confiabilidade do sistema (Alsakati et al., 2021).

- **Qualidade da Energia:** Harmônicos elevados podem degradar equipamento.
- **Interferência com outros equipamentos:** A presença de harmônicos pode causar interferências eletromagnéticas, afetar a geração.

2.3.4 Efeitos das Distorções Harmônicas:

- **Vibrações e Ruídos:** Harmônicos são capazes de induzir vibrações mecânicas e ruídos em motores e transformadores, o que pode acelerar o desgaste desses equipamentos.

- **Falhas em Equipamentos:** A exposição contínua a altos níveis de harmônicos pode aumentar a taxa de falhas de dispositivos elétricos e eletrônicos.

Estes aspectos destacam a importância de implementar estratégias eficazes de mitigação de harmônicos e de design robusto de sistemas para garantir a confiabilidade e a eficiência operacional em instalações de geração eólica.

2.4 Avaliação da Distorção Harmônica de Tensão

A avaliação da distorção harmônica de tensão é realizada por meio do Índice de Distorção Harmônica de Tensão Individual (DTHI). Esse índice corresponde ao valor percentual da relação entre a tensão harmônica de ordem h (V_h) e a tensão na frequência fundamental (V_1), ambas medidas em volts (Teixeira, 2009).

Para essa avaliação, são utilizados os indicadores DTHI e DTHTS95%, considerando o percentil 95 dos dados coletados durante uma campanha de medição ao longo de sete dias consecutivos. O DTHTS95% é obtido a partir de medições realizadas em intervalos de 24 horas, considerando valores integralizados a cada 10 minutos. Esses indicadores permitem uma avaliação robusta da distorção harmônica de tensão, identificando os períodos de maior impacto e proporcionando uma análise detalhada da qualidade de energia fornecida (ONS, 2021).

A distorção de tensão harmônica total (DTHT) corresponde ao valor obtido da raiz quadrada do somatório das DTHI de ordens 2 a 50. O desempenho da rede básica em relação à distorção harmônica de tensão é avaliado comparando os indicadores DTHI e DTHTS95% com os respectivos limites globais e individuais, definidos com base em campanhas de medição e aplicados ao Plano de Ação Corretiva (PAC), tais como:

$$DTHI_h = 100 \frac{V_h}{V_1} \quad [03]$$

A distorção de tensão harmônica total (DTHT) corresponde ao valor obtido da raiz quadrada do somatório das DTHI de ordens 2 a 50:

$$DTHT = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} DTHI \frac{2}{h}} \quad [04]$$

O desempenho da rede básica quanto à distorção harmônica de tensão é avaliado a partir da comparação dos indicadores DTHI e DTHTS95% com os respectivos limites globais e individuais. Os limites globais, obtidos por meio de campanhas de medição e aplicados ao Plano de Ação Corretiva (PAC), são definidos em quadros 1 e 2.

Tabela 2 - Limites globais inferiores para os indicadores DTHI e DTHTS95%

V < 69Kv				V ≥ 69Kv			
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	1,5%		
		≥ 8	1%			≥ 8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥ 27	1%			≥ 27	0,5%		
DTHTS95%=6%				DTHTS95%=3%			

Fonte: ONS, 2021.

Assim, os limites globais superiores relativos aos indicadores DTHTS95% para V < 69 kV e V ≥ 69 kV são, respectivamente, 6% e 3%.

O Quadro 2 apresenta os critérios de aceitação para novas instalações quanto aos limites individuais (da 2ª à 50ª ordem) e totais (DTHTS95%). Esses

limites são aplicados nas etapas de estudo de pré-instalação de novos empreendimentos que possuem equipamentos com características não lineares (ONS, 2008).

Tabela 3 - Distorções Harmônicas - Limites Globais Recomendados

Valores de Tensão	Distorção Harmônica	
	Individual %	Total %
V<1KV	5,0	8,0
1KV<V≤69KV	3,0	5,0
69KV<V≤161KV	1,5	2,5
V>161KV	1,0	1,5

Fonte: ONS, 2021.

Além disso, os Quadros 3 e 4 apresentam os requisitos do PRODIST Módulo 8 e Submódulo 2.8, que detalham as distorções aceitáveis e os limites máximos que o sistema deve apresentar para que o desempenho seja considerado adequado (ONS, 2008).

Tabela 4 - PRODIST - Módulo 08

Distorções Harmônicas de Tensão	
Valores de Tensão	THD (%)
V<1KV	10,0
1KV<V≤13.8KV	8,0
13.8KV<V≤69KV	6,0
69KV<V≤230KV	3,0

Fonte: ONS, 2021.

Tabela 5 - PROREDE - Submódulo 2.8

Distorções Harmônicas de Tensão	
Valores de Tensão	THD (%)
V<69KV	8,0

V > 69KV	4,0
h ≤ 50	

Fonte: ONS, 2021.

2.5 Estratégias de Mitigação de Distorções Harmônicas

A mitigação de distorções harmônicas através do uso de filtros é crucial para manter a qualidade da energia elétrica e assegurar a eficiência operacional de equipamentos elétricos e eletrônicos. Portanto, o uso de filtros para mitigar harmônicos não é apenas uma medida de manutenção, mas um investimento estratégico que protege o capital, otimiza o desempenho e reduz os custos operacionais no longo prazo.

A literatura enfatiza a importância de desenvolver estratégias eficazes para mitigar distorções harmônicas em sistemas de geração híbrida. Técnicas como filtros ativos e passivos, conversores de energia com controle de harmônicos e dispositivos de eletrônica de potência avançada têm sido propostas (Afonso et al., 2021). Além disso, a manutenção preventiva e o monitoramento contínuo são cruciais.

Avaliar essas estratégias requer considerar a especificidade de cada sistema de geração híbrida, levando em conta custos associados e benefícios esperados. Uma revisão mais aprofundada da literatura permitirá uma compreensão abrangente das melhores práticas e tecnologias disponíveis. A qualidade da energia impacta diretamente a performance e a vida útil dos equipamentos conectados à rede elétrica. Aqui estão algumas razões pelas quais é importante utilizar filtros para mitigar esses problemas:

1. **Redução de Perdas de Energia:** Harmônicos podem causar perdas significativas de energia em componentes do sistema elétrico, como motores, transformadores e cabos. Essas perdas ocorrem devido ao aquecimento excessivo dos equipamentos provocado por correntes harmônicas, que não contribuem para o trabalho produtivo, mas demandam energia adicional.
2. **Aumento da Eficiência dos Equipamentos:** Equipamentos elétricos são projetados para operar de maneira mais eficiente em uma frequência específica (normalmente a frequência fundamental de 50 ou 60 Hz).

Harmônicos introduzem frequências múltiplas da fundamental, que podem interferir com a operação eficiente dos equipamentos, levando a uma redução geral na eficiência energética.

3. **Redução de Custos Operacionais:** A mitigação de harmônicos pode levar a uma redução significativa nos custos operacionais. Equipamentos que operam em um ambiente com baixa qualidade de energia tendem a ter uma taxa de falhas mais alta e custos de manutenção elevados, devido a danos causados por aquecimento excessivo e estresse nos componentes elétricos.
4. **Aumento da Vida Útil do Equipamento:** A exposição prolongada a distorções harmônicas pode reduzir a vida útil dos equipamentos. Isso ocorre porque o estresse térmico adicional e as vibrações causadas pelos harmônicos podem acelerar o desgaste e a degradação de componentes críticos.
5. **Conformidade com Normas e regulações:** Existem várias normas e regulamentos que estipulam limites para os níveis de harmônicos permitidos em sistemas de energia elétrica. Utilizar filtros para mitigar harmônicos ajuda a garantir a conformidade com essas normas, evitando penalidades e garantindo uma operação contínua e sem interrupções.

2.6 Estratégias de Mitigação de Distorções Harmônicas

O Operador Nacional do Sistema (ONS) fornece informações vitais para o planejamento e análise de instalações eólicas e solares fotovoltaicas, sendo fundamental para os estudos de Qualidade de Energia Elétrica (QEE). A seguir, são destacados os submódulos que detalham o processo de integração de instalações com elementos não lineares à Rede Básica, incluindo os requisitos e responsabilidades envolvidos:

- **Submódulo 2.9:** Define os requisitos mínimos de QEE para a integração à rede.
- **Submódulo 7.8:** Avalia o impacto das instalações não lineares na Rede Básica.
- **Submódulo 6.15:** Foca na gestão da qualidade de energia da Rede Básica.
- **Submódulo 9.7:** Descreve os indicadores de QEE da Rede Básica.

Esses estudos visam identificar a distorção harmônica individual no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) causada por operações em instalações que contêm elementos não lineares, como cargas industriais, geração de energia e componentes de transmissão.

Os harmônicos podem interferir com sistemas de comunicação e controle, comprometendo a estabilidade geral do sistema de energia. Filtros sintonizados e amortecidos são empregados para mitigar esses efeitos, melhorando a confiabilidade e estabilidade do fornecimento de energia. As estratégias adotadas para combater os desafios das distorções harmônicas incluem:

- **Filtros Harmônicos:** Utilização de filtros ativos e passivos para atenuar frequências indesejadas, aprimorando a qualidade da energia. Os filtros ativos são particularmente eficazes em ajustar-se às variações na carga e na produção de harmônicos.
- **Compensadores Estáticos de Reativos (SVCs):** Estabilizam a tensão e corrigem o fator de potência, contribuindo também para a redução dos efeitos das distorções harmônicas.
- **Transformadores Defasadores:** Balanceiam a carga harmônica entre diferentes fases, minimizando o impacto geral das distorções.

2.7 Utilização de Filtros Ativos

2.7.1 Classificação dos Filtros

Os filtros são circuitos projetados para separar sinais elétricos em frequências desejadas e indesejadas. Eles são categorizados em filtros sintonizados e amortecidos, conforme discutido por Alsakati et al. (2021).

2.7.2 Filtros Sintonizados

Os filtros sintonizados são ressonantes em série e possuem baixa impedância resistiva na frequência de sintonia, podendo atuar como compensadores de reativos na frequência fundamental. Na frequência de sintonia ou de ressonância, esses circuitos ressonantes em série apresentam baixa impedância resistiva. Eles são capacitivos para frequências inferiores à frequência de sintonia e indutivos para frequências superiores. Assim, na frequência fundamental, esses filtros podem

funcionar efetivamente como compensadores de reativos, como discutido por Lange e Redlarski (2020) e Teixeira (2009).

$$V(t) = LRCL(t) [05]$$

Figura 6 - Filtro Harmônico Sintonizado.



Fonte: Filtro de Harmônica Sintonizado - Electric Service | Electric Service

A ressonância série é uma condição na qual um circuito contendo pelo menos um indutor e um capacitor apresenta uma impedância de entrada puramente resistiva (Arikan; Kucukaydin, 2020). Conseqüentemente, aplicando este conceito a um circuito série, cuja impedância complexa é dada pela equação [06], observa-se que, ao ajustar a frequência da fonte, existe um valor no qual essa impedância se torna puramente resistiva.

$$Z(w) = R + j[w.L - 1 \frac{w}{C}] [06]$$

Onde, “w” é a frequência angular da fonte de alimentação, e R, L e C são os valores dos componentes indicados. A condição de ressonância, conforme estabelecida acima, aplicada à equação possibilitará a determinação da frequência que anulará a parte imaginária de Z(w):

$$W.l - 1/W.C = 0 \quad [07]$$

Assim, explicitando-se a frequência w na equação, obtém-se a frequência angular de ressonância do circuito série, que é dada por:

$$W_0 = \frac{1}{\sqrt{L.C}} = 2.\pi f_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad [08]$$

Onde, w_0 é a frequência angular de ressonância do circuito RLC. Observa-se na equação que w_0 é função, apenas, dos componentes L e C do circuito. Portanto, esta frequência (w_0) é uma característica do circuito RLC série.

Isto significa que, se a fonte de alimentação (de pulsação w variável) coincidir sua frequência com a frequência w_0 própria do circuito, o fará entrar em ressonância série. Procurando então ilustrar, graficamente, as condições de ressonância série, serão tomados o módulo e o ângulo de fase da impedância do circuito da Figura 3, conforme indicam as equações abaixo:

$$Z_w = \sqrt{R^2 + [W.L - \frac{1}{w.C}]^2} \quad [09]$$

$$\frac{W.L - 1 \frac{w}{c}}{R} [10]$$

Onde:

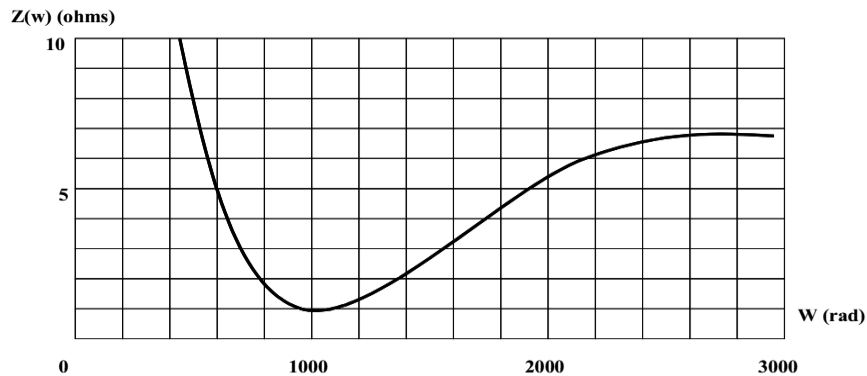
- $Z(w)$: É o módulo da impedância complexa dada por (1), em função da frequência w .
- $\theta(w)$: É o ângulo da impedância $Z(w)$, em função de w . Este ângulo difere de , apenas, pelo sinal oposto, tomando-se na referência a tensão da fonte dada na equação:

$$V(t) = 2V \cos(WT) \quad [11]$$

As representações gráficas das equações citadas, respectivamente, estão ilustradas nas figuras 3 e 4, para um dado circuito RLC série de resistência $R = 1 \Omega$, capacitância $C = 100 \mu F$ e indutância $L = 10 \text{ mH}$, cuja frequência angular ressonante (w_0) é 1000 rad/s.

Pela observação da Figura 3, verifica-se que, na frequência de ressonância, a impedância é mínima. Verifica-se também que o módulo de $Z(\omega)$ aumenta indefinidamente quando “ ω ” tende para zero ou infinito.

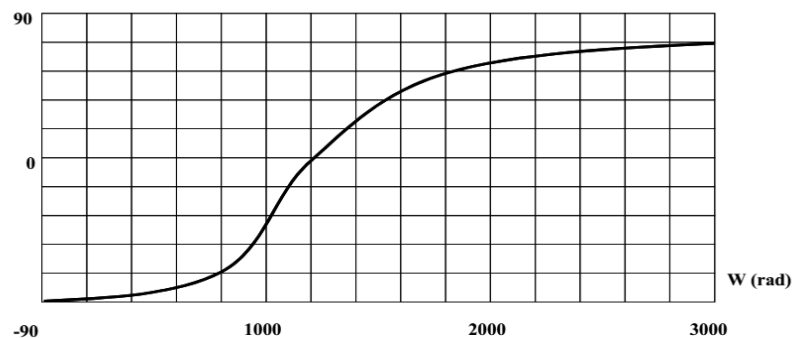
Figura 7 - Impedância de um circuito RLC série versus frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, da Figura 3, conclui-se que o ângulo de $Z(\omega)$ anula-se para $\omega = \omega_0$. Este fato demonstra que, na ressonância série, o circuito será puramente resistivo. Observa-se também que, aumentando a frequência além do ω_0 , os ângulos da impedância são positivos e cada vez mais próximos de $+90^\circ$. Isto implicará que a impedância será predominantemente indutiva nas altas frequências.

Figura 8 - Módulo e Ângulo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Outra forma de ilustrar a ressonância série consiste em analisar o módulo da corrente elétrica que atravessa os elementos R, L e C. Considerando-se, então, o circuito da Figura 5, sua corrente será dada em função da frequência ω , para uma tensão de alimentação de amplitude constante, conforme indica a equação abaixo:

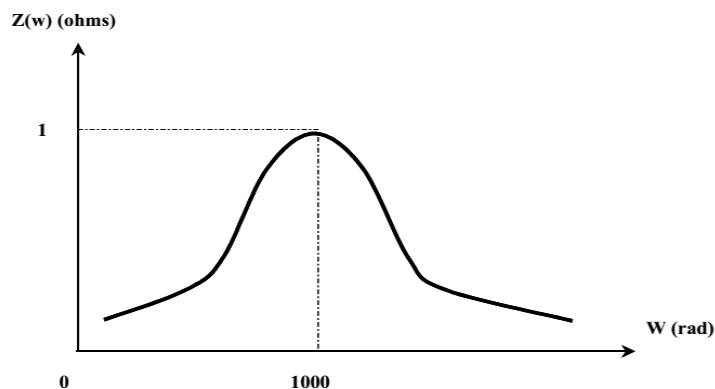
$$I(\omega) = \frac{V(\omega)}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} = V(\omega) \cdot Y(\omega) \quad [12]$$

Onde:

- $I(\omega)$ e $V(\omega)$: São, respectivamente, os módulos da corrente e da tensão de alimentação, em função de ω .
- $Y(\omega)$: É o módulo da admitância do circuito RLC série, que equivale ao inverso de $Z(\omega)$.

Desse modo, admitindo o mesmo circuito ressonante que originou as curvas da Figura 5 e uma fonte de alimentação de frequência variável, porém com amplitude constante de 1 volt eficaz, obtém-se a curva da corrente (em módulo) versus frequência, como ilustra a Figura 5 abaixo:

Figura 9 - Corrente versus frequência para o circuito série.



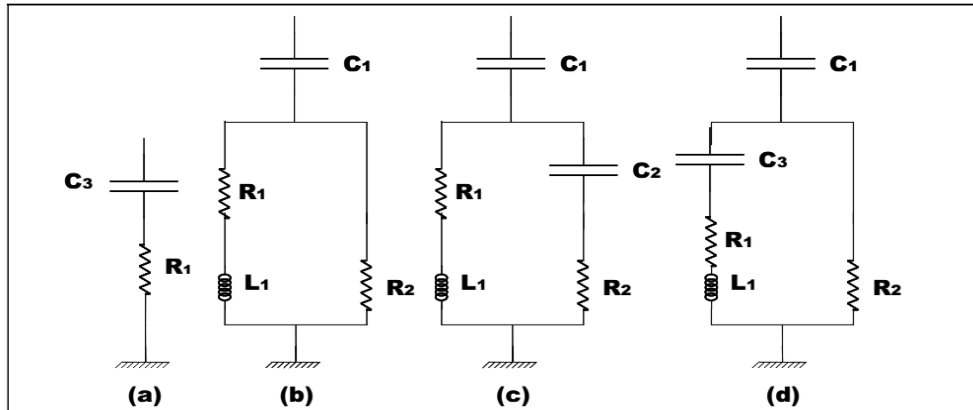
Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, é possível combinar seus elementos de forma a sintonizá-lo em mais de uma frequência, ou seja, corrigir mais de uma ordem de harmônicos com um mesmo filtro, o que pode tornar essa solução atrativa financeiramente.

2.7.3 Filtros Amortecidos

Formados por elementos R, L e C, esses filtros oferecem baixa impedância em uma ampla faixa de frequência. Podem ser de primeira, segunda, terceira ordens ou do tipo "C". A escolha depende dos requisitos de desempenho e perdas de energia. Os modelos dos filtros amortecidos são basicamente de quatro tipos: os filtros amortecidos de primeira, segunda e terceira ordens, e o filtro tipo "C". Estes modelos estão ilustrados na Figura 6.

Figura 10 - Filtros amortecidos: (a) 1ª Ordem. (b) 2ª Ordem. (c) 3ª Ordem. (d) Tipo "C".



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os filtros amortecidos, o de 1ª ordem, ilustrado na Figura 6, não é utilizado em aplicações práticas devido à necessidade de um grande capacitor e às excessivas perdas de energia na frequência fundamental. Por outro lado, os demais filtros amortecidos são amplamente utilizados nos sistemas elétricos, sendo a escolha entre os modelos determinada pelos requisitos de desempenho de filtragem e pelas perdas de energia. Conseqüentemente, devido à diversidade de modelos de filtros amortecidos e considerando as peculiaridades de cada um, especialmente no que diz respeito aos parâmetros característicos, eles serão analisados separadamente.

2.8 Procedimentos de Medições e Estudos

2.8.1 Medições de Harmônicas nos Sistemas Elétricos de Potência

Para avaliar as componentes harmônicas em sistemas elétricos com cargas não lineares, a medição direta é fundamental. Os critérios de medição adotados pelas concessionárias brasileiras são baseados em recomendações práticas e experiências internacionais (ONS, 2021). Os equipamentos de medição incluem:

1. **Método Simples para a Constatação de Correntes e Tensões Harmônicas:** A visualização da forma de onda através de osciloscópios

oferece uma primeira indicação da presença de harmônicas, embora não permita uma análise detalhada dos níveis harmônicos.

2. **Medição através de Analisadores de Harmônicos e de Espectro:** Os analisadores de harmônicos e de espectro são utilizados para análises detalhadas das componentes harmônicas. Enquanto os analisadores de espectro cobrem toda a faixa de frequências, os analisadores de harmônicos se concentram apenas nas frequências harmônicas desejadas. Equipamentos modernos, como o NOWA-1 AC Power Line Harmonic Analyzer (Alemanha) e o HP3582A - Spectrum Analyser (EUA), são amplamente utilizados para medições em tempo real.

2.9 Estudos de Harmônicos e Simulação Computacional de Sistemas Elétricos de Potência

2.9.1 Parâmetros Elétricos do Sistema

Para realizar estudos de fluxo harmônico, é necessário coletar diversos parâmetros elétricos do sistema, incluindo potência de curto-circuito, tensões fundamentais, injeções de correntes harmônicas, dados nominais das cargas e dos transformadores.

2.9.2 Distorções de Tensão e Corrente

A análise de Fourier é utilizada para decompor ondas de tensão ou corrente distorcidas em suas componentes fundamentais e harmônicas. Isso permite uma compreensão detalhada das distorções presentes no sistema.

$$V_{(t)} = \sqrt{2x}.V_1.x.\sin \sin (W_{t+\theta_1}) + \sqrt{2x}.V_2.x.\sin \sin (W_{t+\theta_2}) + \sqrt{2x}.V_3.x.\sin \sin (W_{t+\theta_3}) + \dots [13]$$

- Corrente:

$$I_{(t)} = \sqrt{2x}.I_1.x.\sin \sin (W_{t+\theta_1}) + \sqrt{2x}.I_2.x.\sin \sin (W_{t+\theta_2}) + \sqrt{2x}.I_3.x.\sin \sin (W_{t+\theta_3}) + \dots [14]$$

Onde:

- **V1, I1** => Valores eficazes da tensão e corrente de frequência fundamental.

- **V_h, I_h** => Valores eficazes da tensão e da corrente de frequência harmônica de ordem n (n = 2, 3,...).
- **h, φ_h** => Ângulos de fase das componentes de tensão e corrente respectivamente (n = 1, 2, 3,...). O conhecimento da amplitude, ordem e ângulo de fase de cada componente harmônica de uma onda periódica distorcida determina completamente esta onda.

No entanto, muitas vezes, é mais adequado descrever uma forma de onda distorcida através de outros parâmetros, principalmente quando se deseja avaliar o efeito total das frequências harmônicas sobre o sistema elétrico e seus componentes. Os parâmetros mais usuais são:

Fator de Distorção Harmônica Total de Tensão:

$$DHT = \sqrt{\frac{\sum_2^n V_h^2}{V_1}} [15]$$

Fator de Distorção Harmônica Total de Corrente:

$$DHI = \sqrt{\frac{\sum_2^n I_h^2}{I_1}} [16]$$

Além dos parâmetros de distorção definidos anteriormente, é interessante que sejam redefinidos alguns conceitos e expressões largamente empregados em sistemas elétricos, porém adaptados para condições de tensão e corrente distorcidas.

Valores Eficazes de Tensão e Corrente:

$$V_{eff} = \sqrt{2} \sum V_h \quad (\text{Soma Linear}) [17]$$

Potências Ativa (P) e Reativa (Q)

$$I_{eff} = \sqrt{\sum I_h^2} \quad (\text{soma quadrática}) [18]$$

Potências Ativa (P) e Reativa (Q):

$$P = \sum V_h \cdot I_h \cdot \cos(h - \varphi_h) [19]$$

$$Q = \sum V_h \cdot I_h \cdot \sin(h - \varphi_h) [20]$$

Assim, com as informações básicas fornecidas, inicia-se a seguir um estudo mais detalhado sobre harmônicas e as fontes geradoras, bem como as formas de detecção, estudo e solução dos problemas causados por elas nos sistemas elétricos de potência.

2.10 Caso de Estudo: Campo Eólico de Casa Nova - Eletrobras Chesf

Este estudo de caso se concentra na identificação, na redução das distorções harmônicas, na análise do comportamento do sistema com e sem a instalação de filtros e na melhoria da qualidade da energia elétrica na geração eólica do campo de Casa Nova - Eletrobras Chesf.

A manutenção da qualidade da energia é essencial para garantir a confiabilidade, eficiência e proteção dos sistemas elétricos e dos equipamentos conectados. Justifica-se pela necessidade de conformidade com normas, mitigação de impactos de cargas não lineares, integração de fontes renováveis e satisfação dos consumidores. Além disso, promove o desenvolvimento tecnológico e a modernização do setor elétrico, resultando em um sistema elétrico adequado.

2.11 Premissas Básicas para Procedimentos de Medições e Estudos de Harmônicos

2.11.1 Medições de Harmônicas nos Sistemas Elétricos de Potência

Medições diretas são realizadas utilizando instrumentos de última geração para avaliar as componentes harmônicas em sistemas elétricos com cargas não lineares. Essas medições são essenciais para entender a extensão e o impacto das distorções harmônicas e para a implementação de estratégias eficazes de mitigação.

2.11.2 Medição através de Analisadores de Harmônicos e de Espectro

Analisadores de harmônicos e de espectro são utilizados para fornecer análises detalhadas das componentes harmônicas. Estes equipamentos modernos permitem realizar medições em tempo real, oferecendo dados precisos e imediatos, que são cruciais para a avaliação rápida e eficaz da qualidade da energia elétrica em ambientes industriais e comerciais.

2.11.3 Estudos de Harmônicos e Simulação Computacional de Sistemas Elétricos de Potência

Os estudos e simulações computacionais de sistemas elétricos de potência formam a base para entender e prever o comportamento das distorções harmônicas. Estes estudos utilizam métodos avançados, como a previsão em séries temporais e modelos de Redes Neurais Artificiais (RNAs), que são particularmente úteis no setor energético para prever padrões de consumo e identificar tendências futuras.

2.12 Métodos De Previsão Em Séries Temporais

A previsão de séries temporais é uma técnica estatística que analisa dados de séries temporais para extrair características significativas e gerar previsões sobre futuros eventos. No contexto energético, isso é aplicado para antecipar demandas de consumo, eficiência de geração e potenciais falhas de sistema. Destaca-se a importância dos modelos de Redes Neurais Artificiais (RNAs) devido à sua robustez e versatilidade na previsão de dados que evoluem ao longo do tempo.

Principais Pontos:

1. **Definição de Séries Temporais:** Conjuntos de medidas ordenadas cronologicamente em intervalos específicos, presentes em fenômenos físicos e químicos;
2. **Componentes Principais:** Tendência, sazonalidade e resíduos, que descrevem o movimento geral, padrões repetidos e valores remanescentes, respectivamente;
3. **Importância dos Métodos de Previsão:** Crucial em diversos setores, especialmente no energético, para prever padrões de consumo e otimizar a gestão de recursos;
4. **Classificação Metodológica:** Métodos podem ser univariados ou multivariados, dependendo da variável dependente do tempo. Além disso, podem ser paramétricos ou não paramétricos, baseados em assumir ou não uma estrutura fixa subjacente aos dados.

A importância de debater este método, e a razão pela qual ele é aplicado em detrimento de outros, reside na sua robustez e versatilidade em modelar e prever

dados que evoluem ao longo do tempo. Porém, para adentrar neste campo, é imperativo primeiro compreender os conceitos básicos que fundamentam as séries temporais e suas previsões.

As séries temporais são conjuntos de medidas coletadas e ordenadas cronologicamente em intervalos de tempo específicos. Esta definição sublinha a ubiquidade das séries temporais em fenômenos físicos e químicos, onde variáveis evoluem significativamente com o tempo, tornando a previsão de séries temporais uma abordagem valiosa em quase todas as disciplinas científicas (Torres et al., 2020).

Historicamente, as abordagens estatísticas para a previsão de séries temporais ganharam proeminência desde a década de 1970, particularmente aquelas baseadas na metodologia Box-Jenkins. Contudo, com o advento do aprendizado de máquina e seus métodos avançados de regressão, uma pluralidade de modelos foi proposta, cada um buscando otimizar a precisão das previsões (Torres et al., 2020; Deba et al., 2017).

Uma série temporal é caracteristicamente dividida em três componentes principais: 1. tendência, 2. sazonalidade e 3. resíduos. A tendência descreve o movimento geral da série ao longo do tempo, independentemente de variações sazonais ou irregulares. A sazonalidade identifica padrões que se repetem em intervalos regulares, enquanto os resíduos consistem nos valores remanescentes após a remoção da tendência e da sazonalidade, podendo, em alguns casos, ocultar esses componentes devido à sua magnitude (Torres et al., 2020; Deba et al., 2017).

A aplicabilidade dos métodos de previsão em séries temporais transcende vários setores, demonstrando sua versatilidade e importância crítica em inúmeras aplicações. Especialmente no setor energético, a capacidade de prever padrões e tendências de consumo de energia assume uma relevância fundamental para a gestão eficiente e sustentável dos recursos (Deba et al., 2017).

A instalação de sistemas energéticos eficientes, acompanhada de estratégias operacionais e de gestão apropriadas, requer a análise contínua de dados de séries temporais. Essa análise permite não apenas a otimização do desempenho energético de edificações, mas também a identificação precoce de necessidades de

manutenção, garantindo a sustentabilidade e eficiência energética a longo prazo (Deba et al., 2017).

Adentrando na classificação metodológica, os métodos de previsão de séries temporais podem ser categorizados, de acordo com Torres et al. (2020), como univariados, que se concentram em uma única variável dependente do tempo, ou multivariados, que abordam múltiplas variáveis dependentes do tempo. Essa distinção é crucial para entender a complexidade e o alcance dos modelos de previsão, uma vez que a escolha entre abordagens univariadas e multivariadas pode influenciar significativamente a precisão e a aplicabilidade das previsões.

Além disso, os métodos de previsão são divididos em paramétricos e não paramétricos. Os métodos paramétricos assumem uma estrutura fixa subjacente aos dados e ajustam parâmetros dentro dessa estrutura, enquanto os não paramétricos não fazem tais suposições, oferecendo maior flexibilidade ao custo de maior complexidade computacional (Deba et al., 2017).

Em contraste, os métodos não paramétricos, que ganharam destaque nas últimas décadas, baseiam-se na capacidade de aprender padrões diretamente dos dados, sem a necessidade de assumir previamente uma estrutura fixa. Essa abordagem não paramétrica beneficia-se significativamente do aprendizado iterativo e da melhoria contínua na precisão das previsões, adaptando-se eficientemente a uma ampla gama de problemas de séries temporais.

No contexto energético, a seleção entre abordagens univariadas ou multivariadas, bem como entre métodos paramétricos e não paramétricos, é determinada pelo tipo de dados disponíveis e pelos objetivos específicos da previsão. Visando focar nesta segunda divisão e expressar de forma resumida o debate sobre métodos paramétricos e não paramétricos, além de apresentar exemplos dessas técnicas de análise e previsão em séries temporais, o quadro abaixo resume essas informações de maneira concisa.

Tabela 6 - Métodos Paramétricos e Não Paramétricos

Tipo de Método	Descrição	Exemplos
Métodos Paramétricos	Pressupõem que os dados seguem um modelo específico, cuja estrutura pode	Modelo de Suavização Exponencial (ES),

	ser descrita por um conjunto finito de parâmetros. Estes modelos são adequados para séries temporais que exibem padrões regulares e podem ser ajustados aos dados historicamente observados.	ARMA (AutoRegressive Moving Average), ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average)
Métodos Não Paramétricos	Não fazem suposições específicas sobre a estrutura subjacente dos dados. São flexíveis e capazes de modelar relações complexas e não lineares entre os dados, adaptando-se às peculiaridades dos dados sem a necessidade de especificar uma forma funcional a priori.	Redes Neurais (NN), Regressão Vetorial de Suporte (SVR), Árvores de Regressão, Processo Gaussiano (GP)

Fonte: Elaboração própria. Com base em Gautam e Singh (2020).

Tratando primeiramente dos métodos paramétricos, um bom ponto de partida são os modelos de suavização exponencial. Esses modelos introduzem uma abordagem ad hoc, mas eficaz, para lidar com componentes de tendência e sazonalidade em séries temporais. Este método, embora inicialmente desprovido de uma base estatística robusta, foi posteriormente consolidado através de pesquisas que o vincularam à decomposição Wold, estabelecendo assim uma conexão teórica com os modelos ARIMA (Gautam e Singh, 2020).

Avançando na complexidade, os modelos ARMA representam uma síntese de processos autorregressivos (AR) e de média móvel (MA), fundamentada na compreensão de que séries temporais estacionárias podem ser eficientemente modeladas e previstas através da combinação dessas duas abordagens. Esta inovação, desenvolvida a partir dos conceitos de estocástica, permitiu uma modelagem mais precisa de dados temporais, estabelecendo um alicerce para análises mais sofisticadas (Gautam e Singh, 2020). Por último, o modelo ARIMA surge como uma evolução natural dos modelos ARMA, incorporando um processo de diferenciação para tornar os dados estacionários, ou seja, adequados para análise.

Desenvolvendo de forma mais abrangente os métodos não paramétricos, destacamos a importância e a diversidade dessas técnicas, conforme meticulosamente revisado por Gautam e Singh (2020). As árvores de regressão CART exemplificam uma das variantes mais empregadas dentro deste conjunto de técnicas. Este método participa recursivamente no espaço de entrada, construindo um modelo que pode capturar as nuances das relações entre variáveis de entrada e saída. Tal abordagem tem sido valiosa em uma ampla gama de aplicações, inclusive

no âmbito ambiental, sublinhando sua adaptabilidade a diferentes tipos de dados e contextos de pesquisa (Gautam e Singh, 2020).

Ao avançarmos na discussão, encontramos o método de regressão vetorial de suporte (SVR), que, conforme elucidado por Gautam e Singh (2020), enfrenta desafios relacionados à seleção de parâmetros. A precisão do SVR pode ser comprometida pela dificuldade em definir os parâmetros ótimos, uma limitação que tem motivado a aplicação de técnicas de otimização como o algoritmo de recozimento simulado e o algoritmo genético.

Outro pilar importante entre os métodos não paramétricos são os processos gaussianos (GP). Os GPs oferecem uma abordagem profunda para a inferência bayesiana, assumindo que todos os dados podem ser representados por uma distribuição conjunta. Isso facilita a modelagem de incertezas e a realização de previsões robustas. Embora relativamente recentes quando comparados a outras técnicas de aprendizado de máquina, os GPs têm emergido como uma ferramenta poderosa na modelagem não linear devido à sua abordagem fundamentada na teoria das probabilidades.

Por fim, as redes neurais destacam-se pela sua capacidade de atuar como aproximadores universais. A versatilidade e o poder computacional das redes neurais permitem a modelagem de relações complexas e não lineares com uma precisão notável. Esta característica é particularmente relevante para tarefas de previsão de carga, onde a capacidade de processamento paralelo e a adaptabilidade das redes neurais a uma ampla classe de funções se mostram fundamentais (Gautam e Singh, 2020). Isso as torna ideais para:

- **Prever o consumo de energia:** RNAs podem aprender padrões de consumo históricos e prever futuras demandas.
- **Identificar tendências de distorções harmônicas:** Ao alimentar RNAs com dados de qualidade de energia, elas podem aprender a identificar padrões de distorções harmônicas e prever sua ocorrência.

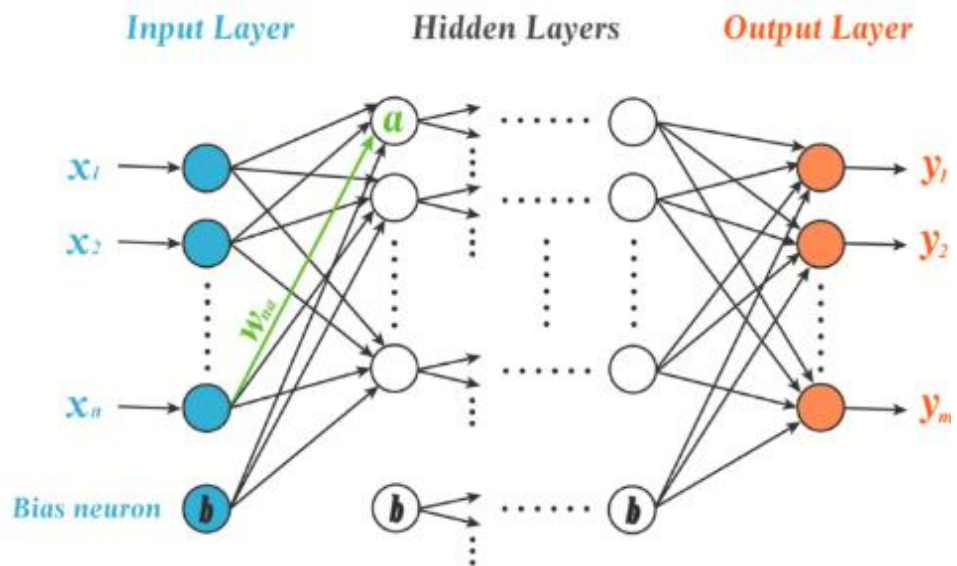
Os modelos de Redes Neurais Artificiais (RNAs) oferecem uma gama de estruturas e algoritmos que podem ser combinados para melhorar sua aplicabilidade e desempenho de aprendizagem (Dragović, 2022). A escolha da estrutura da rede é

crucial para determinar sua eficácia em resolver problemas específicos. Alguns dos modelos de RNA mais conhecidos incluem:

- **Perceptron Multicamadas (MLP):** É um modelo típico de RNA feedforward, composto por uma camada de entrada, várias camadas ocultas e uma camada de saída. O MLP é amplamente utilizado e poderoso computacionalmente. Ele expressa uma relação de mapeamento entre elementos e é a base da modelagem de RNAs.
- **Rede Neural de Função de Base Radial (RBFNN):** Usa funções de base radial como função de ativação. É comumente usado em problemas de classificação e regressão.
- **Rede Neural Convolutiva (CNN):** É amplamente utilizado em tarefas de reconhecimento de imagens e visão computacional, incluindo reconhecimento de caracteres manuscritos e imagens coloridas. Foi fundamental para avanços significativos nessas áreas.
- **Rede de Kohonen (SOM):** Também conhecida como Mapa Auto-organizado, é usada para classificação e agrupamento de dados. Possui uma camada de entrada e uma camada de competição, onde os neurônios competem para responder aos dados de entrada.
- **Rede Neural Recorrente (RNN):** Adequada para lidar com dados de séries temporais, como reconhecimento de voz, tradução de idiomas e síntese musical. Possui memória, onde a saída de um neurônio está relacionada não apenas à entrada atual, mas também à saída de neurônios anteriores.

Esses modelos de RNAs têm aplicações específicas em diferentes domínios, dependendo das características dos dados e dos objetivos da análise. A escolha do modelo mais adequado depende do problema em questão e das necessidades do projeto. A figura abaixo ilustra a estrutura básica de um perceptron multicamadas (MLP).

Figura 11 - Estrutura de um perceptron multicamadas (MLP).



Fonte: Redes Neurais Artificiais – IBM1108

O Teorema da Aproximação Universal estabelece uma base teórica sólida para o uso de redes neurais Multi-LayerPerceptron (MLP) na modelagem de uma vasta gama de funções complexas, o que é crucial para aplicações que envolvem análises preditivas e de comportamento, como a identificação de distorções harmônicas em sistemas de energia. Este teorema sugere que uma MLP pode teoricamente aproximar qualquer função contínua em um compacto, desde que possua uma quantidade suficiente de neurônios na camada oculta e utilize funções de ativação não lineares adequadas (Verma e Kurma, 2022).

2.12.1 Algoritmo de Retropropagação e Método da Descida do Gradiente

O algoritmo de retropropagação (BP) é fundamental para o treinamento de MLPs, permitindo a eficiente propagação de erros através da rede para atualizar os pesos:

1. **Propagação Direta:** Durante esta fase, a entrada é processada camada por camada até a saída da rede, onde o erro entre a saída prevista e a real é calculado.
2. **Retropropagação do Erro:** O erro é então propagado de volta através da rede, calculando-se o gradiente do erro para cada peso. Este gradiente indica como o erro muda em relação a cada peso.
3. **Atualização de Pesos via Descida do Gradiente:** Usando o gradiente calculado, o método da descida do gradiente (GD) ajusta os pesos. O ajuste é feito na direção oposta ao gradiente para minimizar o erro. A taxa de aprendizagem determina o tamanho do passo da atualização.

2.12.2 Desafios e Prática

Embora o BP e o GD sejam eficazes, eles apresentam desafios, como o risco de convergir para mínimos locais ao invés de globais, especialmente em funções de erro complexas e altamente não lineares. Além disso, a eficiência do aprendizado não depende apenas da arquitetura da rede, mas também da qualidade e diversidade dos dados de treinamento, bem como da configuração dos parâmetros de treinamento (como taxa de aprendizagem e *momentum*).

2.12.3 Implicações para a Análise Harmônica

No contexto da análise harmônica em sistemas de geração de energia eólica, como o Parque Eólico de Casa Nova, as MLPs podem ser utilizadas para modelar e prever as distorções harmônicas a partir de dados históricos e em tempo real. Isso pode levar a um melhor entendimento dos impactos dessas distorções e à implementação de medidas corretivas mais eficazes para manter a qualidade e a estabilidade do fornecimento de energia.

2.13 Revisão Crítica e Comparativa das Aplicações de Redes Neurais Artificiais

Os estudos sobre a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) na análise de dados em sistemas elétricos e ambientais têm se multiplicado nas últimas décadas, cada um contribuindo de maneira significativa, mas com suas limitações e especificidades.

Tratando de um tema semelhante à presente dissertação, Neto (2024) desenvolveu uma metodologia detalhada usando RNA em Python para analisar dados como tensão, corrente e distorção harmônica total (THD). Seus resultados mostraram alta acurácia, com valores superiores a 90% na maioria das medições contínuas, e uma perda final de 0,0854, sugerindo um modelo bem ajustado sem *overfitting*.

No entanto, ele enfrentou desafios com a detecção de ruído, resultando em pequenos erros de consumo energético durante períodos sem carga. Mesmo com esses desafios, a metodologia mostrou-se eficaz na identificação precisa de padrões harmônicos em sistemas elétricos.

Por outro lado, Silva (2014) focou na modelagem do oxigênio dissolvido (OD) em corpos hídricos usando RNA, obtendo uma baixa taxa de erro com poucos dados. Sua pesquisa destacou a simplicidade e o baixo custo computacional das RNAs para modelar sistemas complexos. Contudo, a aplicabilidade do estudo ficou restrita a parâmetros físico-químicos específicos, limitando sua generalização para outros contextos ambientais.

No campo das distorções harmônicas, Sousa (2020) comparou métodos de detecção de harmônicas em correntes elétricas utilizando tanto o domínio da frequência quanto do tempo. Ambos os métodos mostraram eficácia semelhante, com uma divergência média de 1,2% nas harmônicas detectadas. Sua pesquisa permitiu monitoramento remoto contínuo, mas não explorou profundamente as implicações dos resultados para a mitigação de distúrbios harmônicos em larga escala.

Candeia (2021) investigou a identificação de cargas elétricas residenciais usando RNAs e máquinas de estados finitos, demonstrando que ambas as abordagens são eficazes, com a RNA apresentando melhor desempenho geral. A pesquisa, no entanto, apontou a necessidade de considerar as características específicas do sistema de aplicação, como o número de cargas e variações de tensão, para escolher o método mais adequado.

Ademais, Kanegae (2011) apresentou um estudo sobre a identificação de componentes harmônicas em sistemas elétricos residenciais usando RNAs, com

dados reais coletados de ensaios laboratoriais. A pesquisa comprovou a superioridade das RNAs sobre as TRFs na extração de componentes harmônicas, especialmente em janelas amostrais pequenas. No entanto, sua aplicação prática ficou restrita a cargas não lineares comuns em residências, sem explorar outros tipos de sistemas elétricos.

Bernardino (2022) propôs um método de estimativa harmônica seletiva utilizando redes neurais profundas (DNN), focando na precisão e seletividade das amplitudes e ângulos de fase dos harmônicos de ordens específicas. A metodologia mostrou-se eficaz na atenuação da distorção harmônica e no monitoramento da qualidade da energia elétrica. No entanto, a implementação prática do modelo pode exigir recursos computacionais significativos, limitando sua aplicabilidade em sistemas com menor infraestrutura.

Já Souza (2020) demonstrou a eficácia das RNAs na avaliação dos impactos causados por harmônicos na rede elétrica, validando sua metodologia através de comparações com simulações computacionais e estudos de caso. Seu trabalho destacou a importância da norma PRODIST na regulamentação das distorções harmônicas, mas não abordou extensivamente as possíveis melhorias na qualidade da energia além dos casos estudados.

Diante desses estudos, a presente dissertação se destaca ao aplicar um modelo computacional baseado em LSTM para a predição de distorções harmônicas em sistemas de geração eólica. Como será visto nas seções posteriores deste trabalho, utilizando técnicas de *Dropout* para mitigar o *overfitting*, a pesquisa demonstrou alta precisão nas predições e ofereceu insights valiosos para a gestão e operação de sistemas de geração eólica.

Além disso, diferentemente dos estudos anteriores, esta dissertação não se limita à análise de sistemas elétricos tradicionais ou parâmetros físico-químicos específicos, mas expande a aplicação das RNAs para promover sustentabilidade e eficiência energética em um contexto de diversificação das fontes de energia, abrindo novas perspectivas para a otimização da qualidade da energia em sistemas de geração renovável.

3 METODOLOGIA

Este capítulo delinea as diretrizes metodológicas utilizadas para avaliar a qualidade harmônica no Parque Eólico de Casa Nova A, detalhando o modelo adotado e os cenários de simulação implementados. A abordagem metodológica é estruturada em duas fases distintas, visando uma análise compreensiva e robusta das distorções harmônicas no sistema de energia.

3.1 Primeira Fase: Coleta de Dados e Preparação

Escolha dos Ativos:

- **Linha de Transmissão:** A linha 04S3 230kV, conectada à Subestação Sobradinho, foi selecionada por sua importância na transmissão de energia do sistema eólico.

Conexões e Coleta de Dados:

- **Instrumentação:** Utilização do TPC 245kV para conexão com o qualímetro ION7650 da Schneider Electric, série PJ-0805A170-01.
- **Período de Coleta:** Dados coletados a cada 10 minutos, entre julho e outubro de 2023.
- **Dados Coletados:** Atributos de distorções harmônicas das fases DTHa, DTHb e DTHc, ajustados pela curva de frequência do TPC para precisão.

3.2 Segunda Fase: Análise e Modelagem

Preparação da Máquina:

- **Configuração:** Processador Intel(R) Core(TM) i7-11800H, 16 GB RAM, NVIDIA GeForce RTX 3060, Windows 11 Pro.

Ferramentas de Desenvolvimento:

- **Ambiente de Desenvolvimento:** Spyder com Python 3.10.
- **Bibliotecas Utilizadas:** Keras versão 2.6.0 para modelagem preditiva.

Desenvolvimento do Modelo:

- **Modelo Utilizado:** Redes Neurais LSTM (*Long Short-TermMemory*) para análise preditiva das distorções harmônicas.
- **Dados de Modelo:** Amostras representativas das fases DTHa, DTHb e DTHc foram selecionadas para o treinamento do modelo.

Simulação e Análise de Impacto:

- **Propósito:** Compreender e prever o impacto das distorções harmônicas devido à operação contínua da planta de geração eólica.
- **Referencial Teórico:** Baseado em estudos e métodos anteriores, como descrito por Chan (2010), focando na detecção, análise e mitigação de harmônicos.

Quantificação de Distorções Harmônicas:

- **Métricas Utilizadas:** Distorção Harmônica Individual (DHI) e Distorção Harmônica Total (DHT).
- **Descrição das Métricas:** DHI mede a amplitude de uma ordem harmônica em relação à ordem fundamental, enquanto DHT quantifica a soma total das distorções em relação à tensão ou corrente de base.

3.3 Detalhe da Metodologia

Esta seção detalha a metodologia adotada para assegurar uma análise rigorosa dos efeitos das distorções harmônicas no sistema eólico de Casa Nova. A metodologia não apenas foca em resultados imediatos, mas também estabelece uma fundação para futuras melhorias na operação e manutenção de sistemas de geração de energia renovável, garantindo a conformidade com as normas de qualidade energética e mantendo a estabilidade e eficiência do sistema elétrico.

3.3.1 Escolha dos Ativos

Para a realização deste estudo, optou-se por coletar dados do transformador abaixador de 230/34,5KV, localizado na Subestação (SE) Sobradinho. Este transformador é parte integrante da linha 04S3, que alimenta os Parques Eólicos Casa Nova II e III, com uma capacidade instalada total de 88,1 MW. Essa escolha torna o estudo relevante para análises de distorções harmônicas em sistemas de geração eólica.

- **Transformador Abaixador**

Tabela 7 - Dados de placa do Transformador

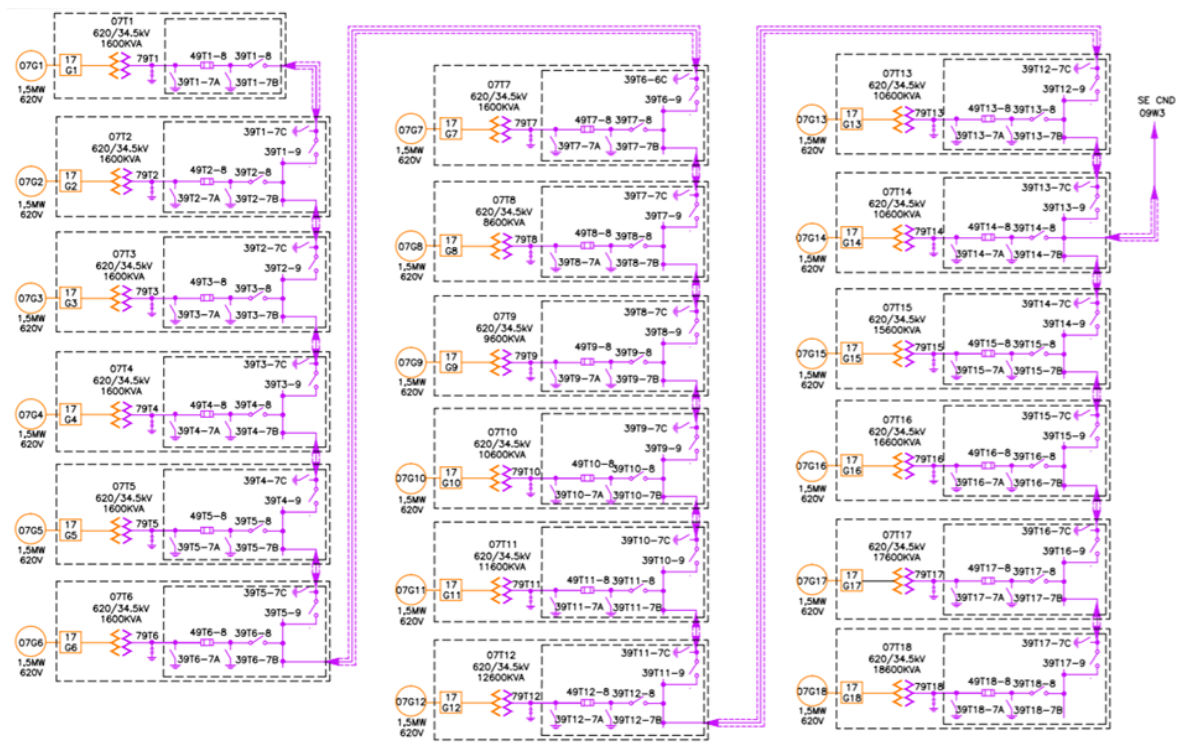
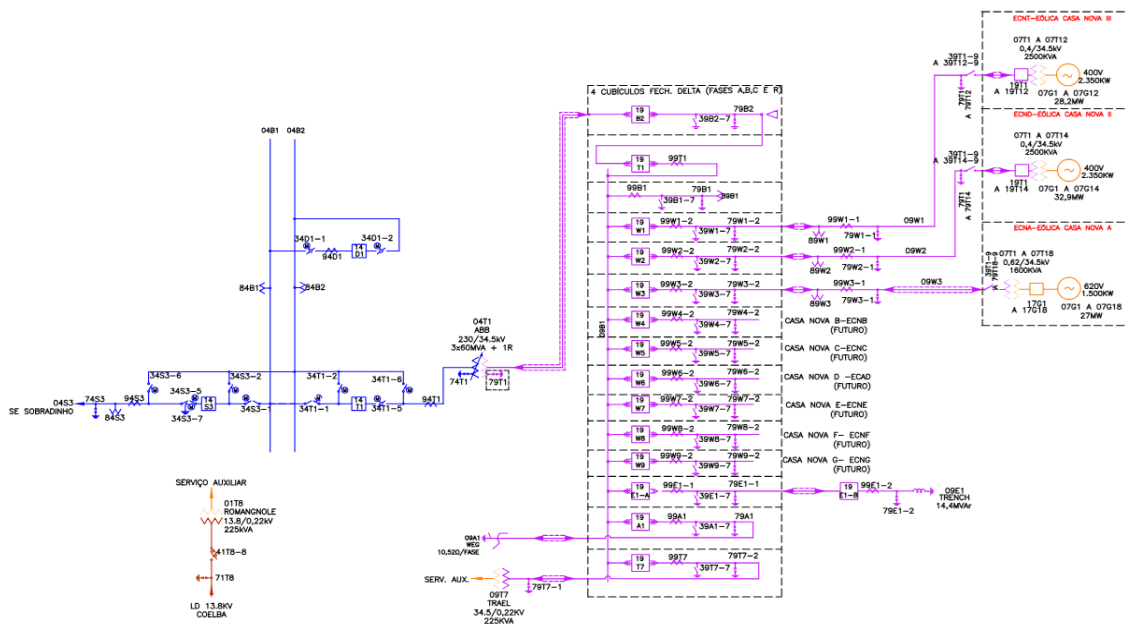
Tensão Nominal Primária	230 kV
Tensão Nominal Secundária	34,5 kV
Potência Nominal	180 MVA (ONAF1)
Tapes	+27/-63 kV (33 steps com dispositivo LTC)
Reatância em 100 MVA	7,20%

Fonte: Elaboração própria.

- **Localização dos Ativos**

O unifilar representa o sistema de geração eólica de casa nova II da Eletrobras Chesf, conforme ilustrado na Figura 8 fornecida (Eletrobras Chesf)

Figura 12 - Unifilar SE CASA NOVA.

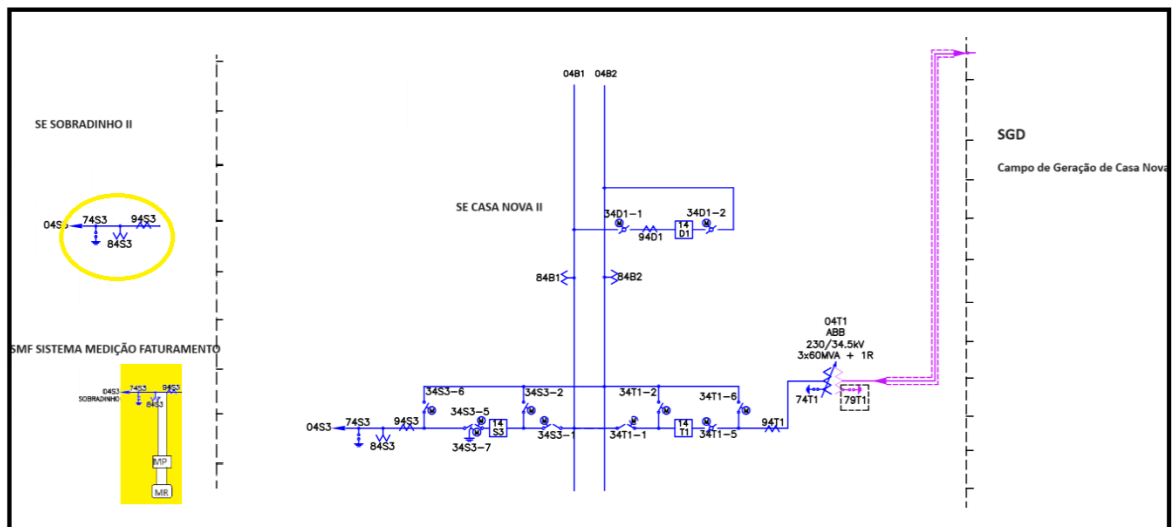


Fonte: Eletrobrás Chesf.

O sistema de medição de faturamento, crucial para o estudo, é alimentado pelos Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP), captando correntes e tensões dos aerogeradores do complexo do campo de geração de Casa Nova. Este sistema está instalado na SE Sobradinho II.

Detalhe do Sistema de Medição Faturamento

Figura 13 - Localização SMF.



Fonte: Elaboração própria.

Para assegurar a efetividade deste sistema, a empresa implementa um plano anual de manutenção preventiva, que inclui:

- Calibração dos medidores realizada a cada 5 anos;
- Verificação metrológica com padrão rastreado pelo INMETRO para confirmar que os erros de medição estão dentro do limite tolerado;
- Emissão de um relatório detalhando as atividades de manutenção e controle dos selos de intervenções.

3.3.2 Qualímetro

O qualímetro de QEE utilizado na campanha foi o ION 7650 [3], de fabricação da Schneider Electric, nº de série PJ-0805A170-01, é fundamental para a coleta e análise de dados. Este dispositivo fornece medições precisas de vários parâmetros elétricos, incluindo potência, energia, demanda e qualidade de energia.

Detalhes do Qualímetro ION7650

- **Instalação:** Frontal e traseira do painel.
- **Medições realizadas:** Potência, energia, demanda, qualidade de energia.
- **Características adicionais:**
 - Monitoramento de Sag/Swell.

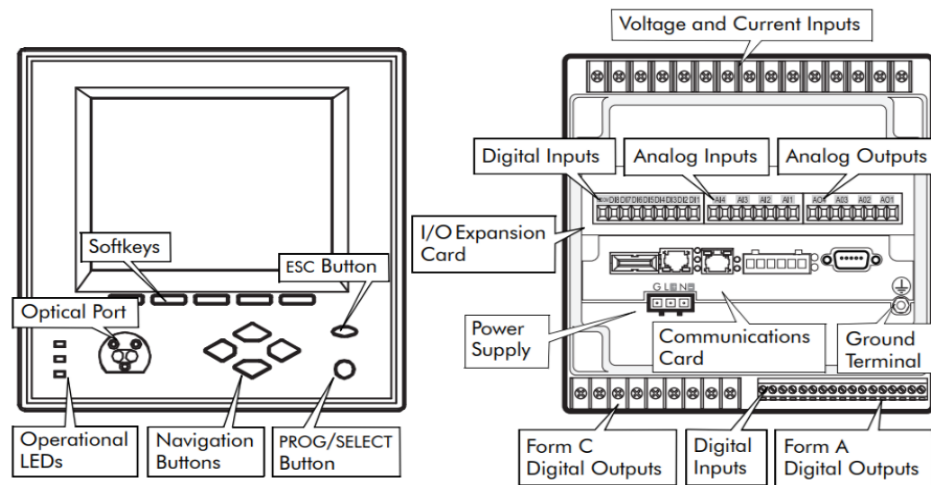
- Análise de harmônicos e Flicker.
- Detecção de transientes.
- Taxa de até 1024 amostras por ciclo.

Figura 14 - ION 7650.



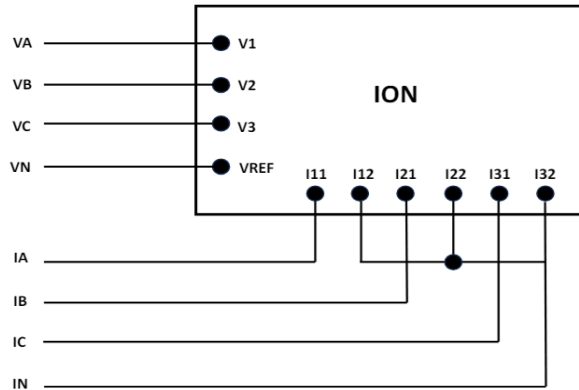
Fonte: Schneider Electric.

Figura 15 - Vista frontal e traseira do ION 7650.



Fonte: Schneider Electric.

Figura 16 - Diagrama Genérico de ligação do ION 7650.



Fonte: Elaboração própria.

3.3.3 TPC Transformador de Potencial Capacitivo

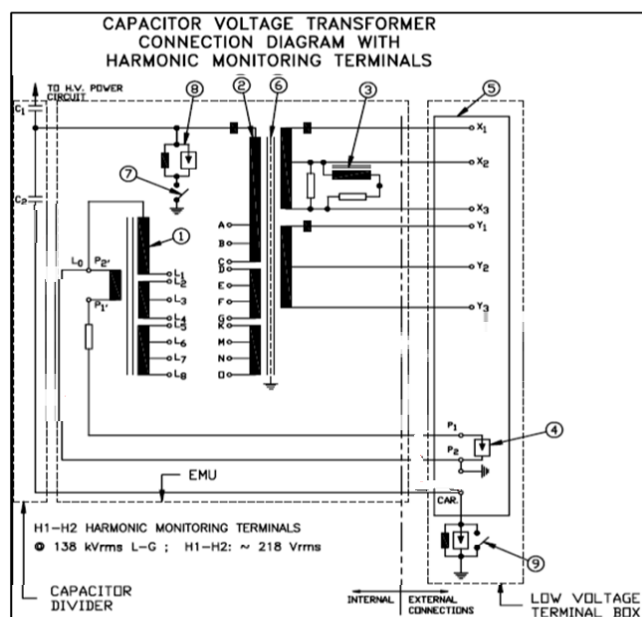
A integração dos TPCs Trench TCVT 245 com sistemas de medição, controle e proteção é crucial para garantir a operação segura e eficiente do sistema elétrico. A precisão desses dispositivos é vital para evitar interrupções e penalidades, garantindo a continuidade do fornecimento de energia e a integridade da infraestrutura elétrica.

Figura 17 - TPC Trench TCVT 245.



Fonte própria do autor

Figura 18 - Conexões do TPC Trench TCVT 245. (Adaptada de [6]).



Fonte: Eletrobras Chesf.

Tabela 8 - Resposta em frequência dos terminais X1-X3 do TPC Trench TCVT 245

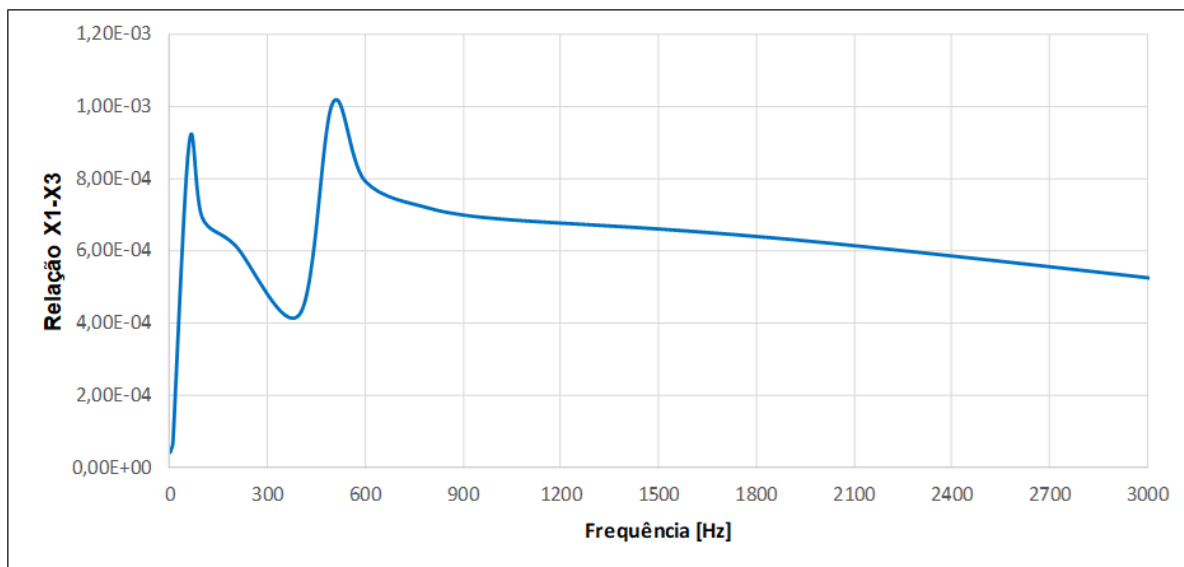
Frequência (Hz)	Relação X1-X3	Valor Medido Secundário [%]	Fator de correção [pu]
1	4,12E-05	5%	21,87
5	5,04E-05	6%	17,88
10	6,91E-05	8%	13,04
60	9,01E-04	100%	1,00
100	6,93E-04	77%	1,30
200	6,17E-04	68%	1,46
400	4,26E-04	47%	2,12
500	1,01E-03	112%	0,89
600	7,94E-04	88%	1,13
800	7,18E-04	80%	1,25
1000	6,90E-04	77%	1,31
2000	6,24E-04	69%	1,44
4000	4,24E-04	47%	2,13

Fonte: Elaboração própria.

O transformador de potencial capacitivo (TPC), disponível no barramento de 230 kV da SE Sobradinho, modelo Trench TCVT 245 [6], não possui os terminais H1-H2 para medição direta de harmônicos, conforme ilustra a Figura 13. Portanto, a medição foi realizada nos terminais X1-X3, que possuem classe de exatidão 0,3,

com dois capacitores C1 6169pF e C2 6039pF e a resposta em frequência é detalhada na Figura 15, ilustrada na Figura 14.

Figura 19 - Relação dos terminais X1-X3 do TPC Trench TCVT 245 com a frequência.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 - Tabela de dados brutos.

	DthtD9 5% AZ	DthtD9 5% BR	DthtD9 5% VM	VhD95% AZ	VhD95% BR	VhD95% VM	VhD95% AZ	VhD95% BR	VhD95% VM	VhD95% AZ	VhD95% BR	VhD95% VM	VhD95% AZ	VhD95% BR	VhD95% VM
quinta-feira, 13 de julho de 2023	1,08	0,81	0,85	0,00	0,00	0,00	0,28	0,16	0,21	0,00	0,04	0,00	1,04	0,79	0,83
sexta-feira, 27 de outubro de 2023	0,90	0,77	0,75	0,00	0,00	0,00	0,24	0,19	0,20	0,00	0,04	0,04	0,87	0,73	0,72
segunda-feira, 9 de outubro de 2023	1,03	0,74	0,89	0,00	0,00	0,00	0,30	0,18	0,19	0,00	0,04	0,03	1,00	0,71	0,88
segunda-feira, 14 de agosto de 2023	1,00	0,83	0,92	0,00	0,03	0,04	0,28	0,20	0,19	0,00	0,04	0,04	0,96	0,81	0,91
quarta-feira, 27 de setembro de 2023	1,11	0,90	0,92	0,00	0,00	0,04	0,28	0,20	0,18	0,00	0,04	0,04	1,08	0,84	0,88
quarta-feira, 2 de agosto de 2023	1,04	0,83	0,88	0,00	0,00	0,00	0,26	0,23	0,17	0,00	0,04	0,00	1,01	0,79	0,85
sexta-feira, 15 de setembro de 2023	0,93	0,78	0,75	0,00	0,00	0,00	0,27	0,20	0,16	0,00	0,04	0,04	0,87	0,73	0,71
Máximo D95% da Semana	1,11	0,90	0,92	0,00	0,03	0,04	0,30	0,23	0,21	0,00	0,04	0,04	1,08	0,84	0,91

Fonte: Elaboração própria.

3.4 Configuração da Máquina

Todo o processo de desenvolvimento foi realizado em um computador com as seguintes especificações:

- **Processador:** Intel(R) Core(TM) i7-11800H de 11ª geração com frequência de 2.30GHz
- **Memória RAM:** 16 GB

- **Placa de Vídeo:** NVIDIA GeForce RTX 3060 com 6GB de memória dedicada
- **Sistema Operacional:** Windows 11 Pro

Para o desenvolvimento do modelo, utilizamos o software Spyder com Python 3.10 e a biblioteca Keras versão 2.6.0.

3.5 Preparação de Dados

Para construir o conjunto de dados (dataset), os dados foram coletados do qualímetro instalado na linha principal de alimentação do parque eólico das distorções harmônicas e formatados em um arquivo CSV. Os valores de DTHA, DTHB e DTHC foram incluídos como atributos. Seguindo a recomendação de Witten, Frank e Hall (2016), os algoritmos de aprendizado de máquina funcionam melhor quando as variáveis numéricas de entrada são padronizadas. O dataset consistiu em 1008 amostras de dados, cada uma com 48 atributos. Tais como:

V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9, V10, V11, V12, V13, V14, V15, V16, V17, V18, V19, V20, V21, V22, V23, V24, V25, V26, V27, V28, V29, V30, V31, V32, V33, V34, V35, V36, V37, V38, V39, V40, V41, V42, V43, V44, V45, V46, V47, V48, V49 e V50.

Os modelos de aprendizado de máquina aprendem a mapear variáveis de entrada para uma variável de saída. Assim, a escala e a distribuição dos dados retirados do domínio podem ser diferentes para cada variável. De acordo com Kuhn e Johnson (2019), dimensionar variáveis de entrada e saída é uma etapa crítica no uso de modelos de rede neural. Nesse sentido, pode ser uma boa ideia dimensionar a variável de destino para problemas de modelagem preditiva de regressão, visando facilitar o aprendizado do problema, principalmente no caso de modelos de rede neural.

3.6 Premissas para as Simulações e Análise das Medições de Distorções Harmônicas

A metodologia adotada para os estudos de desempenho harmônico no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) foi baseada em premissas específicas, visando uma análise precisa dos impactos das distorções harmônicas:

1. **Escolha e Levantamento dos Ativos:** A coleta de dados foi realizada na linha de transmissão 04S3 do PAC. Amostragens foram feitas a cada 10 minutos, de julho a outubro de 2023. Os parâmetros dos ativos, como resistências das linhas de transmissão, transformadores e geradores, foram ajustados utilizando uma expressão de correção hiperbólica, adaptada às condições de frequência e valores típicos observados.
2. **Dados Corrigidos e Simulações:** Após a correção, os dados foram utilizados para simulações detalhadas em laboratório. As distorções harmônicas (DTHa, DTHb, DTHc) foram capturadas pelo qualímetro instalado na principal linha de transmissão de 230 kV que alimenta o parque eólico. Os dados foram então formatados em um arquivo CSV, estabelecendo a base para a construção do dataset analítico.

Essas medições revelaram insights significativos sobre a presença e o impacto das distorções harmônicas no sistema de geração híbrida de energia eólica de Casa Nova, operado pela Eletrobras Chesf.

- **Resultados Obtidos:** As análises demonstraram variabilidades nas distorções harmônicas que podem afetar adversamente a operação e a eficiência do sistema elétrico, especialmente em períodos de alta demanda ou flutuação na produção eólica.
- **Implicações Operacionais:** Os resultados indicam a necessidade de ajustes operacionais e a possibilidade de implementar medidas de mitigação, como a instalação de filtros harmônicos ou a recalibração de equipamentos, para melhorar a resiliência e a qualidade da energia produzida.

Essas informações são cruciais para a tomada de decisões estratégicas na gestão da infraestrutura e na otimização do desempenho energético do parque eólico, alinhando as operações com as normas de qualidade energética vigentes e as expectativas de sustentabilidade e eficiência energética.

3.7 Análise da Distorção Harmônica Total (DTHT) e individual (DTHI)

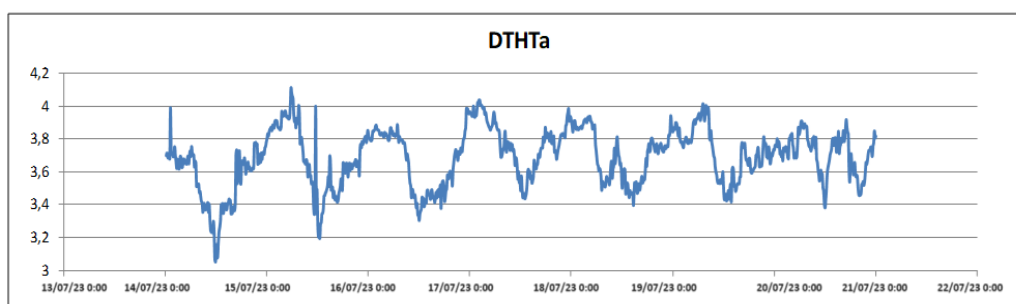
Durante a campanha de medições realizada no sistema de geração eólica de Casa Nova, foram coletados dados significativos sobre as distorções harmônicas

nas fases A, B e C do sistema elétrico. As medições detalhadas da Distorção Total de Tensão Harmônica (DTHT) e da Distorção Harmônica Total Individual (DTHI) são essenciais para avaliar a conformidade com as normas e regulamentações de qualidade de energia.

3.7.1 Medição da Distorção Total de Tensão Harmônica (DTHT)

- **Fase A:** Conforme ilustrado na Figura 16, a DTHT para a fase A foi medida em 4,00%, ultrapassando o limite de 3% estabelecido para tensões acima de 69 kV, indicando uma preocupação significativa com a qualidade da energia.

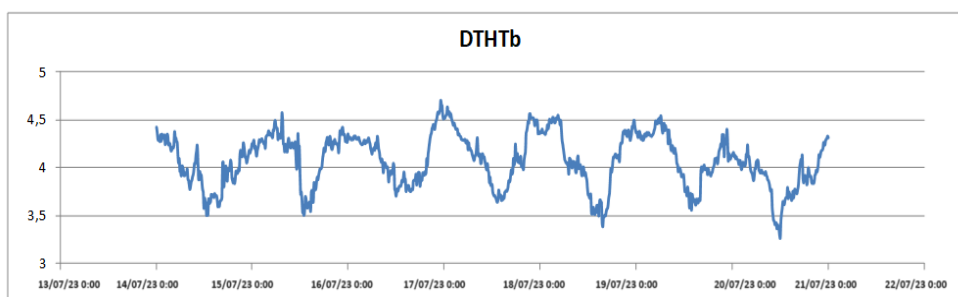
Figura 21 - Medição da DTHT na fase A.



Fonte: Elaboração própria.

- **Fase B:** A Figura 17 mostra uma DTHT de 4,56% para a fase B, também excedendo o limite de 3%, o que pode indicar a necessidade de medidas corretivas para reduzir a distorção harmônica.

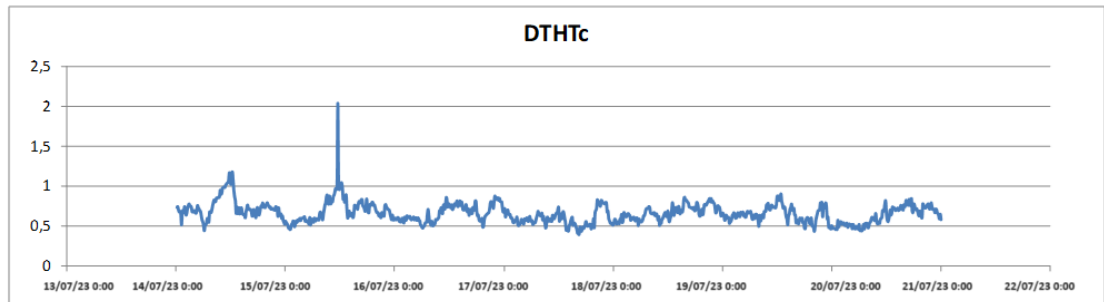
Figura 22 - Medição da DTHT na fase B.



Fonte: Elaboração própria.

- **Fase C:** Como mostrado na Figura 18, a fase C apresentou uma DTHT bem abaixo do limite, com 1,04%, indicando uma operação mais estável e dentro dos padrões aceitáveis.

Figura 23 - Medição da DTHT na fase C.



Fonte: Elaboração própria.

3.7.2 Análise dos Valores de Distorção Harmônica Total Individual (DTHI)

O Quadro 6 (abaixo), que detalha os maiores valores de DTHI corrigidos em função da resposta em frequência do Transformador de Potencial de Corrente (TPC), revela que a maior distorção foi observada na quinta ordem harmônica da fase B, com 4,466%. Este valor excede consideravelmente o limite de 2% especificado nos Procedimentos de Rede, destacando uma área crítica que requer atenção imediata para evitar possíveis danos ou ineficiências no sistema.

Tabela 9 - Limites globais inferiores para o indicador DTHI

Ordem	Fator de Correção	Fase A		Fase B		Fase C	
		DTHI [%]	DTHI Corrigido [%]	DTHI [%]	DTHI Corrigido [%]	DTHI [%]	DTHI Corrigido [%]
2	1,3291	0,041	0,054	0,039	0,052	0,058	0,078
3	1,4249	0,656	0,935	0,364	0,519	0,361	0,515
4	1,5569	0,058	0,090	0,058	0,090	0,071	0,111

5	1,7292	2,212	3,825	2,583	4,466	0,495	0,856
6	1,9442	0,000	0,000	0,041	0,080	0,000	0,000
7	1,6609	0,502	0,834	0,500	0,830	0,256	0,425
8	1,0068	-	-	-	-	-	-
9	0,9726	0,169	0,164	0,169	0,164	0,000	0,000
10	1,1300	-	-	-	-	-	-
11	1,1635	0,357	0,415	0,320	0,372	0,311	0,362
12	1,1991	-	-	-	-	-	-
13	1,2369	0,496	0,614	0,589	0,728	0,426	0,526
14	1,2616	0,106	0,134	0,079	0,100	0,101	0,127
15	1,2793	0,034	0,043	0,000	0,000	0,000	0,000
16	1,2975	-	-	-	-	-	-
17	1,3124	0,109	0,144	0,079	0,103	0,097	0,127
18	1,3195	-	-	-	-	-	-
19	1,3268	0,070	0,093	0,056	0,074	0,058	0,077

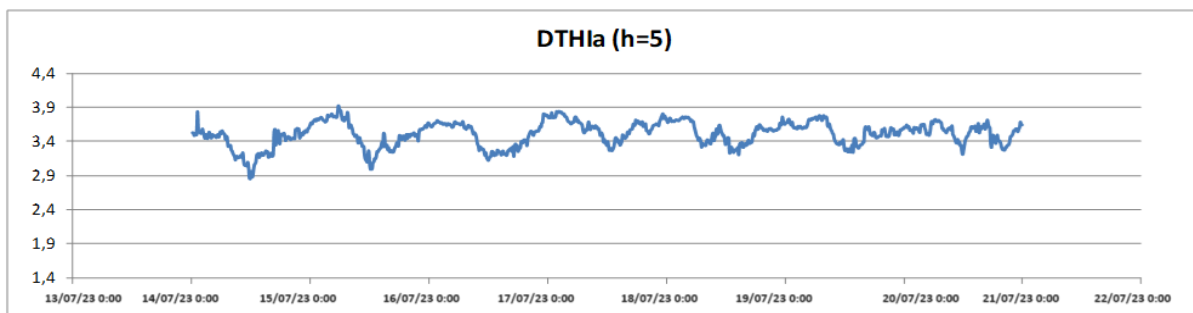
20	1,3341	-	-	-	-	-	-
21	1,3415	-	-	-	-	-	-
22	1,3490	-	-	-	-	-	-
23	1,3565	0,193	0,261	0,041	0,055	0,168	0,228
24	1,3642	0,000	0,000	0,000	0,000	0,149	0,205
25	1,3719	0,149	0,205	0,088	0,121	0,135	0,186
26	1,3798	-	-	-	-	-	-
27	1,3877	0,034	0,047	0,000	0,000	0,000	0,000
28	1,3957	-	-	-	-	-	-
29	1,4038	-	-	-	-	-	-
30	1,4120	-	-	-	-	-	-
31	1,4203	0,057	0,081	0,057	0,081	0,059	0,083
DTHT [%]	-	2,35	4,00	2,66	4,56	0,64	1,04

Fonte: Elaboração própria.

Nas Figuras 19, 20 e 21 são detalhados os comportamentos da DTHI para a quinta ordem harmônica durante o período de medição para as fases A, B e C, respectivamente.

- **Figura 19 (Fase A):** Mostra níveis flutuantes de DTHI, destacando períodos em que as distorções excedem os limites padrões. Isto indica uma possível inconsistência ou influência de operações específicas que podem estar contribuindo para um aumento nas harmônicas.

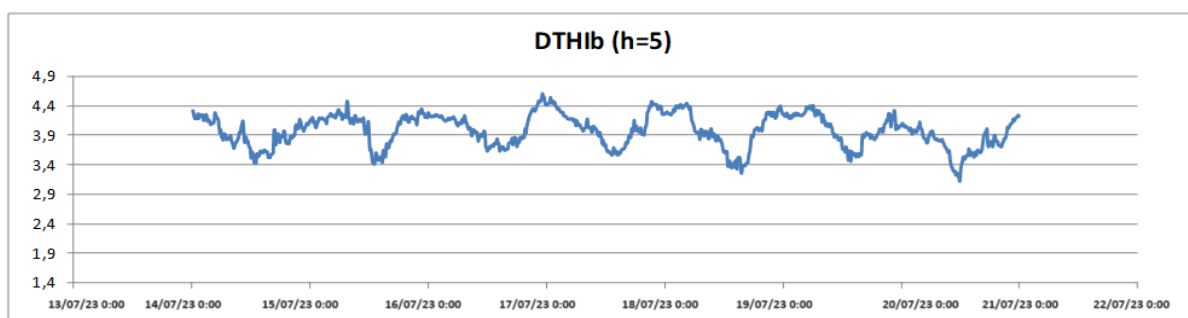
Figura 24 - Medições da DTHI na fase A para a quinta ordem harmônica.



Fonte: Elaboração própria.

- **Figura 20 (Fase B):** Apresenta os valores mais altos de DTHI, superando consistentemente o limite aceitável. Isso sugere que a fase B pode estar mais suscetível a fatores que geram distorções, tais como configurações específicas do equipamento ou interações com cargas não lineares na rede.

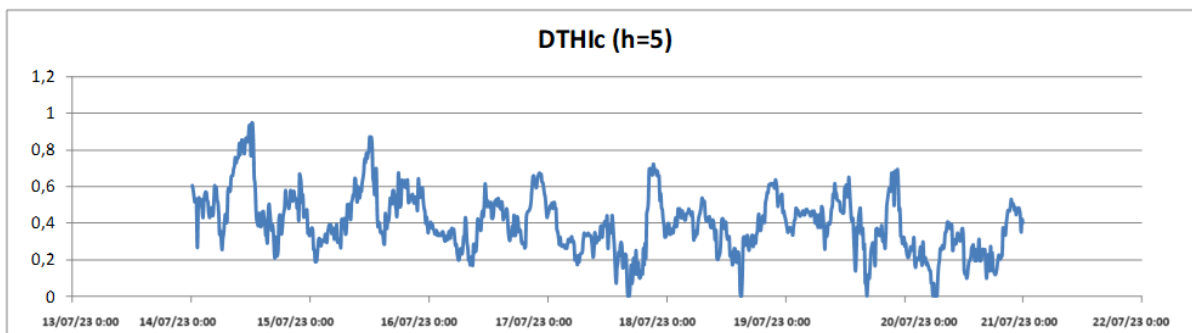
Figura 25 - Medições da DTHI na fase B para a quinta ordem harmônica.



Fonte: Elaboração própria.

- **Figura 21 (Fase C):** Demonstra os menores níveis de DTHI, mantendo-se dentro dos limites na maioria dos registros. Isso pode indicar uma condição mais estável e menos afetada por distorções externas ou internas ao sistema.

Figura 26 - Medições da DHTI na fase C para a quinta ordem harmônica.



Fonte: Elaboração própria.

3.8 Análise de Distorção Total de Tensão Harmônica (DTHT)

As medições indicam uma variação significativa nas distorções harmônicas entre as três fases, com particular preocupação para as fases A e B, onde os valores de DTHTS95% excederam o limite aceitável de 3% estabelecido para tensões acima de 69 kV:

- **Fase A:** 4,00%
- **Fase B:** 4,56%
- **Fase C:** 1,04%

Esses valores indicam que as fases A e B estão operando com uma quantidade de harmônicas que pode comprometer a integridade dos equipamentos elétricos conectados, além de poder afetar a eficiência geral do sistema de transmissão.

3.8.1 Maiores Valores de DTHI Corrigidos

O foco na quinta ordem harmônica da fase B, que registrou um valor de 4,466%, evidencia uma preocupação ainda maior. Este valor excede significativamente o limite de 2%, sugerindo que esta ordem harmônica específica está desproporcionalmente alta e pode ser uma fonte primária de problemas de qualidade de energia:

- **Fase B (5ª ordem harmônica):** 4,466%

3.8.2 Implicações e Recomendações

A superação dos limites estabelecidos para DTHT e DTHI nas fases A e B sugere uma necessidade urgente de intervenção para evitar danos a longo prazo ao equipamento e para melhorar a eficiência operacional do sistema. As seguintes medidas podem ser consideradas:

1. **Instalação de Filtros Harmônicos:** Considerar a instalação de filtros harmônicos sintonizados especificamente para as ordens harmônicas mais problemáticas, principalmente na fase B.
2. **Revisão do Sistema de Geração e Conexão:** Avaliar a configuração do sistema de geração eólica e as conexões à rede para identificar possíveis contribuições para os níveis elevados de distorção harmônica.
3. **Monitoramento Contínuo:** Implementar um regime de monitoramento contínuo para acompanhar a eficácia das intervenções implementadas e para identificar rapidamente quaisquer novas questões que possam surgir.
4. **Engajamento de Especialistas em Qualidade de Energia:** Trabalhar com consultores especializados em qualidade de energia para uma análise mais profunda das causas fundamentais e para o desenvolvimento de soluções personalizadas.
5. **Educação e Treinamento:** Capacitar as equipes técnicas envolvidas na operação e manutenção do parque eólico em práticas de mitigação de harmônicas e qualidade de energia.

Estas medidas visam não só atender aos padrões regulatórios, mas também melhorar a confiabilidade e a eficiência do fornecimento de energia, essenciais para a sustentabilidade de operações de energia renovável como o Parque Eólico de Casa Nova.

3.9 Recomendações e Ações Futuras

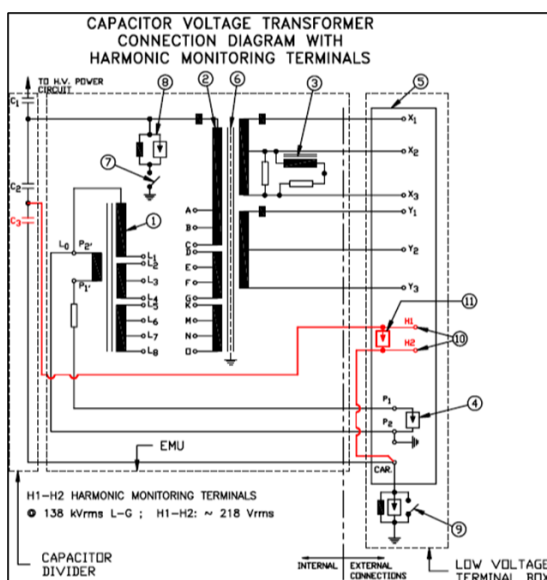
1. **Compatibilidade dos Instrumentos de Medição:**
 - Os instrumentos de medição devem ser compatíveis com equipamentos de classe A, conforme norma IEC.
2. **Normas a serem Seguidas:**

- As normas estabelecidas devem ser seguidas para flutuação de tensão e distorção harmônica de tensão, conforme especificado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

3. Instalação de Terceiro Capacitor no Circuito do TPC:

- Sugere-se estudar a instalação de um terceiro capacitor no circuito do TPC para eliminar ruídos, evitar atuações indevidas da teleproteção e melhorar a confiabilidade dos dados coletados pelo ION 7650. Representação na Figura 22.

Figura 27 - ION 7650.



Fonte: Elaboração própria.

O levantamento da primeira semana destacou que o PAC (o barramento de 230 kV da SE Sobradinho II) apresenta níveis de distorção de tensão em determinado tempo com os parques eólicos CASA NOVA II. Além disso, observou-se que os níveis de DTHI e DTHT diferem significativamente entre as fases A, B e C.

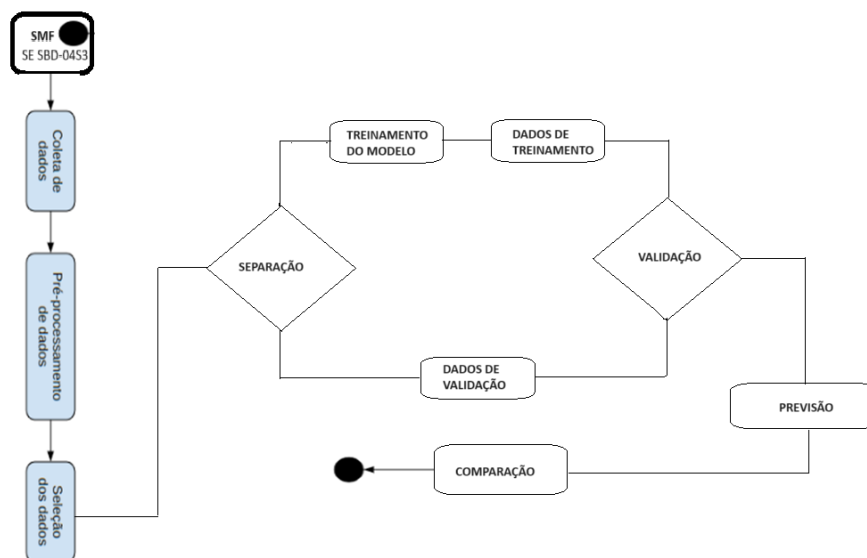
3.10 Procedimentos de Simulação Implementados em LSTM

Após a coleta dos dados ajustados por um coeficiente definido conforme o TPC utilizado, iniciamos a etapa de pré-processamento, que envolveu a formatação e adequação dos dados para a predição das futuras distorções harmônicas usando uma rede MLP. Os dados foram normalizados para uma escala comum, mantendo a integridade das informações. Além disso, realizou-se a normalização dos dados para mudar os valores das colunas numéricas no conjunto de dados e usar uma escala

comum, sem distorcer as diferenças nos intervalos de valores nem perder informações.

Depois do tratamento dos dados, avançamos para o processo de treinamento do algoritmo de aprendizagem. Neste momento, o dataset foi dividido em 80% para treinamento e 20% para avaliação. A Figura 23 ilustra melhor estes aspectos.

Figura 28 - Avaliação dos dados.



Fonte: Elaboração própria.

Para avaliar o comportamento do modelo da RNA, utilizamos dados individuais e totais de cada fase de distorção. Os valores de tensão foram obtidos diretamente do qualímetro instalado na linha principal de alimentação do parque eólico. Observamos um erro total abaixo de 5%, indicando alta precisão na previsão do modelo. As simulações abrangeram diferentes cenários de carga e foram organizadas em seis fases distintas para uma análise detalhada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Rede Neural Artificial (RNA) utilizada foi composta por cinco camadas: entrada, duas ocultas e saída. O número de neurônios na camada de entrada da RNA foi determinado pela dimensionalidade do vetor de características, que neste

caso foi de 48 (V2 até V50). A quantidade de neurônios na camada de saída da rede foi definida como três neurônios (DTHTa, DTHTb e DTHTc), uma vez que o objetivo da rede é prever três valores.

Seguindo Heaton (2008), duas camadas ocultas são capazes de representar qualquer relação entre os dados, mesmo aquelas que não podem ser representadas por equações. Mais do que duas camadas ocultas são necessárias apenas em problemas mais complexos, como visão computacional. Assim, a RNA foi modelada com duas camadas ocultas. O número de neurônios em cada camada é uma questão mais empírica, sem regras explícitas para um cálculo ideal. Portanto, utilizou-se a metodologia proposta por Han & Kamber (2011), definida pela equação:

$$N_{hidden} = 2xN_{in} + 1 \quad [21]$$

Onde N_{in} é o número de neurônios da camada de entrada e N_{hidden} representa o número de neurônios da camada oculta. Nesse sentido, o número de neurônios da camada oculta foi definido como noventa e cinco. O processo de treinamento do modelo foi executado em 500 épocas. A taxa de aprendizagem foi de 0,3 e a constante de momentum 0,2.

Os resultados apresentados nos Quadros 7, 8 e 9 mostram que o modelo proposto para previsão dos valores de DTHa, DTHb e DTHc é muito preciso na previsão ou explicação das relações entre as variáveis de entrada e saída, com base no coeficiente de correlação de 0,99.

Tabela 10 - Sumário avaliação DTHa

Correlationcoefficient	0.9981
Meanabsoluteerror	0.0067
Root meansquarederror	0.0111
Relativeabsoluteerror	4.3335 %
Root relativesquarederror	6.1814 %
Total NumberofInstances	202

Fonte: Elaboração própria.

O Quadro 7 resume as críticas de avaliação do modelo preditivo para a ocorrência de harmônica total da fase A (DTHa). O coeficiente de transparência de 0,9981 revela uma forte relação linear entre os valores previstos e os reais, diminuindo a alta precisão. O erro absoluto médio de 0,0067 e o erro quadrático

médio de 0,0111 são baixos, refletindo pequenas diferenças entre os valores reais e estimados. Os erros absolutos e quadráticos relativos, de 4,3335% e 6,1814%, respectivamente, confirmam o bom desempenho do modelo.

Tabela 11 - Sumário avaliação DTHb

Correlationcoefficient	0.9991
Meanabsoluteerror	0.0085
Root meansquareerror	0.0108
Relativeabsoluteerror	4.7324 %
Root relativesquareerror	5.1695 %
Total NumberofInstances	202

Fonte: Elaboração própria.

No Quadro 8, as especificações de avaliação para a harmônica total da fase B (DTHb) mostram um coeficiente de transparência de 0,9991, destacando uma excelente relação linear e altíssima precisão. O erro absoluto médio de 0,0085 e o erro quadrático médio de 0,0108 são baixos, evidenciando pequena discrepância entre os valores reais e previstos. Os erros absolutos e quadráticos relativos, de 4,7324% e 5,1695%, respectivamente, reforçam a precisão relativa do modelo.

Tabela 12 - Sumário avaliação DTHc

Correlationcoefficient	0.9992
Meanabsoluteerror	0.0062
Root meansquareerror	0.0096
Relativeabsoluteerror	2.9789 %
Root relativesquareerror	3.9222 %
Total NumberofInstances	202

Fonte: Elaboração própria.

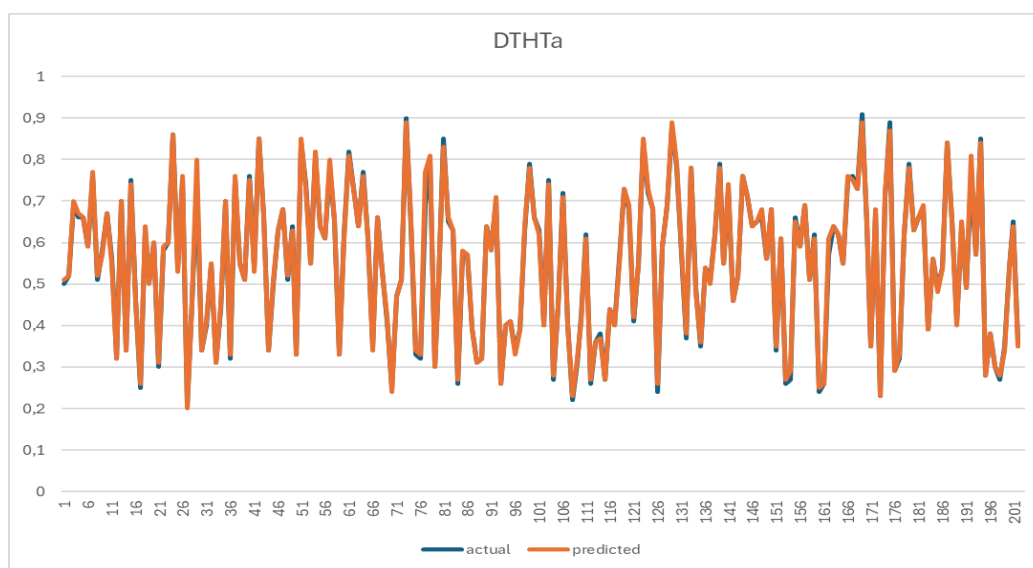
O Quadro 9 apresenta as críticas de avaliação do modelo para a alteração harmônica total da fase C (DTHc). O coeficiente de transparência de 0,9992 demonstra uma excelente relação linear, apresentando altíssima precisão. O erro absoluto médio de 0,0062 e o erro quadrático médio de 0,0096 são baixos, refletindo pequenas discrepâncias entre os valores reais e estimados. Os erros absolutos e quadráticos relativos, de 2,9789% e 3,9222%, respectivamente, indicam um desempenho muito preciso em termos relativos.

As Figuras 22, 23 e 24 apresentam os valores reais e previstos pelo modelo das variáveis DTHa, DTHb e DTHc. Os resultados da análise revelam uma forte concordância entre os valores reais e as previsões do modelo. A análise visual dos

dados mostra que as previsões do modelo seguem de perto a tendência dos valores reais ao longo do tempo.

Além disso, métricas de avaliação, como o erro absoluto médio e a raiz do erro médio quadrático, indicam que o modelo é capaz de fazer previsões precisas com uma margem de erro mínima. A precisão das previsões do modelo sugere que ele é capaz de capturar adequadamente os padrões e tendências presentes na série temporal.

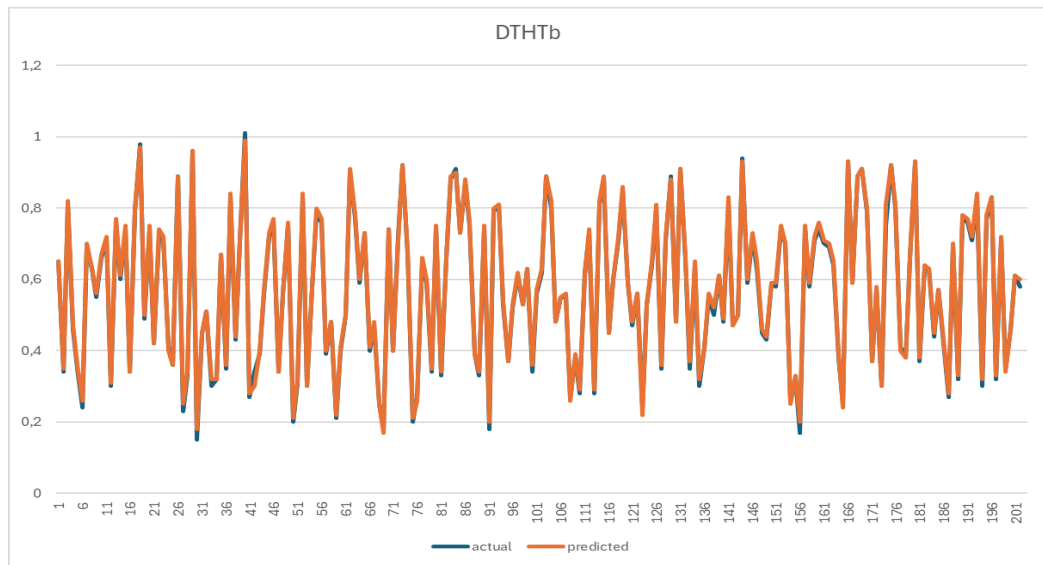
Figura 29 - Resultado das previsões da variável DTHa.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 22 ilustra os resultados das previsões da variável DTHa, com linhas laranja representando os valores previstos pelo modelo e pontos azuis os valores reais medidos. A proximidade entre os pontos e as linhas sugere que o modelo preditivo está acompanhando bem os dados reais, capturando eficazmente as variações nas distorções harmônicas ao longo das 202 instâncias analisadas. Esse alinhamento demonstra a precisão do modelo LSTM com *Dropout* na predição de distorções harmônicas na fase A, evidenciada pela forte correlação entre os valores e pelos baixos erros absolutos e relativos.

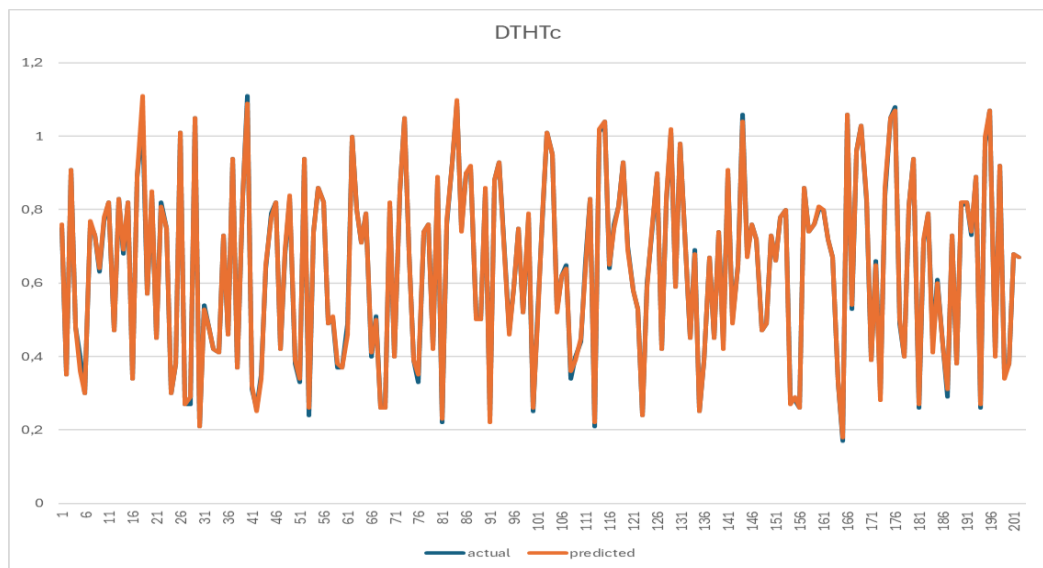
Figura 30 - Resultado das previsões da variável DTHb.



Fonte:Elaboração própria.

A Figura 23 apresenta as previsões da variável DTHb, também utilizando linhas laranja para os valores previstos e pontos azuis para os valores reais. O gráfico mostra que o modelo capta bem as variações nas distorções harmônicas, confirmando a eficácia do LSTM com *Dropout*na fase B. A proximidade entre os valores reais e previstos e os baixos erros reforçam a robustez do modelo, tornando-o adequado para monitoramento e controle de qualidade de energia.

Figura 31 - Resultado das previsões da variável DTHc.



Fonte:Elaboração própria.

A Figura 24 exibe os resultados das previsões da variável DTHc, seguindo o mesmo esquema de cores. A proximidade entre os valores previstos e reais indica que o modelo continua a capturar com precisão as variações nas distorções harmônicas ao longo das 202 instâncias analisadas. A alta correlação e os baixos erros absolutos e relativos confirmam a eficácia do LSTM com *Dropout* na fase C, evidenciando sua robustez e aplicabilidade prática em sistemas de geração eólica.

Tendo isso em vista, os resultados obtidos proporcionam insights valiosos para a melhoria contínua e aprimoramento das práticas de monitoramento e controle nesse contexto específico. Este estudo conduziu uma investigação aprofundada do sistema de Casa Nova, utilizando dados obtidos pelos instrumentos de qualimetria, proporcionando um melhor acompanhamento do estado dos filtros e tipos utilizados.

No entanto, as medições apresentadas indicam a necessidade de estudos adicionais para a instalação de filtros e capacitores no circuito do TPC, visando melhorar a qualidade das medições, evitar atuações indevidas da teleproteção e corrigir valores de dados que podem prejudicar os resultados da simulação em LSTM. Tais melhorias são cruciais para evitar multas conforme as regulamentações da ONS.

Assim, alinhados a esses objetivos e buscando a recomendação do modelo equivalente de máquina única baseado em aprendizado profundo para dimensionar e rastrear as distorções harmônicas, foi utilizado um algoritmo desenvolvido por Chilamkurthy et al. (2018), representando algoritmos que operam o rastreamento das distorções harmônicas produzidas em parques eólicos em estudos de sistemas de potência.

5 CONCLUSÕES

A análise e aplicabilidade de Redes Neurais LSTM no monitoramento das distorções harmônicas elétricas resultaram em resultados promissores. Este método de previsão em série temporal demonstrou eficácia na predição das distorções harmônicas, contribuindo para a redução dessas distorções e o aumento da qualidade da energia produzida. No entanto, os resultados também apontam para a necessidade de mais pesquisas e desenvolvimento contínuo para aprimorar essas

técnicas, adaptando-as a variados cenários operacionais e integrando outras tecnologias de monitoramento e controle.

As curvas padrão obtidas a partir de dados de ensaios laboratoriais no laboratório Cimatec e a precisão das previsões do modelo indicam que ele é capaz de capturar adequadamente os padrões e tendências presentes na série temporal. A atualização automática ou fixa dos filtros para períodos específicos de distorção reforça esse desempenho. Assim, o uso de Redes Neurais LSTM visa estimar a necessidade de instalação de filtros e prever momentos de distorções no sistema, melhorando e garantindo a qualidade da energia gerada no parque eólico de Casa Nova Chesf.

Nenhum desenvolvimento semelhante foi identificado a nível nacional ou internacional, após pesquisas em projetos desenvolvidos no âmbito da ANEEL e periódicos internacionais. A tensão harmônica de 3ª ordem obtida das simulações (0,62%) ultrapassou o limite de tensão harmônica individual (DTHI) estabelecido pelos Procedimentos de Rede do ONS (0,6%). Para mitigar essa não conformidade, estudamos a alternativa de um filtro sintonizado na 3ª harmônica com dessintonia (150 Hz).

O estudo de desempenho harmônico avaliou os impactos na qualidade de energia sobre a rede básica, analisando distorções harmônicas de tensão em regime de operação permanente e em contingência simples. Aproximadamente 40% dos dados da linha 04S3 de alimentação do campo eólico de Casa Nova mostraram complicações relacionadas à confiabilidade e segurança, atreladas às dificuldades enfrentadas pela CHESF na gestão das distorções harmônicas, evidenciando a necessidade de mais pesquisas.

Este modelo será implementado numa ferramenta customizada que, além dessa informação, processará uma grande quantidade de dados, produzirá diagnósticos e relatórios precisos para facilitar a gestão das distorções harmônicas e do filtro, ajudando na pré-operação para estudos da qualidade de energia e cumprindo as normas regulatórias da ONS.

Portanto, as principais contribuições desta pesquisa incluem:

1. **Eficácia das Redes Neurais LSTM:** As redes neurais LSTM demonstraram uma capacidade significativa para identificar e mitigar distorções harmônicas, especialmente em complexos de geração eólica onde a qualidade energética é crítica.
2. **Necessidade de Melhorias e Adaptações:** Há um espaço considerável para melhorar a precisão dos modelos e a eficiência das redes LSTM, particularmente no ajuste fino à medida que novos dados são coletados e diferentes condições operacionais são experimentadas.
3. **Implementação de Novas Estratégias:** Recomenda-se a implementação de um terceiro capacitor no circuito do TPC para reduzir ruídos e melhorar a confiabilidade dos dados coletados, o que pode impactar significativamente a eficácia do monitoramento das distorções.

Portanto, este trabalho não só contribui para o desenvolvimento teórico sobre a qualidade da energia elétrica em ambientes com geração eólica, mas também fornece uma ferramenta prática avançada para profissionais do setor. Este estudo abre novas perspectivas para a otimização da gestão da qualidade da energia, crucial para a integração bem-sucedida de fontes renováveis no mix energético, promovendo sustentabilidade e eficiência energética em um contexto de crescente diversificação das fontes de energia.

5.1 Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Recomendamos que a Eletrobras Chesf invista em pesquisas adicionais para aprofundar a compreensão e aprimorar as técnicas de otimização baseadas em redes neurais LSTM. Isso pode incluir a experimentação com diferentes configurações e a avaliação da integração de outras abordagens computacionais para o aprimoramento contínuo do monitoramento e controle das distorções harmônicas. Além disso, é crucial implementar estratégias de adaptação e flexibilidade das redes neurais LSTM para lidar com variações nas condições operacionais e demandas específicas de diferentes parques eólicos. Personalizar essas abordagens para atender às necessidades individuais de cada sistema de energia eólica híbrida pode maximizar a eficácia e os benefícios obtidos.

5.1.1 Sugestões Específicas para Trabalhos Futuros:

1. Instrumentação do Sistema de Geração Eólica em Relação à Qualidade de Energia:

- **Objetivo:** Realizar a instrumentação do sistema de geração eólica com filtros reais para avaliar a eficiência do modelo em um ambiente operacional.
- **Descrição:** Implementar e monitorar os filtros propostos em um cenário real de operação, verificando a aplicabilidade e precisão do modelo em situações práticas. Isso permitirá validar os resultados obtidos em laboratório e ajustar o modelo conforme necessário para garantir a eficácia no controle das distorções harmônicas em condições reais.

2. Avaliação dos Recursos de Hardware Necessários para Implementação do Modelo Computacional em Ambiente Industrial:

- **Objetivo:** Investigar os recursos de hardware, como CPU, GPU, unidade de armazenamento e memória RAM, necessários para a implementação do modelo em um ambiente industrial.
- **Descrição:** Realizar um estudo detalhado para determinar os requisitos de hardware que garantam a eficiência e escalabilidade do sistema em larga escala. Esta análise ajudará na escolha das tecnologias adequadas e na otimização do desempenho do modelo em um ambiente industrial.

3. Introdução de Redes Neurais LSTM para Previsão de Degradação dos Filtros:

- **Objetivo:** Integrar redes neurais LSTM para calcular a previsão de degradação dos filtros.
- **Descrição:** Desenvolver e implementar redes neurais LSTM que levem em consideração tanto os dados históricos quanto fatores que influenciam a degradação dos filtros ao longo do tempo. Isso poderia melhorar a precisão das previsões e permitir um planejamento mais eficaz da manutenção e substituição dos filtros, aumentando a confiabilidade do sistema.

4. Investigação de Outras Técnicas de Otimização:

- **Objetivo:** Investigar a viabilidade e eficácia de outras técnicas de otimização, além das redes neurais LSTM, para previsão de distorção harmônica e da degradação de filtros em sistemas de energia elétrica para geração eólica.

- **Descrição:** Explorar diferentes abordagens de otimização, como redes neurais profundas, algoritmos de enxame de partículas e aprendizado por reforço, para aprimorar a precisão e eficiência das previsões e controle das distorções harmônicas.

Concluindo, a aplicação das redes neurais LSTM oferece uma oportunidade significativa para aprimorar a operação e eficiência dos sistemas de geração híbrida de energia eólica. A continuidade das pesquisas e investimentos nesse campo pode posicionar a Eletrobras Chesf na vanguarda da inovação e excelência em energia renovável, promovendo uma operação mais sustentável e eficiente dos sistemas de energia eólica.

REFERÊNCIAS

ABAS, Naeem et al. **Power quality improvement using dynamic voltage restorer.** IEEE Access, v. 8, p. 164325-164339, 2020.

AFONSO, Joao L. et al. **A review on power electronics technologies for power quality improvement.** Energies, v. 14, n. 24, p. 8585, 2021.

ALMOHAIMEED, Sulaiman A.; ABDEL-AKHER, Mamdouh. **Power quality issues and mitigation for electric grids with wind power penetration.** Applied Sciences, v. 10, n. 24, p. 8852, 2020.

ALSAKATI, Ahmad Adel et al. **Mitigation of power quality issues in distribution systems using harmonic filters and capacitor banks.** Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, v. 34, n. 4, p. 589-603, 2021.

ANDRSA. **Estudos Elétricos para Integração das CGE Corrupião 3, Carcará, Caititu 3, Caititu 2, Papagaio, Coqueirinho 2, Acauã, Angical 2, Arapapá, Teiú 2 e Tamanduá Mirim 2 no Sistema Elétrico,** Relatório Andesa RT-04-05-15 Maio de 2015.

ARIKAN, Oktay; KUCUKAYDIN, Baris. **A new approach to limit fault current with series-parallel resonance strategy.** Electrical Engineering, v. 102, n. 3, p. 1287-1296, 2020.

ARRANZ-GIMON, Angel et al. **A review of total harmonic distortion factors for the measurement of harmonic and interharmonic pollution in modern power systems.** *Energies*, v. 14, n. 20, p. 6467, 2021.

BERNARDINO, Luiz Gustavo Reis. **Estimador Seletivo do Conteúdo Harmônico de Tensão e Corrente Baseado em Rede Neural Profunda.** 2022. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. 95 p.

BOLLEN, Math HJ; GU, Irene YH. **Signal processing of power quality disturbances.** John Wiley& Sons, 2006.

BRASIL. **Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).** Submódulo 2.9: Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica. Aprovado em 2021.

BRITO, Vinícius Henrique Farias; GIANESINI, Bárbara Moraes; SANTOS, Ivan Nunes. **Avaliação da representação de cargas não lineares na aplicação de metodologia para compartilhamento de responsabilidades harmônicas.** 2021

BURIAN, R. (2009, 1º de janeiro). **ALGORITMOS GENÉTICOS NA ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CANDEIA, Jean Karlos de Souza. **Estudo da Identificação Não Invasiva de Cargas Elétricas Residenciais Usando Redes Neurais Artificiais e Máquinas de Estados Finitos.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Itajubá, João Monlevade, 2021. 114 p.

CARVALHO, John Kennedy Soares et al. **Análise e comparação sobre diferentes formas de controle de filtros ativos trifásicos em diferentes situações do sistema elétrico.** 2023

CHILAMKURTHY, Sasank et al. **Deep learning algorithms for detection of critical findings in head CT scans: a retrospective study.** *The Lancet*, v. 392, n. 10162, p. 2388-2396, 2018.

DE ARRUDA, Elcio F.; KAGAN, Nelson; RIBEIRO, Paulo F. **Harmonic distortion state estimation using an evolutionary strategy**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 25, n. 2, p. 831-842, 2010.

DeutschesWindenergie-Institute Tech-Wise A/S. **“Wind Turbine Grid Connection and Interaction – General Information”**.

DOTA. **Medições da Campanha de Pré-Tensão dos Parques Eólicos GPEXPAN**, Maio de 2018.

DRAGOVIĆ, Snežana. **Artificial neural network modeling in environmental radioactivity studies—A review**. Science of the Total Environment, v. 847, p. 157526, 2022.

DUGAN, Roger C. et al. Electric power systems quality. 2004.

FUCHS, EF Fuchs HA; FUCHS, H.; MASOUM, M. **Qualidade de energia de máquinas elétricas e sistemas de potência**. In: Anais da Oitava Conferência Internacional IASTED . 2008. pág. 35.

Garcia, F R. (sd). **Harmônicos em SEP: Causas, Efeitos e Soluções**

GAUTAM, Anjali; SINGH, Vrijendra. **Parametric Versus Non-Parametric Time Series Forecasting Methods: A Review**. Journal of Engineering Science & Technology Review, v. 13, n. 3, 2020.

GHRITLAHRE, Harish Kumar; VERMA, Manoj. **Solar air heaters performance prediction using multi-layer perceptron neural network—a systematic review**. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, p. 1-18, 2021.

HarmZs – **Programa para Cálculo do Comportamento Harmônico de Sistemas Elétricos**, versão 3.3 - CEPEL 2018.

HEATON, Jeff. **Introduction to Neural Networks with Java**. 2nd ed. St. Louis: HeatonResearch, 2008.

IEC. Norma Internacional IEC 61400-21, “**Wind Turbine Generators Systems – Part 21: Measurements and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines**”.

IEEE. IEEE 1531 “**IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters**”, IEEE Std 1531 - 2003.

KABALCI, Ersan; CALPBINICI, Ayberk. **Design and Implementation of Control Algorithms for Single-Axis Sun Tracking Systems**. Journal of Power Technologies, v. 100, n. 1, p. 32-42, 2020. Disponível em:

KANEGAE, Laís Rezende. **Estimação de Correntes Harmônicas por Redes Neurais Artificiais**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011. 69 p.

KUHN, Max; JOHNSON, Kjell. **Applied Predictive Modeling**. New York: Springer, 2019. 600 p. ISBN 9781493979363.

KUNDUR, Prabha. **Estabilidade do sistema de energia**. Estabilidade e controle do sistema de energia, v. 10, p. 7-1, 2007.

LANGE, Andrzej Grzegorz; REDLARSKI, Grzegorz. **Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces**. Energies, v. 13, n. 9, p. 2330, 2020.

LAS CASAS, Marina Spyer. **Modelagem Utilizando Redes Neurais Artificiais para Predição da Percentagem de Ferrita e Parâmetros Geométricos de Cordões de Solda de Aços Inoxidáveis Austeníticos**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. 113 p.

Leonardo, Gustavo HS et al. **Analysis and mitigation of harmonic distortion in distribution networks by an active filter**. In: 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). IEEE, 2018. p. 1-6.

LUCENA NETO, Everaldo Ferreira de. **Análise das Assinaturas Elétricas para Segregação de Cargas com Redes Neurais Visando o Consumo Individualizado**

de Energia. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Recife, 2024. 73 p.

MACHADO, B. A. S.; PEREIRA, C. G. NUNES, S. B.; PADILHA, F. F.; UMSZAGUEZ, M. A. **Supercritical Fluid Extraction Using CO₂: Main Applications and Future Perspectives**. *Separation Science and Technology*, v. 48, n. 3, p. 2741-2760, 2013. Link.

MALMONTE, R. L.; ASHLEY, A. W. **Harmonics at the utility industrial interface: a real world example**. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 6, Nov-Dec., pp. 1419-1426, 1995.

NASCIMENTO, R. P. **Propostas de procedimentos para projetar filtros harmônicos a partir de um programa de penetração harmônica, incluindo cálculos de desempenho e de suportabilidade**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

ONS. **“Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica”**, 27 de setembro de 2010.

ONS. Submódulo 2.8 – **“Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes”**. Ver, 1.1 de 16/09/2010.

ONS. Submódulo 2.8: **Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de seus Componentes**, Rio de Janeiro, p. 30, 2008.

PARACHA, Zahir J.; KALAM, Akhtar; ALI, Rubbiya. **A novel approach of harmonic analysis in power distribution networks using artificial intelligence**. In: 2009 International Conference on Information and Communication Technologies. IEEE, 2009. p. 157-160.

SILVA, Saulo Rodrigues e. **Modelagem de Oxigênio Dissolvido Utilizando Redes Neurais Artificiais**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014. 120 p.

SOUSA, Moisés Hamssés Sales de. **Detecção de Harmônicas em Redes Industriais Utilizando Métodos no Domínio da Frequência e do Tempo.** 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020. 74 p.

SOUZA, Jayne do Nascimento. **Análise de Impactos Harmônicos em Rede de Média Tensão Utilizando Redes Neurais.** 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2020. 97 p.