



## **ANÁLISE DE IMPACTOS HARMÔNICOS EM REDE DE MÉDIA TENSÃO UTILIZANDO REDES NEURAIAS**

**Jayne do Nascimento Souza**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Jandecy Cabral Leite

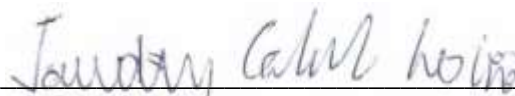
Belém  
2020

**ANÁLISE DE IMPACTOS HARMÔNICOS EM REDE DE MÉDIA TENSÃO  
UTILIZANDO REDES NEURAIAS**

Jayne do Nascimento Souza

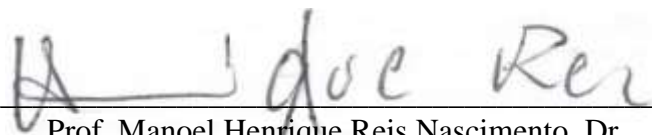
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



---

Prof. Jandecy Cabral Leite, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)



---

Prof. Manoel Henrique Reis Nascimento, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



---

Prof. David Barbosa Alencar, Dr.  
(FAMETRO-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

NOVEMBRO DE 2020

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da UFPA**

---

Souza, Jayne do Nascimento, 1990-  
Análise de impactos harmônicos em rede de média tensão  
utilizando redes neurais / Jayne do Nascimento Souza. – 2020.

Orientador: Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Processos, Belém, 2020.

1. Impactos harmônicos em sistemas elétricos de potência  
2. Qualidade de energia. 3. Cargas não lineares, Inteligência  
computacional. 4. Redes neurais. I. Título.

CDD 620

---

*Dedico este trabalho ao meus pais,  
meu companheiro e a todos os amigos  
que participaram ao longo de todo esse  
período essa caminhada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente, quero agradecer a Deus, por mais essa vitória em minha vida.

Aos meus pais pelo investimento em mim realizado e os anos de carinho e dedicação que foram fundamentais para que eu me tornasse quem sou hoje.

Ao meu companheiro, que sempre apoiou e sempre incentivou a seguir o melhor caminho, abdicou da nossa distância de cidades para que eu pudesse seguir o melhor caminho para nós.

Ao professor Jandecy Cabral, homem integro, transparente e objetivo nos temas que foram levantados e a colaboração neste trabalho, pela oportunidade de iniciar a pesquisa na área impactos harmônicos e por sua orientação segura e objetiva.

Ao meu ex chefe Sergio Bringel e Lysson que iniciou financiando meu mestrado, apoiando e incentivando o estudo na área, sempre apoiando seus colaboradores ao crescimento profissional.

Ao grande amigo Rivanildo Almeida que a faculdade me apresentou e no mestrado ela se consolidou. Nos momentos difíceis ao longo da jornada do mestrado, sempre apoiou e incentivou a continuar mostrando os caminhos mais fáceis a serem percorridos.

Ao ITEGAM pelo excelente trabalho realizado, dando oportunidade de estudos a todos os alunos.

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.*

*Albert Einstein*

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGE/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

## **ANÁLISE DE IMPACTOS HARMÔNICOS EM REDE DE MÉDIA TENSÃO UTILIZANDO REDES NEURAIS**

**Jayne do Nascimento Souza**

Outubro/2020

Orientador: Jandecy Cabral Leite

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Apresenta-se uma metodologia para avaliar o impacto causado pela geração de harmônicos, localizado em um barramento de interesse na subestação de média tensão, na rede elétrica da concessionária de energia. A estimativa é realizar a construção de um modelo com base em dados levantado, aplicando a técnica de rede neurais artificiais (RNA). A entrada do modelo neural é construída pelas correntes harmônicas, impactada de cargas não lineares que compõe o sistema da metodologia proposta. O objetivo desta dissertação é realizar campanha de medição para coleta de dados do sistema elétrico, demonstrar um estudo sobre a qualidade de energia elétrica, considerando as recomendações do IEC 61000-3-6 (IEC/ TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014, EN 50160-2004 e PRODIST (módulo 8,2017) e propor o desenvolvimento de um algoritmo capaz de avaliar as medições usando a técnica de rede neurais artificiais. A técnica utilizada nesse projeto foi a técnica de rede neural artificial (RNA), que foi possível realizar a construção do modelo bem com a validação dos resultados obtidos a partir de comparações dos resultados de referência via simulação computacional com resultados obtidos através do modelo neural. Diante disso, a dissertação apresentou e aplicou na prática com estudos de caso das ações para análise de impactos harmônicos em sistemas de distribuição de energia elétrica através da construção de modelos matemáticos utilizando a rede neurais, obtendo bons resultados, validado assim a técnica aplicada.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

## **ANALYSIS OF HARMONIC IMPACTS IN A MEDIUM VOLTAGE NETWORK USING NEURAL NETWORKS**

**Jayne do Nascimento Souza**

October/2020

Advisor: Jandecy Cabral Leite

Research Area: Process Engineering

A methodology is presented to assess the impact caused by the generation of harmonics, located on a bus of interest in the medium voltage substation, in the electric grid of the energy concessionaire. The estimate is to carry out the construction of a model based on data collected, applying the technique of artificial neural network (ANN). The input of the neural model is built by harmonic currents, impacted by non-linear loads that make up the system of the proposed methodology. The objective of this dissertation is to conduct a measurement campaign to collect data from the electrical system, to demonstrate a study on the quality of electrical energy, considering the recommendations of IEC 61000-3-6 (IEC / TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014, EN 50160-2004 and PRODIST (module 8,2017) and propose the development of an algorithm capable of evaluating measurements using the artificial neural network technique. The technique used in this project was the artificial neural network (ANN) technique, which made it possible to construct the model well with the validation of the results obtained from comparisons of the reference results via computer simulation with results obtained through the neural model. Therefore, the dissertation presented and applied in practice with case studies of the actions for analysis of harmonic impacts in electrical energy distribution systems through the construction of mathematical models using the neural network, obtaining good results, thus validating the applied technique.



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 - OBJETIVOS.....	1
<b>1.2.1 - Objetivo geral.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2.2 - Objetivos específicos.....</b>	<b>2</b>
1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	2
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
1.5 - CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	3
<b>1.5.1 - Definição e justificativa da proposta de pesquisa.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1 - QUALIDADE DE ENERGIA.....	5
2.2 - DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	6
2.3 - FONTES DE HARMÔNICOS.....	11
2.4 - TRANSFORMADORES.....	11
2.5 - FORNO ELÉTRICO A ARCO.....	13
2.6 - LÂMPADA FLUORESCENTE E LÂMPADAS LD.....	14
2.7 - O CIRCUITO TÍPICO E A SIMULAÇÃO DE DIFERENTES LÂMPADAS.....	16
2.8 - INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	18
2.9 -NORMAS E RECOMENDAÇÕES PARA MONITORAÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (QEE).....	20
2.10 - IEEE Std. 519-2014.....	20
<b>2.10.1 - Recomendação para aumentar os limites de corrente harmônica.....</b>	<b>23</b>
2.11 - EN 50160-POWER QUALITY STANDARD.....	23
2.12 - NORMA IEC 61000-3-6.....	24
2.13 - PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST – MÓDULO 8 (ANEEL- PRODIST, 2018).....	27
<b>CAPÍTULO 3 - REDES NEURAS ARTIFICIAIS.....</b>	<b>31</b>
3.1 - FUNDAMENTOS DE REDE NEURAS.....	31
<b>3.1.1 - Funções de ativação parcialmente diferenciáveis.....</b>	<b>34</b>

3.2 - REDE NEURAL PERCEPTRON DE MÚLTIPLAS CAMADAS (MLP).....	40
3.3 - RETROPROPAGAÇÃO (BACKPROPAGATION).....	42
<b>3.3.1 - Cálculo de impacto harmônico provindo de cargas não lineares.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.2 - Treinamento de Redes MLP .....</b>	<b>49</b>
<b>CAPÍTULO - 4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
4.1 - METODOLOGIA .....	50
4.1.1 - Metodologia desenvolvida.....	50
<b>4.1.2 - Processo de aprendizagem.....</b>	<b>51</b>
4.2 - FLUXOGRAMA.....	53
<b>4.2.1 - Software AAQEE.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.2 - Analisador de qualidade de energia elétrica hioki pw 3198.....</b>	<b>54</b>
4.3 - ESTUDO DE CASOS.....	55
<b>4.3.1 - Estudo de caso 1.....</b>	<b>56</b>
<b>4.3.2 - Análise de impacto entre a corrente harmônica de 3ª ordem dos alimentadores DIAL2-16, DIAL-17 e DIAL2-19 e a tensão harmônica de mesma ordem na barra DIBR2-03.....</b>	<b>56</b>
<b>4.3.3 - Estudo de caso.....</b>	<b>61</b>
<b>4.3.4 - Análise de impacto entre a corrente harmônica de 5ª ordem dos alimentadores DIAL2-16, DIAL-17 e DIAL2-19 e a tensão harmônica de mesma ordem na barra DIBR2-03.....</b>	<b>61</b>
<b>4.3.5 - Estudo de caso 3.....</b>	<b>66</b>
<b>4.3.6 - Análise de impacto entre a corrente harmônica de 7ª ordem dos alimentadores DIAL2-16, DIAL-17 e DIAL2-19 e a tensão harmônica de mesma ordem na barra DIBR2-03.....</b>	<b>66</b>
4.4 - DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	71
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....</b>	<b>72</b>
5.1 - CONCLUSÕES.....	72
5.2 - SUGESTÕES.....	73
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE A - FLUXOGRAMA VALIDAÇÃO DO PROJETO PROPOSTO.....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO I - DIAGRAMA UNIFILAR DA SUBESTAÇÃO DISTRITO INDUSTRIAL DA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA.....</b>	<b>81</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Distorções de harmônicas.....	7
Figura 2.2	Forma de onda sem harmônico.....	7
Figura 2.3	Circuito equivalente para a estimativa da impedância harmônica.....	8
Figura 2.4	Representação de forma de ondas com harmônico.....	9
Figura 2.5	Circuito equivalente ao forno elétrico.....	14
Figura 2.6	Amplitude e ângulo de fase de cada harmônico.....	15
Figura 2.7	Diagrama do circuito da lâmpada fluorescente.....	16
Figura 2.8	Forma de onda da corrente de simulação e espectro harmônico da lâmpada fluorescente.....	17
Figura 2.9	Diagrama do circuito da lâmpada Led.....	17
Figura 2.10	Forma de onda da corrente de simulação e espectro da lâmpada Led...	18
Figura 2.11	Espectro do inversor.....	19
Figura 2.12	Ponto de acoplamento comum (PAC).....	21
Figura 3.1	Conceito de filtro de energia ativo.....	33
Figura 3.2	Processo de detecção de harmônica no filtro de energia ativo: tipo original (a), tipo de rede neural de avanço (b), rede neural recorrente de Elman (c).....	34
Figura 3.3	Função degrau bipolar ou função sinal (symmetric hard limiter).....	35
Figura 3.4	Função degrau ( Heavyside/hard limiter).....	36
Figura 3.5	Ilustração da função de ativação do tipo linear.....	36
Figura 3.6	Representação gráfica da função de ativação do tipo tangente hiperbólica.....	37
Figura 3.7	Ilustração da função de ativação do tipo logística (sigmoide).....	38
Figura 3.8	Representação gráfica da função de ativação do tipo rampa.....	38
Figura 3.9	Ilustração da função de ativação de base radial (gaussiana).....	39
Figura 3.10	Arquitetura de uma rede neural do tipo MLP.....	40
Figura 3.11	Diagrama de blocos do ELMAN.....	42
Figura 3.12	Notação para derivação do algoritmo backpropation.....	43
Figura 3.13	Configuração de neurônio utilizado na derivação do algoritmo backpropagation.....	44
Figura 4.1	Sistema elétrico de potência típico.....	50

Figura 4.2	Esquema resumido do modelo proposto.....	51
Figura 4.3	Diagrama de blocos ilustrando a forma de aprendizagem.....	52
Figura 4.4	Fluxograma da pesquisa.....	53
Figura 4.5	Sistema elétrico de potência típico.....	55
Figura 4.6	Análise das tensões de saída da RNA de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).....	57
Figura 4.7	Análise das tensões de saída da RNA de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).....	58
Figura 4.8	Análise das tensões de saída da RNA de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).....	58
Figura 4.9	Análise dos impactos de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).....	59
Figura 4.10	Análise dos impactos de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).....	60
Figura 4.11	Análise dos impactos de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).....	60
Figura 4.12	Análise das tensões de saída da RNA de 5º harmônico na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).....	62
Figura 4.13	Análise das tensões de saída da RNA de 5º harmônico na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).....	63
Figura 4.14	Análise das tensões de saída da RNA de 5º harmônico na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).....	63
Figura 4.15	Análise dos impactos de 5º harmônico na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).....	64
Figura 4.16	Análise dos impactos de 5º harmônico na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).....	65
Figura 4.17	Análise dos impactos de 5º harmônico na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).....	65
Figura 4.18	Análise das tensões de saída da RNA de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).....	67
Figura 4.19	Análise das tensões de saída da RNA de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).....	68

Figura 4.20	Análise das tensões de saída da RNA de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).....	68
Figura 4.21	Análise dos impactos de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).....	69
Figura 4.22	Análise dos impactos de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).....	70
Figura 4.23	Análise dos impactos de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Limite de distorção de tensão .....	21
Tabela 2.2	Limites de distorção harmônica de corrente para sistema classificados entre 127 V e 69Kv.....	22
Tabela 2.3	Multiplicadores recomendados para aumento dos limites de corrente harmônica.....	23
Tabela 2.4	Valores de cada harmônico de tensão .....	24
Tabela 2.5	Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de baixa tensão (BT) e média tensão (MT).....	25
Tabela 2.6	Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média (MT), alta (AT) e extra alta tensão (EHT).....	26
Tabela 2.7	Terminologia.....	28
Tabela 2.8	Limites das distorções harmônicas totais.....	30
Tabela 4.1	Fator de Impacto $IF_{Vlj}^h$ (%) calculado na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (3° harmônico).....	57
Tabela 4.2	Fator de Impacto $IF_{Vlj}^h$ (%) calculado na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (5° harmônico).....	61
Tabela 4.3	Fator de Impacto $IF_{Vlj}^h$ (%) calculado na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (7° harmônico).....	66

## NOMENCLATURA

ANEEL	AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
AT	ALTA TENSÃO
BT	BAIXA TENSÃO
BT	BAIXA TENSÃO
CA	CORRENTE ALTERNADA
CC	CORRENTE CONTINUA
$DTT_h$ %	DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL DE TENSÃO DE ORDEM H
$DTT$ %	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO
$DTT$ 95%	VALOR DO INDICADOR $DTT$ % QUE FOI SUPERADO EM APENAS 5 % DAS 1008 LEITURAS VÁLIDAS
$DTT_3$ %	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO PARA AS COMPONENTES MÚLTIPLAS DE 3
$DTT_3$ 95 %	VALOR DO INDICADOR $DTT_3$ % QUE FOI SUPERADO EM APENAS 5 % DAS 1008 LEITURAS VÁLIDAS
$DTT_i$ %	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO PARA AS COMPONENTES ÍMPARES NÃO MÚLTIPLAS DE 3
$DTT_i$ 95 %	VALOR DO INDICADOR $DTT_i$ % QUE FOI SUPERADO EM APENAS 5 % DAS 1008 LEITURAS VÁLIDAS
$DTT_p$ %	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO PARA AS COMPONENTES PARES NÃO MÚLTIPLAS DE 3
$DTT_p$ 95 %	VALOR DO INDICADOR $DTT_p$ % QUE FOI SUPERADO EM APENAS 5 % DAS 1008 LEITURAS VÁLIDAS
F	FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL
FTT	TRANSFORMADA DE FOURRIER
IAC	CORRENTE ALTERNADA
IEC	COMISSÃO ELETROTÉCNICA INTERNACIONAL
IEEE	INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS
$IH$	CORRENTE HARMÔNICA
IHD	DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL

IHDI	DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL DE CORRENTE
IHDV	DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL DE TENSÃO
IL	CARGA DO CONSUMIDOR
$I_n$	CORRENTE HARMÔNICA PARA $N$ NÍVEL HARMÔNICO
ISC	CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO
LMS	MÍNIMO QUADRADO MÉDIO
MT	MÉDIA TENSÃO
MLP	REDE PERCEPTRON DE MÚLTIPLAS CAMADAS
MT	MÉDIA TENSÃO
P	POTÊNCIA REAL
PAC	PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM
PCC	PONTO DE CONEXÃO COMUM
<i>PMÉDIA</i>	POTENCIA MÉDIA
PRODIST	PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL
PAC	PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM
PCC	PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM
PU	POR UNIDADE
QQE	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
RMS	RAIZ QUADRÁTICA MÉDIA
RNA	REDE NEURAIAS ARTIFICIAIS
T	PERÍODO
TC	TRANSFORMADOR DE CORRENTE
THD	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL
THDI	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE
THDV	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO
TL	TENSÃO DE LINHA
TP	TRANSFORMADOR DE CORRENTE
TR	TENSÃO DE REFERÊNCIA
$V_1$	TENSÃO FUNDAMENTAL MEDIDA
VAC	TENSÃO ALTERNADA
$V_n$	TENSÃO HARMÔNICA PARA $N$ NÍVEL HARMÔNICO
$V_n$	TENSÃO HARMÔNICA DE ORDEM $H$



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - MOTIVAÇÃO

A motivação desse trabalho partiu do interesse pelo assunto qualidade de energia elétrica, com o foco no controle de distorções harmônicas num sistema de energia elétrica, na aplicação de uma metodologia para analisar os impactos em redes elétricas de média tensão, buscando identificar quais alimentadores possuem impactos harmônicos justificáveis para analisar o sistema e melhorar a tomada de decisão e consequentemente melhorando a gestão do sistema de energia.

Nos tempos atuais, de forma repentina, parte da carga variável e da carga não linear aumentou significativamente, além disso, ocorreram mudanças na composição das cargas, consequentemente ocorreram mudanças no desvio dos indicadores de QEE, portanto monitorar e melhorar os indicadores de qualidade de energia elétrica é de fundamental importância tanto para concessionária quanto para os consumidores, pois a eficiência dos dispositivos elétricos e eletrônicos depende disso (ANDREY Y.SHKLYARSKIY, 2018).

A fonte de alimentação mundial está se tornando uma fonte de correntes harmônicas com a poluição causada por equipamentos eletrônicos modernos, causando interferência nos sistemas de comunicação, gerando perdas extras de energia elétrica na fiação, sobrecarga nos transformadores ou nos próprios sistemas elétricos, e, além disso, causa a condução de um alto nível de potência reativa, adicionando mais encargos às contas de energia elétrica aos consumidores devido a essa poluição (T.J, HAMMONS, 2011).

### 1.2 - OBJETIVOS

#### 1.2.1 - Objetivo geral

Analisar um barramento do sistema elétrico, a fim de avaliar a contribuição dos impactos harmônicos causados por carga não lineares, utilizando técnicas de redes neurais.

## 1.2.2 - Objetivos específicos

- Realizar campanha de medição para coleta de dados do sistema elétrico
- Demonstrar um estudo sobre a qualidade de energia elétrica, considerando as recomendações do IEC 61000-3-6 (IEC/ TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014, EN 50160-2004 e PRODIST (módulo 8,2017).
- Propor o desenvolvimento de um algoritmo capaz de avaliar as medições usando a técnica de rede neurais artificiais.

## 1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho é de total relevância diante da necessidade de identificar os níveis de distorções harmônicas, para que possamos propor de forma eficaz e precisa soluções que possibilitem a diminuição no impacto no sistema elétrico, cujo foco será a busca de melhorias da qualidade de energia elétrica (QEE), utilizando o controle de distorções harmônicas. As principais contribuições geradas foram:

- Avaliação da qualidade de energia elétrica utilizando técnicas computacionais de redes neurais.
- Conhecer o perfil harmônico individual de cada processo envolvido e coletado nos alimentadores.

A utilização da técnica de rede neurais é capaz de determinar a presença da poluição harmônica, quantificar e identificar os horários da ocorrência e as fases que são causadores dos distúrbios presentes em cada alimentador analisando, incluindo na análise, os níveis em cada harmônicas e a ordem presente em cada fase analisada.

Este trabalho é fundamental para contribuição da aplicação na prática da metodologia válida, através de estudos de caso para análise de impactos harmônicos, considerando as normas do IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014 e PRODIST/MODULO 8/ANEEL, revisão ano 2018, que servirá como material de apoio e base para as pesquisas que serão realizadas.

## 1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, conforme listado abaixo:

O capítulo 1 apresentação consiste na motivação, os objetivos e contribuição da dissertação.

O capítulo 2 apresentações da literatura, sobre o conceito da qualidade de energia, fundamento das distorções harmônicas e suas as principais causas, normas e recomendações para monitoração de qualidade de energia, considerando as normas técnicas IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014 e PRODIST/MODULO 8/ANEEL, revisão ano 2018.

O capítulo 3 refere-se fundamentos da rede neurais, funções de ativação parcialmente diferenciáveis, rede neural perceptron de múltiplas camadas, retropropagação.

O capítulo 4 refere-se a metodologia aplicada, resultados e discursões finais.

O capítulo 5 apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 1.5 - CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

### 1.5.1 - Definição e justificativa da proposta de pesquisa

Diante da expansão elétrica que a cada dia vem ocorrendo, o tema Qualidade de Energia Elétrica (QEE), vem despertando o interesse nos órgãos regulamentadores. Esse despertar do interesse, torna-se cada vez mais frequente, devido a causa de forte e continua degradação dos índices de conformidade e continuidade recomendado pelos órgãos, mediante as transformações e descobertas nas novas tecnologias dos equipamentos eletroeletronicos, onde estão cada vez mais presentes nos setores comerciais, domésticos e industriais, propocionando maior eficiência e rapidez nas atividades diárias. Devido aos avanços nessa expansão elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) observou o crescente niveis de distorções harmônicos de tensão e corrente nas redes elétricas, onde são prejudiciais aos próprios equipamentos eletrônicos, possuindo grande sensibilidade às distorções que estão presente na rede. Diante do fato, o órgão regulamentador criou o manual de Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional-PRODIST, módulo 8, tornando público e determinando os limites aplicados a qualidade de energia elétrica. Dentre os principais objetivos do PRODIST é garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade.

Esta dissertação justifica-se por contribuir com a aplicação de uma metodologia de análise de impactos harmônicos em redes elétricas de média tensão, auxiliando na identificação nos alimentadores, que constam maiores impactos harmônicos na rede elétrica, ajudando na melhoria de tomadas de decisões e melhorando a gestão do sistema de energia. Tanto empresas de transmissão como as de distribuição de energia elétrica, possuem interesse no tema, devido a relevância de questão de harmônico em seus respectivos sistemas, uma vez que, com a vigência de normas relacionadas à qualidade de energia, as mesmas são obrigadas a seguirem as normas e manterem os padrões solicitados, para evitarem multas pesadas em virtude do não cumprimento das normas vigentes, além disso, os consumidores deverão assumir a responsabilidade caso violem os níveis de distorções harmônicas relacionado na norma.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 - QUALIDADE DE ENERGIA

Segundo SOUZA (2000) mediante as transformações e descobertas nas novas tecnologias dos equipamentos eletroeletrônicos, onde estão cada vez mais presentes nos setores comerciais, domésticos e industriais, proporcionando maior eficiência e rapidez nas atividades diárias, podemos tomar como exemplo: microcomputadores, notebook, carregadores de equipamentos eletrônicos, carros elétricos, micro-ondas e outras cargas não-lineares (relação não-linear entre tensão e corrente da rede). De acordo com o autor, o que pode provocar impactos na rede são:

- Baixo fator de potência;
- Distorção da tensão da rede no ponto de acoplamento comum devido à impedância do circuito ou da instalação;
- Sobrecarga nos condutores neutros em razão da soma das harmônicas de terceira ordem geradas pelas cargas monofásicas;
- Baixa eficiência;
- Interferência em alguns instrumentos e equipamentos;
- Sobredimensionamento dos sistemas de distribuição.
- Aquecimento em transformadores devido ao efeito pelicular (aumento da resistência do cobre com a frequência), à histerese e às correntes parasitas.

Segundo JR. e SIMONETTI (2019) a longo prazo a presença de harmônicas também pode causar grande prejuízo econômico. Tomamos como exemplo: envelhecimento precoce de cabos e componentes eletrônicos, sendo necessário a substituição dos materiais antes do prazo previsto em projeto, sobrecarga na rede e disparos intempestivos acarretando em paradas dos setores de produção.

Para controlar o distúrbio harmônico na rede, as normas técnicas internacionais (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS-IEEE) foram estabelecidas de maneira a limitar a emissão de harmônicos

## 2.2 - DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Quando existem cargas não-lineares ligadas diretamente a rede elétrica, conforme mencionado JR. e SIMONETTI (2019) nesse trabalho, a corrente que transita nas linhas contém harmônicas e as quedas de tensão provocadas pelas harmônicas nas impedâncias das linhas faz com que as tensões de alimentação fiquem distorcidas. No entanto, por vários motivos, as concessionárias não conseguem preservar tais condições desejáveis.

De acordo com ALMEIDA (2018) a qualidade de energia está surgindo como um “direito básico”, proporcionando assim um bom funcionamento de seus equipamentos.

Os usuários de energia elétrica residencial ou industrial necessitam de energia livre de falhas, distorções, cintilação, ruído e interrupções. As concessionárias de energia desejam que os usuários utilizem equipamentos de boa qualidade para que eles não produzam anormalidade ao sistema elétrico. Distorção harmônica são outras formas de onda múltiplas da fundamental. Como exemplo tem a frequência fundamental de 50 Hz (frequência da rede em cabo verde), a 2ª harmônica é 100 Hz e assim por diante.

Quando essas frequências com múltiplos inteiros da frequência do sistema de distribuição são observadas e existe a combinação com o formato fundamental, tem-se o efeito de distorção harmônica na rede de distribuição elétrica.

Segundo DUGAN, MCGRANAGHAN, SANTOSO e BEATY (2004) um dispositivo não linear é aquele em que a corrente não é proporcional à tensão aplicada, onde na Figura 2.1 mostra as formas de onda com distorção harmônica e a Figura 2.2 sem distorção harmônica. Aumentar a tensão em alguns por cento pode dobrar a corrente e assumir uma forma de onda diferente.

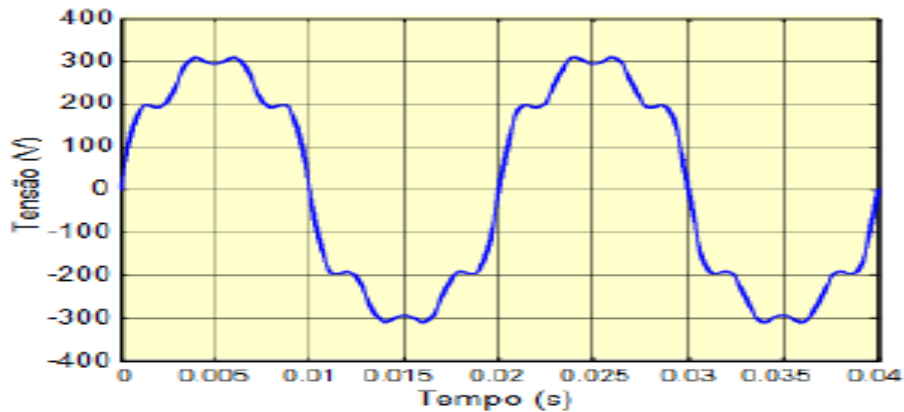


Figura 2.1 - Distorções de harmônicas.  
Fonte: TAVARES, (2015).

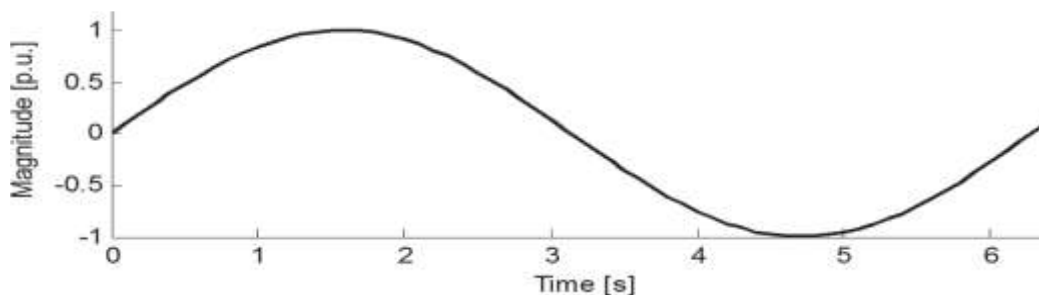


Figura 2.2 - Forma de onda sem harmônico.  
Fonte: MAYORAL *et al.* (2017).

Segundo NOSHAHR, BAGHERI, e KERMANI (2019) atualmente as distorções harmônicas são conhecidas como espécie de energia poluída que, diversamente dos transientes de corrente e tensão, estão presentes de forma permanente, agregado a alta inserção de cargas não-lineares conectadas no sistema elétrico. Dentro os maiores causadores da distorção harmônica, podemos citar: transformadores, motores e sistemas eletrônicos de chaveamento que necessitam trabalhar com a mudança da corrente alternada para corrente contínua.

Segundo AZEVEDO, ROMÃO, e MENEGATTI (2019) a maioria dos dispositivos não lineares produz distorções harmônica ímpares sendo que a maioria componentes de distorção é dada pelo 3º harmônico. Essa atividade é dada como algo intrínseco da maioria dos sistemas elétricos. Em relação as harmônicas pares, que geram assimetrias de meia-onda, não são comuns nos dispositivos elétricos, mesmo em caso não linear, pois elas se manifestam com menos intensidade em sistemas elétricos do que as harmônicas ímpares e no geral estão atreladas ao mau funcionamento das cargas não

lineares. Para melhor entendimento e para que possamos quantificar o problema de distorção na rede precisamos entender a análise harmônica clássica, conhecida como análise de Fourier.

De acordo com MONTEIRO, OLIVEIRA, ALEIXO, e DUQUE (2016), a impedância harmônica é calculada utilizando a corrente a voltagem no ponto de acoplamento comum (PCC). Quando um método não invasivo é usado, a corrente e a tensão são medidas, a transformada de Fourier (FTT) é aplicada e, em seguida, a impedância harmônica é calculada. Quando um método invasivo é usado, uma perturbação é introduzida na rede, e a corrente correspondente e a tensão são medidas e a impedância harmônica é calcula em todo o espectro de frequência. A Figura 2.3, mostra uma rede onde a perturbação é representada como a fonte de corrente. Então, a impedância harmônica é obtida dividindo a tensão e a corente no domínio da frequência.

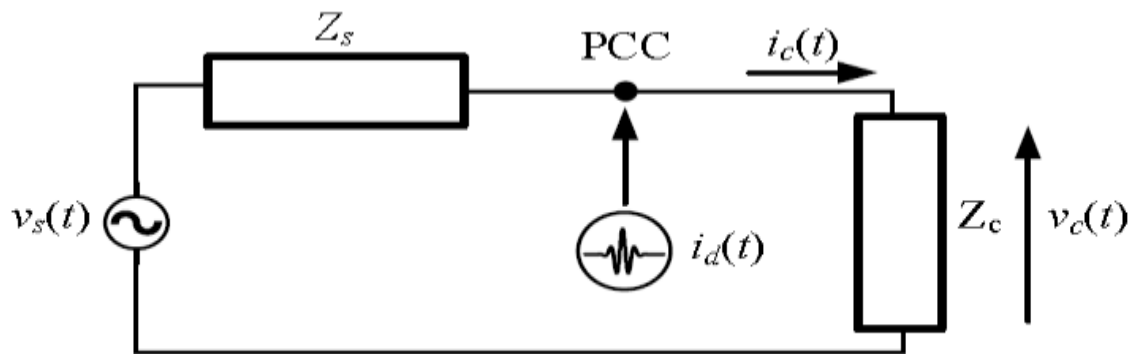


Figura 2.3 - Circuito equivalente para a estimativa da impedância harmônica.  
Fonte: MONTEIRO, OLIVEIRA, ALEIXO e DUQUE (2016).

Para MAHAD, UQAILI, e LARIK (2011) a formula geral para séries de Fourier,  $f(t)$  de qualquer onda complexa durante o período de  $2\Omega$  pode ser escrito na formula 2.1

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.1)$$

Onde o  $a_0$  é o componente DC da onda original e  $(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$  é o enésimo harmônico da função. Na análise de Fourier uma função periódica não senoidal pode ser representada por uma série trigonométrica composta pela somatória de senos e ou cossenos. Podendo ser exemplificado melhor em forma da Figura 2.4, os tipos de ondas existente, onde na letra a, b e c, tem-se uma representação fundamental do 3° e 5°



harmônico. Essas três ondas quando somadas geram a forma de onda distorcida, que resulta na letra d.

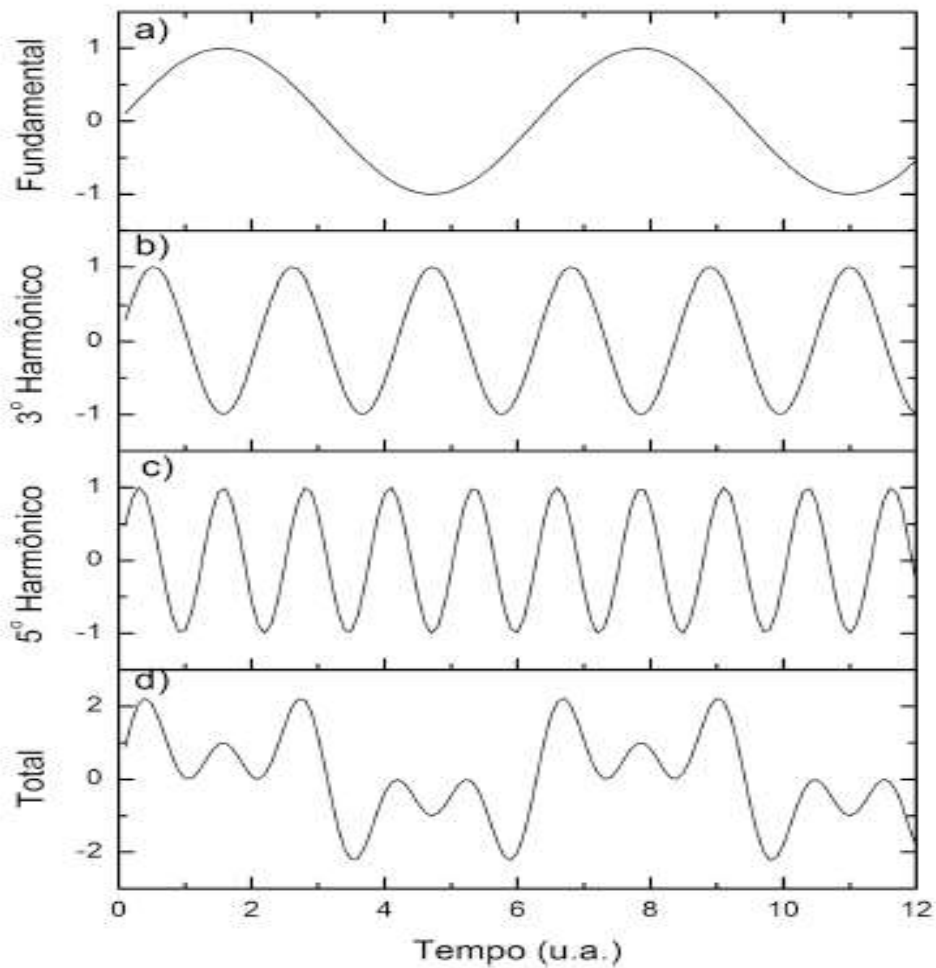


Figura 2.4 - Representação de forma de ondas com harmônico.  
Fonte: AZEVEDO, ROMÃO, e MENEGATTI (2019).

Analisando a Figura 2.4, atentou-se que o sinal global (fundamental 3 e 5º harmônico) é a soma do ponto a ponto dos sinais fundamentais e são formados por senoides puras de amplitudes e frequência distintas. Diante disso, podemos afirmar que um sinal periódico contém forma de harmônico quando a representação de onda desse sinal não é senoidal ou, podemos dizer que um sinal contém harmônico quando ele é distorcido comparado a um sinal senoidal.

Para ANDREI, CEPISCA e GRIGORESCU (2011) destaca os aspectos proeminentes da qualidade de energia são considerados os seguintes:

Tensões e correntes são quantidade senoidais e podem ser expressas por:

$$u(t) = \sum_{k=1}^N U_k \sqrt{2} \sin(k\omega t + y_k) \quad (2.2)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^N I_k \sqrt{2} \sin(k\omega t + y_k - \varphi_k) \quad (2.3)$$

Onde  $U_k$ ,  $I_k$  são os RMS de cada harmônico  $k$ - de tensão, respectivamente corrente,  $\omega$  é a frequência angular,  $y_k$  é o ângulo de fase ou cada harmônico  $k$ - de tensão ou voltagem,  $\varphi_k$  é a diferença de cada ângulo de fase do harmônico  $k$ - de tensão ou voltagem e  $t$  é o tempo.

A presença de harmônico de tensão e corrente, são avaliados através de uma quantidade relativa que são conhecido com os valores das amplitudes harmônicos, o cálculo da Taxa de Distorção Harmônica é definido como a formula 2.4:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N v_i^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.4)$$

Em que  $V_1$  é o valor de amplitude do modo fundamental e  $v_i^2$  a amplitude subsequente de cada harmônico. O valor de THD é expresso em porcentagem (%).

Para PROCOBRE, (2003), as sequências harmonicas podem ser positivas, negativas e zero, conforme descrito a seguir:

- Sequência positiva: tendem a fazer os motores a girarem no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando assim, uma sobrecorrente nos seus enrolamentos;
- Sequência negativa: tendem a fazer motores girarem em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e causando aquecimento indesejado;
- Sequência zero: surgimento de uma corrente de neutro 3 (três) vezes maior que a corrente de fase, ocasionando aquecimento excessivo do condutor neutro.

## 2.3 - FONTES DE HARMÔNICOS

Segundo JÚNIOR, *et al.* (2018) esclarece que se tornaram frequentes a preocupação com a qualidade de energia, e conseqüentemente com as harmônicas, quando houve um grande aumento de cargas não lineares na rede, a partir dos meados da década de 90, devido aos equipamentos baseados em eletrônicas de potência.

De acordo com (DUGAN *et al.*, 2004) destaca que a distorção harmônica é causada por cargas não-lineares no sistema de potência; um dispositivo não linear é aquele em que a corrente não é proporcional à tensão aplicada. Ou seja, tendo-se uma tensão senoidal aplicada a uma resistência não linear simples, com a tensão e a corrente variando, enquanto a tensão aplicada é perfeitamente senoidal, a corrente resultante é distorcida.

Conforme DAS (2012) de forma simples, a simulação harmônica é parecida com a simulação de fluxo de carga. Podemos usar como parâmetros para modelagem de componentes de um sistemas elétricos: Resistência, indutância e capacitância. Esses parâmetros estão presentes em todo o circuito ou equipamentos elétricos. Além dos modelos de cargas, transformadores, geradores, motores, etc., onde podemos incluir como fontes de injeção de harmônicos, os fornos elétrico a arco, placas solares, lâmpada fluorescente e LED , etc.

## 2.4 - TRANSFORMADORES

De acordo com CALDEIRA, COELHO, MACIEL, COELHO e FARIA (2018) o desenvolvimento da eletrônica de potência propiciou elevado avanço tecnológico em instalações industriais e, concomitantemente, amplificou o volume de perdas acarretadas pela circulação de harmônicos na rede.

Segundo ELMOUDI, LEHTONEN e NORDMAN (2006) as perdas do transformador ( $P_t$ ) são divididas em perdas sem carga ( $P_{nl}$ ) e perdas de carga ( $P_{ll}$ ) como :

$$P_t = P_{nl} + P_{ll} \quad (2.5)$$

Onde  $P_{nl}$  são as perdas devido à excitação de tensão do núcleo e  $P_{ll}$  e expresso como:

$$P_{II} = I^2 R + P_{EC} + P_{osl} \quad (2.6)$$

Onde:

$I^2 R$  é a perda devido à corrente de carga e resistência ao enrolamento CC, em W.

$P_{EC}$  é perdas por correntes em W.

$P_{osl}$  é perda devido a estrutura diferentes do enrolamento em W.

As perdas totais são determinadas subtraindo  $I^2 R$  de perda de carga medidas durante o teste de impedância e não existe um método de teste para distinguir as perdas por enrolamento que ocorrem em partes estruturais

Segundo IEEE, Std C57-110-1 Recommended Practice for Establishing (1998) esses componentes de corrente harmônica causam perdas adicionais nos enrolamentos e outras partes estruturais. Convencionalmente, as perdas por correntes do enrolamento (PEC) presume-se que os gerados pelo fluxo eletromagnético variam com o quadro da corrente eficaz e o quadrado da frequência ( ordem harmônica  $h$ ), conforme a Eq. (2.7) :

$$P_{ec} = P_{ec-R} \sum_{h=1}^{h=\max} h^2 \left( \frac{I_h}{I_r} \right)^2 \quad (2.7)$$

Sendo que

$P_{ec}$  = Perdas nominais de correntes, em W.

$I_h$  = Corrente na ordem harmônica  $h$ , em A.

$I_r$  = Corrente nominal.

$h$  = Ordem harmônica.

O fluxo eletromagnético pode não penetrar totalmente os fios do enrolamento em altas frequências. A dependência da frequência da penetração no campo  $\delta$  em frequência harmônica é dada por:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \pi f h}} = \frac{\delta_r}{\sqrt{h}} \quad (2.8)$$

Sendo que

$\delta_r$  = Profundidade de penetração na frequência nominal de cerca de 10 mm e para cobre e 13 mm para alumínio.

$\rho$  = Resistividade do condutor.

$\mu$ = Permeabilidade do condutor.

$f$ = Frequência fundamental.

## 2.5 - FORNO ELÉTRICO A ARCO

Segundo JR. e SIMONETTI (2019) os fornos elétricos a arco são o principal equipamento de transformação da sucata metálica em aço no processo de fusão e refinamento de metais (principalmente do ferro), sendo de fundamental importância na indústria siderúrgica devido ao seu benefício ambiental a partir da reciclagem de materiais metálicos. Diante disso, o forno elétrico a arco no processo siderúrgico, torna-se de fundamental importância na sustentabilidade da cadeia de produção e consumo humano de materiais fabricados a partir do aço como matéria-prima.

De acordo com DUGAN *et al.* (2004. ) os fornos de arcos são considerados como uma fonte de perturbação bastante intensa para os sistemas elétricos, pois entre os principais problemas de qualidade da energia comumente encontrados nas operações, estão incluídos: desequilíbrios de tensão, distorção da forma de onda ( harmônica, inter-harmônicas, sub-harmônicas) e flutuações de tensão. São cargas não lineares, variáveis no tempo, que constantemente causam grandes flutuações de tensão e distorção harmônica. A maior parte da grande corrente ocorrem flutuações no início do ciclo de fusão.

Segundo ANDREI *et al.* (2011) o forno elétrico a arco produz fortes efeitos perturbadores na rede, caracterizado por não simetrias de correntes e tensões, oscilações, quedas de tensão e sobretensão. Existem muitas maneiras de reduzir os efeitos das perturbações, este são determinados pelo sistema utilitário ao qual o forno deve ser conectados e são influenciado principalmente pelo tamanho e estabilidade da rede elétrica. Antes de tais sistemas serem instalados, será necessário para determinar os tipos de equipamentos necessários para tais perturbações no sistema elétrico:

- Configuração do banco de capacitores
- Necessidade de ajuste harmônicos das seções
- Procedimento de comutação

As perturbações causadas por fornos a arco elétricos são de natureza aleatória e abrangem uma faixa de frequência de DC a algumas centenas de Hz. Dependendo se

CA de CC é usado para fornecer o forno elétrico a arco, existem desequilíbrios, harmônico, Inter- harmônicos ou cintilação de tensão

Segundo NIKOLAEV *et al.* (2018) o estudo da composição harmonica de tensão de arco elétrico, requer análise de valores instantâneos. Essa análise é possibilitada pelo modelo matemático do circuito conforme Figura 2.5, baseado nas leis de Kirchoff, diferenciais equação da condutividade instantânea do arco, bem como equações de força eletromotriz do arco considerando a ação elétrica semelhante a uma válvula.

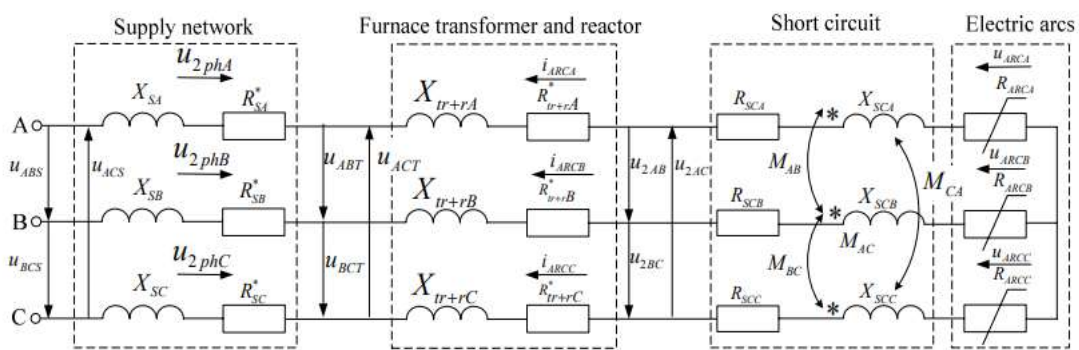


Figura 2.5 - Circuito equivalente ao forno elétrico.  
 Fonte: NIKOLAEV, TUPUPOV e ANTROPOVA (2018).

## 2.6 - LÂMPADA FLUORESCENTE E LÂMPADAS LED

Para CHAMMAM e MRABET (2018) as lâmpadas fluorescentes são muito utilizadas pelos consumidores de eletricidade, particularmente em residências particulares. São conhecidas como cargas não lineares, a maioria fabricadas possuem baixo fator de potência com harmônicos injetados na rede elétrica que afeta a qualidade de energia.

Segundo DUGAN *et al.* (2004) as lâmpadas que exigem um reator para fornecer uma alta tensão inicial para iniciar a descarga da energia elétrica, pois a corrente oscila entre os dois eletrodos no tubo fluorescente. Quando a descarga é estabelecida, a tensão diminui a medida que a corrente do arco aumenta, essa reação é essencialmente um curto-circuito entre os dois eletrodos, e o papel fundamental do reator é reduzir rapidamente a corrente a um nível para manter a saída específica do lúmen, sendo assim, um reator também é um limitador de corrente. Na tentativa de fornecer soluções,

muitas empresa surgiram com modelos diferentes no mercado, e diante de tais descobertas, os estudos ampliaram para as novas tecnologias no mercado.

Segundo OGUNJUYIGBE, AYODELE e IDIKA (2017) as novas tecnologias levaram a economia de energia a graves considerações. Embora essas modernas tecnologias de iluminação ofereçam esses enormes benefícios, elas produzem harmônicos, pois são carga não lineares. Harmônico em sistemas de energia impõe consequências negativas à energia no sistema; aumenta as perdas de linha e causa excesso de aquecimento de equipamentos que diminuem a sua vida útil. Na Figura 2.6 pode ser exemplificado a medição experimental, os sub-harmônicos podem causar tremulações que resultam em efeito visual desconfortável nos olhos, desequilíbrio e saturação do núcleo de transformadores e envelhecimento termo de motores de indução.

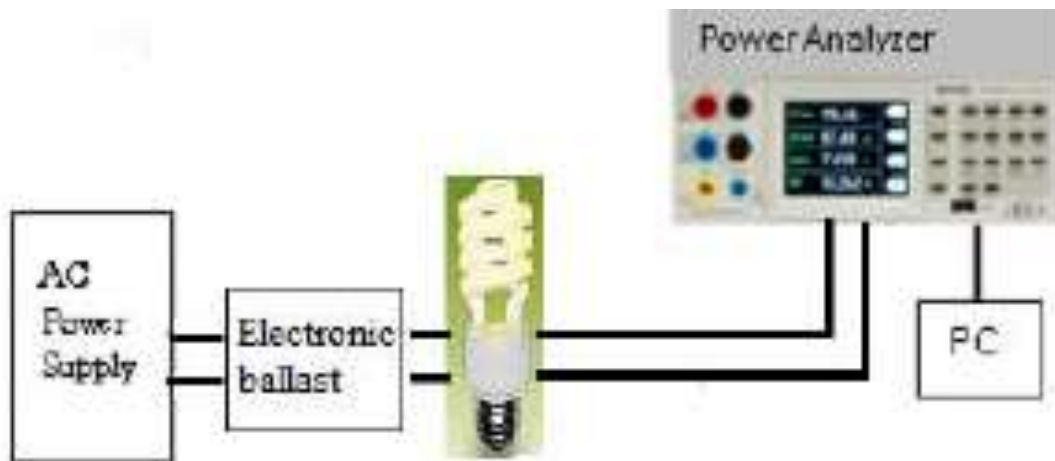


Figura 2.6 - Amplitude e ângulo de fase de cada harmônico.  
Fonte: CHAMMAM e MRABET (2018).

No SHUNFU LIN e ZHU (2016) enfatiza em seu artigo que as medições a análise comparativa são realizadas nas características de emissão da qualidade de energia da lâmpada incandescente, lâmpadas fluorescentes e LED com o mesmo brilho, incluindo potência ativa ( $P$ ), potência reativa ( $Q$ ), potência de fator ( $PF$ ), harmônicos e outros índices. Onde realiza uma comparação abrangente e quantificada em termos de poder nos impactos na qualidade da adoção generalizada de lâmpadas fluorescentes e LED com fluxo luminoso semelhante no sistema de distribuição.

## 2.7 - O CIRCUITO TÍPICO E A SIMULAÇÃO DE DIFERENTES LÂMPADAS

### a) Lâmpada fluorescente

De acordo com SHUNFU LIN e ZHU (2016) o diagrama de circuito típico de uma lâmpada fluorescente é mostrado na Figura 2.7. A tensão de corrente contínua de 300 V (CC) é obtida com a rede elétrica fluindo através do circuito retificados e capacitor de filtro. E a corrente flui através da alta frequência do circuito de alta oscilação para gerar a alta frequência de alta tensão na fonte de alimentação.

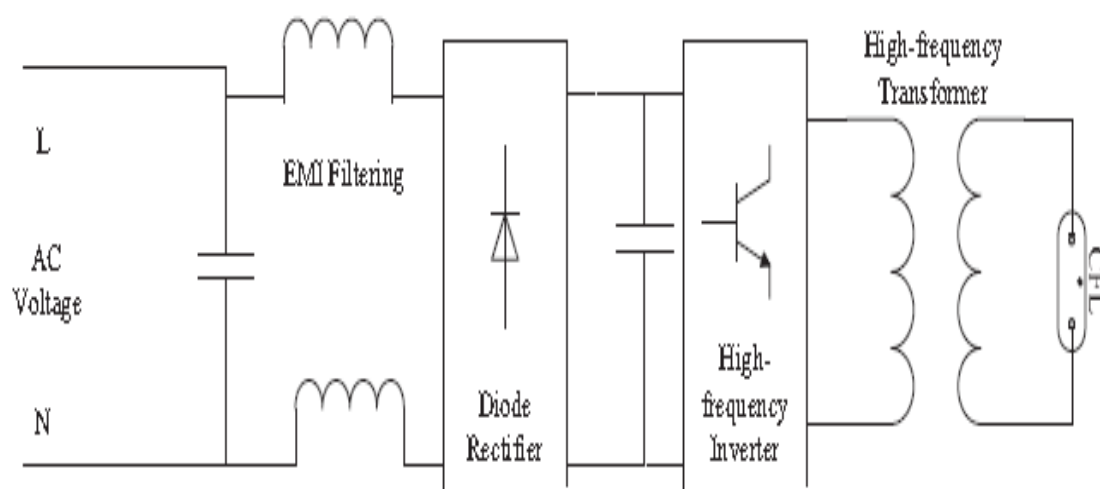


Figura 2.7 - Diagrama do circuito da lâmpada fluorescente.  
Fonte: SHUNFU LIN e ZHU (2016).

Segundo SHUNFU LIN e ZHU (2016) um modelo de simulação da lâmpada fluorescente apresentado na Figura 2.8, onde mostra a forma de onda atual correspondente e espectro harmônico, onde a forma de onda atual da lâmpada fluorescente é distorcida, onde contém 3°, 5°, 9° e 11° e outros harmônicos ímpares.

### b) Lâmpada Led



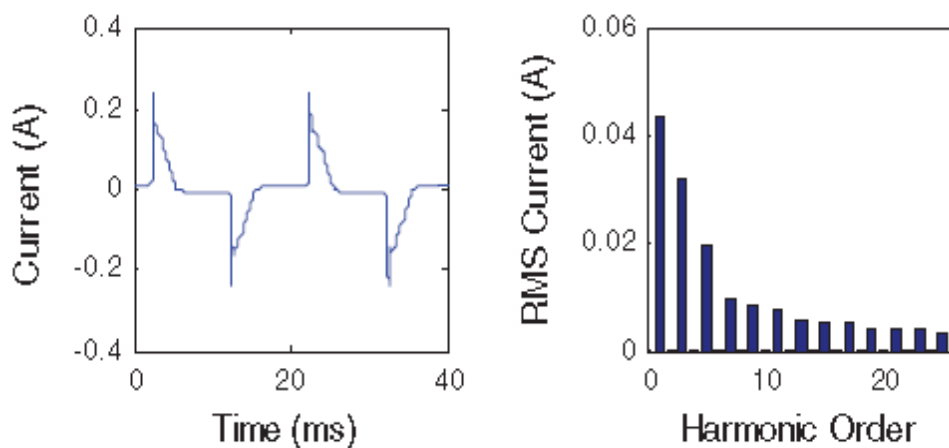


Figura 2.8 - Forma de onda da corrente de simulação e espectro harmônico da lâmpada fluorescente.

Fonte: SHUNFU LIN e ZHU (2016).

De acordo com SHUNFU LIN e ZHU (2016) na Figura 2.9 mostra o circuito típico de uma lâmpada Led. O Led funciona como um dispositivo semicondutor de estado sólido, que pode converter diretamente energia elétrica em energia luminosa, através do circuito retificados, um filtro capacitor, conversor DC-DC e driver de corrente constante. As lâmpadas Led fornecem fonte que alimenta corrente constante em série, para que seja transportada em Led elas se movam de forma contínua.

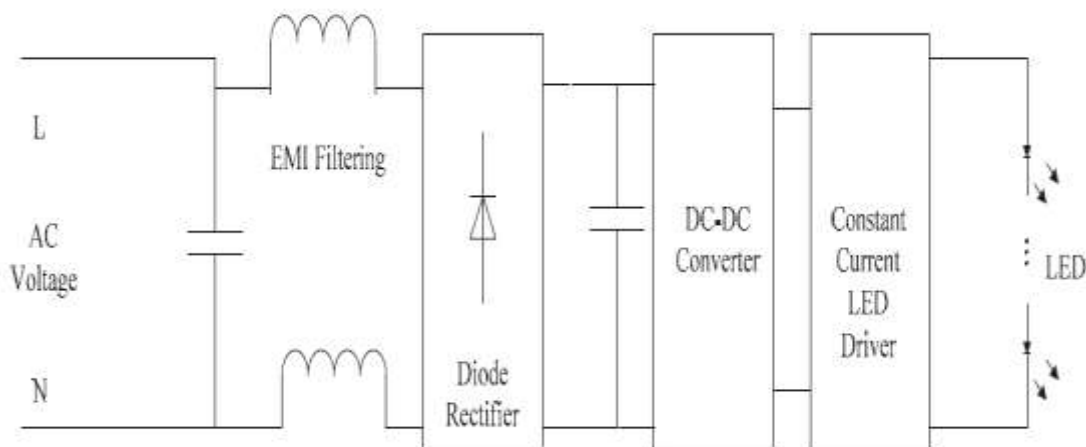


Figura 2.9 - Diagrama do circuito da lâmpada Led.

Fonte: SHUNFU LIN e ZHU (2016).

Segundo SHUNFU LIN e ZHU (2016), a forma de onda da corrente é apresentada na Figura 2.10 abaixo, onde apresenta os resultados da simulação realizada pelo onde demonstra os principais harmônicos da lâmpada Led.

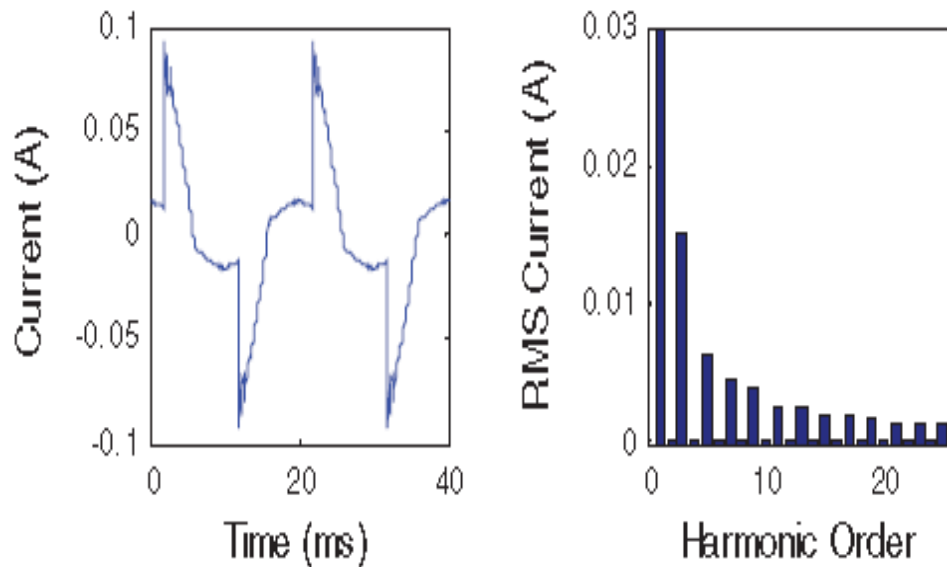


Figura 2.10 - Forma de onda da corrente de simulação e espectro da lâmpada Led.  
Fonte: SHUNFU LIN e ZHU (2016).

## 2.8 - INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Segundo RAHIMI, MOHAJERYAMI e MAJZOOBI (2016) os recursos naturais estão crescendo projetados para suprir toda a demanda de energia futuro. Onde os recursos de energia eólica e solar possuem as maiores taxas de crescimento, e nos últimos anos, a energia sola tem sido o número nas taxas de crescimento entre todos os tipos de recursos renováveis. Diante dessas novas descobertas, a energia solar utiliza flutuações de irradiância solar e isso causa variações na produção de energia. Essas variações de energia podem afetar a tensão e a corrente no ponto do acomplamento, consequentemente a qualidade de energia é prejudicada.

Para DARTAWAN e NAJAFABADI (2017) os inversores são a principal fonte de distorção harmônica, ele demostra na Figura 2.11 o espectro harmônico dos inversores na planta de estudo de pesquisa. Onde o espectro harmônico do inversor foi para o teste de conformidade nas condições de potência nominal de 33%, 66% e 100%. A técnica de interpolação linear foi usada no estudo para estimar o espectro harmônico dos inversores entre os níveis de geração fornecido. Os inversores são modelados como

fontes atuais, portanto, a ressonância paralela do sistema afeta muito os resultados da análise de distorção.

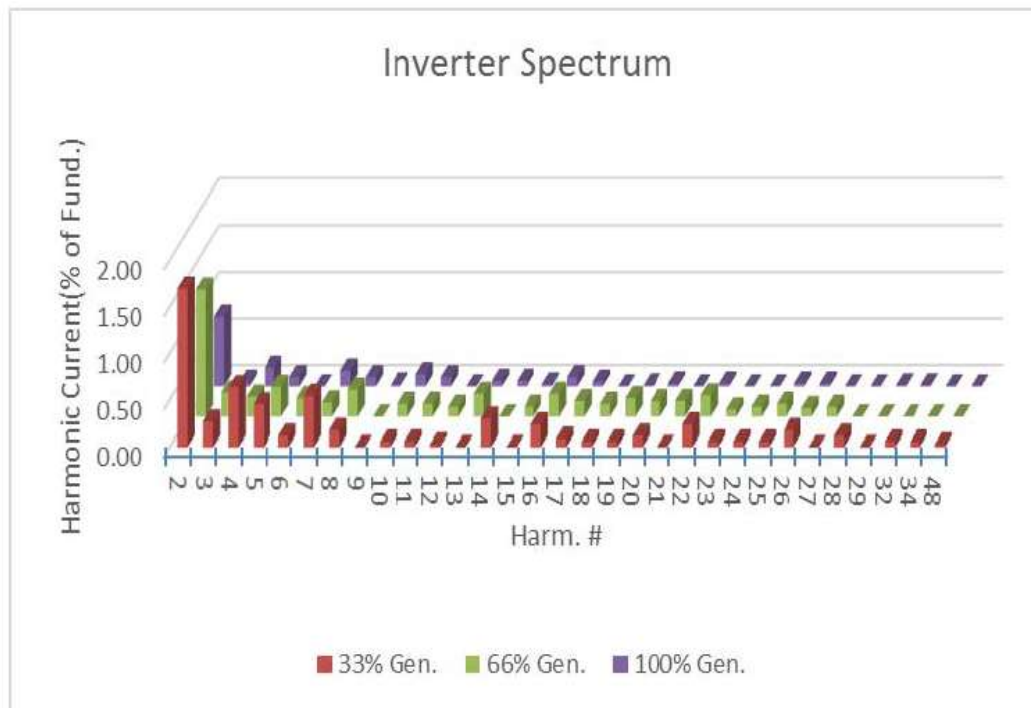


Figura 2.11 - Espectro do inversor.  
Fonte: DARTAWAN e NAJAFABADI (2017).

Para PHANNIL, JETTANASEN, e NGAOPITAKKUL (2017) para que possa produzir eletricidade, é necessário um inversor para converter a corrente contínua em alternada. O inversor é a causa de problemas que afetam a estabilidade do sistema de energia porque é um dispositivo de comutação servido para ajustar a frequência da energia em CA. No mesmo tempo, pode causar harmônico que resultam em distorção da forma de onda e afeta dispositivos eletrônicos que recebem energia. O estudo foi implementando em 2 estados, com e sem sistema fotovoltaico para que possa ser observado o harmônico gerado no sistema. Nos dois casos, a tensão nos pontos de conexão de harmônicos medidos são baixos, enquanto os harmônicos atuais são altos. Quando o PV gera mais energia elétrica para o sistema, o harmônico de tensão ainda são inalterados.

## 2.9 - NORMAS E RECOMENDAÇÕES PARA MONITORAÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (QEE)

Neste item serão apresentadas as normas que são utilizadas que limitam os níveis de distorções harmônicas em rede elétricas de distribuição.

Atualmente as normas internacionais e nacionais para o controle de distorção harmônica das formas de onda de tensão e corrente, são apresentadas pelas:

- IEEE Std. 519-2014, EN 50160 e a IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02).
- EN 50160.
- IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02).
- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional / PRODIST – Módulo 8 (ANEEL-PRODIST, 2018).

### 2.10 - IEEE Std. 519-2014

A norma utilizada para monitoramento da qualidade de energia elétrica está conceituada na IEEE Std519-2014, onde demonstra as práticas recomendadas e requisitos da norma para o controle de harmônico em sistemas elétricos de potência. A característica desta norma é a determinação dos valores limites para ambos, não somente a distorção da tensão fornecida pela concessionária, mas também a corrente de carga do consumidor (IEEE, Std 519, 2014).

A norma IEEE Std 519-2014 foi estabelecida para o ponto de conexão comum (PCC) entre a concessionária e os consumidores. A Figura 2.12 mostra um exemplo de configuração de forma geral em um sistema elétrico visto a partir do ponto de acoplamento comum entre a concessionária de energia elétrica e a unidade consumidora.

Para ALMEIDA (2018) a unidade consumidora é representada por cargas lineares e não- lineares, enquanto o sistema da concessionária de energia elétrica, é demonstrada de forma simplificada através de um complexo não detalhado que inclui suas partes fundamentais. Entre elas podem destacar a transmissão, distribuição, outros consumidores etc.

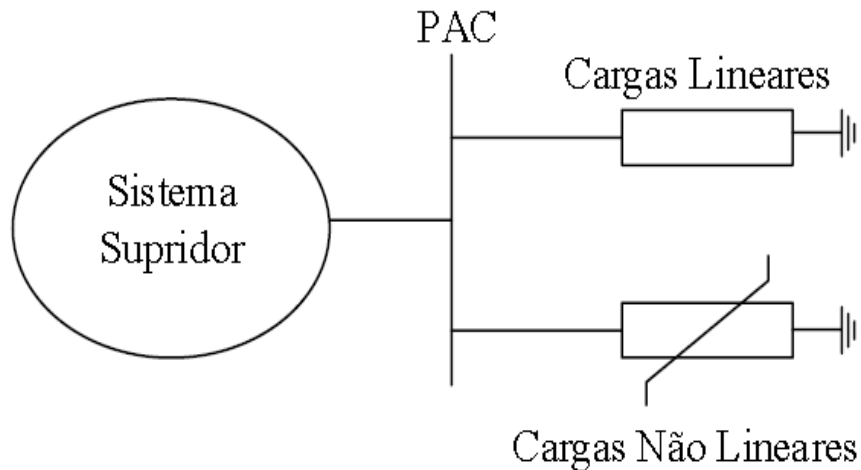


Figura 2.12 - Ponto de acoplamento comum (PAC).

A concessionária é a responsável por manter a qualidade da forma de onda de tensão no PCC, onde na Tabela abaixo é demonstrado os valores limites máximo em regime permanente, conforme Tabela 2.1 e 2.2

Tabela 2.1 - Limite de distorção de tensão.

<b>Tensão no barramento do PAC</b>	<b>Harmônicos individuais (%)</b>	<b>Distorção harmônica total – THD (%)</b>
$V \leq 1kV$	5,0	8,0
$1kV < V \leq 69kV$	3,0	5,0
$69kV < V \leq 161kV$	1,5	2,5
$161kV < V$	1,0	1,5

Fonte: IEEE STD. 519 (2014).

\*Os sistemas de alta tensão podem ter até 2% de THD, onde a causa é um terminal HVDC cujos efeitos serão atenuados em pontos da rede em quem futuros usuários possam conectar:

Tabela 2.2 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas classificados entre 127 V e 69kV

<b>Distorção harmônica máxima em porcentagem da demanda máxima de corrente de carga (<math>I_L</math>)</b>						
<b>Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)</b>						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	<i>TDD</i>
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: IEEE STD. 519, (2014).

Harmônicas pares estão limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares.

Distorções de corrente que resultam em um deslocamento cc, por exemplo, conversores de meia onda, não são permitidos.

Todos os equipamentos de geração de energia estão limitados a estes valores de distorção de corrente, independentemente da corrente  $I_{sc}/I_L$ .  $I_{sc}$  é a corrente máxima de curto-circuito no PAC.  $I_L$ : corrente máxima de demanda de carga (componente de frequência fundamental) no PAC

Todos os valores devem estar em porcentagem da tensão de frequência de potência nominal no PCC. A Tabela 2.1 demonstra o limite que deve ser cumprido para a pior condição de operação do sistema com duração maior que uma hora, onde aplica à tensão harmônica cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência de potência. Para período de prazo curto, durante as condições iniciais ou transitórias, esses limites podem ser ultrapassados em 50%. Os limites de distorção de corrente dependem da relação que existe entre a carga do consumidor ( $I_L$ ) e a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) no PCC. Um elevado  $I_{sc}/I_L$  significa que o sistema admite níveis de distorção harmônica mais elevados (IEEE Std. 519,2014).

### 2.10.1 - Recomendação para aumentar os limites de corrente harmônica

Recomenda-se que os valores na Tabela 2.3, sejam aumentados por uma multiplicação, quando ações são tomadas por um usuário para reduzir harmônicos de ordem inferior. A Tabela 2.3 é aplicável quando são tomadas medidas para reduzir as ordens harmônicas dadas na primeira coluna.

Tabela 2.3 - Multiplicadores recomendados para aumento dos limites de corrente harmônica.

<b>Pedidos de harmônico limitados a 25% dos valores dados na Tabela 2</b>	<b>Multiplicador</b>
5,7	1.4
5,7,11,13	1.7
5,7,11,13,17,19	2.0
5,7,11,13,17,19,23,25	2.2

Fonte: IEEE Std. 519 (2014).

Os multiplicadores na Tabela 2.3 podem ser obtidos na Eq. (2.9) em que  $p$  é a ordem de pulso de uma fase trifásica de conversor baseado em retificador ( $p=6,12,18,24$  etc). Esses conversores produzem características dominantes ou características de correntes harmônicas nas ordens de  $p$  ( $n \pm 1$ ), onde  $n$  é um contador simples,  $n=1,2,3$  etc. e significativamente menor nas magnitudes atuais em outras ordens.

$$\text{Multiplicador} = \sqrt{\frac{p}{6}} \quad (2.9)$$

### 2.11 - EN 50160-POWER QUALITY STANDARD

A norma europeia 50160 POWER QUALITY STANDARD, ela mostra em sua norma os parâmetros de qualidade de energia no PCC, informando os limites aceitáveis, fornece os principais parâmetros de tensão e suas faixas de desvio permitidas no ponto do cliente ao acoplamento comum nos sistemas públicos de distribuição de baixa tensão ( BT) e média tensão (MT), sob condições normais de operação. Os harmônicos de tensão, deverão ser analisados por um período de uma semana, onde 95% dos valores

eficazes de cada harmônico de tensão (tensão com média em cada 10 minutos), não devem exceder os valores limites indicados na Tabela 2.4 (EN 50160, 2004).

Tabela 2.4 - Valores de cada harmônico de tensão.

<b>Harmônicos ímpares</b>				<b>Harmônicos Pares</b>	
<b>Não múltiplos de 3</b>		<b>Múltiplos de 3</b>			
<b>Ordem</b>	<b>% da tensão nominal</b>	<b>Ordem</b>	<b>% da tensão nominal</b>	<b>Ordem</b>	<b>% da tensão nominal</b>
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
1	3,5%	1	0,5%	6	0,5%
1		5		até 24	
1	3%	2	0,5%		
3		1			
1	2%				
7					
1	1,5%				
9					
2	1,5%				
3					
2	1,5%				
5					

DHT<sub>t</sub> < 8%

Fonte: EN 50160 (2004).

## 2.12 - NORMA IEC 61000-3-6

Esta norma IEC 61000-3-6 fornece orientações para a coordenação das tensões harmônicas entre diferentes níveis de tensão, a fim de atender aos níveis de compatibilidade no ponto de utilização e para evitar efeitos adversos no equipamento do cliente sensível (IEC/TR 61000-3-6, 2008).



Os limites de emissão para equipamentos individuais ou uma instalação de um cliente deve ser desenvolvida com base na tensão com critérios de qualidade. O princípio mais básico para o desenvolvimento dos limites de emissão são os níveis de compatibilidade. Estes são os valores de referência para coordenar os equipamentos conectados ao sistema, onde os níveis de compatibilidade geralmente são baseados nos 95% onde os níveis de probabilidade do sistema, o que representam variações de perturbações no espaço e no tempo. (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

Para IEC/TR 61000-3-6 (2008) estabelece que os limites sejam os níveis de compatibilidade conforme mostra a Tabela 2.5 e Tabela 2.6. Quando as correntes harmônicas geradas por cargas não lineares não ultrapassam os valores limites estabelecidos, a qualidade de energia estar garantida. Em modo geral, os fornecedores de energia podem usar esses níveis como diretrizes para o desenvolvimento do controle sobre os equipamentos e não deve ser excedido no ponto de conexão.

Tabela 2.5 - Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de baixa tensão (BT) e média tensão (MT).

Ímpares não múltiplas de 3		Ímpares múltiplas de 3		Pares	
Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %	Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %	Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27(17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25(10/h) + 0.25$

Fonte: IEC/TR 61000-3-6, (2008).

As empresas fornecedoras devem desenvolver projetos de sistemas e critérios de conexão baseados em “níveis de planejamento” que permitem condições de contingência e possuam alguma margem com níveis de compatibilidade. Planejamento

são níveis especificados pelo operador do sistema e pode ser considerado como qualidade interna para o operador. Níveis de planejamento para harmônicos são iguais ou inferiores aos níveis de compatibilidade e devem permitir a coordenação de tensões harmônicas entre diferentes níveis de tensão. O planejamento para tensões harmônicas é apresentado na Tabela 6-(IEC/TR 61000-3-6, 2008);

Tabela 2.6- Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média (MT), alta (AT) e extra alta tensão (EHT).

Ímpares não múltiplas de 3			Ímpares múltiplas de 3			Pares		
Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica h %		Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica h %		Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica h %	
	MT	AT-EHT		MT	AT-EHT		MT	AT-EHT
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
$17 \leq h \leq 49$	$1.9(17/h)-0.2$	$1.2(17/h)$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25(10/h) + 0.22$	$0.19(10/h) + 0.16$

Fonte: IEC/TR 61000-3-6 (2008).

Os valores limites de harmônicos de tensão são determinados para evitar os efeitos prejudiciais dos harmônicos em regime permanente e em curto período que se define como:

- Os efeitos de regime permanente são referidos a aquecimento em capacitores, cabos, transformadores, motores e o outros, e são medidos em média a intervalo de 10 minutos (IEC/TR 61000-3-6, 2008);

- Os efeitos a curto período são os que se manifestam em equipamentos eletrônicos sensíveis aos valores limites de harmônicos, e com intervalo para registro a faixa de 3 segundos ou menos (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

O nível de compatibilidade do THDV para média e baixa tensão é de 8% para harmônicos de regime permanente (intervalos de 10 minutos) e de 11% para harmônicos de curta duração (intervalos menores que 3 segundos) (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

### 2.13 - PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST – MÓDULO 8 (ANEEL-PRODIST, 2018)

O objetivo dos procedimentos de distribuição de energia elétrica do sistema elétrico nacional-PRODIST- modulo 8, é estabelecer os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica- QEE, abordando a qualidade do produto, a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações (PRODIST-ANEEL, 2018).

Referente a qualidade do produto, o módulo 8 define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição (PRODIST-ANEEL, 2018).

Para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, o modulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergências, definindo padrões e responsabilidade. (PRODIST-ANEEL, 2018) e para a qualidade do tratamento de reclamações, o módulo estabelece a metodologia de cálculo dos limites do indicador de qualidade comercial FER (PRODIST-ANEEL, 2018).

Podemos destacar dentro do módulo 8 da PRODIST referente à qualidade de energia elétrica, o item relacionado a distorção harmônica.

As distorções harmônicas são fenômeno associados a deformações nas formas de onda das tensões e corrente em relação à onda senoidal da frequência fundamental (PRODIST-ANEEL, 2018).

Tabela 2.7 - Terminologia.

<b>Identificação da Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h$ %
Distorção harmônica total de tensão	$DTT$ %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p$ %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i$ %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3$ %
Tensão harmônica de ordem h	$V_n$
Ordem harmônica	$h$
Ordem harmônica máxima	$hmáx$
Ordem harmônica mínima	$hmin$
Tensão fundamental medida	$V_1$
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT$ 95%
Valor do indicador DTTP% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_p$ 95 %
Valor do indicador DTTI% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_i$ 95 %
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_3$ 95 %

Fonte: PRODIST-ANEEL (2018).

Onde nas subseções serão demonstrados valores limites de referência para distorções harmônicas totais cabíveis dentro do sistema, onde a classe de tensão está classificada em:

- BT- Baixa Tensão
- MT- Média Tensão

– AT- Alta Tensão

Na Tabela 2.7, demonstra a terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas.

As expressões para o cálculo das grandezas  $DIT_h$  %,  $DTT$  %,  $DTT_p$  %,  $DTT_i$  %,  $DTT_3$  % são:

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.10)$$

Sendo:

$h$  = ordem harmônica individual.

$$DTT \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.11)$$

Sendo:

$h$  = todas as ordens harmônicas de 2 até  $hm\acute{a}x$ ;

$hm\acute{a}x$  = conforme a classe A ou S.

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.12)$$

Sendo:

$h$  = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ( $h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, \dots$ );

$hp$  = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.13)$$

Sendo:

$h$  = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ( $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, \dots$ );

$hi$  = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.14)$$

Sendo:

h = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 (h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39,...);

h<sub>3</sub> = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

De acordo com PRODIST MODULO 8 (2018), os valores limites para as distorções harmônicas totais são apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Limites das distorções harmônicas totais.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0kV$	$1,0kV < V_n < 69kV$	$69kV \leq V_n < 230kV$
$DTT_{95\%}$	10,0 %	8,0	5,0
$DTT_p 95 \%$	2,5%	2,0	1,0
$DTT_i 95 \%$	7,5%	6,0	4,0
$DTT_3 95 \%$	6,5%	5,0	3,0

Fonte: PRODIST MODULO 8 (2018).

Os limites correspondem ao máximo valor almejado a ser observado no sistema de distribuição. No caso de medições realizadas utilizando-se TP's com conexão do tipo V ou delta aberto, os limites permitidos para o indicador  $DTT_3 95\%$  deverão corresponder a 50% dos respectivos valores indicados na Tabela 2.8. (PRODIST MODULO 8 (2018)).

Os responsáveis pela implantação de quaisquer equipamentos na rede básica precisarão seguir o determinado nos Procedimentos de Rede ou em regulamentação específica PRODIST MODULO 8 (2018).

## CAPÍTULO 3

### REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

#### 3.1 - FUNDAMENTOS DE REDE NEURAIS

Segundo HAYKIN (1999) redes neurais são definidas como modelos matemáticos-computacionais inspirados no comportamento do cérebro humano. Onde o cérebro humano possui um sistema de processamento da informação extremamente complexo, não linear e paralelo; ao passo que as redes neurais artificiais possuem um processamento paralelo que é distribuído pelas suas unidades de processamento, ou seja, os neurônios, que por sua vez são favoráveis ao armazenamento de conhecimento, de forma a disponibilizá-lo para uma posterior utilização.

De acordo com SILVA, SPATTI e FLAUZINO (2010) as características mais relevantes relacionadas com a aplicação de redes neurais artificiais são:

- Adaptação por experiências: as adaptações dos parâmetros internos da rede, tipicamente seus pesos sinápticos, são ajustadas a partir da apresentação sucessiva de exemplos (padrões, amostras, medidas) relacionados ao comportamento do processo, possibilitando a aquisição do conhecimento por experimentação;
- Capacidade de aprendizado: por intermédio da aplicação de um método de treinamento, a rede consegue extrair o relacionamento existente entre as diversas variáveis que compõem a aplicação;
- Habilidade de generalização: após o processo de treinamento da rede, essa é capaz de generalizar o conhecimento adquirido, possibilitando estimar soluções que eram até então desconhecidas;
- Organização de dados: baseada em características intrínsecas envolvendo determinado conjunto de informações a respeito de um processo, a rede é capaz de realizar a sua organização interna visando possibilitar o agrupamento de padrões que apresentam particularidade em comum;
- Tolerância a falhas: devido ao elevado nível de interconexões entre os neurônios artificiais, a rede neural torna-se um sistema tolerante a falhas quando parte de sua estrutura interna é sensivelmente corrompida;

- Armazenamento distribuído: o conhecimento a respeito do comportamento de determinado processo dentro de uma arquitetura neural é realizado de forma distribuída entre as diversas sinapses de seus neurônios artificiais, permitindo então um incremento da robustez da arquitetura frente a eventuais neurônios que se tornaram inoperantes;
- Facilidade de prototipagem: a implementação da maioria das arquiteturas neurais pode ser facilmente, dependendo da especificidade da aplicação, prototipada em hardware ou em software, pois, após o processo de treinamento, os seus resultados são normalmente obtidos por algumas operações matemáticas elementares.

Conforme JAIN e N.M.MARTIN (1998), as aplicações da rede neurais artificiais, são parecidas ao cérebro em duas características:

- Seu conhecimento é adquirido por um processo de aprendizado e;
- As conexões entre neurônios são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido;

Onde as redes neurais artificiais estão sendo aplicadas a uma ampla variedade de problemas de automação incluindo controle adaptativo, otimização, diagnóstico médico, tomada de decisão, análise de harmônico bem como processamento de informações e sinais, incluindo processamento de fala. RNAs está sendo comprovadamente muito adequado para o processamento de dados de sensores, em particular, extração de recurso e reconhecimento automatizado de sinais e padronização de objetos multidimensionais. O reconhecimento surgiu, no entanto, como uma das principais aplicações, porque a estrutura de rede é adequada para tarefas que os sistemas biológicos executam bem. O reconhecimento é um bom exemplo em que os sistemas biológicos superam as regras tradicionais de abordagem de inteligência artificial. A generalização está atrelada com a capacidade de a rede aprender pela apresentação de um conjunto reduzido de exemplos, onde a mesma deverá ser apta a fornecer respostas coerentes para dados que não tenham sido utilizados em sua etapa de aprendizado.

Com esta vasta quantidade de áreas para aplicação, pode-se perceber o potencial apresentados pelas RNA's. Esse foi um dos fatores que motivou a escolha da ferramenta para que viesse a ser empregada nesse estudo.

Segundo CHANG e C-I. CHEN (2010) e H.C. LIN (2007) a identificação harmônica usando o método baseado em RNA tem algumas vantagens como algoritmos



simplificados e baixo esforço computacional. Para compensação harmônica de potência distribuída, amostragem do sinal atual com essas incertezas nas formas de onda leva a maiores esforços de computação e complexidade de algoritmos

Segundo NASCIMENTO, JR., GOEDEL, e DIETRICH (2012) tomamos como exemplo o estudo onde o mesmo propõe um método de rede neural para a corrente harmônica para identificação de conteúdo e estimativa de THD em fase única em sistemas de energia, alimentando cargas não lineares que podem ser analiticamente modelado em seu comportamento teórico, mas com incertezas nos parâmetros do modelo. Este método de RNA pode ser utilizado em inteligente medidores e sistemas de controle APF, para compensação seletiva de harmônico específico e críticos.

Segundo o TEMURTAS, GUNTURKUN, e N. YUMUSAKA (2004) o método para detectar harmônicos usando redes neural é aplicado na Figura 3.1 e 3.2.

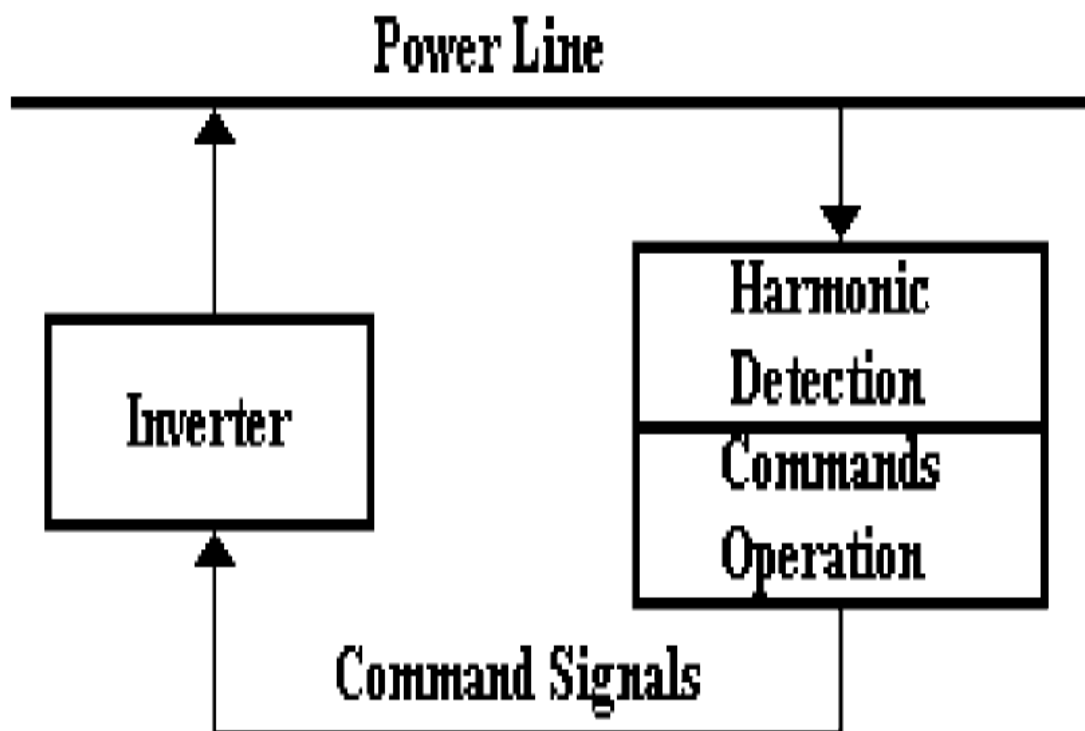


Figura 3.1 - Conceito de filtro de energia ativo.  
Fonte: TEMURTAS, GUNTURKUN e N. YUMUSAKA (2004).

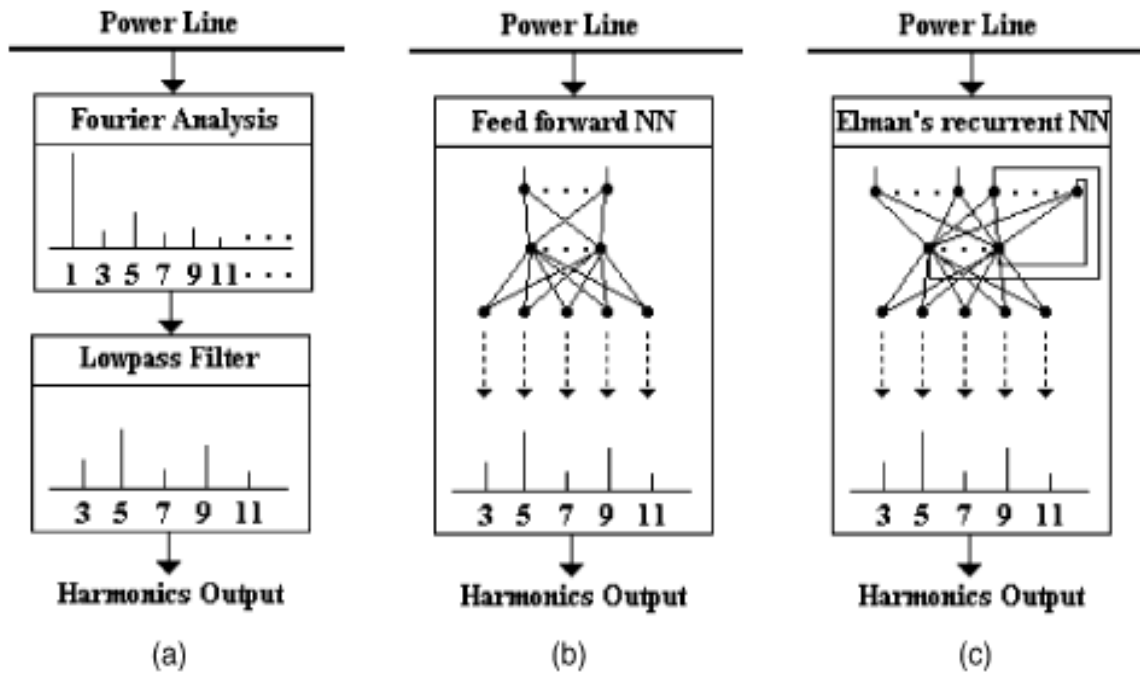


Figura 3.2 - Processo de detecção de harmônica no filtro de energia ativo: tipo original (a), tipo de rede neural de avanço (b), rede neural recorrente de Elman (c).  
 Fonte: TEMURTAS, GUNTURKUN e N. YUMUSAKA, (2004).

Conforme TEMURTAS, GUNTURKUN, e N. YUMUSAKA (2004) na Figura 3.1 mostra o conceito de filtro de energia ativo e Figura 3.2 mostra o processo de detecção de harmônicos no filtro de energia ativo. Geralmente, a corrente distorcida da linha de energia é analisada no espectro de frequência. Depois o componente da onda fundamental é eliminado, e o restante das harmônicas são produzidas para serem usadas para compensar a geração atual. Quando a corrente distorcida é detectada na linha de energia, a amplitude do ciclo de onda é inserida em cada unidade do sistema neural em termos de sinais. Por meio do uso de rede neurais recorrente e avançadas, cada harmônica é decomposto separadamente sem transformação de Fourier. Ao mesmo tempo, a onda fundamento é eliminadas sem um filtro.

### 3.1.1 - Funções de ativação parcialmente diferenciáveis

Segundo SILVA, SPATTI e FLAUZINO (2010) e FERNANDES R. A. (2009) as funções de ativação parcialmente diferenciáveis são aquelas que possuem pontos cujas derivadas de primeira ordem são inexistentes. Em geral, utiliza-se a mesma função

de ativação para os neurônios de uma dada camada. Algumas das funções de ativação mais utilizadas têm seus cálculos e formatos gráficos mostrados nas Figuras abaixo:

a) Função degrau bipolar ou função sinal (*symmetric hard limiter*)

O resultado produzido pela aplicação desta assumirá valores unitários positivos quando o potencial de ativação do neurônio for maior que zero; valor nulo quando o potencial for também nulo; e valores unitários negativos quando a potência for menor que zero. Em notação matemática, tem-se:

$$y(n) = \begin{cases} 1, & \text{se } n > 0 \\ 0, & \text{se } n = 0 \\ -1, & \text{se } n < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

A representação gráfica desta função é ilustrada na Figura 3.3:

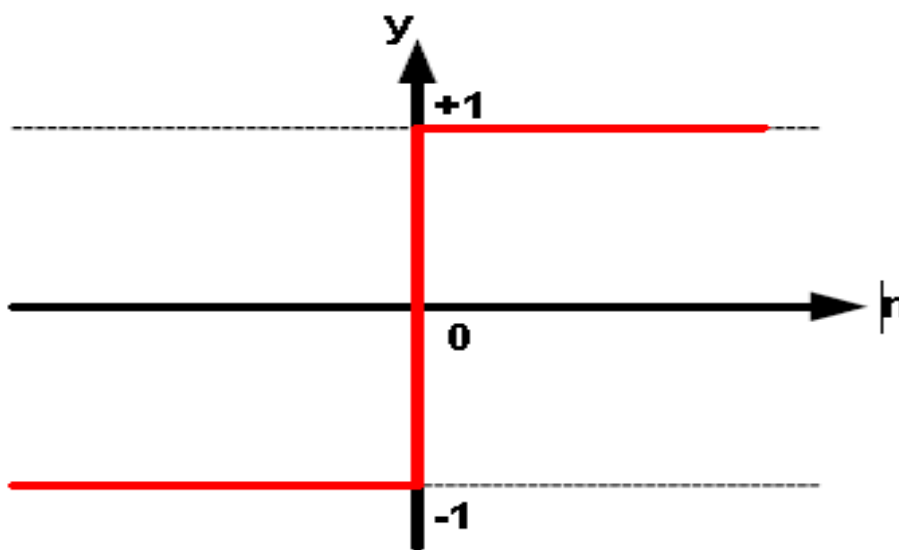


Figura 3.3 - Função degrau bipolar ou função sinal (*symmetric hard limiter*).

b) Função degrau (*Heavyside/hard limiter*).

O resultado produzido pela aplicação da função degrau assumirá valores unitários positivos quando o potencial de ativação do neurônio for maior ou igual a zero; caso contrário, o resultado assumirá valores nulos, ou seja:

$$y(n) = \begin{cases} 1, & \text{se } n \geq 0 \\ 0, & \text{se } n < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

A representação gráfica desta função é mostrada na Figura 3.4:

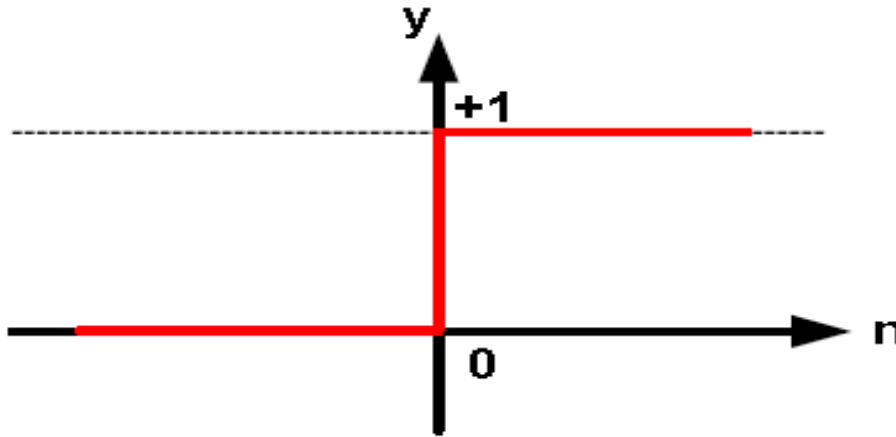


Figura 3.4 - Função degrau ( Heavyside/hard limiter).

c) Função linear

A função de ativação linear ou função identidade produz resultados de saída idênticos aos valores do potencial de ativação (n), tendo sua expressão matemática definida pela Figura 3.5:

$$y(n) = n \quad (3.3)$$

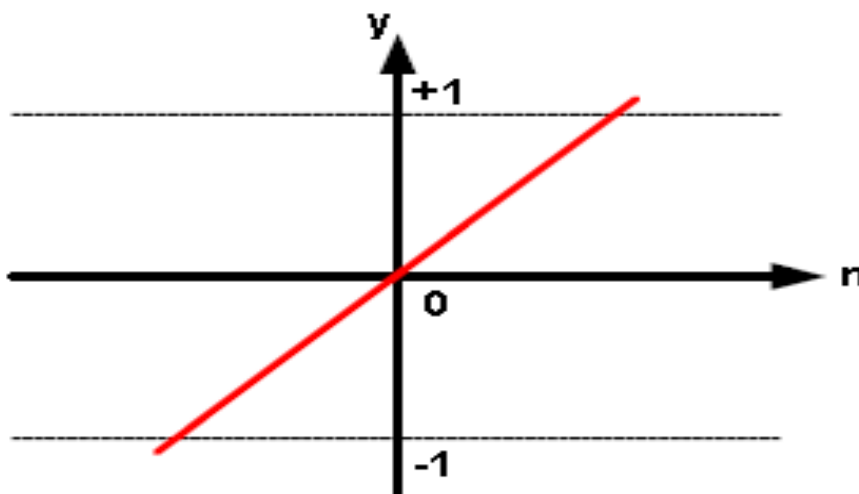


Figura 3.5 - Ilustração da função de ativação do tipo linear.

d) Tangente hiperbólica

O resultado de saída, diferentemente da função logística, sempre assumirá valores reais entre -1 e 1, cuja expressão matemática é definida por:

$$y(n) = \frac{1 - e^{-\beta n}}{1 + e^{\beta n}} \quad (3.4)$$

Onde  $\beta$  é o parâmetro de excentricidade, conforme demonstração da Figura 3.6.

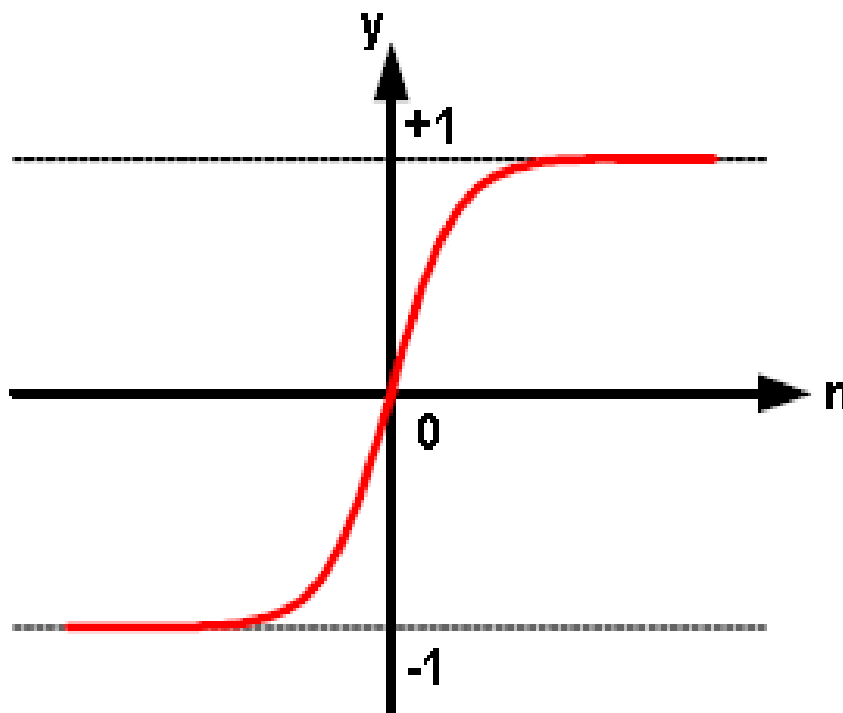


Figura 3.6 - Representação gráfica da função de ativação do tipo tangente hiperbólica.

e) Função Logística (sigmoide)

O resultado de saída produzida pela aplicação da função logística assumirá sempre valores reais entre zero e um, tendo-se sua expressão matemática dada por:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\beta n}} \quad (3.5)$$

Onde  $\beta$  é o parâmetro de excentricidade, conforme Figura 3.7

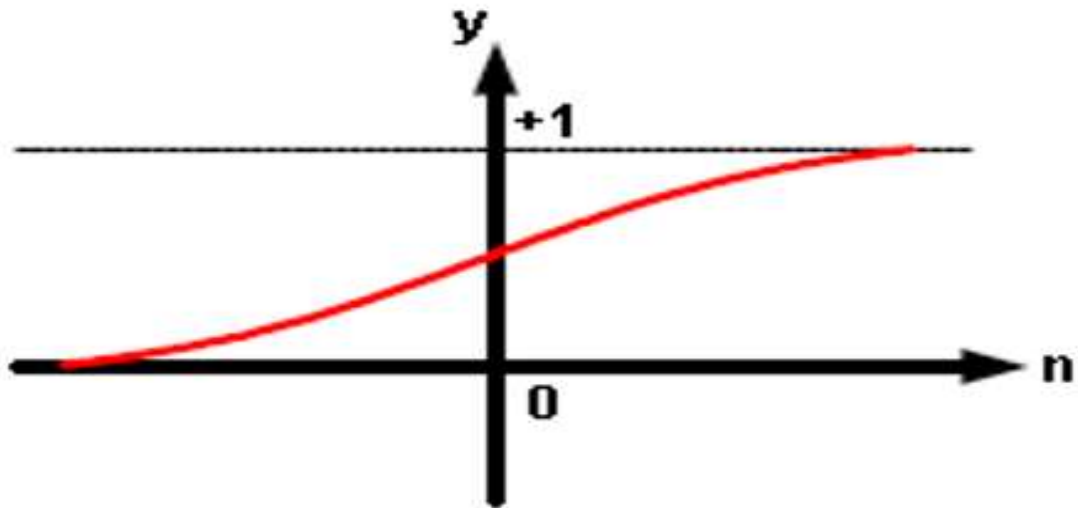


Figura 3.7 - Ilustração da função de ativação do tipo logística (sigmoide).

f) Função rampa

Os valores retornados são iguais aos próprios valores dos potenciais de ativação quando estes estão definidos no intervalo (-1 e 1), restringindo-se aos valores limites em caso contrário. Em notação matemática temos a seguinte Eq.(3.6):

$$y(n) = \begin{cases} y=1, & \text{se } n > 1 \\ y=n, & \text{se } -1 \leq n \leq 1 \\ y=-1, & \text{se } n < -1 \end{cases} \quad (3.6)$$

Conforme representado na Figura 3.8:

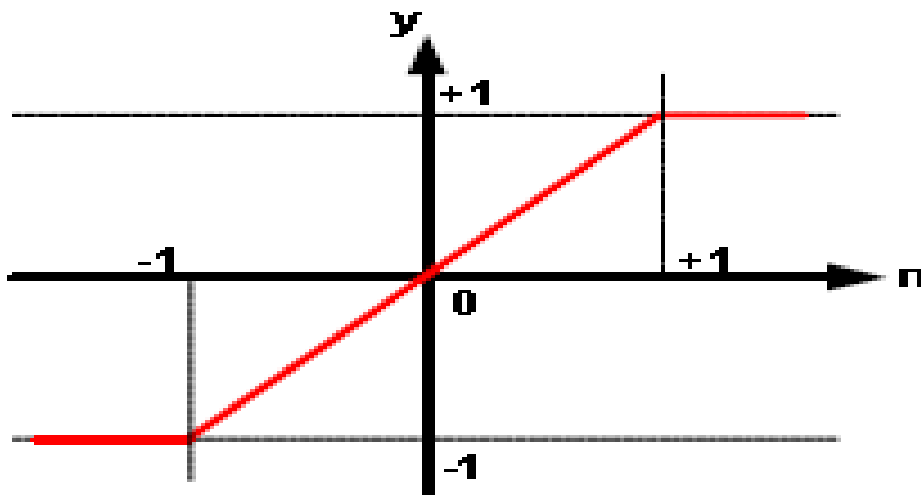


Figura 3.8 - Representação gráfica da função de ativação do tipo rampa.

g) Função de base radial (gaussiana)

Em relação à utilização da função de ativação gaussiana, a saída do neurônio produzirá resultados iguais para aqueles valores de potencial de ativação ( $u$ ), que estejam posicionados a uma mesma distância de seu centro (média) sendo que a curva é simétrica em relação a este. A função gaussiana é dada pela Eq. 3.7 e representada pela Figura 3.9:

$$y(n) = e^{-\frac{(\sigma n)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.7)$$

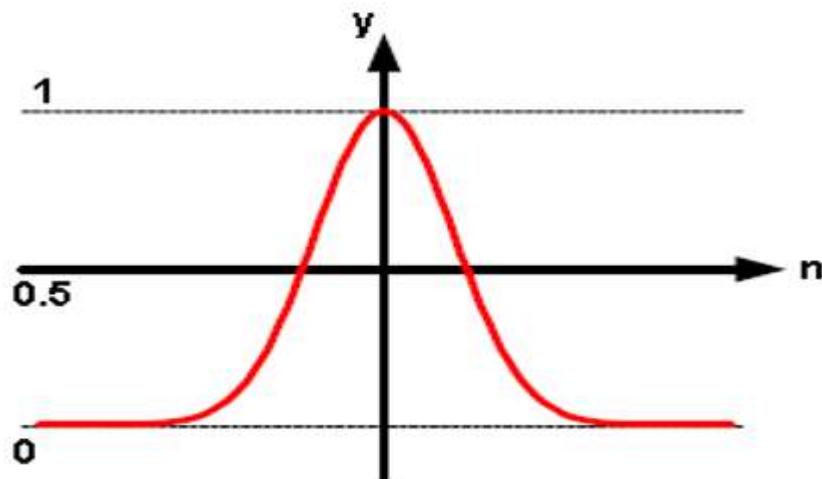


Figura 3.9 - Ilustração da função de ativação de base radial (gaussiana).

Para FERNANDES R. A., (2009) alguns parâmetros como número de camadas, quantidade de neurônios por camada, tipo de conexão entre os neurônios e a topologia da rede devem ser levadas em consideração para determinar a arquitetura.

O número de camadas, pode-se categorizá-las em:

- Camadas única ou;
- Múltiplas camadas

A quantidade dos tipos de conexão entre os neurônios, podem ser:

- Totalmente conectados ou;
- Parcialmente conectados.

A topologia da rede, estas podem ser principalmente divididas em:

- Feedforward e
- Feedback.

No próximo item serão apresentados os aspectos inerentes à arquitetura feedforward da rede Perceptron de múltiplas camadas, cujo trabalho será voltado para a extração dos padrões apresentados para análise dos impactos harmônicos, a qual foi empregada nessa dissertação para defesa do projeto.

### 3.2 - REDE NEURAL PERCEPTRON DE MÚLTIPLAS CAMADAS (MLP)

Segundo SILVA, SPATTI, e FLAUZINO (2010) as redes Perceptron de múltiplas camadas (MLP) são caracterizadas pela presença de pelo menos uma camada intermediária de neurônios, situadas entre a camada de entrada e a respectiva camada neural de saída. Uma grande vantagem apresentada por esta arquitetura é a vasta quantidade de aplicações como: aproximador funcional, reconhecimento de padrões, otimização e controle de processo, entre outras.

De acordo com FERNANDES R. A. (2009) por utilizar a topologia *feedforward*, seu fluxo de dados deve ser passado camada a camada, partindo-se da camada de entrada que irá receber um vetor, contendo os sinais provenientes do sistema e que serão propagados aos neurônios das camadas intermediárias onde serão devidamente processados. Feito o processamento nas camadas intermediárias, estes serão emitidos à camada neural de saída que fornecerá o parecer final da rede.

A apresenta-se a Figura 3.10, uma rede MLP (Multi-Layer- Perceptron) com apenas uma camada intermediária.

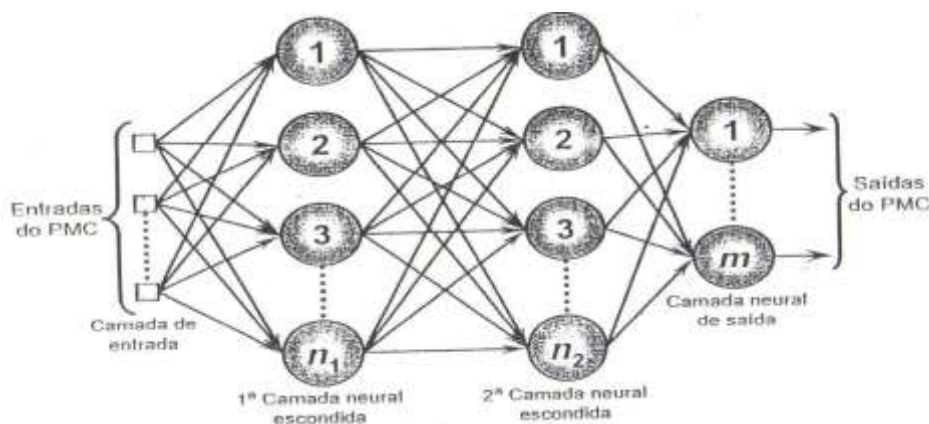


Figura 3.10 - Arquitetura de uma rede neural do tipo MLP.  
Fonte: SILVA, SPATTI e FLAUZINO, (2010).



Segundo SILVA, SPATTI e FLAUZINO (2010) a Figura acima é o fluxo de informação na estrutura da rede, inicia-se na camada de entrada, segue para a camada intermediária e finaliza na camada neural de saída. Sendo que na rede PMC convencional inexistem qualquer tipo de alimentação de valores produzidos pela camada neural de saída ou pelas próprias camadas neurais intermediárias.

Sob o mesmo ponto de vista de WST e APJ (2004) propôs uma técnica para identificação de fontes de harmônicos, onde foi aplicada uma rede neural artificial do tipo MLP para identificar qual parcela está sendo gerada por uma determinada fonte sob estudo e qual parcela é proveniente de outras cargas não lineares, sendo realizada em um ponto de acoplamento comum.

O trabalho desenvolvido em MAZUMDAR, R.G e F (2005) utilizou redes neurais recorrentes para estimar a verdadeira distorção harmônica de corrente atribuída a uma determinada carga no ponto de acoplamento comum entre consumidores e concessionária. A estimação é realizada mediante o uso de duas redes neurais: uma para o processo de identificação da admitância da carga e a outra para o processo propriamente dito da estimação, onde os pesos da primeira rede são passados para a segunda e então a saída desta é obtida para uma entrada puramente senoidal, caracterizando assim a distorção exclusivamente da carga, desconsiderando as distorções provenientes do sistema.

De acordo com MAZUMDAR e HARLEY (2008) a Figura 3.11 demonstra o diagrama de blocos interligado pelas matrizes de peso  $W$  e  $V$ . Uma camada de três rede está sendo utilizadas, com a adição de um conjunto de neurônio de contexto na camada de entrada. Existem conexões da camada ocultas com esses neurônios de contexto com atraso unitário. Em cada etapa, a entrada é propagada de maneira padrão para o feedforward e, em seguida, uma regra de aprendizado (geralmente backpropagation é aplicada para atualizar os pesos. As conexões de feedback resultam no contexto sempre mantendo uma cópia dos valores anteriores das unidades, sendo assim, a rede desenvolve capacidade de memória.

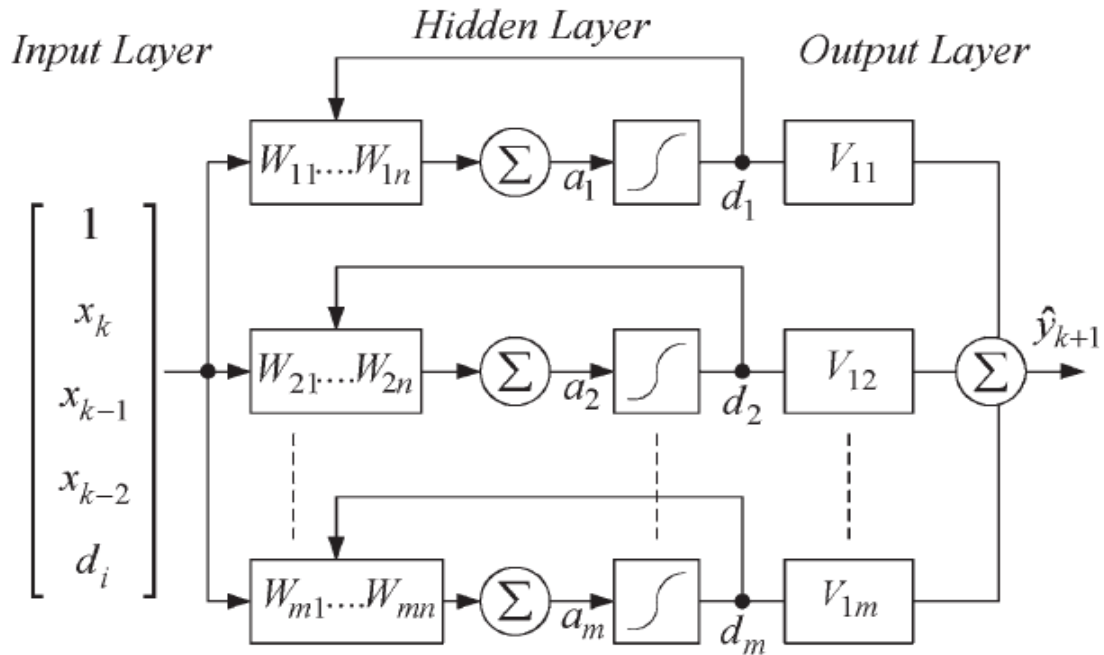


Figura 3.11 - Diagrama de blocos do ELMAN.  
 Fonte: MAZUMDAR e HARLEY, (2008).

Semelhantemente em MAZUMDAR e HARLEY (2008) deu-se continuidade ao trabalho realizado em MAZUMDAR, R.G e F (2005), onde desta vez foram comparados os desempenhos e os esforços computacionais de três tipos de redes neurais: MLP (Multi-Layer Perceptron), RNN (Recurrent Neural Network) e ESN (Echo State Network). Os resultados mostraram que as redes RNN e ESN apresentaram melhor precisão, contudo, o esforço computacional foi maior.

Conforme GALA (2009) foi utilizada uma rede neural para determinar a contribuição harmônica de fontes não lineares conectadas no ponto de acoplamento comum (PAC). A metodologia proposta consiste em separar o sistema sob análise em um consumidor particular e um grupo de consumidores, correspondendo aos consumidores restantes conectados no PAC.

### 3.3 - RETROPROPAGAÇÃO (BACKPROPAGATION)

Segundo HAYKIN (2008) o algoritmo *backpropation* (BP) é um algoritmo de treinamento supervisionado de rede de múltiplas camadas alimentadas adiante, baseado na correção de erro, cujo propósito é a obtenção dos ajustes dos pesos sinápticos da rede neural, sendo este algoritmo uma generalização do algoritmo LMS (*Least Mean Square*) ou regra Delta.

De acordo com SILVA, SPATTI, e FLAUZINO (2010) o processo para redes PMC utilizando o algoritmo *backpropagation*, conhecido como regra Delta generalizada, é comumente realizado mediante as aplicações sucessivas de duas fases bem específicas. A Figura 3.12 ilustra as aplicações, em que é considerada uma configuração de PMC constituída de duas camadas escondidas, composta por  $n$  sinais em suas camadas de entrada, tendo como  $n_1$  neurônios na primeira camada neural escondida,  $n_2$  neurônio na segunda camada neural escondida e  $n_3$  sinais associados à camada neural de saída.

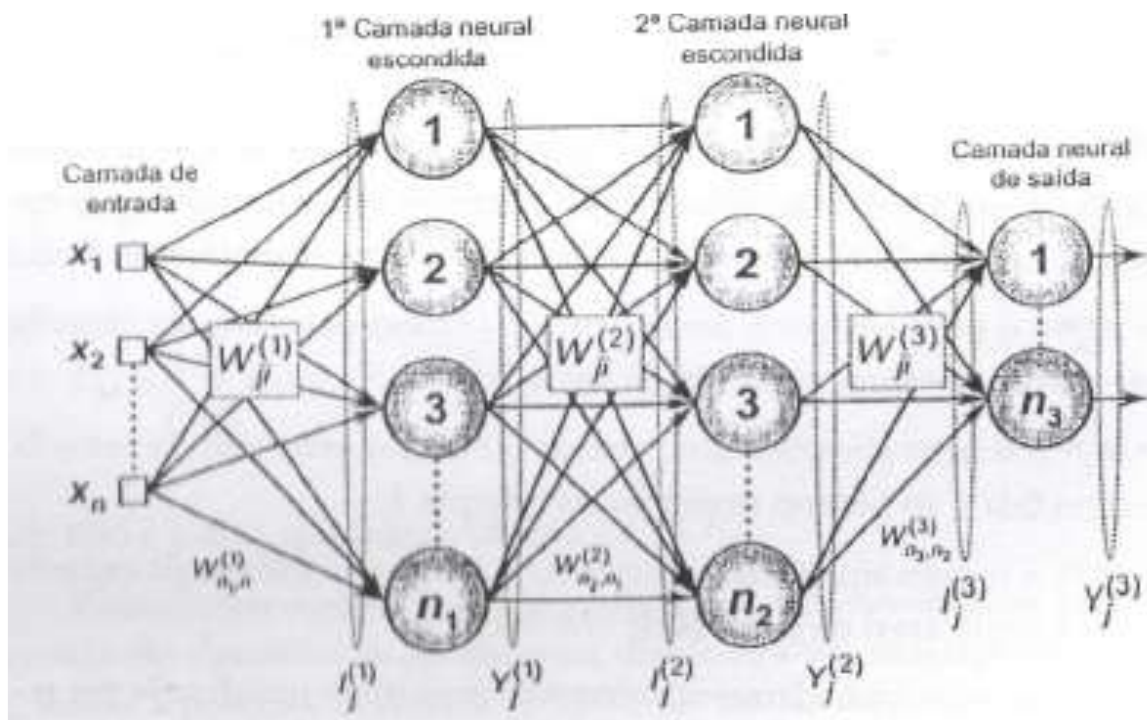


Figura 3.12- Notação para derivação do algoritmo *backpropation*.  
Fonte: SILVA, SPATTI e FLAUZINO (2010).

Onde os tipos de erros utilizados como critérios de parada durante o treinamento das redes MPL são: erro quadrático, correspondendo ao valor instantâneo da soma dos erros quadráticos do padrão de treinamento de todos os neurônios da camada de saída e o erro quadrático médio, obtido a partir da soma dos erros quadráticos relativos a todos os padrões de entrada utilizados no conjunto de treinamento (AGUIAR, 2010).

Cada um dos neurônios  $\{j\}$  pertencentes a uma das camadas  $\{L\}$  da topologia ilustrada na Figura 3.12 pode ser configurado conforme a terminologia adotada na Figura 3.13, onde  $g(\cdot)$  representa uma função de ativação que deve ser contínua e diferencial em todo o seu domínio, tais como aquelas representadas pela função de ativação logística ou tangente hiperbólica.

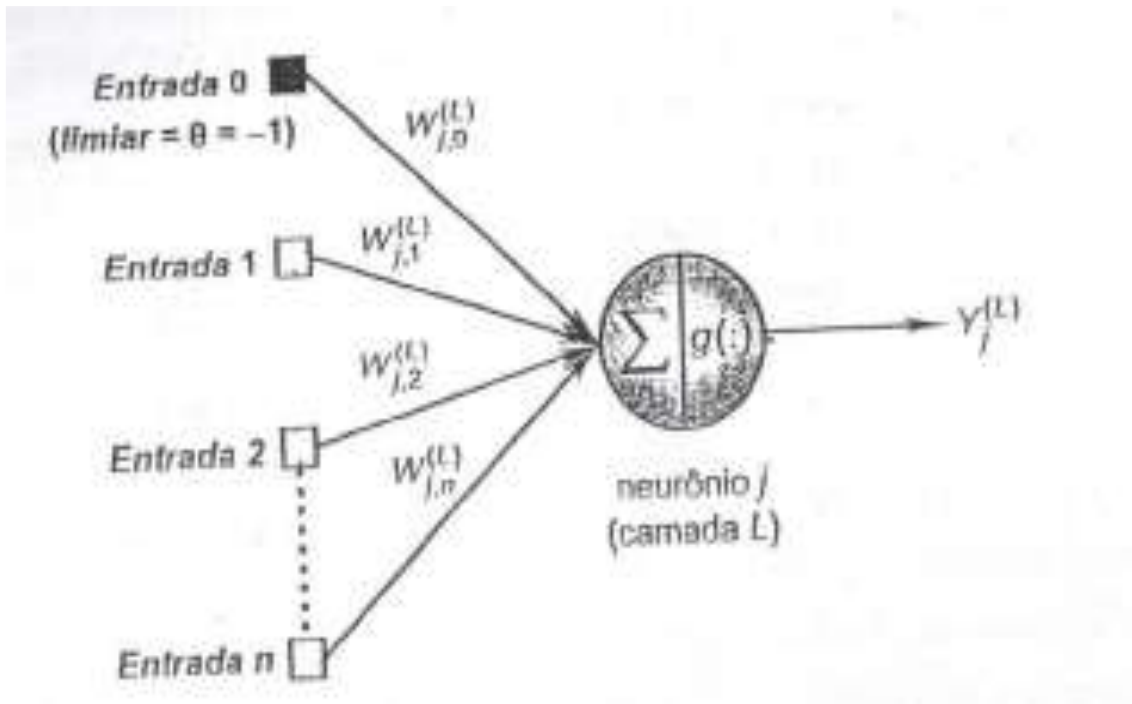


Figura 3.13 - Configuração de neurônio utilizado na derivação do algoritmo *backpropagation*.

Fonte: SILVA, SPATTI e FLAUZINO (2010).

Tomando como sequência, abaixo será representado o algoritmo de retropropagação, conforme os autores (GRAUPE, 2007; HAYKIN, 2008; PEREIRA, 2009; PERALES, 2011 E MANITO 2019).

O sinal de erro na saída do neurônio  $j$ , na iteração  $n$ , é definido através da Eq. (3.8) sendo o neurônio  $j$  um neurônio pertencente à camada de saída:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (3.8)$$

Onde,

$e_j(n)$  = Erro na saída do neurônio  $j$ .

$d_j(n)$  = Saída desejada no neurônio  $j$ .

$y_j(n)$  = Saída calculada do neurônio  $j$

Após a definição do valor instantâneo da energia do erro para o neurônio  $j$  como  $\frac{1}{2}e_j^2(n)$ , pode-se calcular o valor instantâneo da energia total do erro  $E(n)$  e por conseguinte calcular a energia média do erro quadrado  $E_{med}$ :

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n)$$

$$E_{med} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(n) \quad (3.9)$$

Onde,

C= é o conjunto composto por todos os neurônios da camada de saída da rede

N= número total de padrões contidos no conjunto de treinamento

Para minimizar o  $E_{med}$ , os pesos são atualizados de padrão em padrão de treinamento até formar uma época, isto é, uma apresentação de todos os N padrões de treinamentos à camada de entrada da rede.

A convergência do algoritmo BP pode-se dar quando a diferença do valor de  $E_{med}$  entre duas épocas sucessivas atinge um valor satisfatório, ou seja:

$$E_{med}(n+1) - E_{med}(n) \leq \epsilon \quad (3.10)$$

A minimização do erro no algoritmo BP é determinada por meio do gradiente decrescente na superfície de erros do espaço de pesos.

O vetor gradiente indica o sentido e direção de maior crescimento da função  $E(n)$  a partir do ponto em que foi calculado e o módulo do vetor indica a intensidade do crescimento desta função. O vetor gradiente ainda completa a informação gráfica no mapa de contornos de uma superfície, determinando o “fluxo e crescimento” da superfície.

O vetor gradiente para o algoritmo backpropagation pode ser definido através da Eq. (3.11):

$$\nabla E(n) = \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (3.11)$$

Onde a correção  $\nabla w_{ji}$  a ser aplicada a  $w_{ji}$  é obtida pela Eq. 3.12:

$$\partial w_{ji}(n) = w_{ji}(n+1) - w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (3.12)$$

Onde  $\eta$  é o parâmetro da taxa de aprendizagem.

O uso do sinal negativo na Eq. 3.12 indica a descida do gradiente no espaço de pesos.

A correção aplicada aos pesos sinápticos pode ser definida pela Eq. 3.13:

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_i(n) y_j(n) \quad 3.13$$

Sendo,

$$\delta_i(n) = (d_j(n) - y_j(n)) \varphi'(v_j(n)) \quad 3.1$$

4

Em que,

$\delta_i(n)$  - Gradiente local do neurônio j.

$\varphi'(v_j(n))$  - Derivada da função de ativação.

Na Eq. 3.14 é válida para os neurônios pertencentes à camada de saída, uma vez que neste caso é possível utilizar a Eq. 3.8 para determinação do erro  $e(n)$ . Calculando  $e(n)$  pode-se obter diretamente o gradiente local  $\delta_i(n)$  usando a Eq. 3.14.

Desta maneira, a proposta desse projeto é o desenvolvimento de um modelo baseado em redes neurais artificiais para investigar a contribuição harmônica de múltiplas cargas não lineares em um determinado barramento do sistema elétrico, cujo modelo será baseado em medições e considerará a interação de todas as cargas na análise, considerando todo o período de medição.

### 3.3.1 - Cálculo de impacto harmônico provindo de cargas não lineares

Conforme MANITO (2019) para determinação da carga não linear quando houver impactado na distorção harmônica de tensão de um determinado barramento de interesse, tem-se o seguinte procedimento:

Considere A como sendo a matriz que contém os padrões a serem aprendidos pela RNA, que correspondem à série temporal dos valores RMS das correntes harmônicas das barras j, na frequência de interesse h, ou seja,  $I_j^h(k)$ , for  $j=1,2,\dots, p$  and  $h=1,2,3,\dots,m$ .

De maneira adicional, considere C como o vetor de saída da RNA contendo a série temporal dos valores RMS da tensão harmônica no barramento de interesse  $V_x^h$ . Ambos os valores para  $I_j^h$  e  $V_x^h$  são séries temporais de medidas para o período da

campanha de medição. Para uma frequência harmônica específica  $h$ ,  $A$  e  $C$  pode ser escritas de acordo com as equações 3.15 e 3.16 :

$$A = \begin{bmatrix} I_1^h(1) & I_1^h(2) & \dots & I_1^h(T) \\ I_2^h(1) & I_2^h(2) & \dots & I_2^h(T) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_p^h(1) & I_p^h(2) & \dots & I_p^h(T) \end{bmatrix} \quad 3.15$$

$$C = [V_x^h(1) \ V_x^h(2) \dots V_x^h(t)] \quad 3.16$$

Uma vez que a RNA esteja devidamente treinada, esta pode ser utilizada para estimar as tensões de saída  $V_x^h$  com certa precisão para cada vetor de entrada pertencente ao conjunto de dados de teste, ou seja, dados de medições de corrente que não foram usados durante a fase de treinamento da RNA.

Para determinar qual carga não linear está ocasionando maior impacto na distorção harmônica de tensão de um determinado barramento de interesse, a RNA treinada é submetida a novos vetores de entrada, os quais são modificados para incluir pequenas variações nas correntes harmônicas com relação aos valores medidos. O objetivo é determinar o quanto a tensão de saída da RNA é sensível à pequenas variações de corrente de cada carga não linear individualmente. Sendo assim, mantendo as outras cargas inalteradas, cada série temporal de corrente harmônica de uma respectiva carga é alterada, pelo mesmo incremento  $\Delta I (0 < \Delta I < 1)$  e a tensão harmônica correspondente é obtida pela RNA. Com isso, um fator de sensibilidade pode ser definido para expressar a variabilidade da tensão harmônica com relação às correntes de carga individualmente. Podendo ser escrito conforme Eqs. (3.17), (3.18) e (3.19):

$$I_{j\text{ novo}}^h(k) = (\Delta I + 1) I_j^h(k) \quad 3.17$$

$$A_{j\text{ novo}} = \begin{bmatrix} I_1^h(k) \\ I_2^h(k) \\ \vdots \\ I_{j\text{ novo}}^h(k) \\ \vdots \\ I_p^h(k) \end{bmatrix} \quad 3.18$$

$$C_{j\text{ novo}} = [V_{xj\text{ novo}}^h(k)] \quad 3.19$$

Onde:

$A_{j\ novo}$  - Nova matriz de entrada contendo todas as séries temporais de corrente inalteradas exceto a série temporal correspondente à  $I_{j\ novo}^h(k)$ .

$V_{xj\ novo}^h$  - Nova série temporal de tensão de saída estimada pela RNA treinada com  $A_{j\ new}$ .

Comparando  $V_{xj\ novo}^h(k)$  com  $V_x^h(k)$ , pode-se determinar a resposta  $V_{xj\ novo}^h(k)$  que apresenta a maior variação com relação à série temporal original  $V_x^h(k)$ , e, assim sendo, a corrente da carga não linear associada com esta resposta pode ser classificada como a mais impactante com relação à distorção harmônica de tensão no ponto de interesse.

Conforme (CHAIR e DRAXLER, 2014) a fim de mensurar a contribuição relativa de cada carga não linear na distorção harmônica de tensão, um fator de impacto percentual  $FI_{VIj}^h$  (%) conforme apresentado na Eq. 3.20. Estes fatores de impacto podem ser interpretados como valores percentuais relativos que são calculados para cada corrente individualmente, e é assumido que esses impactos somam 100%, ou seja conforme a Eq. 3.21.

$$FI_{VIj}^h(\%) = \frac{MAE_{jnovo}^h}{\sum_{j=1}^p MAE_{novo}^h} \times 100 \quad 3.20$$

$$FI_{VI1}^h(\%) + FI(\%) + \dots + FI_{VIp}^h(\%) = 100\% \quad 3.21$$

Para alcançar o fator de impacto percentual, o Erro Absoluto Médio (MAE – Mean Absolut Error) é calculado entre a série temporal de tensão estimada inicial e a série temporal de tensão estimada quando cada corrente é variada no tempo. Usando a formulação do Erro Absoluto Médio, pode-se escrever conforme Eq. 3.22

$$MAE_{jnovo}^h = \frac{\sum_{k=1}^T |V_{xjnovo}^h(k) - V_x^h(k)|}{T} \quad 3.22$$

No apêndice A é apresentado o fluxograma simplificado, mostrando as tarefas principais envolvidas. Vale ressaltar que em aplicação real, os blocos ao ATP é retirado da Figura 3.13, onde os dados de correntes harmonicas das cargas não lineares quando a tensão harmonica na barra são obtidos via campanha de medições simultaneas, para os mesmos serem adicionados como dados de entrada no modelo RNA utilizado neste projeto.



### 3.3.2 - Treinamento de Redes MLP

Segundo HAYKIN (2008), a aprendizagem de uma rede neural é um processo onde os parâmetros livres são adaptados através de estimulação pelo ambiente em que a rede está inserida. Diante disso, o aprendizado é determinado com base na maneira pela qual a modificação dos parâmetros ocorre. Tem-se a seguinte sequência da análise:

- A rede neural é estimulada por um ambiente
- A rede neural sofre modificações nos seus parâmetros livres como resultado desta estimulação;
- A rede neural responde de uma maneira nova ao ambiente, devido às modificações ocorridas na estrutura interna;

De acordo com PEREIRA (2009), se o número de neurônios for muito grande, a rede acaba memorizando os padrões apresentados durante o treinamento. Entretanto, se a arquitetura das camadas ocultas possuírem unidades em número inferior ao necessário, o algoritmo backpropagation pode não conseguir ajustar os pesos sinápticos adequadamente, impedindo a convergência para uma solução. O ideal é utilizar o menor número possível de neurônios de modo que a rede neural não perca sua capacidade de generalização.

Segundo NASCIMENTO, JR., GOEDEL e DIETRICH, (2012), uma forma de se evitar o problema, os pesos das conexões entre as camadas de uma rede neural devem ser inicializados com valores aleatórios e pequenos para que se evite a saturação da função de ativação e a consequente incapacidade de realizar a aprendizagem.

## CAPÍTULO 4

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 4.1 - METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados a metodologia proposta para demonstrar as medições realizadas e a correlação de dados das correntes harmônicas, bem como serão demonstrados os resultados obtidos através do método proposto de redes neurais, de tal maneira que seja transparecido a relação existente entre a corrente harmônica de uma carga não linear (conhecida como fonte geradora de corrente harmônica) e a tensão harmônica no PCC da rede elétrica. O método baseado em medições, foi extraído diretamente pelo conjunto de medições, podendo a análise ser realizada na interface entre concessionárias e consumidor, considerando diferentes pontos do sistema. Diante do exposto, a tese é desenvolvida no modelo baseado em redes neurais artificiais para a distinguir a contribuição harmônica de múltiplas cargas não lineares em um determinado barramento do sistema elétrica, através do modelo exposto acima, considerando todo o período de medição. O equipamento aplicado para realizar a medição de campanha foi o analisador de qualidade de energia elétrica HIOKI MODELO PW38 e o Software AAQEE, que será abordado nos subtópicos.

##### 4.1.1 - Metodologia desenvolvida

Para melhor entendimento da metodologia, na Figura 4.1 é mostrado o sistema elétrico de potência típico, sendo representado a rede de distribuição ou transmissão, com  $n$  barramentos elétricos e  $p$  cargas não lineares, para melhor entendimento ao longo do projeto.

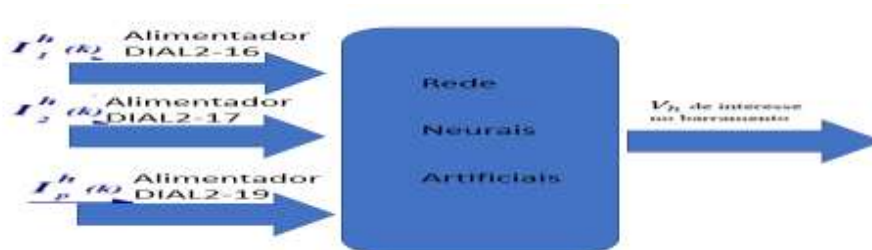


Figura 4.1 - Sistema elétrico de potência típico.

O desenvolvimento de um modelo neural, onde a finalidade é capturar e reproduzir as características específicas do sistema de estudo, onde a impedância deste, como entrada do modelo, tem-se as correntes harmônicas procedente de carga não lineares, em uma determinada frequência, e como saída, a tensão harmônica para a mesma frequência na barra de interesse. Para tal estudo, é proposto um modelo de rede neural que tenha como propósito capturar e replicar as particularidades típicas do sistema elétrico sob estudo, mais especificamente, a impedância desse sistema, visto que como entrada da rede neural tem-se as correntes harmônicas  $I_h$  originárias das cargas não lineares conectadas nos alimentadores em estudo, em uma determinada frequência, e como saída, a tensão harmônica  $V_h$  na mesma frequência da barra de interesse. A Figura 4.2 mostra um esquema resumido do modelo proposto.

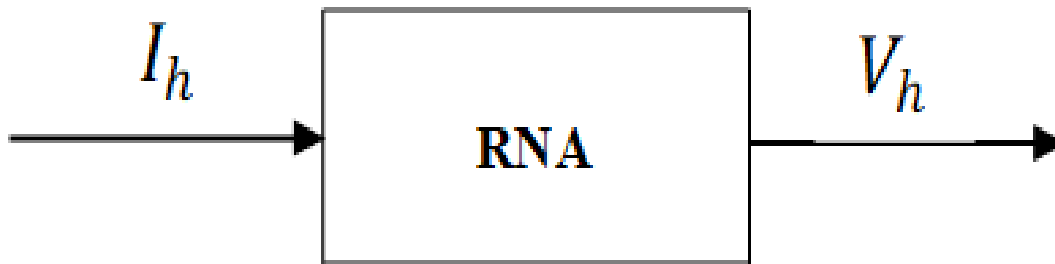


Figura 4.2 - Esquema resumido do modelo proposto.

Vale destacar que a metodologia desenvolvida no presente trabalho é realizada para cada ordem harmônica ou frequência harmônica de interesse, onde consiste em analisar os impactos harmônicos tanto qualitativo quanto quantitativo, onde somente a análise qualitativa não é o suficiente, é necessário quantificar a contribuição harmônica de cada cliente ou alimentador do sistema elétrico, pois possivelmente, todos os clientes ou alimentadores do sistema elétrico apresentam contribuição para as distorções de tensão harmônica no ponto ou na barra analisado.

#### 4.1.2 - Processo de aprendizagem

Por causa das particularidades da problemática exposta, em que se deseja replicar uma determinada grandeza, ou seja, determinar a tensão harmônica em função das correntes harmônicas originárias das cargas não lineares conectadas nos alimentadores em estudo do sistema elétrico, sendo os dados de entrada ( $I_h$ ) e saída ( $V_h$ ) da rede neural obtidos através de campanha de medição, adotou - se uma rede

neural do tipo Rede Neural Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP) tal qual o aprendizado é supervisionado, ou seja, o aprendizado do ambiente desconhecido se concede por meio de comparações entre as respostas desejadas com as respostas provindas da saída da rede neural, a cada repetição, até que o erro seja mínimo. Na Figura 4.3 mostra o diagrama em blocos que esclarece a maneira de aprendizagem para o estudo proposto.

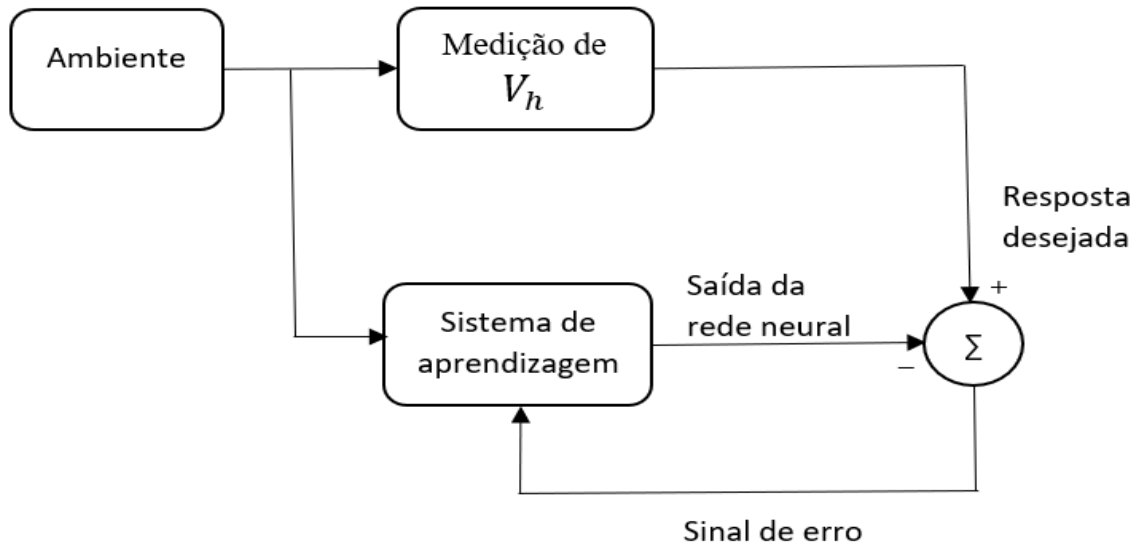


Figura 4.3 - Diagrama de blocos ilustrando a forma de aprendizagem.

A aprendizagem da RNA é realizada por meio de dados coletados durante uma campanha de medição, tais dados são inseridos tanto na entrada ( $I_h$  provindas de cada carga não linear) como na saída ( $V_h$  em um determinado barramento de interesse) da rede neural, para cada frequência de interesse. É importante destacar que a realização da coleta dos dados deve ser de forma sincronizada, ou seja, deve ser realizada nos mesmos instantes de tempo.

O treinamento de Rede Neural Artificial – RNA deve ser realizado para cada frequência harmônica, a fim de obter o modelo adequado de estimação de tensão harmônica para cada caso, onde a análise é realizada para cada ordem harmônica, de forma independente, determinando um impacto harmônico das correntes de 3ª ordem, por exemplo, de cada carga não linear, na distorção de tensão de 3ª ordem de uma determinada barra, sendo os demais estudos, considerando outras frequências, sendo realizado de forma independente.

A análise foi realizada durante a campanha de medição, onde foi registrado a cada intervalo de agregação, normalmente no período de dez minutos, durante um

período de 7 dias corridos, conforme as normas nacionais estipula. Diante disso, é possível capturar o perfil de carregamento nos dias de semana, e finais de semana, formando um ciclo completo de operação de carga.

#### 4.2 - FLUXOGRAMA

Na Figura 4.3 é apresentado o fluxograma de forma simplificado mostrando as principais tarefas envolvidas na metodologia desenvolvida. A base de dados foi construída a partir de campanha de medição para obter as correntes harmônicas das cargas não lineares destas series temporais das curvas de carga não lineares (corrente harmônica), cujo objetivo é representar as tensões harmônicas nas barras do sistema elétrico simulado.

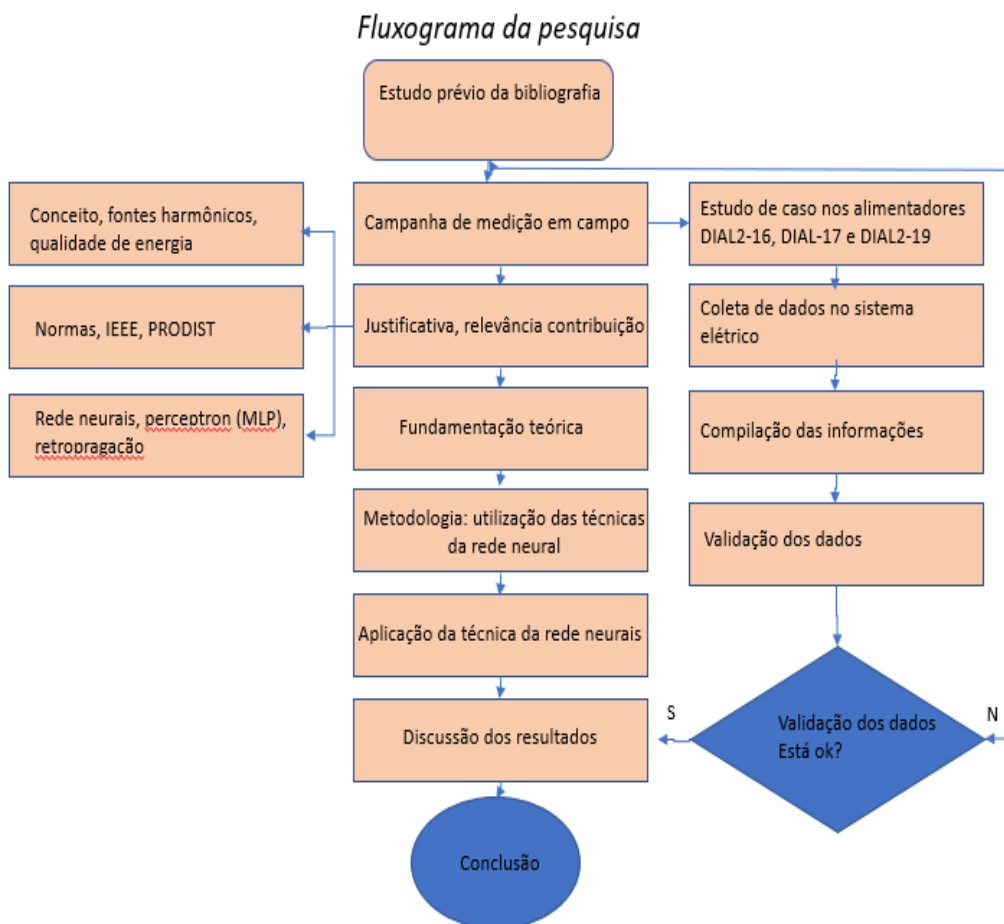


Figura 4.4- Fluxograma da pesquisa.

#### **4.2.1 - Software AAQEE**

O software AAQEE é uma ferramenta desenvolvida na análise de qualidade de energia elétrica (QEE), capaz de estimar o grau do impacto harmônico na rede de distribuição de energia elétrica nos consumidores individuais comerciais, analisando medições simultâneas de tensões, correntes e potências harmônica, bem como técnicas de inteligência computacionais. O software de qualidade de elétrica AAQEE, é possível analisar em forma gráficas, as grandezas elétricas obtidas em campanhas de medição, realizando o cálculo conforme solicitado pela QEE especificado pela PRODIST. O mesmo apresenta a funcionalidade do cálculo de impactos harmônicos acarretado pelas unidades consumidoras na rede de distribuição da concessionária.

#### **4.2.2 - Analisador de qualidade de energia elétrica hioki pw 3198**

O analisador de qualidade de energia elétrica HIOKI PW 3198 é um instrumento para monitorar e gravar as anomalias encontrada no fornecimento de energia elétrica, permitindo identificar rapidamente as causas. O equipamento pode ser aplicado para analisar problemas durante o fornecimento de energia elétrica, tomando como exemplo: queda de tensão, flutuações, harmônico etc.

Segundo ALMEIDA (2018), as características do equipamento PW3198 são as seguintes: (a) Possui classe A cumprindo com a norma IEC 61000-4-30, (b) Realiza medições de sobretensão transitória de alta frequência de no máximo 6 kv pico com taxa de amostragem de no mínimo 1MHz, (c) Medição e registro de tensão e corrente harmônicas e interharmônicas de acordo com a IEC 610004-7 e com taxa de amostragem mínima de 256 amostras/ciclo, (d) Medição e registro dos ângulos de fase da tensão e corrente harmônicas e interharmônicas; (e) Medição das potências harmônicas e fator de potência, (f) Medição de flicker de acordo com a IEC 61000-4-15, (g) Medição da corrente de inrush, (h) Medição de sags, swells e interrupções, (i) Memória de massa de no mínimo 2 GB, (j) Três sensores de corrente na faixa (aproximada): 1A à 100 A, (l) Três sensores flexíveis de corrente na faixa: 200 A à 5000 A.

### 4.3 - ESTUDO DE CASOS

O presente trabalho foi realizado no sistema elétrico da concessionária de energia realizado a avaliação da metodologia informada anteriormente, em três alimentadores e um barramento do sistema elétrico, onde foi possível identificar a intervenção de cargas não lineares na distorção harmônica da tensão no barramento em estudo, como exemplo, tomamos a Figura 4.5.

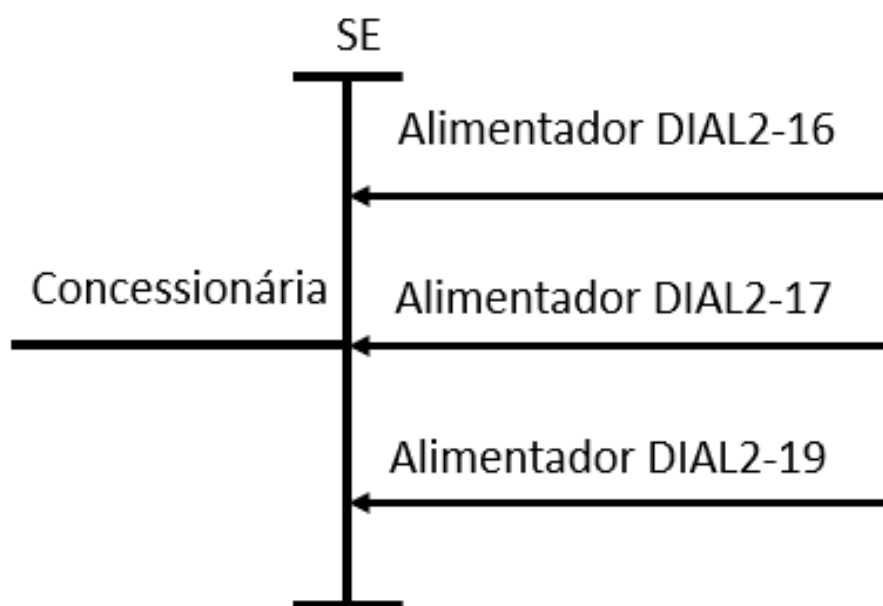


Figura 4.5 - Sistema elétrico de potência típico.

Obtiveram-se as medições de tensões e corrente harmônicos em pontos estratégicos, durante o decorrer dos estudos do sistema, cujo trabalho foi a construção de modelos de rede neurais.

O estudo foi realizado através de campanha de medição em campo, seguindo a norma da PRODIST, entre os períodos de 15 maio de 2017 à 22 de maio de 2017 na subestação Distrito Industrial de nível de tensão 13.8 kV da empresa Eletrobrás Distribuição Amazonas, no qual instalaram-se 4 analisadores de QEE modelo PW 3198 da HIOKI para a realização de medições simultâneas, nos seguintes pontos de medição: transformador DITF4-04; e alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19. O Anexo I, pode ser visto o diagrama unifilar da subestação e a localização dos pontos de instalação dos analisadores de qualidade de energia, circulado em azul, totalizando 4

pontos de medição simultâneo. O objetivo da instalação do equipamento no transformador DITF4-04 é o monitoramento da tensão harmônica na barra DIBR02-03, circulado em verde, a característica ao longo circuito é composta por grandes motores elétricos que acionam cargas não lineares, como exemplo máquinas CNC, máquinas injetoras, e etc, onde o objetivo a busca da avaliação e a correlação existente entre as correntes harmônicas de ordem 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> nos alimentadores DIAL2-16, DIAL-17 e DIAL2-19, e as tensões harmônicas de mesma ordem localizado na barra DIBR2-03 (13,8 kV) dessa subestação e abrangendo assim as três sequências, zero (3<sup>a</sup>), negativa (5<sup>a</sup>) e positiva (7<sup>a</sup>)

#### **4.3.1 - Estudo de caso 1**

O estudo de caso 1 apresenta o estudo de impacto harmônico entre a corrente harmônica de ordem 3<sup>a</sup> dos alimentadores DIAL2-16, DIAL-17 e DIAL2-19 e a tensão harmônica de mesma ordem da barra DIBR2-03 de 13,8 kV, ver Anexo I.

#### **4.3.2 - Análise de impacto entre a corrente harmônica de 3<sup>a</sup> ordem dos alimentadores DIAL2-16, DIAL-17 e DIAL2-19 e a tensão harmônica de mesma ordem na barra DIBR2-03**

Neste subtópico são apresentados os resultados referentes à análise da contribuição harmônica dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17, DIAL2-19 na 3<sup>a</sup> ordem da tensão harmônica da barra localizada no lado de baixa tensão do transformador DITF4-04 (13,8 kV) utilizando redes neurais artificiais.

Como pode ser visto na Tabela 4.1, que contém os fatores de impacto calculados considerando todo o período de medição, o alimentador DIAL-2\_16 apresentou um maior fator de impacto na fase B, alcançando um valor igual a 55,803%. No entanto, nas fases A e C, o alimentador que apresentou maior influência na distorção de tensão na barra DIBR2-03 foi o DIAL2-19, apresentando um valor igual a 67,895% na fase A e 38,229% na fase C. Com relação a parcela de contribuição do background, os valores do fator de impacto foram iguais a 08,094% na fase A, 17,147% na fase B e 11,682% na fase C, não impactando significativamente na distorção da barra DIBR2-03.



Tabela 4.1 - Fator de Impacto  $IF_{Vij}^h$  (%) calculado na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (3º harmônico).

BASE	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2-16	07,135	55,803	16,344
DIAL2-17	16,876	12,938	33,746
DIAL2-19	67,895	14,112	38,229
BACKGROU ND	08,094	17,147	11,682

As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostram as tensões de saída da RNA assim como os valores de tensão medidos na barra DIBR2-03. Analisando essas Figuras, verifica -se que a RNA apresentou um bom desempenho, pois houve uma boa aproximação entre os sinais estimados pela RNA e o sinal medido no sistema, tanto os sinais de saída da RNA considerando somente um alimentador quanto o sinal de saída da RNA considerando os três alimentadores. Como pode ser observado nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 não é possível identificar um alimentador dominante para contribuição da distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-03 ao longo de todo o período de medição, ou seja, em determinados momentos um alimentador específico apresenta maior variação na saída da rede neural (maior sensibilidade), enquanto que em outro momento outro alimentador é responsável por apresentar maior sensibilidade.

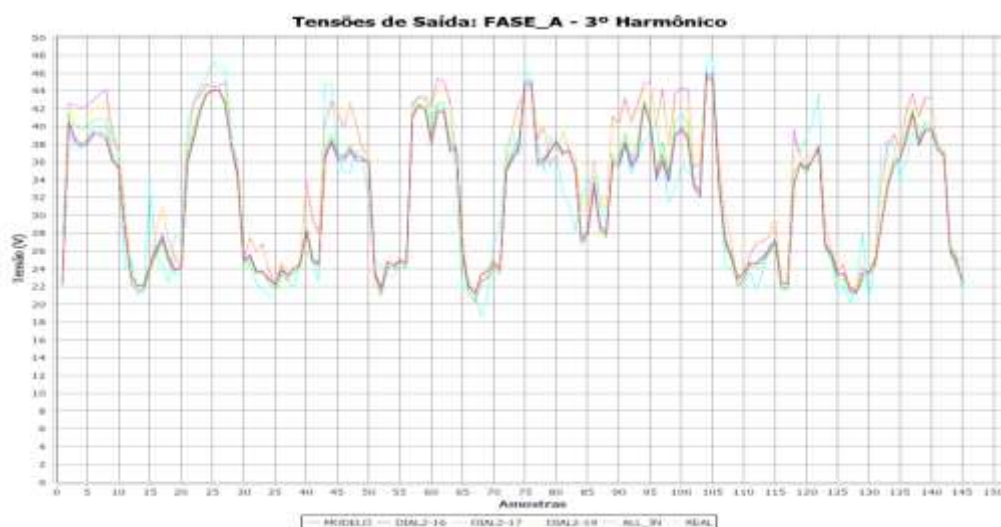


Figura 4.6 - Análise das tensões de saída da RNA de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).

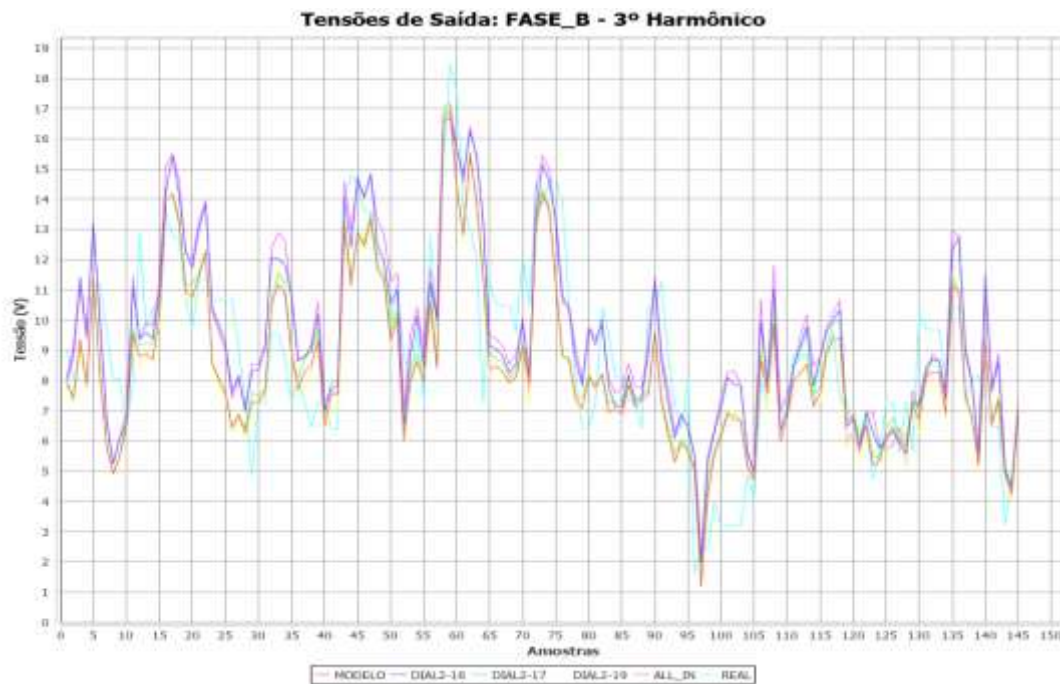


Figura 4.7 - Análise das tensões de saída da RNA de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).

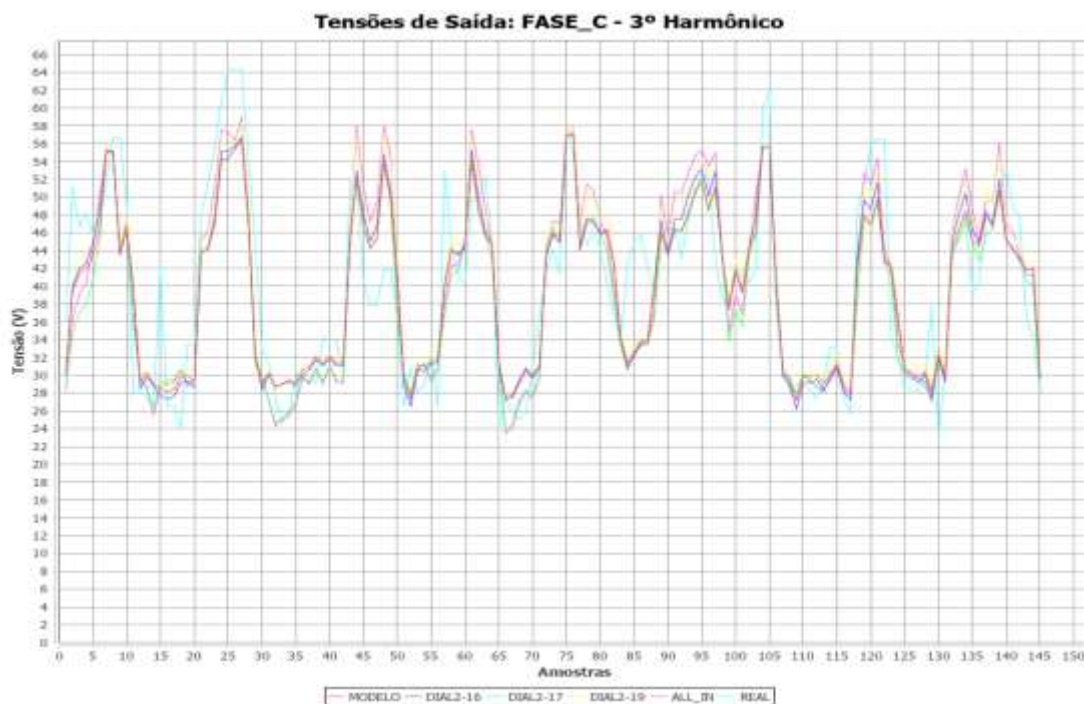


Figura 4.8 - Análise das tensões de saída da RNA de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 mostram os impactos na distorção de tensão da barra DIBR2-03 e de cada alimentador do sistema elétrico estudado bem como do background ao longo de um período. Como pode ser visto nestas Figuras de 4.8, 4.9 e

4.10, existem variações dos impactos ao longo do tempo, alternando os alimentadores, ou seja, em alguns momentos um determinado alimentador apresenta maior influência que o outro. No entanto, quando o impacto é analisado de maneira geral, fica evidente, em alguns casos, a dominância de certa carga harmônica, como pode ser visto na Tabela 4.1 apresentada anteriormente.

Como pode ser observado nas Figuras 4.8 e 4.10 o alimentador DIAL2-19 apresenta uma dominância nos impactos harmônicos da barra DIBR2-03 nas fases A e C e na Figura 4.7 o alimentador DIAL2-16 apresenta uma dominância na fase B da mesma barra.

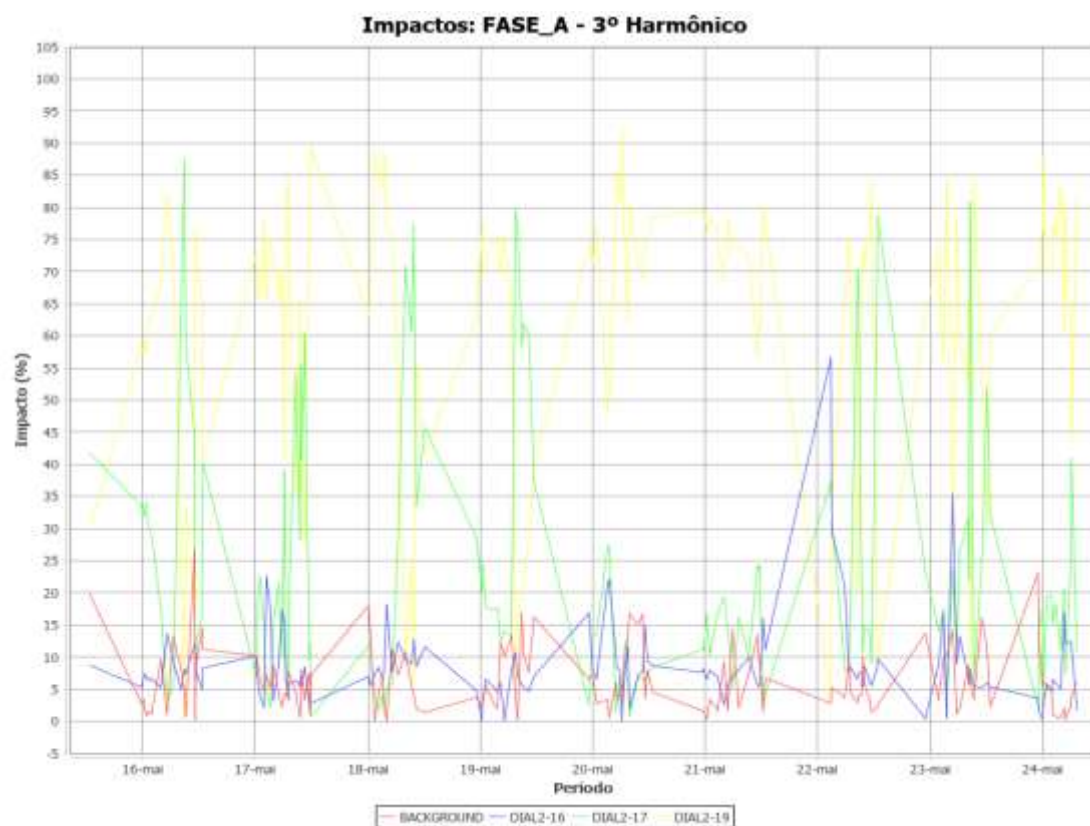


Figura 4.9 - Análise dos impactos de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).

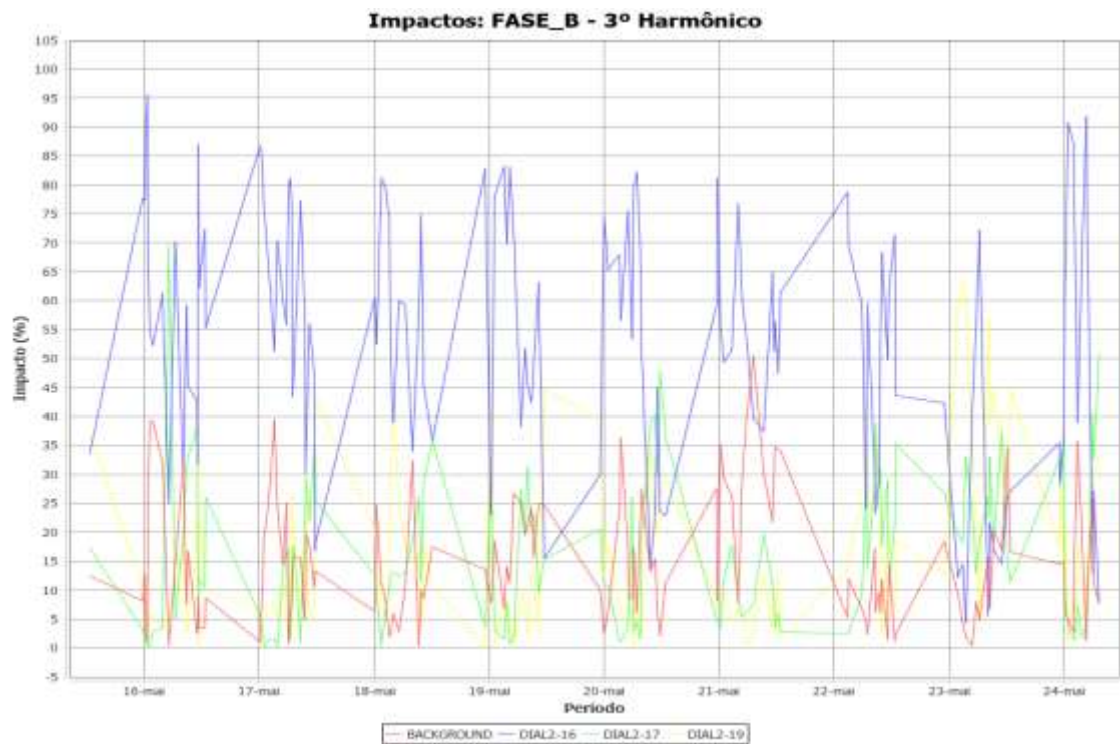


Figura 4.10 – Análise dos impactos de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).

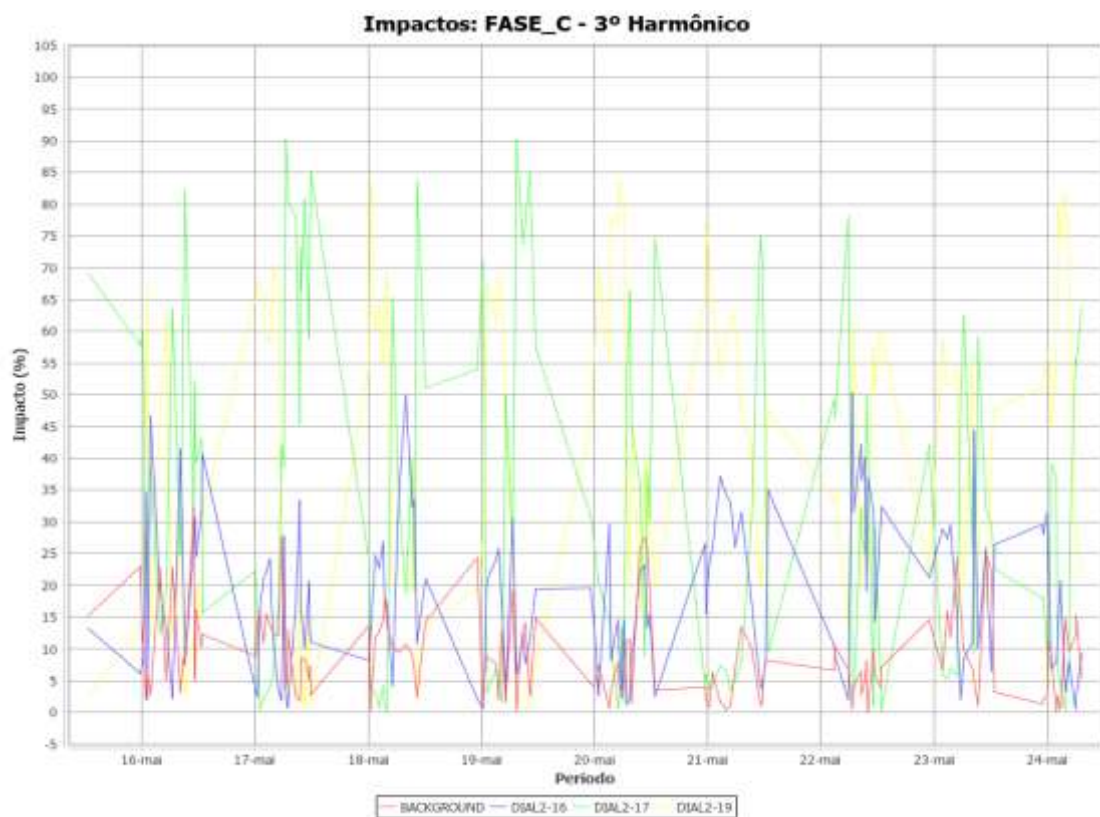


Figura 4.11 - Análise dos impactos de 3º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).

### 4.3.3 - Estudo de caso 2

O estudo de caso 2 apresenta o estudo de impacto harmônico entre a corrente harmônica de ordem 5ª dos alimentadores DIAL2-16, DIAL-17 e DIAL2-19 e a tensão harmônica de mesma ordem da barra DIBR2-O3 de 13,8kV, ver Anexo I.

### 4.3.4 - Análise de impacto entre a corrente harmônica de 5ª ordem dos alimentadores DIAL2-16, DIAL-17 e DIAL2-19 e a tensão harmônica de mesma ordem na barra DIBR2-03

Neste subtópico são apresentados os resultados referentes à análise da contribuição harmônica dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17, DIAL2-19 na 5ª ordem de tensão harmônica da barra localizada no lado de baixa tensão do transformador DITF4-04 (13,8 kV) utilizando redes neurais artificiais.

Como pode ser visto na Tabela 4.2, que contém os fatores de impacto calculados considerando todo o período de medição, o alimentador DIAL2-16 apresentou um fator de impacto significativo na fase B, alcançando um valor igual a 36,176%. No entanto, nas fases A, B e C, o alimentador que apresentou maior influência na distorção de tensão na barra foi o DI AL-2\_17, apresentando um valor igual a 70,232% na fase A, 52,599 na fase B e 69,025% na fase C. Com relação a parcela de contribuição do background, os valores do fator de impacto foram iguais a 06,847% na fase A, 05,447% na fase B e 06,389% na fase C.

Tabela 4.2 - Fator de Impacto  $IF_{VIj}^h$  (%) calculado na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (5º harmônico).

BASE	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2-16	14,386	36,176	13,197
DIAL2-17	70,232	52,599	69,025
DIAL2-19	08,535	05,778	11,389
BACKGROUND	06,847	05,447	06,389



As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 mostram as tensões de saída da RNA assim como os valores de tensão medidos na barra DIBR2-03. Analisando essas Figuras, verifica-se que a RNA apresentou um bom desempenho, pois houve uma boa aproximação entre os sinais estimados pela RNA e o sinal medido no sistema, tanto os sinais de saída da RNA considerando somente um alimentador quanto o sinal de saída da RNA considerando os três alimentadores. Como pode ser observado nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 não é possível identificar um alimentador dominante para contribuição da distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-03 ao longo de todo o período de medição, ou seja, em determinados momentos um alimentador específico apresenta maior variação na saída da rede neural (maior sensibilidade), enquanto em outro momento outro alimentador é responsável por apresentar maior sensibilidade.

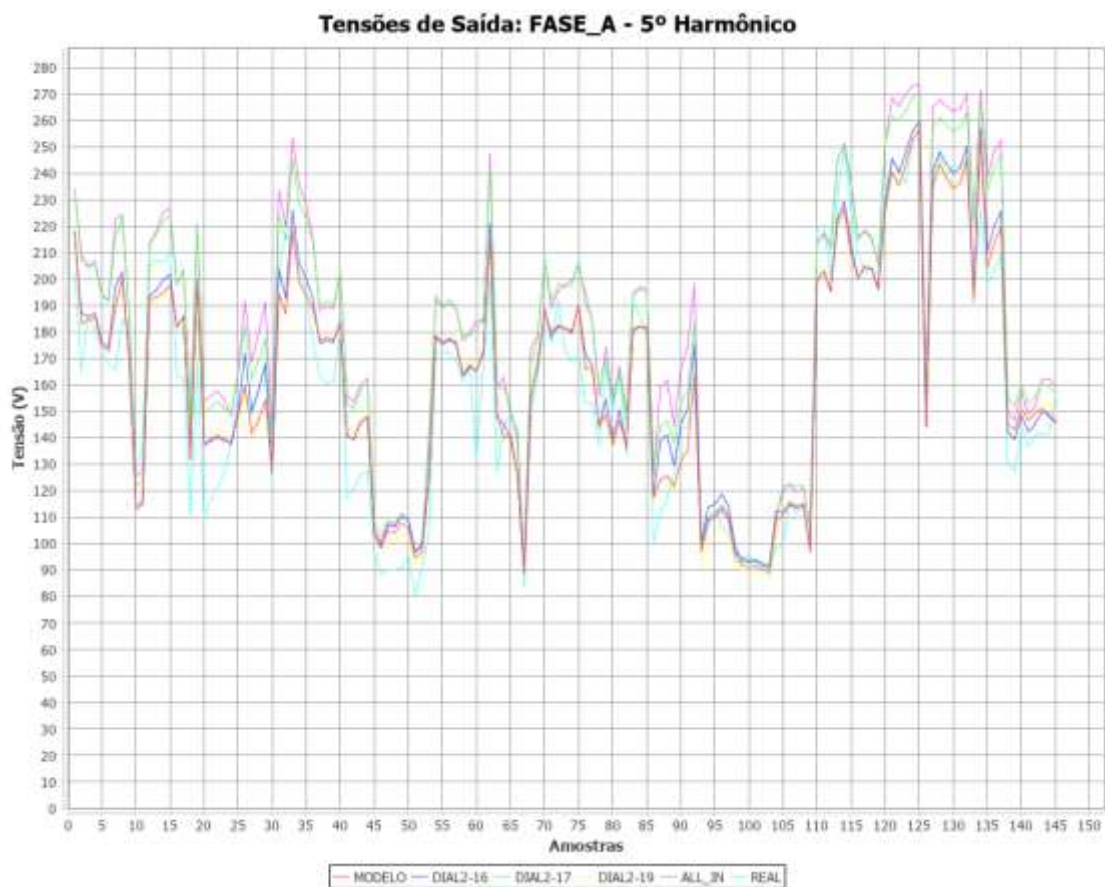


Figura 4.12 - Análise das tensões de saída da RNA de 5º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).

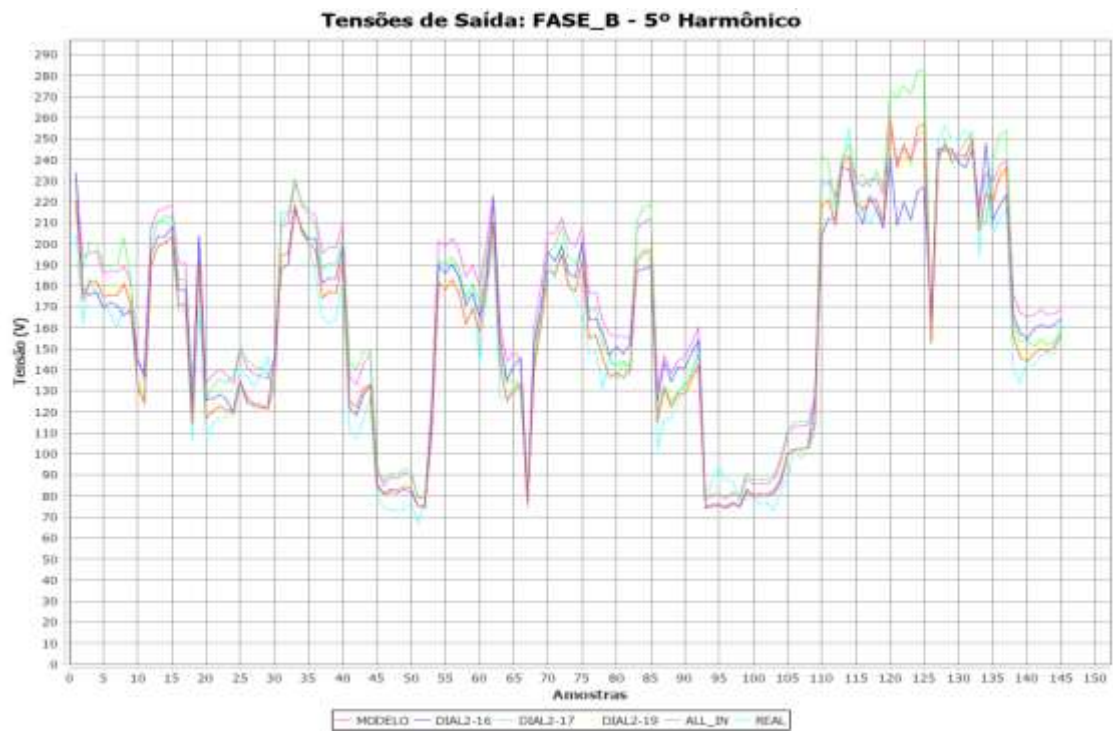


Figura 4.13 - Análise das tensões de saída da RNA de 5º harmônico na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).

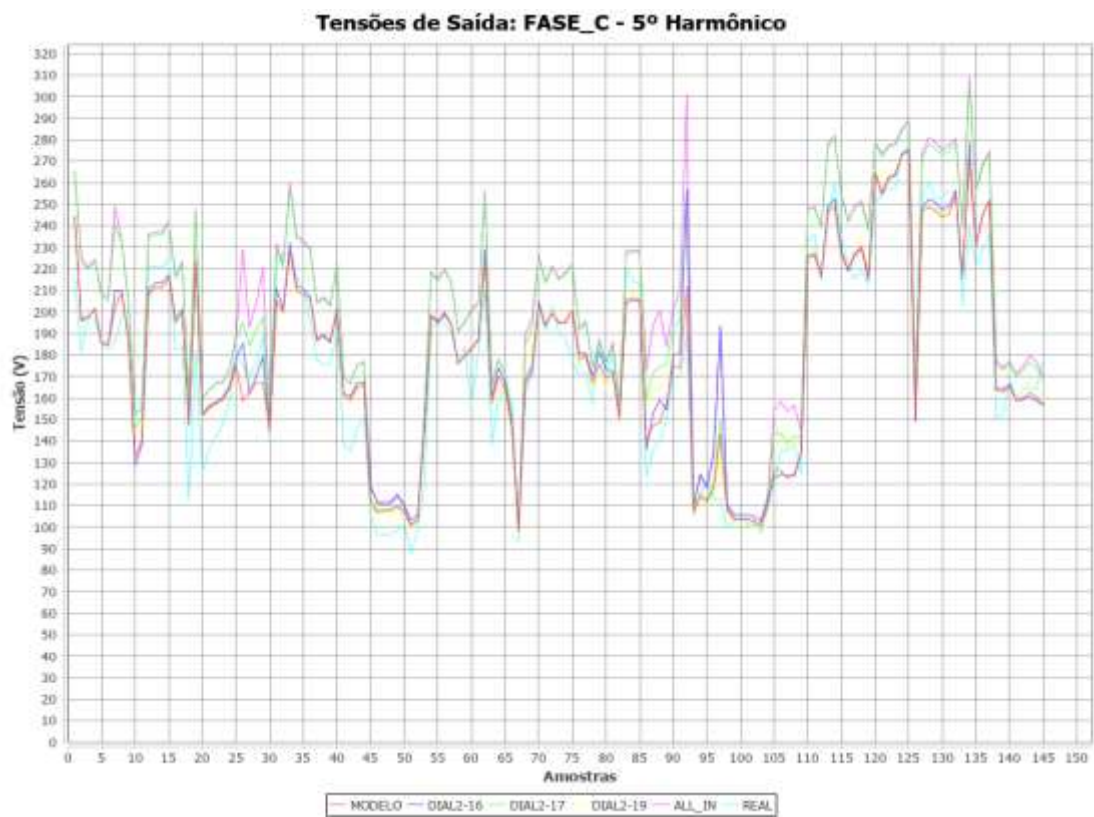


Figura 4.14 - Análise das tensões de saída da RNA de 5º harmônico na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram os impactos na distorção de tensão na barra DIBR2-03 e de cada alimentador do sistema elétrico estudado bem como do background ao longo de um período. Como pode ser visto nestas Figuras de 4.7 a 4.9, existem variações dos impactos ao longo do tempo, alternando os alimentadores, ou seja, em alguns momentos um determinado alimentador apresenta maior influência que o outro. No entanto, quando o impacto é analisado de maneira geral, através da Equação. de impacto  $IF_{VIj}^h$ , fica evidente, em alguns casos, a dominância de certa carga harmônica, como pode ser visto na Tabela 4.2 apresentada anteriormente.

Como pode ser observado nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 o alimentador DIAL2-17 apresenta uma dominância nos impactos harmônicos da barra estudada nas fases A, B e C e na Figura 4.10 o alimentador DIAL2-16 apresenta uma dominância na fase B da mesma barra.

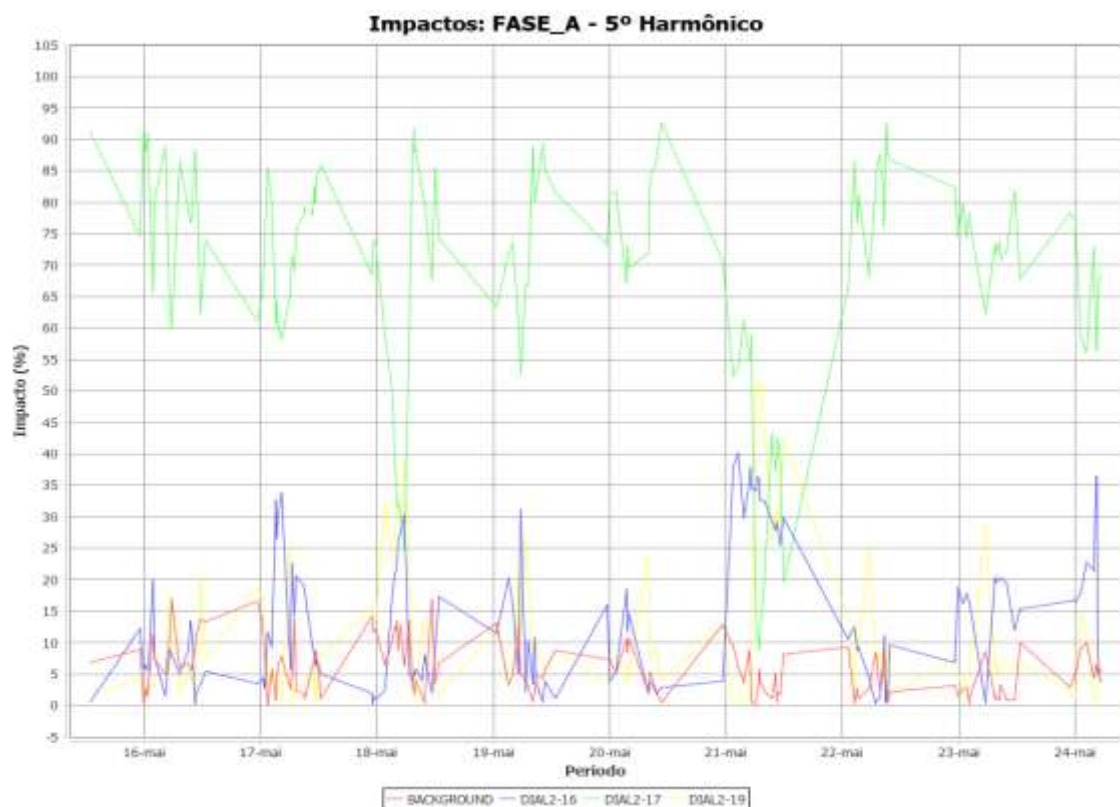


Figura 4.15 - Análise dos impactos de 5º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).



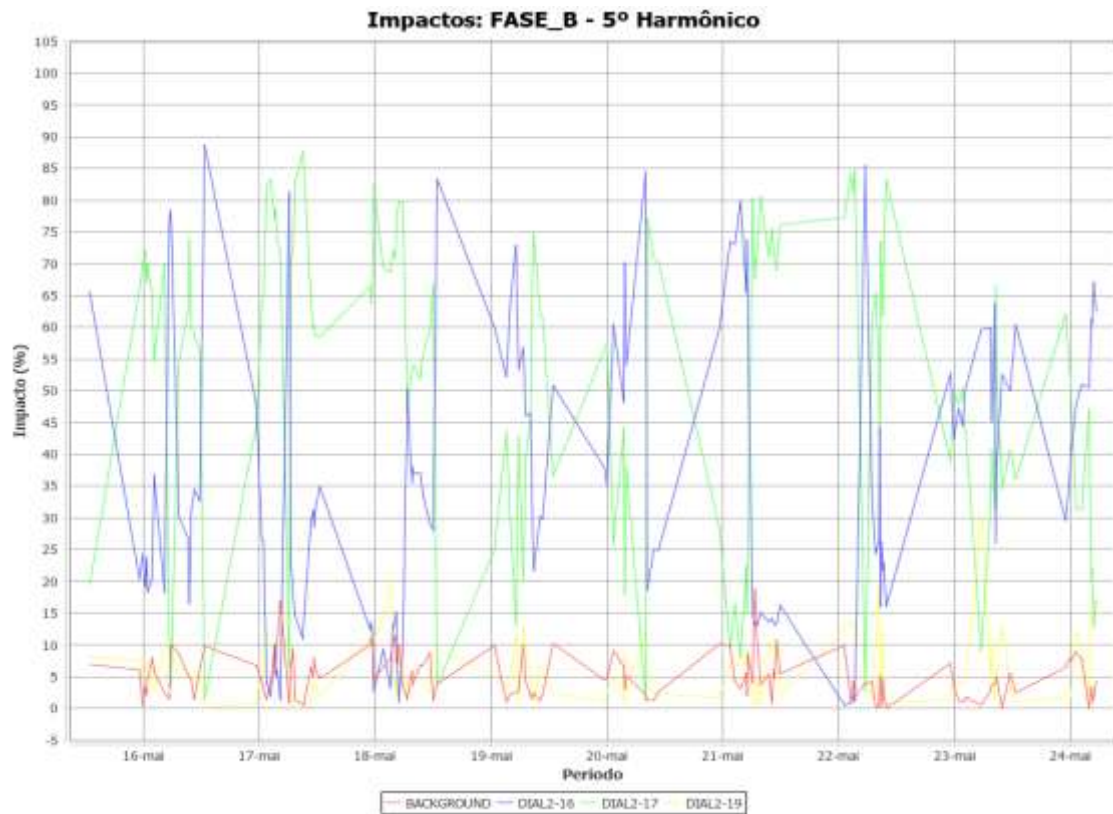


Figura 4.16 – Análise dos impactos de 5º harmônico na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).

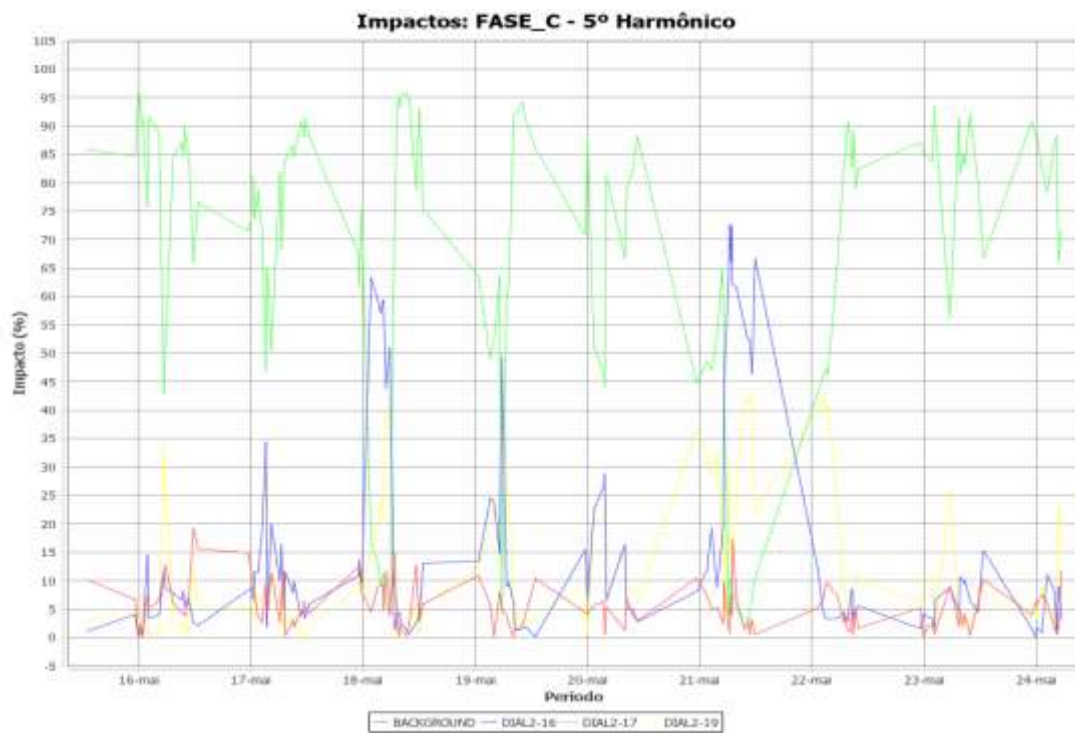


Figura 4.17 - Análise dos impactos de 5º harmônico na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).

### 4.3.5 - Estudo de caso 3

O estudo de caso 3 apresenta o estudo de impacto harmônico entre a corrente harmônica de ordem 7ª dos alimentadores DIAL2-16, DIAL-17 e DIAL2-19 e a tensão harmônica de mesma ordem da barra DIBR2-O3 de 13,8kV, ver Anexo I.

### 4.3.6 - Análise de impacto entre a corrente harmônica de 7ª ordem dos alimentadores DIAL2-16, DIAL-17 e DIAL2-19 e a tensão harmônica de mesma ordem na barra DIBR2-03

Neste subtópico são apresentados os resultados referentes à análise da contribuição harmônica dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17, DIAL2-19 na 7ª ordem de tensão harmônica da barra localizada no lado de baixa tensão do transformador DITF4-04 (13,8 kV) utilizando redes neurais artificiais.

Como pode ser visto na Tabela 4.3, que contém os fatores de impacto calculados considerando todo o período de medição, o alimentador DIAL2-16 apresentou um maior fator de impacto na fase B, alcançando um valor igual a 41,871%. No entanto, nas fases A e C, o alimentador que apresentou maior influência na distorção de tensão na barra DIBR2-O3 foi o DIAL2-17, apresentando um valor igual a 62,785% na fase A, e 49,618% na fase C, e com fator de impacto significativo na fase B. Com relação a parcela de contribuição (fator de impacto) do background, os valores calculados foram iguais a 09,574% na fase A, 05,543% na fase B e 09,799% na fase C.

Tabela 4.3 - Fator de Impacto  $IF_{Vij}^h$  (%) calculado na barra DIBR2-O3 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (7º harmônico).

BASE	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2-16	09,381	41,971	05,461
DIAL2-17	62,785	38,145	49,618
DIAL2-19	18,261	14,342	35,123
BACKGROUN D	09,574	05,543	09,799

As Figuras 4.17,4.18 e 4.19 mostram as tensões de saída da RNA assim como os valores de tensão medidos na barra DIBR2-03. Analisando essas Figuras, verificou -se que a RNA apresentou um bom desempenho, semelhante ao estudo de caso 2, pois houve uma boa aproximação entre os sinais estimados pela RNA e o sinal medido no sistema, tanto os sinais de saída da RNA considerando somente um alimentador quanto o sinal de saída da RNA considerando os três alimentadores. Como pode ser observado nas Figuras 4.17,4.18 e 4.19 não é possível identificar um alimentador dominante para contribuição da distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-03 ao longo de todo o período de medição, ou seja, em determinados momentos um alimentador específico apresenta maior variação na saída da rede neural (maior sensibilidade), enquanto em outro momento outro alimentador é responsável por apresentar maior sensibilidade.

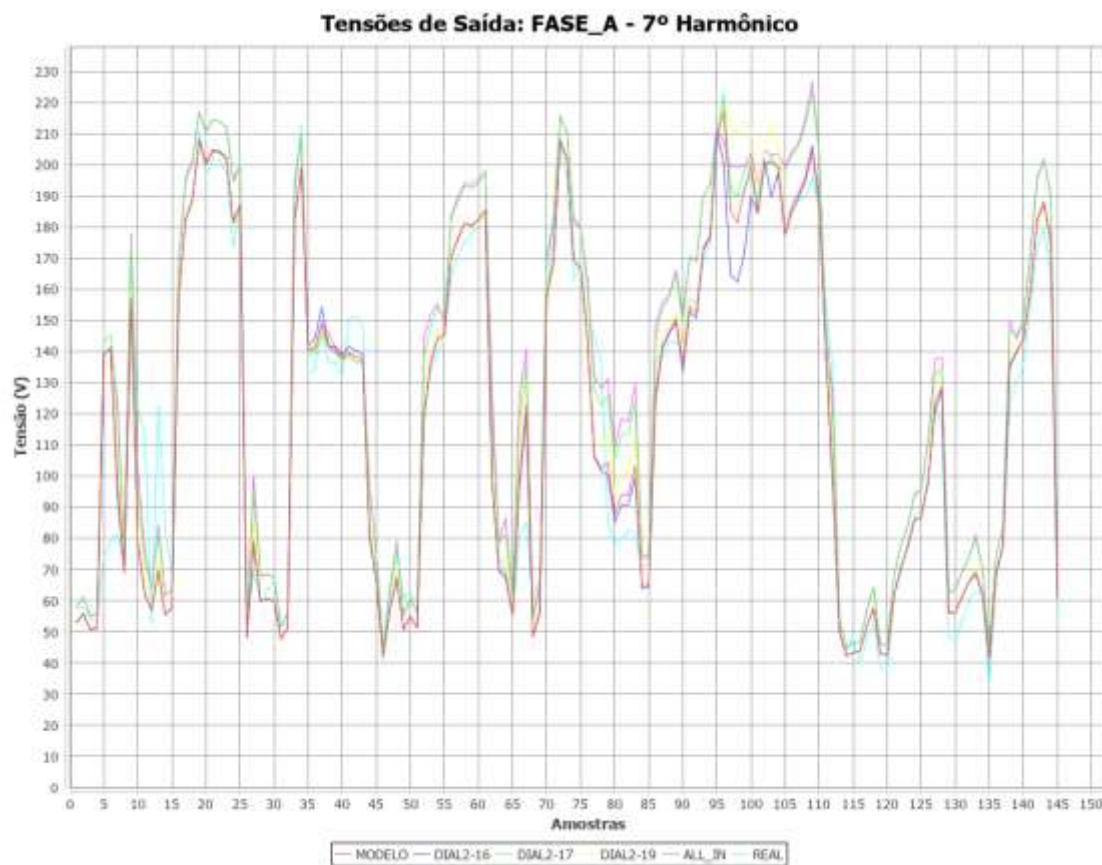


Figura 4.18 - Análise das tensões de saída da RNA de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).

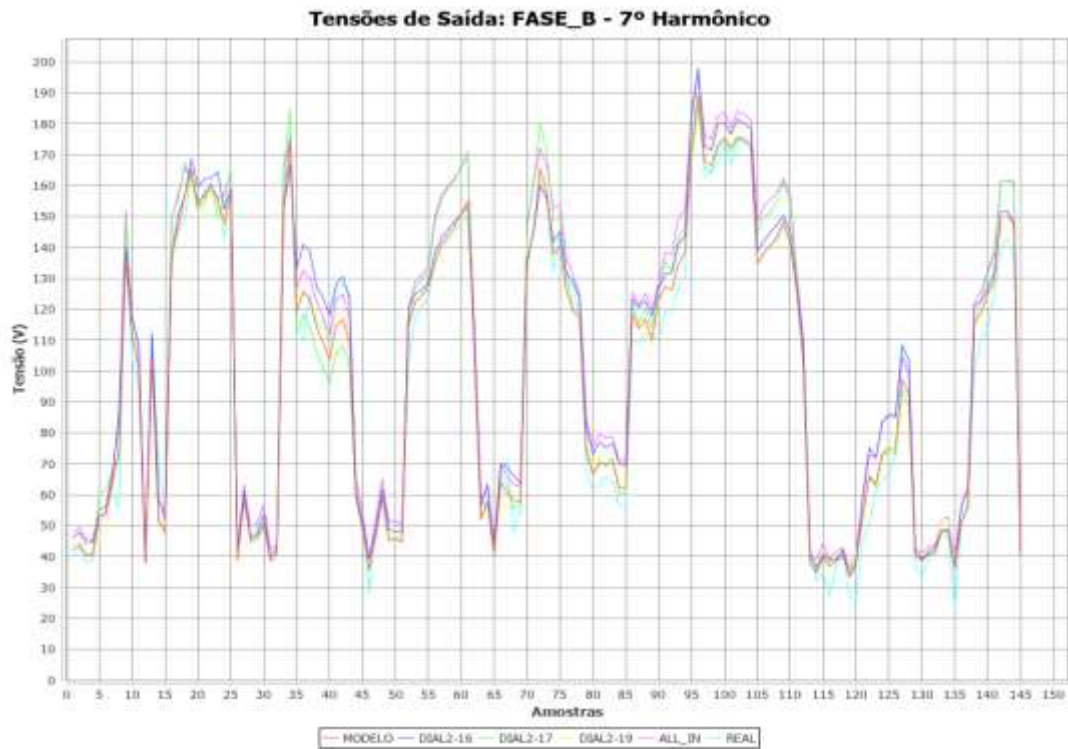


Figura 4.19 - Análise das tensões de saída da RNA de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).

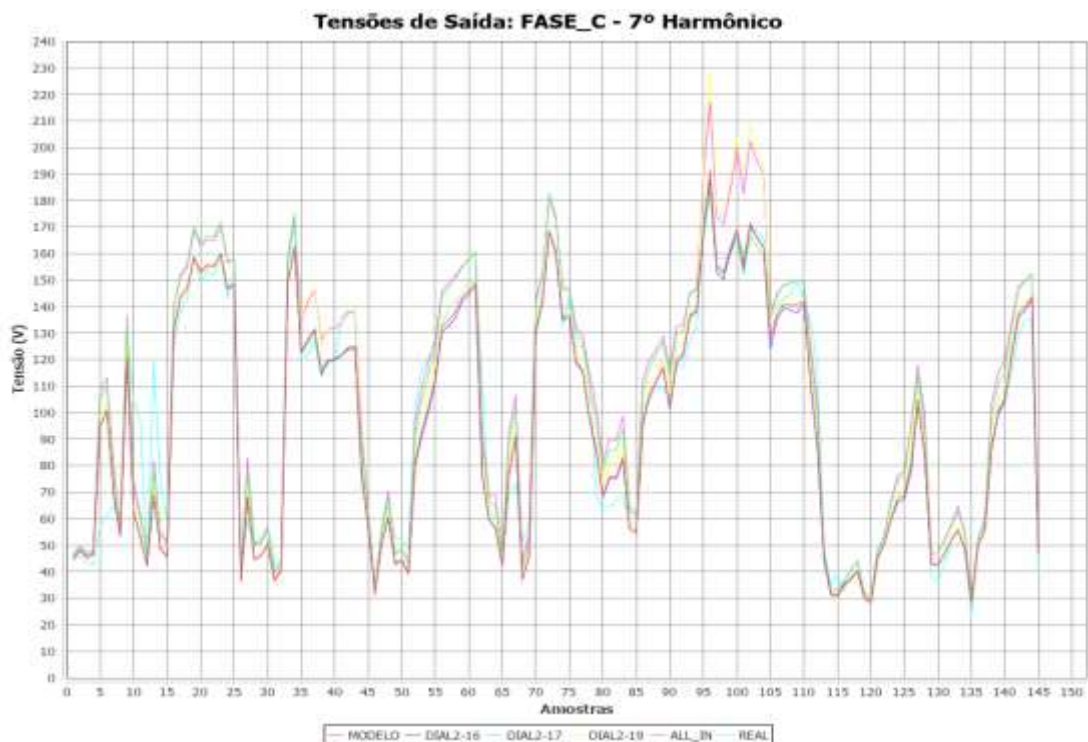


Figura 4.20 - Análise das tensões de saída da RNA de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).

As Figuras 4.20,4.21 e 4.22 mostram os impactos na distorção de tensão na barra DIBR2-03 e de cada alimentador do sistema elétrico estudado bem como do background ao longo de um período. Como pode ser visto nas Figuras de 4.16,4.17 e 4.18, existem variações dos impactos ao longo do tempo, alternando os alimentadores, ou seja, em alguns momentos um determinado alimentador apresenta maior influência que o outro. No entanto, quando o impacto é analisado de maneira geral, através da equação de impacto  $IF_{VIj}^h$ , fica evidente, em alguns casos, a dominância de certa carga harmônica, como pode ser visto na Tabela 4.3 apresentada anteriormente.

Como pode ser observado nas Figuras 4.20,4.21 e 4.22 o alimentador DIAL2-17 apresenta uma dominância nos impactos harmônicos da barra estudada nas fases A, B e C e na Figura 4.21 o alimentador DIAL2-16 apresenta uma dominância na fase B da mesma barra.

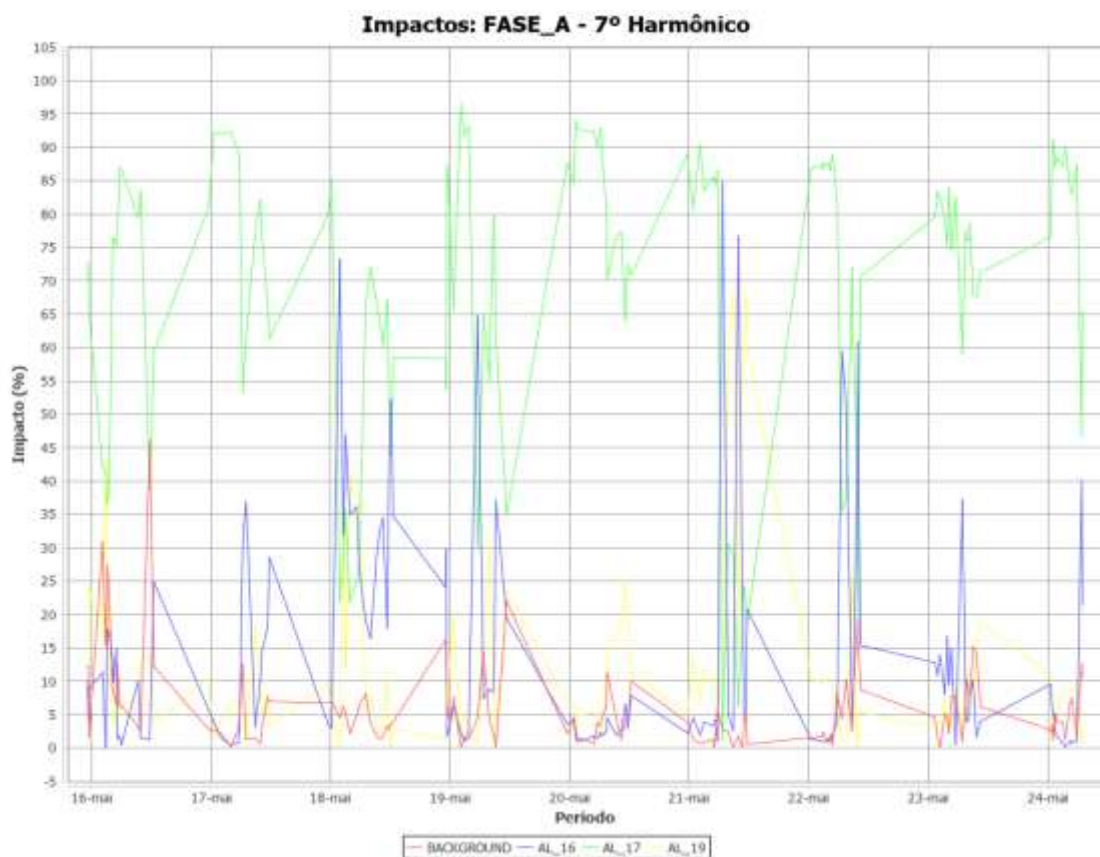


Figura 4.21 - Análise dos impactos de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase A).



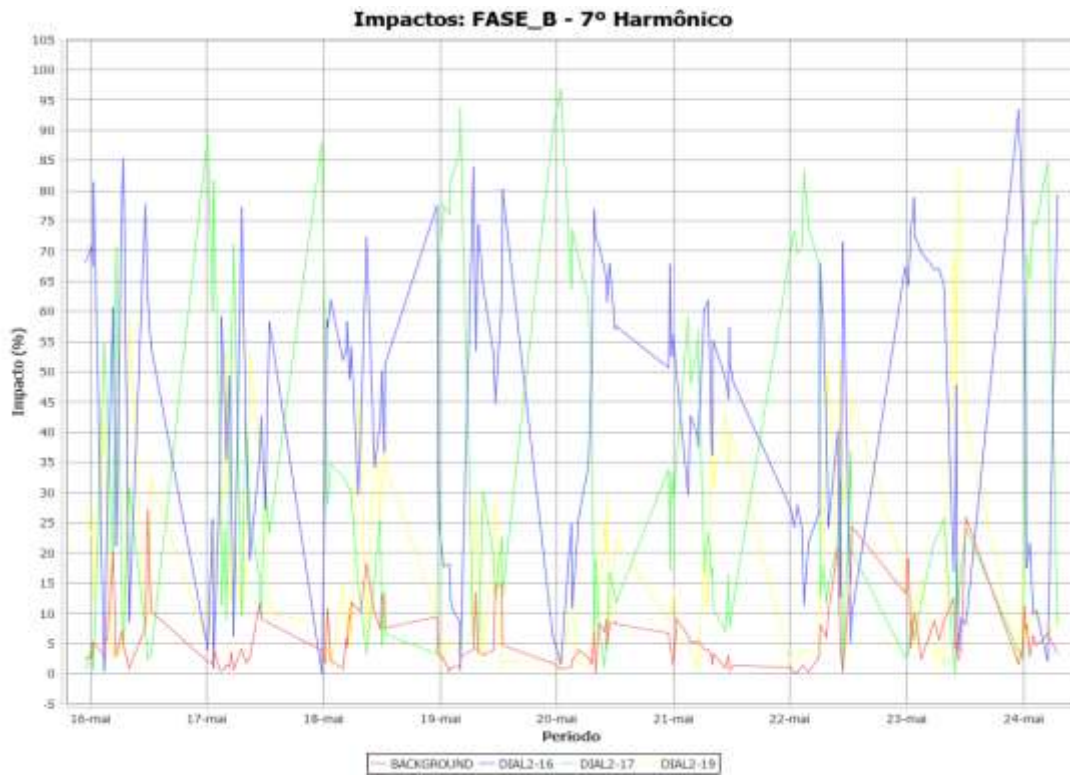


Figura 4.22 - Análise dos impactos de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase B).

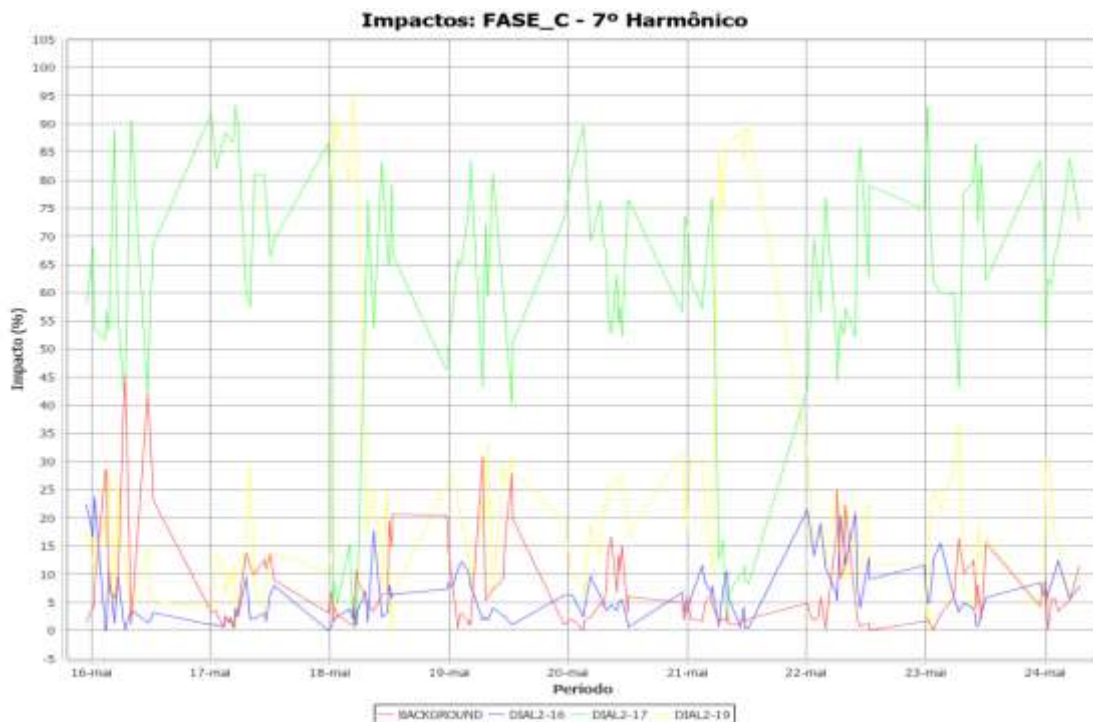


Figura 4.23 - Análise dos impactos de 7º harmônico na barra DIBR2-03 (13,8 kV) do transformador DITF4-04 (fase C).

#### 4.4 - DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Neste subtópico foram apresentados os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta nessa tese. Onde os resultados foram divididos em 3 (três) casos, realizado a análise dos impactos entre a corrente harmônica na 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19 e a tensão harmônica de mesma ordem na barra DIBR2-03. Os resultados foram obtidos via simulação computacional e as seções associadas aos resultados obtidos considerando dados reais medidos durante a campanha de medição.

A RNA apresentou um bom desempenho, pois houve uma boa aproximação entre o sinal estimado pela RNA considerando os três alimentadores e o sinal medido no sistema elétrico. A estimação individual de cada alimentador também apresentou um bom desempenho, pois houve uma boa aproximação entre os sinais estimados de cada alimentador e o sinal estimado pela RNA considerando os três alimentadores. Tal fato era esperado devido esses alimentadores estarem diretamente conectados neste barramento.

Com essas análises foi possível criar um perfil dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17, DIAL2-19 para então mitigar a distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-03 em estudo, causada pelos os impactos das correntes harmônicas destes alimentadores.

Dessa forma a metodologia apresentada e aplicada na prática com estudo de caso ações para análise de impactos harmônicos em sistemas de distribuição de energia elétrica através da construção de modelos matemáticos utilizando a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA), obtendo ótimos resultados nos estudos realizados, demonstrando assim a eficiência da aplicação da técnica em análise de impactos harmônicos em sistemas de distribuição de energia elétrica.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO

#### 5.1 - CONCLUSÕES

Diante do trabalho, aplicando a técnica de rede neural foram analisados os impactos da corrente harmônica em três alimentadores em um barramento do sistema elétrico, da concessionária de energia elétrica, através de campanha de medição em campo. Foram realizadas no período de 7 dias corrido, conforme a norma da PRODIST, do modulo 8, orienta para que seja feito. Extraído a base dos resultados, foi possível realizar a análise de correlação entre as correntes harmônicas injetadas nos alimentadores e a distorção de tensão na barra do sistema elétrico, de acordo com a metodologia proposta.

As distorções harmônicas estão cada vez mais presentes no cotidiano, e principalmente no sistema elétrico, ocasionando degradação na qualidade de fornecimento de energia aos consumidores finais. Diante do exposto, faz-se necessário a intensificação de estudos relacionados a área supramencionada, na identificação dos harmônicos e a redução de problemas decorrente da circulação destes harmônicos no sistema de energia elétrico.

A norma da PRODIST, modulo 8 e outras normas, preveem os valores limites para a distorção harmônica, porém, é de suma importância regulamentar os procedimentos com relação a atribuição de responsabilidade para os causadores dos níveis de distorção em um determinado barramento do sistema, com isso dando autonomia a concessionária de energia para que possa cobrar dos consumidores conectados em suas redes que são causadores dos impactos mencionados.

A área de estudo de rede neural pode ser aplicada em diversas áreas, pois são modelos matemáticos bastante validos, apresentando resultado pontuais quando o problema a ser estudado demonstra características complexas para serem modelados. Na metodologia no projeto proposto, foi utilizado a técnica a rede neural do tipo ML, apresentando bons resultados em problemas da aproximação de funções.

Diante do exposto no projeto onde foi apresentado e aplicado na pratica com o estudo de caso, as ações necessárias para que ocorresse as análises dos impactos harmônicos no sistema de distribuição de energia elétrica, através da construção de



modelo de rede neural, obtendo resultados no estudo realizado, mostrando de forma clara e sucinta a eficiência da aplicação da técnica em análise de impactos harmônicos na análise no sistema da distribuidora de energia elétrica.

## 5.2 - SUGESTÕES

Para trabalhos futuros sugere-se:

- A aplicação de outras técnicas estatísticas como em Arvore de Regressão;
- A aplicação de filtros ativos e passivos nos alimentadores analisados para tratamento do problema de distorções harmônicas de tensão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, F. **Utilização de Redes Neurais Artificiais para Detecção de Padrões de Vazamento em Dutos**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2010.

ALMEIDA, R. D. **Análise de impactos harmônicos em rede de distribuição de energia elétrica de média tensão utilizando técnicas de inteligência computacional**. Belém, Pará, Brasil. 2018.

ANDREI, H., CEPISCA, C., E GRIGORESCU, S. **Power Quality and Electrical Arc Furnaces**. Vol. Submitted: June 24th 2010 Reviewed: September 11th 2010. Published: April 11th 2011). Croatia: Andreas Eberhard. doi:10.5772/15996.

ANDREY Y.SHKLYARSKIY. **Developing of Electric Power Quality Indicators Evaluation and Monitoring Intellectual System**, 2018. doi:10.1109/EIConRus.2018.8317202.

CALDEIRA, B. F., COELHO, F. D., MACIEL, G. A., COELHO, A. L., E FARIA, I. P. Testing and Diagnostics of Distribution Transformers Losses in the Presence of Harmonics. **Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)**. 2018. doi:10.1109/SBSE.2018.8395793.

CHAMMAM, A., E MRABET, B. Experimental Quantification of Current Harmonics Injected by Compact Fluorescent Lamps Towards the Electrical Distribution Network. **IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals e Devices (SSD)**(Prince Sattam bin Abdulaziz University (PSAU)- College of Engineering). 2018. doi:https://doi.org/10.1109/SSD.2018.8570544.

CHANG, G., E C-I. CHEN, Y.-F. T. Radial-basis-function-based neural network for harmonic detection, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57. 2010. 2171–2179.  
DA SILVA, M. C. (25 DE MARÇO DE 2014). **Proposta de modelagem e simulação para análise de distorção harmônica**. Porto Alegre. Acesso em 2020.

DARTAWAN, K., E NAJAFABADI, A. M. **Case study; Applying IEEE Std. 519-2014 for harmonic distortion analysis of a 180 MW solar farm**. *IEEE*, 2017. 1-5. doi:10.1109/PESGM.2017.8273773.

DAS, J. C. **Power system analysis- Short-Circuit Load Flow and Harmonics 2nd.ed. crc press**. 2012.

DE AZEVEDO, G. T., ROMÃO, E. C., E MENEGATTI, C. R. Correção de distorções harmônicas em sistemas elétricos através de interferência destrutiva. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol.41, nº 03, e20180278, 2019. doi:http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0278.

DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., e BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality. **Second Edition Mc Graw-Hill**. 2004.

ELMOUDI, A., LEHTONEN, M., E NORDMAN, H. Effect of Harmonics on Transformers **Loss of life**. **Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**. 2006. doi:10.1109/ELINSL.2006.1665344.

FERNANDES, R. A. **Identificação de fontes de correntes harmônicas por redes neurais artificiais**. 2009.

FERNANDES, R. A., DA SILVA, I. N., E M. O. Identificação de cargas lineares e não-lineares em sistemas elétricos residenciais usando técnicas para seleção de atributos e redes neurais artificiais. **Revista controle e automação/** vol.21, 2010. doi:http://dx.doi.org/10.1590/S0103-17592010000400006 .

GALA, M. Application of Neural Method of Voltage Estimation to Evaluation of Influence of Nonlinear Loads on Electric Energy Quality. **10<sup>a</sup> International Conference Electrical Power Quality And Utilization**, 2009. doi:10.1109/EPQU.2009.5318808.

GRAUPE, D. Principles of Artificial Neural Networks. **2nd Edition. World Scientific**, 2007.

H.C. LIN. **Intelligent neural network-based fast power system harmonic detection**, IEEE Transactions on Industrial Electronics 54 (1), 2007, 43-52.

HAYKIN, S. **Redes Neurais princípios e prática.**, 2008.

IEEE. **Std C57-110-1 Recommended Practice for Establishing**, 1998.

IEEE. **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**, 2014.

JAIN, L. C., E N.M.MARTIN. **Fusion of neural networks, fuzzy systems, and genetic algorithms- Industrial Applications**. CRC Press, 1998.

JR., D. S., E SIMONETTI, D. S. Análise harmônica e inter-harmônica de um forno elétrico a arco. **IEEE/IAS International Conference on Industry Applications**, 2019. disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/224226659>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2020, 21:30min.

JÚNIOR, U. C., MANITO, A. R., ROCHA, G. V., MONTEIRO, F. P., CARVALHO, C. C., BEZERRA, U. H., E TOSTES, M. E. **Evaluation of harmonic contribution impacts in the electric grid through linear regression, artificial neural networks and regression tree**. **IEEE**, 2018. doi:10.1109/TDC-LA.2018.8511688.

KLAJN, H. M., E TECHNOLOGY, W. U. STANDARD EN 50160. **Voltage Characteristics in Public Distribution Systems**, 2004.

MAHAD, M. A., UQAILI, M. A., E LARIK, A. A. Harmonic Analysis of AC-DC Topologies and their Impacts on Power Systems. **MEHRAN UNIVERSITY RESEARCH JOURNAL OF ENGINEERING e TECHNOLOGY**, v. 30, n. 1, p. 173-178, 2011., 1-6. Acesso em 06 de 02 de 2020.

MANITO, A. R. **Estimação das parcelas de contribuição de cargas não lineares na distorção harmônica de tensão de um barramento de interesse do sistema elétrico de potência utilizando rede neural artificial**. 2019.

MAZUMDAR, J., e HARLEY, R. G. Recurrent Neural Networks Trained With Backpropagation Through Time Algorithm to Estimate Nonlinear Load Harmonic Currents". **IEEE Transaction on Industrial Electronics**. Vol 55, NO. 9, 2008. doi:10.1109/TIE.2008.925315.

MAZUMDAR, J., R.G, H., E F, L. **Identifying Harmonic Contributions from Non-Linear Loads Using Neural Networks**. 2005. doi:10.1109/ISAP.2005.1599250.

MONTEIRO, H. L., OLIVEIRA, M. M., ALEIXO, R. R., E DUQUE, C. A. **A Real Time Implementation of an Harmonic Impedance Estimator**. **IEEE**, 2016, 1-5. doi:10.1109/ICHQP.2016.7783440.

NASCIMENTO, C. F., JR., A. A., GOEDTEL, A., E DIETRICH, A. B. **Harmonic distortion monitoring for nonlinear loads using neural-network-method**. **Applied Soft Computing** **13**, 2013, 475–482. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2012.08.043>.

NIKOLAEV A.A., T. P.. The comparative analysis of electrode controle systems of electric arc furnaces and ladle furnaces. **International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)**, 2016, p. 1-7. doi:10.1109/ICIEAM.2016.7910888.

NIKOLAEV, A. A., TULUPOV, P. G., E SAVINOV, D. A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs. **International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)**, 2017, p. 1-6. doi:10.1109/ICIEAM.2017.8076205.

NIKOLAEV, A. A., TUPUPOV, P. G., E ANTROPOVA, L. **Heating stage diagnostics of the electric arc furnace based on the data about harmonic composition of the arc voltage.** (N. M. Automated Electrical drive and Mechatronisc Dept., Ed.) IEEE, 03, 2018. doi:10.1109/EIConRus.2018.8317198.

NOGUEIRA, R. D. **Análise dos impactos harmônicos em uma indústria de manufatura de eletroeletrônicos utilizando árvores de decisão.** Dissertação de mestrado apresentada à coordenação do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica ( PPGEE) do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará. Belém , Pará, Brasil, 2015.

NOSHAHR, J. B., BAGHERI, M., E KERMANI, M. **The Estimation of the Influence of Each Harmonic Component in Load Unbalance of Distribution Transformers in Harmonic Loading Condition.** IEEE, 1, 2019. doi:10.1109/EEEIC.2019.8783488.

OGUNJUYIGBE, A. S., AYODELE, T. R., E IDIKA, V. Effect of Lamp Technologies on the Power Quality of Electrical Distribution Network. 2017 **IEEE PES-IAS PowerAfrica**, 2017, p. 1-5. doi:10.1109/PowerAfrica.2017.7991216.

PERALES, T. **Utilização de Redes Neurais Artificiais no Diagnóstico de Cardiopatias.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina. 20.

PEREIRA, A. **Utilização de Redes Neurais Artificiais no Ajuste de Controladores Suplementares e Dispositivo Facts STATCOM para a Melhoria da Estabilidade a Pequena Perturbações do Sistema Elétrico de Potência.** 2009. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia - UNESP.

PHANNIL, N., JETTANASEN, C., E NGAOPITAKKUL, A. **Power Quality Analysis of Grid Connected Solar.** IEEE, 2, 2019. doi:10.1109/IFEEC.2017.7992269.

PROCOBRE, S. Qualidade de energia- Harmonicas - **Workshop Instalações. Elétricas de baixa tensão**, 2009.

PRODIST-ANEEL, A. N. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST- MODULO 8**. 2018. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, REVISÃO 10- ( após realização da AP 34/2017). ANEEL. Acesso em 2020.

RAHIMI, K., MOHAJERYAMI, S., E MAJZOABI, A. **Effects of Photovoltaic Systems on Power Quality**. *iee*, 2016, p. 1-6. doi:10.1109/NAPS.2016.7747955.

SHUNFU LIN, N. H., E ZHU, M. **The study of the power quality emission characteristics of different types of lamps and their impacts on distribution systems**. *IEEE*, 2016, p. 1-6. doi:<https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603657>.

SILVA, I. N., SPATTI, D. H., E FLAUZINO, R. A. **Rede Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas**. Sao Paulo: Artliber Ltda, 2010. doi:ISBN978-85-88098-53-4.

SOUZA, F. P. **Correção do fator de potência para instalações de baixa potência empregando filtros ativos**. 2000. Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Elétrica. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

T.J HAMMONS. **Energy Issues under Deregulated Environment, Electricity Infrastructures in the Global Marketplace**, 2011. doi:10.5772/37863.

TAVARES, V. S. **Amostragem da Qualidade de Energia Elétrica. Estudo da qualidade de energia na cidade da Praiae na ilha de Boavista**. Praia, Santiago, 2015.

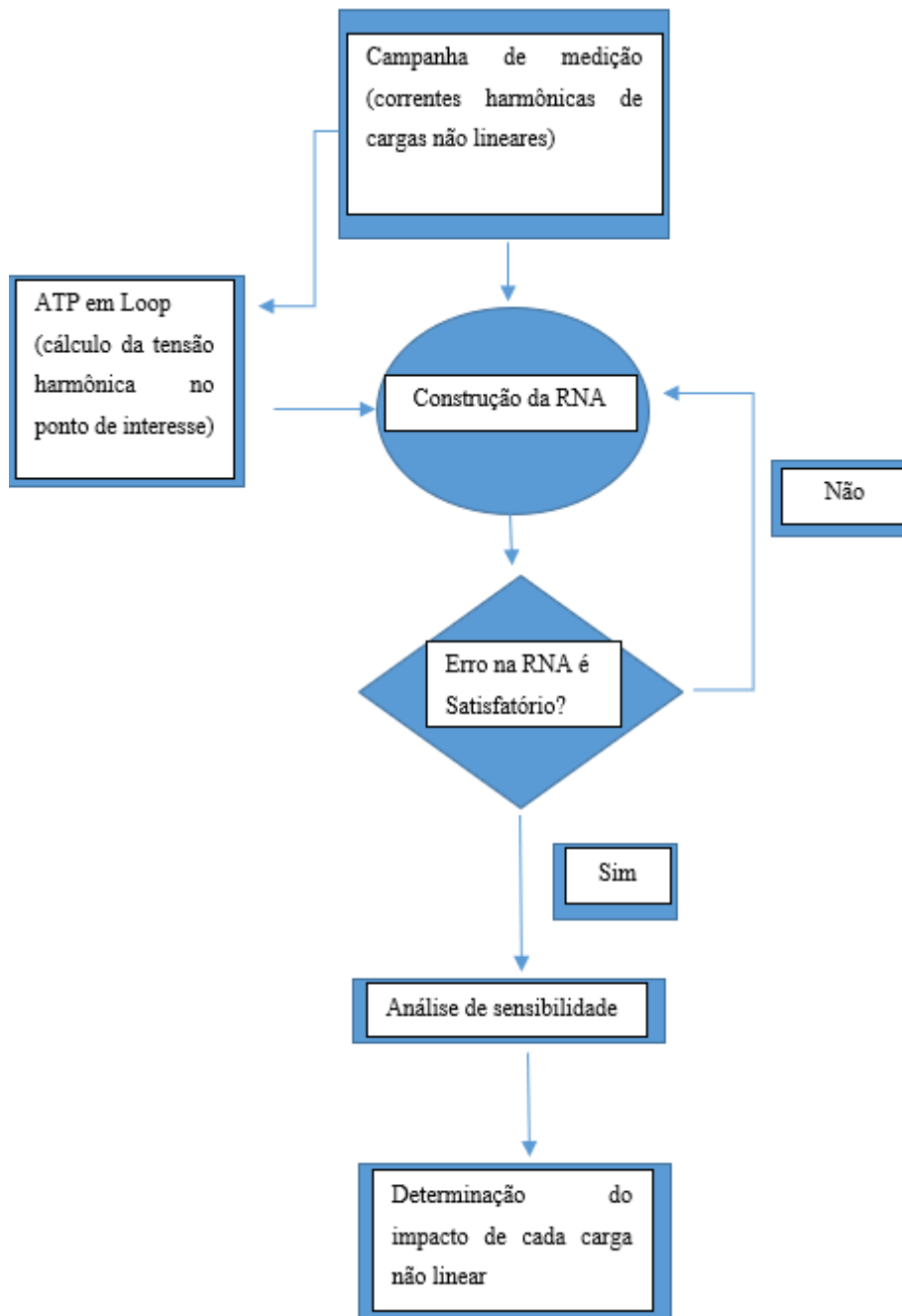
TEIXEIRA, G. D., CLARO, E. R., E RENATO, C. M. Correção de distorções harmônicas em sistemas elétricos através de interferência destrutiva. **Revista Brasileira de Ensino Fisica**, vol 41, nº03, e20180278, 2019. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0278> .

TEMURTAS, F., GUNTURKUN, R., E N. YUMUSAKA, H. T. **Harmonic detection using feed forward and recurrent neural networks for active filters**. *Electric Power Systems Research* **72**, 2004, p. 33–40. doi:10.1016/j.epsr. 2004.02.005.

WST, C., E APJ, R. Investigating the validity of applying artificial neural networks to localise harmonic distortion sources. **IEEE AFRICON**, 2004. doi:10.1109/AFRICON.2004.1406757.

## APÊNDICE A

### FLUXOGRAMA VALIDAÇÃO DO PROJETO PROPOSTO





# ANEXO I

## DIAGRAMA UNIFILAR DA SUBESTAÇÃO DISTRITO INDUSTRIAL DA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA

