

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**COMPARAÇÃO ENTRE REGRESSÃO LINEAR, REDES NEURAS ARTIFICIAIS E  
ÁRVORES DE REGRESSÃO PARA QUANTIFICAÇÃO DO IMPACTO  
HARMÔNICO DE MÚLTIPLAS CARGAS EM REDES ELÉTRICAS DE  
DISTRIBUIÇÃO.**

**ULISSES CARVALHO PAIXÃO JÚNIOR**

**DM 38/2018**

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ULISSES CARVALHO PAIXÃO JÚNIOR**

**COMPARAÇÃO ENTRE REGRESSÃO LINEAR, REDES NEURAS ARTIFICIAIS E  
ÁRVORES DE REGRESSÃO PARA QUANTIFICAÇÃO DO IMPACTO  
HARMÔNICO DE MÚLTIPLAS CARGAS EM REDES ELÉTRICAS DE  
DISTRIBUIÇÃO.**

**DM 38/2018**

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ULISSES CARVALHO PAIXÃO JÚNIOR**

**COMPARAÇÃO ENTRE REGRESSÃO LINEAR, REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS E  
ÁRVORES DE REGRESSÃO PARA QUANTIFICAÇÃO DO IMPACTO  
HARMÔNICO DE MÚLTIPLAS CARGAS EM REDES ELÉTRICAS DE  
DISTRIBUIÇÃO.**

Dissertação submetida à Banca  
Examinadora do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica  
da UFPA para obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica na  
área de Sistemas de Energia Elétrica

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**COMPARAÇÃO ENTRE REGRESSÃO LINEAR, REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E  
ÁRVORES DE REGRESSÃO PARA QUANTIFICAÇÃO DO IMPACTO  
HARMÔNICO DE MÚLTIPLAS CARGAS EM REDES ELÉTRICAS DE  
DISTRIBUIÇÃO.**

**AUTOR: ULISSES CARVALHO PAIXÃO JÚNIOR**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Emília de Lima Tostes**  
(ORIENTADORA – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra**  
(MEMBRO INTERNO – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira**  
(MEMBRO INTERNO – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. Edson Ortiz de Matos**  
(MEMBRO EXTERNO - UFPA)

---

**Prof. Dr. Anderson Alvarenga de Moura Meneses**  
(MEMBRO EXTERNO - UFOPA)

**VISTO:**

---

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Emília de Lima Tostes**  
(COORDENADOR DO PPGEE/ITEC/UFPA)

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

---

P149c Paixão Júnior, Ulisses Carvalho

Comparação entre regressão linear, redes neurais artificiais e árvores de regressão para quantificação do impacto harmônico de múltiplas cargas em redes elétricas de distribuição / Ulisses Carvalho Paixão Júnior.-2018.

Orientadora: Maria Emília de Lima Tostes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2018.

1. Sistemas de energia elétrica – controle de qualidade. 2. Harmônicos (ondas elétricas). 3. Redes neurais (computação).4. Análise de regressão. I. Título.

CDD 23. ed. 621.3191

“Deixo a quem Queria,  
a quem Possa, a quem  
Goste, a tarefa de  
Construir um mundo  
novo.”

Mario Faustino.

## **DEDICATÓRIA**

“À minha família e àqueles que acreditaram em mim.”

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus e a Nossa Senhora de Nazaré que me acompanham desde sempre, me guiando, orientando e me fortalecendo nos momentos de dificuldade.

Aos meus Pais (Ulisses e Alaide) que me deram educação e me ensinaram a lutar por meus objetivos e sonhos.

Aos meus Irmãos (William e Danieli) que sempre me apoiaram em minhas decisões e me aconselharam nos momentos mais difíceis.

Aos meus Sobrinhos (Maria Clara, Enzo, João e Lucca) que sempre me fizeram sorrir e lutar pelo amanhã.

À minha Esposa (Camila) que sempre esteve ao meu lado e teve paciência durante este caminho que resolvi percorrer.

À minha Família em geral que, mesmo de tão longe, reza, torce e vibra com cada conquista que tenho.

À minha Orientadora e Professora, Maria Emília Tostes, que acreditou em mim em momentos tão difíceis e por muitas vezes foi também Amiga e Mãe possibilitando a conclusão deste trabalho.

Ao Amigo Allan Manito que sempre esteve por perto disposto a me ajudar na conclusão deste trabalho. E a Carolina Dias, que fez me sentir em casa desde que a conheci em Belém e, assim como eu, acredita na força do trabalho em equipe para vencer barreiras.

Aos Professores do CEAMAZON e do GEDAE, pelos ensinamentos repassados durante o mestrado, em especial, aos Professores Ubiratan Bezerra e Marcos Galhardo, respectivamente.

Aos Amigos/Irmãos do Brasil e do Mundo que acreditam em mim e que, mesmo longe, tem contribuído para a minha felicidade e sucesso

Aos amigos do CEAMAZON e do GEDAE, pelas trocas de informações, ideias, parcerias, pizzas, churrascos e surpresa!

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. UMA ABORDAGEM GERAL .....	1
1.2. MOTIVAÇÃO .....	2
1.3. OBJETIVOS .....	4
1.3.1. Objetivo geral .....	4
1.3.2. Objetivos específicos .....	4
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	6
<b>2. QUALIDADE DA ENERGIA ELETRICA</b> .....	6
2.1. INTRODUÇÃO .....	6
2.2. CONCEITUAÇÃO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA .....	7
2.3. HARMÔNICOS .....	10
2.3.1. Cargas não lineares .....	12
2.3.2. Distorção harmônica individual e total .....	15
2.3.3. Efeitos dos harmônicos nos principais componentes da rede elétrica .....	17
2.4. NORMAS E LIMITES ASSOCIADOS À DISTORÇÃO HARMÔNICA .....	20
2.4.1. Normas internacionais (IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4, IEC 61000-4-7 E IEEE-519) .....	20
2.4.2. Normas nacionais – módulo 8 dos procedimentos de distribuição (PRODIST) .....	22
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	23
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	24
<b>3. TRABALHOS CORRELATOS A QEE</b> .....	24
3.1. INTRODUÇÃO .....	24
3.2. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....	24
3.3. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E REGRESSÃO LINEAR .....	27

3.4.	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E REDES NEURAS ARTIFICIAIS ...	28
3.5.	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E ÁRVORES DE REGRESSÃO .....	30
3.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	31
<b>CAPÍTULO 4</b> .....		<b>33</b>
<b>4. METODOLOGIAS APLICADAS</b> .....		<b>33</b>
4.1.	INTRODUÇÃO .....	33
4.2.	CONCEITO DAS TÉCNICAS COMPUTACIONAIS .....	34
4.2.1.	Regressão Linear .....	36
4.2.2.	Redes Neurais Artificiais .....	42
4.2.3.	Árvores de Regressão .....	48
4.3.	METODOLOGIA PROPOSTA PARA OS ESTUDOS DE CASO .....	52
4.3.1.	Estudo de caso 1: Universidade Federal do Pará – Campus Guamá .....	54
4.3.2.	Estudo de caso 2: parque industrial de Manaus .....	63
4.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	68
<b>CAPÍTULO 5</b> .....		<b>69</b>
<b>5. RESULTADOS</b> .....		<b>69</b>
5.1.	ESTUDO DE CASO 1: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – CAMPUS GUAMÁ .....	69
5.1.1.	Análise de QEE .....	69
5.1.2.	Regressão Linear .....	72
5.1.3.	Redes neurais artificiais .....	77
5.1.4.	Árvores de regressão .....	82
5.1.5.	Comparação do desempenho entre as técnicas .....	86
5.1.6.	Considerações finais .....	90
5.2.	ESTUDO DE CASO 2: PARQUE INDUSTRIAL DE MANAUS .....	91
5.2.1.	Análise de QEE .....	91
5.2.2.	Regressão linear .....	96

5.2.3.	Redes neurais artificiais .....	100
5.2.4.	Árvores de regressão .....	104
5.2.5.	Comparação do desempenho entre as técnicas .....	107
5.2.6.	Considerações finais.....	111
<b>CAPÍTULO 6</b>	.....	<b>113</b>
<b>6. CONCLUSÃO</b>	.....	<b>113</b>
6.1.	CONCLUSÕES GERAIS.....	113
6.2.	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	115
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	.....	<b>116</b>
<b>ANEXOS</b>	.....	<b>125</b>
<b>ANEXO A – Programa SISQEE</b>	.....	<b>125</b>
<b>ANEXO B – Código do programa em R</b>	.....	<b>130</b>
<b>ANEXO C – Código do programa no Matlab para identificar o EAM</b>	.....	<b>131</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1 – Características de uma carga linear. ....	13
Figura 2-2 – Características de uma carga não linear.....	13
Figura 4-1 - Ajuste de uma reta por meio do princípio dos mínimos quadrados. ....	38
Figura 4-2 - Modelo de regressão linear simples. ....	38
Figura 4-3 – Partes do Neurônio Biológico.....	43
Figura 4-4 – Modelo de um neurônio artificial. ....	44
Figura 4-5 – Modelo não linear de um neurônio. ....	44
Figura 4-6 - Exemplo de arquitetura de um <i>Perceptron</i> de múltiplas camadas com duas camadas ocultas. ....	47
Figura 4-7 – Modelo de árvores de regressão para diagnóstico de pacientes.....	50
Figura 4-8 – Representação de distorções harmônicas em corrente e tensão considerando o PAC. ....	53
Figura 4-9 – Campanha de medição de corrente (a) e tensão (b) realizadas no PAC do sistema elétrico estudado. ....	53
Figura 4-10 – Imagens ilustrativas do analisador de QEE HIOKI PW3198. ....	54
Figura 4-11 – Diagrama Unifilar da UFPA. ....	56
Figura 4-12 – Rede Alta Tensão – Básico 1 e 2. ....	57
Figura 4-13 – Rede Alta Tensão Profissional.....	58
Figura 4-14 – Rede Alta Tensão Saúde. ....	59
Figura 4-15 – Configuração do sistema elétrico da UFPA.....	60
Figura 4-16 – Tensão real e modelo estimado em regressão linear múltipla das fases A, B e C, respectivamente, para o período de uma semana. ....	62
Figura 4-17 – RNA com diferentes quantidades de camadas escondidas. ....	63
Figura 4-18 – Diagrama Unifilar da Subestação Distrito Industrial.....	64
Figura 4-19 – Configuração de parte do sistema elétrico da SE DI. ....	65
Figura 4-20 – Tensão real e modelo estimado em regressão linear múltipla das fases A, B e C para o período de uma semana. ....	67
Figura 4-21 – RNA com diferentes quantidades de camadas escondidas. ....	67
Figura 5-1 – Tensão RMS medida no disjuntor de entrada da UFPA.....	69
Figura 5-2 – Taxa de DHT <sub>v</sub> medida na entrada da UFPA. ....	70
Figura 5-3 – Corrente RMS medida no alimentador do Básico 1. ....	70

Figura 5-4 – Valores mínimos, máximos e médios de corrente medidos nos alimentadores...	71
Figura 5-5 – Taxa de DHTI medida no alimentador do Básico 1. ....	71
Figura 5-6 – Valores máximos, mínimos, médios e percentis de $DHT_1$ medido nos alimentadores.....	72
Figura 5-7 – Modelos de RL do 5º harmônico para as três fases (a), (b) e (c) do alimentador Saúde em relação ao disjuntor de entrada. ....	74
Figura 5-8 – Fator de impacto pontual do 5º harmônico para as três fases (a), (b) e (c) do alimentador Saúde em relação ao barramento de entrada. ....	76
Figura 5-9 – Topologia das RNAs do estudo de caso. ....	78
Figura 5-10 – Tensão de saída da RNA de 5º harmônico em cada alimentador para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. ....	80
Figura 5-11 – Tensão real de saída e o modelo estimado da RNA de 5º harmônico para as fases A, B e C no barramento de 13,8 kV. ....	81
Figura 5-12 – Impactos de 5º harmônico do modelo de RNA para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. ....	82
Figura 5-13 – Exemplo de modelo de AR.....	83
Figura 5-14 – Tensão de saída da AR de 5º harmônico em cada alimentador para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. ....	84
Figura 5-15 – Tensão real de saída e o modelo estimado da RNA de 5º harmônico para as fases A, B e C no barramento de 13,8 kV. ....	85
Figura 5-16 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período semanal.....	87
Figura 5-17 – Quantidade de dias de impacto harmônico em cada alimentador para a análise diária. ....	87
Figura 5-18 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período diário.....	88
Figura 5-19 – Patamares de carga da universidade. ....	88
Figura 5-20 – Quantidade de dias de impacto harmônico em cada alimentador para a análise em patamar de carga. ....	89
Figura 5-21 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período em patamar de carga. ....	89
Figura 5-22 – Tendência dos valores médios de EAM (%) na fase A em diferentes períodos. ....	91
Figura 5-23 – Tensão RMS medida no lado de baixa tensão do transformador DITF4-04 da SE DI. ....	92

Figura 5-24 – Taxa de distorção harmônica total de tensão medida do transformador DITF4-04 da SE DI. ....	92
Figura 5-25 – Corrente RMS medida no alimentador DIAL2-16 da SE DI.....	93
Figura 5-26 – Corrente RMS medida no alimentador DIAL2-17 da SE DI.....	93
Figura 5-27 – Corrente RMS medida no alimentador DIAL2-20 da SE DI.....	93
Figura 5-28 – Valores mínimos, máximos e médios de corrente medidos nos alimentadores.	94
Figura 5-29 – Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no transformador DIAL2-16 da SE DI.....	94
Figura 5-30 – Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no transformador DIAL2-17 da SE DI.....	95
Figura 5-31 – Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no transformador DIAL2-20 da SE DI.....	95
Figura 5-32 – Valores máximos, mínimos, médios e percentis de DHTI medido nos alimentadores.....	95
Figura 5-33 – Modelo de RL do 5º harmônico para as fases A, B e C, respectivamente (a), (b) e (c), do alimentador DIAL2-16 em relação ao transformador DITF4-04.....	97
Figura 5-34 – Fator de impacto pontual do 5º harmônico para as fases A, B e C, respectivamente (a), (b) e (c), do alimentador DIAL2-16 em relação ao transformador DITF4-04. ....	99
Figura 5-35 – Topologia das RNAs do estudo de caso. ....	100
Figura 5-36 – Tensão de saída da RNA de 5º harmônico em cada alimentador para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. ....	102
Figura 5-37 – Tensão real de saída e o modelo estimado da RNA de 5º harmônico para a fase A, B e C no barramento de 13,8 kV. ....	103
Figura 5-38 – Impactos de 5º harmônico do modelo de RNA para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. ....	104
Figura 5-39 – Tensão de saída da AR de 5º harmônico em cada alimentador para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. ....	106
Figura 5-40 – Tensão real de saída e o modelo estimado da RNA de 5º harmônico para a fase C no barramento de 13,8 kV.....	107
Figura 5-41 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período semanal.....	108
Figura 5-42 – Quantidade de dias de impacto harmônico em cada alimentador para a análise diária. ....	108
Figura 5-43 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período diário.....	109

Figura 5-44 – Patamares de carga da universidade. ....	109
Figura 5-45 – Quantidade de dias de impacto harmônico em cada alimentador para a análise em patamar de carga. ....	110
Figura 5-46 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período em patamar de carga. ....	110
Figura 5-47 – Tendência dos valores médios de EAM (%) na fase A em diferentes períodos. ....	112
Figura A-1 – Tela Principal do Módulo de RL. ....	125
Figura A-2 – Algoritmo utilizado na RL simples. ....	126
Figura A-3 – Tela Principal do Módulo de RNA. ....	126
Figura A-4 – Tela de Configuração de Parâmetros de RNA. ....	127
Figura A-5 – Tela principal do módulo de AR. ....	128
Figura A-6 – Tela de configuração de parâmetros de AR. ....	128
Figura A-7 - Algoritmo utilizado na RNA e na AR. ....	129

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Limites das distorções harmônicas totais em % da tensão fundamental.....	16
Tabela 2-2 – Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição (120 V a 69 kV). .....	21
Tabela 2-3 – Limites de distorção da corrente para sistemas de subtransmissão (69.001 V a 161 kV).....	21
Tabela 2-4 – Limites de distorção de tensão. ....	22
Tabela 2-5 – Valores de Referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).....	22
Tabela 4-1 - Caracterização do grau de correlação nos modelos de regressão de acordo com os valores de com $R^2$ .....	40
Tabela 4-2 – Exemplo de relações causa-efeito da AR que levam ao menor valor de distorção harmônica de tensão. ....	50
Tabela 4-3 – Vantagens e desvantagens da AR.....	51
Tabela 4-4 – Dados dos alimentadores da UFPA.....	55
Tabela 5-1 – Fatores de impacto do 5° harmônico calculados para cada alimentador e seus respectivos background utilizando regressão linear. ....	77
Tabela 5-2 – Fatores de impacto percentual do 5° harmônico calculados para cada alimentador utilizando RNA.....	78
Tabela 5-3 – Fatores de impacto percentual do 5° harmônico calculados para cada alimentador utilizando AR. ....	83
Tabela 5-4 – Comparação entre as técnicas.....	86
Tabela 5-5 – EAM (%) de cada alimentador no período em patamar de carga. ....	90
Tabela 5-6 – Fatores de impacto percentual do 5° harmônico calculados para cada alimentador e seus respectivos background utilizando regressão linear. ....	100
Tabela 5-7 – Fatores de impacto percentual do 5° harmônico calculados para cada alimentador utilizando RNA.....	101
Tabela 5-8 – Fatores de impacto percentual do 5° harmônico calculados para cada alimentador utilizando AR. ....	105
Tabela 5-9 – EAM (%) de cada alimentador no período em patamar de carga. ....	111

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AR – Árvores de Regressão
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- CA – Corrente Alternada
- CC – Corrente Contínua
- DDT – Distorção de Demanda Total
- DHI<sub>I</sub> – Distorção Harmônica Individual de Corrente
- DHI<sub>V</sub> – Distorção Harmônica Individual de Tensão
- DHT – Distorção Harmônica Total
- EAM - Erro Absoluto Médio
- EAM<sub>ref</sub> – Erro Absoluto Médio de Referência
- IC – Inteligência Computacional
- IEC – *International Electrotechnical Commission*
- IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*
- IF – Fator de Impacto
- IF<sub>VBG</sub> – Fator de Impacto de Background
- IF<sub>VT</sub> – Fator de Impacto de Tensão
- MLP – *Multiplayer Perceptron (Perceptron de múltiplas camadas)*
- NBR – Norma Brasileira
- PAC – Ponto de Acoplamento Comum
- PRODIST – Procedimentos de Distribuição
- QEE – Qualidade da Energia Elétrica
- RL – Regressão Linear
- RLM – Regressão Linear Múltipla
- RNA – Redes Neurais Artificiais
- SEP – Sistema Elétrico de Potência
- SQE – Soma de Quadrados de Erro
- SQReg – Soma de Quadrados de Regressão
- SQT – Soma de Quadrados Total
- TR – Tensão de Referência
- UFPA – Universidade Federal do Pará
- UPS – *Uninterruptible power supply*
- V<sub>BG</sub> – Tensão de background

## RESUMO

Nos últimos anos, o desenvolvimento socioeconômico da população, o crescimento dos setores comercial e industrial, assim como a instalação cada vez mais crescente de novas cargas, têm gerado grande evolução na demanda do consumo de energia elétrica. Por sua vez, buscando obter sistemas mais eficientes, os fabricantes têm produzido equipamentos energeticamente mais eficientes para utilização residencial, comercial e industrial. No entanto, essas cargas, devido à sua não linearidade, têm contribuído significativamente para o aumento dos níveis de distorção harmônica de tensão e corrente, elevando a preocupação dos gestores do setor elétrico quanto a qualidade de energia elétrica (QEE), principalmente, pela dificuldade na identificação da origem da distorção harmônica. Logo, visando antecipar os efeitos harmônicos e atender a regulamentação vigente, por meio de técnicas computacionais, no presente trabalho dá-se ênfase no ponto de acoplamento comum (PAC), independente das características de consumo e cargas, com o intuito de avaliar os impactos harmônicos em sua rede, além de comparar o nível de confiabilidade das técnicas por meio do erro absoluto médio (EAM). A metodologia proposta utiliza o software de Sistema de Qualidade de Energia Elétrica (SISQEE) que possibilita a utilização de três técnicas computacionais distintas, sendo Regressão Linear, Redes Neurais Artificiais e Árvores de Regressão, para avaliar a contribuição harmônica de cada alimentador no ponto de interesse das redes elétricas escolhidas. Para comprovar a validade da metodologia, são elaborados dois estudos de caso baseadas em medições reais em uma universidade e em um polo industrial. As medições foram realizadas com o período mínimo amostral de sete dias através de analisadores de QEE, conforme procedimentos de distribuição da ANEEL (PRODIST). Como resultado da QEE, verificou-se o quanto cada alimentador impacta a distorção de tensão e corrente no PAC, além de classificar os alimentadores com relação a seu respectivo impacto na rede elétrica estudada. Também como resultado, os estudos propiciaram a avaliação de desempenho entre as diferentes técnicas, com diferentes intervalos de tempo (semanal, diário e por patamar de carga), permitindo classificar o comportamento e a confiabilidade de cada técnica em cada período. Como conclusão do trabalho, os métodos propostos e as análises apresentadas dão subsídios aos gestores para efetuar uma ação mitigadora mais eficiente dos impactos harmônicos causados na rede elétrica e, também, identificar as diferenças entre as técnicas e seu grau de confiabilidade, de acordo com os intervalos temporais estudados.

**PALAVRAS-CHAVES:** Redes Neurais Artificiais, Árvores de Regressão, Regressão Linear; Qualidade de energia elétrica; Distorções harmônicas de tensão e de corrente.

## **ABSTRACT**

In recent years, the socio-economic development of the population, the growth of commercial and industrial sectors, as well as the ever-increasing installation of new electrical loads, have generated great evolution in demand of electricity consumption. In turn, to obtain more efficient systems, the manufacturers have produced equipment more energy efficient for residential, commercial and industrial use. However, these loads due their non-linearities, have contributed significantly to the increase in harmonic distortion levels of voltage and current, raising the concern of the power sector managers with respect to the power quality, mainly, due to the difficulty in the identification of the origin of the harmonic distortion. Therefore, to anticipate the harmonic effects and meet the current legislation, through computational techniques, this work emphasis is placed on the common coupling point (CCP) of consumers and utility, regardless of consumption characteristics and loads, to assess the harmonic impacts in his grid, besides comparing the reliability level of the techniques through the mean absolute error (MAE). The proposed methodology uses the Electrical Power Quality System (SISQEE) software that allows the use of three different computational techniques, such as Linear Regression, Artificial Neural Networks and Regression Trees, to evaluate the harmonic contribution of each feeder at the point of interest of the chosen electric grid. To prove the validity of the methodology, two case studies, based on real measurements at a university and at an industrial district, was carried out with a minimum sampling period of seven days using power quality analyzers, according to the distribution procedures by ANEEL (PRODIST). As a result of the power quality, it was verified how much each feeder impacts the voltage and current distortion at the CCP, besides classifying the feeders in relation to their respective impacts in the studied electrical grid. Also, as a result, the studies allowed the evaluation of performance between the different techniques, with different time intervals (weekly, daily and per load level), allowing to classify the behavior and reliability of each technique in each period. As a conclusion of the work, the proposed methods and analyzes presented allow managers to perform a more efficient mitigation action of the harmonic impacts caused in the electrical network and, also, to identify the differences between the techniques and their degree of reliability, in accordance with the time intervals studied.

**KEYWORDS:** Artificial Neural Networks, Regression Tree, Linear Regression; Electric power quality; Harmonic distortion of voltage and current.

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1. UMA ABORDAGEM GERAL

A energia elétrica é o componente fundamental de desenvolvimento das sociedades mundiais, pois esta é parte indispensável em nossas vidas, seja nas atividades domésticas, comerciais ou industriais, em que ela ilumina, aquece, movimenta, aciona computadores e possibilita inúmeras outras aplicações, além de ser determinante na concorrência e competitividade da economia.

A disponibilidade de energia elétrica é um serviço de utilidade pública, a qual a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável por criar regras para a produção, transmissão, comercialização e distribuição de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal, sendo assim, o sistema elétrico de potência (SEP) deve operar de forma a atender com segurança e qualidade as cargas nele conectadas.

Do ponto de vista regulatório, o suprimento de energia elétrica aos consumidores é caracterizado como um produto associado a serviços que devem possuir desempenho operacional eficiente e de alta qualidade, pois tem impactos diretos e significativos na relação das distribuidoras com seus consumidores, tanto na operação das cargas quanto na satisfação do cliente final.

O crescimento constante da população, a evolução tecnológica, o barateamento de equipamentos eletroeletrônico e, conseqüentemente, o aumento da demanda e perdas no sistema elétrico, tem tornado cada vez mais notória a necessidade de análise da qualidade da energia elétrica (QEE), haja vista que esta é uma questão de grande interesse tanto para as companhias responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, quanto para os fabricantes de equipamentos e os consumidores finais, pois, dentre outros, a melhoria do sistema envolve aspectos que podem melhorar a competitividade do sistema e a eficiência econômica dos envolvidos.

Os termos eficiência energética e produtividade trazem consigo a aquisição de equipamentos mais modernos e eficientes que propiciem à redução das perdas. Porém, se não

forem estudadas e implementadas de forma conveniente, apesar de serem atrativas, muitas das medidas de conservação podem resultar em vários problemas relacionados à qualidade de energia elétrica, tendo em vista que vários dos equipamentos que possuem dispositivos com eletrônica de potência podem constituir as próprias fontes de problemas que deterioram a QEE, comprometendo o funcionamento de sistemas ou cargas mais sensíveis às falhas e distúrbios no sistema elétrico.

A eletrônica de potência exerce uma considerável influência na geração de fontes contaminantes ou produtoras de harmônicos nos sistemas elétricos, destacando-se as cargas não lineares empregadas nas instalações industriais, residenciais e comerciais (Nogueira, 2015). A conexão de cargas com características não-lineares na rede elétrica, proporciona a circulação de correntes com conteúdo harmônico, provocando a distorção da onda senoidal de tensão em diversos pontos da rede e podendo ocasionar aquecimento adicional em máquinas elétricas, transformadores, condutores e conectores; interferência em sistemas de comunicação; falhas em bancos de capacitores; redução da vida útil de equipamentos; imprecisão e instabilidade na operação de sistemas de controle, proteção e medição; sendo assim, a consequência destas distorções harmônicas afeta as cargas conectadas ao ponto de acoplamento comum (PAC) de um sistema elétrico de potência (Galhardo, 2006).

As medições dos conteúdos harmônicos vêm sendo usadas para caracterizar o comportamento de cargas não lineares, para localizar possíveis fontes harmônicas e quantificar os níveis de distorções harmônicas em sistemas de energia. Logo, com os novos conceitos de distribuição de energia elétrica, há uma preocupação com indicadores de qualidade de energia e, em especial, a distorção harmônica total (DHT).

## **1.2. MOTIVAÇÃO**

No Brasil, a ANEEL desenvolveu os Procedimentos de Distribuição de Energia (PRODIST), em que a revisão 10 do PRODIST entrou em vigência em primeiro de janeiro de 2010. Dentre os principais objetivos do PRODIST tem-se o dever de garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade. Especificamente, o módulo 8 do PRODIST regula a qualidade da energia em redes de distribuição, contudo, quando comparada a normas e procedimentos internacionais, sabe-se que existem temas nas normas estrangeiras que não são abordados no PRODIST, mas que

afetam o sistema elétrico (PRODIST – Módulo 8, 2018).

A ocorrência dos problemas citados na seção anterior, em conjunto com a necessidade por parte das companhias elétricas, fabricantes de equipamentos e consumidores de buscar soluções para a realização de medidas práticas e econômicas, apresentam-se como justificativa para incentivar estudos que levem à criação de metodologias e ao desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliem na eliminação ou atenuação de problemas relacionados a harmônicos.

Atualmente existem muitos estudos relacionados aos harmônicos no SEP e, dentre estes, tem-se a estimação da contribuição de fontes harmônicas na distorção de tensão no PAC do sistema elétrico. Entretanto, a análise da rede elétrica torna-se uma tarefa difícil, devido a interação de múltiplas cargas ao longo da rede que podem se anular ou se somar dependendo do perfil harmônico de cada carga ao longo do dia.

De acordo com as normas e procedimentos da ANEEL, as concessionárias são responsáveis por garantir que a alimentação dos consumidores finais (residenciais, comerciais e industriais) esteja livre de distorções ou dentro dos limites aceitáveis, embora, os mesmos consumidores tem sido os grandes responsáveis pelas distorções harmônicas, visto que estes proporcionam o aumento de demanda e a quantidade de cargas não lineares empregadas na rede elétrica. Desta forma, a análise no PAC é capaz de delimitar as responsabilidades entre os consumidores finais e concessionárias quanto aos harmônicos, sejam estes de tensão ou de corrente.

Ao analisar o um ponto de interesse do barramento, o presente trabalho possui relacionamento direto com a qualidade de energia elétrica, pois pode contribuir como ferramenta auxiliar para estimar como as múltiplas unidades consumidoras (industrial, comercial, etc.) estão contribuindo para a distorção harmônica de tensão em um ponto de interesse da rede elétrica e, com isto, orientar aos gestores como implementar tratamentos diferenciados para estes consumidores, com vistas a adoção de medidas remediais que mitiguem as violações de níveis de tensão harmônica verificadas na rede elétrica. Com essa finalidade o presente trabalho leva em consideração a utilização de três técnicas computacionais que auxilia na realização de análises técnicas a partir de campanhas de medição nos pontos de interesse da rede elétrica e, além deste, apresenta qual das técnicas possui maior acurácia na identificação dos impactos.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo geral**

Devido comportamento da rede elétrica com suas frequentes alterações de demanda e fluxo de carga, o objetivo geral da dissertação é analisar os impactos dos harmônicos de tensão e de corrente, em determinado período, devido a distorção harmônica em um ponto de interesse do barramento proporcionada pelas principais cargas instaladas na rede elétrica entre um consumidor e a concessionária, por meio de técnicas computacionais (Regressão Linear, Redes Neurais Artificiais e Árvores de Regressão).

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

A presente dissertação tem como objetivos específicos:

- Avaliar a contribuição harmônica dos alimentadores em um ponto de interesse de um barramento, sendo este no PAC dos sistemas elétricos entre um consumidor e a concessionária, como prevenção a problemas relacionados a distorções harmônicas nos barramentos analisados;
- Descrever os processos de análise de Regressão Linear (RL), Redes Neurais Artificiais (RNA) e Árvores de Regressão (AR) em cada etapa e como essas metodologias podem contribuir nos estudos relacionados à análise de distorções harmônicas;
- Comparar os resultados das análises do grau do impacto harmônico em um ponto de interesse, entre as técnicas computacionais de RL, RNA e AR, para identificar a melhor técnica para a análise de distorções harmônicas em trabalhos futuros.

### **1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A continuidade da presente dissertação é composta por seis Capítulos, assim estruturada:

O Capítulo 2, “QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA”, conceitua a QEE com foco na distorção harmônica total e individual, advindo de cargas não lineares, assim como os principais efeitos dos harmônicos, as normas de QEE internacionais e nacionais que norteiam as concessionárias e usuários para atendimento à QEE.

O terceiro Capítulo, intitulado “TRABALHOS CORRELATOS A QEE”, aborda trabalhos relacionados entre a qualidade de energia elétrica e a distorção harmônica e que envolvem as técnicas de RL, RNA e AR. Contudo, dentre os trabalhos encontrados, todos abordam as técnicas de forma individual e não comparando as mesmas.

O quarto Capítulo, “METODOLOGIAS APLICADAS”, apresenta os conceitos das três técnicas de inteligência computacional (IC) utilizadas para determinar o impacto harmônico na QEE e como estas oferecem confiabilidade em sua análise, além disto, apresenta as configurações dos sistemas elétricos utilizados, descreve os procedimentos de medição para coleta de dados e os softwares utilizados para análise dos dados coletados.

O quinto Capítulo, “RESULTADOS”, é feita a análise de QEE, apresentando os níveis de tensão em regime permanente, os perfis da cargas, porém, o foco está no impacto harmônico, no PAC da Universidade Federal do Pará (UFPA) entre os alimentadores e a concessionária e em um ponto de interesse no barramento de uma indústria no polo industrial de Manaus, assim como a comparação entre as três técnicas de IC mencionadas.

Finalmente, o sexto Capítulo apresenta as conclusões do estudo, realizando uma análise crítica quanto aos objetivos e metodologias utilizadas. Além disto, são relacionadas propostas para futuros trabalhos.

## CAPÍTULO 2

### 2. QUALIDADE DA ENERGIA ELETRICA

#### 2.1. INTRODUÇÃO

Da década de 80 em diante o tema qualidade de energia elétrica tem sido exaustivamente discutido no setor de energia elétrica. Antes disso, quando se falava em QEE geralmente pensava-se somente na frequência e no tempo de interrupção do fornecimento da energia, uma vez que os equipamentos não eram tão exigentes com relação à qualidade da energia que consumiam (Parijós Júnior, 2018). Na atualidade, o crescente uso de equipamentos sensíveis aos distúrbios dos sistemas elétricos de potência, tem ocasionado, também, o crescimento nas exigências de melhorias do serviço de supervisão, controle e desempenho dos sistemas elétricos de potência.

Segundo Arrillaga e Watson (2003), as concessionárias de energia vincularam a sua rotina operacional a adoção de práticas como o monitoramento da qualidade da energia; a análise das causas e efeitos de distorções da forma de onda de tensão e corrente; a utilização de técnicas de mensuração, modelagem e controle dos níveis de distorção de tensão para padrões aceitáveis.

Kusko e Thompson (2007) expõem que o crescimento do uso de dispositivos de eletrônica de potência e cargas elétricas não lineares em geral nas instalações residenciais, comerciais e industriais, tem contribuído de forma significativa, para o aumento das distorções harmônicas de tensão nas redes de distribuição de energia. A carga harmônica que o sistema deve acomodar é advinda por meio do uso de inversores de frequência, fontes de alimentação comutadas, fornos a arco, reatores de lâmpadas fluorescentes eletrônicas, microprocessadores, dentre outros equipamentos que são fabricados visando a redução do consumo de energia elétrica para tornar o sistema mais eficiente.

Entre as principais razões do crescimento da preocupação com a qualidade da energia está o surgimento de equipamentos com controle baseado em microprocessadores e dispositivos eletrônicos de potência mais sensíveis a variações de tensão, além da natureza não linear destas cargas, elas podem contribuir causando a circulação de conteúdo harmônico

na rede (Parijós Júnior, 2018). Parte dos equipamentos eletrônicos em uso hoje são suscetíveis a danos ou interrupção do serviço durante eventos de baixa qualidade de energia, sendo assim, existe uma interdependência direta entre as chamadas fontes poluidoras e as cargas sensíveis.

A contradição no que diz respeito a QEE, devido as características não lineares de equipamentos eletroeletrônicos, sendo estes a origem do próprio problema ao introduzir conteúdo harmônico no sistema elétrico, os fabricantes desses equipamentos também têm sua parcela de responsabilidade na manutenção da QEE devido projeto deste tipo de carga. Em Kagan *et al.* (2005), é proposto que se estabeleça uma inter-relação harmoniosa, dentro de limites aceitáveis, de forma que o consumidor final não venha a ser prejudicado pela presença de alguns dos fatores que diminuem a qualidade da energia elétrica.

Em conjunto com a evolução tecnológica, criou-se a necessidade de manter o nível de qualidade da energia constante e, para tal, no mundo inteiro foram criados órgãos que possuem o intuito de padronizar, monitorar e fiscalizar as concessionárias, referente a qualidade da energia fornecida, bem como fabricantes de equipamentos, referente ao reflexo resultante das cargas. De acordo com Dugan *et al.* (2004), os atores envolvidos no sistema de energia elétrica estão se tornando cada vez mais preocupados com a qualidade da energia elétrica e, por isto, tem sido gerado índices de desempenho em que as concessionárias devem fornecer seus serviços de modo a se manter um padrão mínimo de qualidade.

No Brasil, a ANEEL desenvolveu o PRODIST, que é um conjunto de documentos voltados para a normatização e padronização das atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Logo, foram definidos valores de referência para indicadores de qualidade, como por exemplo, os índices de distorção harmônica total e individual, de tensão e corrente, os quais limitam os níveis de distorção harmônica na rede elétrica em patamares que não representem degradação da QEE para a operação do sistema elétrico e que, também, não afetem o ciclo de vida dos dispositivos e equipamentos elétricos e eletrônicos.

## **2.2. CONCEITUAÇÃO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

O tema qualidade de energia elétrica é amplamente pesquisado no meio científico e, por isso, diversos fenômenos que afetam a qualidade da energia e suas consequências, têm sido investigados. Esta seção faz uma abordagem sobre os conceitos gerais da QEE, dentre as

tantas bibliografias e trabalhos acadêmicos produzidos.

Kusko e Thompson (2007) interpretam que os eventos de qualidade de energia podem ocorrer durante condições de falha, por meio de raios e utilização de equipamentos, dentre outras ocorrências que podem afetar negativamente as formas de onda de tensão e/ou corrente do sistema de energia elétrica.

Segundo Leão *et al.* (2014), QEE é a condição dos sinais elétricos de tensão e corrente que permite que equipamentos, processos, instalações e sistemas elétricos operem de forma satisfatória, sem prejuízo de desempenho e de vida útil.

De forma bem semelhante, Dugan *et al.* (2004), menciona que a má QEE é qualquer problema manifestado no desvio da corrente, tensão ou de frequência que resulte em falhas do sistema ou falhas de operação dos equipamentos dos clientes.

Segundo Tostes (2003) o termo qualidade da energia elétrica engloba todos os aspectos associados à amplitude, fase e frequência das formas de onda da tensão e corrente existentes nos sistemas elétricos, sendo que um sistema elétrico estará dentro dos padrões da qualidade da energia caso este apresente em níveis aceitáveis de QEE.

O *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE Std. 1159-1995 (1995))*, classifica a QEE como uma grande variedade de fenômenos eletromagnéticos, que caracterizam a tensão e a corrente em um determinado momento e local no sistema de alimentação. Já a *International Electrotechnical Commission (IEC, 1991)* expõe que dentre os eventos que causam distúrbios no sistema elétrico se destacam os harmônicos, inter-harmônicos, flutuações de tensão, afundamentos, transitórios, entre outros.

De acordo com a ELETROBRAS (2008), os fenômenos eletromagnéticos que podem aparecer em um sistema de energia são caracterizados em função do espectro de frequência que aparecem nos sinais de tensão durante o fenômeno, da duração do fenômeno, da magnitude de tensão em que estes fenômenos são causados, principalmente, por transitórios impulsivos de grande magnitude; chaveamento ou comutação nas redes elétricas; falhas na operação do sistema; além de cargas não lineares que geram distorções harmônicas na rede elétrica.

Mikkili e Panda (2016) definem QEE como qualquer problema de energia manifestado em desvio de tensão, corrente ou frequência que leve a danos, mau

funcionamento e/ou parada do equipamento do consumidor, haja vista que a baixa qualidade da energia causa danos ao sistema e proporciona um impacto negativo técnico e econômico aos clientes. Em seu trabalho, Nogueira (2015) menciona que fabricantes de equipamentos de carga podem definir a qualidade de energia como as características do fornecimento de energia que permitem que o equipamento funcione adequadamente.

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, elaborados pela ANEEL, tem por objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica, englobando as terminologias, os parâmetros, os fenômenos e os valores relativos à conformidade de tensão em regime permanente e transitório. Detalhado no Módulo 8 do PRODIST, a QEE é dividida em três pilares, sendo estes a Qualidade do Produto, Qualidade do Serviço e a Qualidade do Tratamento de Reclamações (PRODIST – Módulo 8, 2018).

Este trabalho está voltado para a qualidade do produto (energia elétrica), que a ANEEL define como a capacidade que o sistema elétrico possui de fornecer energia dentro dos limites aceitáveis de tensões equilibradas e sem deformações na sua forma de onda, ou seja, o SEP deve possuir disponibilidade de energia elétrica com limites de tensões senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constantes sem variações (PRODIST – Módulo 8, 2018). Dentro da qualidade do produto os aspectos mais relevantes em regime permanente e transitório são:

- a) Tensão em regime permanente;
- b) Fator de potência;
- c) Harmônicos;
- d) Desequilíbrio de tensão;
- e) Flutuação de tensão;
- f) Variações de tensão de curta duração;
- g) Variação de frequência

Mesmo com a existência de vários aspectos relevantes na Qualidade do Produto definidos e padronizados no PRODIST, no presente trabalho, o aspecto que será evidenciado com maior relevância serão os harmônicos que servirão como as principais variáveis de análise. A presença de componentes harmônicas, em um sistema elétrico de potência, também é uma forte indicação da má qualidade de energia, caso essas componentes harmônicas estejam acima dos limites recomendados pelas normas.

Segundo Kusko e Thompson (2007), o aumento do interesse na qualidade de energia pode ser resumido devido impacto da baixa qualidade de energia no sistema de medição, podendo afetar a precisão da medição de energia; no sistema de proteção, podendo causar defeitos nos relés de proteção; no tempo de inatividade, podendo resultar em inatividade do equipamento e/ou danos, resultando em perda de produtividade; na compatibilidade eletromagnética, podendo resultar em problemas de compatibilidade eletromagnética e ruído; e, principalmente, no custo, pois pode resultar em aumento de custos devido aos efeitos anteriores.

De acordo com os conceitos utilizados, de modo geral, uma definição aceitável por grande parte dos acadêmicos é que a energia elétrica de boa qualidade é aquela que garante um funcionamento contínuo, adequado e seguro aos equipamentos elétricos e os processos associados, sem afetar o meio ambiente e o bem-estar das pessoas.

### **2.3. HARMÔNICOS**

A presente seção se propõe a apresentar conceitos sobre os harmônicos, como são gerados, quais são seus principais efeitos nos sistemas elétricos e algumas normas que estão associadas a eles.

De acordo com o PRODIST, os harmônicos são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (PRODIST – Módulo 8).

Segundo Leão *et al.* (2014), os harmônicos são um conjunto de sinais com forma de onda senoidal e com frequências múltiplas inteiras de uma frequência de referência, conhecida como frequência fundamental. Sendo assim, tais componentes ao se combinarem com a componente fundamental, produzem as distorções harmônicas, ou seja, deformação na forma de onda da tensão e corrente em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

Para Kamenka (2014), uma forma de onda distorcida sempre pode ser representada como a superposição de uma forma de onda da frequência fundamental com outras formas de onda de diferentes frequências e amplitudes harmônicas.

Dugan *et al* (2004), afirma que, idealmente, as tensões e correntes presentes nos diversos pontos de uma rede elétrica devem ser puramente senoidais e apresentar uma frequência de 60 Hz, no caso do Brasil. Porém, na realidade, sabe-se que estas apresentam desvios em sua forma de onda senoidal. Quando uma tensão deixa de ser puramente senoidal ocorrem mudanças de comportamento nas instalações elétricas e nos equipamentos, de modo que quanto mais distorcida for a forma de onda, mais acentuados serão os efeitos negativos sobre alguns tipos de equipamentos, como gerar calor excessivo em motores e cabos, causando falhas precoces nos motores e abaixando o isolamento dos fios, além de alteração do torque e ruídos em motores.

Dugan *et al* (2004) afirmam que segundo Fourier, uma função qualquer contínua e periódica, em um intervalo qualquer, pode ser representada por um somatório de componentes senoidais e uma componente constante.

Para Galhardo (2006), uma função periódica pode ser representada por uma soma infinita de funções senoidais (série de Fourier), cada uma com uma determinada amplitude e fase, mais uma componente de frequência zero, e que a frequência das funções senoidais da série infinita é um múltiplo inteiro, ou harmônico, da frequência da função periódica, que é chamada de frequência fundamental.

Em Rosa (2006), é mencionado que, no passado, os níveis de distorções harmônicas no SEP eram menores e menos impactantes, devido haver poucos equipamentos geradores de harmônicos e a robustez dos mesmos. Entretanto, com avanço da eletrônica de potência, os níveis de distorção harmônica de tensão e corrente têm se tornado prejudiciais aos diversos equipamentos elétricos e eletrônicos ligados à rede elétrica, tendo em vista sua sensibilidade à presença dos harmônicos. E, segundo Dugan *et al* (2004), os impactos de harmônicos tendem a ser mais agressivos próximo aos consumidores, no ponto de acoplamento comum.

Sabe-se que os harmônicos podem ser causados devido à conexão de cargas não lineares na rede de energia, afetando não apenas a instalação onde foi originada como também se propaga para a rede de distribuição de energia afetando outros usuários. Por isso, a responsabilidade da produção de componentes harmônicas no sistema não é apenas das concessionárias, mas também do usuário final da energia. Logo, estudos relacionados à contribuição de cada carga, usuário ou conjunto destas na distorção harmônica de uma determinada barra do sistema vem sendo desenvolvido a fim de atribuir responsabilidades aos consumidores conectados à rede elétrica.

Muitos dispositivos podem ser fonte de corrente harmônica individual, contudo, a distorção harmônica total no PAC também precisa ser analisada, visto que a distorção da tensão resultante da propagação de correntes harmônicas em um sistema de energia depende das características de fontes harmônicas e das características de todos os dispositivos conectados à rede elétrica.

A distorção harmônica total pode quantificar o nível de poluição harmônica em um sistema de energia. Normalmente, a DHT é medida em uma relação percentual, através de um método matemático que através da decomposição da forma de onda analisada em uma somatória de outras ondas, mensurando a intensidade individual de cada um dos harmônicos e totalizando suas componentes.

Para Arrillaga e Watson (2003), a presença de harmônicos no sinal elétrico pode causar ressonância harmônica na rede do sistema elétrico, sendo esta a condição na qual a frequência natural do sistema de energia está em ressonância com o harmônico de maior intensidade produzido por cargas não lineares. Como consequência da ressonância harmônica pode-se mencionar:

- Sobretensões no PAC, podendo causar danos a equipamentos ou reduzir sua vida útil;
- Aumento da distorção harmônica de tensão nos sistemas de energia elétrica, provocando redução da vida útil de equipamentos, falhas em sistemas sensíveis, interferência em sistemas de comunicação;
- Sobrecorrentes nos equipamentos; e
- Perdas elétricas pelo aquecimento de linha dos transformadores, dentre outros.

### **2.3.1. Cargas não lineares**

A geração de harmônicos está fortemente inserida no contexto de qualidade de energia, devido a instabilidade que esta causa ao sistema. Os harmônicos podem ser gerados por cargas lineares e não lineares, sendo as cargas com características não lineares as principais contribuintes para a injeção de harmônicos na rede elétrica.

Segundo Lima (2016), as cargas lineares possuem sua corrente diretamente proporcional à tensão aplicada e são constituídas por resistores, indutores não saturáveis e

capacitores de valores fixos, já as cargas não lineares, tem a característica de deformar a forma de onda da corrente absorvida, quando alimentada com tensão senoidal, sendo estas geradas por elementos como compensadores estáticos, geradores e compensadores síncronos em menor escala, conversores de corrente contínua (CC) / corrente alternada (CA) e transformadores. As Figuras 2-1 e 2-2 apresentam as características de uma carga linear e não linear, respectivamente.

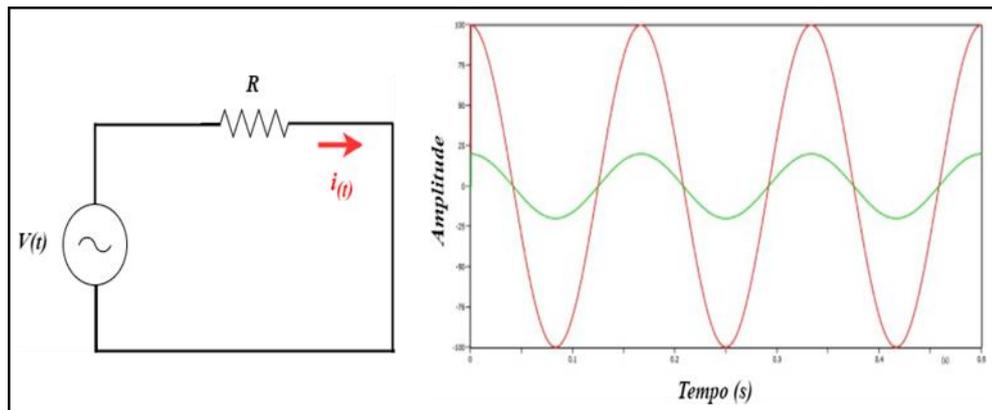


Figura 2-1 – Características de uma carga linear. Fonte: Lima, 2016.

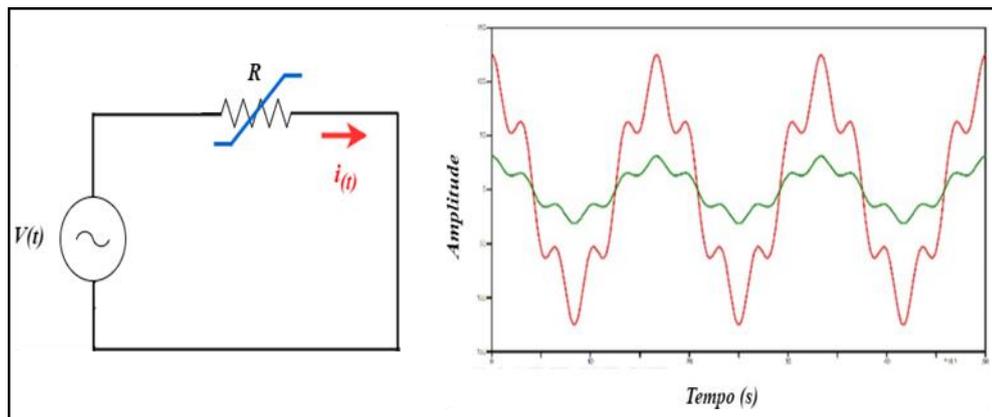


Figura 2-2 – Características de uma carga não linear. Fonte: Lima, 2016.

Uma carga é considerada não linear se a corrente projetada pela carga não for senoidal mesmo quando estiver conectada a uma tensão senoidal, pois a corrente não linear contém componentes de frequência que são múltiplos da frequência do sistema de energia, com isto, as correntes harmônicas interagem com a impedância da rede de energia elétrica criando distorção de tensão que pode afetar a própria rede elétrica e as cargas conectadas a ela (Oliveira, 2018).

Dias (1998) afirma que uma carga linear é aquela em que existe uma proporcionalidade entre tensão e corrente por meio de uma impedância  $Z$ , a qual afeta a amplitude e a fase da corrente, de modo que esta mantenha uma forma de onda senoidal.

Em Arrillaga e Watson (2003) é exposta a possibilidade de se verificar as formas de onda de tensão e corrente nos pontos de conexão de dispositivos não lineares, de modo que estas podem ser obtidas por meio de transdutores apropriados ou calculadas para uma dada condição operacional, com base no conhecimento das características não lineares dos dispositivos estudados.

O trabalho desenvolvido por Soares (2012), mostra que, embora alimentadas por uma fonte de tensão puramente senoidal, as cargas não lineares absorvem uma corrente distorcida em virtude da não proporcionalidade existente entre tensão e corrente. E, como consequência, a passagem pela impedância série dos cabos e linhas de transmissão provoca queda de tensão em cada harmônico, causando distorção na tensão em diversos pontos de uma rede elétrica.

Tendo em vista que os harmônicos são gerados por equipamentos ou cargas que apresentam características não lineares entre tensão/corrente e que, num sistema elétrico, se somam à componente fundamental provocando as distorções nas formas de onda dessas grandezas, conforme Tostes (2003), qualquer onda periódica pode ser decomposta em uma somatória de senóides com uma frequência fundamental mais um certo número de harmônicos, ou seja, uma onda distorcida pode ser representada pela fundamental mais uma porcentagem de segundo harmônico, mais uma porcentagem do terceiro harmônico e assim por diante, até o h-ésimo harmônico. Além disto, a distorção de tensão em uma determinada barra da rede elétrica é resultante da interação dos diversos tipos de cargas que compõe um determinado sistema, dependendo do perfil das cargas presentes no mesmo, uma vez que os harmônicos produzidos por estas cargas poderão se somar, aumentando o nível de distorção de tensão ou se cancelar, provocando reduções no nível de distorção.

Segundo Nogueira (2015), sistemas que possuem grande quantidade de cargas monofásicas não lineares e de baixa potência em equipamentos como notebooks, reatores de lâmpadas fluorescentes, monitores de vídeos, tablets e computadores de mesa, afetam, significativamente, as demais cargas conectadas ao PAC, devido à alta representatividade na geração de distorções harmônicas de tais equipamentos.

O trabalho desenvolvido por Tostes (2003) divide o perfil harmônico em três categorias, classificando as cargas não lineares de acordo com a natureza de seu conteúdo harmônico gerado e seu princípio de funcionamento, sendo:

- Categoria 1 - inclui as cargas com princípio de funcionamento baseado em descargas elétricas e oriundas da não linearidade do arco, como forno a arco, máquinas de solda, iluminação fluorescente e outros.
- Categoria 2 - engloba os equipamentos de núcleo magnético saturado e oriunda da não linearidade do circuito magnético, como reatores e transformadores de núcleo saturado.
- Categoria 3 - é composta de equipamento de eletrônico e oriunda da não linearidade de componentes eletrônicos que possuem diodos, transistores e tiristores, presentes em diversos equipamentos eletrônicos, como conversores estáticos, computadores, fornos micro-ondas, lâmpadas compactas fluorescentes, nobreaks e outros.

### 2.3.2. Distorção harmônica individual e total

A definição da presença de harmônicos pode ser realizada através do tratamento individual ou total das mesmas. Os valores de referência das distorções harmônicas totais e individuais servem para o monitoramento do sistema elétrico, em termos de qualidade de energia, uma vez que os mesmos ainda não foram regulamentados.

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pela análise do espectro harmônico considerando as amplitudes de cada componente harmônica individualmente. Com isto, os níveis de distorções individuais indicam a porcentagem de um determinado harmônico em relação ao componente fundamental do sinal em questão, de modo que, tais níveis são determinados dividindo-se a amplitude da tensão ou da corrente de ordem  $h$  pela amplitude da tensão ou da corrente fundamental. Garcia (2008), utiliza as Equações (2-1) e (2-2) para quantificar o nível de distorção em relação a onda fundamental de modo individual.

- Distorção Harmônica Individual de Tensão ( $DHI_V$ )

$$DHI_V = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (\text{Eq. 2-1})$$

- Distorção Harmônica Individual de Corrente ( $DHI_I$ )

$$DHI_I = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (\text{Eq. 2-2})$$

Ainda de acordo com Garcia (2008), as distorções harmônicas totais têm por objetivo, gerar um indicador representativo da ação conjunta de todas as frequências harmônicas

presentes nos sinais de tensão e/ou corrente. A DHT representa o quanto um sinal está deformado em relação ao seu componente fundamental, conforme descrito pelas Equações (2-3) e (2-4):

$$DHT_V\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (\text{Eq. 2-3})$$

$$DHT_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (\text{Eq. 2-4})$$

em que,

**h** – ordem harmônica;

**V<sub>h</sub>** – tensão harmônica de ordem h;

**V<sub>1</sub>** – componente fundamental da tensão;

**I<sub>h</sub>** – corrente harmônica de ordem h;

**I<sub>1</sub>** – componente fundamental da corrente.

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão, indicados nas Tabela 2-1, servem como referência no planejamento elétrico em termos de QEE (PRODIST - Módulo 8, 2018).

Tabela 2-1 – Limites das distorções harmônicas totais em % da tensão fundamental. Fonte: PRODIST - Módulo 8, 2018.

Indicador	Tensão nominal		
	V <sub>n</sub> ≤ 1,0 kV	1,0 kV ≤ V <sub>n</sub> ≤ 69 kV	69 kV ≤ V <sub>n</sub> ≤ 230 kV
<b>DTT95%</b>	10,0%	8,0%	5,0%
<b>DTTp95%</b>	2,5%	2,0%	1,0%
<b>DTT195%</b>	7,5%	6,0%	4,0%
<b>DTT395%</b>	6,5%	5,0%	3,0%

sendo,

**DTT%** - Distorção harmônica total de tensão;

**DTT95%** - Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas;

**DTTP%** - Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3;

**DTTI95%** - Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3;

**DTT3%** - Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3.

### **2.3.3. Efeitos dos harmônicos nos principais componentes da rede elétrica**

A presença de tensões e de correntes harmônicas nos sistemas elétricos tem ocasionado inúmeros problemas diretos em equipamentos do sistema elétrico como a redução da vida útil, perdas adicionais e a queima desses equipamentos. Além disso, de forma indireta, os efeitos de harmônicos podem afetar a economia de uma indústria, pois existem dispositivos elétricos e eletrônicos que apresentam sensibilidade a tais distúrbios.

Segundo Kusko e Thompson (2007), a primeira manifestação de um problema de qualidade de energia pode ser percebida por meio de uma perturbação na forma de onda de tensão da fonte de energia de uma onda senoidal ou na amplitude de um nível de referência estabelecido ou uma interrupção completa. Tais perturbações podem ter intervalos de milissegundos (fração de um ciclo), segundos e até horas, podendo esta ocasionar um desligamento por completo.

Um dos problemas mais comuns causados com a circulação de correntes harmônicas de magnitude elevadas são quando o PAC está distante da carga, pois, devido as longas distâncias percorridas pela corrente, a linha de distribuição possui altos valores de impedância até o PAC, criando neste caso uma alta distorção na tensão de suprimento Galhardo (2006).

A seguir são apresentados alguns efeitos das distorções harmônicas em alguns dos principais componentes dos sistemas de energia elétrica.

a) Capacitores - é sempre um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, estando sempre sujeito a sobrecarga e sobreaquecimento excessivo, sendo assim, este pode ocasionar (Dugan *et al*, 2004):

- aumento das perdas dielétricas devido à aplicação de uma tensão distorcida.
- aquecimento excessivo e esforço adicional na isolação do capacitor;

- condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas;

- queima de fusíveis, e redução da vida útil;

b) Transformadores - são os equipamentos elétricos mais expostos à distorção harmônica, pois os harmônicos gerados nas várias instalações convergem para os transformadores e, com isto, ocorre (Dugan *et al*, 2004; Tostes, 2003):

- elevação da temperatura de operação e conseqüente redução de sua vida útil;
- aumento das perdas no cobre e das perdas envolvendo fluxos de dispersão, implicando numa redução da área efetivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente.;

- maiores solicitações do isolamento e possíveis ressonâncias (para as frequências harmônicas) entre os enrolamentos do transformador e as capacitâncias das linhas ou de outros equipamentos;

- possíveis presenças de componentes de corrente contínua oriundas de cargas como conversores assimétricos, levando o transformador a uma magnetização assimétrica e com isso aumentando as perdas no ferro e dos harmônicos da corrente de excitação.

- aumento de correntes com distorções harmônicas ou de correntes trifásicas desbalanceadas, de modo a aumentar a corrente de neutro e podendo ser necessário o redimensionamento do transformador.

c) Máquinas rotativas - os harmônicos são responsáveis pelo surgimento de torques parasitas contrários à direção de movimento do rotor em virtude da presença de harmônicos de sequência negativa e dentre os efeitos mais significativos, destacam-se (Dugan *et al*, 2004; Arrillaga e Watson, 2003):

- aquecimentos das bobinas acima dos valores nominais;
- aumento das vibrações e do nível de ruído;
- aumento de oscilação mecânica;
- diminuição do rendimento;
- deformações elásticas.

d) Cabos condutores – são importantes no sistema elétrico, por efetuarem a conexão entre os componentes, podendo sofrer uma sobrecarga e perdas adicionais por efeito joule. Com isto, os harmônicos podem ocasionar (Dugan *et al*, 2004; Tostes, 2003):

- perdas por efeito pelicular e efeito de proximidade, implicando na diminuição da secção de condução e no aumento da resistência do condutor.

- degradação do cabo por aquecimentos e perdas por efeito *skin* e possível ruptura de dielétrico.

e) Sistemas de proteção - fusíveis e disjuntores tendem a apresentar problemas como (Dugan *et al*, 2004):

- operação falsa ou errônea, inadequado para um sistema de proteção;
- aquecimento e redução de vida útil do equipamento.

Em seu estudo, Mikkili e Panda (2016), mencionam que existem duas metodologias para a mitigação de problemas de qualidade de energia, sendo o condicionamento de carga, que garante que o equipamento seja menos sensível a perturbações de energia, e a instalação de sistemas que suprima ou neutralize os distúrbios do sistema de potência.

Já Kusko e Thompson (2007) trazem os métodos de correção dos efeitos harmônicos nos seguintes momentos:

- Projeto do equipamento de carga - podem ser projetados para reduzir harmônicos na corrente de carga, assim como reduzir a sensibilidade a distúrbios de tensão.

- Projeto distribuição de energia elétrica - se dimensionados corretamente, pode reduzir a impedância da fonte, separar cargas e evitar ressonâncias harmônicas.

- Instalação de filtros de harmônicos de potência - são instalados para corrigir a distorção de tensão contínua produzida por cargas não lineares em sistemas de potência.

- Utilização de compensadores dinâmicos de tensão - funcionam com o intuito de correção de quedas de tensão de curta duração.

- Instalação de fontes de alimentação ininterruptas (*UPSs*, do inglês) – utiliza-se sistemas de armazenamento de energia suplementar como baterias e *nobreak*, para fornecer uma fonte de energia independente para a carga a partir de um inversor eletrônico, de modo que durante uma interrupção os equipamentos sirvam como fonte de energia.

## 2.4. NORMAS E LIMITES ASSOCIADOS À DISTORÇÃO HARMÔNICA

Na maioria dos países, dada a expansão contínua e globalização dos mercados, existe uma tendência na adoção de normas compatíveis que garantam a QEE, principalmente, nos indicadores específicos (para equipamentos) ou indicadores globais (para o sistema elétrico).

Conforme já visto, os efeitos que as distorções harmônicas de tensão e de corrente causam nos equipamentos elétricos podem mudar a operação do sistema e caracterizam-se como fenômenos prejudiciais à QEE, com isto, nesta seção, são relacionados normas e procedimentos que tratam de práticas e requisitos para o controle de harmônicos no sistema elétrico de potência internacional e nacional.

Dentre esses conjuntos de referências no que diz respeito à regulamentação de normas ou recomendações associadas à distorção harmônica tem-se a *International Electrotechnical Commission* (IEC), o *Institute of Electric and Electronic Engineers* (IEEE), as normas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a própria Norma Brasileira 5410 (NBR).

### 2.4.1. Normas internacionais (IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4, IEC 61000-4-7 E IEEE-519)

Dentre as normas que regulam a injeção de harmônicos, tem-se como principal referência as normas internacionais IEC 61000 e a recomendação IEEE 519/1992, a qual as regulamentações brasileiras se baseiam.

O IEC 61000 contém uma série de normas relativas à compatibilidade eletromagnética, que estabelecem limites para diversos tipos de distúrbios ocasionados por equipamentos eletroeletrônicos. O IEC desenvolveu a norma IEC 61000-3-2, que aplica-se a equipamentos elétricos e eletrônicos que possuem uma corrente de entrada menor ou igual a 16 A por fase, conectados a uma rede pública de baixa tensão alternada, de 50 ou 60 Hz, com tensão fase-neutro/fase-fase: 220/380 V, 230/400 V e 240/415 V. Já a IEC 61000-3-4, é voltada para equipamentos com corrente nominal acima de 16 A.

A norma IEC 61000-4-7 estabelece as metodologias e requisitos que os equipamentos devem atender para realizar medições de componentes espectrais superpostas na frequência fundamental de um sistema de potência assim como as técnicas empregadas por esses equipamentos para a realização dessas medições. Esta norma tem como intuito, realizar

distinções entre harmônicos, inter-harmônicos e outros componentes acima do alcance de frequência de harmônicos, até 9Hz.

Segundo Mikkili e Panda (2016), em 1981 o IEEE reconheceu os problemas relacionados aos harmônicos e começaram a trabalhar em um padrão que daria diretrizes para usuários e engenheiros, formulando, então, as diretrizes IEEE 519. A norma IEEE 519 de 1992, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, traz consigo as recomendações para o controle de harmônicos nos sistemas elétricos de potência. Os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC, por isto, a norma leva em consideração a participação dos envolvidos como concessionárias e clientes, para definir níveis aceitáveis de harmônicos de tensão e corrente no ponto de entrega de energia pela concessionária e o cliente.

As Tabelas 2-2 e 2-3 mostram os limites de distorção harmônica de corrente, sendo estes classificados tanto em relação à tensão nominal dos circuitos quanto em relação às ordens harmônicas individuais. Analisando as Tabelas, percebe-se que quanto maior for a corrente máxima de curto-circuito ( $I_{cc}$ ) no PAC em relação à corrente da carga ( $I_L$ ) demandada no PAC, maiores serão as distorções de corrente admissíveis, conforme a distorção de demanda total (DDT) (IEEE Standard 519, 1992).

Tabela 2-2 – Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição (120 V a 69 kV). Fonte: IEEE Standard 519, 1992.

<b>Harmônica de Ordem Ímpar</b>						<b>DDT (%)</b>
<b><math>I_{cc}/I_L</math></b>	<b><math>h &lt; 11</math></b>	<b><math>11 \leq h &lt; 17</math></b>	<b><math>17 \leq h &lt; 23</math></b>	<b><math>23 \leq h &lt; 35</math></b>	<b><math>35 \leq h</math></b>	
< 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	10,0	4,5	4,0	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

Tabela 2-3 – Limites de distorção da corrente para sistemas de subtransmissão (69.001 V a 161 kV). Fonte: IEEE Standard 519, 1992.

<b>Harmônica de Ordem Ímpar</b>						<b>DDT (%)</b>
<b><math>I_{cc}/I_L</math></b>	<b><math>h &lt; 11</math></b>	<b><math>11 \leq h &lt; 17</math></b>	<b><math>17 \leq h &lt; 23</math></b>	<b><math>23 \leq h &lt; 35</math></b>	<b><math>35 \leq h</math></b>	
< 20*	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

A Tabela 2-4 apresenta os limites individuais por componente e um limite para a DHT no PAC, em que os valores mais severos são para as tensões menores (nível de distribuição), com isto, à medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis.

Tabela 2-4 – Limites de distorção de tensão. Fonte: IEEE Standard 519, 1992.

<b>Tensão no PAC</b>	<b>Distorção Individual</b>	<b>DHT<sub>v</sub></b>
69 kV e abaixo	3%	5%
69001 V até 161000 V	1,5%	2,5%
Acima 161000 V	1%	1,5%

#### 2.4.2. Normas nacionais – módulo 8 dos procedimentos de distribuição (PRODIST)

Neste novo cenário, é uma preocupação, principalmente, das concessionárias monitorar continuamente sua rede elétrica visando detectar e identificar cargas suspeitas que possam estar impactando significativamente as distorções harmônicas de tensão, observadas em pontos específicos de interesse da rede elétrica. Para tal, no Brasil, a ANEEL desenvolveu os Procedimentos de Distribuição da Energia Elétrica (PRODIST), composto de 11 módulos de tal forma a lidar com alguns aspectos dos sistemas de distribuição. Dentre esses módulos, o módulo 8 está voltado para a QEE, onde estão definidos limites de distorção harmônica total de tensão (DHT<sub>v</sub>) na rede elétrica em patamares que não representem degradação da qualidade da energia para a operação do sistema elétrico e que também não afetem o ciclo de vida dos dispositivos e equipamentos elétricos e eletrônicos.

A Tabela 2-5 apresenta os limites permitidos para a DHT<sub>v</sub> estipulados pelo PRODIST (PRODIST – Módulo 8). Estes valores servem para avaliar o desempenho global quanto a harmônicos de tensão, em regime permanente, e como referência para o planejamento elétrico nacional em termos de QEE.

Tabela 2-5 – Valores de Referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental). Fonte: PRODIST – Módulo 8.

<b>Tensão Nominal do Barramento</b>	<b>DHT<sub>v</sub> (%)</b>
$VN \leq 1kV$	10,0 %
$1kV < VN \leq 13,8kV$	8,0 %
$13,8kV < VN \leq 69kV$	6,0 %
$69kV < VN \leq 230kV$	3,0 %

Segundo Matos (2016), apesar das normas nacionais, como o PRODIST, se basear nas normas internacionais, quando se trata de QEE, existem algumas diferenças entre a norma

brasileira e as demais que deve se considerar, como o fato de que a norma IEEE-519 recomenda limites para harmônicos de corrente e tensão, além de recomendar um limite único para todas as ordens de harmônicos e um limite único de DHT, para cada faixa de tensão. Já a ANEEL regulamenta somente os harmônicos de tensão e possui limites diferentes para cada classe de tensão específica, segundo a ordem do harmônico. O ponto em comum entre a ANEEL e a norma do IEEE-519, é que ambas tratam de questões de harmônicos do ponto de vista sistêmico, porém a norma IEC 61000-3-2 define limites harmônicos de corrente para equipamentos de baixa tensão com  $I_{rms} < 16A$ .

## 2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente, o presente Capítulo concentrou-se na caracterização dos conceitos e definições associados à qualidade de energia, além de aspectos gerais que devem ser considerados na análise da QEE.

Na sequência, foi descrito como o surgimento de harmônicos na rede elétrica vem aumentando devido à presença cada vez maior de cargas não lineares. Em consequência disso, também vem ganhando maiores destaques os estudos dos efeitos de harmônicos e a preocupação com a mitigação de problemas ocasionados pela circulação destes harmônicos no sistema de energia elétrico.

De forma a quantificar e avaliar os níveis de distorção presentes em vários pontos do sistema elétrico, organizações internacionais e nacionais têm desenvolvido normas que estabelecem técnicas de medição dos níveis de distorção nos vários pontos de uma rede elétrica e limites aceitáveis de distorção. Apesar das normas e/ou recomendações desenvolvidas proporcionarem regulamentação ao setor elétrico, a determinação dos os limites de responsabilidade e os agentes causadores dos níveis de distorção em uma determinada barra e do sistema ainda é uma discussão sem término previsto.

O próximo Capítulo abordará trabalhos correlatos que relacionam a qualidade de energia elétrica com os harmônicos e, também, com diferentes técnicas de IC para estimar a contribuição de fontes harmônicas na distorção de tensão em um barramento de interesse.

## CAPÍTULO 3

### 3. TRABALHOS CORRELATOS A QEE

#### 3.1. INTRODUÇÃO

A qualidade de energia nos sistemas elétricos tem sido frequente em todas as classes envolvidas, seja na geração, transmissão, distribuição ou consumidor final. O tema tem merecido atenção especial dos pesquisadores da área e, por isto, esta seção oferece um panorama sobre o assunto em estudo, por meio de uma pesquisa bibliográfica com vários trabalhos técnicos que enfocam a QEE em conjunto com características harmônicas e técnicas computacionais utilizadas para estimar e mitigar o possível grau do impacto harmônico de instalações elétricas.

A seguir, dentre as várias aplicações, são comentadas algumas publicações que serviram de base conceitual para o desenvolvimento desta dissertação.

#### 3.2. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Conforme mencionado na Capítulo 2 desta dissertação, o aumento do uso de cargas eletrônicas não lineares tem provocado a injeção de correntes harmônicas na rede elétrica e, conseqüentemente, o aumento significativo da distorção harmônica nos sistemas de distribuição. Com isto, o incremento de correntes e tensões harmônicas resultantes podem acarretar problemas de qualidade de energia e afetar o desempenho dos consumidores conectados à rede de energia elétrica. A seguir, são mencionados trabalhos que evidenciam tal experiência de distúrbio e métodos de mitigação.

Em Xu e Liu (2000), foi proposto um método para determinar o impacto das contribuições harmônicas de um consumidor e da concessionária no PAC, propiciando a separação da corrente e da tensão em dois componentes, sendo uma para os consumidores e a outra para a própria rede elétrica. Seguindo o conceito de que a potência reativa constitui um indicador mais confiável para identificar fontes harmônicas dominantes, em detrimento da potência ativa, em Li *et al* (2003), é proposto um método de identificação do causador de

maior contribuição harmônica no PAC.

Em 2001, Bezerra *et al.* (2001) efetuaram o trabalho de verificação da presença de harmônicos na rede elétrica da região metropolitana de Belém em consumidores residenciais. Neste caso, constatou-se que as distorções harmônicas estão presentes, de forma mais significativa, nas frequências 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup>. Como continuidade do trabalho mencionado, Tostes (2003), desenvolveu um algoritmo para o cálculo da propagação de correntes harmônicas na rede primária de distribuição, de modo a propiciar o emprego de filtros passivos de baixo custo para efetuar a filtragem das principais componentes harmônicas geradas pela injeção harmônica dos consumidores em baixa tensão. Em 2009, Xu *et al.* (2009) também apresentam um método de medição que determina a fonte e a impedância harmônica para sistemas prediais supridos por um transformador monofásico de tal forma que seja possível determinar a contribuição da fonte supridora de energia elétrica e do consumidor no PAC.

Pyzalski e Wilkosz (2005) também desenvolveram um método baseado em medições no barramento comum, com o objetivo de identificar a fonte harmônica dominante entre distribuidora e consumidor para a magnitude da tensão harmônica no PAC. O método proposto apresenta um erro menor quando comparado aos critérios de corrente, direção da potência ativa, impedância crítica e necessita de menos conhecimento quando comparado ao critério de fonte.

Utilizando a série de Fourier, Gama (2006) faz uma descrição das causas de distúrbios relacionados a qualidade da energia elétrica e as fontes de harmônico. Semelhante a este, em estudos com foco em métodos para compensação de harmônicos em SEP, Galhardo (2006) enfatiza a influência da forma de onda de alimentação sobre cargas não lineares; a interação harmônica entre a tensão de suprimento e a corrente das cargas; e a influência mútua entre cargas não lineares em paralelo. Já em 2009, Pinho e Galhardo (2009) ressaltaram a importância da análise da interação harmônica existente entre a tensão de suprimento no ponto de acoplamento e a corrente injetada por cargas não lineares de um sistema elétrico, sendo que, por meio de medições e simulações, conseguiram exemplificar como as mesmas são influenciadas mutuamente, dependendo da forma de onda da tensão da fonte e/ou da impedância série do sistema.

Xu *et al.* (2009), propõe um método capaz de determinar os impactos harmônicos individual de múltiplas cargas harmônicas espalhadas pelo sistema de energia. A técnica aplicada efetua registros continuamente, de modo que os dados são atualizados em cada ponto

de carga e, após o processamento dos dados, são determinados o grau de associação entre o nível de harmônico de um ponto medido e os comportamentos das cargas monitoradas.

Visando identificar a fonte da emissão de harmônicos e determinar sua contribuição em diferentes pontos de um SEP, Kandev e Chénard (2010) apresentaram um método capaz de localizar em tempo real o consumidor responsável pelo distúrbio harmônico na rede. O sistema é baseado na análise vetorial das correntes harmônicas medidas em diferentes pontos da rede elétrica e, por isto, permite uma melhor compreensão dos problemas associados a harmônicos, além de identificar as causas e os efeitos com maior agilidade.

O trabalho desenvolvido por Unsar *et. al.* (2014) utilizou um método baseado no circuito equivalente de Norton para identificar a contribuição da distorção harmônica no PAC entre a concessionária e uma planta siderúrgica, tal análise possibilitou que os autores afirmassem que as cargas internas, principalmente os fornos a arco, eram as principais cargas geradoras de distorções harmônicas no PAC, mesmo com a contribuição de cargas que não estão sendo monitoradas (background).

Em Paixão Júnior *et al.* (2018), é apresentada uma avaliação da QEE em uma minirrede híbrida (geração fotovoltaica e diesel). Dentre as análises de QEE, são apresentados os efeitos de harmônicos gerado por inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e, por meio dos resultados, é possível verificar a presença da injeção de harmônicos de corrente na rede, principalmente, quando o sistema está com baixo carregamento. Nesta mesma linha de pesquisa, Parijós Júnior (2018) apresenta dados relevantes e preocupantes sobre QEE em seu trabalho, quando expõe o crescimento da geração distribuída, em especial a geração fotovoltaica, onde, por meio de testes realizados em laboratório, foi possível avaliar e apresentar as consequências da inserção da geração fotovoltaica na rede elétrica. Logo, o sistema fotovoltaico pode proporcionar nas unidades consumidoras a alteração da curva de carga, a elevação nos níveis de tensão, a variação do fator de potência e, principalmente, insere componentes harmônicas no sinal de corrente da saída do inversor, que, em grandes proporções, pode causar danos incalculáveis ao SEP.

Dadas as informações mencionadas em diferentes períodos e trabalhos mencionados, se faz necessária a identificação de forma exata das principais fontes de distorções harmônicas no SEP e, conseqüentemente, ações para mitigar as mesmas. Ainda que os responsáveis identificados não corrijam os níveis excedidos, os métodos de análise e medição permitem aos

órgãos responsáveis a aplicação de sanções para aqueles que ultrapassarem os níveis de distorções harmônicas além do permitido.

### **3.3. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E REGRESSÃO LINEAR**

A identificação de fontes harmônicas em um determinado sistema de energia é uma tarefa importante para o gerenciamento da qualidade da energia elétrica, com isto, nos últimos anos o interesse em conhecer os danos causados pela má QEE aumentaram e, como pode ser visto nos trabalhos relacionados a seguir, a utilização de técnica de RL tem auxiliado na mitigação dos problemas de distorção harmônica no SEP.

Em 2000, Xu e Liu (2000), propuseram um método para quantificar as responsabilidades do cliente e da concessionária quanto as violações de limite causadas por inserção de harmônicos no PAC, por meio de uma técnica de RL dupla, contudo, o modelo proposto apresentou problema devido a estimar somente os parâmetros do sistema de alimentação, assumindo que a tensão da fonte do cliente e a tensão harmônica do PAC estão em fase.

Em 2009, Xu *et al.* (2009) utilizaram a RL simples para determinar a contribuição do impacto harmônico de múltiplas cargas distribuídas num sistema elétrico. A metodologia proposta foi baseada no método de correlação de dados de corrente e de tensão das fontes harmônicas de uma barra do sistema. Já em 2011, com base na teoria de inferência estatística e na regressão linear múltipla (RLM), Mazin *et al.* (2011), utilizaram um indicador quantitativo para mensurar o impacto harmônico nas cargas geradoras de harmônico em um sistema semelhante ao anterior. Em ambas pesquisas, visando reduzir o erro oriundo da variação de outras cargas, foi considerado períodos onde ocorria a variação de apenas uma carga por vez.

Buscando identificar fontes de distorções harmônicas, Yin *et al.* (2011), pesquisaram ferramentas que proporcionassem tal solução. Então, de acordo com seu trabalho, foram propostos os métodos da RLM e de análise de correlação parcial para determinar as contribuições individuais das múltiplas cargas harmônicas.

A definição de quais cargas não lineares podem ser consideradas potenciais fontes harmônicas para as distorções harmônicas de tensão na rede elétrica sempre dificultou a tomada de decisão. Com isto, Matos *et al.* (2016), utilizaram, simultaneamente, modelos de

RL para estabelecer correlações entre as tensões harmônicas medidas na rede e de correntes harmônicas em cada carga individual não linear, possibilitando a determinação da contribuição harmônica em um ponto específico da rede. Desta forma, por meio de RL e regressão linear não paramétrica, analisaram os impactos na distorção harmônica gerada por múltiplas cargas não lineares no PAC da rede elétrica da UFPA, constituído de 84 barras de carga em tensão de 13,8 kV. A correlação entre as técnicas visou utilizar os benefícios que cada método pode trazer para estimar o impacto harmônico de cada carga.

### 3.4. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

Sabe-se que é uma tarefa difícil identificar a parcela de responsabilidade de cada um dos agentes da rede elétrica sobre os níveis de distorção harmônica no PAC, contudo, alguns autores têm publicado artigos que utilizam as RNA como ferramenta de detecção de harmônicos em sistemas de potência devido a grande capacidade de generalização e reconhecimento das mesmas.

Em 1998, Zin *et al.* (1998), utilizaram a rede neural de alimentação múltipla para determinar as componentes harmônicas em um conversor. De forma eficaz e eficiente, uma vez treinada pelo algoritmo de aprendizado, a rede neural detectou componentes de 5°, 7° e 11° harmônicos das ondas distorcidas.

Em uma sequência de trabalhos, Mazumdar *et al.* (2005, 2007 e 2008) buscam métodos para minimizar os conflitos entre as concessionárias de energia elétrica e os clientes finais, no que tange a quem é responsabilidade das distorções harmônicas no PAC. Mazumdar *et al.* (2005), utilizaram a técnica de redes neurais recorrentes para a determinação das distorções harmônicas injetadas pelos consumidores ligados a um mesmo ramal de distribuição. Ou seja, por meio de simulação é verificado o comportamento de uma carga não linear, possibilitando a obtenção de qualquer valor de corrente, quando aplicado um sinal de tensão à sua entrada. Mazumdar *et al.* (2007), empregaram uma estrutura de rede neural com memória para modelar a admitância da carga não linear e, assim que o treinamento é alcançado, a rede neural prevê a corrente harmônica real da carga, fornecendo uma onda senoidal sem interferências. Como continuidade das pesquisas, Mazumdar e Harley (2008), utilizaram 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,

sendo que, uma rede identifica a admitância da carga e a outra o processo da estimação, caracterizando assim a distorção exclusivamente da carga e desconsiderando as distorções provenientes do sistema, sem desconectar a carga da rede.

Em Srinivasan *et al.* (2006), é proposta a identificação de fontes harmônicas não intrusivas por meio de RNA. Sendo assim, as RNA são treinadas para extrair recursos da forma de onda da corrente de entrada para identificar, de forma exclusiva, os vários tipos de dispositivos usando suas assinaturas harmônicas distintas.

A RNA tem recebido atenção especial dos pesquisadores por sua simplicidade, aprendizado e capacidade de generalização, a exemplo disto, Swiatek *et al.* (2007), apresentam um algoritmo baseado em RNA que pode identificar tanto a magnitude quanto a fase dos harmônicos, propiciando bom desempenho na geração de uma variedade de harmonias e inter-harmônicos.

Para a detecção de harmônicos usando a transformada de Fourier são requeridos dados de entrada para mais de um ciclo da forma de onda atual e requer tempo para a análise no próximo ciclo. Como um método alternativo, Hsiung (2007) utilizou um algoritmo de RNA para a detecção rápida e precisa de harmônicos em ambientes ruidosos, fornecendo apenas valores de amostragem de meio ciclo de formas de ondas distorcidas para a rede neural.

Em um experimento em laboratório, Fernandes *et al.* (2010), utilizaram seleção de atributo e RNA para identificação de cargas lineares e não lineares aplicadas em um sistema elétrico residencial. Os dados foram coletados por medidores de qualidade de energia de cargas reais normalmente utilizadas em residências e estes, por sua vez, possibilitaram o treinamento e validação da RNA.

Em Mantovani (2011), por meio de simulação, é identificada a parcela de distorção harmônica total associada exclusivamente à característica não linear de uma carga. Para tal, se fez necessário o desacoplamento da carga do sistema, alimentando a mesma com uma tensão senoidal e, com isto, obteve-se o valor correto de DHT.

Também buscando estimar o conteúdo harmônico apresentado na forma de onda de corrente de carga não linear, supondo uma fonte de alimentação senoidal pura, Oleskovicz (2012) modelam a admitância de uma carga não linear em uma condição pré-estabelecida de tensão no PAC. Com isto, após treinada, a RNA é utilizada para prever a forma de onda de

corrente de carga não linear por uma estimativa de fonte de alimentação que preserve semelhanças com aquela aplicada durante seu treinamento.

Em Manito *et al* (2014), por meio de campanhas de medição e considerando a interação de todas as cargas do sistema elétrico, foi desenvolvido um modelo baseado em RNA para avaliar a contribuição harmônica de múltiplas cargas não lineares no PAC.

### 3.5. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E ÁRVORES DE REGRESSÃO

Assim como as demais técnicas de IC, utilizando árvores de regressão é possível mitigar os problemas de QEE, por meio da identificação da origem de fontes harmônicas em um sistema elétrico. Como veremos a seguir, ao longo dos anos, alguns autores tem se aprofundado na utilização da técnica de AR.

Perera e Rajapakse (2008), aplicam AR como modelos classificadores para distinguir os transitórios oriundos das falhas que, por meio de simulação, utilizou-se os transitórios para treinar e testar os classificadores. Os resultados mostraram que a técnica utilizada possui potencial confiável para o desenvolvimento de classificadores transitórios.

Em Bikas *et al.* (2009), é utilizada a técnica de AR como estratégia de adaptação de parâmetros em dois estudos de caso que, no primeiro caso, propõe carga corretiva para evitar a instabilidade de tensão, e no segundo, investiga o cenário de grande escala de integração da energia eólica ao sistema.

Utilizando AR, Silva *et al.* (2014), propuseram uma metodologia para determinar falhas em medidores eletromecânicos de energia elétrica. Já Samantaray (2010), utilizou a técnica de árvores de regressão para classificar os eventos de QEE como *sag*, ondulação, harmônicos, interrupções momentâneas, transitórios, *flicker*, entre outros.

Vaid *et al.* (2011), utilizaram a técnica de AR para identificar a fonte das distorções harmônicas em um sistema de cinco barras entre duas empresas geradoras. Para realização do estudo foi utilizado um diodo retificador trifásico que possibilitou a injeção de correntes harmônicas para detectar os distúrbios causadores de distorções harmônicas.

Em 2013, Borges (2013) apresentou a metodologia de detecção e classificação de distúrbios relacionados à QEE, no qual utilizou AR como método de classificação. Foram

analisados 15 distúrbios com base em sinais modelados por meio de equações paramétricas e inseridos no banco de dados analisados, com isto, foi possível diagnosticar a presença ou não do distúrbio em uma janela, oferecendo rapidez e tamanho reduzido.

Também voltado para a classificação dos distúrbios de QEE como afundamentos, sobretensão, cortes de tensão e harmônicos, Ray *et al* (2014) utilizaram técnicas como algoritmos genéticos, Máquina de Vetores de Suporte e AR, para apoiar na classificação de distúrbios.

Diferente das metodologias mencionadas a partir de simulações *off-line* de fluxo de carga, Rodrigues (2014) apresentou uma metodologia para avaliação da segurança estática em tempo real de sistemas elétricos de potência utilizando AR. Desta forma, o uso de computadores no ambiente *on-line* nesta metodologia é reduzido, uma vez que o processamento das AR necessita apenas da verificação de algumas instruções lógicas do tipo *if-then* (do inglês, se-então) e de um número reduzido de testes numéricos nos nós binários para definição do valor do atributo que satisfaz as regras. Como consequência, o processamento computacional torna-se simples e a tarefa de avaliação da segurança estática pode ser executada mais rápida do que o tempo necessário para a realização pelos métodos tradicionais.

Utilizando técnicas de IC conjugadas, Seera *et al.* (2016) e Fortes *et al.* (2016) apresentaram estudos sobre detecção e classificação de distúrbios de QEE usando RNA com modelo *fuzzy* e AR. Em 2017, outros autores agruparam técnicas computacionais para obter os resultados na detecção e classificação de distúrbio de QEE, como foi o caso de Rahmatian *et al.* (2017), que utilizou árvores de regressão e o algoritmo *Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)*, e Mahela e Shaik (2017), que tomou como ferramentas a transformada de *Stockwell* agrupadas com árvores de regressão e *Fuzzy C-Means (FCM)*.

### **3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O diagnóstico de falhas em sistemas de potência inclui a detecção da origem de falhas com a identificação e localização do evento ocorrido nesses sistemas. Sendo assim, para evitar danos e custos extras para manutenção da QEE, o setor elétrico tem estimulado o desenvolvimento de tecnologias dedicadas ao diagnóstico de falhas no sistema de energia elétrica. Conforme apresentado neste Capítulo, tais sistemas visam antecipar alguns

problemas e auxiliar na tomada de decisões tanto em operação em tempo real como em ambientes de planejamento.

As técnicas de RL, RNA e AR apresentadas neste Capítulo, são explicadas individualmente no Capítulo 4, com o intuito de evidenciar sua importância e particularidades durante análise dos resultados gerados.

## CAPÍTULO 4

### 4. METODOLOGIAS APLICADAS

#### 4.1. INTRODUÇÃO

No decorrer da história, a energia elétrica tornou-se um elemento importante no processo evolutivo da humanidade, sendo uma das mais utilizadas. A cada ano a procura por energia cresce e, junto a ela, tem crescido a necessidade de melhoria da qualidade da energia elétrica para tornar os sistemas mais eficientes e disponíveis para os usuários. O potencial energético demonstrou-se elevado, tornando-se componente importante na economia global e uma grandeza a ser medida, monitorada e corrigida, em caso de necessidade.

Analisar, quantificar e qualificar a qualidade da energia elétrica é um dos novos problemas que surgiram com as melhorias e modernizações dos sistemas elétricos, sendo assim, a ANEEL, com o objetivo de estabelecer base para o monitoramento e controle, faz recomendações para os limites mínimos e máximos dos indicadores de qualidade através do PRODIST.

Segundo Ciufu *et al.* (2017), as fontes de energia não lineares estão presentes em quase todos os dispositivos eletrônicos conectados à rede de alimentação e, por sua própria natureza distorcida destes tipos de cargas, tem influenciado a qualidade da energia elétrica gerando níveis harmônicos indesejados nas formas de onda de corrente e tensão dos sistemas de energia. Em seu trabalho, dentre os problemas de QEE, Vlahinic *et al.* (2009), demonstra preocupação com os índices de DHT na rede elétrica e a necessidade de quantificar a mesma. Contudo, ainda há de se considerar que estimar a contribuição de múltiplas fontes harmônicas num ponto qualquer de um sistema elétrico não é uma tarefa fácil, devido as correntes harmônicas provenientes das diversas cargas não lineares presentes neste sistema podem se cancelar ou se somar de tal forma a diminuir ou aumentar os níveis de distorção harmônica de tensão do mesmo.

No presente trabalho é realizado um estudo para quantificar os impactos harmônicos em duas redes elétricas com níveis de carregamento diferente, sendo o estudo de caso 1 em uma instituição de ensino superior em Belém – Pará, e o Estudo de Caso 2 em um polo industrial

em Manaus – Amazonas, no qual aplica-se a metodologia descrita nesta seção, utilizando técnicas computacionais (regressão linear, redes neurais artificiais e árvores de regressão) e medições no PAC entre os usuários finais e a concessionária. A metodologia visa identificar os alimentadores que causam maior impacto harmônico na rede e, a título de comparação entre as técnicas utilizadas, determinar quais das técnicas apresenta maior acurácia em sua análise em diferentes intervalos de tempo, sendo estes semanal (conforme determinação do PRODIST), diário e em patamar de carga (de acordo com a curva de carga do local em questão).

#### 4.2. CONCEITO DAS TÉCNICAS COMPUTACIONAIS

No Capítulo 2 desta dissertação é possível verificar alguns equipamentos causadores de distorções harmônicas no sistema, bem como os diversos efeitos ocasionados aos equipamentos eletroeletrônicos dos clientes finais e na própria rede das concessionárias, responsáveis em garantir a qualidade e estabilidade do sistema elétrico. Com isto, o estudo da distorção harmônica de um SEP tem como objetivo avaliar a influência das diversas cargas geradoras de harmônicos nos diferentes pontos da rede elétrica. Para tal, é necessário considerar que as cargas geradoras de harmônicos injetam correntes harmônicas nas redes de distribuição, permitindo modelá-las como fontes de correntes harmônicas. Sendo que, tais correntes harmônicas, ao fluir por meio das impedâncias dos cabos e transformadores, geram distorções nas formas de onda das tensões nos diversos pontos da rede elétrica.

No capítulo 3, é exposto o trabalho de diversos autores para identificar a origem das distorções harmônicas no PAC por meio de técnicas de IC como RL, RNA e AR, porém, segundo Monticelli (1983), primeiramente, é necessária a formulação do modelo adequado para a análise de um sistema de energia elétrica. Considerando tal modelo linear, este pode ser representado pela matriz de impedância nodal, conforme mostrada na Equação (4-1).

$$E^h = Z^h I^h \quad (\text{Eq. 4-1})$$

Onde:

$E^h$  é o vetor tensão harmônica complexa para cada ordem harmônica  $h$ , com módulo igual  $V^h$  e ângulo igual a  $\alpha^h$ ;

$I^h$  é o vetor corrente harmônica complexa para cada ordem  $h$ , com o módulo igual à  $I^h$  e ângulo de fase igual a  $\gamma^h$ ;

$Z^h$  é a matriz de impedâncias harmônicas de ordem  $h$ ;

Através da Equação (4-2) pode-se determinar a contribuição da corrente harmônica da carga na tensão em um ponto da rede  $i$ .

$$E_i^h = Z_{ij}^h I_j^h + \sum_{k=1}^n Z_{ik}^h I_k^h \quad (\text{Eq. 4-2})$$

Sendo  $i \neq j$

Onde:

$n$  – número de cargas;

$Z_{ij}^h I_j^h$  – é a distorção harmônica de tensão devido à corrente da carga não linear  $j$ ;

$\sum_{k=1}^n Z_{ik}^h I_k^h$  – é a tensão harmônica *background*, devido às outras cargas não lineares.

A rede elétrica pode ser considerada uma rede linear, então, na Equação (4-2), o termo  $Z_{ik}^h I_k^h$  representa a contribuição harmônica devido à carga não linear  $j$  na tensão harmônica, enquanto que o termo  $\sum_{k=1}^n Z_{ik}^h I_k^h$  representa a contribuição devido a outras cargas. Porém, sabe-se que em uma rede elétrica real, devido à saturação magnética de reatores e transformadores, esta suposição não é correta, uma vez que esses equipamentos costumam introduzir distorções harmônicas de tensão significantes em  $E^h$ .

Com base na Equação (4-2), a contribuição de cada corrente harmônica  $I_j^h$  na tensão harmônica  $E_j^h$  pode ser exatamente determinada, caso a impedância de transferência  $Z_{ij}^h$  seja conhecida para cada condição operacional, sendo este normal em sistemas elétricos reais. Ou seja, existe certa dificuldade para aplicar a Equação (4-2), tendo em vista que é necessário obter os elementos não lineares da rede, assim como as medições simultâneas do módulo e ângulo de fase das tensões e de correntes harmônicas no PAC.

Os modelos estatísticos apresentados não representam uma relação causal, mas sim uma correlação entre duas variáveis, isto significa que uma variável pode explicar o comportamento da outra (Mazin *et al.*, 2011). Logo, neste Capítulo, é exposto a metodologia para avaliar a relação entre os módulos das tensões e de correntes harmônicas ( $E_i^h$  e  $I_j^h$ ),

por meio das técnicas de RL, RNA e AR. Cada uma das três técnicas utilizadas para a análise da contribuição das cargas não lineares na distorção harmônica das tensões da rede elétrica, apresentam peculiaridades próprias que as fazem mais adequadas para certas aplicações, contudo, todas são capazes de determinar o nível de impacto causado pela distorção harmônica e seu respectivo grau de confiabilidade.

#### **4.2.1. Regressão Linear**

Costa (2012), define que os modelos estatísticos são extremamente úteis na análise de séries temporais e na modelagem da expectativa para prever o valor de uma variável em função de outras variáveis, além de avaliar o comportamento da série e quais os fatores que influenciaram, obtendo a relações de causa e efeito entre as variáveis propostas.

Em Yan (2009), classifica-se a análise de regressão como um método estatístico, agrupada em um conjunto de técnicas capaz de descobrir a relação existente entre uma variável aleatória (variável resposta) e uma ou mais variáveis aleatórias (variáveis regressoras), sendo que o produto da análise de regressão é um modelo de regressão ou função de regressão, que contém uma descrição simples de um processo. Com isto, os principais objetivos da análise de regressão são:

- Estabelecer uma relação de causa e efeito entre duas ou mais variáveis;
- Prever o valor da variável resposta para um conjunto de valores das variáveis regressoras;
- Investigar as variáveis regressoras, a fim de identificar quais variáveis são mais importantes para descrição da variável resposta.

De acordo com Crawley (2005), a essência da análise da regressão é a utilização das amostras de dados para estimar parâmetros de valores e os seus erros mais comuns, de modo que existe a necessidade de escolher um modelo que descreva a relação entre a variável resposta e a variável explicativa, podendo esta ser utilizada nos seguintes modelos de regressão:

- Regressão Polinomial – capaz de ajustar um modelo polinomial (expansão polinomial da variável preditiva) a não linearidade em uma relação;

- Regressão não-linear – permite determinar um modelo não linear para os dados estudados;
- Regressão não paramétrica – utilizada quando não há uma forma funcional concreta;
- Regressão Linear – possui maior simplicidade e, por isto, é frequente utilizada.

Nesta seção, são abordados alguns conceitos fundamentais sobre os métodos de regressão simples e múltipla.

### **Regressão linear simples**

A regressão linear simples é um método estatístico que busca relacionar uma variável aleatória, denominada de variável resposta, a uma única variável aleatória regressora, condicionado à equação de uma reta, conforme mostrado na Equação (4-3).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (\text{Eq. 4-3})$$

Onde:

$Y$ : é uma variável aleatória resposta;

$\beta_0, \beta_1$ : são constantes;

$\epsilon$ : é o erro.

Segundo Charnet *et al.* (1999), o ajuste da curva de regressão é realizado com base no método dos mínimos quadrados, que, por sua vez, determina a reta que apresenta a menor soma de quadrados dos resíduos (erros), conforme apresentado na Figura (4-1). Com a aplicação do método dos mínimos quadrados, os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  do modelo de regressão mostrado na Equação (4-3) são estimados de acordo com as Equações (4-4) e (4-5), respectivamente.

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{y} - \widehat{\beta}_1 \bar{x} \quad (\text{Eq. 4-4})$$

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Eq. 4-5})$$

Onde:

$\widehat{\beta}_0$  e  $\widehat{\beta}_1$ : são os estimadores mínimos quadrados;

$\bar{y}$  e  $\bar{x}$ : são as médias das variáveis aleatórias Y e X.

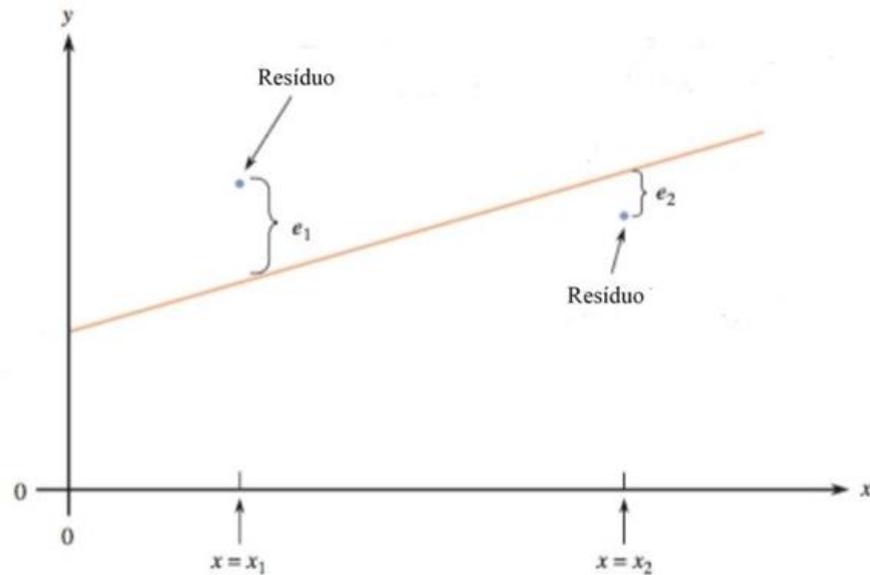


Figura 4-1 - Ajuste de uma reta por meio do princípio dos mínimos quadrados. Fonte: Peck, Olsen e Devore, 2012.

Através da Figura (4-2), pode-se observar que a parte determinística do modelo é numericamente igual à média da distribuição normal e a variância do mesmo representa a variabilidade das variáveis aleatórias.

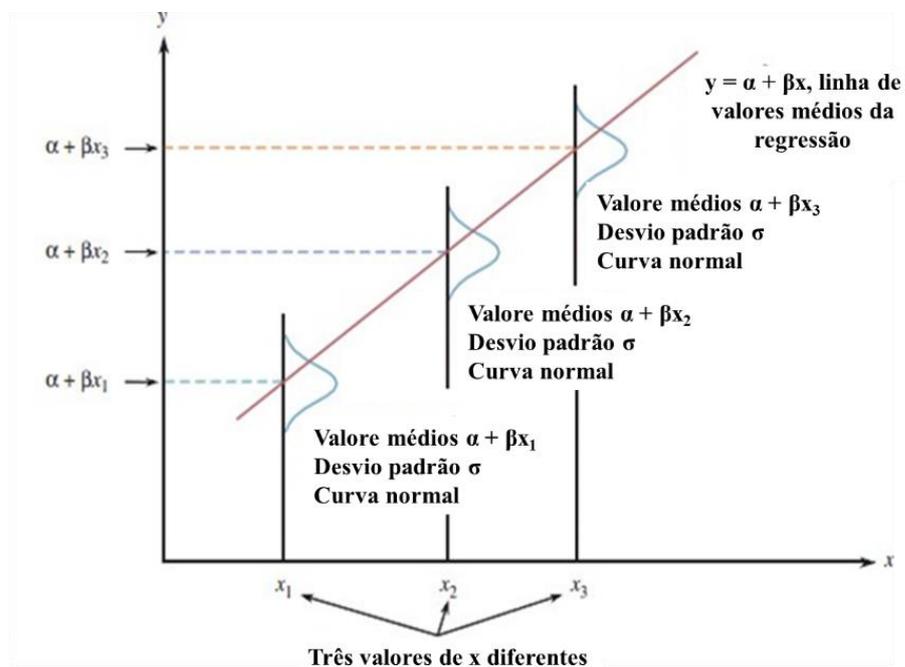


Figura 4-2 - Modelo de regressão linear simples. Fonte: Peck, Olsen e Devore, 2012.

Para certificar que o modelo de regressão obtido é adequado para explicar a relação entre as variáveis resposta e regressora, após obtido o modelo da regressão linear simples, é feita análise da variância deste, que utiliza técnicas da inferência estatística para testar a

hipótese nula, que representa a possibilidade de o parâmetro  $\beta_1$  (declividade da reta) ser nulo, e a hipótese alternativa, que representa a possibilidade desse mesmo parâmetro não ser nulo.

Dentre as definições para buscar os impactos na rede, tem-se o coeficiente linear que é definido como a tensão de background ( $V_{BG}$ ), sendo esta a distorção de tensão no barramento de interesse proveniente do sistema elétrico como um todo, desconsiderando a fonte não linear ( $I_h$ ) selecionada para o estudo. Conforme demonstrado em Manito *et al.* (2016), a cada valor de tensão estimada da fonte ( $V_T$ ) é calculado o impacto da tensão de background e, caso o coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) seja maior ou igual a 0 (zero), o Fator de Impacto (IF, do inglês *Impact Factor*) pontual é calculado pela Equação (4-6), caso contrário, assume-se que a correlação é inversa e o IF é calculado pela Equação (4-7). Por fim, o IF da fonte é obtido pelo impacto da tensão de background conforme Equação (4-8).

$$IF_{V_{BG}i}^h(\%) = \frac{V_{BG} \cdot 100\%}{V_{Ti}} \quad (\text{Eq. 4-6})$$

$$IF_{V_{BG}i}^h(\%) = \frac{V_{Ti} \cdot 100\%}{V_{BG}} \quad (\text{Eq. 4-7})$$

$$IF_{V_{Ti}}^h(\%) = 100,0 - IF_{V_{BG}i}^h(\%) \quad (\text{Eq. 4-8})$$

O fator de impacto geral é obtido pela média aritmética simples dos impactos ponto a ponto, conforme Equação (4-9) e Equação (4-10).

$$IF_{V_{BG}i}^h(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N IF_{V_{BG}i}^h(\%) }{N} \quad (\text{Eq. 4-9})$$

$$IF_{V_{Ti}}^h(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N IF_{V_{Ti}}^h(\%) }{N} \quad (\text{Eq. 4-10})$$

Durante a análise de variância são obtidos três parâmetros, sendo a soma de quadrados total (SQT), a soma de quadrados dos erros (SQE) e a soma de quadrados de regressão (SQReg). As Equações (4-11), (4-12) e (4-13) apresentam os cálculos dos respectivos parâmetros.

$$SQT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Eq. 4-11})$$

$$SQE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{Eq. 4-12})$$

$$SQReg = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Eq. 4-13})$$

Onde,

$\hat{y}_i$  é o valor estimado da variável  $y$  pelo modelo de regressão;

$\bar{y}$  é a média da variável  $y$ ;

$y_i$  é o valor da variável  $y$  utilizado para construir o modelo de regressão;

O coeficiente de determinação  $R^2$  é o indicador estatístico utilizado para avaliar o grau de confiabilidade do modelo gerado pela análise de regressão. Com base nos três parâmetros apresentados, a Equação (4-14) mostra a expressão do fator de determinação  $R^2$ .

$$R^2 = \frac{SQReg}{SQT} \quad (\text{Eq. 4-14})$$

O coeficiente de determinação é uma métrica que representa o grau de ajuste do modelo de regressão em relação à amostra de dados, ou seja, é uma medida que mostra o quanto o modelo de regressão é capaz de representar a correlação existente entre as variáveis dependente e independente.

O código do algoritmo para análise do impacto harmônico para uma única carga utilizado no software SISQEE pode ser encontrado no Anexo A.

De acordo com Costa (2012), o coeficiente  $R^2$  é uma medida estatística que tem o objetivo de informar o quanto a variável independente contribui para o comportamento da variável dependente, podendo ser utilizado para medir a intensidade da correlação entre a resposta e as variáveis independentes, em um modelo de regressão. Conforme apresentado na Tabela 4-1, o intervalo de variação  $R^2$  situa-se na faixa de 0 a 100%, sendo que, quanto mais próxima de 0%, o modelo adotado não explica a realidade, enquanto que, quanto mais próximo de 100%, o modelo oferece toda a realidade dos dados de resposta.

Tabela 4-1 - Caracterização do grau de correlação nos modelos de regressão de acordo com os valores de  $R^2$ . Fonte: Costa, 2012.

Valor do $R^2$	Grau de Correlação
0,00	(N) Nenhuma
(0,00 – 0,09)	(B) Baixa
(0,09 – 0,36)	(M) Moderada
(0,36 – 0,81)	(A) Alta
(0,81 – 0,98)	(MA) Muito Alta
1,00	(P) Perfeita

## Regressão Linear Múltipla

Para comparação entre as técnicas computacionais, na dissertação em questão, se fez necessário que as mesmas contivessem os mesmos parâmetros ou avaliadas pelas mesmas métricas, sendo a regressão linear simples diferente das demais, optou-se em utilizar a regressão linear múltipla (RLM). A equação da reta da RLM foi gerada através do software R, que segundo Soares (2012), é um software estatístico disponível na internet sob uma licença pública geral. O software possui um conjunto de ferramentas integradas voltadas para a manipulação de dados, cálculos matemáticos e exibição de gráficos. O código utilizado pode ser encontrado nos anexos.

A análise de uma RLM segue, basicamente, os mesmos critérios da análise de uma regressão simples, contudo, consiste em uma relação casual, adequada para se investigar simultaneamente os efeitos sobre duas ou mais variáveis preditoras. O modelo matemático da RLM é descrito da Equação (4-15).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \dots + \beta_m x_{mj} + \epsilon \quad (\text{Eq. 4-15})$$

Onde,

Y é a variável dependente;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  e  $\beta_m$  são coeficientes de regressão parciais;

$x_{1j}, x_{2j}$  e  $x_{mj}$  são variáveis independentes.

$j = 1, 2, 3, \dots$

Também na regressão múltipla, as estimativas dos mínimos quadrados são obtidas pela escolha dos estimadores que minimizam a soma dos quadrados dos desvios entre os valores observados  $y_i$  e os valores ajustados Y, em que a solução dos mínimos quadrados é a que minimiza a soma dos quadrados dos desvios entre os valores observados e a superfície de regressão ajustada, conforme a Equação (4-16).

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left( y_i - (\bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_1 x_{1i} + \dots + \bar{\beta}_k x_{ki}) \right)^2 \quad (\text{Eq. 4-16})$$

Onde,

$y_i$  é a variável dependente;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  e  $\beta_m$  são coeficientes de regressão parciais;

$x_{1j}, x_{2j}$  e  $x_{kj}$  são variáveis independentes.

$k = 1, 2, 3...$

Sendo assim, a regressão linear múltipla permitiu que fossem realizadas comparações entre a combinação de diversos alimentadores e o resultado delas no impacto harmônico.

A comparação do erro absoluto médio (EAM), foi possível também através da utilização do Matlab, de modo que este realizou a conversão dos valores por meio das Equações (4-17), (4-18) e (4-19). A Equação (4-17) permite encontrar a diferença entre as tensões real e estimada; e na Equação (4-18), o valor é subtraído por 0 (zero), pois o EAMref possuirá 100 % de erro quando o valor estimado for igual a 0 (zero); enquanto a Equação (4-19) representa percentualmente o valor de EAM.

$$EAM_{rl} = \frac{|sum[abs(v_{medido} - v_{estimado_{rl}})]|}{[length(v_{medido})]} \quad (\text{Eq. 4-17})$$

$$EAM_{ref} = \frac{|sum[abs(v_{medido} - 0)]|}{[length(v_{medido})]} \quad (\text{Eq. 4-18})$$

$$EAM_{percentual} = \frac{(EAM_{rl} \times 100)}{(EAM_{ref})} \quad (\text{Eq. 4-19})$$

#### 4.2.2. Redes Neurais Artificiais

Segundo Haykin (2001), o cérebro tem a capacidade de organizar seus neurônios, de forma a realizar processamentos muito mais rápido do que o mais rápido computador digital hoje existente.

Dentre os sistemas de computação, as RNA são os sistemas que se assemelham à estrutura do cérebro humano, por isto, a solução de problemas por meio desta técnica tem sido mais atrativa (Braga et al., 2007).

Partindo de um modelo biológico de um neurônio para um modelo artificial, uma RNA também possui a capacidade de modelar uma determinada tarefa e solucionar diversos tipos de problemas que não apresentem um modelo determinístico ou de fácil implementação, como é o caso de problemas não lineares. Com isto, nesta seção são apresentados conceitos referentes às RNAs, mostrando o modelo de um neurônio natural e artificial, a classificação

das redes neurais segundo alguns critérios, bem como, de maneira mais detalhada, as redes de múltiplas camadas alimentadas diretamente.

### Neurônio biológico

Para melhor compreensão dos neurônios artificiais, Minussi e Lotufo (2000), modelaram um neurônio biológico e dividiu o mesmo em quatro partes apresentados a seguir. A Figura (4-3) possibilita a visualização do modelo do neurônio biológico com todas as partes descritas.

- Dendritos: recebe as informações de outros neurônios e as conduz ao corpo celular;
- Corpo Celular: recebe e gera os impulsos nervosos, parte central do neurônio;
- Axônio: transmite os impulsos nervosos aos outros neurônios, por meio de ligações chamadas de sinapses;
- Sinapse: efetua o contato entre a terminação axônica de um neurônio e o dendrito do outro.

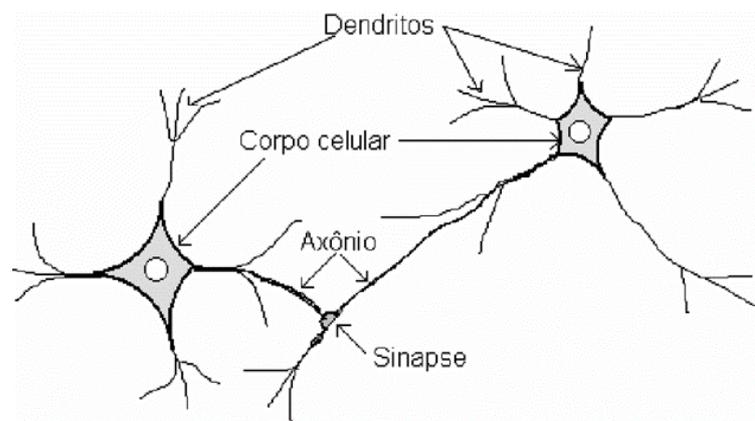


Figura 4-3 – Partes do Neurônio Biológico. Fonte: Minussi e Lotufo, 2000.

### Neurônio artificial

Em 1943, foi proposto por McCulloch e Pitts um modelo inicial de um neurônio artificial, em que a descrição matemática resultou em  $n$  terminais de entrada ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ) que representam os dendritos, e apenas um terminal de saída  $y$ , representando o axônio. Para igualar o comportamento das sinapses, os terminais de entrada do neurônio possuem pesos acoplados ( $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ), cujos valores podem ser positivos (excitatórias) ou negativos (inibitórias), dependendo das sinapses. Além disto, os pesos determinam o grau que o

neurônio deve considerar sinais de disparos ocorridos naquela conexão (Braga *et al.*, 2007). A Figura (4-4) ilustra o modelo mencionado neste parágrafo.

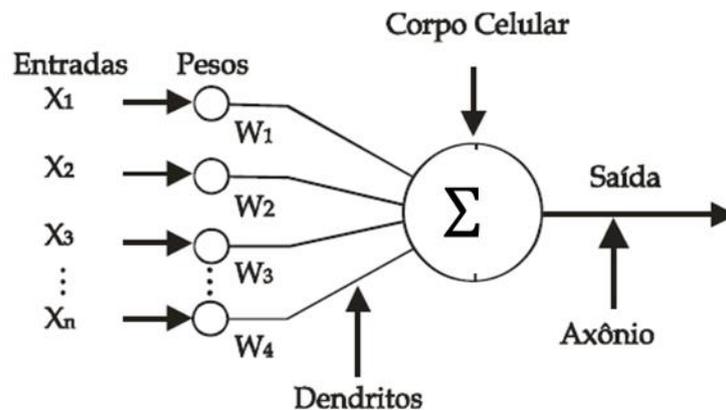


Figura 4-4 – Modelo de um neurônio artificial. Fonte: Braga *et al.*, 2007.

Atualmente, os projetos de RNA levam em consideração o modelo de neurônio formulado por Haykin (2001), onde este define que um neurônio é uma unidade de processamento de informação que é fundamental para a operação de uma rede neural, visto que o neurônio artificial simula as características fundamentais do neurônio natural. O modelo de neurônio artificial criado por Haykin é mostrado na Figura (4-5) e, em seguida, pode-se destacar três elementos básicos do modelo do neurônio artificial.

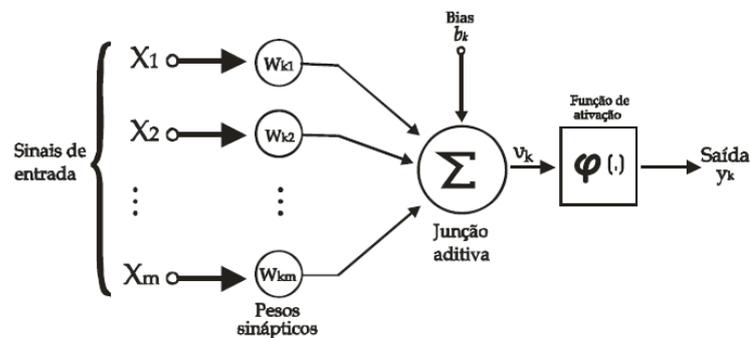


Figura 4-5 – Modelo não linear de um neurônio. Fonte: Haykin, 2001.

- Sinapses - caracterizada por um peso, a qual irá ser multiplicada pelo sinal de entrada da referida sinapse;
- Somador - efetua a soma os sinais de entrada, ponderadas pelos seus respectivos pesos sinápticos;
- função de ativação - limita o intervalo permissível de amplitude do sinal de saída a um valor finito.

Em termos matemáticos, um neurônio  $k$  pode ser descrito de acordo com as seguintes equações:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (\text{Eq. 4-20})$$

$$v_k = u_k + b_k \quad (\text{Eq. 4-21})$$

$$y_k = \phi(v_k) \quad (\text{Eq. 4-22})$$

Onde,

$x_1, x_2, \dots, x_m$  – representam os dentritos como sinais de entrada;

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$  – são os pesos sinápticos do neurônio k

$u_k$  – saída do combinador linear devido aos sinais de entrada;

$b_k$  – bias;

$\phi(v_k)$  – função de ativação; e

$y_k$  – sinal de saída do neurônio.

O uso do bias ( $b_k$ ) tem o efeito de aplicar uma transformação na saída  $u_k$  do combinador linear da Equação (4-21), visto que o mesmo possui o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação, dependendo se ele é positivo ou negativo, respectivamente.

A aprendizagem de uma rede neural artificial corresponde ao processo de ajustes dos pesos sinápticos, mediante aos estímulos recebidos pela rede, de tal forma a capturar o conhecimento do sistema (ambiente) no qual irá operar. Braga *et al.* (2007), tratam a aprendizagem como um processo iterativo de ajuste de parâmetros da rede, em que os pesos das conexões armazenam o conhecimento que a rede adquiriu do ambiente no qual está operando. Em Haykin (2001), é mencionado que existem diversos algoritmos de treinamento que definem como o valor de cada peso deve ser alterado, geralmente seguindo regras já definidas, como associação de padrões, reconhecimento de padrões e aproximação de funções.

Os principais paradigmas de aprendizado são (Pereira, 2009):

- Supervisionado - possui o conhecimento do ambiente a ser analisado e sua função é observar as respostas da rede para cada entrada, comparando com a saída e ajustando os parâmetros para que se possa encontrar uma ligação entre os dados de entrada e de saída.

Quando a condição ideal é alcançada, o professor é dispensado e a rede neural lida com o ambiente inteiramente por si mesma;

- Não supervisionado - não há esse supervisor intervindo no processo de entrada e saída, ou seja, não há exemplos rotulados do ambiente a ser aprendido pela rede, de tal forma que a rede deve aprender a partir de técnicas de agrupamento, por exemplo.

Uma rede neural artificial pode ser constituída de uma unidade simples e exercer tarefas aplicadas tanto para a regressão quanto para a classificação, dependendo do algoritmo de treinamento e da problemática escolhida. Contudo, na maioria das aplicações, o uso de apenas um neurônio artificial não é suficiente, uma vez que este possui apenas uma não linearidade, ou seja, como no cérebro humano, quanto mais complexa a tarefa a ser executada, mais neurônios são necessários para sua realização.

Os *Perceptron* de múltiplas camadas (MLP, do inglês, *Multi Layer Perceptron*) têm sido aplicados com sucesso para resolver diversos problemas difíceis, através do seu treinamento de forma supervisionada, contudo, a escolha da topologia adequada para cada aplicação é uma tarefa difícil, baseada principalmente na experiência do desenvolvedor da rede. Como não existem regras para definir uma topologia, muitas vezes, a concepção de uma topologia é obtida através do método de tentativa e erro, baseando-se sempre em trabalhos anteriores. A estrutura típica de uma rede *Perceptron* Multicamada contém:

- Uma camada de entrada - responsável por apresentar os padrões de entrada à rede, porém não realiza nenhum processamento;
- Uma ou mais camadas ocultas - funciona como extratores de características e com a codificação interna dessas características traduzindo-se no ajuste dos pesos sinápticos;
- Uma camada de saída - possui a função de construir os padrões de resposta da rede.

A Figura (4-6) ilustra a arquitetura de um *Perceptron* de múltiplas camadas com duas camadas ocultas e uma camada de saída (Haykin, 2001).

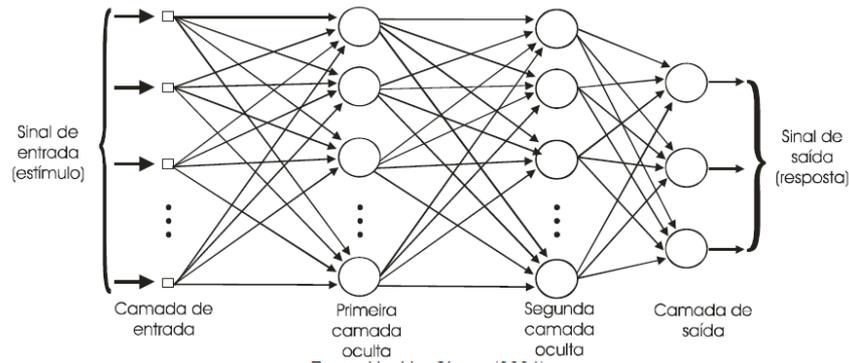


Figura 4-6 - Exemplo de arquitetura de um *Perceptron* de múltiplas camadas com duas camadas ocultas. Fonte: Haykin, 2001.

Para medir a contribuição relativa de cada carga não linear na distorção harmônica de tensão, é sugerido um fator de impacto percentual ( $IF_{VIj}^h(\%)$ ). Conforme proposto por Manito *et al* (2016), os fatores de impacto podem ser interpretados como valores percentuais relativos que são calculados para cada corrente individualmente, sendo assumido que esses impactos somam 100%, de acordo com a Equação (4-23).

$$IF_{VI1}^h(\%) + IF_{VI2}^h(\%) + \dots + IF_{VIp}^h(\%) = 100\% \quad (\text{Eq. 4-23})$$

Ainda na proposição de Manito *et al* (2016), o fator de impacto percentual (Equação (4-25)) pode ser obtido por meio da métrica para calcular o erro (Equação (4-24)) entre a série temporal de tensão estimada inicial e a série temporal de tensão estimada, quando cada corrente varia em função do tempo. A partir da formulação do EAM, pode se escrever que:

$$EAM_{jnew}^h = \frac{\sum_{k=1}^T |v_{xjnew}^h(k) - v_x^h(k)|}{T} \quad (\text{Eq. 4-24})$$

$$IF_{VIj}^h(\%) = \frac{MAE_{jnew}^h}{\sum_{j=1}^p MAE_{jnew}^h} \times 100\% \quad (\text{Eq. 4-25})$$

O código do algoritmo para análise do impacto harmônico para múltiplas cargas utilizado no software SISQEE pode ser encontrado no Anexo A.

Dentre as características das RNAs, destacam-se (Bordignon, 2012):

- O mapeamento de entrada/saída, com aprendizado a partir de exemplos;
- A adaptabilidade, devido os pesos sinápticos da rede se adaptarem a medida que o meio ambiente sofre modificações;
- A capacidade de generalização, visto que a rede é capaz de responder adequadamente a entradas que não lhe foram apresentadas durante a fase de treinamento;

- A capacidade para modelar fenômenos físicos não lineares;
- A tolerância a falhas devido à natureza distribuída da informação armazenada na rede neural; e
- A rápida implementação do modelo proposto.

### 4.2.3. Árvores de Regressão

Os métodos utilizados na AR, avalia os impactos causados por vários pontos de medição em relação a um ponto de referência, assim como na técnica de RNA. Para o processo de estimação é estimada a tensão harmônica na barra de interesse a partir do conhecimento adquirido no processo de aprendizagem, sendo utilizados, no momento de estimação, dados de entrada desconhecidos para o modelo desenvolvido. A forma de cálculo dos fatores de impacto da AR também segue a técnica de RNA.

Segundo Castanheira (2009), os primeiros trabalhos baseados em árvores de regressão surgiram no final da década de 50, a começar por Hunt que apresentou experimentos para formulação de padrões, seguido de Breiman (1984), que desenvolveu o algoritmo CART (*Classification And Regression Trees*), Quinlan, que desenvolveu o algoritmo ID3 (*Iterative Dichotomiser 3*, 1986) e C4.5 (1993); e o Microsoft SQL Server (Seidman, 2001), que implementa árvores de regressão para problemas de classificação e regressão.

Os algoritmos das árvores de regressão mencionados são considerados precursores e diversas variações que surgiram deles utilizam a mesma estratégia que consiste em dividir para conquistar, ou seja, seguida por uma série de declarações de se-então (*if-then*, do inglês) e construídas com base no modelo hierárquico de cima para baixo (*top-down*, do inglês), isto é, do nó raiz em direção às folhas. As árvores de regressão classificam os registros da base de dados de entrada e efetua sucessivas divisões do problema estudado em vários subproblemas de menores dimensões, até que seja encontrada uma solução mais simples para cada um dos problemas.

Como objetivos para classificação por árvores de regressão, Safavian e Landgrebe (1991), mencionam que estas devem possuir uma estrutura de simples compreensão, facilidade de atualização pelo usuário, além de alta taxa de precisão para classificação das amostras que não foram vistos na base de treinamento.

No trabalho elaborado por Oliveira (2018), as árvores de decisões classificam instâncias, sendo este da raiz da árvore até algum nó folha. Desta forma, cada nó da árvore especifica um ensaio de algum atributo do caso estudado e cada ramo descendente, a partir deste nó, corresponde a um dos valores possíveis para este atributo. Como exemplo é feita a classificação, iniciando no nó raiz da árvore, testando o atributo especificado por este nó e, em seguida, movendo-se para baixo, com isto, o galho de árvore corresponde ao valor do atributo no exemplo dado.

Para sua aprendizagem, uma árvore de regressão tem seus atributos de entrada divididos em contínuos, chamada de regressão, ou discretos, chamada de classificação (Russell e Norvig, 2003). As árvores de decisões, segundo Prass (2009), possuem forma de execução simples pois, obtendo um conjunto de dados, cabe ao usuário escolher uma das variáveis como objeto de saída, então, o algoritmo encontra o fator mais importante correlacionado com a variável de saída e o define como o primeiro ramo, em seguida, os demais fatores são classificados como nós até que se chegue ao último nível, a folha ou nó terminal.

Com o intuito de prever e explicar a relação entre algumas medições sobre um item e seu valor objetivo, as árvores de regressão, são ferramentas altamente eficazes em áreas como lógica, gestão, estatísticas, a mineração de texto, extração de informações, aprendizado de máquina e reconhecimento de padrões. De acordo com Nogueira (2015), o algoritmo de classificação utilizado em árvores de regressão é uma das tarefas mais importantes em mineração de dados, pelo fato de estar sendo aplicada para resolver problemas relacionados a diferentes áreas, como administração, finanças, educação, saúde e outros.

O código do algoritmo para análise do impacto harmônico para múltiplas cargas utilizado no software SISQEE pode ser encontrado no Anexo A. A Tabela (4-2) demonstra exemplo de parte do algoritmo criado para efetuar as relações causa-efeito da árvore de regressão que levam ao menor valor de distorção harmônica de tensão. Se tratando de análise de sistemas de redes de distribuição elétrica trifásica, são feitas diferenciações entre as fases A, B ou C do sistema e, também, de qual harmônico está sendo analisado. Sendo assim, são estipulados valores de correntes e ações para os alimentadores (In\_Alimentador\_A, B, C ou D) e de tensão para o ponto de acoplamento comum (Vn\_PAC).

Tabela 4-2 – Exemplo de relações causa-efeito da AR que levam ao menor valor de distorção harmônica de tensão. Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó da Árvore	Regras
1	Se In_Alimentador_A < 0,54 Então Nó 2 Senão Nó 23
2	Se In_Alimentador_B < 0,45 Então Nó 3 Senão Nó 14
3	Se In_Alimentador_C < 0,64 Então Nó 4 Senão Nó 9
4	Se In_Alimentador_D < 1,47 Então Nó 5 Senão Nó 8
5	Se In_Alimentador_B < 0,43 Então Nó 6 Senão Nó 7
6	V <sub>n_PAC</sub> = 42,40 V
7	V <sub>n_PAC</sub> = 59,41 V
8	V <sub>n_PAC</sub> = 57,27 V
9	Se In_Alimentador_D < 1,67 Então Nó 10 Senão Nó 11
10	V <sub>n_PAC</sub> = 37,13 V
11	Se In_Alimentador_A < 0,54 Então Nó 12 Senão Nó 13
12	V <sub>n_PAC</sub> = 57,21
13	V <sub>n_PAC</sub> = 40,03
14	Se In_Alimentador_C < 0,77 Então Nó 15 Senão Nó 16
15	V <sub>n_PAC</sub> = 57,11 V
16	Se In_Alimentador_D < 1,63 Então Nó 17 Senão Nó 20

A Figura (4-7) representa a estrutura de uma árvore de regressão hipotética e, em seguida, é mencionado os elementos que a compõe (Monteiro, 2015).

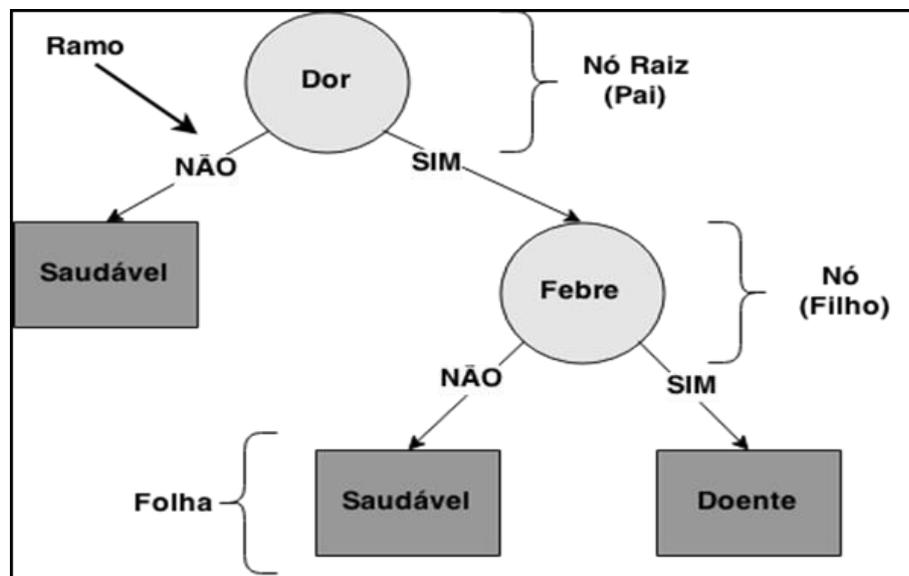


Figura 4-7 – Modelo de árvores de regressão para diagnóstico de pacientes. Fonte: Monteiro, 2015.

- Raiz - é o nó do topo da árvore que segue um caminho na árvore, da raiz até a folha;
- Nós - são todos os elementos que estão conectados por ramos, em que cada nó interno representa um teste em um atributo;

- Ramos - ligações entre nós, onde o ramo que sai de um nó interno representa o resultado do teste no atributo;
- Folhas - são os últimos nós da árvore e representam um rótulo de classe (Sim/Não) do conjunto de dados.

Dentre as características de árvores de regressão, Roiger (2017), destaca vantagens e desvantagens de sua utilização conforme apresentadas na Tabela (4-3):

Tabela 4-3 – Vantagens e desvantagens da AR. Fonte: Roiger, 2017.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• São fáceis de entender e delineiam satisfatoriamente o conjunto de regras de produção;</li> <li>• Já foram aplicadas com sucesso em casos reais;</li> <li>• Não fazem pressupostos anteriores sobre a natureza dos dados;</li> <li>• São capazes de construir modelos com conjuntos de dados contendo números, bem como dados categóricos;</li> <li>• Poder usar a mesma variável em diferentes estágios do modelo, permitindo reconhecer efeitos que certas variáveis produzem sobre outras.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os atributos de saída devem ser categóricos e vários atributos de saída não são permitidos;</li> <li>• Os algoritmos de árvore de regressão são instáveis, de modo que pequenas variações nos dados de treinamento podem resultar em diferentes seleções de atributos em cada ponto de escolha dentro da árvore;</li> <li>• As árvores criadas a partir de conjuntos de dados numéricos podem ser bastante complexas, pois as divisões de atributos para dados numéricos normalmente são binárias.</li> </ul>

Em meio as etapas para construção de uma árvore, a poda da árvore de regressão é considerada como a parte mais importante do processo, haja vista que existem ruídos na base de dados que podem possibilitar que as árvores induzidas classifiquem novos objetos em um modo não confiável, dificultando a compreensão. Contudo, existem métodos de poda como pré-poda ou pós-poda, que podem evitar problemas com ruídos ou erros nos ramos da árvore de regressão. Com isto, temos que:

- Pré-poda - realizada durante a criação da árvore, esta técnica consiste em regras de paradas durante o processo de classificação que previnem a construção de ramos ou sub-árvores muito complexas, que não poderiam melhorar a predição da AR (Faceli *et al.*, 2011);

- Pós-poda - realizada depois da criação de árvore, ou seja, após a árvore ser totalmente construída, ela será podada. Segundo Quinlan (1993), apesar do processo de poda após a construção ser mais lento, este é mais confiável do que a pré-poda, pois eliminando ramos completos possibilita a exclusão de todos os nós abaixo desse ramo e transforma o nó em folha.

### **4.3. METODOLOGIA PROPOSTA PARA OS ESTUDOS DE CASO**

Ao longo desta dissertação foram apresentados diversos trabalhos voltados para a QEE evidenciando as melhorias e modernizações de equipamentos elétricos residenciais e de processos industriais. Também foi mostrado como a utilização de produtos e equipamentos com cargas predominantemente não lineares têm proporcionado à informatização das áreas de escritório e automatização no chão de fábrica, no entanto, para ambas situações, fica evidente o surgimento de novos desafios com relação à QEE, haja vista os impactos oriundos desses equipamentos. O trabalho desenvolvido por Sousa (2017), estima que mais de 50% das cargas americanas e europeias conterão eletrônica de potência no futuro e, com isto, ocorrerá um incremento nos problemas associados aos harmônicos do sistema elétrico de potência devido ao uso de cargas não lineares oriundas das novas tecnologias.

A metodologia proposta neste trabalho é baseada na realização de uma análise de correlação de dados, utilizando técnicas de RL, RNA e AR, de modo a extrair um modelo que descreva a relação existente entre a corrente harmônica de uma carga não linear e a tensão harmônica no PAC da rede elétrica que se deseja analisar, viabilizando uma melhor visualização da influência da carga no nível de distorção harmônica da tensão. A Figura (4-8) exemplifica o ponto de acoplamento comum que delimita as responsabilidades dos consumidores finais e concessionárias quanto aos harmônicos, sejam estes de tensão ou de corrente.

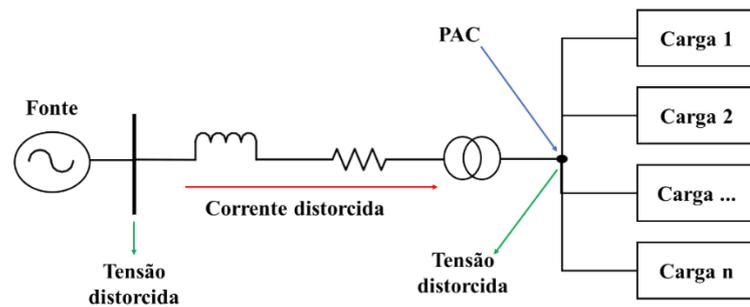


Figura 4-8 – Representação de distorções harmônicas em corrente e tensão considerando o PAC. Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo proposto é construído com base nas medições do valor rms das tensões e correntes harmônicas obtidas em campo por meio de analisadores de QEE. As campanhas de medição apresentadas nesta seção (Figuras (4-9)(a) e (b)), foram realizadas continuamente nos estudos de caso 1 e 2, com duração de 7 (sete) e 10 (dez) dias, respectivamente, com intervalos de integralização de 10 minutos para possibilitar o mínimo de 1.008 medições, conforme determina o PRODIST. Além deste, o intervalo de integralização dos equipamentos de medição exerce uma grande influência na construção dos modelos gerados.



(a)



(b)

Figura 4-9 – Campanha de medição de corrente (a) e tensão (b) realizadas no PAC do sistema elétrico estudado.

Fonte Elaborado pelo autor.

Durante medição os analisadores de QEE utilizados, PW3198 da fabricante Hioki (Figura (4-10)), são capazes de medir tensões, correntes, potências ativa e reativa, energias ativa e reativa, fator de potência, variações de tensão de curta duração (*sags* e *swells*), sobretensões transitórias de baixa, média e alta frequências, *flicker*, desequilíbrios de tensão e corrente, inter-harmônicos, correntes de *inrush*, distorções harmônicas totais de corrente e de tensão e harmônicos individuais de tensão e corrente até a 50<sup>a</sup>. ordem.



Figura 4-10 – Imagens ilustrativas do analisador de QEE HIOKI PW3198. Fonte: HIOKI, 2018.

As medições e análises iniciais dos harmônicos individuais de tensão e corrente foram realizadas até a 50ª ordem harmônica, contudo, como a 5ª ordem harmônica apresentou maior impacto, em ambos os estudos e, com isto, maior importância nos sistemas elétricos, esta será evidenciada nos estudos individuais.

Seguindo os objetivos do trabalho, este Capítulo apresenta uma metodologia para estimar a contribuição de múltiplas fontes harmônicas na distorção harmônica de tensão em um ponto de interesse utilizando as técnicas de RL, RNA e AR por meio do software SISQEE, conforme descrito em Rocha (2017). Os estudos foram realizados em dois sistemas elétricos reais com perfis de cargas distintas de tal forma que, as medições de tensões e de correntes harmônicas, possibilite a construção de modelos que descrevam a relação existente entre essas grandezas, assim como mostrar a sua eficácia frente aos impactos harmônicos.

Ao final de cada estudo de caso, após apresentar os resultados dos impactos obtidos em medições simultâneas das correntes e das tensões harmônicas que compõe o sistema, é apresentado uma comparação do desempenho das três técnicas utilizadas, de modo a evidenciar qual das técnicas entrega as informações desejadas com menor valor de erro do modelo. Para tal, a comparação entre as técnicas é dada pelo mesmo indicador de confiabilidade baseado no erro absoluto médio (EAM), sendo, também, analisado nos três períodos de amostragem (semanal, diário e por patamar de cargas).

#### 4.3.1. Estudo de caso 1: Universidade Federal do Pará – Campus Guamá

A UFPA possui mais de 40 unidades consumidoras espalhadas pelo Estado, contudo, o maior consumo é dado pelo Campus Prof. José de Silveira Neto, conhecido como “Campus

Universitário do Guamá”, por estar localizado na cidade de Belém/PA, às margens do rio Guamá.

Atendida pela Subestação Guamá da concessionária de energia local, com nível de tensão em 13,8 kV, a unidade consumidora (UC-19) alimenta 84 (oitenta e quatro) unidades acadêmicas e/ou administrativas ao longo do campus universitário, em que todas as edificações são atendidas pelos circuitos oriundos da cabine de medição geral, onde é feito o seccionamento da rede interna e instalada a proteção primária geral. A partir do ponto de entrega de energia e medição, o atendimento interno é feito em rede de distribuição primária através de quatro alimentadores, divididas por setor de ensino considerados como Básico 1, Básico 2, Profissional e Saúde ou também conhecidos como alimentadores AL-01, AL-02, AL-03 e AL-04, respectivamente.

Com exceção do alimentador Saúde, que possui cargas específicas da área médica, os demais alimentadores possuem cargas similares, como computadores, sistema de iluminação (fluorescente e led em sua maioria) e aparelhos condicionadores de ar, além de motores e bombas elétricas de pequeno porte. Como resumo, a Tabela (4-4), demonstra as características de cada alimentador e a potência total instalada no campus.

Tabela 4-4 – Dados dos alimentadores da UFPA. Fonte: Prefeitura do Campus Universitário do Guamá, 2018.

ALIMENTADOR	COMPRIMENTO	LOCALIZAÇÃO (CAMPUS)	Nº DE UNIDADES ATENDIDAS	POTÊNCIA (KVA)
AL – 01	1.682,56 m	BÁSICO 1	30	5.587,50
AL – 02	1269,19 m	BÁSICO 2	13	3.775,00
AL – 03	2.055,00 m	PROFISSIONAL	26	5.950,00
AL – 04	2.959,53 m	SAÚDE	15	3.012,50
<b>TOTAL</b>	<b>7.966,28</b>	<b>UFPA</b>	<b>84</b>	<b>18.335</b>

As subestações ao longo do campus são predominantemente aéreas, contendo poucas subestações abrigadas, as quais são alimentadas por ramais subterrâneos advindos da rede aérea. A Figura (4-11) apresenta o diagrama unifilar e as Figuras (4-12), (4-13) e (4-14) o traçado da rede no campus universitário, com as respectivas subestações e seus alimentadores.

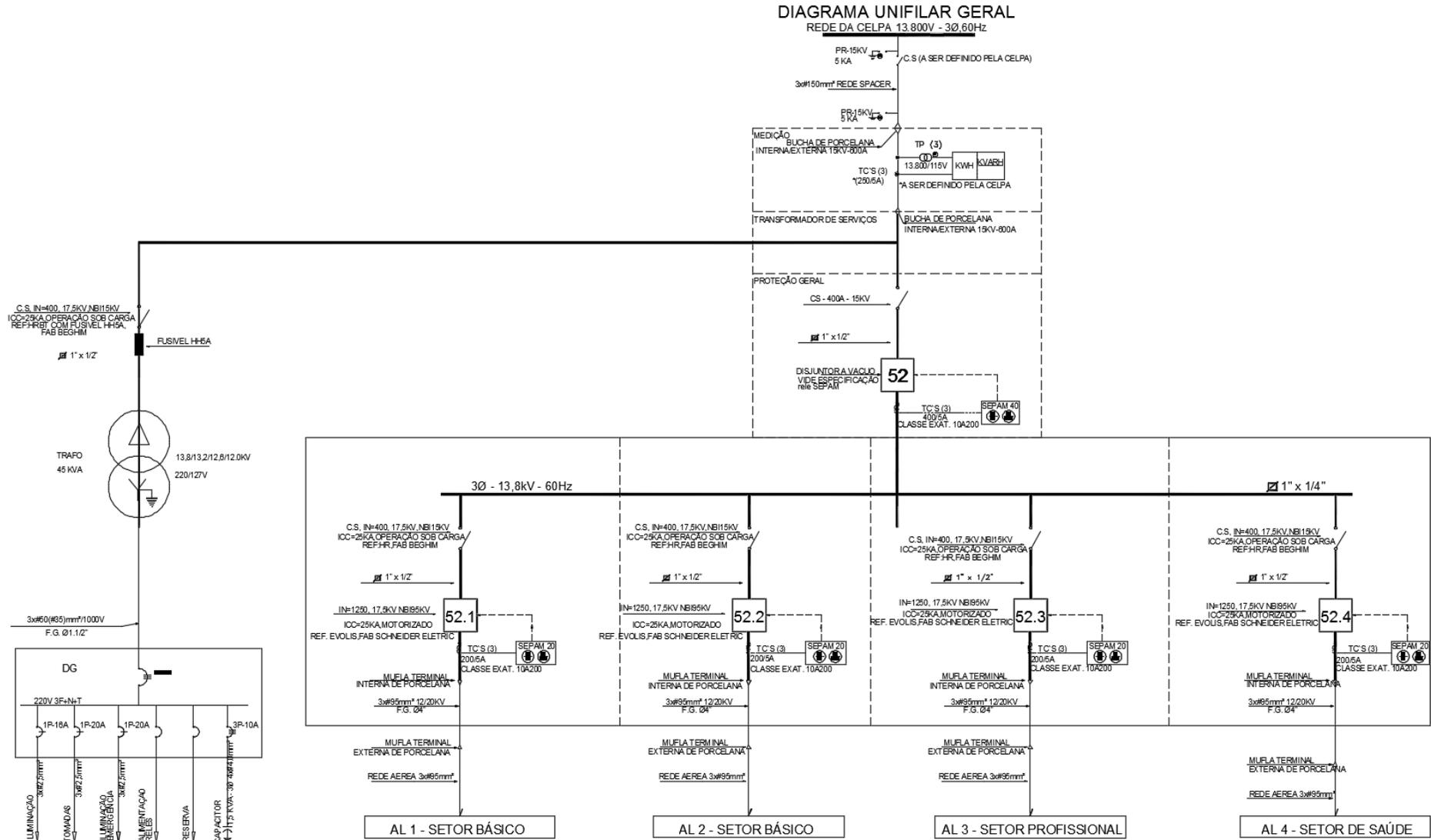


Figura 4-11 – Diagrama Unifilar da UFFA. Fonte: Prefeitura UFFA, 2018.



Na Figura (4-13) é possível verificar a dimensão do alimentador Profissional (AL-03), que possui a maior carga do campus com 5.950 kVA, dentre suas 26 unidades consumidoras que, em sua maioria, é contemplado com blocos de aula e laboratórios, além de prédios administrativos.

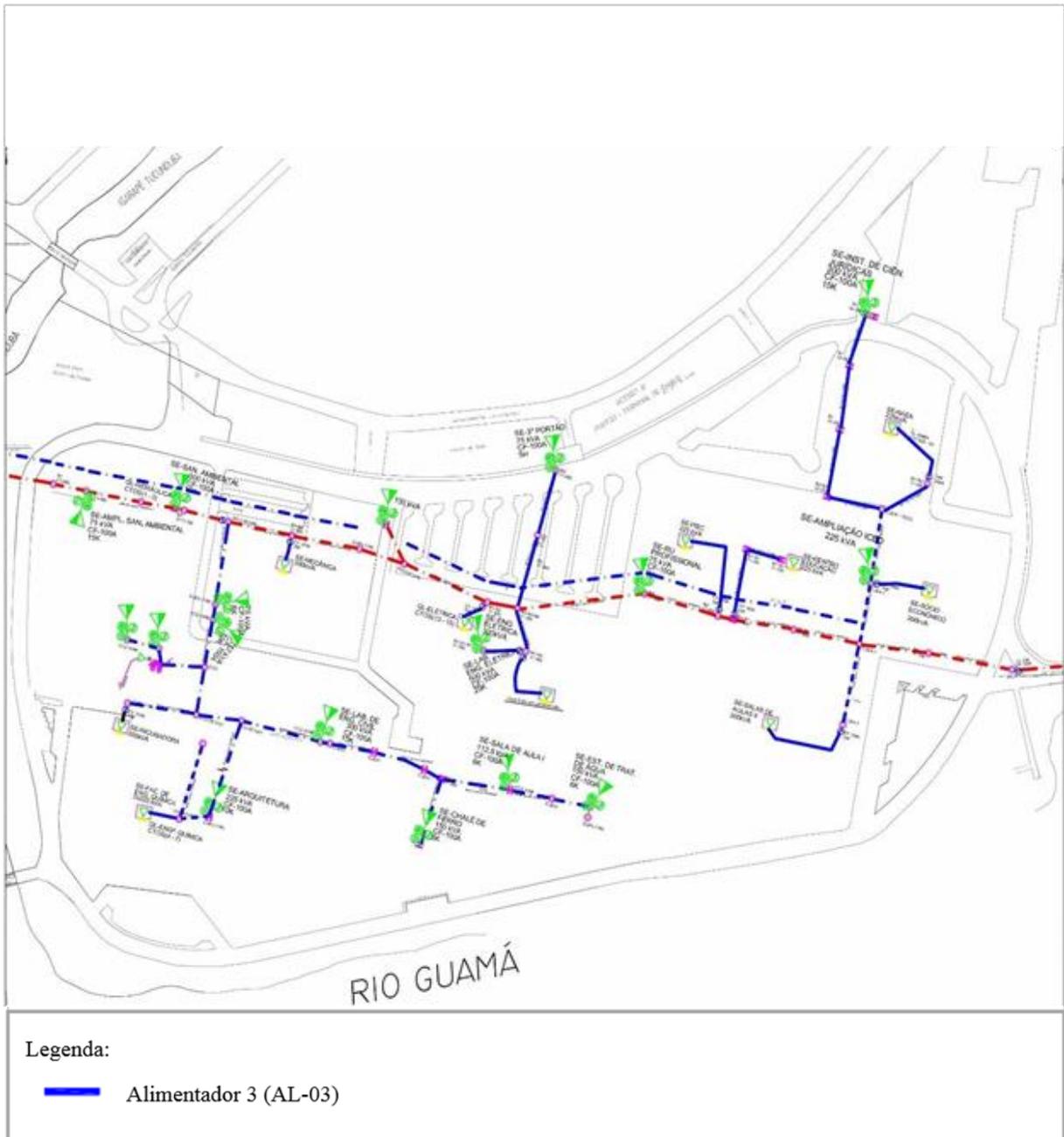


Figura 4-13 – Rede Alta Tensão Profissional. Fonte: Prefeitura do Campus Universitário do Guamá, 2015.

Já a Figura (4-14), representa o alimentador mais longínquo da cabine de entrada e de medição da UFPA. O alimentado Saúde, como o próprio nome diz, além de possuir os blocos de aula, laboratórios e prédios administrativos, dentre as 15 cargas do setor, possui prédios voltados para a saúde, como é o caso do hospital Bettina Ferro de Souza. Desta forma, sua

carga instalada é a menor do campus, com 3.012,5 kVA.

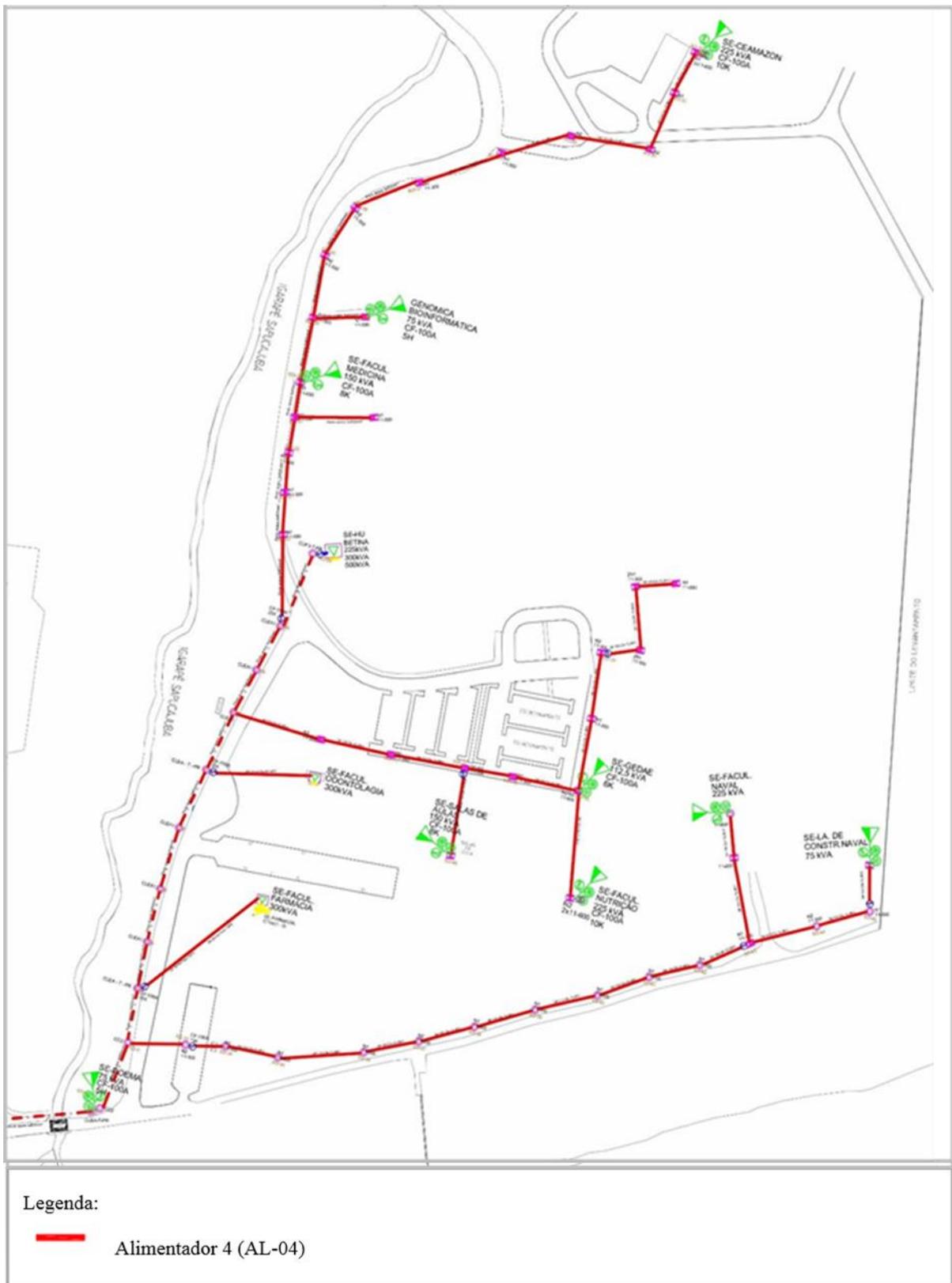


Figura 4-14 – Rede Alta Tensão Saúde. Fonte: Prefeitura do Campus Universitário do Guamá, 2018.

A Figura (4-15) foi elaborada para ilustrar com maior detalhe os pontos de medição em que foram inseridos os analisadores na rede da UFPA, de modo a medir a tensão na entrada da rede e a corrente em cada alimentador, tendo em vista que estes se estendem por todo o campus, atendendo todas as unidades consumidoras existentes e seus respectivos usuários finais (blocos de aula, laboratórios, escritórios, hospital, etc.).

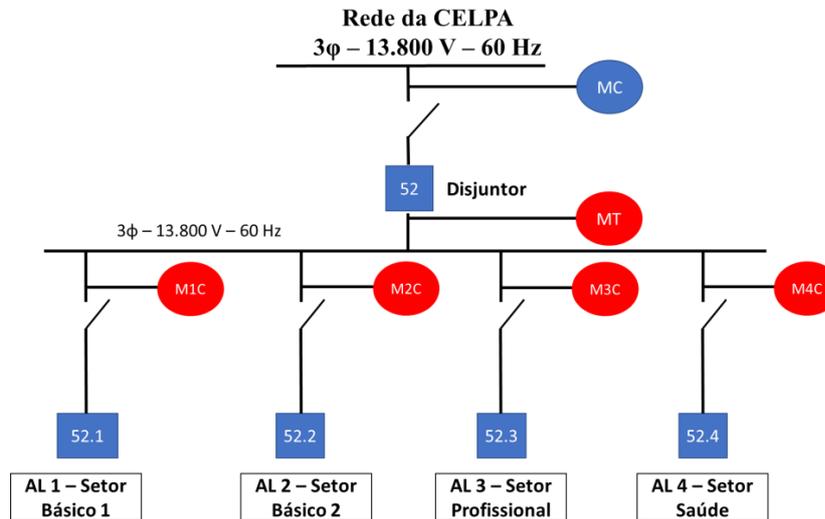


Figura 4-15 – Configuração do sistema elétrico da UFPA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde as siglas significam:

MC – Medidor da Concessionária

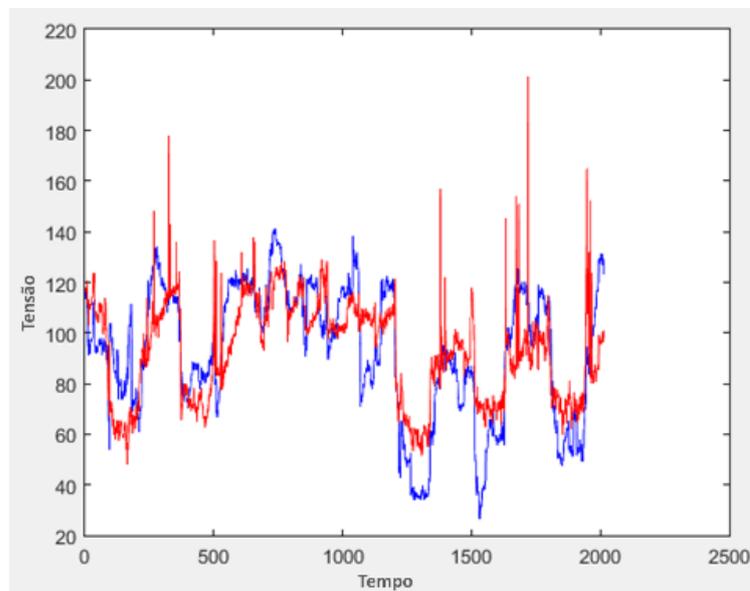
MT – Medidor de Tensão instalado na entrada da UFPA

M1C a M4C – Medidores de Corrente instalados nos alimentadores

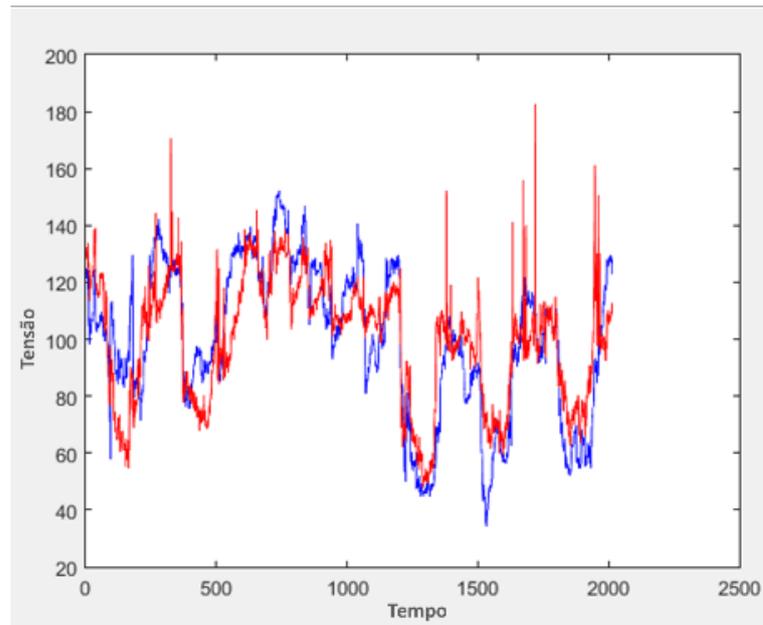
Todas as análises das medições se deram através do software SISQEE que utiliza a RL e técnicas de mineração de dados (AR e RNA) como forma de analisar o impacto harmônico no PAC. Os métodos e formulações para calcular os impactos harmônicos estão descritos na seção 4.2. Para a identificação impacto e do comportamento das três técnicas, as análises foram realizadas com períodos semanal, diário e em patamar de carga específico da UFPA (00h às 06h e 20h às 24h – leve; 06h às 10h e 16h às 20h – média; e 10h às 16h – pesada). A análise leva em consideração os alimentadores Básico 1, Básico 2, Profissional e Saúde, em relação ao background tendo como referência o PAC. Durante as medições foram analisados os harmônicos de 1 a 50, porém, como o 5º harmônico foi o mais significativo dentre os demais, este será instrumento das análises apresentadas nas próximas subseções.

Considerando que, para comparação entre as técnicas, estas devem possuir os mesmos parâmetros, se fez necessário adequar as técnicas de RL, RNA e AR para que ambas apresentassem o parâmetro de EAM escolhido como métrica, mesmo que a RNA também possa apresentar a correlação de  $R^2$ .

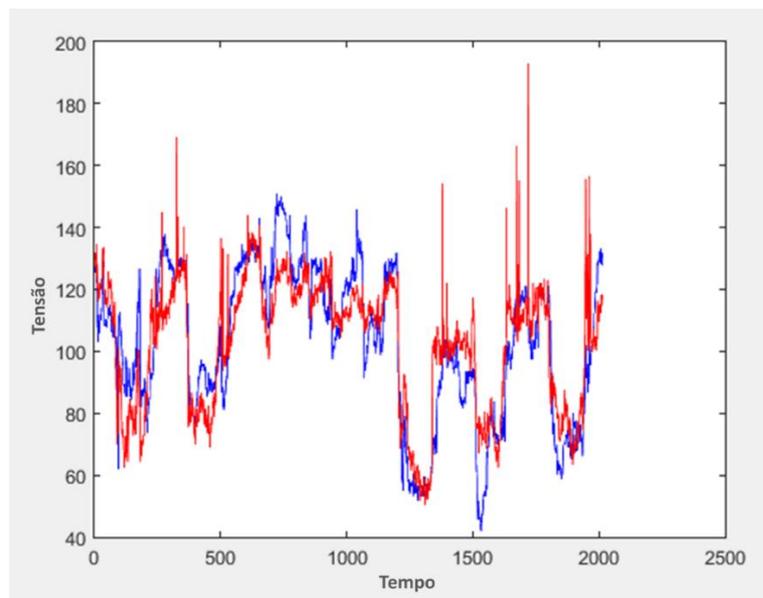
Das três técnicas analisadas, a RL possui características diferentes da RNA e AR como o fato de não efetuar a análise simultaneamente dos alimentadores e utilizar o  $R^2$  como forma de medir a confiabilidade da análise, pois, para a RNA e AR, o software SISQEE utiliza a métrica do EAM. Sendo assim, utilizou-se o software R e Matlab para que os resultados da regressão linear simples dos quatro alimentadores fossem unificados, passando a obter uma regressão linear múltipla (RLM) e, também, obtivesse como índice de confiabilidade o EAM. Por meio do software R, foi obtida a equação da reta para cada fase e período analisado. O uso do Matlab possibilitou a comparação entre os níveis de tensão real (na cor azul) e o modelo proposto (na cor vermelha) para as fases A, B e C, conforme Figura (4-16) (a), (b) e (c). As descrições do programa em R e as equações para cálculo do EAM da RLM, estão descritos na seção 4.2.1, assim como os algoritmos estão destacados nos Anexos B e C.



(a)



(b)



(c)

Figura 4-16 – Tensão real e modelo estimado em regressão linear múltipla das fases A, B e C, respectivamente, para o período de uma semana. Fonte: Elaborado pelo autor.

A RNA possui a versatilidade de alterar seus números de camadas, de modo que estas podem alterar o percentual de erro do modelo criado. Para comparação e exemplificação do efeito do aumento do número de camadas escondidas da RNA, conforme a Figura (4-17), efetuou-se análises com 1, 2 e 3 camadas para cada fase, no período de uma semana para verificar em qual situação é detectado o melhor EAM. O incremento da 2ª camada, quando comparada a análise padrão (1 camada), propiciou redução no EAM de, aproximadamente, 14 % nas fases A e B, e 21 % na fase C. Ao inserir a 3ª camada a redução foi de 19 %, 14% e 22

%, nas fases A, B e C, respectivamente. Desta forma, para este estudo, verifica-se que o aumento de camadas reduz o EAM e obtém-se melhor resultado com três camadas. Neste caso, é necessário salientar que o aumento do número de camadas gera maior nível de simulações de aprendizagem, o tempo de cálculo também acaba sendo maior e não apresenta valores significativos de redução do EAM, quando se compara o sistema com 2 e 3 camadas. Para as demais análises, diária e por patamar de carga, é apresentado somente o estudo com três camadas (RNA\_3), que obteve menor EAM dentro da técnica de RNA.

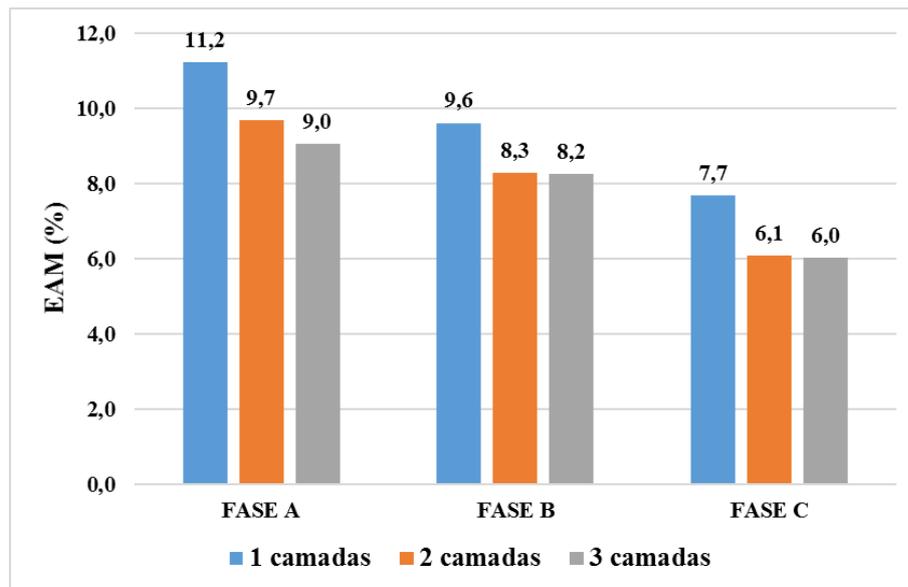


Figura 4-17 – RNA com diferentes quantidades de camadas escondidas. Fonte: Elaborado pelo autor.

A AR possui os parâmetros de análise idênticos aos utilizados pela RNA, porém, não trabalha com camadas escondidas, os resultados de confiabilidade da AR são melhores do que a RNA e, também, possui tempo de análise mais rápida para identificar a variável do fator de impacto mais significativa.

Nesta seção foi apresentada a metodologia para análise do sistema elétrico do Campus Universitário do Guamá da UFPA, que serviu como estudo de caso 1 para a validação da dissertação. Com isto, foram apresentados o diagrama unifilar, as plantas gerais de distribuição das cargas, as cargas em cada alimentador, os pontos de medição do sistema e o método de comparação entre as técnicas.

#### 4.3.2. Estudo de caso 2: parque industrial de Manaus

Para este estudo de caso foi utilizada uma das campanhas de medições realizadas no

polo industrial de Manaus, pois esta apresenta diversos equipamentos microprocessados e microcontrolados que estão ligados simultaneamente na rede interna, possuindo cargas não lineares que geram componentes harmônicas no PAC da planta industrial. Durante o período de medição, ocorreram alguns desligamentos em diferentes alimentadores e, visando obter maior amostragem contínua dos dados, efetuou-se a medição durante 9 dias ao invés de 7 dias como o estudo de caso anterior.

A subestação do distrito industrial (SE DI) fornece energia elétrica a parte das indústrias localizadas no distrito industrial de Manaus, apresenta arranjo em anel, sendo alimentada pelas subestações Manaus I (MN) por meio das linhas denominadas MNDI-LT4-01 e MNDI-LT4-02; Mauá (MU) através das linhas MUDI-LT4-01 e MUDI-LT4-02; além do alimentador DICE-LI4-01, que alimentam indústrias no nível 69 kV. Através dos quatro transformadores de  $69\Delta/13,8Y$  kV de 26,6 MVA, partem 13 alimentadores que são responsáveis por fornecer energia elétrica a aproximadamente 81 consumidores industriais, conforme diagrama unifilar da SE DI ilustrado pela Figura (4-18).

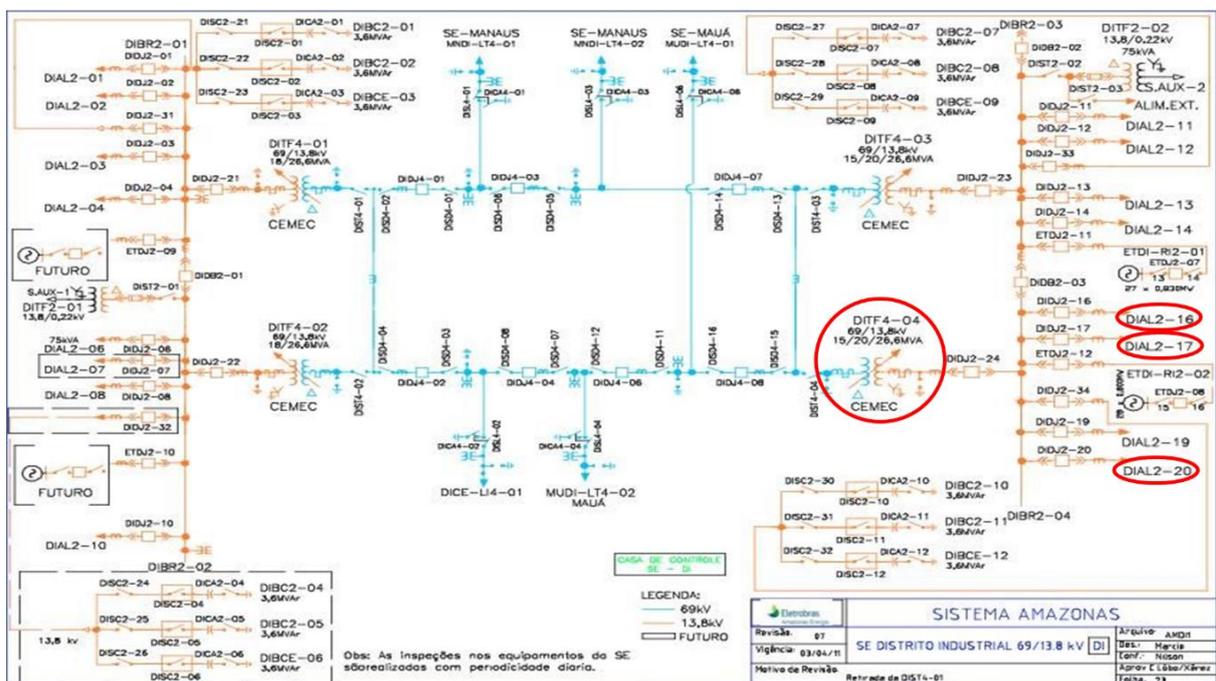


Figura 4-18 – Diagrama Unifilar da Subestação Distrito Industrial. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os procedimentos e equipamentos para este estudo são os mesmos utilizados no estudo de caso 1 na seção 4.3.1, de modo que as aquisições dos dados e as análises de QEE, se deram mediante a instalação dos analisadores PW3198 (fabricante Hioki) e o software SISQEE, respectivamente. As análises deste estudo também foram baseadas nas técnicas computacionais de RL, RNA e AR apresentadas na seção 4.2, a qual possui os métodos e

formulações para calcular os impactos harmônicos e EAM.

Para a identificação impacto e do comportamento das três técnicas, as análises foram realizadas com períodos semanal, diário e em patamar de carga específico do Distrito Industrial (00h às 07h e 17h às 24h – leve; e 07h às 17h – pesada). A análise leva em consideração os alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-20, em relação ao background e tendo como referência o PAC, no lado de baixa tensão do transformador DITF4-04 da SE DI, com nível de tensão em 13,8 kV, conforme Figura (4-19). Durante as medições foram analisados os harmônicos de 1 a 50, porém, como o 5º harmônico se apresentou o mais significativo, este será instrumento das análises apresentadas nas próximas subseções.

A Figura (4-19) foi elaborada para ilustrar separadamente os pontos de medição em que os analisadores foram inseridos na rede elétrica industrial. Desta forma, os demais alimentadores da rede foram considerados como background da rede elétrica.

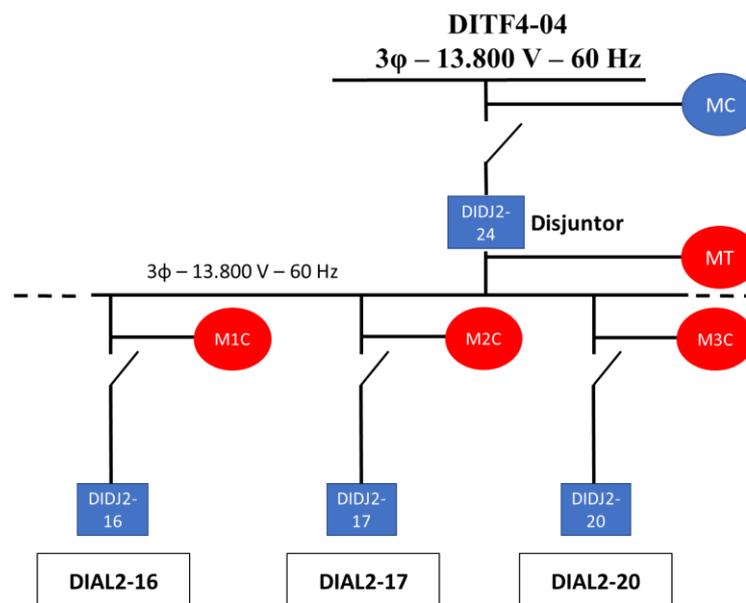


Figura 4-19 – Configuração de parte do sistema elétrico da SE DI. Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde as siglas significam:

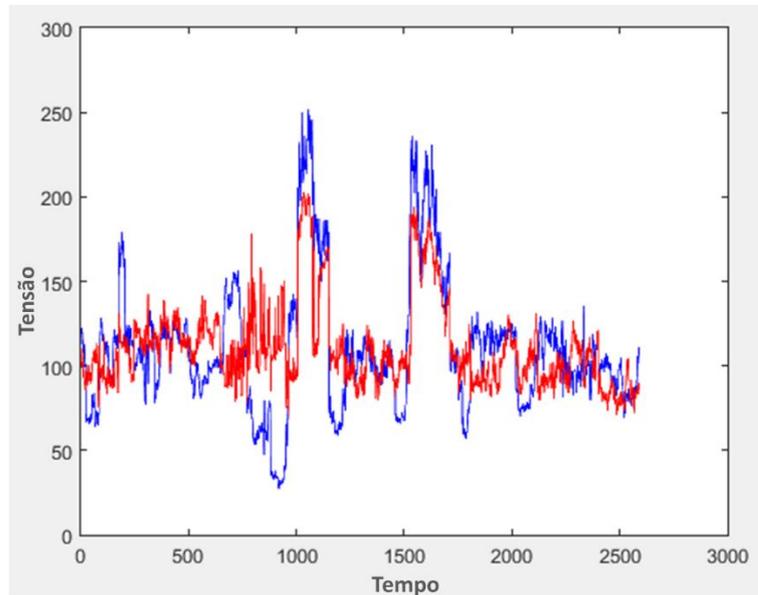
MC – Medidor da concessionária

MT – Medidor de tensão instalado no barramento comum

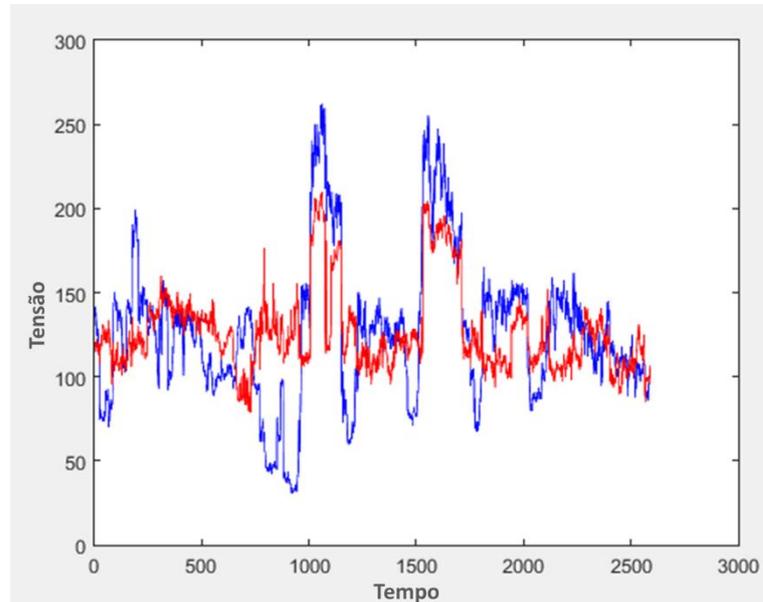
M1C a M3C – Medidores de corrente instalados nos alimentadores

No estudo de caso 2 também se fez necessário utilizar os mesmos procedimentos para

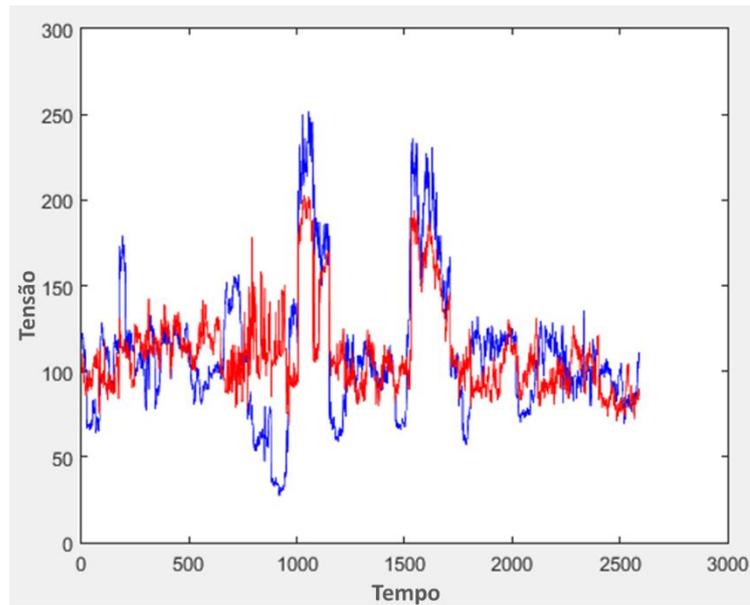
adequar as técnicas para efetuar a comparação entre as mesmas. As Figuras (4-20) (a), (b) e (c) apresentam a comparação entre os níveis de tensão real (na cor azul) e o modelo proposto (na cor vermelha) para as fases A, B e C da regressão linear múltipla, estando o código em R e Matlab nos Anexos A e B, e as equações utilizadas estão dispostas na seção 4.2.1.



(a)



(b)



(c)

Figura 4-20 – Tensão real e modelo estimado em regressão linear múltipla das fases A, B e C para o período de uma semana. Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste estudo de caso, a RNA utilizada apresentou valores muito próximos após alteração das camadas escondidas, contudo, obteve melhor valor de EAM utilizando apenas 2 camadas, dentre as análises com 1, 2 e 3 camadas no período de uma semana, conforme Figura (4-21). Sendo assim, para as demais análises, diária e por patamar de carga, é apresentado somente o estudo com duas camadas (RNA\_2), que obteve menor EAM dentro da técnica de RNA.

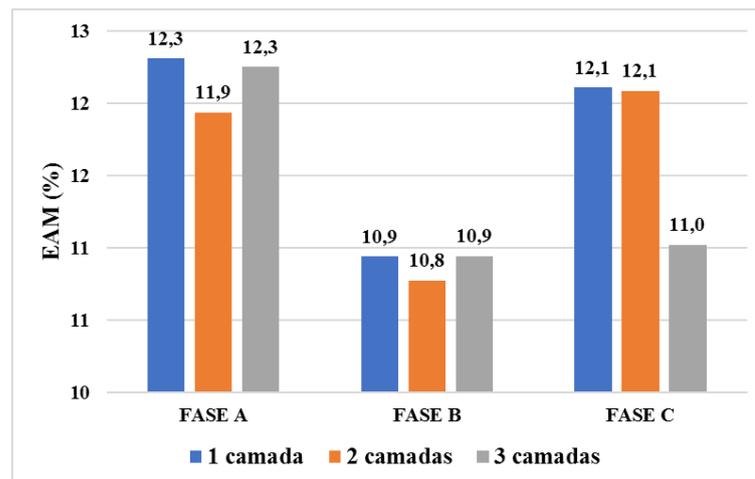


Figura 4-21 – RNA com diferentes quantidades de camadas escondidas. Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta seção foi apresentada a metodologia para análise do sistema elétrico do Polo Industrial de Manaus, que serviu como estudo de caso 2 para a validação da dissertação. Com isto, foram apresentados o diagrama unifilar, as plantas gerais de distribuição das cargas, as

cargas em cada alimentador, os pontos de medição do sistema e o método de comparação entre as técnicas.

#### 4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo foi apresentado os conceitos e funcionamento das três técnicas de IC que são utilizadas nesta dissertação. Cada técnica apresentada possui características diferentes umas das outras, como é o caso da regressão linear que busca relacionar uma variável aleatória em resposta a uma única variável aleatória regressora, condicionado à equação de uma reta, enquanto as redes neurais e árvores de regressão são capazes de avaliar simultaneamente as medições de todas as cargas não lineares como entrada do modelo. Como semelhança entre as técnicas, ambas são capazes de detectar o impacto harmônico em um PAC de um sistema de energia elétrica.

Além disto, neste Capítulo apresentou-se as metodologias utilizadas para estimar a contribuição de múltiplas fontes harmônicas na distorção harmônica de tensão no PAC, proporcionada pelas principais cargas instaladas em redes elétricas, com objetivo de permitir aos agentes reguladores, as concessionárias e aos consumidores uma tomada de decisão no cenário atual, mediante os dados extraídos nas unidades consumidoras em estudo, antecipando-se a regulamentação das responsabilidades com relação à geração de harmônicos. Apesar de o sistema não ser automático (*on line*), dada a necessidade do gestor da rede elétrica, é possível identificar as fontes causadoras de impactos harmônicos na rede em questão.

Sendo assim, por meio das técnicas computacionais e das metodologias apresentadas, no próximo Capítulo, são analisados os impactos harmônicos no PAC de dois sistemas elétricos diferentes, baseados nas normas e procedimentos de QEE vigentes. Além deste, o Capítulo 5 oferece uma comparação entre as técnicas, em diferentes intervalos de tempo, possibilitando a visualização daquela que melhor se adequa aos sistemas estudados.

## CAPÍTULO 5

### 5. RESULTADOS

#### 5.1. ESTUDO DE CASO 1: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – CAMPUS GUAMÁ

##### 5.1.1. Análise de QEE

No estudo de caso aqui apresentado, o objetivo foi avaliar o potencial da metodologia proposta na identificação de fontes harmônicas e seus respectivos impactos nas distorções harmônicas de tensão e corrente, contudo, durante a análise também foi possível verificar os níveis de tensão e o comportamento da carga no decorrer do período monitorado. Na Figura (5-1) têm-se as formas de onda de tensão por unidade (pu) nas três fases da planta no PAC obtidas por medição. Durante a medição percebe-se a inexistência de falta de fornecimento de energia e que os limites de tensão variam entre 0,980 pu e 1,048 pu, ou seja, dentro da faixa de tensão adequada determinada pelo PRODIST, sendo esta de  $0,95 \leq TR \leq 1,05$ .



Figura 5-1 – Tensão RMS medida no disjuntor de entrada da UFPA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma grande parte das cargas existentes na instalação elétrica do campus universitário tem características não lineares e geram componentes de distorções harmônicas, sendo assim,

na Figura (5-2), tem-se que a  $DHT_V$  no PAC não ultrapassa o valor de 2,35 % (fase C), estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pelo PRODIST para o nível de tensão em 13,8 kV.



Figura 5-2 – Taxa de  $DHT_V$  medida na entrada da UFPA. Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o intuito de ilustrar o nível de carregamento dos quatro alimentadores do campus e devido a similaridade entre o perfil de carregamento dos mesmos, por meio da Figura (5-3), representando o alimentador Básico 1, visualiza-se o ciclo semanal da corrente no alimentador e, com isto, verifica-se que os dias de semana apresentam diferenças significativas em relação ao final de semana, onde este apresenta menor nível de carregamento na rede.



Figura 5-3 – Corrente RMS medida no alimentador do Básico 1. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura (5-4) contém os valores registrados dos máximos, mínimos e médios da corrente registrados neste período por todos os alimentadores. Apesar dos valores de corrente

mínimos serem muito baixo, estes ainda se encontram dentro do grau de incerteza dos analisadores, não comprometendo as medições.

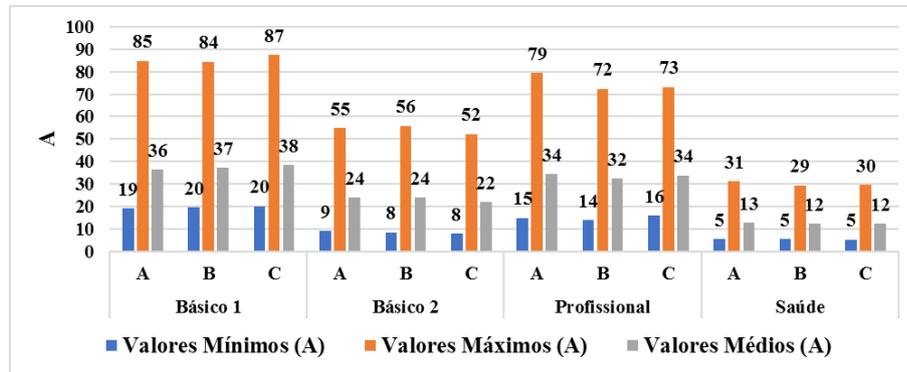


Figura 5-4 – Valores mínimos, máximos e médios de corrente medidos nos alimentadores. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em vista o comportamento similar do sistema para os alimentadores estudados, a Figura (5-5) apresenta a taxa de  $DHT_I$  nas três fases do alimentador Básico 1 e, por meio desta, observa-se que os valores de  $DHT_I$  encontram-se em níveis elevados durante a madrugada e no final de semana. O valor elevado do  $DHT_I$  pode ser justificado pelo baixo nível de carregamento nos períodos mencionados e o tipo de carga que está sendo utilizada.



Figura 5-5 – Taxa de  $DHT_I$  medida no alimentador do Básico 1. Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura (5-6) contém os valores máximos, mínimos, médios e percentis das  $DHT_I$  registradas em todos os alimentadores e, com isto, percebe-se que os alimentadores Básico 2 e Saúde atingem valores acima de 30 % no período medido. Os valores medidos ainda se encontram dentro do range de incerteza do equipamento de medição.

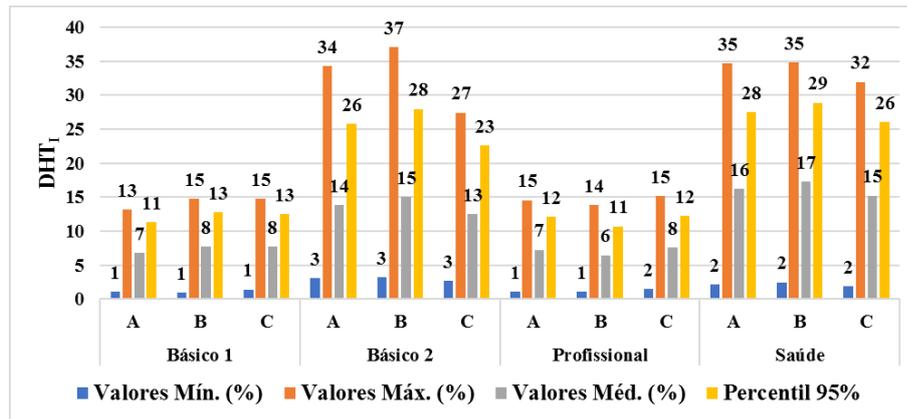


Figura 5-6 – Valores máximos, mínimos, médios e percentis de  $DHT_1$  medido nos alimentadores. Fonte:

Elaborado pelo autor.

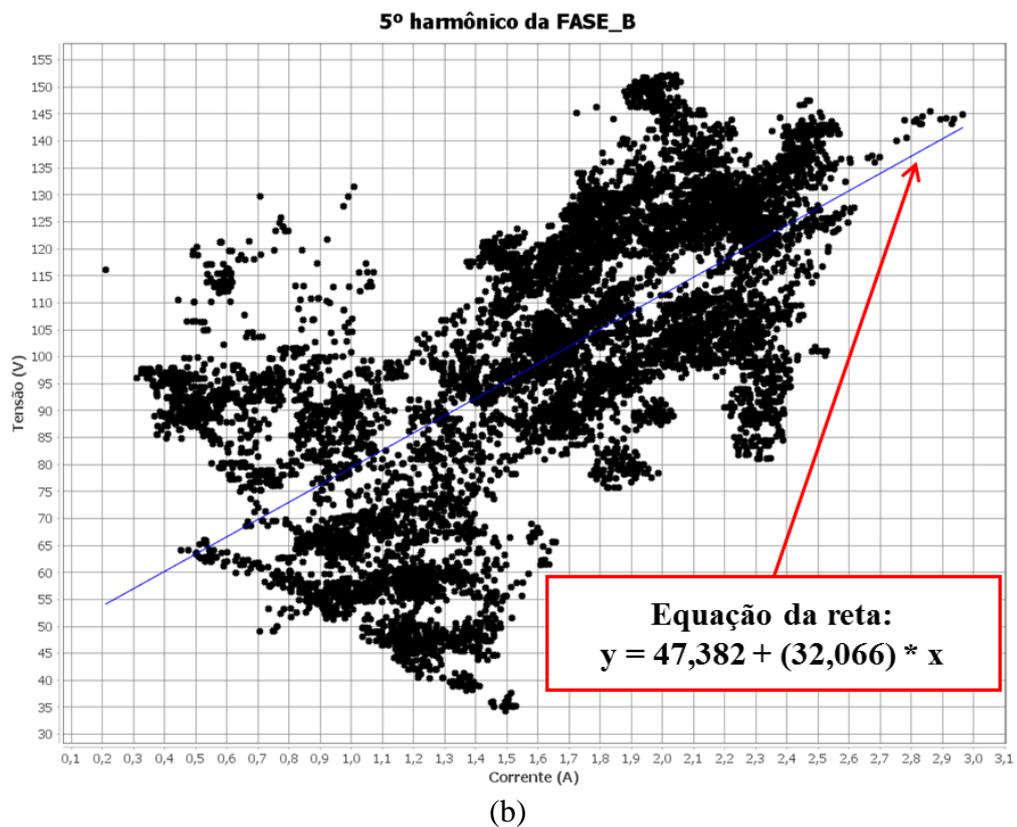
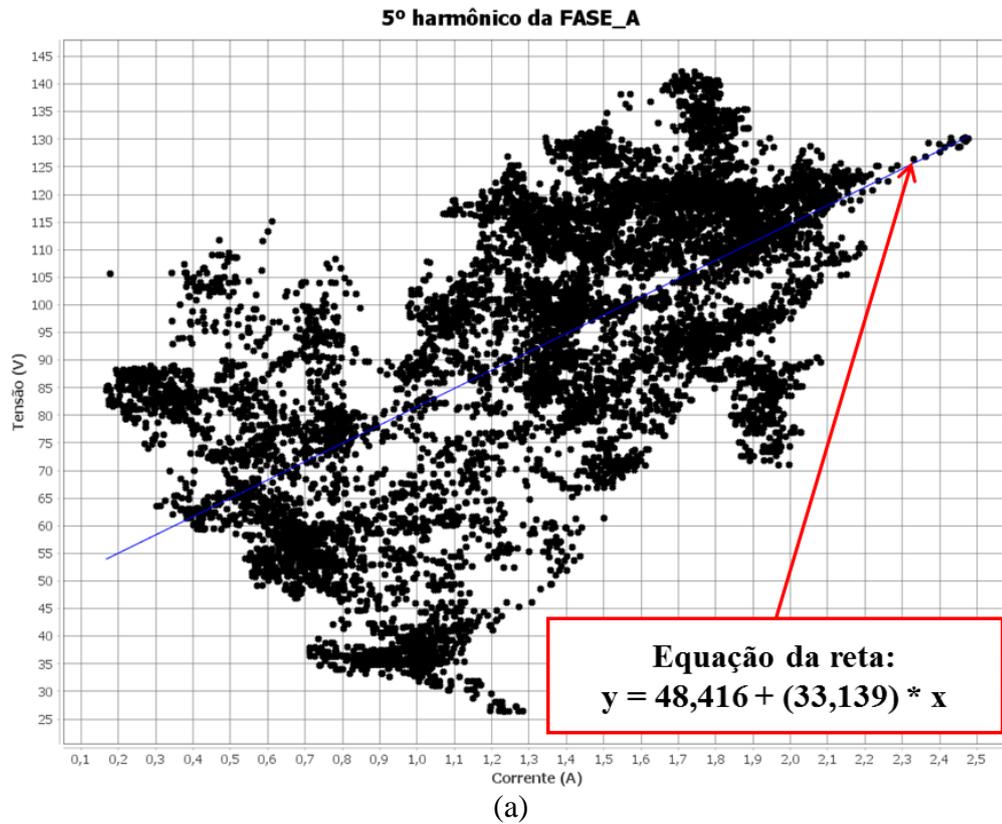
Para simular e prever o impacto causado por cargas não-lineares em um sistema, se faz necessário o conhecimento das respostas das mesmas. Visando prever tais informações, utilizou-se as técnicas de inteligência computacional de RL, RNA e AR, para apresentar a situação da rede do campus. A análise leva em consideração os alimentadores Básico 1, Básico 2, Profissional e Saúde, em relação ao background tendo como referência o disjuntor de entrada como PAC, utilizando dados do 5º harmônico, conforme apresentado a seguir para cada IC.

### 5.1.2. Regressão Linear

A RL simples é um método estatístico que busca relacionar uma variável aleatória em resposta a uma única variável aleatória regressora, condicionado à equação de uma reta. O ajuste da curva de regressão é realizado com base no método dos mínimos quadrados, que, por sua vez, seleciona o modelo que apresenta a menor soma de quadrados dos erros (Mazumdar e Harley, 2008). Para o estudo proposto, a RL é utilizada para verificar o impacto harmônico em um ponto de interesse, em que é feita uma correlação entre a corrente harmônica, para cada alimentador e a tensão harmônica para a mesma frequência do barramento considerado no estudo.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos utilizando a metodologia baseada em RL, verificando a contribuição harmônica dos alimentadores Básico 1, Básico 2, Profissional e Saúde em relação ao background tendo como referência a Entrada no PAC com a concessionária, utilizando dados do 5º harmônico. Devido a similaridade do comportamento dos alimentadores analisados por RL, para exemplificar tais análises, as Figuras (5-7) (a), (b)

e (c) mostram os modelos de regressão linear criados para as três fases do alimentador Saúde com relação ao disjuntor de entrada contendo as equações da reta, que servirá para calcular o impacto do alimentador analisado e o background da rede.



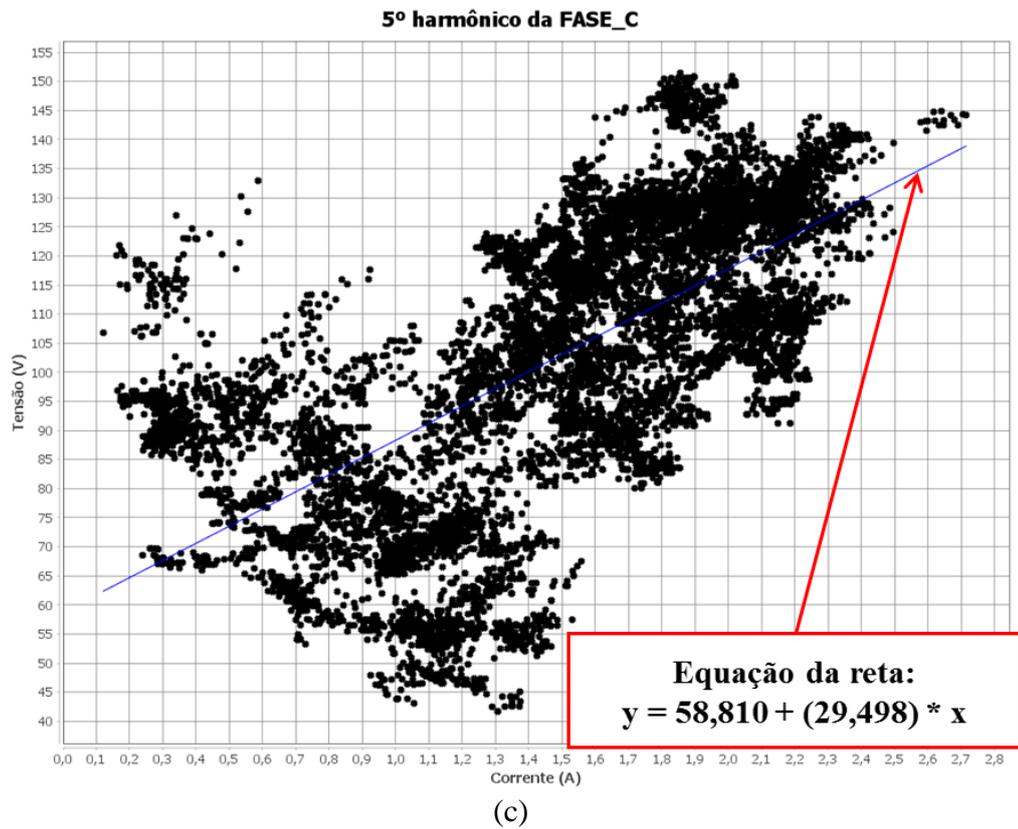
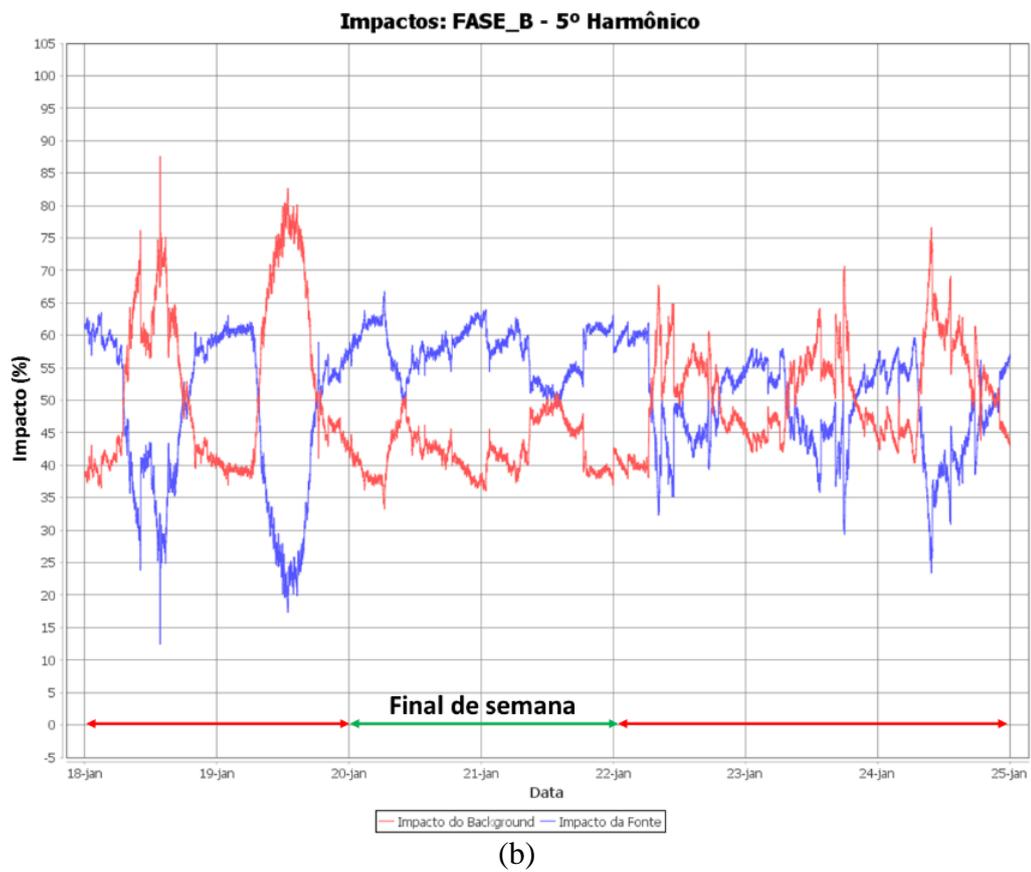
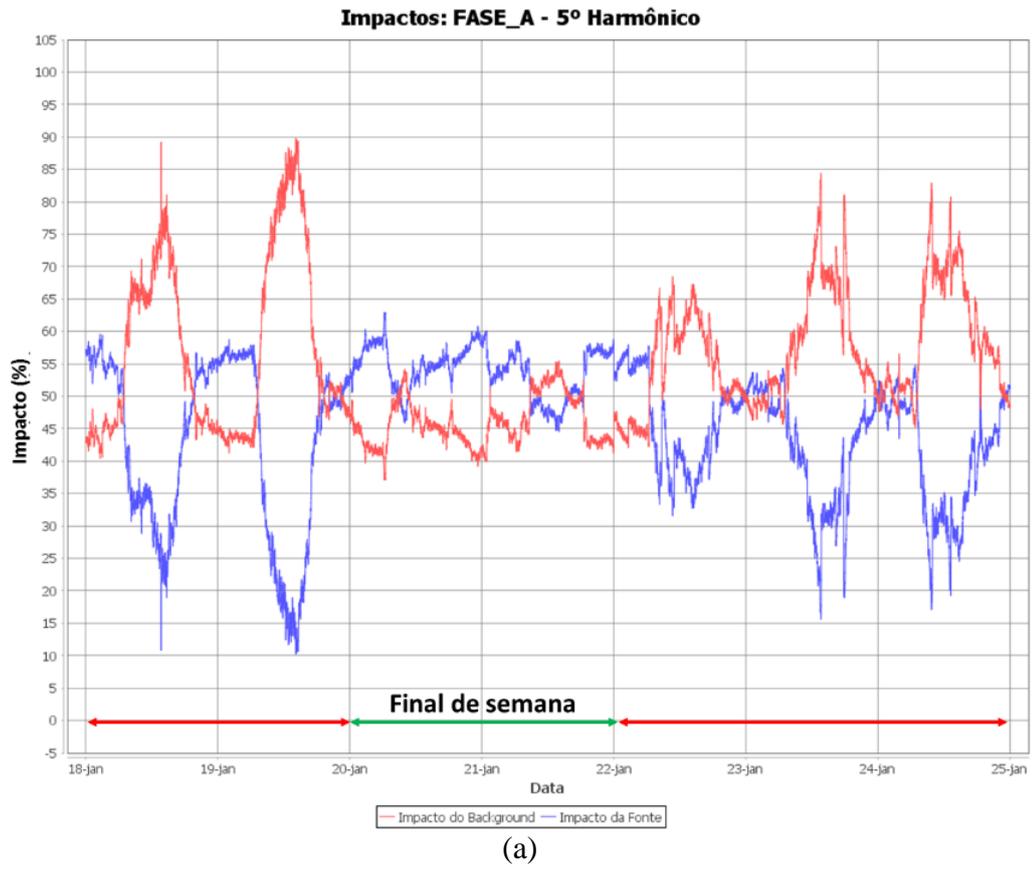


Figura 5-7 – Modelos de RL do 5º harmônico para as três fases (a), (b) e (c) do alimentador Saúde em relação ao disjuntor de entrada. Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras (5-8) (a), (b), e (c) mostram os impactos pontuais, também, considerando o alimentador Saúde (curva azul) em relação ao background (curva vermelha). Durante as análises, percebe-se que os impactos do alimentador se sobrepõem ao background nas três fases nos períodos em que os níveis de carregamento são menores (período noturno e final de semana).



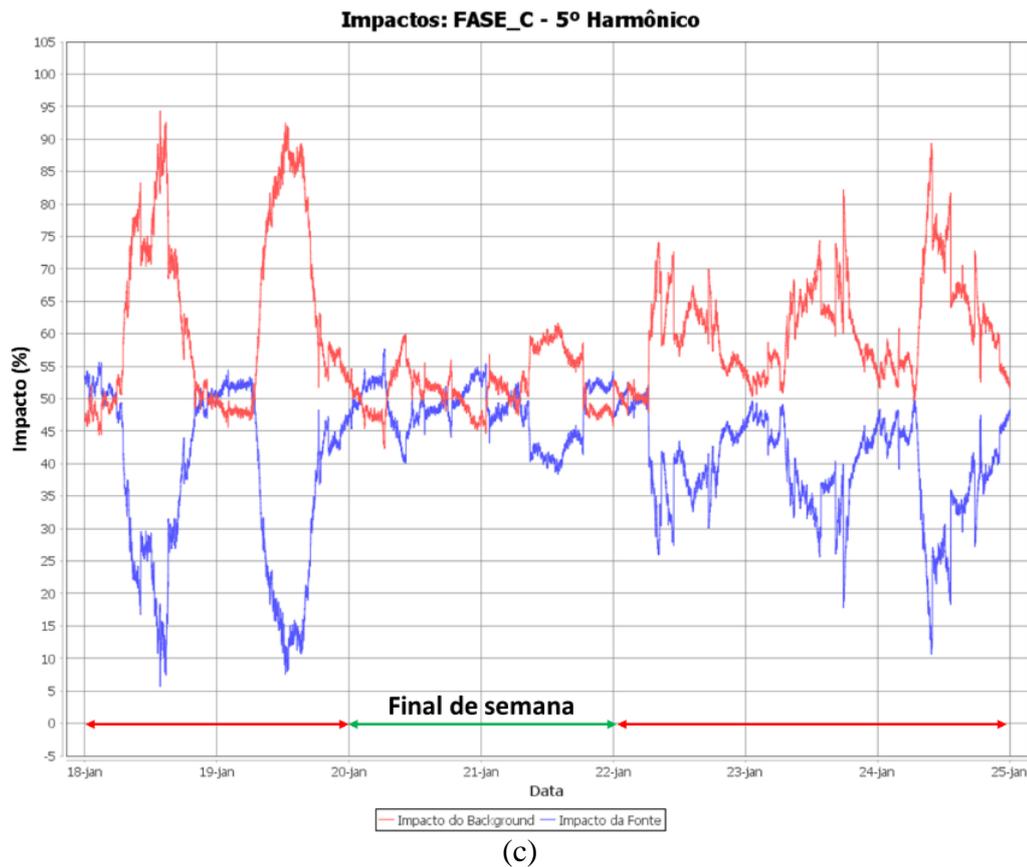


Figura 5-8 – Fator de impacto pontual do 5º harmônico para as três fases (a), (b) e (c) do alimentador Saúde em relação ao barramento de entrada. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela (5-1) apresenta os fatores de impacto percentual sobre o 5º harmônico de tensão ( $IF_{VT}$  (%)) no PAC estimado para cada um dos quatro alimentadores, individualmente e seus respectivos impactos de background ( $IF_{VBG}$  (%)). Para calcular os valores de  $IF_{VT}$  (%),  $IF_{VBG}$  (%) e  $R^2$ , utilizou-se, respectivamente, o método da correlação de Pearson, o coeficiente linear da equação da reta e o grau de confiabilidade, conforme descritos na seção 4.2.1 desta dissertação. Dessa maneira, tem-se que, dentre os quatro alimentadores analisados na Tabela (5-1), o alimentador Saúde é a carga que impacta de maneira mais significativa na distorção de 5º harmônico do barramento de entrada nas três fases e possui valores de impacto de tensão bem maiores do que o background calculado para as três fases.

Tabela 5-1 – Fatores de impacto do 5° harmônico calculados para cada alimentador e seus respectivos background utilizando regressão linear. Fonte: Elaborado pelo autor.

FONTE	FASE A	FASE B	FASE C
<b>Básico 1</b>			
IF <sub>VT</sub> (%)	45,858	50,968	41,198
IF <sub>VBG</sub> (%)	54,142	49,032	58,802
R <sup>2</sup>	0,394 / Alta	0,43 / Alta	0,42 / Alta
<b>Básico 2</b>			
IF <sub>VT</sub> (%)	38,921	48,670	17,866
IF <sub>VBG</sub> (%)	61,079	51,330	82,134
R <sup>2</sup>	0,348 / Moderada	0,167 / Moderada	0,04 / Baixa
<b>Profissional</b>			
IF <sub>VT</sub> (%)	53,775	59,613	52,285
IF <sub>VBG</sub> (%)	46,225	40,387	47,715
R <sup>2</sup>	0,318 / Moderada	0,313 / Moderada	0,256 / Moderada
<b>Saúde</b>			
IF <sub>VT</sub> (%)	73,750	73,616	58,187
IF <sub>VBG</sub> (%)	26,250	26,384	41,813
R <sup>2</sup>	0,498 / Alta	0,583 / Alta	0,622 / Alta

### 5.1.3. Redes neurais artificiais

Esta técnica avalia os impactos causados por vários pontos de medição em relação a um ponto de referência. Utiliza-se a rede neural para estimar a tensão harmônica na barra de interesse a partir do conhecimento adquirido no processo de aprendizagem, sendo que, para tal, se utiliza dados de entrada desconhecidos no modelo neural desenvolvido. Portanto, a metodologia adotada realiza um estudo de sensibilidade, variando cada entrada (alimentador) de maneira independente e verificando o quanto esta variação impacta na saída (tensão no PAC) do modelo de rede neural já treinado, determinando, dessa maneira, qual dos alimentadores contribui mais fortemente para a distorção do barramento analisado.

A seguir são apresentados os resultados referentes à análise da contribuição das correntes harmônicas de 5ª ordem dos alimentadores Básico 1, Básico 2, Profissional e Saúde, utilizando dados de tensão harmônica também de 5ª ordem na entrada do campus no PAC.

Os parâmetros padrões para criação do modelo da RNA para cada fase de cada alimentador, estão definidos com 80 % de dados utilizados para treino e 20 % para teste.

Além disto, o fator de sensibilidade  $\Delta T$  utilizado foi 1,10, o qual corresponde a um aumento das entradas de correntes harmônicas em 10 % para cálculo do impacto harmônico de cada alimentador, baseado na determinação do indicador EAM, conforme cálculos descritos na seção 4.2.2 desta dissertação.

A RNA utilizada é a MLP, na qual adota a mesma topologia para cada uma das RNAs criadas, consistindo em uma camada escondida contendo  $n + 1$  neurônios (configuração padrão do software SISQEE), onde  $n$  é o número de entradas, resultando em cinco neurônios, conforme Figura (5-9).

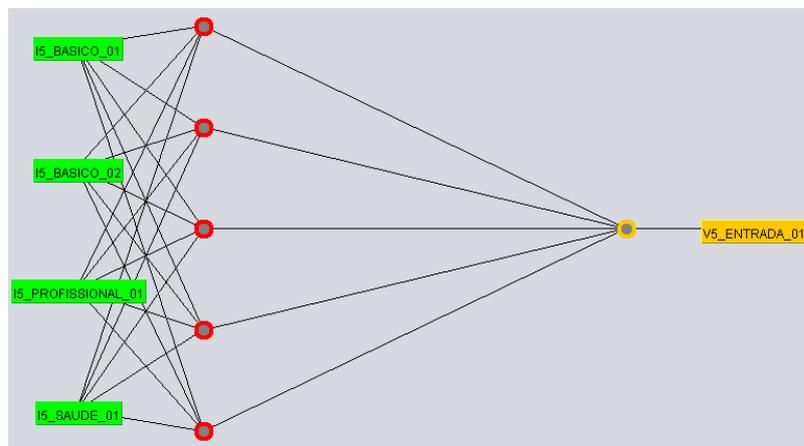


Figura 5-9 – Topologia das RNAs do estudo de caso. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela (5-2) contém os fatores de impactos calculados para cada alimentador, além do erro do modelo neural criado. Ao analisar os dados obtidos, verifica-se que o alimentador Saúde apresenta maior influência na distorção de tensão do barramento nas fases A (31,160) e C (45,097), enquanto o alimentador Básico 1 influencia na fase B (32,885). Para avaliar a confiabilidade dos resultados é preciso observar a qualidade do modelo criado, logo, no estudo em questão, o EAM apresentou entre as três fases, valores médios de 9 %, aproximadamente.

Tabela 5-2 – Fatores de impacto percentual do 5º harmônico calculados para cada alimentador utilizando RNA.

Fonte: Elaborado pelo autor.

FONTE	FASE A	FASE B	FASE C
Básico 1	24,023	32,885	6,707
Básico 2	8,086	5,183	6,613
Profissional	25,102	26,345	33,051
Saúde	31,160	25,162	45,097
EAM	10,3867	9,5803	7,8811

As Figuras (5-10) (a), (b) e (c), das fases A, B e C, respectivamente, apresentam as tensões de 5º harmônico na saída da RNA bem como os valores de tensão medidos no barramento de interesse. Por meio dos gráficos mencionados, observa-se que não há valores mais expressivos (maiores) em nenhuma das fases, ao longo de todo o período, por parte de um alimentador somente, isto é, ocorre variação do alimentador que apresenta maior sensibilidade na saída da rede neural. Contudo, todos os alimentadores possuem seus níveis de tensão mais elevados quando o sistema está com nível de carregamento mais baixo, durante os períodos noturnos e final de semana.



(a)



(b)



Figura 5-10 – Tensão de saída da RNA de 5º harmônico em cada alimentador para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. Fonte: Elaborado pelo autor.

Já as Figuras (5-11) (a), (b) e (c), apresentam as tensões real (curva em preto) do 5º harmônico nas fases A, B e C, respectivamente, e o modelo projetado na RNA (curva em azul), também nas três fases. Logo, percebe-se a aproximação entre as curvas e a similaridade entre o comportamento das mesmas, resultando em uma pequena diferença entre a medição real e o modelo.





(c)

Figura 5-11 – Tensão real de saída e o modelo estimado da RNA de 5º harmônico para as fases A, B e C no barramento de 13,8 kV. Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras (5-12) (a), (b) e (c) apresentam os impactos calculados nas três fases, para cada alimentador, na distorção de 5º harmônico do barramento de entrada da UFPA ao longo do período de medição considerado. Em suas análises, verifica-se que os impactos variam ao longo do período de medição, ou seja, hora um determinado alimentador apresenta maior impacto em relação ao outro, contudo, quando o impacto é analisado de maneira geral, fica evidente, em alguns casos, a predominância do alimentador Saúde (curva em preto) entre os demais alimentadores. A linha descrita como background nas Figuras (5-12) (a), (b) e (c) foi retirada devido a mesma representar o erro do modelo criado.



(a)

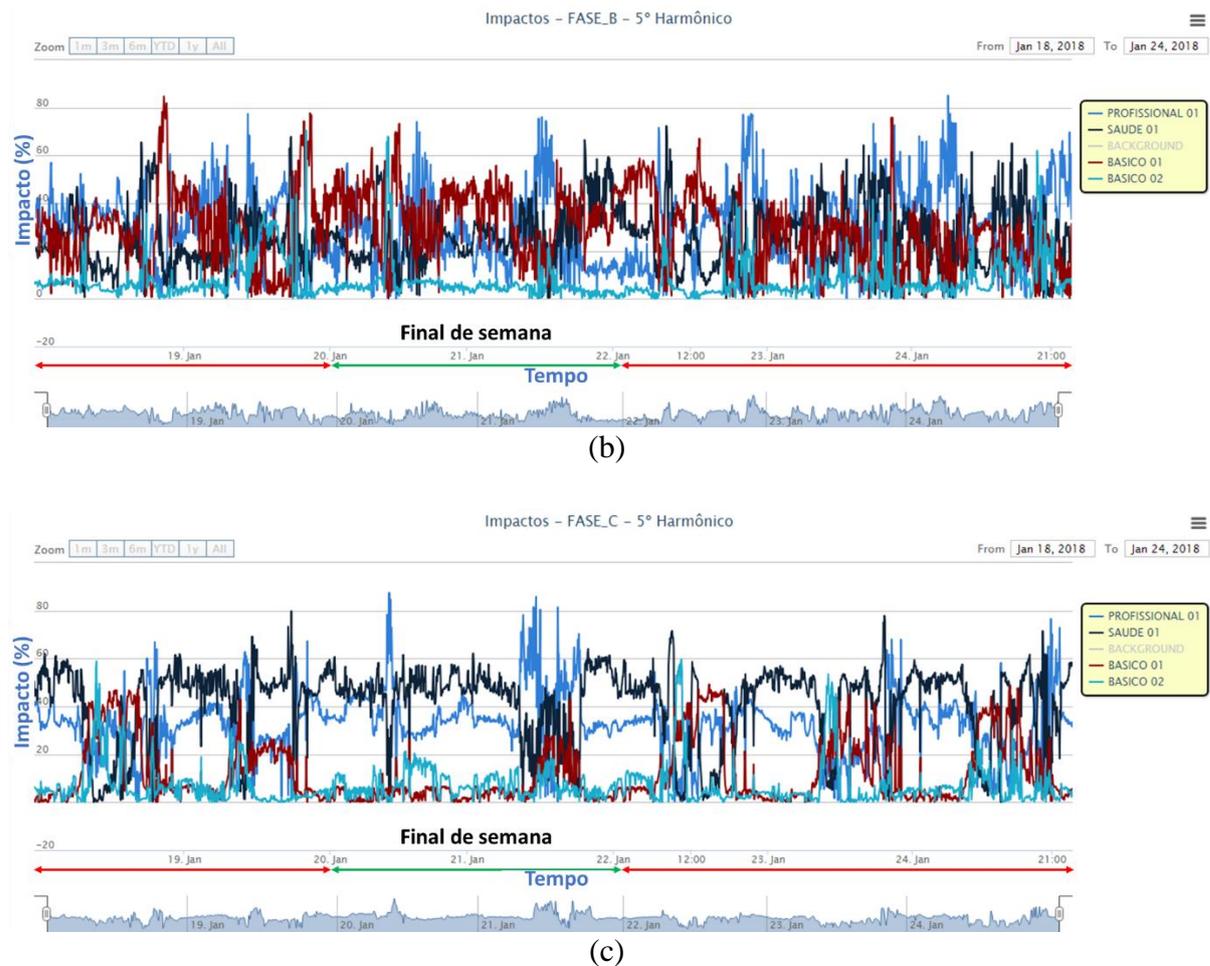


Figura 5-12 – Impactos de 5° harmônico do modelo de RNA para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.1.4. Árvores de regressão

A técnica de AR possui aprendizado preditivo baseado em procura, criando uma hipótese baseada em instâncias particulares para a geração de conclusões generalizadas, similar a regras de *if-then*. Como esta técnica abrange todo o espaço amostral, a mesma pode realizar previsões para qualquer exemplo de entrada. Para o processo de estimação por meio de árvore de regressão desta dissertação, avalia-se a tensão harmônica na barra de interesse a partir do conhecimento adquirido no processo de aprendizagem, utilizando dados de entrada desconhecidos para o modelo desenvolvido no momento de estimação.

Os parâmetros utilizados na análise da AR são os mesmos usados para a RNA, inclusive, o fator de impacto percentual é calculado por meio dos valores de EAM. Sendo assim, a porcentagem de dados utilizados para treino foi de 80 % e teste de 20 %, enquanto o

fator de sensibilidade para incrementar as entradas de correntes harmônicas utilizado foi de 10%. A Figura (5-13) apresenta um modelo de AR. As fórmulas utilizadas para calcular estas informações estão descritas na seção 4.2.3.

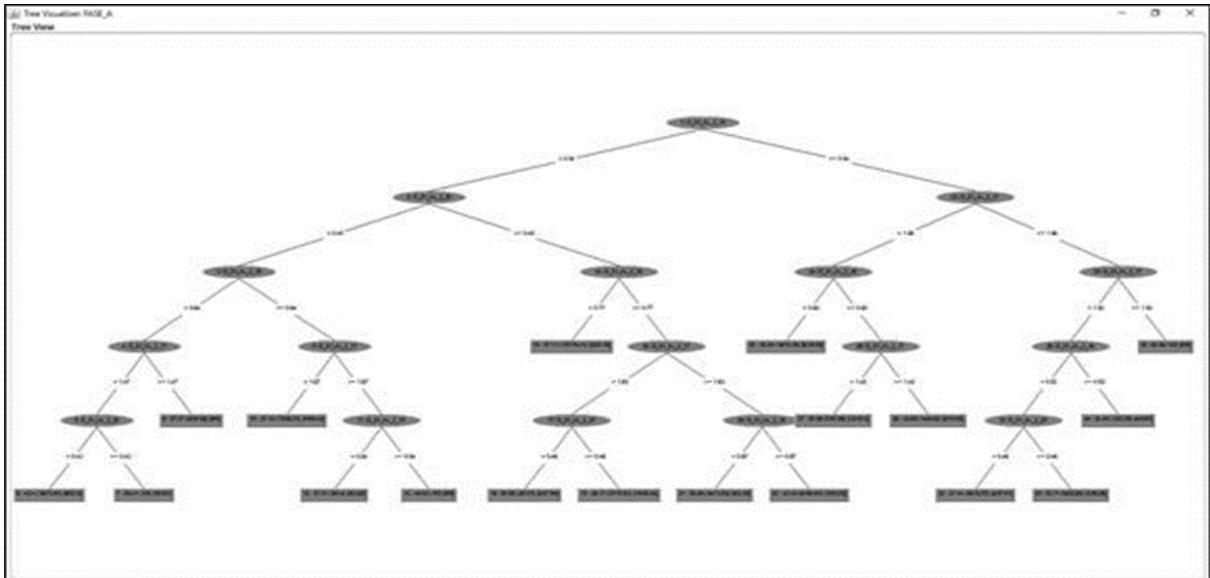


Figura 5-13 – Exemplo de modelo de AR. Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir são apresentados os resultados referentes à análise da contribuição das correntes harmônicas de 5ª ordem dos alimentadores Básico 1, Básico 2, Profissional e Saúde, em relação ao PAC com a concessionária (entrada da universidade).

A Tabela (5-3) contém os fatores de impactos calculados para cada alimentador, além do erro do modelo obtido para a construção da árvore. Como pode ser visto, o alimentador Saúde representa maior influência na distorção de tensão de 5º harmônico no PAC para a fase A (27,382 %) e C (32,674 %), enquanto o alimentador Profissional representa um maior impacto na fase B (25,781 %), que está muito próximo ao valor medido no alimentador Saúde, também na fase B (25,592 %). Os valores médios de EAM do modelo estão em entorno de 5% para as três fases, de modo que já apresenta valores mais baixos do que a RNA e suas comparações serão detalhadas na seção 5.1.5.

Tabela 5-3 – Fatores de impacto percentual do 5º harmônico calculados para cada alimentador utilizando AR.

Fonte: Elaborado pelo autor.

FONTE	FASE A (%)	FASE B (%)	FASE C (%)
Básico 1	24,511	23,277	21,679
Básico 2	13,394	16,135	12,899
Profissional	25,342	25,781	25,549
Saúde	27,382	25,592	32,674
EAM	5,5456	5,5535	4,2095

As Figuras (5-14) (a), (b) e (c) apresentam as tensões de saída da AR bem como os valores de tensão real medidos no barramento de interesse e, por meio destas, verifica-se que não há dominância de nenhum alimentador em nenhuma das fases ao longo de todo o período. Assim como na RNA, as tensões de saída para o 5° harmônico se mostram mais evidentes durante o final de semana e períodos noturnos, quando o nível de carregamento da rede se apresenta mais baixo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-14 – Tensão de saída da AR de 5° harmônico em cada alimentador para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. Fonte: Elaborado pelo autor.

Já as Figuras (5-15) (a), (b) e (c), apresentam as tensões real (curva em preto) do 5º harmônico nas fases A, B e C, respectivamente, e o modelo projetado na AR (curva em azul), também nas três fases. Logo, apesar de variações instantâneas, percebe-se que o modelo e a tensão real possuem similaridade entre seus comportamentos.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-15 – Tensão real de saída e o modelo estimado da RNA de 5º harmônico para as fases A, B e C no barramento de 13,8 kV. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.5. Comparação do desempenho entre as técnicas

Esta seção apresenta a comparação entre as técnicas de RL, RNA e AR com o objetivo de identificar quais destas possui melhor aproveitamento durante análise de impacto harmônico. A Tabela (5-4) apresenta algumas características de cada técnica utilizada e, buscando efetuar comparação entre as mesmas, será analisado o EAM, pois este possibilita informar o grau de confiabilidade durante a criação do modelo computacional.

Tabela 5-4 – Comparação entre as técnicas. Fonte: Elaborado pelo autor.

RL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O impacto harmônico é medido individualmente entre o PAC e o alimentador individual;</li> <li>• Possibilita calcular os valores de background da rede, devido a possibilidade de ser analisada individualmente;</li> <li>• Utiliza o fator de grau de confiabilidade <math>R^2</math> para classificar a validade dos dados.</li> </ul>
RNA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O impacto harmônico pode ser medido individual ou simultaneamente entre o PAC e o grupo de alimentadores estudado;</li> <li>• Utiliza o EAM para calcular a confiabilidade dos dados.</li> </ul>
AR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O impacto harmônico pode ser medido individual ou simultaneamente entre o PAC e o grupo de alimentadores estudado;</li> <li>• Utiliza o EAM para calcular a confiabilidade dos dados. Os valores de EAM da AR são melhores quando comparado a RNA.</li> </ul>

Nas subseções a seguir, são apresentadas as comparações entre as técnicas em três períodos de amostragem (semanal, diário e por patamar de cargas), em que nestes períodos são evidenciados o fator de impacto e os valores de EAM obtidos em cada alimentador.

#### a) Análise semanal

A análise semanal segue a normatização do módulo 8 do PRODIST, sendo necessário 1.008 amostras da grandeza monitorada com intervalo de integralização de 10 minutos, possibilitando a verificação do alimentador que mais impacta o sistema neste intervalo. A Figura (5-16) demonstra o EAM (%) das fases A, B e C para as três técnicas estudadas na análise semanal e, por meio desta, verifica-se que o EAM (%) possui a seguinte escala de

confiabilidade  $AR > RNA\_3 > RLM$ .

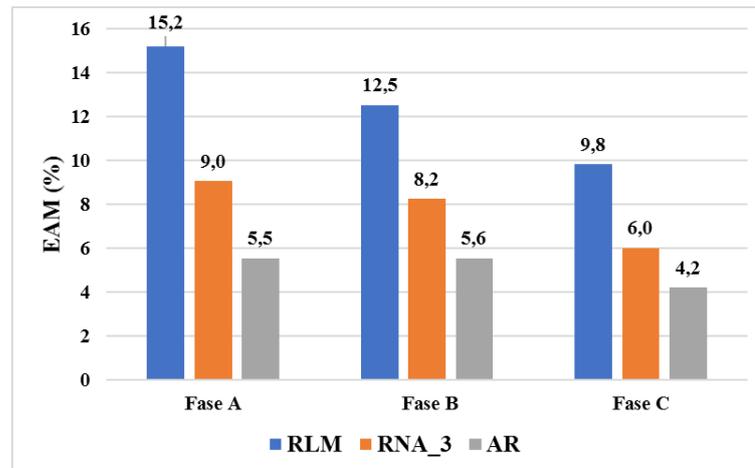


Figura 5-16 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período semanal. Fonte: Elaborado pelo autor.

### b) Análise diária

A análise diária dos sete dias da semana monitorada demonstra o fator de impacto do alimentador que mais impacta o sistema diariamente. Como forma de ilustrar a comparação entre as técnicas a Figura (5-17) demonstra a quantidade de impacto diário apresentada em cada alimentador, somadas nas três fases ao longo de uma semana de acordo com cada técnica utilizada, totalizando 21 eventos (3 fases em 7 dias) por técnica.

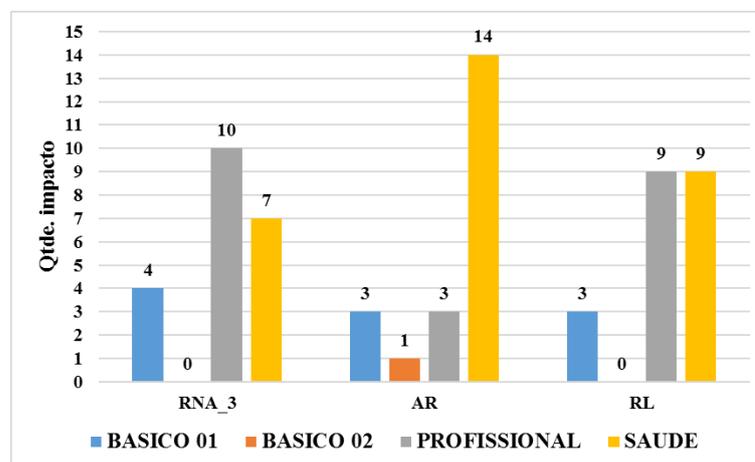


Figura 5-17 – Quantidade de dias de impacto harmônico em cada alimentador para a análise diária. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura (5-18) utiliza a média dos valores de EAM (%) diário como forma de demonstrar que a técnica de AR também possui o menor EAM na análise diária, com isto, mantém-se a ordem de confiabilidade dos valores de EAM (%), sendo  $AR > RNA\_3 > RLM$ , ou seja, a AR se mantém a melhor forma de detectar o impacto entre as técnicas.

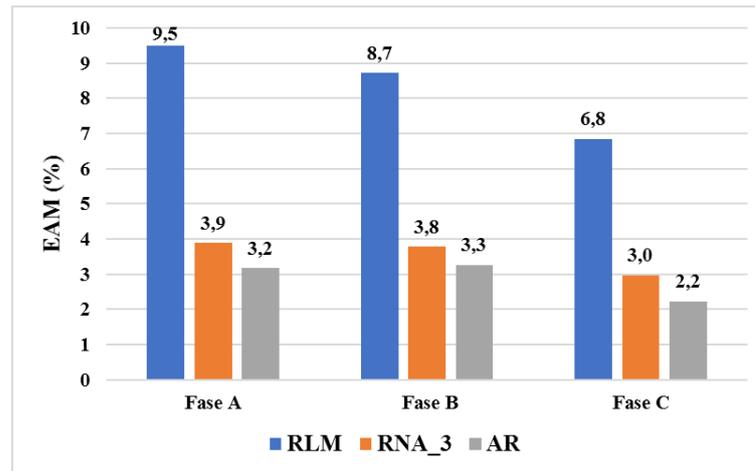


Figura 5-18 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período diário. Fonte: Elaborado pelo autor.

### c) Análise do patamar de carga

Devido a particularidade da curva de carga da universidade que possui consumo principalmente diurno, efetuou-se a classificação dos patamares de carga do campus, para que servisse de base para este estudo. A análise dos alimentadores em patamares pré-definidos (00h às 06h e 20h às 24h – leve; 06h às 10h e 16h às 20h – médio; e 10h às 16h – pesado), conforme Figura (5-19), permite a filtragem dos impactos no PAC em situações diferentes de consumo, caracterizando o alimentador que mais impacta o sistema dividido entre os patamares.



Figura 5-19 – Patamares de carga da universidade. Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido a separação dos dias em patamares de carga, o fator de impacto nos alimentadores não se mantém constante em um único alimentador, ou seja, oscila entre os alimentadores de acordo com o patamar de carga e a técnica utilizada. Como forma de ilustrar a comparação entre as técnicas a Figura (5-20) demonstra a quantidade de impacto diário apresentada em cada alimentador, somadas nas três fases ao longo de uma semana de acordo com cada técnica utilizada e cada patamar de carga, totalizando 21 eventos (3 fases em 7 dias)

por técnica e por patamar. Com isto, pela análise em patamar de carga, nota-se que os maiores impactos estão nos alimentadores Profissional e Saúde, e que o alimentador Básico 2 pouco influência no sistema.

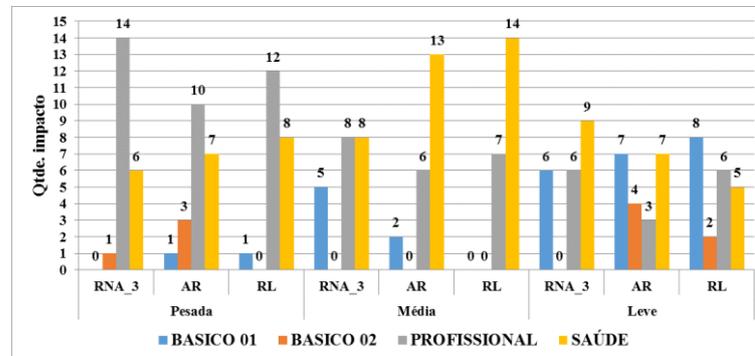


Figura 5-20 – Quantidade de dias de impacto harmônico em cada alimentador para a análise em patamar de carga. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura (5-21) utiliza a média dos valores de EAM (%) dos três patamares de carga e das três técnicas como forma de demonstrar que, neste caso, os valores médios do EAM (%) calculado da RNA\_3 (com 3 camadas) se equipara aos valores da AR. Sendo assim, no patamar de carga a ordem de confiabilidade dos valores de EAM (%) é dada por  $AR \approx RNA_3 > RLM$ .

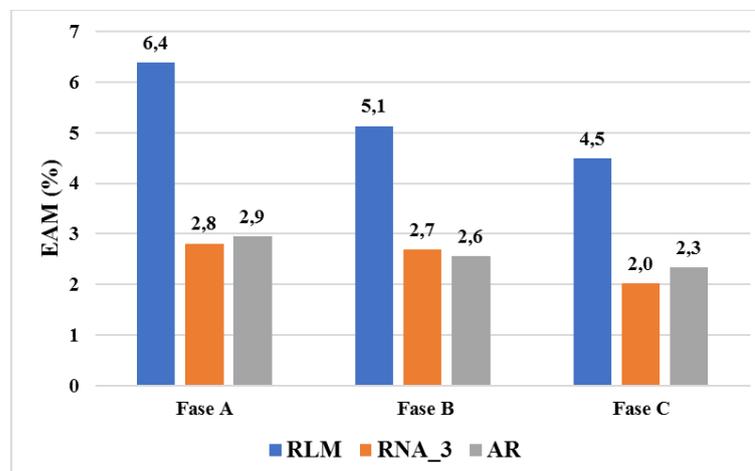


Figura 5-21 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período em patamar de carga. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela (5-5) apresenta os dados dos patamares de carga leve, médio e pesado, respectivamente, calculados no dia 22/01/2018. Este dia foi escolhido devido se aproximar a média semanal dos valores encontrados e, com isto, viabilizar a verificação do comportamento do EAM (%) em diferentes patamares de carga.

Tabela 5-5 – EAM (%) de cada alimentador no período em patamar de carga. Fonte: Elaborado pelo autor.

BASE	Patamar Pesado			Patamar Médio			Patamar Leve		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
<b>RLM</b>	5,5819	2,1588	1,8481	9,2673	7,3466	8,438	6,204	4,6073	4,2219
<b>RNA_3</b>	2,0393	1,5403	1,7874	5,3896	3,7661	2,8459	2,0188	1,9923	1,8937
<b>AR</b>	2,6213	2,0238	1,7963	5,3491	3,6379	3,4784	2,8038	2,3883	2,106

### 5.1.6. Considerações finais

O uso de metodologias baseadas em RL e inteligência artificial, como redes neurais e árvores de regressão demonstraram uma alternativa para avaliar a contribuição de impactos ocasionados por cargas não lineares em um determinado barramento do sistema elétrico com cargas características de uma instituição de ensino e/ou setores administrativos com equipamentos como computadores, condicionadores de ar e sistema de iluminação, principalmente.

Na campanha de medição deste estudo de caso, que teve como objetivo registrar valores simultâneos de harmônicos de tensão e corrente no PAC e em cada alimentador da UFPA, as técnicas de RL, RNA e AR estudadas tiveram resultados e comportamentos semelhantes que identificaram o alimentador Básico 2 como o menos impactante na distorção do 5º harmônico de tensão no PAC da UFPA, seguido dos alimentadores Básico 1 e Profissional, enquanto o alimentador Saúde classificou-se como o mais impactante dentre os quatro alimentadores analisados.

Na seção 5.1.5, de comparação do desempenho entre as técnicas de RLM, RNA e AR, no cenário da universidade, detectou-se que a técnica de AR apresentou maior confiabilidade para classificar o impacto na rede da universidade, por meio do fator de impacto do alimentador e do EAM (%), em diferentes períodos (semanal, diário e patamar de carga). Conforme a Figura (5-22), destacando a fase A de cada uma das técnicas nos diferentes períodos, é possível verificar que o EAM das três técnicas computacionais reduz à medida que o período de amostragem também é reduzido, visto que, nos períodos diário e em patamar de carga, ocorrem filtros de seleção dos dados, em que estes possuem características de cargas similares, ou seja, proporciona a seleção de intervalos com similaridade do comportamento de harmônicos, de forma a reduzir o erro encontrado.

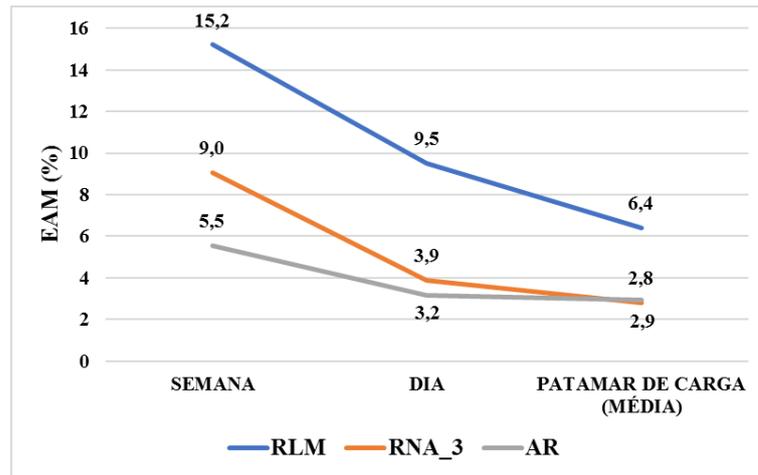


Figura 5-22 – Tendência dos valores médios de EAM (%) na fase A em diferentes períodos. Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste conjunto de dados analisados, a AR se apresenta como a melhor opção de ferramenta para análise de impactos de harmônicos no sistema elétrico estudado, visto que, devido obter os valores de EAM mais baixos, a técnica se mostra mais confiável para efetuar estudos de impacto na distorção de tensão no PAC e, além disto, o trabalho possibilita aos gestores o conhecimento prévio de suas unidades e obtenção de informações mais aprofundadas com diagnóstico da qualidade de energia das unidades.

## 5.2. ESTUDO DE CASO 2: PARQUE INDUSTRIAL DE MANAUS

### 5.2.1. Análise de QEE

Durante a análise verificou-se quesitos de QEE como os níveis de tensão, o comportamento da carga e as distorções harmônicas de tensão e corrente no decorrer do período monitorado. Na Figura (5-23) têm-se as formas de onda de tensão em pu nas três fases da planta no PAC obtidas por medição e nestas, percebe-se a inexistência de falta de fornecimento de energia e que os limites de tensão variam entre 0,960 pu e 1,041 pu, ou seja, dentro da faixa de tensão de referência (TR) determinada pelo PRODIST para o nível de tensão em 13,8 kV. Na mesma Figura (5-23), é possível visualizar os valores máximos, mínimos e médios de tensões registrados no período.

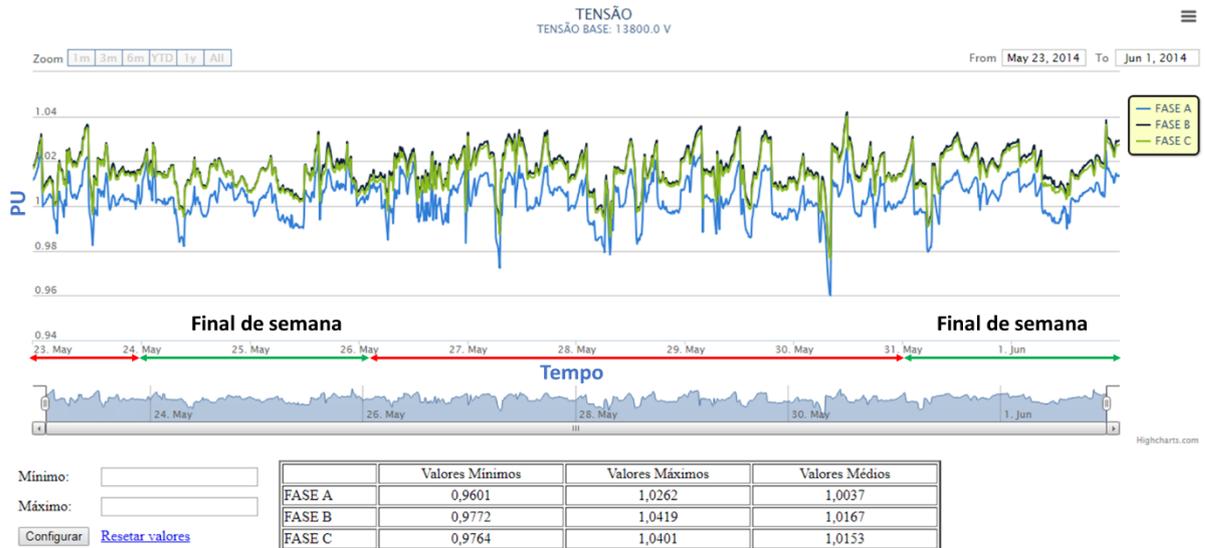


Figura 5-23 – Tensão RMS medida no lado de baixa tensão do transformador DITF4-04 da SE DI. Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura (5-24), que mostra a taxa de DHTv das três fases do transformador DITF4-04 da SE DI, observou-se que os valores de DHTv atingiram um valor máximo igual 3,90 % na fase A, 3,19% na fase B e 3,64% na fase C, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pelo módulo 8 do PRODIST, para esse nível de tensão em 13,8 kV.



Figura 5-24 – Taxa de distorção harmônica total de tensão medida do transformador DITF4-04 da SE DI. Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o intuito de ilustrar o nível de carregamento dos três alimentadores do parque industrial, as Figuras (5-25), (5-26) e (5-27), apresentam o ciclo semanal da corrente nos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-20, respectivamente. A Figura (5-28) contém os valores registrados dos máximos, mínimos e médios da corrente registrados neste período

por todos os alimentadores. Logo, verifica-se que os três alimentadores reduzem sua carga no sábado e obtêm desligamento aos domingos (dias 25/05/2014 e 01/06/2014), mas que ambos possuem níveis de carregamento diferente entre si.



Figura 5-25 – Corrente RMS medida no alimentador DIAL2-16 da SE DI. Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 5-26 – Corrente RMS medida no alimentador DIAL2-17 da SE DI. Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 5-27 – Corrente RMS medida no alimentador DIAL2-20 da SE DI. Fonte: Elaborado pelo autor.

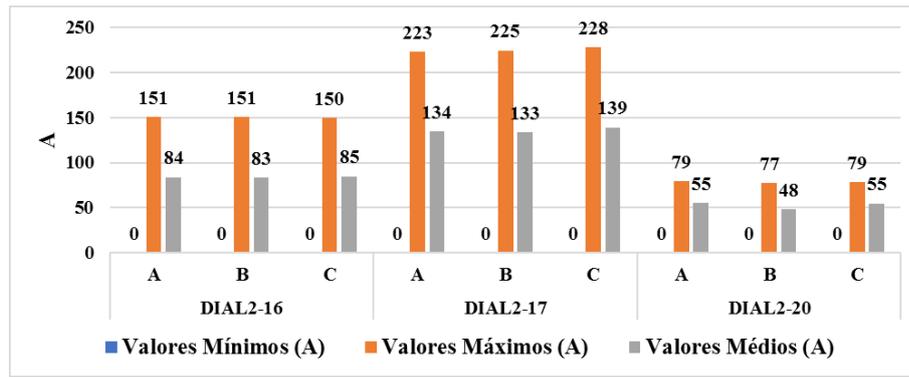


Figura 5-28 – Valores mínimos, máximos e médios de corrente medidos nos alimentadores. Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o ciclo semanal de consumo pode-se identificar a corrente assumindo valores nulos muitas vezes, pois o valor nulo se deve a sensibilidade da garra de corrente que não apresenta precisão adequada para valores muito baixos de corrente. Porém, pode-se verificar que as correntes nas Figuras (5-25), (5-26) e (5-27) não são nulas ao observar os gráficos das Figuras (5-29), (5-30) e (5-31), o qual representam a  $DHT_1$  nesses mesmos intervalos, como sendo diferente de zero.

As Figuras (5-29), (5-30) e (5-31), apresentam a taxa de  $DHT_1$  das três fases nos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-20, respectivamente, sendo que no período de maior carga dos alimentadores (segunda a sábado), os valores de  $DHT_1$  se encontram em níveis baixos e aos domingos, quando as cargas estão muito baixas, a  $DHT_1$  atinge valores de até 23 % em um dos alimentadores. A Figura (5-32) contém os valores máximos, mínimos, médios e percentis das distorções harmônicas totais de corrente, registrados neste período.

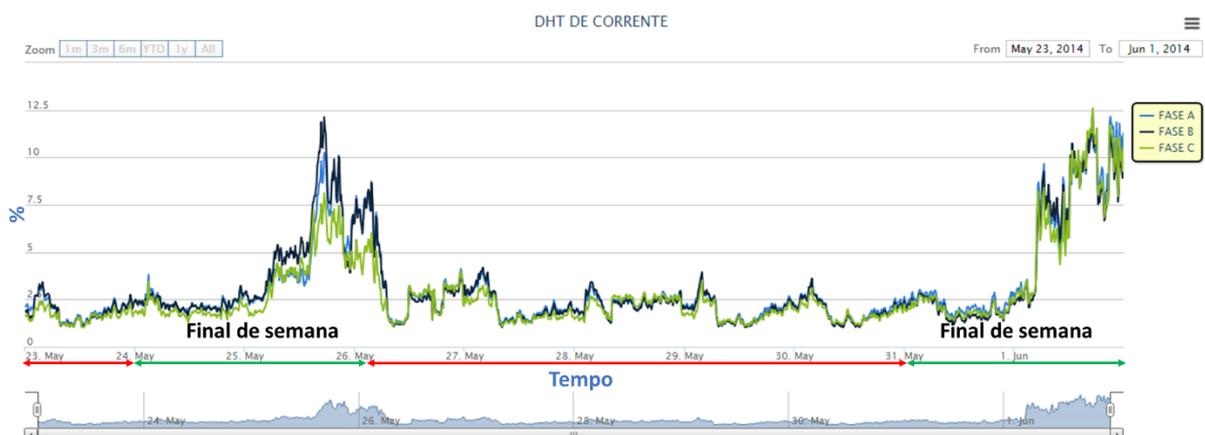


Figura 5-29 – Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no transformador DIAL2-16 da SE DI.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 5-30 – Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no transformador DIAL2-17 da SE DI.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 5-31 – Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no transformador DIAL2-20 da SE DI.

Fonte: Elaborado pelo autor.

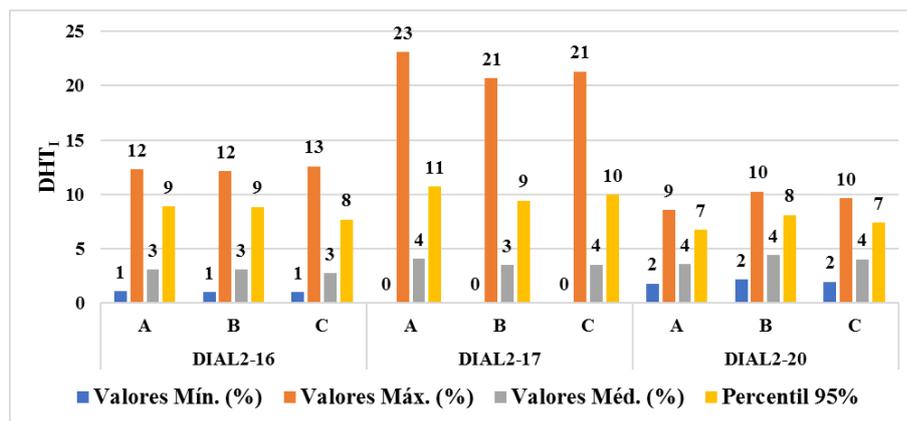


Figura 5-32 – Valores máximos, mínimos, médios e percentis de DHTI medido nos alimentadores. Fonte:

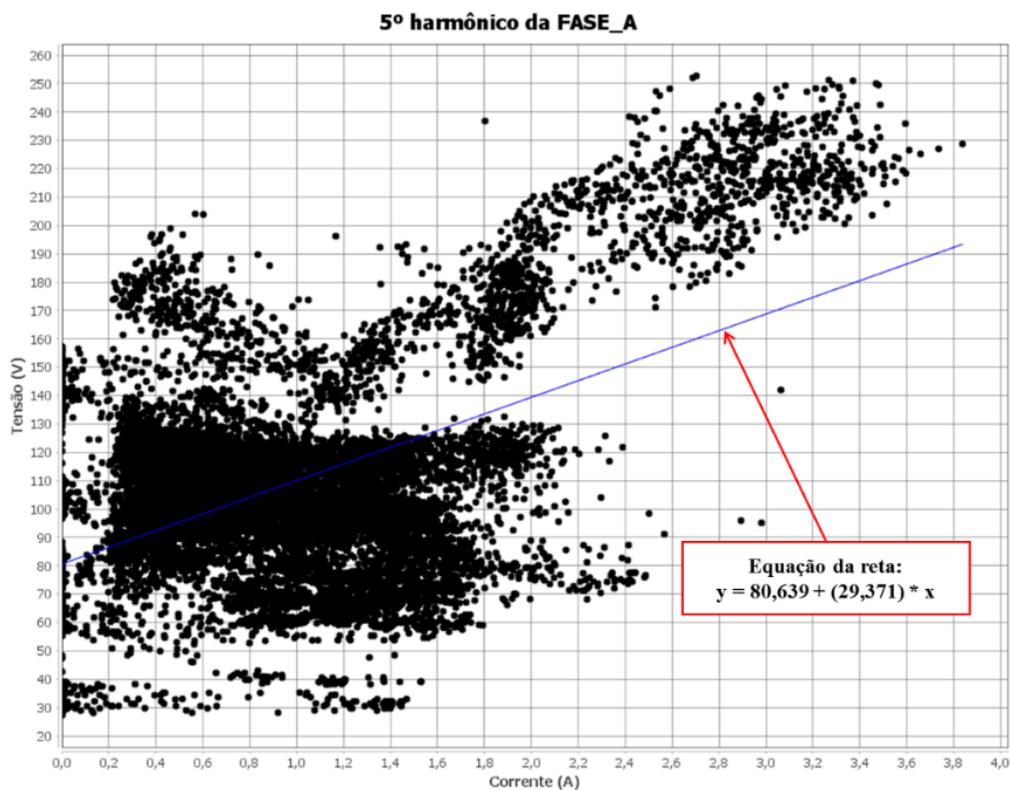
Elaborado pelo autor.

As técnicas de inteligência computacional de RL, RNA e AR, utilizadas possuem o intuito de prever a situação de parte da rede do parque industrial por meio dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-20, em relação ao background tendo como referência o lado

de baixa tensão do transformador DITF4-04, utilizando dados do 5º harmônico, conforme apresentado nas seções a seguir para cada IC.

### 5.2.2. Regressão linear

Neste estudo a RL é utilizada para verificar o impacto harmônico no PAC de um transformador da rede elétrica do parque industrial, para tal, é feita uma correlação entre a corrente harmônica, para cada alimentador e a tensão harmônica para a mesma frequência do barramento considerado no estudo. Para exemplificar a análise de RL da rede SE DI, as Figuras (5-33) (a), (b) e (c) mostram os modelos de regressão linear simples para o 5º harmônico, gerados para as três fases do alimentador DIAL2-16 em relação ao background tendo como referência o secundário do transformador DITF4-04, contendo as equações da reta que são utilizadas para calcular os impactos das tensões e o background da rede.



(a)

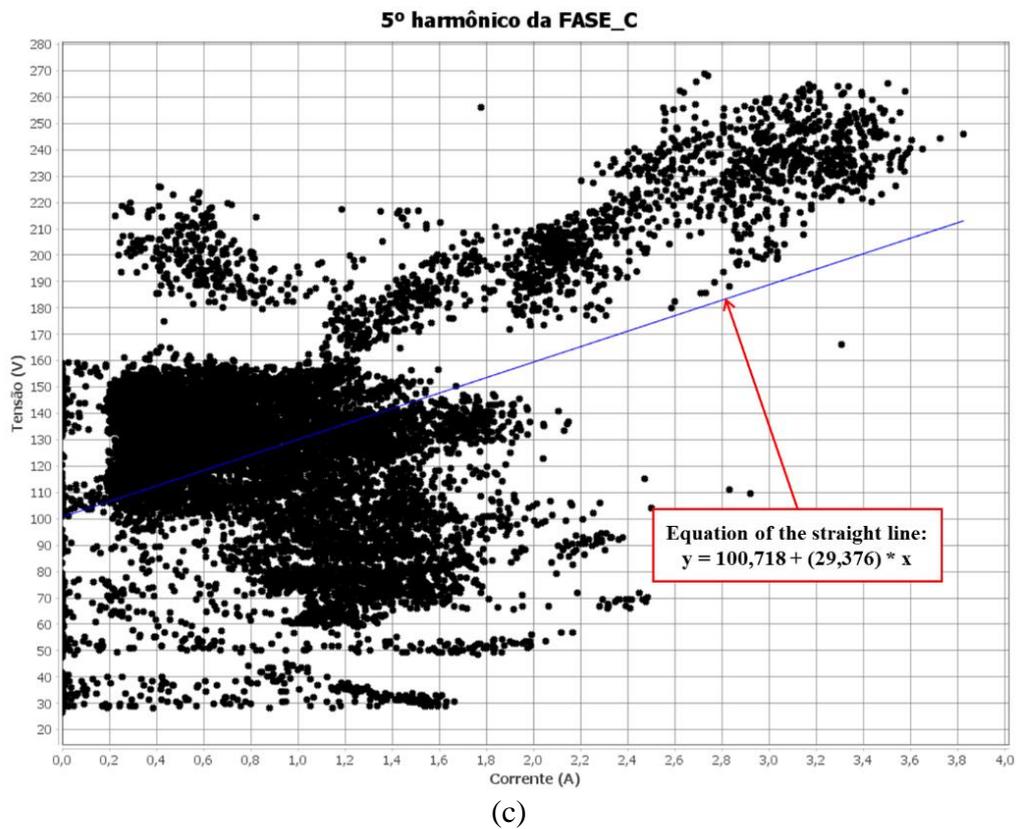
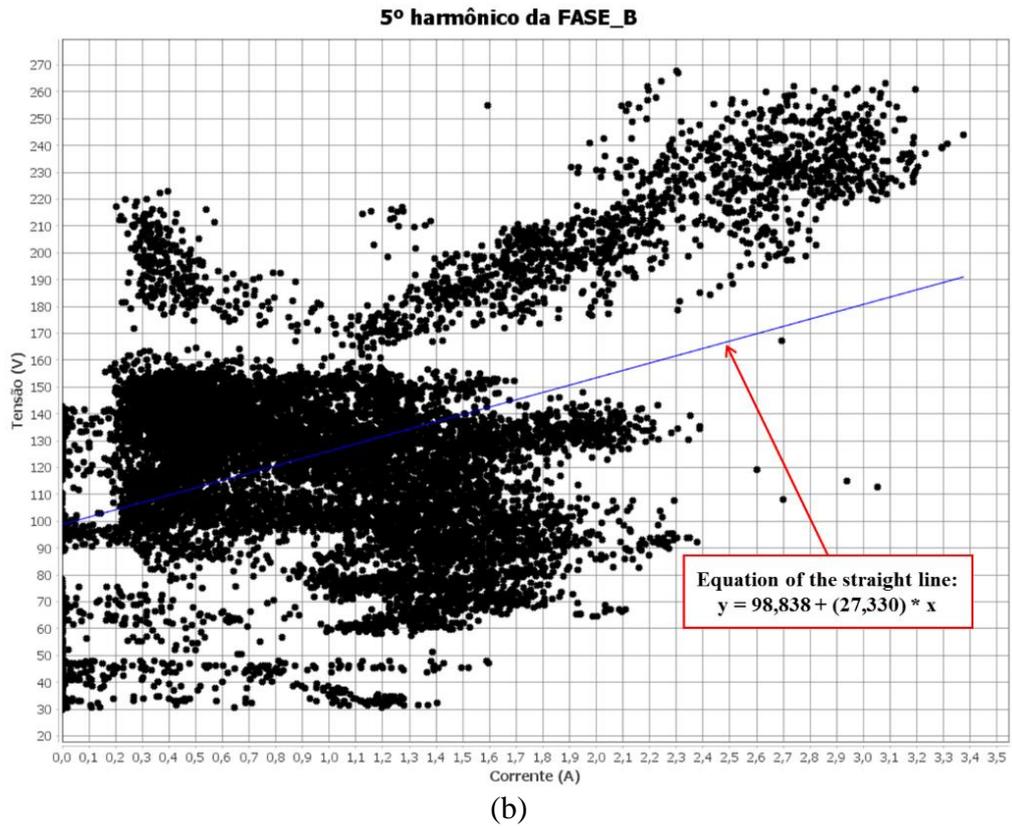
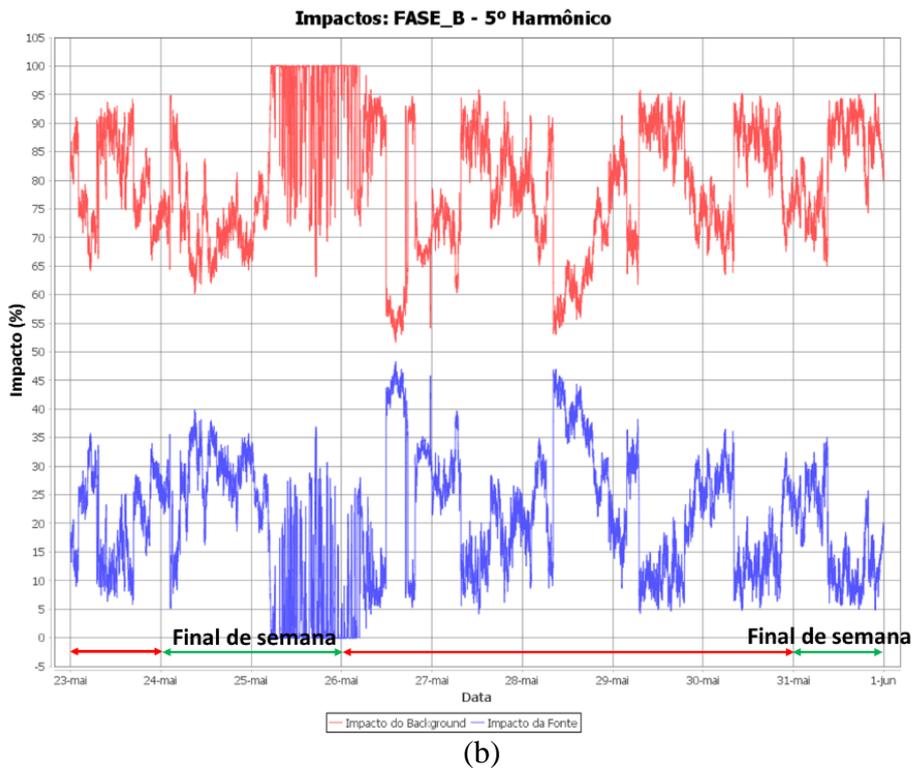
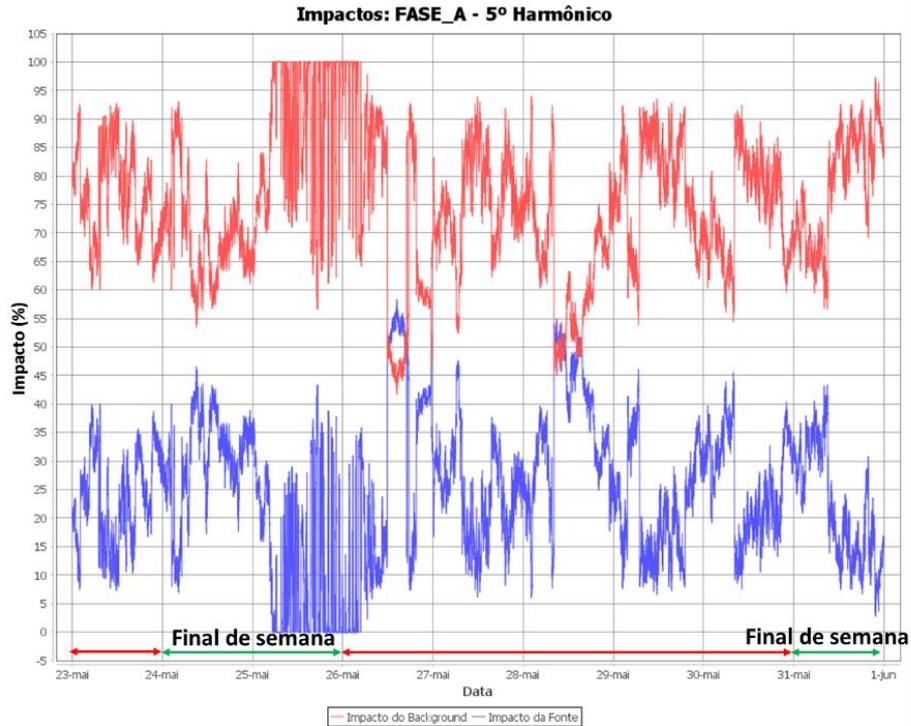


Figura 5-33 – Modelo de RL do 5º harmônico para as fases A, B e C, respectivamente (a), (b) e (c), do alimentador DIAL2-16 em relação ao transformador DITF4-04. Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras (5-34) (a), (b) e (c) mostram os impactos pontuais considerando o

alimentador da DIAL2-16 (curva azul) em relação ao background (curva vermelha). Neste caso, dado o nível de carregamento na rede sempre alto e a influência dos demais alimentadores, percebe-se que os valores de background se sobrepõem aos níveis de impactos do próprio alimentador. Esta comparação fica ainda mais evidente quando analisada a Tabela (5-6).



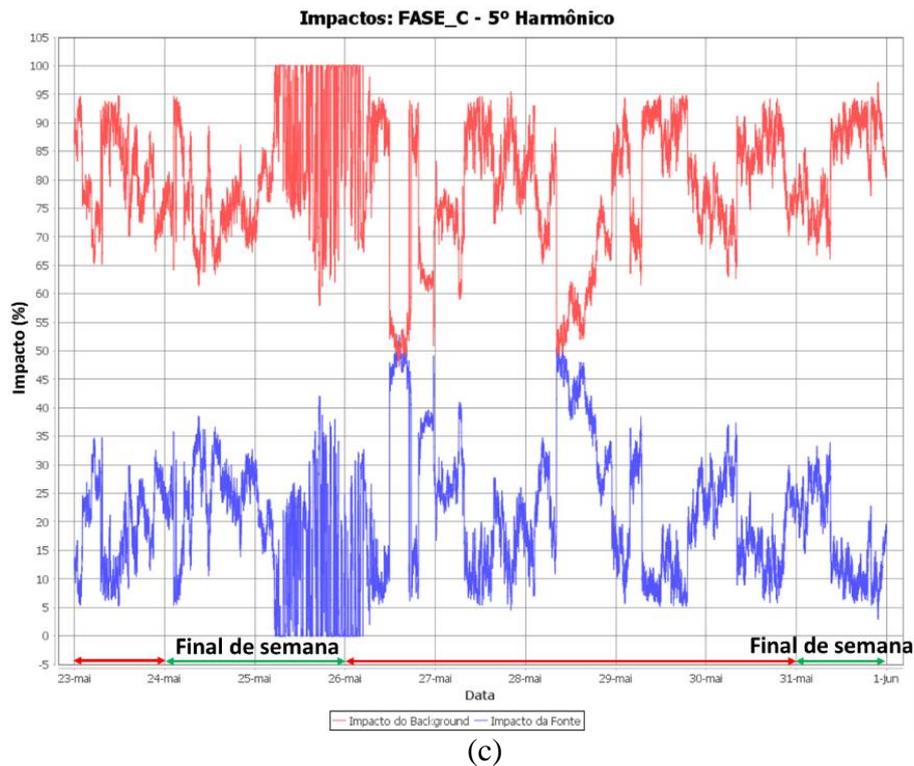


Figura 5-34 – Fator de impacto pontual do 5º harmônico para as fases A, B e C, respectivamente (a), (b) e (c), do alimentador DIAL2-16 em relação ao transformador DITF4-04. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela (5-6) apresenta os fatores de impacto percentual sobre o 5º harmônico de tensão ( $IF_{VT}$  (%)) no PAC estimado para cada um dos alimentadores, individualmente e seus respectivos impactos de background ( $IF_{VBG}$  (%)). As equações e fórmulas para cálculo dos valores de  $IF_{VT}$  (%),  $IF_{VBG}$  (%) e  $R^2$ , estão descritos na seção 4.2.1 desta dissertação. Dessa maneira, tem-se que, dentre os três alimentadores analisados, o alimentador DIAL2-17 possui as cargas que impacta de maneira mais significativa na distorção de 5º harmônico do barramento de entrada nas fases A (36,658) e B (26,524), enquanto a fase C (20,564) é impactada pelo alimentador DIAL2-16. Também é possível verificar a representatividade do impacto de background em cada fase.

Tabela 5-6 – Fatores de impacto percentual do 5º harmônico calculados para cada alimentador e seus respectivos background utilizando regressão linear. Fonte: Elaborado pelo autor.

FONTE	FASE A	FASE B	FASE C
<b>DIAL2-16</b>			
IF <sub>VT</sub> (%)	24,661	20,283	20,564
IF <sub>VBG</sub> (%)	75,339	79,717	79,436
R <sup>2</sup>	0,261 / Moderada	0,183 / Moderada	0,232 / Moderada
<b>DIAL2-17</b>			
IF <sub>VT</sub> (%)	36,658	26,524	17,322
IF <sub>VBG</sub> (%)	63,342	73,476	82,678
R <sup>2</sup>	0, 261 / Moderada	0, 209 / Moderada	0, 089 / Baixa
<b>DIAL2-20</b>			
IF <sub>VT</sub> (%)	01,232	04,810	09,943
IF <sub>VBG</sub> (%)	98,768	95,190	90,057
R <sup>2</sup>	0,000 / Baixa	0,005 / Baixa	0,021 / Baixa

### 5.2.3. Redes neurais artificiais

Utilizando os mesmos métodos e parâmetros apresentados no estudo de caso 1, a seguir são exibidos os resultados referentes à análise da contribuição das correntes harmônicas de 5ª ordem dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-20, utilizando dados de tensão harmônica também de 5ª ordem no secundário do transformador DITF4-04. Os cálculos para determinação do indicador EAM também estão descritos na Seção 4.2.2 desta dissertação.

A RNA utilizada também é a MLP, porém o número de entradas neste estudo é igual a três, resultando em quatro neurônios, conforme Figura (5-35).

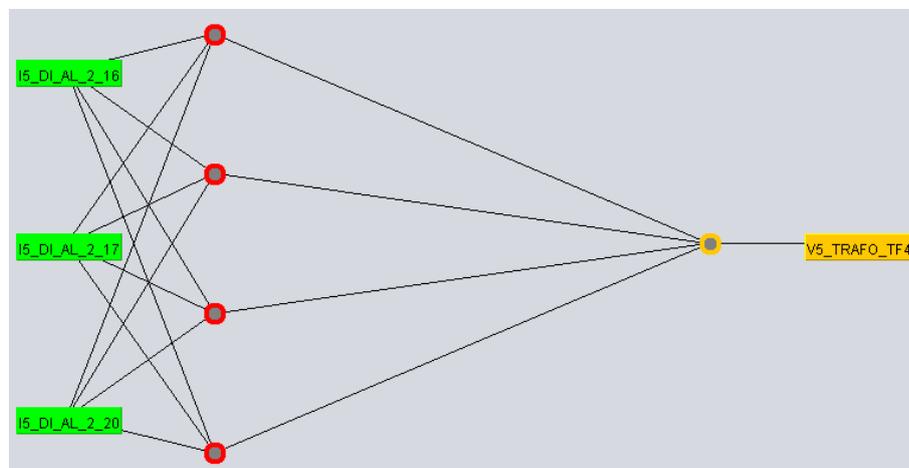


Figura 5-35 – Topologia das RNAs do estudo de caso. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela (5-7) contém os fatores de impactos calculados para cada alimentador, além do erro do modelo neural criado. Ao analisar os dados obtidos, verifica-se que o alimentador DIAL2-20 apresenta maior influência na distorção de tensão do barramento nas fases B (32,559) e C (41,267), enquanto o alimentador DIAL2-17 influencia na fase A (33,786). Para avaliar a confiabilidade dos resultados verificou-se que o EAM apresentado entre as três fases, possui valores médios de 14 %, aproximadamente.

Tabela 5-7 – Fatores de impacto percentual do 5º harmônico calculados para cada alimentador utilizando RNA.

Fonte: Elaborado pelo autor.

<b>FONTE</b>	<b>FASE A</b>	<b>FASE B</b>	<b>FASE C</b>
<b>DIAL2-16</b>	21,067	17,182	13,963
<b>DIAL2-17</b>	33,786	30,56	27,963
<b>DIAL2-20</b>	24,402	32,559	41,267
<b>EAM</b>	13,4393	13,7334	15,5782

As Figuras (5-36) (a), (b) e (c), das fases A, B e C, respectivamente, apresentam as tensões de 5º harmônico na saída da RNA bem como os valores de tensão medidos no barramento de interesse. Por meio das Figuras mencionadas, observa-se uma similaridade entre as fases ao longo de todo o período, sem destaque para um único alimentador.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-36 – Tensão de saída da RNA de 5º harmônico em cada alimentador para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. Fonte: Elaborado pelo autor.

Já as Figuras (5-37) (a), (b) e (c), apresentam as tensões real (curva em azul) do 5º harmônico nas fases A, B e C, respectivamente, e o modelo projetado na RNA (curva em verde), também nas três fases. Logo, percebe-se a aproximação entre as curvas e a similaridade entre o comportamento das mesmas, com um mínimo de diferença.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-37 – Tensão real de saída e o modelo estimado da RNA de 5º harmônico para a fase A, B e C no barramento de 13,8 kV. Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras (5-38) (a), (b) e (c) apresentam os impactos calculados nas três fases, para cada alimentador, na distorção de 5º harmônico do barramento de 13,8 kV do transformador DITF4-04 ao longo do período de medição considerado. Em suas análises, verifica-se que os impactos variam ao longo do período de medição, porém, na maioria dos casos, existe a alternância de maiores valores entre alimentadores DIAL2-17 (curva em azul) e DIAL2-20 (curva em verde).

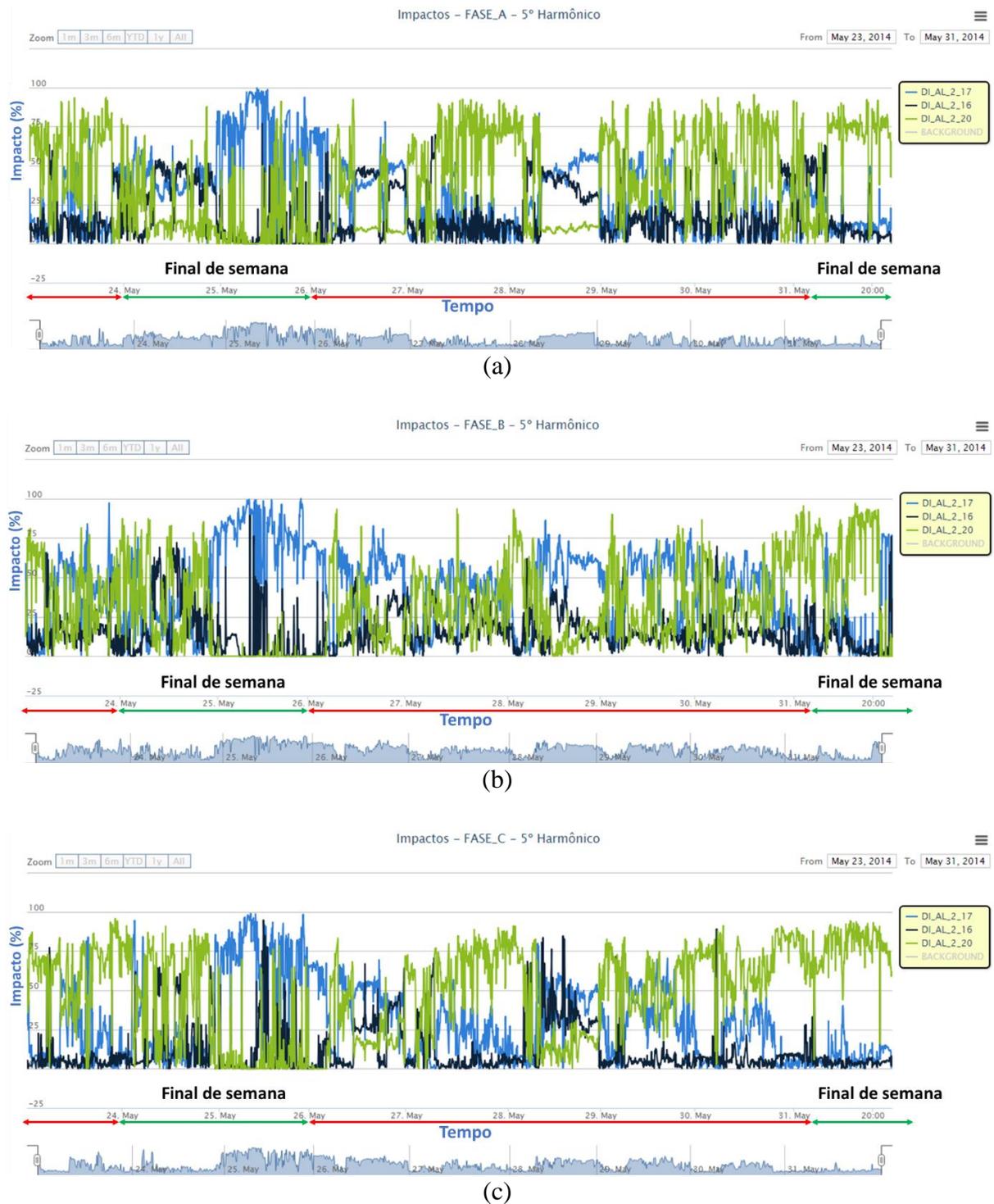


Figura 5-38 – Impactos de 5º harmônico do modelo de RNA para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.2.4. Árvores de regressão

O período e os parâmetros utilizados na análise da AR são os mesmos utilizados no estudo de caso 1, assim como as fórmulas utilizadas para os cálculos estão descritas na seção

4.2.3. A seguir são apresentados os resultados referentes à análise da contribuição das correntes harmônicas de 5ª ordem dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-20, em relação à barra do transformador DITF4-04.

A Tabela (5-8) contém os fatores de impactos calculados para cada alimentador, além do erro do modelo obtido para a construção da árvore. Como pode ser visto, o alimentador DIAL2-17 representa maior influência na distorção de tensão de 5º harmônico no PAC para as três fases, contudo, o alimentador DIAL2-20 possui valores muito aproximados nas fases B e C. Os valores médios de EAM do modelo estão em entorno de 11 % para as três fases, de modo que já apresenta valores mais baixos do que a RNA e serão detalhados na seção 5.2.5.

Tabela 5-8 – Fatores de impacto percentual do 5º harmônico calculados para cada alimentador utilizando AR.

Fonte: Elaborado pelo autor.

<b>FONTE</b>	<b>FASE A (%)</b>	<b>FASE B (%)</b>	<b>FASE C (%)</b>
<b>DIAL2-16</b>	19,627	20,968	20,309
<b>DIAL2-17</b>	41,599	34,483	33,623
<b>DIAL2-20</b>	25,563	32,635	32,477
<b>EAM</b>	10,7116	10,6879	12,1818

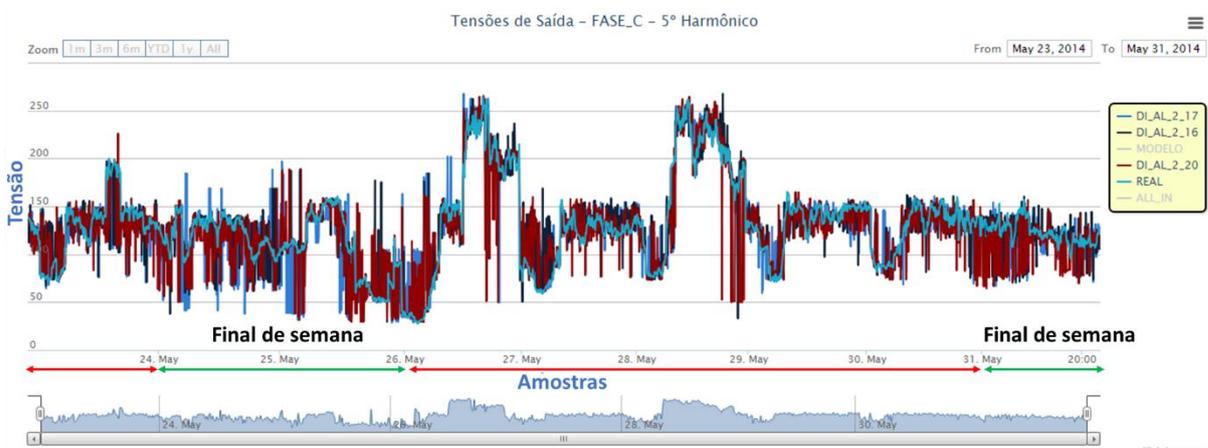
As Figuras (5-39) (a), (b) e (c) apresentam as tensões de saída da AR, bem como os valores de tensão real medidos no barramento de interesse e, por meio destas, verifica-se que não há dominância de nenhum alimentador em nenhuma das fases ao longo de todo o período. Além disto, as tensões de saída para o 5º harmônico na análise de AR possuem o mesmo comportamento da análise na RNA.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-39 – Tensão de saída da AR de 5º harmônico em cada alimentador para as fases A, B e C na barra de 13,8 kV. Fonte: Elaborado pelo autor.

Já as Figuras (5-40) (a), (b) e (c), apresentam as tensões real (curva em azul) e o modelo projetado na AR (curva em verde) do 5º harmônico nas fases A, B e C, respectivamente. Neste caso, fica visível a compatibilidade entre as curvas real e o modelo projetado.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-40 – Tensão real de saída e o modelo estimado da RNA de 5º harmônico para a fase C no barramento de 13,8 kV. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.5. Comparação do desempenho entre as técnicas

Esta seção apresenta a comparação entre as técnicas de RL, RNA e AR com o objetivo de quais destas possui melhor aproveitamento durante análise. Assim como apresentado na Tabela (5-4) exposta no estudo de caso 1 na seção 5.1.5, as características de cada técnica utilizada tiveram o mesmo comportamento no estudo de caso 2.

Nas subseções a seguir, são apresentadas as comparações entre as técnicas em três períodos de amostragem (semanal, diário e por patamar de cargas), em que nestes períodos são evidenciados o fator de impacto e os valores de EAM obtidos em cada alimentador.

#### a) Análise semanal

A análise semanal segue a normatização do módulo 8 do PRODIST, sendo necessário

1.008 amostras da grandeza monitorada com intervalo de integralização de 10 minutos, possibilitando a verificação do alimentador que mais impacta o sistema neste intervalo. Contudo, buscando evidenciar a redução brusca de carga aos domingos, efetuou-se medição e análises no período de 9 dias. A Figura (5-41) demonstra o EAM (%) das fases A, B e C para as três técnicas estudadas na análise semanal e, por meio desta, verifica-se que o EAM (%) possui a seguinte escala de confiabilidade  $AR > RNA\_2 > RLM$ .

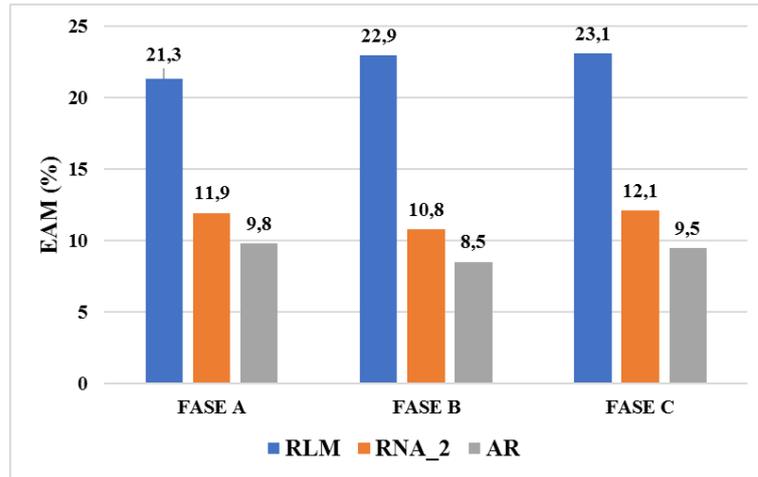


Figura 5-41 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período semanal. Fonte: Elaborado pelo autor.

**b) Análise diária**

A análise diária dos nove dias do período monitorado demonstra o fator de impacto do alimentador que mais impacta o sistema diariamente. Como forma de ilustrar a comparação entre as técnicas a Figura (5-42) demonstra a quantidade de impacto diário apresentada em cada alimentador, somadas nas três fases ao longo de nove dias de acordo com cada técnica utilizada, totalizando 27 eventos (3 fases em 9 dias) por técnica.

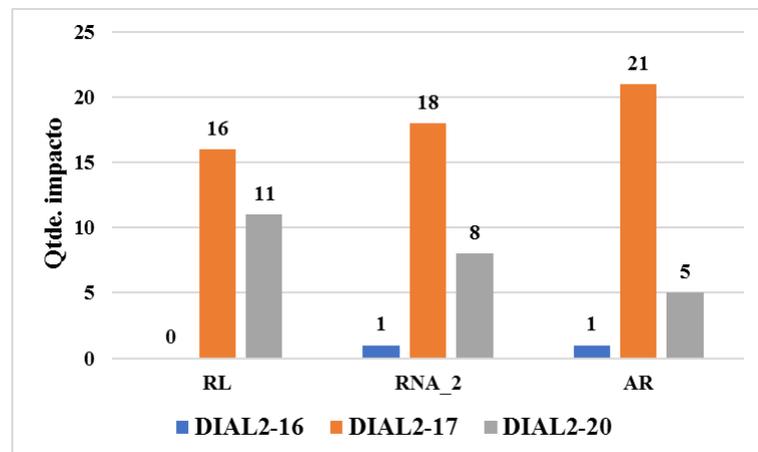


Figura 5-42 – Quantidade de dias de impacto harmônico em cada alimentador para a análise diária. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura (5-43) utiliza a média dos valores de EAM (%) diário como forma de demonstrar que a técnica de AR também possui o menor EAM na análise diária, com isto, mantem-se a ordem de confiabilidade dos valores de EAM (%), sendo  $AR > RNA\_2 > RLM$ , ou seja, a AR se mantém a melhor forma de detectar o impacto entre as técnicas.

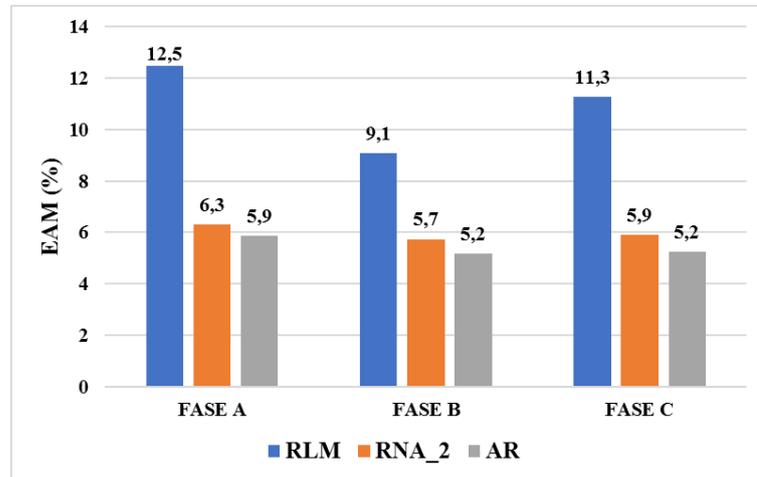


Figura 5-43 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período diário. Fonte: Elaborado pelo autor.

**c) Análise do patamar de carga**

Devido a particularidade da curva de carga do distrito industrial, efetuou-se a classificação dos patamares de carga do distrito, para que servisse de base para este estudo. A análise dos alimentadores em patamares pré-definidos (00h às 07h e 17h às 24h – leve; e 07h às 17h – pesado), conforme Figura (5-44), permite a filtragem dos impactos no PAC em situações diferentes de consumo, caracterizando o alimentador que mais impacta o sistema dividido entre os patamares.



Figura 5-44 – Patamares de carga da universidade. Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido a separação dos dias em patamares de carga, o fator de impacto nos alimentadores não se mantém constante em um único alimentador, ou seja, oscila entre os alimentadores de acordo com o patamar de carga e a técnica utilizada, conforme pode ser

visualizado na Figura (5-45). Com isto, pela análise em patamar de carga, nota-se que os maiores impactos estão nos alimentadores Profissional e Saúde, e que o alimentador Básico 2 pouco influência no sistema.

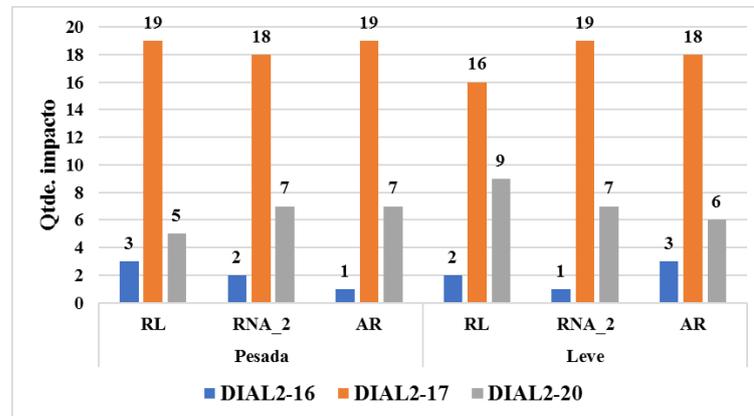


Figura 5-45 – Quantidade de dias de impacto harmônico em cada alimentador para a análise em patamar de carga. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura (5-46) utiliza a média dos valores de EAM (%) dos três patamares de carga e das três técnicas como forma de demonstrar que, neste caso, os valores médios do EAM (%) calculado da RNA\_2 (com 2 camadas) praticamente se equipara aos valores da AR. Contudo, os valores do EAM da AR ainda são menores do que as demais técnicas, sendo assim, a ordem de confiabilidade dos valores de EAM (%) é dada por AR > RNA\_3 > RLM.

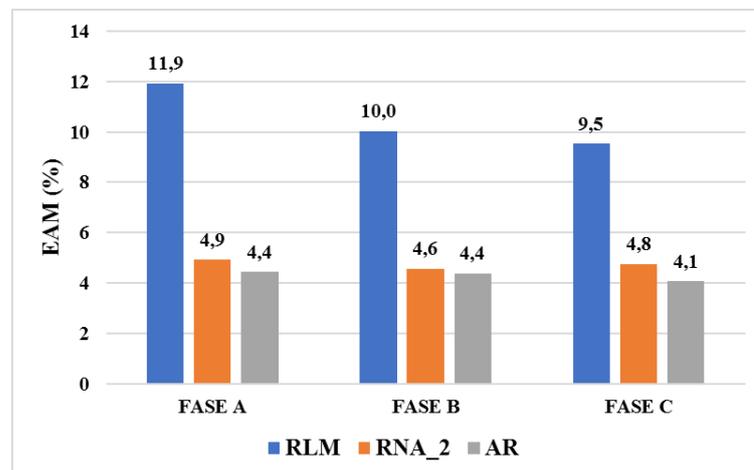


Figura 5-46 – EAM (%) nas fases A, B e C das três técnicas no período em patamar de carga. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela (5-9) apresenta os dados dos patamares de carga leve e pesado, respectivamente, calculados no dia 27/05/2014. Este dia foi escolhido devido se aproximar a média semanal dos valores encontrados e, com isto, viabilizar a verificação do comportamento do EAM (%) em diferentes patamares de carga.

Tabela 5-9 – EAM (%) de cada alimentador no período em patamar de carga. Fonte: Elaborado pelo autor.

BASE	Patamar Pesado			Patamar Leve		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
<b>RLM</b>	8,0128	8,0258	7,7531	15,2668	17,5550	12,7563
<b>RNA_2</b>	4,3504	4,8565	4,6709	6,4616	4,1559	4,5975
<b>AR</b>	5,2828	6,0455	5,8029	7,2663	4,383	4,5507

### 5.2.6. Considerações finais

No presente trabalho, utilizou-se dados provenientes de uma campanha de medição com o objetivo de registrar valores simultâneos de harmônicos de tensão em um ponto do distrito industrial de Manaus e de corrente em três dos alimentadores nesta rede elétrica. Além disto, efetuou-se comparação entre as técnicas de RLM, RNA e AR, por meio do fator de impacto do alimentador e do EAM (%) calculado em diferentes períodos (semanal, diário e patamar de carga) com o objetivo de analisar qual a técnica apresenta maior confiabilidade para classificar o impacto na rede estudada.

Durante a análise semanal, verificou-se que os alimentadores DIAL2-17 e DIAL2-20 possuem valores do fator de impactos muito próximos nas três fases, de modo que esta semelhança fica ainda mais evidente quando é feita a análise diária, em que a diferença dos impactos diários se alterna nas três técnicas computacionais. Contudo, a quantidade de dias de impacto do alimentador DIAL2-17 é consideravelmente maior do que os demais, nos períodos diário e em patamar de carga.

A análise de comparação das três técnicas permitiu visualizar a redução do EAM a medida em que o período de amostragem também é reduzido, visto que, nos períodos diário e em patamar de carga, funcionam como filtros dos dados, unindo as cargas que possuem características similares e proporcionando a seleção de intervalos com a mesma influência de harmônicos. Tal descrição é mostrada por meio da Figura (5-47), destacando a fase A de cada uma das técnicas nos diferentes períodos.

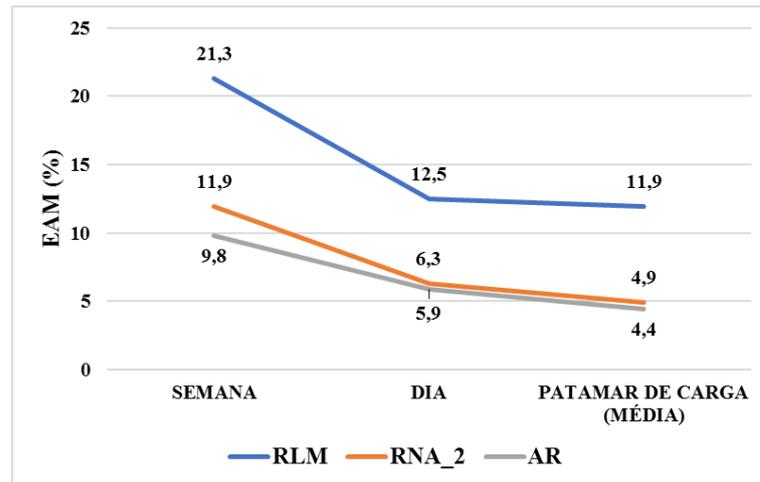


Figura 5-47 – Tendência dos valores médios de EAM (%) na fase A em diferentes períodos. Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste conjunto de dados analisados e para os parâmetros utilizados, a AR também se apresenta como a melhor opção de ferramenta para análise de impactos de harmônicos no sistema elétrico, pois, devido obter os valores de EAM mais baixos, a técnica se mostra mais confiável para efetuar estudos de impacto na distorção de tensão no PAC e, além disto, o trabalho possibilita aos gestores o conhecimento prévio, avaliação de suas unidades e obtenção de informações mais claras com diagnóstico da qualidade de energia dos setores fabris.

## CAPÍTULO 6

### 6. CONCLUSÃO

#### 6.1. CONCLUSÕES GERAIS

O aumento do número de cargas não lineares devido à evolução industrial e o crescimento do setor elétrico nos últimos anos impactou a QEE em consumidores de diferentes países. Devido aos impactos na  $THD_V$ , especialistas tem procurado diagnosticar e mitigar esses efeitos com o uso crescente de técnicas computacionais. Sendo assim, esta dissertação apresentou metodologias baseadas em RL e IC, como RNA e AR como alternativa para avaliar a contribuição de impactos harmônicos ocasionados por cargas não lineares em um determinado barramento do sistema elétrico. Além disto, também foi possível efetuar um comparativo entre as três técnicas, em diferentes períodos, para ilustrar aquela que apresenta maior acurácia na identificação dos impactos harmônicos.

A expansão de redes elétricas devido crescimento populacional, a entrada de novas cargas de grande porte ou até mesmo a inserção de geração distribuída, dentre outros, na rede faz com que, constantemente, haja alteração dos níveis de harmônicos e alteração da representatividade de cada alimentador ao sistema elétrico. Logo, a realização de campanhas de medição e dos estudos complementares está relacionado com a identificação das principais fontes geradoras de distorções harmônicas, podendo, a partir de então, atribuir responsabilidades e tomar medidas necessárias para a melhoria dos índices de QEE da rede elétrica, evitando futuras penalidades impostas pela concessionária ou agência reguladora devido à transgressão desses índices.

Para comprovação da metodologia proposta, foram analisados dois sistemas elétricos diferentes como número de alimentadores, perfil de consumo, perfil de carga e/ou equipamentos e período de operação, em que as técnicas computacionais foram capazes de descrever o comportamento da tensão harmônica do sistema elétrico em função da corrente harmônica dos alimentadores durante os períodos de medição pré-determinados.

No estudo de caso 1, a metodologia proposta foi aplicada no campus da Universidade Federal do Pará, onde se avaliou a influência dos quatro alimentadores principais no PAC,

localizado na entrada do campus. Como o 5º harmônico de tensão foi o mais impactante dentre os demais harmônicos medidos, este foi tomado como base para as análises. As três técnicas apontaram a maior influência de harmônico advindo do mesmo alimentador, mesmo em intervalos de análises diferentes (semanal, diário e patamar de carga), oferecendo maior confiabilidade. Enquanto a comparação entre as técnicas permitiu classificar a AR como a de menor EAM dentre as demais, mesmo com redução do intervalo temporal de análise.

No estudo de caso 2, a análise foi realizada no sistema elétrico de uma rede industrial de Manaus, onde se avaliou a influência de três alimentadores no ponto de interesse, localizado no secundário de um transformador de 69/13,8 kV. Aqui também se destacou a distorção de tensão do 5º harmônico como o mais impactante dentre os demais, e esta foi tida como base para as análises. As três técnicas apontaram a maior influência de harmônico advindo do mesmo alimentador e com intervalos análises diferentes, assim como as técnicas classificaram a árvore de regressão como a de menor erro (EAM) dentre as demais, como no estudo 1.

Ambos estudos se apresentaram confiáveis, principalmente pelo fato de que as três técnicas apontaram os mesmos alimentadores como impactante na rede. Também se evidenciou que as técnicas computacionais aumentam sua acurácia à medida em que o período de amostragem é reduzido, visto que nos períodos menores (diário e em patamar de carga), as técnicas operam como filtros de seleção dos dados, analisando as cargas que possuem características similares e, com isto, os intervalos com maior influência de harmônicos.

Por se tratar de um sistema adaptável a qualquer rede elétrica, o trabalho possibilita aos gestores (agentes reguladores, concessionárias e consumidores) o conhecimento prévio de suas unidades e a obtenção de informações mais aprofundadas com diagnóstico da qualidade de energia, evidenciando os níveis de distorção harmônica de tensão presente e a identificando das cargas suspeitas de estarem contribuindo de forma mais significativa para tal distorção. Logo, os resultados permitem a adoção de medidas remediais para a correção de transgressões, redução perdas técnicas e, também, evitar multas da ANEEL devido a melhoria da qualidade da energia elétrica. Como o processo de análise não funciona automaticamente, fica a cargo do gestor optar pela periodicidade que irá rodar o programa para analisar quais cargas ou clientes estão impactando a rede, assim como seu grau de intensidade perante aos demais consumidores.

## 6.2. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta área, ainda há muito a ser desenvolvido e consolidado, sendo assim, como trabalhos futuros, sugere-se:

- Aplicar esta metodologia nas cargas de um único alimentador, como por exemplo, o alimentador Saúde na UFPA, que apresentou maior impacto, a fim de identificar a carga mais impactante;
- A criação de uma ferramenta ou software que possibilite análise em tempo real de gerenciamento da distorção harmônica nos sistemas elétricos;
- A criação de uma ferramenta na qual as técnicas de inteligência computacional possam ser comparadas entre si;
- Efetuar medições com períodos maiores, para mensurar o comportamento das técnicas;
- Utilizar a árvore de regressão como forma de previsão para mitigação do impacto harmônico.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia.** Revisão 10. 2018.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power system harmonics.** Second Edition. John Wiley & Sons, 2003.

BEZERRA, U. H.; TOSTES, M. E. L.; ARAÚJO, A. C.; TUPIASSÚ, A. A. **Desenvolvimento de modelos experimentais para representação harmônica de consumidores em baixa tensão.** Publicado nos Anais do IV SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, Porto Alegre – RS, Brasil, agosto de 2001.

BIKAS, A. K.; VOUMVOULAKIS, E. M.; HATZIARGYRIOU, N. D. **Intelligent system applications to power systems.** ISAP 09. 15th International Conference, 2009.

BORDIGNON, S. **Metodologia para previsão de carga de curtíssimo prazo considerando variáveis climáticas e auxiliando na programação de despacho de pequenas centrais hidroelétricas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Pampa, Alegrete – RS, 2012.

BORGES, F. A. S. **Extração de características combinadas com árvore de decisão para detecção e classificação dos distúrbios de qualidade da energia elétrica.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2013

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. C.; LUDEMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: Teoria e aplicações.** 2º edição: Editora LTC, 2007.

CASTANHEIRA, L. G. **Aplicação de técnicas de mineração de dados em problemas de classificação de padrões.** Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte – MG, setembro de 2009.

CIUFU, L.; POPESCU, C. L.; POPESCU, M. O. **Experimental mitigation techniques to reduce the Total Harmonic Distortion of low voltage non-linear power sources.** In: Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2017.

CHARNET, R.; FREIRE, C. A. de L.; CHARNET, E. M. R.; BONVINO, H. **Análise de Modelos de Regressão Linear – com aplicações**. São Paulo: Editora Unicamp, 1999.

COSTA, G. G. O. **Curso de estatística inferencial e probabilidades: teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2012.

CRAWLEY, M. J. **Statistics – An introduction using R**. John Wiley & Sons, Ltd., 2005.

DIAS, G. A. D. **Harmônicas em Sistemas industriais**. Coleção Engenharia, EDIPUCRS, Porto Alegre, 1998.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. Second Edition. McGraw- Hill, 2004.

ELETRORÁS. **7 - Energia Elétrica: conceito, qualidade e tarifação, guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2008.

ESTEVES, E. A. C. **Impactos na qualidade da energia elétrica provenientes do rápido crescimento da demanda no sudeste do estado do PARÁ**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2012. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

FACELI, K.; LORENA, A. C.; GAMA, J.; CARVALHO, A. **Inteligência artificial: Uma abordagem de aprendizado de máquina**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

FERNANDES, R. A. S.; OLESKOVICZ, M.; SILVA, I. N. da. **Identificação de cargas lineares e não-lineares em sistemas elétricos residenciais usando técnicas para seleção de atributos e redes neurais artificiais**. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática, v. 21, n. 4, p. 389-405, 2010.

FORTES, M. Z.; FERREIRA, V. H.; ZANGHI, R. **A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines**. Electric Power Systems Research, v. 136, p. 135-153, 2016.

GALHARDO, M. A. B. **Contribuições ao estudo da compensação de harmônicos em sistemas de energia elétrica**. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2006. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

GAMA, P. H. R. P. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. Eletrobrás/PROCEL EDUCAÇÃO. Itajúba, 2006.

GARCIA, F. R. **Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência**. In: Capacitores INEPAR. IESA/SA. São Paulo, 2008. Disponível em: < [http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf\\_reativa/ap\\_harmonicosePCap.pdf](http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosePCap.pdf) >. Acesso em: 10 mai. 2018.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática** trad. Paulo Martins Engel. – 2.ed. – Porto Alegre: Bookman, 2001.

CHENG, L. H. **Intelligent neural network-based fast power system harmonic detection**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, New York, v. 54, n. 1, p. 43-52, Feb. 2007.

IEC 61000-3-2. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase) (IEC 61000-3-2:2005 + A1:2008 + A2:2009); German version EN 61000-3-2:2006 + A1:2009 + A2:2009

IEC 61000-4-7:2002 ed. 2.0 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.

IEC. IEC-91- Draft Classification of Electromagnetic Environments. Relatório técnico, IEC: TC77WG6 (Secretary) 110-R5, Janeiro 1991.

IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems: IEEE Standard 519, 1992.

IEEE Std. 1159-1995. IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality; IEEE Standards Board, 1995.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 1ª edição. São Paulo: Blucher, p. 328, 2005.

KAMENKA, A. **Six tough topics about harmonic distortion and power quality indices in electric power systems**. A White Paper of Schaffner Group, 2014.

KANDEV, N. P.; CHÉNARD, S. **Method for determining customer contribution to harmonic variations in a large power network**. In: International Conference Harmonics and Quality of Power (ICHQP). p. 1-7, Sept. 2010.

KUSKO, A.; THOMPSON, M. T. **Power quality in electrical systems**. McGraw-Hill Companies, 2007.

LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. **Harmônicos em sistemas elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

LI, C., XU, W.; TAYJASANANT, T. **Interharmonics: basic concepts and techniques for their detection and measurement**. Electric Power Systems Research: p39 – 48. 2003.

LIMA, D. de S. **Desenvolvimento de um simulador de redes elétricas para estudos da propagação de harmônicos**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2016. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

MAHELA, O. P.; SHAIK, A. G. **Recognition of Power Quality Disturbances Using S-Transform Based Ruled Decision Tree and Fuzzy C-Means Clustering Classifiers**. Applied Soft Computing, 2017.

MANITO, A. R. A.; BEZERRA, U. H.; TOSTES, M. E. de L.; SOARES, T. M. **Estimação da contribuição de cargas não lineares na distorção harmônica de tensão de um barramento de interesse do sistema elétrico utilizando rede neural artificial**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, Foz do Iguaçu – PR, 2014.

MANITO, A. R. A.; BEZERRA, U. H.; TOSTES, M. E. de L.; SOARES, T. M.; ROCHA, G. V. S. **Comparação de técnicas de regressão linear e rede neural no estudo de estimação da contribuição de cargas não lineares na distorção harmônica de tensão de um barramento de interesse do sistema elétrico**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, Natal – RN, 2016.

MANTOVANI, W. A. **Utilização de redes neurais recorrentes na caracterização de cargas não lineares em sistemas elétricos**. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, São Paulo, 2011. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

MARQUES, M. dos S. **Metodologia para modelagem de curvas típicas de demanda elétrica utilizando redes neurais artificiais considerando variáveis climáticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Pampa, Alegrete – RS, 2014.

MATOS, E. O. **Análise não paramétrica para identificação de fontes de distorções harmônicas em sistemas de energia elétrica: Um estudo aplicado no campus universitário do Guamá da Universidade Federal do Pará**. Tese (Doutorado) Universidade

Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2016. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

MATOS, E. O. de; SOARES, T. M.; BEZERRA, U. H.; TOSTES, M. E. de L.; MANITO, A. R. A.; COSTA JR, B. C. **Using linear and non-parametric regression models to describe the contribution of non-linear loads on the voltage harmonic distortions in the electrical grid.** IET Generation, Transmission & Distribution, v.10, n.8, p.1825–1832, 2016.

MAZIN, H. E.; XU, W.; HUANG, B. **Determining the harmonic impacts of multiple harmonic-producing loads.** Published in IEEE Power & Energy Society General Meeting. Oct 2011.

MAZUMDAR, J.; HARLEY, R. G.; LAMBERT, F. **System and method for determining harmonic contributions from non-linear loads.** In: Conference record of the 2005 IEEE industry applications conference. v. 4, p. 2456-2463. 2005

MAZUMDAR, J.; HARLEY, R. G.; LAMBERT, F. C.; VENAYAGAMOORTHY, Ganesh K. **Neural network-based method for predicting nonlinear load harmonics.** IEEE Transactions on Power Electronics, New York, v. 22, n. 3, p. 1036-1045, May 2007.

MAZUMDAR, J.; HARLEY, R. G. **Recurrent neural networks trained with backpropagation through time algorithm to estimate nonlinear load harmonic currents.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, n. 9, p. 3484-3491, Sept. 2008.

MIKKILI, S.; PANDA, A. K. **Power quality issues - current harmonics.** Taylor & Francis Group, 2016.

MINUSSI, C. R.; LOTUFO, A. D. P. **Redes neurais: princípios e métodos.** Apostila didática. Ilha Solteira: Unesp, 2000.

MONTEIRO, F. P. **Uma metodologia para classificação.** 2015.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica.** São Paulo: Ed. Edgard Blücher LTDA, 1983.

MUSSOI, F. L. R. **Modelo de decisão integrado para a priorização multiestágio de projetos de distribuição considerando a qualidade da energia elétrica.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2013.

NOGUEIRA, R. de M. **Análise dos impactos harmônicos em uma indústria de manufatura de eletroeletrônicos utilizando árvores de regressão.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2015. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

OLESKOVICZ, M.; LIMA, M. A. A.; BIASOTTO, E.; COURY, D. V. M. **Estimation of harmonic currents injected by nonlinear loads for a distorted power supply scenario using Artificial Neural Networks.** In: 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Hong Kong, China, Jun 2012.

OLIVEIRA, E. F. **Avaliação da distorção harmônica total de tensão (THDv) no ponto de acoplamento comum (PAC) industrial usando o processo kdd baseado em medição.** Tese (Doutorado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2018. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

PAIXÃO JÚNIOR, U. C.; ALBUQUERQUE, L. O. DE; BARBOSA, C. F. de O.; VERÍSSIMO, J. P. A.; PINHO, J. T.; GALHARDO, M. A. B. **Qualidade do suprimento de energia elétrica no Laboratório de Sistemas Híbridos e Minirredes do GEDAE/UFPA.** VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, RS. 2018.

PARIJÓS JUNIOR, I. R. de. **Avaliação operacional dos efeitos de demanda de quatro sistemas de microgeração fotovoltaica conectados à rede.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2018. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

PECK, R.; OSLEN, C.; DEVORE, J. **Introduction to studies & data analysis.** Brooks/Cole, CANGAGE Learning. 2012.

PEREIRA, A. L. S. **Utilização de redes neurais artificiais no ajuste de controladores suplementares e dispositivo Facts STATCOM para a melhoria da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia - UNESP, 2009.

PERERA, N.; RAJAPAKSE, A. D. **Power system transient classification for protection relaying.** Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2008. 13th International Conference, 2008.

PINHO, J. T.; GALHARDO, M. A. B. **Interação harmônica entre suprimento e cargas.** In: VIII CBQEE Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, Blumenau, SC. ago 2009.

PRASS, F. S. **KDD – Uma visão geral do processo.** 2009.

PYZALSKI, T.; WILKOSZ, K. **Identification of harmonic sources in a power system: a new method.** IEEE PowerTech, St. Petersburg, Russia, pp. 1- 6, jun 2005.

QUINLAN, J. R. **C4.5: Programs for machine learning.** Morgan Kaufmann Publishers, 1993.

RAHMATIAN, M. CHEN, Y. C.; PALIZBAN, A.; MOSHREF, A.; DUNFORD, W. G. **Transient stability assessment via decision trees and multivariate adaptive regression splines.** Electric Power Systems Research, v. 142, p. 320-328, 2017.

RAY, P. K.; MOHANTY, S. R.; KISHOR, N.; CATALAO, J. **Optimal feature and decision tree-based classification of power quality disturbances in distributed generation systems.** IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 5, n. 1, p. 200-208, 2014.

ROCHA, G. V. S. **Sistema inteligente de suporte a análise da qualidade da energia elétrica em regime permanente.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2017. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

RODRIGUES, B. das G. D. **Uso de árvore de decisão para avaliação da segurança estática em tempo real de sistemas elétricos de potência.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2014. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

ROIGER, R. J. **Data mining: a tutorial-based primer.** CRC Press, 2017.

ROSA, F. C. de La. **Harmonics and power systems.** CRC PRESS, 2006.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial intelligence: a modern approach.** [s.l.] Prentice Hall, 2003.

SAFAVIAN, S. R.; LANDGREBE, D. **A survey of decision tree classifier methodology.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. 21, n. 3, p. 660–674, 1991.

SAMANTARAY, S. R. **Decision tree - initialized fuzzy rule-based approach for power quality events classification, generation, transmission & distribution.** IET, 2010.

SEERA, M.; LIM, C. P.; LOO, C. K.; SINGH, H. **Power quality analysis using a hybrid model of the fuzzy min–max neural network and clustering tree.** IEEE transactions on neural networks and learning systems, v. 27, n. 12, p. 2760-2767, 2016.

SILVA, W. F.; NOGUEIRA, R. de M.; OLIVEIRA, E. F. de. **Naive Bayes aplicados na análise de impactos harmônicos em sistemas elétricos industriais.** IEEE XI INTERNACIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (IEEE INDUSCON), 2014.

SOARES, T. M. **Estimação da contribuição de múltiplas fontes harmônicas utilizando regressão não paramétrica.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2012. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

SOUSA, V. *et al.* **Analysis of harmonic distortion generated by PWM motor drives.** In: Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2017.

SRINIVASAN, D.; Ng, W. S.; LIEW, A. C. **Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification.** IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 21, n. 1, p. 398- 405, Jan. 2006.

SWIATEK, B., ROGOZ, M.; HANZELKA, Z. **Power system harmonic estimation using neural networks.** Published in 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. 2007.

TOSTES, M. E. de L. **Avaliação dos impactos causados pela geração de harmônicos na rede de distribuição em consumidores em baixa tensão.** Tese (Doutorado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2003. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

TOSTES, M. E. L.; BEZERRA, U. H.; MOURA, C. C. M. de; SILVA, R. S. e; BRANCO, T. da M. M. **Fluxo de carga harmônico trifásico via método somatório de corrente.** In: V Seminário Brasileiro Sobre Qualidade de Energia Elétrica, V SQBEE, Aracajú, 2003. p. 97 - 102.

UNSAR, O.; SALOR, O; ÇADIRCI, I. **Identification of harmonic current contributions of iron and steel plants based on time-synchronized field measurements - Part I.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 50, n. 6, p. 4336-4347, 2013.

VAID, K.; SRIKANTH, P.; SOOD, Y. R. **Critical impedance based automatic identification of harmonic**. Sources in deregulated power industry, Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies (ICSCCN), International Conference, 2011.

VLAHINIC, S.; BRNOBIC, D.; STOJKOVIC, N. **Indices for harmonic distortion monitoring of power distribution systems**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009.

XU, W.; BAHRY, R.; MAZIN, H. E.; TAYJASANANT, T. **A method to determine the harmonic contributions of multiple loads**. IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES 09, p. 1–6, 2009.

XU, W.; LIU, Y. **A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling**. Power Delivery, IEEE Transactions on, CANADA, 2000.

YAN, X. **Linear regression analysis: theory and computing**. World Scientific Publishing Company Pte Limited, 2009.

YIN, Z.; SUN, Y.; YU, T. **New methods exploration for harmonic source identification technologies**. In: Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on. IEEE, 2011. p. 399-402.

ZIN, A. A. M.; RUKONUZZAMAN, M.; SHAIBON, H; LO, K. I. **Neural network approach of harmonics detection**. Published in IEEE Power & Energy Society General Meeting. v. 2, p467 - 472, Apr 1998.

## ANEXOS

Este tópico é destinado para apresentar detalhes adicionais para um melhor entendimento dos programas utilizados nesta dissertação.

### ANEXO A – Programa SISQEE

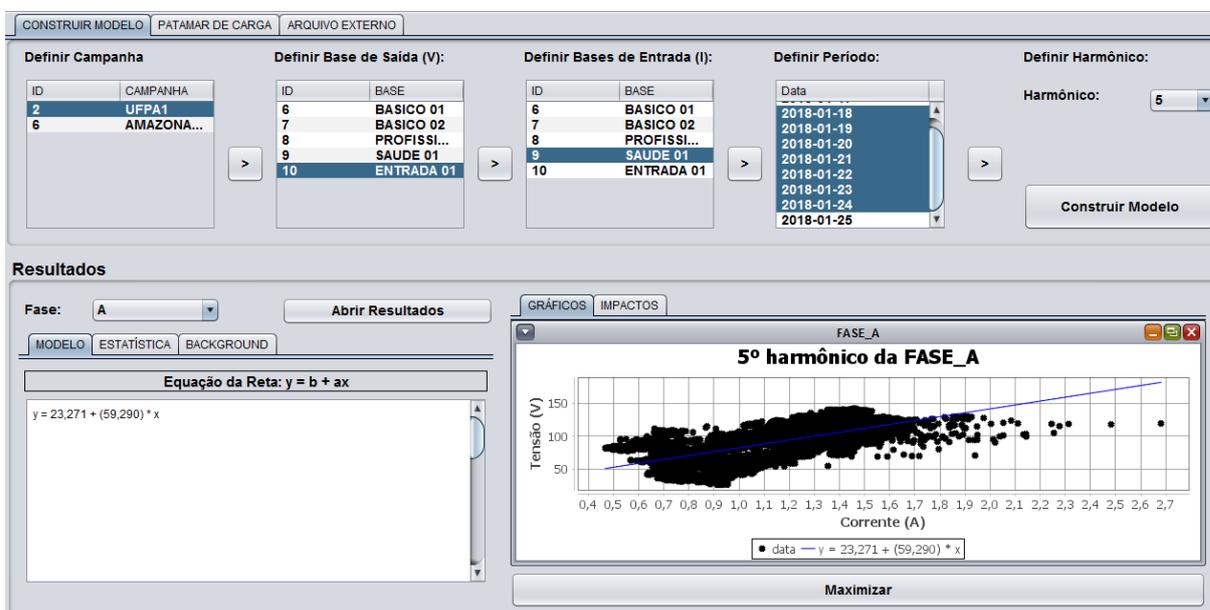


Figura A-1 – Tela Principal do Módulo de RL. Fonte: Elaborado pelo autor.

---

**Algorithm 1** Análise de Impacto Harmônico de uma Carga Utilizando RL
 

---

**Início**

- 1: Obter parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  do modelo de regressão linear
  - 2:  $V_{BG} \leftarrow \beta_0$
  - 3:  $\rho \leftarrow \frac{cov(V_T, I_T)}{\sqrt{var(V_T) \cdot var(I_T)}}$
  - 4: **para**  $i \leftarrow 1$  **até**  $size(V_E)$  **faça**
  - 5:   **se**  $\rho > 0$  **então**
  - 6:      $IF_{V_{BG}i}^h(\%) \leftarrow \frac{V_{BG} \cdot 100\%}{V_{Ti}}$
  - 7:   **senão**
  - 8:      $IF_{V_{BG}i}^h(\%) \leftarrow \frac{V_{Ti} \cdot 100\%}{V_{BG}}$
  - 9:   **fim se**
  - 10:  $IF_{V_{Ti}}^h(\%) \leftarrow 100,0 - IF_{V_{BG}i}^h(\%)$
  - 11: **fim para**
  - 12:  $IF_{V_{BG}}^h(\%) \leftarrow média(IF_{V_{BG}i}^h(\%))$
  - 13:  $IF_{V_{Ti}}^h(\%) \leftarrow média(IF_{V_{Ti}i}^h(\%))$
  - 14:  $R^2 \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^N (V_{Ei} - \widehat{V}_E)^2}{\sum_{i=1}^N (V_{Ti} - \widehat{V}_T)^2}$
  - 15: **se**  $R^2 \geq Alta$  **então**
  - 16:   Resultados apresentam boa confiabilidade
  - 17: **fim se**
- Fim**
- 

Figura A-2 – Algoritmo utilizado na RL simples. Fonte: Elaborado pelo autor.

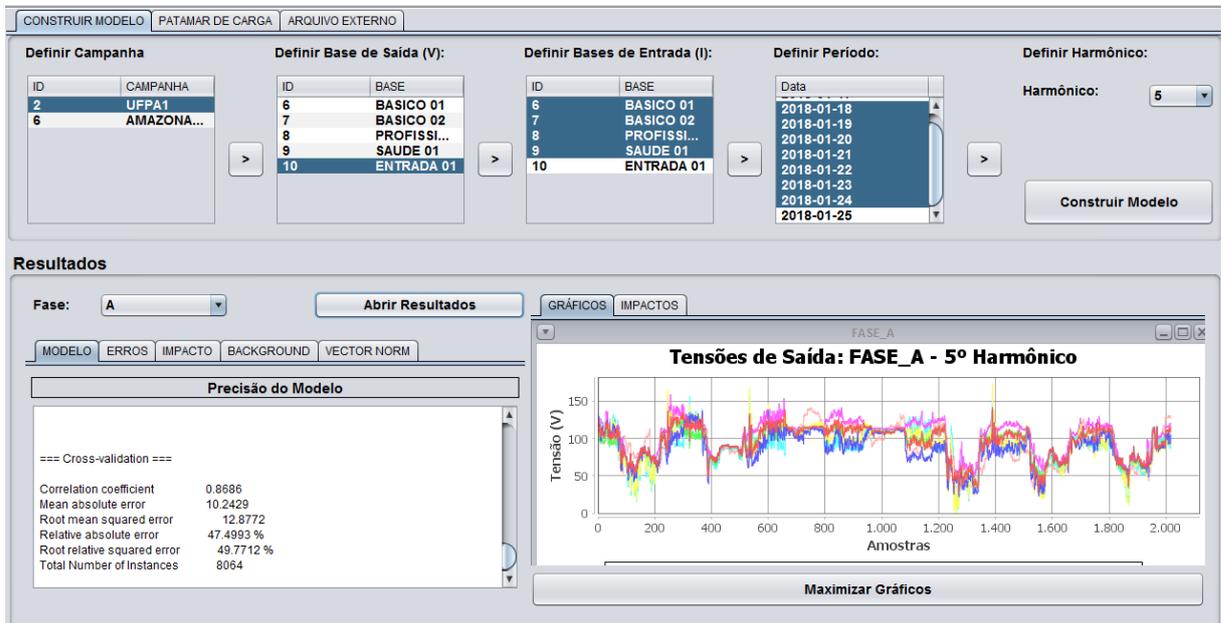


Figura A-3 – Tela Principal do Módulo de RNA. Fonte: Elaborado pelo autor.

### Configuração de Parametros

GUI	False
autoBuild	True
debug	False
decay	False
hiddenLayers	t
learningRate	0.05
momentum	0.03
nominalToBinaryFilter	True
normalizeAttributes	True
normalizeNumericClass	True
reset	False
seed	5
trainingTime	10000
validationSetSize	0
validationThreshold	20
sensibilidade	+1.10
porcentagemTreino	80.0
<input checked="" type="checkbox"/> Cross-validation: Folds	10

OK Cancelar

Figura A-4 – Tela de Configuração de Parâmetros de RNA. Fonte: Elaborado pelo autor.

CONSTRUIR MODELO PATAMAR DE CARGA ARQUIVO EXTERNO

**Definir Campanha**

ID	CAMPANHA
2	UFFA1
6	AMAZONA...

**Definir Base de Saída (V):**

ID	BASE
6	BASICO 01
7	BASICO 02
8	PROFISSI...
9	SAUDE 01
10	ENTRADA 01

**Definir Bases de Entrada (I):**

ID	BASE
6	BASICO 01
7	BASICO 02
8	PROFISSI...
9	SAUDE 01
10	ENTRADA 01

**Definir Período:**

DATA
2018-01-18
2018-01-19
2018-01-20
2018-01-21
2018-01-22
2018-01-23
2018-01-24
2018-01-25

**Definir Harmônico:**

Harmônico: 5

Construir Modelo

**Resultados**

Fase: A Abrir Resultados

MODELO ERROS IMPACTO BACKGROUND VECTOR NORM

**Precisão do Modelo**

=== Cross-validation ===

Correlation coefficient	0.9125
Mean absolute error	5.6981
Root mean squared error	10.854
Relative absolute error	26.3807 %
Root relative squared error	41.8314 %
Total Number of Instances	8064

**GRÁFICOS IMPACTOS ÁRVORES**

FASE\_A

**Tensões de Saída: FASE\_A - 5º Harmônico**

Maximizar

Figura A-5 – Tela principal do módulo de AR. Fonte: Elaborado pelo autor.

**Configuração de Parâmetros**

debug	False
doNotCheckCapabilities	False
initialCount	0.0
maxDepth	-3
minNum	1.0
minVarianceProp	0.001
noPruning	True
numFolds	5
seed	5
spreadInitialCount	False
sensibilidade	+1.10
porcentagemTreino	80.0
<input checked="" type="checkbox"/> Cross-validation: Folds	10

OK Cancelar

Figura A-6 – Tela de configuração de parâmetros de AR. Fonte: Elaborado pelo autor.

---

**Algorithm 2** Análise de Impacto Harmônico de Múltiplas Cargas
 

---

**Início**

- 1:  $modelo \leftarrow (RNA, AR)$
- 2:  $erro \leftarrow (MAE, MSE, RMSE)$
- 3:  $\sigma \leftarrow [1 \text{ a } 10\%]$
- 4:  $I_hModelo \leftarrow modelo.getEntradas()$
- 5:  $V_EModelo \leftarrow modelo.estimar(I_hModelo)$
- 6: **para**  $i \leftarrow 1$  **até**  $size(I_hModelo)$  **faça**
- 7:      $I_h \leftarrow I_hModelo.copia()$
- 8:      $I_h[i] \leftarrow I_h[i] \cdot \sigma$
- 9:      $V_E \leftarrow modelo.estimar(I_h)$
- 10:      $erros[i] \leftarrow erro.calcular(V_EModelo, V_E)$
- 11: **fim para**
- 12: **para**  $i \leftarrow 1$  **até**  $size(I_hModelo)$  **faça**
- 13:      $IF_{VI[i]}^h(\%) \leftarrow \frac{erros[i]}{\sum_{j=1}^p erros[j]} \cdot 100\%$
- 14: **fim para**
- 15:  $V_{BGx}^h \leftarrow V_x^h(k) - V_{Ex}^h(k)$
- 16:  $\|V_{Ex}^h\| \leftarrow \sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{Ex[i]}^h)^2}$
- 17:  $\|V_{BGx}^h\| \leftarrow \sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{BGx[i]}^h)^2}$
- 18:  $IF_{VEx}^h(\%) \leftarrow \frac{\|V_{Ex}^h\| \cdot 100\%}{\|V_{Ex}^h\| + \|V_{BGx}^h\|}$
- 19:  $IF_{VBGx}^h(\%) \leftarrow \frac{\|V_{BGx}^h\| \cdot 100\%}{\|V_{Ex}^h\| + \|V_{BGx}^h\|}$
- 20: **para**  $i \leftarrow 1$  **até**  $size(I_hModelo)$  **faça**
- 21:      $IF_{VI[i]}^h(\%) \leftarrow IF_{VI[i]}^h(\%) \cdot IF_{VEx}^h(\%)$
- 22: **fim para**

**Fim**

---

Figura A-7 - Algoritmo utilizado na RNA e na AR. Fonte: Elaborado pelo autor.

**ANEXO B – Código do programa em R**

```
>dados<-read.table("C:/Users/Allan/Desktop/ERR0_RL_1_SEMANA/RLM_MANAUS_2P
_DIARIO_23AL.csv", header=T, dec=".", sep=";")
>dados
>attach(dados)
>V_REAL
>dados$V_REAL
>ml<-lm(V_REAL~DIAL2_16+ DIAL2_17+ DIAL2_20)
>ml
```

## ANEXO C – Código do programa no Matlab para identificar o EAM

```

clear all
clc

%Leitura dos dados estimados (Regressão Linear)%%%%%%%%%%
i_fonte_1 = xlsread('rna_31d_fasea_2cp','AL16');
i_fonte_2 = xlsread('rna_31d_fasea_2cp','AL17');
i_fonte_3 = xlsread('rna_31d_fasea_2cp','AL20');
v_estimado_teste_rlm_aux = 10.914*i_fonte_1-1.820*i_fonte_2-2.966*i_fonte_3+99.783;
v_estimado_rlm = v_estimado_teste_rlm_aux';
v_medido_aux = xlsread('rna_31d_fasea_2cp','real');
v_medido = v_medido_aux';

%Cálculo do Erroa Médio Absoluto Percentual%%%%%%%%%%
eam_rlm = (sum(abs(v_medido-v_estimado_rlm)))/(length(v_medido))
eam_ref = (sum(abs(v_medido-0)))/(length(v_medido))
eam_rlm_percentual = eam_rlm*100/eam_ref

%Construção de gráficos%%%%%%%%%%
t_teste = [1:length(v_medido)];
plot(t_teste,v_medido,'blue')
hold
plot(t_teste,v_estimado_rlm,'red')
eam_rlm = 3.9713
eam_ref = 100.0160
eam_rlm_percentual = 3.9706

```