

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

ANÁLISE NÃO PARAMÉTRICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE
DISTRORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: UM ESTUDO
APLICADO NO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARÁ

EDSON ORTIZ DE MATOS

TD 05/2016

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

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

EDSON ORTIZ DE MATOS

ANÁLISE NÃO PARAMÉTRICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE
DISTRORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: UM ESTUDO
APLICADO NO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARÁ

TD 05/2016

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

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

EDSON ORTIZ DE MATOS

ANÁLISE NÃO PARAMÉTRICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE
DISTRORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: UM ESTUDO
APLICADO NO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARÁ

Tese submetida à Banca
Examinadora do Programa de
Pós-Graduação em Energia
Elétrica da UFPA para a obtenção
do Grau de Doutor em Engenharia
Elétrica

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

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

Matos, Edson Ortiz de, 1953 -

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 / Edson Ortiz de Matos. - Belém: UFPA, 2016.

p.132

Orientador: Ubiratan Holanda Bezerra

Tese (Doutorado) Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica 2016.

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Sistema de energia elétrica - Controle de qualidade. 3 Harmônicos (ondas elétricas). 4. Universidade Federal do Pará - Energia Elétrica. I. Título.

CDD-621.3191

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

**“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”**

AUTOR: EDSON ORTIZ DE MATOS

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 19/02/2016

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Ubiratã Holanda Bezerra

(Orientador – PPGEE/UFPA)



Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes

(Co-Orientadora – PPGEE/UFPA)



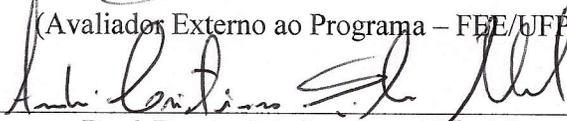
Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Eduardo Tannus Tuma

(Avaliador Externo ao Programa – FEE/UFPA)



Prof. Dr. André Cristiano Silva Melo

(Avaliador Externo – UEPA)



Prof.^a Dr.^a Ruth Pastora Saraiva Leão

(Avaliadora Externa – UFC)

VISTO:



Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Meus mais sinceros agradecimentos, em primeiro lugar ao meu orientador, Dr. Ubiratan Holanda Bezerra, pela sua inestimada orientação, dedicação, amizade e idéias para a elaboração da pesquisa de tese;

À minha coorientadora, Dra. Maria Emília de Lima Tostes, por toda ajuda e encorajamento durante a realização dessa pesquisa;

Ao amigo Engenheiro Thiago da Mota Soares, pela ajuda fundamental na análise, simulação e discussões interessantes na interpretação dos resultados; e ao Engenheiro Allan Manito, por sua dedicação e profissionalismo na realização das campanhas de medições para coleta de dados.

Às amigas Edna Frazão e Graça Pena, pela revisão e sugestões para a organização do texto, e ao amigo Thiago Miranda, pela diagramação e formatação final.

Aos amigos e amigas da Pró-Reitoria de Administração da UFPA, pela confiança e incentivo, e a Secretária Executiva da PROAD, Jackeline Nakata, pela paciência e ajuda nesses momentos intrincados de atividades administrativas e pós-graduação.

À amiga Fernanda Monte Santo, pelo apoio na conclusão de mais esta etapa em minha vida acadêmica.

Uma dívida especial tenho com os professores Paulo Gama, Edinaldo Pereira e Luciano Nicolau da Costa. Agradeço pela amizade e apoio durante esses anos de vida acadêmica na Universidade Federal do Pará.

E por fim, meu mais profundo e inabalável agradecimento a minha esposa e companheira Regina Matos, o carinho dos meus filhos Bruno e Silvana Matos, genro Ronaldo Martins e nora Ligia Fontenele, dos netos Bruna Ortiz e Lucca Martins, pelo apoio dos meus irmãos e de minha sogra Raimunda Oliveira. Com todos divido as alegrias por mais uma conquista em minha vida.

A DEUS, aquele que nos conforta e fortalece.

Aos meus pais Lourival e Vitória Matos (In memoriam)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Distorção de corrente causada por uma resistência não-linear.....	14
Figura 02 - Representação de uma forma de onda distorcida, através da série de Fourier.....	16
Figura 03 - Ajuste de uma reta por meio do princípio dos mínimos quadrados.....	28
Figura 04 - Exemplo de uma curva de regressão pelo método de regressão polinomial local de Kernel.....	31
Figura 05 - (a) Função de Kernel <i>Boxcar</i> (b) Função de Kernel Gaussiana (c) Função de Kernel Epanechnikov (d) Função de Kernel <i>Tricube</i>	32
Figura 06 - (a) Sobsuavização da curva de regressão (b) modelo não paramétrico com um baixo <i>bandwidth</i> (c) modelo não paramétrico com um alto <i>bandwidth</i> (d) Sobresuavização da curva de regressão.....	34
Figura 07 - Fluxograma da metodologia de quantificação do impacto harmônico.....	36
Figura 08 - Diagrama Unifilar da UFPA.....	45
Figura 09 - Rede Alta Tensão – Básico 1 e 2.....	47
Figura 10 - Rede Alta Tensão Profissional.....	48
Figura 11 - Rede Alta Tensão Saúde.....	49
Figura 12 - Demanda de energia – UC-19 no período de 2000 a 2015.....	51
Figura 13 - DHT de tensão para as fases A, B e C no PAC.....	54
Figura 14 - Histograma de tensão no PAC do Sistema Elétrico.....	55
Figura 15 - DHT de tensão para as fases A, B e C – Básico 1 - CTIC.....	55
Figura 16 - DHT de tensão para as fases A, B e C – Básico 2 – Benedito Nunes.....	56
Figura 17 - DHT de tensão para as fases A, B e C – Profissional – Salas de aula GM..	56
Figura 18 - DHT de tensão para as fases A, B e C – Saúde – Hospital Bettina de Sousa Ferro.....	57
Figura 19 - Imagem ilustrativa do Analisador de QEEE HIOKI PW3198.....	59
Figura 20 - Configuração do sistema elétrico da UFPA.....	59
Figura 21 - Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus básico 1 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrada de energia na fase A considerando o período completo de medição.....	63

Figura 22 - Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus básico 2 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A considerando o período completo de medição.....	63
Figura 23 - Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus profissional e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A considerando o período completo de medição.....	64
Figura 24 - Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus da saúde e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A considerando o período completo de medição.....	64
Figura 25 - Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus1 básico 1 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A no período de 18/08/2015 a 20/08/2015...	66
Figura 26 - Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus básico 2 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A no período de 18/08/2015 à 20/08/2015...	66
Figura 27 - Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do prédio do alimentador do campus profissional e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na Fase A no período de 18/08/2015 a 20/08/2015.....	67
Figura 28 - Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus saúde e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A no período de 18/08/2015 à 20/08/2015.....	67
Figura 29 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do Campus básico 1 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase A.....	69
Figura 30 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do Campus básico 1 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase B.....	69
Figura 31 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do Campus básico 1 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase C.....	70
Figura 32 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do Campus básico 2 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase A.....	71
Figura 33 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do Campus básico 2 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase B.....	72

Figura 34 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do campus básico 2 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase C.....	73
Figura 35 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do profissional e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase A.....	74
Figura 36 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do profissional e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase B.....	75
Figura 37 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do profissional e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase C.....	75
Figura 38 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do bloco saúde e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase A.....	76
Figura 39 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do bloco saúde e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase B.....	77
Figura 40 - Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do bloco saúde e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase C.....	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Correlação entre a corrente e tensão: (a) correlação diretamente proporcional e (b) correlação inversamente proporcional.....	38
Gráfico 02 - Tensão do 5º harmônico registrada na fase A da entrada de energia da UFPA.....	60
Gráfico 03 - Corrente do 5º harmônico registrada na fase A do alimentador do Campus básico 1.....	61
Gráfico 04 - Corrente do 5º harmônico registrada na fase A do alimentador do Campus básico 2.....	61
Gráfico 05 - Corrente do 5º harmônico registrada na fase A do alimentador do Campus profissional.....	62
Gráfico 06 - Corrente do 5º harmônico registrada na fase A do alimentador do Campus saúde.....	62
Gráfico 07 - Diagrama geral da relação da corrente do 3º harmônico dos alimentadores, na tensão de entrada do sistema.....	80
Gráfico 08 - Diagrama geral da relação da corrente do 5º harmônico dos alimentadores, na tensão de entrada do sistema.....	83
Gráfico 09 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase A, da cabine de medição – modelo linear.....	86
Gráfico 10 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase B, da cabine de medição – modelo linear.....	87
Gráfico 11 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase C, da cabine de medição – modelo linear.....	87
Gráfico 12 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase A, da cabine de medição – modelo linear.....	90
Gráfico 13 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase B, da cabine de medição – modelo linear.....	91
Gráfico 14 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase C, da cabine de medição – modelo linear.....	91
Gráfico 15 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase A, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	95
Gráfico 16 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase B, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	95

Gráfico 17 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase C, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	96
Gráfico 18 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase A, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	99
Gráfico 19 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase B, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	100
Gráfico 20 - Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase C, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.....	17
Tabela 02 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).....	20
Tabela 03 - Níveis de referência para as distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental).....	20
Tabela 04 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.....	22
Tabela 05 - Caracterização do grau de correlação nos modelos de regressão de acordo com os valores de com R^2	31
Tabela 06 - Os Alimentadores da Universidade Federal do Pará.....	50
Tabela 07 - Tabela resumo dos valores R^2 dos modelos linear e não paramétrico que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico do alimentador do básico 1, na tensão de entrada da UFPA.....	70
Tabela 08 - Tabela resumo dos valores R^2 dos modelos linear e não paramétricos que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico do alimentador do básico 2 na tensão de entrada da UFPA.....	73
Tabela 09 - Tabela resumo dos valores R^2 dos modelos linear e não paramétrico que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico do bloco profissional na tensão de entrada da UFPA.....	76
Tabela 10 - Tabela resumo dos valores R^2 dos modelos linear e não paramétrico que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico do bloco saúde na tensão de entrada da UFPA.....	78
Tabela 11 - R^2 dos modelos linear e não paramétrico, que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico dos alimentadores AL-01, AL-02, Al-03 e Al-04, na tensão de entrada da UFPA.....	79
Tabela 12 - R^2 dos modelos linear e não paramétrico, que caracterizam a relação da corrente do 5º harmônico dos alimentadores AL-01, AL-02, Al-03 e Al-04, na tensão de entrada da UFPA.....	82
Tabela 13 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase A, da cabine de medição – modelo linear.....	84
Tabela 14 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase B, da cabine de medição - modelo linear.....	85
Tabela 15 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase C, da cabine de medição - modelo linear.....	86

Tabela 16 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico das fases A, B e C da cabine de medição – modelo linear.....	88
Tabela 17 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase A, da cabine de medição – modelo linear.....	89
Tabela 18 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase B da cabine de medição modelo linear.....	89
Tabela 19 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase C da cabine de medição – modelo linear.....	90
Tabela 20 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico das fases A, B e C da cabine de medição – modelo linear.....	92
Tabela 21 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase A, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	93
Tabela 22 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase B, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	94
Tabela 23 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase C, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	94
Tabela 24 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico das fases A, B e C da cabine de medição – modelo não paramétrico.....	97
Tabela 25 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase A, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	98
Tabela 26 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase B, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	98
Tabela 27 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase C, da cabine de medição - modelo não paramétrico.....	99
Tabela 28 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico das fases A, B e C da cabine de medição – modelo não paramétrico.....	101

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AL	-	Alimentadores
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCB	-	Centro de Ciências Biológicas
CTIC	-	Centro de Tecnologia e Informação
CT	-	Centro Tecnológico
R ²	-	Coefficiente de Determinação
EE	-	Eficiência Energética
ICB	-	Instituto de Ciências Biológicas
IEC	-	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	-	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
ITEC	-	Instituto de Tecnologia
MME	-	Ministério de Minas e Energia
ONS	-	Operador Nacional do Sistema
PAC	-	Ponto de Acoplamento Comum
PCU	-	Prefeitura do Campus Universitário
PRODIST	-	Procedimentos de Distribuição de Energia
QEE	-	Qualidade de Energia Elétrica
SIPAES	-	Sistema do Projeto Esplanada Sustentável
SISGEE	-	Sistema de Gestão de Energia Elétrica
SIG		Sistema de Informação Gerencial
UC	-	Unidade Consumidora
UC-19	-	Unidade Consumidora 19
UFPA	-	Universidade Federal do Pará

RESUMO

Atualmente, o uso de cargas não lineares e equipamentos baseados em eletrônica de potência nas instalações residenciais, comerciais e industriais estão contribuindo para o aumento significativo dos níveis de distorção harmônica de corrente e, conseqüentemente de tensão, conforme observado no sistema brasileiro de distribuição de energia elétrica. O aumento contínuo dos níveis de distorção harmônica nas redes elétricas de distribuição tem causado preocupação nas concessionárias e clientes de energia, pois a presença dessas fontes de harmônico no sistema provoca, entre outros, perda da qualidade no fornecimento de energia. Com foco neste problema, a presente tese propõe o desenvolvimento de modelos de regressão não paramétrica para identificar e quantificar quais cargas não lineares podem ser consideradas fontes harmônicas principais, para as distorções de tensão em um ponto de interesse da rede elétrica. A metodologia proposta se baseia na análise de correlação de dados, utilizando modelos estatísticos de regressão não paramétrica para estabelecer a correlação entre as correntes harmônicas das cargas não lineares e a tensão harmônica no ponto de interesse. Este modelo é construído a partir das tensões e correntes harmônicas de mesma ordem respectivamente, obtidas em campanhas de medição através de qualímetros instalados nos pontos de interesse. Além disso, deve-se salientar que essas tensões e correntes harmônicas devem estar em sua unidade base, ao invés de grandezas normalizadas em relação à componente fundamental, de forma a impedir que a mesma influencie na criação do modelo de regressão. Um aspecto importante nesta metodologia está na utilização das técnicas de regressão polinomial local de Kernel, para a estimação das curvas de regressão entre a tensão e a corrente harmônica. Na validação dos modelos introduz-se o coeficiente de determinação R^2 , o qual pode ser obtido a partir do coeficiente de correlação de Pearson, para mensurar o grau de precisão dos modelos desenvolvidos. A regressão não paramétrica proporciona uma grande flexibilidade na estimação do modelo de regressão, uma vez que a mesma torna possível a realização de um ajuste mais efetivo do modelo às amostras de dados, e, portanto, é capaz de caracterizar a influência de cada fonte harmônica de forma mais detalhada para todo o período de medição. Essa técnica, apresentou resultados muito mais confiáveis e supera as deficiências dos modelos de regressão linear, o qual impõe que as correntes harmônicas das outras fontes, *background*, não variam quando se analisa uma determinada corrente de carga. Os modelos de regressão linear e não paramétrico foram simulados aplicando-se o programa R, que é uma linguagem e ambiente para cálculos estatísticos e gráficos, e como sistema teste utilizou-se a rede de distribuição elétrica da Universidade Federal do Pará, constituído de 84 (oitenta e quatro) barras de carga em tensão de 13,8 kV. Os resultados obtidos são comparados aos modelos de regressão linear e apresentaram bom desempenho possibilitando sua aplicação por empresas de distribuição de energia elétrica.

Palavras-chave: Cargas Não Lineares, Harmônicos de Tensão, Harmônicos de Corrente, Regressão linear, Regressão não paramétrica.

ABSTRACT

Nowadays, the use of non-linear loads and power electronics-based equipment in residential, commercial and industrial facilities are contributing to the significant increase of current harmonic distortion levels and, consequently voltage harmonic distortions, as noted in the Brazilian distribution systems. Increasing levels of harmonic distortion in electrical distribution networks is a concern to electric utilities and customers, because the presence of these harmonic sources causes, among others, loss of quality in the energy supply. With a focus on this problem, this thesis proposes the development of non-parametric regression models to identify and quantify what non-linear loads can be considered main sources of voltage harmonic distortion at a point of interest in the electric network. The proposed methodology is based on data correlation analysis, using non-parametric regression statistical models to establish the correlation among the non-linear loads harmonic currents and harmonic voltage at a point of interest. This model is built from harmonic voltage and currents measurements, obtained in measuring campaigns using power quality analyzers installed at the points of interest. In addition, it should be pointed out that these harmonic voltages and currents must be express in base units, rather than percent values in relation to the fundamental component, in order to prevent the influence in the creation of the regression model. An important aspect in this methodology is the use of techniques based on Kernel local polynomial regression, for the estimation of the regression model between harmonic voltage and current. To validate the models it is introduced the determination coefficient R^2 , which can be obtained from the Pearson correlation coefficient, to measure the accuracy degree of the developed models. The non-parametric regression procedure provides a great flexibility in the estimation of regression models, since it makes possible to carry out a more effective model fit to the data samples, and therefore it is able to characterize the influence of each harmonic source in more detail for the entire measurement period. This technique presented more reliable results and overcomes the shortcomings of the linear regression model, which requires the harmonic currents of other sources, called background, not to vary when analyzing a particular load current. The linear and non-parametric regression models were simulated using the program R, which is a language and environment for statistical calculations and graphs, and as test system it was used the Federal University of Pará electric distribution network, consisting of 84 (84) load busbars in 13.8 kV. The results so obtained are compared to those obtained with the linear regression models, and presented good performance, allowing its application for electric power distribution companies.

Keywords: Nonlinear Loads, Harmonic Voltage, Harmonic Current, Linear Regression, Non-parametric Regression.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo	2
1.2. Revisão bibliográfica	2
1.2.1. Normas e recomendações de qualidade de energia elétrica	3
1.2.2. Livros e trabalhos realizados na área de qualidade de energia elétrica	4
1.2.3. artigos com enfoque na identificação de fontes de harmônicos nos sistemas de energia elétrica	5
1.3. Estrutura da Tese	10
CAPÍTULO 2 – ASPECTOS GERAIS SOBRE A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	12
2.1. Considerações iniciais	12
2.2. Caracterização dos harmônicos	14
2.3. Série de Fourier	15
2.4. Qualidade de Energia Elétrica – QEE.....	16
2.4.1. Tensão em regime permanente	17
2.4.2. O fator de potência	18
2.4.3. Distorção harmônica individual e total.....	18
2.4.4. Desequilíbrio de tensão	21
2.4.5. Flutuação de tensão	21
2.4.6. Variação de tensão de curta duração	22
2.4.7. Variação de frequência	22
2.5. Considerações finais	23
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DA CARGA NAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	24
3.1. Considerações iniciais	24
3.2. Modelo matemático da rede de distribuição	24
3.3. Modelos de regressão	26

3.3.1. Modelo de regressão linear.....	27
3.3.2. Regressão não paramétrica.....	31
3.4. Metodologia da quantificação da contribuição harmônica	35
3.4.1. Medições das Campanhas de medição	37
3.4.2. Escolha do modelo de regressão.....	37
3.4.2.1. <i>Modelo de regressão linear</i>	39
3.4.2.2. <i>Modelo de regressão não paramétrico</i>	40
3.4.3. Relatório	41
3.5. Considerações finais	41
CAPÍTULO 4 – O SISTEMA ELÉTRICO DO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ DA UFPA	43
4.1. Considerações iniciais.....	43
4.2. A Unidade Consumidora 19 (UC-19).....	43
4.3. Os Alimentadores AL-01, AL-02, AL-03 e AL-04	50
4.4. O Sistema de Gestão de Energia Elétrica – SISGEE	52
4.5. Descrição do SISGEE.....	52
4.6. Considerações finais	57
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DE RESULTADOS.....	58
5.1. Considerações iniciais	58
5.2. Caso 1 – impacto harmônico das cargas dos diversos alimentadores durante a primeira campanha	60
5.2.1. Avaliação do impacto harmônico considerando todo o período de medição	62
5.2.2. Avaliação do impacto harmônico considerando o período 18/08/2015 a 20/08/2015 ...	65
5.3. Caso 2 - impacto harmônico das cargas dos diversos alimentadores durante a segunda campanha	68
5.3.1. Modelo de regressão.....	68
5.3.1.1. <i>3º harmônico</i>	68
5.3.1.1.1. <i>Alimentador básico 1 – AL-01</i>	68
5.3.1.1.2. <i>Alimentador básico 2 – AL-02</i>	71
5.3.1.1.3. <i>Alimentador profissional – AL-03</i>	73

5.3.1.1.4. Alimentador saúde – AL-04	76
5.3.1.2. 5º harmônico.....	81
5.3.2. Impacto harmônico a partir dos Modelos Lineares	84
5.3.2.1. 3º harmônico.....	84
5.3.2.2. 5º harmônico.....	89
5.3.3. Impacto harmônico a partir dos modelos não paramétricos	93
5.3.3.1. 3º harmônico.....	93
5.3.3.2. 5º harmônico.....	98
5.4. Considerações finais	102
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	103
6.1. Propostas para trabalhos futuros.....	104
REFERÊNCIAS	105

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Os problemas de qualidade de energia são cada vez mais significativos e tem sido uma grande preocupação dos agentes do setor elétrico, ao longo das últimas décadas. Os primeiros casos relatados remontam a década de 1920, em instalações industriais dos Estados Unidos da América e do Canadá (PAULILLO e TEIXEIRA, 2013).

As concessionárias de energia elétrica têm constatado um elevado crescimento nos níveis das distorções harmônicas de tensão e corrente em seus sistemas de distribuição elétrica, provocados principalmente pela proliferação de equipamentos baseados em eletrônica de potência, utilizados para aumentar a eficiência e confiabilidade dos mesmos, nas instalações residenciais, comerciais e industriais. Isso tem causado um efeito prejudicial sobre os equipamentos sensíveis a essas variações e, principalmente, na operação do sistema, aumentando substancialmente a probabilidade de ocorrências de falhas e interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Preocupada com essa situação, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) desenvolveu o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (2015), que estabelece os procedimentos relativos à Qualidade de Energia Elétrica (QEE). Neste documento, são definidos valores de referência dos indicadores de qualidade de energia, na tentativa de limitar os níveis de distorção harmônica na rede de distribuição em faixas que não represente a degradação da qualidade de energia elétrica para a operação do sistema e que, também, não afetem o ciclo de vida dos equipamentos elétricos e eletrônicos. Dentre os valores determinados, pode-se citar a taxa de distorção harmônica total e individual de tensão, por exemplo.

A definição dessas faixas que restrinjam o nível das tensões harmônicas presentes nas redes de distribuições elétricas não é suficiente para resolver os problemas provocados por estas cargas não lineares. Faz-se necessário criar meios legais que permitam aplicar sanções aos responsáveis pela geração de níveis excessivos de harmônicos nos sistemas.

Diante desse contexto, observa-se a necessidade de determinar com exatidão as principais fontes de distorções harmônicas no sistema elétrico, com o objetivo de evitar disputas entre as concessionárias e os clientes, a respeito de quem é responsável por essas distorções.

A falta de procedimentos que possam identificar quais cargas, de clientes, são mais significativas para o aumento das distorções de tensões harmônicas em pontos específicos da

rede, faz com que não seja possível implantar um tratamento diferencial a esses clientes, com o objetivo de tomar ações corretivas para atenuar as transgressões das distorções harmônicas.

É importante mencionar que as redes elétricas, por suas características e ponto de operação, geram distorções harmônicas no sistema de energia elétrica. No entanto, reconhece-se que, de fato, as cargas são as principais responsáveis por esse tipo de evento. Assim, os primeiros trabalhos relativos à atribuição de responsabilidade devido a distorções de tensões harmônicas têm-se centrado no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), entre concessionária e o ponto de entrega de energia ao cliente.

1.1. Objetivo

O presente trabalho apresenta uma proposta para determinar os impactos harmônicos de múltiplas cargas geradoras de harmônicos de um sistema de distribuição por meio da criação de modelos estatísticos de regressão linear, e de regressão não paramétrica. A regressão não paramétrica será feita a partir da aplicação do método de regressão polinomial local de Kernel nas medidas da tensão e corrente harmônicas, de tal forma que seja possível caracterizar detalhadamente a influência da corrente harmônica de uma carga na tensão harmônica do sistema.

Para realizar a simulação dos modelos de regressão, utiliza-se o programa R, que é um conjunto de *softwares* para manipulação de dados, cálculo, análise e construção de gráfico, de forma eficaz, com grande facilidade de armazenamento. Este programa proporciona um ambiente para o desenvolvimento de várias metodologias e técnicas estatísticas, clássicas ou modernas, e é disponível como *software* livre, na forma de código fonte, que roda em várias plataformas. (SMITH, D.M.; VENABLES, W.N, 2015)

Portanto, o objetivo principal desse trabalho visa a identificação de fontes de geração de harmônicos e os seus impactos na tensão em um ponto de interesse da rede elétrica. Neste processo serão comparadas as técnicas de regressão linear e não paramétrica com avaliação do desempenho das mesmas.

1.2. Revisão bibliográfica

Visando oferecer um panorama sobre o tema em estudo, realizou-se uma pesquisa bibliográfica relacionada a área de qualidade de energia elétrica, mais precisamente, na abordagem teórica necessária para a compreensão de como analisar, prever e mitigar os vários

problemas envolvidos com distorções harmônicas e identificação das fontes de distorções harmônicas no sistema de energia elétrica.

A seguir, são comentadas algumas publicações diretamente relacionadas ou que serviram de base conceitual para o desenvolvimento dessa tese.

1.2.1. Normas e recomendações de qualidade de energia elétrica

Os regulamentos da ANEEL, de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (2015) descreve, no módulo 8, os procedimentos e os conceitos de qualidade de energia em sistemas de distribuição; e estabelece os indicadores de qualidade de energia elétrica, em particular, harmônicos, que contemplam o tema central dessa tese.

Além do PRODIST, têm-se os procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2010) para qualidade de energia elétrica (QEE), definidos pelos Submódulos 2.8 – “Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes” e 25.6 – “Indicadores de qualidade de energia elétrica – frequência e tensão”.

O primeiro apresenta os indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira relacionados à Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e os valores limites de referência, no aspecto tanto global ou sistêmico, como individual ou por agente. Já o segundo Submódulo estabelece a definição e a formulação dos indicadores de desempenho da rede básica relacionados à Qualidade de Energia Elétrica (QEE), no que diz respeito aos aspectos de variação da frequência e de conformidade da forma da onda de tensão.

O ONS tem, como objetivo, o desenvolvimento de uma série de estudos e ações a serem aplicadas sobre o sistema elétrico e seus agentes, para manejar os estoques de energias e garantir a segurança do suprimento contínuo em todo o País. O ONS é constituído por membros associados e membros participantes que, por sua vez, são formados por empresas de geração, transmissão e distribuição; e consumidores livres de grande porte. Participam, também, importadores e exportadores de energia e o Ministério de Minas e Energia (MME).

As regulamentações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) são similares às normas internacionais IEEE-519 (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) (2014) e IEC-61000-3-2 (*International Electrotechnical Commission*) (2009). Entretanto, existe uma diferença básica entre as especificações da ANEEL e do IEEE-519 (2014). Enquanto a norma IEEE-519 recomenda limites para harmônicas de corrente e tensão, a ANEEL regulamenta

harmônicos de tensão. Outra diferença entre esses documentos é que a norma do IEEE-519 recomenda um único limite para todas as ordens de harmônicas e um limite único de Distorção harmônica total (DHT), para cada faixa de tensão. Entretanto, a ANEEL recomenda diferentes limites para cada classe de tensão específica, segundo a ordem da harmônica. É importante também frisar que a norma IEEE-519 e a regulamentação da ANEEL tratam de questões de harmônicos do ponto de vista sistêmico e a norma IEC 61000-3-2 define limites harmônicos de corrente para equipamentos de baixa tensão com $I_{rms} < 16A$.

De acordo com Bloogming (2006), a norma IEEE 519 de 1992, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, aborda o assunto dos requisitos e recomendações práticas para o controle de harmônicos nos sistemas elétricos de potência. Ela leva em consideração a participação dos entes envolvidos no problema, concessionárias e clientes, para definir níveis aceitáveis de harmônicos de tensão e corrente no ponto de entrega de energia pela concessionária e o cliente. Os limites dessa norma são para operação do sistema em regime permanente.

A norma IEC 61000-3-2, *Electromagnetic compatibility*, (2009) avalia e define os limites de correntes harmônicas em equipamentos com corrente de entrada nominal inferior ou igual a 16 A por fase. Equipamentos com corrente nominal por fase superior a 16 A e inferior a 75 A, são abordados na norma IEC 61000-3-12, de 2011.

1.2.2. Livros e trabalhos realizados na área de qualidade de energia elétrica

Diversos autores (BARROS, 2010; BAGGINI, 2008; DUGAN, 2004; GAMA, 2006) apresentam os conceitos e formulações do estudo de qualidade de energia elétrica, que contribuíram fundamentalmente para o conhecimento do tema. Neste particular, Gama (2006), faz uma descrição de algumas causas de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica, as fontes de harmônicos e desenvolve a análise matemática dos harmônicos. Para o alcance de tal objetivo, utiliza-se da série de Fourier.

Já Dugan (2004), aborda os conceitos básicos de qualidade de energia e métodos testados para melhorar a compatibilidade entre sistemas elétricos, equipamentos dos consumidores e processos. Incluem ainda os termos e definições padrão para os fenômenos de qualidade de energia e análise das normas técnicas do IEC e IEEE.

Outros autores (ANTUNES, 2014; ARRILLAGA, 2001; ARRILLAGA, 2008; ARRILLAGA, 2010), descrevem os conceitos fundamentais para a compreensão das distorções harmônicas e sua formulação matemática. Em especial, Antunes (2014) introduz o conceito geral sobre qualidade de energia elétrica com ênfase aos harmônicos de tensão e

corrente, resultado da interação entre sistema da concessionária e carga elétrica do consumidor. Desenvolve, ainda, a teoria de Fourier para a caracterização dos harmônicos em sinais contínuos e discretos; e a teoria WAVELET, para análise de sinais não estacionários para o conhecimento simultâneo de frequência no tempo. Realiza, também, a descrição e análise das normas técnicas que tratam dos indicadores de distorção harmônica, e os requisitos legais normativos do IEC, IEEE e os regulamentados pela ANEEL, por meio do PRODIST.

Bollen (2000) realiza uma análise detalhada dos problemas associados à qualidade de energia, principalmente em relação aos distúrbios de energia mais graves: Interrupções do fornecimento de energia elétrica e os afundamentos de tensão.

Trabalhos de pesquisas e teses (MAGALHÃES, 2010; SOARES, 2012; TOSTES, 2003), realizados na Universidade Federal do Pará, dizem respeito ao tema em estudo. Tostes (2003) descreve, de maneira pormenorizada, os conceitos dos impactos causados pela geração de harmônicos na rede de distribuição, em consumidores de baixa tensão e caracteriza as principais características de geração de harmônicos.

Nessa publicação avalia-se o emprego de filtros passivos de baixo custo para a filtragem das principais componentes harmônicas geradas por essa classe de consumidores, como também, é desenvolvido um algoritmo de fluxo de potência harmônico que tem por base o método somatório de correntes, incluindo alterações que possibilitem considerar a existência de possíveis pontos com geração distribuída localizados ao longo dos alimentadores.

1.2.3. Artigos com enfoque na identificação de fontes de harmônicos nos sistemas de energia elétrica

A geração de harmônicos e a existência de formas de ondas distorcidas nas redes de distribuição dos sistemas elétricos de potência têm sido um dos principais problemas enfrentados pelas concessionárias de energia elétrica, ocasionados pelo uso de equipamentos que provocam a deterioração da QEE, principalmente, os baseados em eletrônica de potência e outras cargas não lineares.

A questão maior é a determinação exata da fonte de distorção harmônica. A falta de um índice confiável, que possa apontar precisamente a fonte poluidora do sistema de energia elétrica, acaba ocasionando uma disputa entre as concessionárias e os clientes, a respeito de quem é o responsável pelas distorções harmônicas. Diversos autores realizaram estudos

acerca do assunto, com o principal objetivo de propor métodos de identificação das fontes de distorção harmônica.

Davis, Emanuel e Pileggi (2000) propuseram uma formulação matemática baseado na injeção de correntes fasoriais, em um barramento com impedância de Thevenin. O principal objetivo desse artigo foi propor conceitos que pudessem permitir o desenvolvimento de instrumentação, medição e cálculos que levem a uma distribuição equitativa dos custos necessários para manter a rede elétrica de distribuição, razoavelmente livre de poluição harmônica.

Já Li, Xu e Tayjasant (2004) publicaram um método para determinar qual dos entes, concessionária ou cliente, tem mais contribuição para as correntes harmônicas medidos no ponto de acoplamento comum. O método é inspirado pela observação de que a direção da potência reativa harmônica, em vez de potência ativa, é um indicador mais confiável sobre a localização das fontes harmônicas dominantes. O método necessita de informações de impedância do sistema, análise matemática, simulação e medições de campo. A validação do método é demonstrada com análise teórica e simulações computacionais, e os testes de campo.

Mazumdar et al. (2005) propuseram um método com o objetivo de enfrentar os conflitos entre as concessionárias de energia elétrica e os clientes finais, no que tange a quem é responsável pelas distorções harmônicas, devido à falta de um índice confiável e único, que possa apontar precisamente a fonte de poluição harmônica. O método proposto pelos autores tem como objetivo enfrentar este problema com o auxílio das redes neurais. A principal vantagem do método é que apenas as formas de onda das tensões e correntes têm que ser medidas.

Pfajfar et al. (2007) apresentam um o método para avaliar as contribuições harmônicas no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), permitindo o cálculo das contribuições harmônicas, sem o conhecimento da impedância real do cliente. A abordagem proposta baseia-se no método vetorial de corrente harmônica, onde é introduzida uma impedância de referência do lado do cliente. Tal procedimento permite, em condições de ressonância, uma melhor avaliação das contribuições harmônicas do cliente e da concessionária. O método é validado através de simulações e medições de campo.

Já Kandev e Chénard (2010) discorrem sobre um método para identificar a fonte da emissão harmônica e determinar a contribuição para a distorção em diferentes pontos de um grande sistema de potência. O método proposto é baseado na análise vetorial das correntes harmônicas, medidas de forma síncrona, em vários pontos sobre a rede elétrica.

A abordagem realizada pelos autores permite localizar o cliente responsável, em tempo real, (causa harmônica) para uma dada perturbação na corrente harmônica e determinar a sua contribuição para a tensão e variações de corrente em todos os pontos medidos (efeito harmônico). Um modelo físico, que representa uma rede de fornecimento de energia de três cargas não lineares, foi usado para ilustrar o desempenho do método apresentado.

Ainda de acordo com os autores, o método apresentado pode ser utilizado para analisar, em tempo real, as variações de correntes harmônicas e de tensão em uma grande rede de energia. Tal abordagem permite uma melhor compreensão para os diferentes problemas associados com os harmônicos, identificando rapidamente as causas e os efeitos; e permitindo, assim, uma melhor utilidade da energia elétrica.

Ainda na análise dos harmônicos, Yin, Sun e Yu (2011) realizam uma avaliação completa das tecnologias de identificação da origem das fontes harmônicas, e analisam o potencial dessa linha de pesquisa. Com base nessa análise, são pesquisados dois possíveis métodos: o método de regressão linear múltipla e método de análise de correlação parcial, a fim de determinar as contribuições individuais das múltiplas cargas harmônicas.

Os métodos propostos transformam o problema da determinação da contribuição da distorção harmônica em uma análise de correlação de dados, entre a tensão harmônica e cada corrente harmônica. Este grau de correlação pode ser usado para estimar o impacto harmônico de cada carga e as melhorias que cada método pode trazer.

A identificação das contribuições das correntes harmônicas do setor industrial, em seu PAC; e, também, as cargas a montante das concessionárias de energia elétrica, foram os principais objetivos dos estudos de Unsar et al. (2014), que publicaram uma série de dois artigos, com o objetivo de identificar as contribuições das correntes harmônicas de cada planta industrial no PAC e as cargas do lado da concessionária.

Em sua análise, os autores identificaram que as características não lineares das indústrias e da concessionária são modeladas como fonte de correntes harmônicas, considerando que as partes lineares do modelo proposto consistem em elementos passivos. O método proposto é baseado no Circuito Equivalente de Norton, aplicado na frequência harmônica e tal abordagem assume que não há, em diferentes frequências, interação de corrente e tensão harmônica. Portanto, baseia-se na superposição das tensões e das correntes em diferentes frequências harmônicas.

Atualmente, pode-se encontrar na literatura duas abordagens principais voltadas para resolver o problema da atribuição de responsabilidade quanto à distorção harmônica existente num sistema de distribuição. Na primeira abordagem, busca-se determinar, no PAC, os

impactos harmônicos da rede supridora de energia e do consumidor.

Liu e Xu (2000) propuseram uma metodologia que, baseada no método da superposição, possibilita separar as contribuições harmônicas da rede da concessionária e do cliente no PAC e, a partir disso, atribuir responsabilidades pela porcentagem de distorção harmônica provocada pelos mesmos. No entanto, esta metodologia demanda um conhecimento prévio da impedância harmônica equivalente tanto da concessionária quanto do cliente, o que dificulta a sua aplicação prática.

Diante desta dificuldade, Marcelo Jr, Oliveira e Santos (2011) apresentam uma metodologia que, a partir da inserção de uma impedância harmônica bem definida e dominante sobre as impedâncias harmônicas da concessionária e do consumidor, é capaz de determinar os percentuais de distorção provocados pelos mesmos sem a necessidade de conhecer os valores de suas impedâncias.

A segunda abordagem dada ao problema em questão foi apresentada por Mazin (2009) (2011), que desenvolveu metodologias para determinar o impacto harmônico individual de múltiplas cargas geradoras de harmônico em uma barra qualquer de um sistema elétrico, por meio da criação de modelos estatísticos que, por sua vez, foram construídos tendo como base as medições das tensões e correntes harmônicas.

O autor, basicamente, avaliou a correlação existente entre a tensão e a corrente para uma determinada ordem harmônica a partir da aplicação do método de regressão linear simples (MAZIN, 2009). Além disso, desenvolveu um indicador capaz de determinar o impacto harmônico causado pelas cargas num ponto qualquer de um sistema elétrico, sendo que os coeficientes desses indicadores foram obtidos por meio da inferência estatística (MAZIN, 2011).

No entanto, em ambos os métodos apresentados pelo autor, a estimativa do impacto harmônico não pode ser generalizada para o todo período de medição, tendo em vista que é necessário selecionar uma amostra de dados para o qual somente a corrente harmônica da carga em análise varie. Isto pode contribuir para o surgimento de modelos estatísticos ou indicadores que apresentem alta incerteza para determinados momentos do período de medição, tendo em vista que o padrão de operação da carga varia a todo momento, provocando possíveis impactos distintos no sistema elétrico.

Outras metodologias baseadas em fluxo de harmônicos em sistemas trifásicos de potência foram propostas para analisar e investigar a geração e a propagação dos componentes harmônicos de tensão e corrente através do sistema operando em regime permanente. Esses estudos são geralmente realizados a partir de simulações digitais onde se utiliza modelagem

dos componentes da rede de energia elétrica e técnicas de injeção de correntes e métodos de soma de potências (BARBOSA, SALES e FREITAS, 2012; OLIVEIRA, 2004; TOSTES, 2003; VARIZ, 2006; VARIZ, 2008).

Já Arruda e Kagan (2009) apresentam o resultado da estimação da distorção harmônica total em barras de um sistema elétrico a partir de medições em algumas barras. O algoritmo desenvolvido baseia-se em Estratégias Evolutivas. Esta técnica compreende um ramo de desenvolvimento dos Algoritmos Evolutivos no qual se inserem os Algoritmos Genéticos. As vantagens no uso desta técnica estão nas facilidades, de modelagem e em encontrar uma solução para problemas complexos. O algoritmo foi aplicado em uma rede de 14 barras cujos dados foram extraídos do IEEE.

Para a gestão da qualidade de energia, é altamente importante o desenvolvimento de métodos e técnicas para quantificar as contribuições das fontes harmônicas em cada ponto de interesse do sistema e não somente no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Em especial, após a possibilidade da regulamentação das punições por ultrapassagem dos indicadores de distorções harmônicas.

A identificação de fontes harmônicas em um sistema de energia tem sido uma tarefa difícil, por muitos anos. Várias abordagens, tal como uma técnica de fluxo de potência harmônico, amplamente utilizada, e o método estatístico ou o método de análise vetorial, demonstraram várias dificuldades, especialmente quando várias cargas não lineares são simultaneamente conectadas na rede elétrica de alimentação. Estes problemas são devidos, principalmente, à hipótese simplificadora do sistema de alimentação, onde tanto do lado das concessionárias e dos clientes estão representados por circuitos equivalentes, e são necessários o conhecimento das impedâncias harmônicas para a análise desses métodos e nem sempre esses parâmetros estão disponíveis.

O método vectorial da corrente harmônica apresenta algumas deficiências práticas. O método não considera quaisquer condições de ressonância (por exemplo, devido ao uso de bancos de capacitores para compensação de energia reativa), as quais podem ter uma influência significativa na distorção harmônica.

Outros métodos têm sido propostos para medir o conteúdo harmônico da corrente de carga, ou para prevêê-las, mas a maioria deles assume um alimentador radial que fornece uma única carga através de um alimentador de impedância conhecidos, ou múltiplas cargas conectadas ao PAC, que tem uma tensão senoidal e com uma impedância de zero do alimentador.

Outro grupo de métodos práticos para a detecção de fonte de harmônica é medir as

impedâncias harmônicas das concessionárias e do cliente e, em seguida, calcular a fonte harmônica por trás das impedâncias. Este método é bastante difícil de ser implementado, pois o principal problema é a determinação das impedâncias, que só podem ser obtidas com a ajuda de perturbações no sistema. O método com medições sincronizados em múltiplos pontos da rede é uma tarefa difícil e cara.

De acordo com a pesquisa realizada, parece não haver, na literatura, até a presente data, o registro de estudos para a identificação e quantificação dos impactos na distorção harmônica de tensão no PAC gerada por cargas não lineares, utilizando-se modelos de regressão não paramétrica. E, visando suprir parte das lacunas atualmente existentes, a tese irá contribuir com o desenvolvimento de modelo de regressão não paramétrico, utilizando somente medições de magnitude de tensão, no ponto de interesse, e a magnitude da corrente em cada carga não linear. Tal procedimento supera as limitações dos métodos de regressão linear atuais, que consideram constante a contribuição harmônica das outras fontes, quando se analisa a contribuição de uma fonte específica (GAMA, 2006; BAGGINI, 2008).

Também é contribuição da tese a utilização do coeficiente de determinação R^2 , o qual pode ser obtido a partir do coeficiente de correlação de Pearson, que será utilizado para avaliar o grau de precisão ou confiança da correlação entre tensão e corrente harmônica dos modelos de regressão linear e não paramétricos.

1.3. Estrutura da Tese

A seguir, apresenta-se a estruturação do trabalho, dividida em capítulos.

O segundo capítulo, intitulado “Aspectos Gerais Sobre a Qualidade de Energia Elétrica”, aborda os tópicos fundamentais para conhecimento e análise da qualidade de energia elétrica.

O capítulo 3, “Metodologia para Determinação da Contribuição da Carga nas Distorções Harmônicas em um Sistema de Distribuição”, descreve-se o desenvolvimento de um método não paramétrico, para a identificação de fontes harmônicas, e suas contribuições na distorção harmônica.

No quarto capítulo, “O Sistema Elétrico do Campus Universitário do Guamá da UFPA”, apresenta a configuração do sistema elétrico, com suas respectivas cargas e perfis de consumo; e descreve aspectos do Sistema de Gestão de Energia Elétrica (SISGEE) do Campus Universitário. Neste capítulo, também é feita a análise dos parâmetros elétricos e

caracterização da eficiência energética da Instituição, realizada a partir das medições e demandas históricas de consumo.

No quinto capítulo, “Análise de Resultados”, as formulações tratadas nos Capítulos 3 serão aplicadas ao sistema elétrico do Campus Universitário do Guamá, da Universidade Federal do Pará (UFPA), com o objetivo de se verificar a validação do método proposto, suas vantagens e desvantagens.

Finalmente, o capítulo seis 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 – ASPECTOS GERAIS SOBRE A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1. Considerações iniciais

Hoje, pode-se notar um aumento considerável nas exigências, no que tange a supervisão, o controle e o desempenho dos sistemas elétricos de potência. Tal fato resultou a adoção de práticas, dentro das concessionárias elétricas, que se tornam cada vez mais comuns, tais como: o monitoramento da qualidade da energia; a identificação das causas e efeitos das distorções da forma de onda das tensões e correntes; a proposição de técnicas de mensuração, modelagem e controle dos níveis de distorção de tensão para padrões aceitáveis (ARRILLAGA, 2003). Essa preocupação é o resultado do crescente uso de equipamentos sensíveis aos distúrbios dos sistemas elétricos de potência.

O alto grau de investimentos das concessionárias e clientes, para manter os sistemas funcionando dentro dos padrões de confiabilidade e Qualidade de Energia Elétrica (QEE), e a falta de regulamentação do setor elétrico, principalmente em relação aos níveis de distorção harmônica das tensões e correntes, tem contribuído para o aumento do número de pesquisas e publicações na área de qualidade de energia, principalmente na área de distorções harmônicas na tensão de alimentação no PAC. (MCEACHERN, 2000; MCGRANAGHAN e ROETTGER, 2002; THOMPSON e KUSKO, 2007; ARRILLAGA, 2003)

Na análise das condições operativas dos sistemas elétricos, as grandezas tensão e frequência devem ser monitoradas constantemente. A frequência no sistema brasileiro é 60 Hz e, com relação à tensão nos sistemas trifásicos, devem ser observadas as seguintes características: forma de onda senoidal, defasagem de 120° e magnitudes das tensões de fases dentro dos limites normatizados.

A análise da qualidade de energia elétrica realizada neste capítulo baseia-se, principalmente, nas recomendações do Procedimento de Distribuição - PRODIST – ANEEL, módulo 8; e nas normas IEEE-519 e IEC que tratam de práticas e requisitos para o controle de harmônicos no sistema elétrico de potência.

O termo “qualidade de energia” é por vezes utilizado como sinônimo de confiabilidade para indicação da existência de uma fonte de alimentação segura e adequada, ou seja, as formas de ondas das tensões de suprimento devem ser perfeitamente senoidais e equilibradas (PAULIO e TEIXEIRA, 2013). Na prática, isto não acontece devido, principalmente, a operação de cargas não lineares, que provocam distorções na forma ideal da tensão (ARRILLAGA, 2001; TEIXEIRA, 2009; SCHNEIDER, 2003).

A qualidade da energia refere-se a uma ampla variedade de fenômenos electromagnéticos que caracterizam a tensão e a corrente, em um determinado momento e um determinado local no sistema de alimentação (STYVAKTAKIS, 2002; KENNEDY, 2000).

De acordo com a IEEE-SA(2014), ELETROBRÁS (2008), Moreno (2001) e Blooming (2006), 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 e da magnitude de tensão. Estes fenômenos são causados principalmente por:

- Transitórios impulsivos de grande magnitude;
- Chaveamento ou comutação nas redes elétricas;
- Falhas na operação do sistema;
- Utilização de cargas não lineares que provocam distorções harmônicas na rede elétrica.

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.

Para determinar parâmetros nos métodos de medição de harmônicos em sistemas de potência são utilizadas, comumente, duas normas internacionais: a IEC 61000-4-30 (2008) e a IEC 61000-4-7 (2002).

A IEC 61000-4-30 (2008) define os métodos para medição e parâmetros de qualidade da energia elétrica em sistemas de alimentação com frequência de corrente fundamental de 50Hz ou 60Hz. Os métodos de medição desta norma são descritos para cada parâmetro relevante, de modo que eles deem resultados confiáveis, independentemente do método aplicado.

Os principais considerados nesta norma, são:

- Frequência de potência;
- Magnitude da tensão;
- Quedas de tensão na alimentação e *swells*;
- Interrupções de tensão;
- Tensões transitórias;
- Desequilíbrio de tensão de alimentação;
- Tensões harmônicas e inter-harmônicas;
- Alimentação de sinalização na tensão de alimentação;

- Alterações rápidas de tensão;
- Medições de corrente

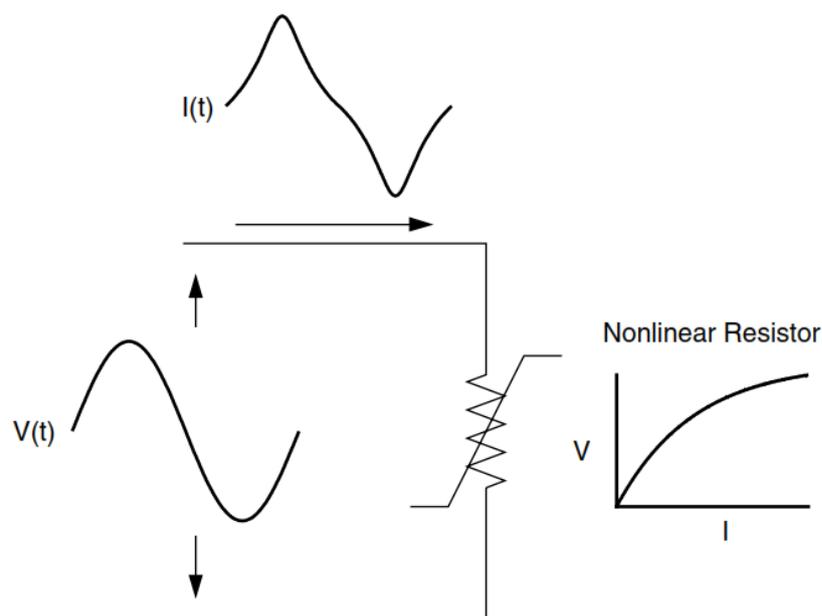
A Norma 61000-4-7 (2002) é destinada para a medição dos componentes espectrais na faixa de frequência até 9 kHz, os quais são sobrepostos na fundamental dos sistemas de fornecimento de energia com frequência a 50 Hz e 60Hz. Em termos práticos, esta norma realiza distinções entre harmônicos, inter-harmônicos e outros componentes acima do alcance de frequência de harmônicos, até 9Hz.

A referida norma estabelece métodos de medição destinados para testar, individualmente, itens dos equipamentos, de acordo com os limites de emissão estabelecidos em certas normas (por exemplo, os limites de corrente e tensão harmônica, conforme mostrado na IEC 61000-3-20) e, também, métodos para a medição da tensão e corrente harmônica em sistemas de alimentação.

2.2. Caracterização dos harmônicos

As distorções harmônicas são provocadas por cargas não lineares, ou seja, aquelas em que a corrente não é proporcional à tensão aplicada. A Figura 01 demonstra esse conceito, onde uma tensão senoidal é aplicada em uma carga não linear e a corrente resultante no sistema é distorcida (DUGAN et al., 2004).

Figura 01 – Distorção de corrente causada por uma resistência não-linear.



Em 1822, J. B. J. Fourier postulou que qualquer função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma componente senoidal fundamental e uma série de componentes de ordem superior de múltiplos inteiros da frequência fundamental e de uma eventual componente contínua. Essa série de componentes é denominada de componentes harmônicas. Portanto, para a análise das componentes harmônicas, emprega-se a série de Fourier (ARRILLAGA, 2003).

2.3. Série de Fourier

De acordo com Arrillaga (2003), a série de Fourier de funções periódicas $x(t)$ pode ser representada pela Equação 2.1:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \text{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) \quad (2.1)$$

Onde as constantes a_0 , a_n e b_n são calculados conforme demonstrado nas Equações 2.2, 2.3 e 2.4:

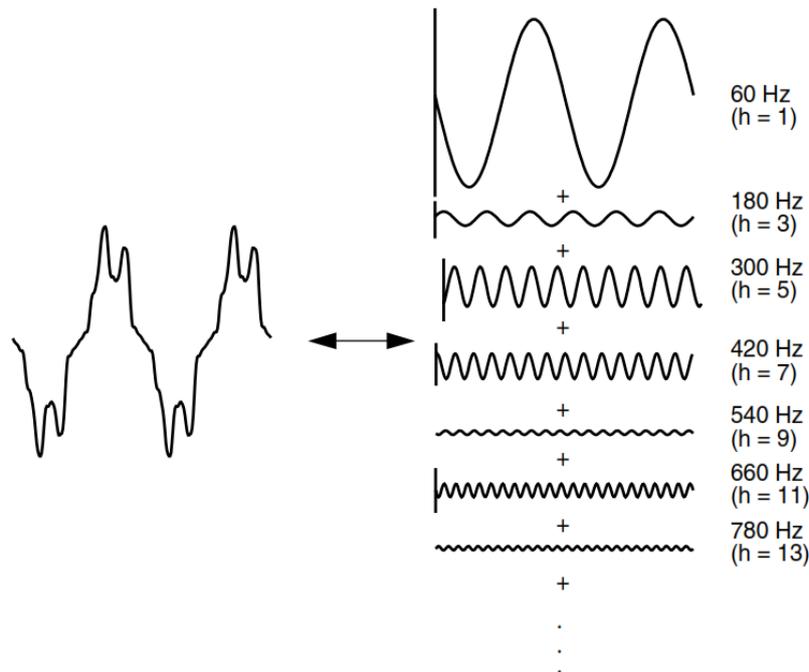
$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) dt \quad (\text{componente contínua}) \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) dt \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \text{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) dt \quad (2.4)$$

A vantagem de se usar a série de Fourier para representar formas de ondas distorcidas é que cada componente harmônica pode ser analisada separadamente, e a distorção final é determinada pela superposição das várias componentes. A representação dessa superposição pode ser vista na Figura 02.

Figura 02 – Representação de uma forma de onda distorcida, através da série de Fourier.



Fonte: DUGAN (2004)

As correntes harmônicas, quando circulam através das impedâncias do sistema elétrico, geram tensões harmônicas e deformam a tensão resultante no barramento de alimentação.

2.4. Qualidade de Energia Elétrica – QEE

De um modo geral, a Qualidade de Energia Elétrica engloba a qualidade do serviço, usualmente mensurada pelos indicadores de interrupção e frequência da interrupção, e pela qualidade do produto, que usualmente se confunde com a qualidade da tensão elétrica.

Barros (2010) caracterizou a qualidade do produto da seguinte forma:

“A qualidade do produto diz respeito à conformidade do produto energia elétrica, que pode ser interpretada como a capacidade de o sistema elétrico fornecer energia com tensões equilibradas e sem deformações de forma de onda. Do ponto de vista ideal, seria a disponibilidade de energia elétrica com tensões senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constante”. (BARROS, 2010, P.41)

Em função da QEE são definidas, por normas da ANEEL (2015), as terminologias, os parâmetros, os fenômenos e valores relativos à conformidade de tensão, em regime permanente.

O módulo 8, dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), também elaborados pela ANEEL, tem por objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica em função da:

- a) Qualidade do produto, onde são definidas a terminologia e parâmetros; caracterizados os fenômenos e valores relativos à conformidade de tensão em regime permanente; e verificadas as perturbações na forma de onda de tensão;
- b) Qualidade dos serviços prestados, onde são estabelecidas a metodologia para apuração de indicadores de continuidade de tempo de atendimento a ocorrências emergenciais.

Ainda, de acordo com o PRODIST, na análise da qualidade de energia, em regime permanente ou transitório, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Distorções harmônicas;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensões de curta duração;
- Variação de frequência.

2.4.1. Tensão em regime permanente

Este módulo do PRODIST estabelece os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica; e os critérios de medição, registro e dos prazos para compensação, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores. É importante mencionar que os valores medidos pelos clientes ou concessionárias devem ser comparados à tensão de referência, que é a tensão nominal ou a contratada, de acordo com o ponto de conexão.

Para uma unidade consumidora atendida em 13,8 kV, por exemplo, sua faixa de variação da tensão de alimentação, para ser considerada como “adequada”, deve situar-se entre 95% (noventa e cinco por cento) e 105% (cento e cinco por cento) da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão, de acordo com a Tabela 01.

Tabela 01 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

Tensão de atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93 TR \leq TL \leq 1,05 TR$
Precária	$0,90 TR \leq TL \leq 0,93 TR$
Crítica	$TL < 0,90 TR$ ou $TL > 1,05 TR$

Fonte: ANEEL (2014)

As medições dos níveis de tensão, para gerar os indicadores individuais, devem conter o registro de 1008 (mil e oito) medições válidas, obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos.

Os índices de duração relativa da transgressão para a tensão precária (DRP) e o de tensão crítica (DRC), conforme as Equações 2.5 e 2.6:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100 [\%] \quad (2.5)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100 [\%] \quad (2.6)$$

Onde nlp e nlc representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precárias e críticas, respectivamente.

2.4.2. O fator de potência

De acordo com a ANEEL, o fator de potência deve estar compreendido entre 0,92 a 1,00, considerado como fator de potência indutivo ou capacitivo. O fator de potência é calculado de acordo com a Equação 2.7.:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad (2.7)$$

Onde:

fp - fator de potência

P - potência ativa (Watts)

Q - potência reativa (VAr)

2.4.3. Distorção harmônica individual e total

O uso crescente das cargas não lineares nos sistemas elétricos tem provocado a circulação de correntes com frequências diferentes da fundamental, ocasionado a deformação da forma de onda das tensões e correntes. A definição da presença de harmônicos pode ser realizada através do tratamento individual ou total das mesmas. Para quantificar esse nível de distorção em relação a onda fundamental de modo individual, utilizam-se as Equações 2.8. e 2.9. (GARCIA, 2008):

- Distorção Harmônica Individual de Tensão (DHI_V)

$$DHI_V = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.8)$$

- Distorção Harmônica Individual de Corrente (DHI_I)

$$DHI_I = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (2.9)$$

De acordo com o autor, 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. Ele é expresso por uma composição quadrática das distorções individuais, conforme as Equações 2.10 e 2.11:

- Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_V)

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.10)$$

- Distorção Harmônica Total de Corrente (DHT_I)

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2.11)$$

Onde:

V_h - Tensão harmônica de ordem h;

I_h - Corrente harmônica de ordem h;

h – Ordem harmônica;

$h_{m\acute{a}x}$ – Ordem harmônica máxima;

V_1 – Tensão fundamental medida;

I_1 – Corrente fundamental medida

As deformações do perfil original de tensão também podem ser associadas a outros fenômenos elétricos, tais como: saturação do núcleo magnético de transformadores, corrente *inrush* do transformador, fornos a arcos, descargas atmosféricas, manobras de linhas e faltas.

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 valores de referência globais das distorções harmônicas totais e individuais, em porcentagem da tensão fundamental, são reproduzidos nas Tabelas 02 e 03, conforme resolução da ANEEL.

Tabela 02 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8 kV$	8
$13,8 kV < V_N \leq 69 kV$	6
$69 kV < V_N < 230 kV$	3

Fonte: ANEEL (2014)

Tabela 03 - Níveis de referência para as distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_N \leq 1kV$	$1kV < V_N \leq 13,8 kV$	$13,8 kV < V_N \leq 69 kV$	$69 kV < V_N < 230 kV$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5

Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	0,5	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL (2014)

2.4.4. Desequilíbrio de tensão

Em um sistema trifásico de distribuição, os desequilíbrios das tensões de fase provocam alterações sensíveis nos padrões recomendados pela ANEEL (PRODIST, 2014). O fator de desequilíbrio de tensão pode ser calculado de acordo com as Equações 2.12, 2.13 e 2.14:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (2.12)$$

ou

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.13)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab^4} + V_{bc^4} + V_{ca^4}}{(V_{ab^2} + V_{bc^2} + V_{ca^2})^2} \quad (2.14)$$

Onde: FD = Fator de desequilíbrio

V - = Magnitude de tensão de sequência negativa (RMS)

V+ = Magnitude de tensão de sequência positiva (RMS)

V_{ab}, V_{bc} e V_{ca} = Magnitudes das tensões trifásicas de linha (RMS)

2.4.5. Flutuação de tensão

São variações repetitivas, esporádicas ou aleatórias do valor eficaz da tensão, em que essas variações magnitude estão normalmente compreendidas entre os limites de 0,95 valor por unidade (pu) a 1.05 pu. Tais variações, na magnitude, são usualmente denominadas como *flicker* ou oscilação.

2.4.6. Variação de tensão de curta duração

São variações momentâneas no valor eficaz da tensão de curta duração, em curtos intervalos de tempo. Sua classificação de variação é dada de acordo com a Tabela 04, (PRODIST, 2014).

Tabela 04 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração

Classificação	Denominação	Duração da variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Aprofundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação temporária de tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Aprofundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: PRODIST (2014)

2.4.7. Variação de frequência

Os sistemas elétricos devem operar com frequência, em condições normais, dentro dos limites de frequência situados na faixa de 59.9 Hz e 60.1 Hz.

Atualmente, somente os indicadores de tensão em regime permanente e o fator de potência são regulamentados pela ANEEL.

2.5. Considerações finais

Inicialmente, o presente capítulo concentrou-se na caracterização dos conceitos e definições associados à qualidade de energia, com base nas recomendações da ANEEL e ONS, além de aspectos gerais que devem ser considerados na análise da qualidade de energia, em regime permanente ou transitório, tais como: Tensão em regime permanente; Fator de potência; Distorções Harmônicas; Desequilíbrio de tensão; Flutuação de tensão; Variações de tensões de curta duração e Variação de frequência.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DA CARGA NAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

3.1. Considerações iniciais

A presença de distorções harmônicas nos sistemas de distribuição de energia elétrica é responsável pelo surgimento de diversos efeitos nocivos aos equipamentos elétricos e eletrônicos como: mal funcionamento de relés de proteção, aquecimentos de cabos e transformadores, sobretensões, ressonâncias e outros. Então, torna-se fundamental para as concessionárias de energia elétrica a identificação das fontes harmônicas, que mais exercem influência nos níveis de distorção harmônica de tensão de uma rede de distribuição, uma vez que as permitem desenvolver medidas capazes de mitigar esse problema com maior eficiência.

Este capítulo apresenta uma metodologia que determina a contribuição harmônica de diversas unidades consumidoras em um ponto específico de uma rede de distribuição tendo como base os métodos de regressão linear simples, e não paramétrico, denominado de Regressão local polinomial de Kernel.

3.2. Modelo matemático da rede de distribuição

A análise harmônica de um sistema de distribuição de energia elétrica tem como objetivo avaliar a influência das diversas cargas geradoras das distorções harmônicas nos diversos pontos da rede elétrica. Para isso, uma consideração razoável é que as cargas geradoras de harmônicos injetam correntes harmônicas nas redes de distribuição, o que permite modelá-las como fontes de correntes harmônicas. Essas correntes harmônicas, quando fluem pelas impedâncias dos cabos e transformadores, geram quedas de tensão em cada ordem harmônica e, como consequência, distorções nas formas de onda das tensões nos diversos pontos da rede elétrica.

Para a análise de um sistema de energia elétrica é necessário, primeiramente, a formulação de modelo adequado para a rede elétrica do sistema (ELGERD,1978; STAGG,1979; STOTT, 1978, MONTICELLI, 1983). Tal modelo pode ser representado pela matriz de impedância nodal, conforme mostrada na Equação 3.1.

$$E^h = Z^h I^h \quad (3.1)$$

Ou, na forma de matriz admitância, conforme Equação 3.2.

$$\mathbf{I}^h = \mathbf{Y}^h \mathbf{E}^h \quad (3.2)$$

A matriz admitância é obtida a partir da inversão da matriz de impedâncias nodais.

Onde:

\mathbf{E}^h é o vetor tensão harmônica complexa para cada ordem harmônica h , com módulo igual V^h e ângulo igual a α^h ;

\mathbf{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 γ^h ;

\mathbf{Z}^h é a matriz de impedâncias harmônicas de ordem h ;

\mathbf{Y}^h é a matriz de admitâncias harmônicas de ordem h

Como deseja-se determinar a contribuição da corrente harmônica da carga na tensão, em um ponto da rede i , a Equação 3.1. pode ser reescrita conforme a Equação 3.3.

$$\mathbf{E}_i^h = \mathbf{Z}_{ij}^h \mathbf{I}_j^h + \sum_{k=1}^n \mathbf{Z}_{ik}^h \mathbf{I}_k^h \quad (3.3)$$

sendo $i \neq j$

Onde:

n – número de cargas

Ou, de forma alternativa conforme a Equação 3.4.

$$\mathbf{E}_i^h = \mathbf{E}_{ij}^h + \mathbf{E}_{ibg}^h \quad (3.4)$$

Onde:

$\mathbf{E}_{ij}^h = \mathbf{Z}_{ij}^h \mathbf{I}_j^h$ - é a distorção harmônica de tensão devido à corrente da carga não linear j ;

$\mathbf{E}_{ibg}^h = \sum_{k=1}^n \mathbf{Z}_{ik}^h \mathbf{I}_k^h$ - é a tensão harmônica *background*, devido às outras cargas não lineares.

Supondo que a rede elétrica pode ser considerada uma rede linear, então, na Equação 3.3, o termo $\mathbf{Z}_{ij}^h \mathbf{I}_j^h$ representa a contribuição harmônica devido à carga não linear j na tensão harmônica, enquanto que o termo $\sum_{k=1}^n \mathbf{Z}_{ik}^h \mathbf{I}_k^h$ representa a contribuição devido a outras cargas. No entanto, numa rede elétrica real, esta suposição não é válida, devido à saturação

magnética de reatores e transformadores, uma vez que esses equipamentos podem introduzir distorções harmônicas de tensão significantes em E_i^h .

Com base na Equação 3.3, a contribuição de cada corrente harmônica I_j^h na tensão harmônica E_i^h pode ser exatamente determinada, caso a impedância de transferência Z_{ij}^h seja conhecida para cada condição operacional, o que não é uma informação trivial em sistemas elétricos reais. Então, a aplicação direta da Equação 3.3 não é uma tarefa simples, tendo em vista que é necessário ter uma descrição bastante detalhada dos elementos não lineares da rede, além da necessidade das medições simultâneas do módulo e ângulo de fase das tensões e correntes harmônicas nos pontos de interesse.

Muitas vezes, as concessionárias medem apenas as magnitudes das correntes e tensões harmônicas, ou seja, V_i^h e I_j^h . E neste caso, a forma mais prática e direta de obter uma indicação da contribuição para a distorção harmônica de tensão E_i^h devido a corrente de carga I_j^h , é identificando um modelo de regressão para expressar a correlação entre V_i^h e I_j^h . É bem conhecido que os modelos estatísticos não necessariamente representam uma relação causal, mas, se eles exibem uma elevada correlação entre duas variáveis, isso significa que uma variável pode perfeitamente explicar o comportamento da outra. Considerando essa característica, serão desenvolvidos modelos estatísticos para avaliar a relação entre os módulos das tensões e correntes harmônicas (E_i^h e I_j^h). Dois modelos de regressão serão derivados, ou seja, um linear e outro não paramétrico, conforme descrito nas próximas sessões.

É importante salientar que os modelos estatísticos não necessariamente representam uma relação de causalidade entre duas variáveis. Porém, se esses modelos exibirem uma alta correlação entre as variáveis é possível afirmar que uma variável pode explicar, satisfatoriamente bem, o comportamento da outra.

3.3. Modelos de regressão

Os modelos estatísticos são extremamente úteis na análise de séries temporais, principalmente na modelagem da expectativa para prever o valor de uma variável em função de outras variáveis (COSTA, 2012) e, também, avaliar quais os fatores que influenciaram o comportamento da série, buscando definir relações de causa e efeito entre as variáveis (SALDIVA E SINGER, 2001).

A análise de regressão é um método estatístico onde tanto a variável resposta, quanto a

variável explicativa, são contínuas. De acordo com Crawley (2005), há quatro modelos importantes de regressão:

- Regressão Linear, mais simples e frequente usada;
- Regressão Polinomial, utilizada para testar a não linearidade em uma relação
- Regressão não linear, para determinar um modelo não linear para os dados estudados;
- Regressão não paramétrica, usada quando não há uma forma funcional óbvia.

Ainda de acordo com o autor, a essência da análise da regressão é a utilização das amostras de dados para estimar parâmetros de valores e os seus erros mais comuns. Primeiramente, precisa-se escolher um modelo que descreva a relação entre a variável resposta e a variável explicativa.

Neste trabalho, abordar-se-á apenas as regressões utilizadas para a obtenção dos resultados, as quais são conceituadas, a seguir.

3.3.1. Modelo de regressão linear

A regressão linear é um método formado por um conjunto de ferramentas estatísticas que buscam estabelecer um modelo estatístico que correlacione uma variável aleatória dependente de uma única variável aleatória independente, tendo como base uma função do primeiro grau (Equação da reta). A Equação 3.5 mostra a representação matemática de um modelo de regressão linear (WAND, 1995; RYAN, 2009 e CRAWLEY, 2005).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (3.5)$$

Onde:

Y: é uma variável aleatória dependente;

X: é uma variável aleatória independente;

β_0 , β_1 são constantes;

ϵ é o erro do modelo;

Neste modelo, ϵ é uma variável aleatória com esperança ($E[\epsilon]$) igual a zero e variância ($Var[\epsilon]$) igual σ^2 . Assim:

$$E[\epsilon] = 0;$$

$$Var[\epsilon] = \sigma^2$$

Assumindo que a relação entre as magnitudes de tensão e corrente harmônica é caracterizada como uma função de primeira ordem, neste caso, a Equação 3.5, pode ser colocada na forma da Equação 3.6:

$$V_i^h = \beta_1 I_j^h + \beta_0 + \epsilon \quad (3.6)$$

Onde:

V_i^h - é a magnitude de tensão harmônica de ordem h no barramento i ;

I_j^h - é o modulo da injeção de corrente harmônica de ordem h no barramento j ;

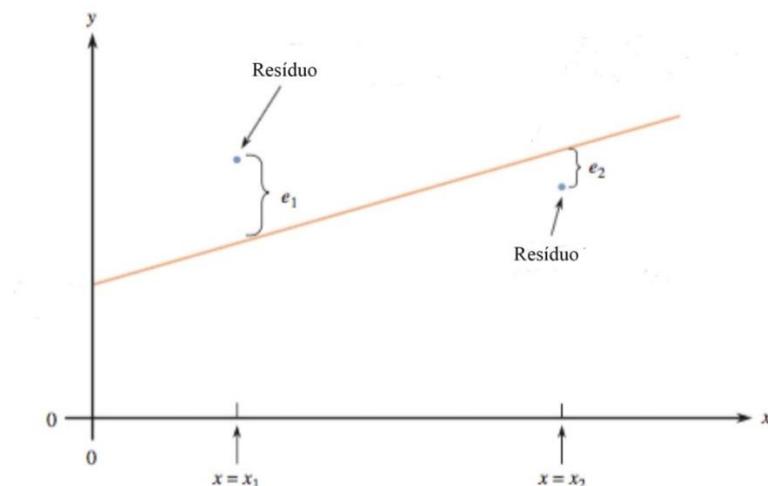
β_0 e β_1 - são os parâmetros de interseção e inclinação, respectivamente, da Equação da reta;

ϵ - é o erro do modelo, o qual é caracterizado por uma distribuição de Gauss, com média zero e variância igual a σ^2 .

O modelo de regressão é determinado por meio do ajuste de uma função do primeiro grau (reta) à uma amostra de dados formada pelo par ordenado composto pelas variáveis independente e dependente.

O ajuste da função é realizado com base no método dos mínimos quadrados (CHARNET, 1999), o qual determina a reta que apresenta a menor soma de quadrados dos resíduos, conforme mostrado na Figura 03.

Figura 03 – Ajuste de uma reta por meio do princípio dos mínimos quadrados



Fonte: PECK, OLSEN e DEVORE (2012)

Então, no método de regressão linear simples, o princípio dos mínimos quadrados tem o objetivo de determinar os parâmetros β_0 e β_1 do modelo de regressão tal que a soma dos quadrados dos resíduos $(y_i - \hat{y}_i)$ seja o menor possível. Para tal, deve-se resolver as Equações 3.7 e 3.8.

$$\frac{\partial}{\partial \beta_0} \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i)]^2 = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta_1} \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i)]^2 = 0 \quad (3.8)$$

Resolvendo as Equações 3.7 e 3.8, obtêm-se as Equações 3.9 e 3.10 que calculam os parâmetros $\widehat{\beta}_0$ e $\widehat{\beta}_1$, respectivamente.

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{y} - \widehat{\beta}_1 \bar{x} \quad (3.9)$$

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.10)$$

Onde:

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

\bar{y} e \bar{x} são as esperanças das variáveis aleatórias Y e X.

Outro parâmetro importante no modelo de regressão é a variância do modelo, que pode ser estimada a partir dos resíduos por meio da Equação 3.11.

$$\hat{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2} \quad (3.11)$$

Para se avaliar a confiabilidade do modelo de regressão são usados várias métricas, dentre os quais pode-se citar o coeficiente de determinação (R^2).

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.

Tendo como base o modelo de regressão mostrado na Equação 3.5, são obtidos os parâmetros que recebem as seguintes denominações especiais: a soma de quadrados total (SQT), a soma de quadrados do erro (SQE) e a soma de quadrados de regressão (SQReg). Esses parâmetros são calculados por meio das Equações 3.12, 3.13 e 3.14, respectivamente.

$$SQT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.12)$$

$$SQE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.13)$$

$$SQReg = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.14)$$

Onde:

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

\bar{y} é a esperança 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 definido como a razão entre a soma de quadrados da regressão pela soma de quadrados total (CHARNET, 1999), conforme a mostrado na Equação 3.15.

$$R^2 = \frac{SQReg}{SQT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.15)$$

O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida estatística que tem o objetivo de informar o quanto a variável independente, incluída no modelo, contribui para o comportamento da variável dependente (COSTA 2012). O intervalo de variação de R^2 situa-se na faixa de 0 a 100%. Se for 0%, o modelo adotado não explica a realidade, enquanto que 100% significa que o modelo explica toda a realidade dos dados de resposta, em torno da sua média. Assim, o R^2 pode ser usado para medir a intensidade da correlação entre a resposta e as variáveis independentes, em um modelo de regressão. Com base em observações realizadas por Costa (2012), foi introduzido uma classificação empírica para o fator de correlação linear, a qual foi transformada em valores de R^2 pelo autor, resultando em um novo perfil de classificação, como mostrado na Tabela 05, que caracteriza o grau de correlação dos modelos de regressão, tendo como base os valores de R^2 .

Tabela 05 – Caracterização do grau de correlação nos modelos de regressão de acordo com os valores de R^2

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

Fonte: Costa (2012), adaptada pelo autor.

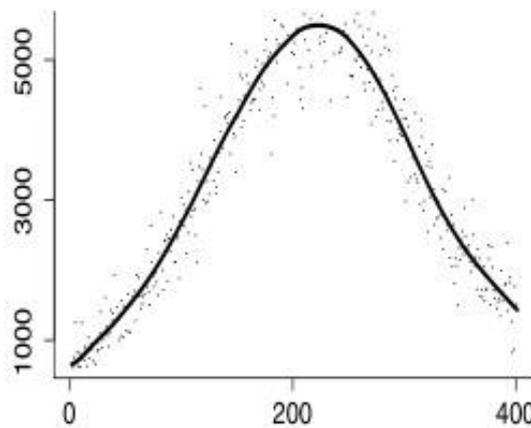
3.3.2. Regressão não paramétrica

A regressão polinomial local de Kernel é um tipo de regressão não paramétrica que, a partir de uma amostra de dados, cria um modelo estatístico que caracteriza a relação existente entre uma variável aleatória regressora e uma variável resposta.

Para regressão polinomial local de Kernel, cada ponto do modelo de regressão é estimado pelo ajuste de um polinômio de grau p à uma pequena amostra de dados (definida por um parâmetro denominado *bandwidth*) por meio do método dos mínimos quadrados ponderados, onde os pesos são selecionados de acordo com o tamanho da função de Kernel centralizada sobre cada ponto.

A Figura 04 apresenta um exemplo de uma modelo de regressão obtido pela aplicação do método de regressão polinomial local de Kernel, no qual mostra-se que curva de regressão é capaz de representar de forma satisfatória a tendência da amostra de dados.

Figura 04 - Exemplo de uma curva de regressão pelo método de regressão polinomial local de Kernel



Fonte: WASSERMAN (2006)

De acordo com Wasserman (2006), o termo “Kernel” pode se referir a qualquer função

de suavização “k”, onde $K(x) \geq 0$ e, conforme Equação 3.16:

$$\int K(x)dx = 1, \int xK(x)dx = 0, \text{ e } \sigma_K^2 = \int x^2K(x)dx > 0 \quad (3.16)$$

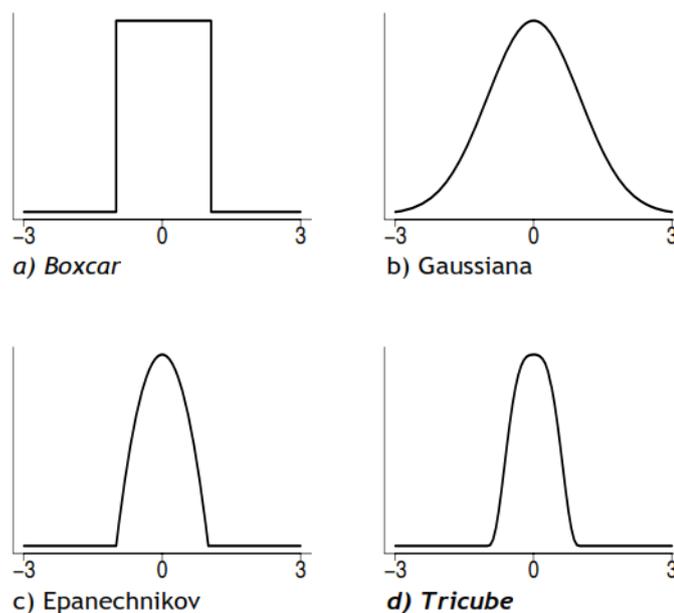
Algumas das funções Kernel mais comumente utilizadas são:

- A função *boxcar* : $K(x) = \frac{1}{2} I(x)$;
- A função Gaussiana: $K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$;
- A função Epanechnikov: $K(x) = \frac{3}{4} (1 - x^2) I(x)$;
- A função *tricube* : $K(x) = \frac{70}{81} (1 - |x|^3)^3 I(x)$

$$\text{Onde: } I(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } |x| \leq 1 \\ 0 & \text{se } |x| > 1 \end{cases}$$

As funções de Kernel mais utilizadas são as funções Gaussianas e a Epanechnikov. Deve-se ressaltar, também, que a escolha da função de Kernel pouco influencia para a criação dos modelos, já que os diferentes modelos de funções são numericamente parecidos. A Figura 05 ilustra a forma das funções Kernel, citadas acima.

Figura 05 - (a) Função de Kernel *Boxcar* (b) Função de Kernel Gaussiana (c) Função de Kernel Epanechnikov (d) Função de Kernel *Tricube*



A regressão polinomial local de Kernel é um procedimento para a estimação de uma função que consiste em estabelecer uma média local ponderada. Para o polinômio de grau p de acordo com a Equação 3.17, tal forma estimar os coeficientes $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)^T$ a partir da Equação 3.18. Para isso, utiliza-se o estimador linear $\hat{\beta}$, mostrado na Equação 3.19.

É importante frisar que o parâmetro h , conhecido como *bandwidth*, ou simplesmente parâmetro de suavização, modifica a largura de faixa da função de Kernel, conforme mostra a Equação 3.18 (Wand, 1995).

$$P_x = \beta_0 + \beta_1(x_i - x) + \beta_2(x_i - x)^2 + \dots + \beta_p(x_i - x)^p \quad (3.17)$$

$$\sum_{i=1}^n \{Y_i - \beta_0 - \beta_1(x_i - x) - \dots - \beta_p(x_i - x)\}^2 K_h(x_i - x) \quad (3.18)$$

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{Y} \quad (3.19)$$

onde:

$$K_h(x_i - x) = h^{-1} K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \quad (3.20)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 - x & \dots & (x_1 - x)^p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_p - x & \dots & (x_n - x)^p \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T \quad (3.22)$$

$$\mathbf{W} = \text{diag}\{K_h(x_1 - x), \dots, K_h(x_n - x)\} \quad (3.23)$$

Pode-se definir o estimador polinomial local de Kernel $\hat{m}(x)$, responsável por criar o modelo de regressão, igual ao valor do coeficiente β_0 , e pode ser obtido através da função dado pela Equação 3.24.

$$\hat{m}(x) = \mathbf{e}^T (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{Y} \quad (3.24)$$

Onde:

$\mathbf{e}^T = (1, 0, 0, 0, \dots)$, e \mathbf{X} , \mathbf{Y} e \mathbf{W} são definidos pelas Equações 3.21, 3.22 e 3.23, respectivamente.

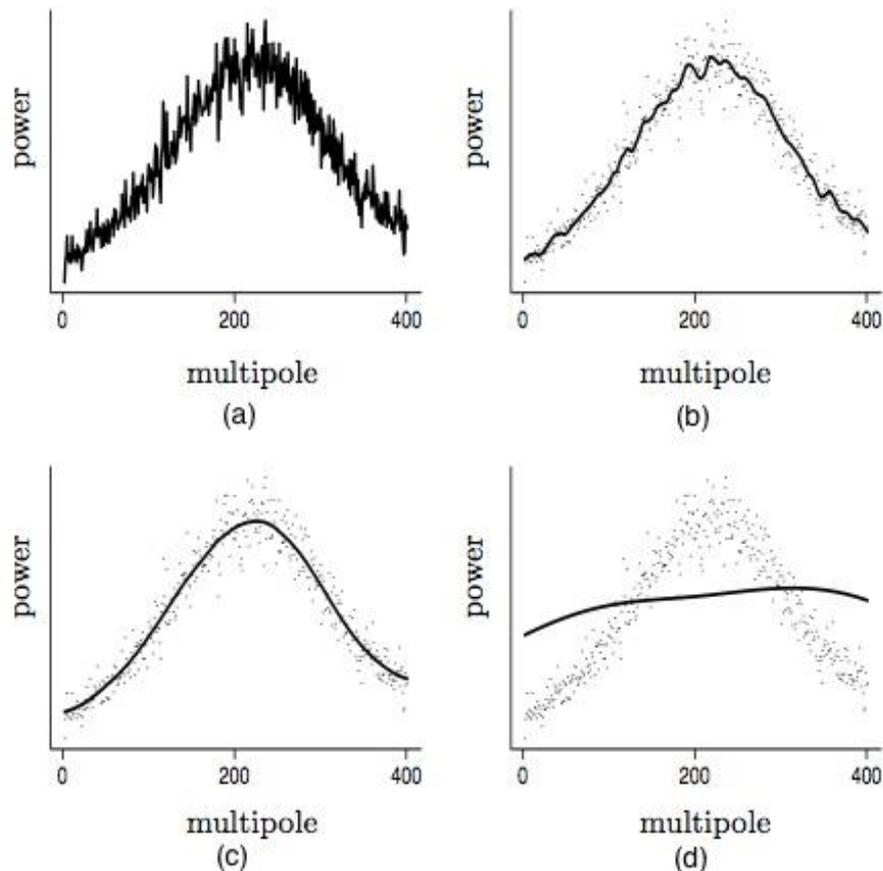
O grau do polinômio determina sua complexidade. Desta maneira, é coerente escolher polinômios de baixa ordem. No caso especial, em que o grau do polinômio é zero, a

função de regressão é obtida pelo estimador Nadaraya-Watson mostrado na Equação 3.25.

$$\hat{m}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n K_h(x_i - x) Y_i}{\sum_{i=1}^n K_h(x_i - x)} \quad (3.25)$$

A influência das observações próximas a um ponto da reta é controlada pelo parâmetro de suavização. Note que, quando o parâmetro de suavização for pequeno, a curva irá sofrer uma subsuavização e, no caso desse parâmetro ser grande, a curva de pode sofrer uma sobresuavização e tender para a equação da reta, como pode ser visualizado nas Figuras 06 (a) e 06 (d).

Figura 06 – (a) Subsuavização da curva de regressão (b) modelo não paramétrico com um baixo *bandwidth* (c) modelo não paramétrico com um alto *bandwidth* (d) Sobresuavização da curva de regressão.



Fonte: WASSERMAN (2006)

A seleção do parâmetro de suavização utilizado nesta tese foi realizada com base no método “*plug-in direto*”. De acordo com (WASSERMAN, 2006), Este método se baseia em escrever a fórmula do “*bandwidth*” ótimo assintoticamente e inserir estimativas de grandezas desconhecidas na mesma. A Equação 3.26 foi utilizada para calcular o “*bandwidth*” ótimo.

$$h_* = \left(\frac{C(h, p) \int \frac{\sigma^2(x)}{f(x)} dx}{n \int (m^{p+1}(x))^2 dx} \right)^{1/(2p+3)} \quad (3.26)$$

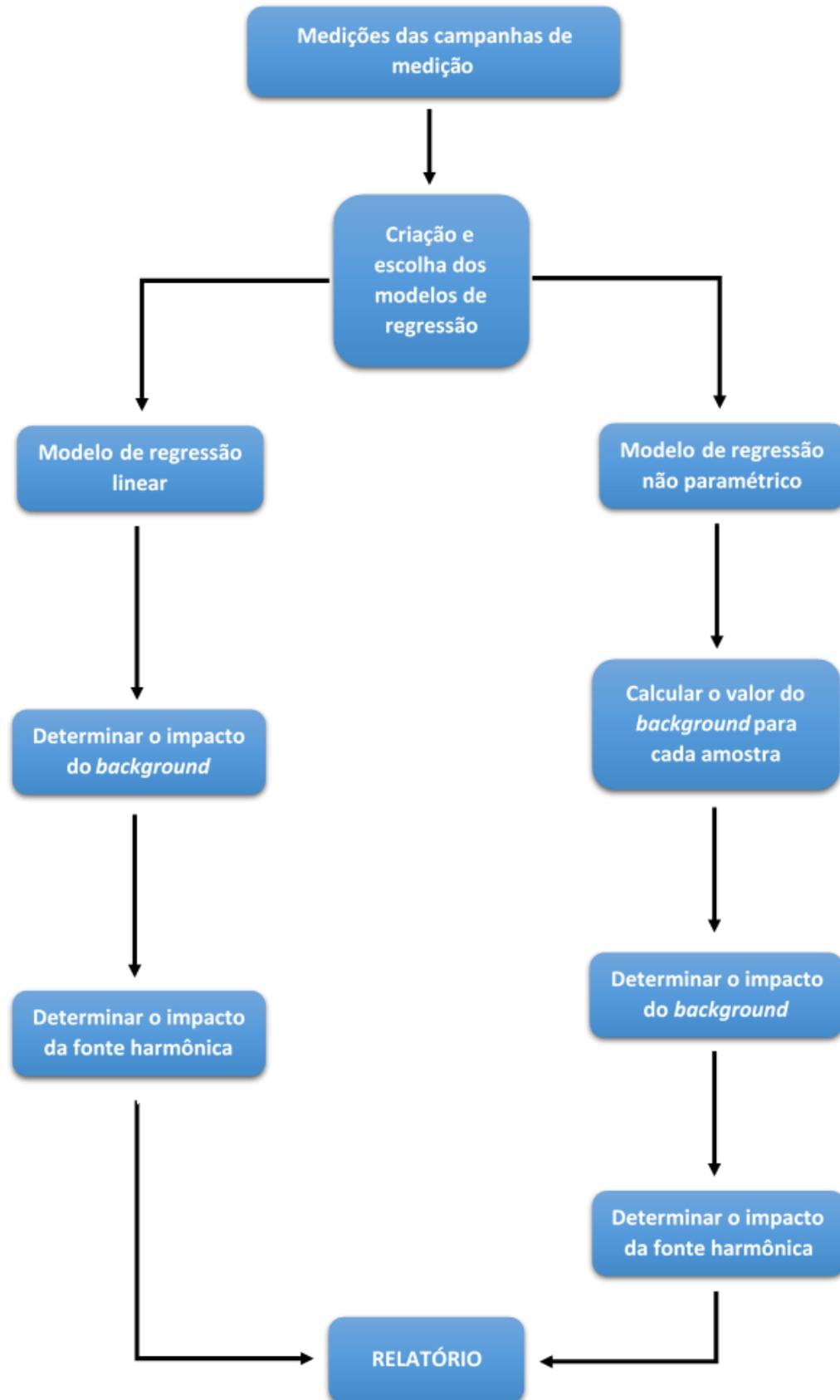
Onde $C(h, p)$ é obtido através da Equação 3.27:

$$C(h, p) = \left(\frac{(p+1)!^2 (2h+1) \sum K_h^{*2}(t) dt}{2(p+1-h) (\int t^{p+1} K_h^*(t) dt)^2} \right)^{1/(2p+3)} \quad (3.27)$$

3.4. Metodologia da quantificação da contribuição harmônica

Nessa seção, considerando as características e especificidades deste estudo, apresenta-se uma metodologia capaz de quantificar a contribuição de múltiplas unidades consumidoras no nível de distorção harmônica de tensão em um ponto específico de um sistema de distribuição a partir dos módulos das tensões harmônicas da rede elétrica e correntes harmônicas das unidades consumidoras, denominado “metodologia de quantificação do impacto harmônico”. A Figura 07 apresenta um fluxograma que descreve cada passo dessa metodologia.

Figura 07 – Fluxograma da metodologia de quantificação do impacto harmônico



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Como pode ser observado na Figura 07, o modelo é dividido em etapas, levando-se em consideração a escolha do modelo de regressão a ser utilizado. A definição e metodologia, de cada um deles, é realizada a seguir.

3.4.1. Medições das Campanhas de medição

Neste primeiro passo, obtêm-se as medidas dos módulos das tensões harmônicas em um ponto específico da rede elétrica e das correntes harmônicas das unidades consumidoras suspeitas de provocar distorções harmônicas significativas, por medição simultânea ou sincronizada.

3.4.2. Escolha do modelo de regressão

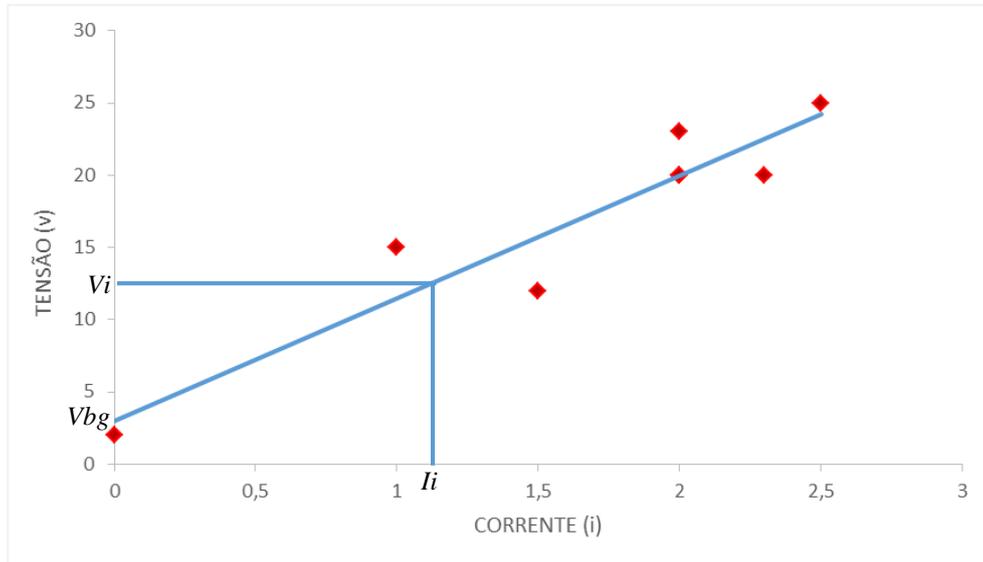
Neste processo, criam-se modelos de regressão por meio dos métodos de regressão linear simples ou não paramétrico. A escolha do método depende bastante do grau de correlação existente entre a corrente e a tensão harmônica, portanto, utiliza-se, como parâmetro para esta análise, os valores e classificações estabelecidas na Tabela 05 desta tese. Ou seja, caso a correlação existente entre a tensão e corrente harmônica seja considerada “muito alta” o método de regressão linear simples é suficiente, pois o modelo apresentará uma resposta semelhante ao modelo não paramétrico.

No entanto, caso a o grau de correlação entre a corrente e a tensão harmônica seja “moderada” ou “forte”, o método de regressão não paramétrico torna-se uma opção mais indicada, tendo em vista que é capaz de representar com maior exatidão a relação existente entre as grandezas elétricas em questão. A determinação dos fatores de impacto deve ser aplicados para cada harmônica h , injetado pelas cargas $k \neq j, \in \{1, \dots, n\}$

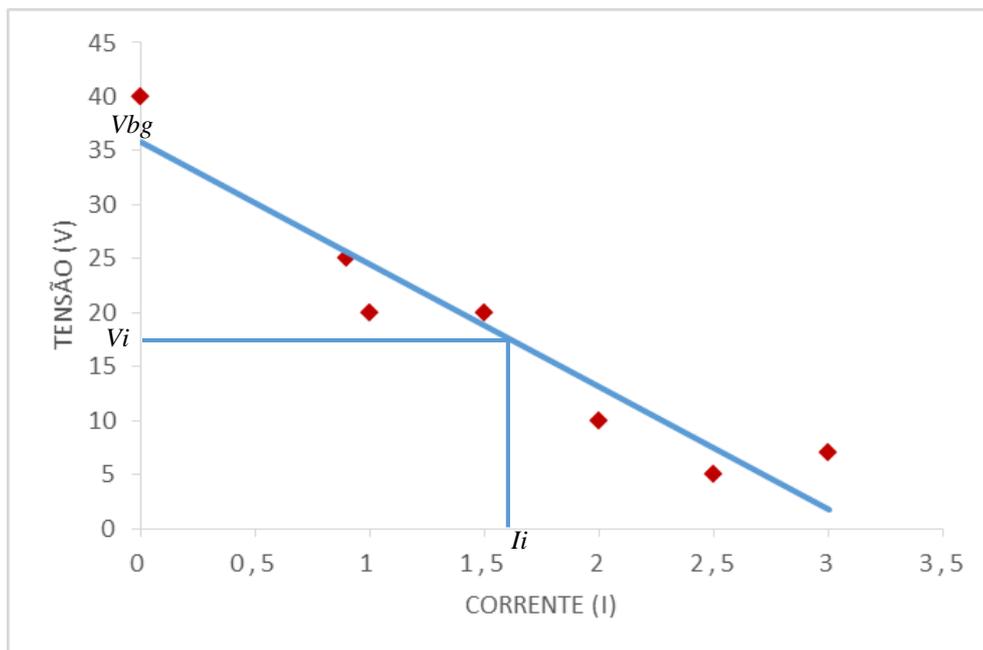
Vale ressaltar que os métodos de regressão, no que tange a relação entre tensão e corrente, podem apresentar uma relação diretamente proporcional ou inversamente proporcional. Tal consideração é um fator crucial, para a realização do processo. Para uma melhor visualização, a configuração é apresentada no Gráfico 01.

Gráfico 01 – Correlação entre a corrente e tensão: (a) correlação diretamente proporcional e (b) correlação inversamente proporcional.

a) correlação diretamente proporcional



b) correlação inversamente proporcional



Fonte: Elaborada pelo autor (2015)

Após a verificação destes parâmetros, aplica-se a metodologia do modelo de regressão escolhido.

3.4.2.1. Modelo de Regressão Linear

Se o modelo de regressão for criado por meio do método de regressão linear simples, é necessário calcular os valores dos coeficientes da Equação linear. Para tal, utilizam-se as Equações 3.9 e 3.10.

a) Determinar o impacto do background: Conforme demonstrado no Gráfico 01, se a tensão e a corrente harmônicas apresentem uma correlação diretamente proporcional, utiliza-se a Equação 3.28, ou, caso a tensão e corrente harmônicas apresentem uma correlação inversamente proporcional, calcula-se o valor através da Equação 3.29. Esses são impactos percentuais individuais, calculados para toda a série de medidas utilizadas.

$$IP_{background-i} = \left(\frac{V_{back}}{\hat{V}_i} \right) x 100\% \quad (3.28)$$

$$IP_{background-i} = \left(\frac{\hat{V}_i}{V_{back}} \right) x 100\% \quad (3.29)$$

b) Determinar o impacto da fonte harmônica: O impacto harmônico gerado pela unidade consumidora em análise na tensão, no ponto de interesse, pode ser calculado pela Equação 3.30, se a tensão e a corrente harmônicas apresentem uma relação diretamente proporcional ou, através da Equação 3.31, caso a tensão e corrente harmônicas apresentem uma relação inversamente proporcional. Novamente, esses são os valores percentuais individuais, para toda a série temporal de medições.

$$IP_{fonte-i} = \left(\frac{V_{fonte-i}}{\hat{V}_i} \right) x 100\% \quad (3.30)$$

$$IP_{fonte-i} = \left(\frac{\hat{V}_i}{V_{fonte-i}} \right) x 100\% \quad (3.31)$$

Onde:

$V_{fonte-i}$ é tensão harmônica provocada pela unidade consumidora

V_{back} é a tensão harmônica provocada pelas outras fontes harmônica presentes na rede elétrica

\hat{V}_i é a tensão harmônica total estimada pelo modelo de regressão linear

3.4.2.2. Modelo de regressão não paramétrico

Caso o modelo de regressão seja criado a partir do método de regressão não paramétrico, deve-se, primeiramente, calcular o grau da curva não paramétrica, por meio da Equação 3.24.

a) **Calcular o valor do *background* de cada amostra:** Para verificação do valor do *background*, de cada amostra, deve-se calcular o vetor de tensão de *background* utilizando para cada amostra da Equação 3.32. Esse cálculo não faz parte do método padrão de regressão não paramétrico, e foi desenvolvido pelo autor.

$$V_{back-i} = V_{modelo-yi} - \left[\left(\frac{V_{modelo-y(i+1)} - V_{modelo-yi}}{V_{modelo-x(i+1)} - V_{modelo-xi}} \right) V_{modelo-xi} \right] \quad (3.32)$$

Onde:

$V_{modelo-yi}$ é o valor da tensão do modelo de regressão não paramétrico

$V_{modelo-xi}$ é o valor da corrente do modelo de regressão não paramétrico

b) **Determinar o impacto do *background*:** Após o cálculo de vetor de tensão harmônica de *background*, calcula-se os impactos do vetor de *background* através da Equação 3.33, caso a tensão e a corrente harmônicas apresentem uma relação diretamente proporcional na amostra em análise; ou através da Equação 3.34, caso a tensão e corrente harmônicas apresentem uma relação inversamente proporcional na amostra em análise.

$$IP_{background-i} = \left(\frac{V_{back-i}}{\hat{V}_i} \right) \times 100\% \quad (3.33)$$

$$IP_{background-i} = \left(\frac{\hat{V}_i}{V_{back-i}} \right) \times 100\% \quad (3.34)$$

c) **Determinar o impacto da fonte harmônica:** O impacto harmônico gerado pela unidade consumidora em análise pode ser calculado pela Equação 3.35, caso a tensão e a corrente harmônicas apresentem uma relação diretamente proporcional, ou através da Equação 3.36, caso a tensão e corrente harmônicas apresentem uma relação inversamente

proporcional.

$$IP_{fonte-i} = \left(\frac{V_{fonte-i}}{\hat{V}_i} \right) \times 100\% \quad (3.35)$$

$$IP_{fonte-i} = \left(\frac{\hat{V}_i}{V_{fonte-i}} \right) \times 100\% \quad (3.36)$$

Onde:

$V_{fonte-i}$ é tensão harmônica provocada pela unidade consumidora para cada amostra de dados;

V_{back-i} é a tensão harmônica provocada pelas outras fontes harmônicas presentes na rede elétrica para cada amostra de dados;

\hat{V}_i é a tensão harmônica total estimada pelo modelo de regressão linear para cada amostra de dados.

3.4.3. Relatório

O relatório é a impressão dos resultados finais, para realização da análise e identificação da fonte de geração de harmônicos e seus impactos na tensão, obtidos através do modelo de regressão escolhido. O detalhamento deste relatório será apresentado no capítulo 5, “Análise dos Resultados”.

3.5. Considerações finais

No presente capítulo, apresentou-se a metodologia desenvolvida para determinar o impacto harmônico de um conjunto de unidades consumidoras num ponto específico de uma rede de distribuição de energia elétrica, assim como os métodos estatísticos, utilizados para a criação dos modelos de regressão linear e não paramétrica, a partir da aplicação do método de regressão polinomial de Kernel nas medidas da tensão e corrente harmônicas, de tal forma que seja possível caracterizar detalhadamente a correlação entre a tensão e a corrente harmônicas no ponto de interesse do sistema.

Foi apresentado alguns importantes conceitos fundamentais da regressão polinomial local de Kernel, que é um tipo de regressão não paramétrica. Cada ponto do modelo de regressão é estimado pelo ajuste de um polinômio de grau p à uma pequena amostra de dados (definida por um parâmetro denominado de *bandwidth*), por meio do método dos mínimos quadrados ponderados, onde os pesos são selecionados de acordo com o tamanho da função de Kernel centrada sobre cada ponto.

O próximo capítulo apresenta as características técnicas do sistema elétrico do Campus Universitário do Guamá da UFPA, que será utilizado como sistema teste para avaliar a metodologia demonstrada. Como também, é apresentado o Sistema de Gestão de Energia Elétrica (SISGEE), um Sistema de Informação Gerencial (SIG) *online*, que possibilita a análise das características operacionais da rede elétrica de distribuição da UFPA em tempo real.

CAPÍTULO 4 – O SISTEMA ELÉTRICO DO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ DA UFPA

4.1. Considerações iniciais

A Universidade Federal do Pará passou a ter um olhar diferenciado para o gerenciamento de consumo de energia a partir do ano 2000, devido, principalmente, à aceleração da sua expansão no interior do estado e à modernização dos seus laboratórios de pesquisa. Tal fato representou um aumento significativo do custo, principalmente, com relação às tarifas públicas: água, energia elétrica, telefonia e transmissão de dados.

Com os problemas atuais de falta de oferta de energia elétrica, alto valor da tarifa e os cortes nas verbas de manutenção das universidades públicas, torna-se necessária uma gestão mais eficiente do conhecimento das instalações elétricas da Universidade Federal do Pará, com o principal objetivo de diagnosticar e propor soluções para mitigar as possíveis perdas. Assim, detectou-se a necessidade de um sistema de monitoramento informatizado, para medição e gerenciamento das grandezas elétricas e financeiras.

Atualmente estão sendo desenvolvidos estudos voltados para o tratamento da energia elétrica, considerando-a não como um problema isolado, mas sim, integrado, envolvendo não só os aspectos específicos das instalações e equipamentos consumidores, mas também a implantação de um sistema de gestão energética, através da instalação de uma rede de aquisição, transmissão e processamento de dados, com o objetivo de supervisionar e analisar a qualidade de energia elétrica.

Tal sistema será capaz de monitorar, em tempo real, o consumo de energia elétrica das instalações consumidoras, gerando relatórios e demais subsídios para a gestão estratégica e efetiva do sistema de energia, com indicadores que refletem o grau de eficiência, economia e qualidade do sistema, além de garantir uma maior segurança, evitando a ocorrência de incidentes e sinistros nas instalações consumidoras.

4.2. A Unidade Consumidora 19 (UC-19)

A Universidade Federal do Pará (UFPA) possui, atualmente, 40 unidades consumidoras (UC) de energia elétrica, distribuídas no município de Belém e demais *Campi*, localizados no interior do Estado do Pará. O *Campus* Prof. José de Silveira Neto, conhecido como “*Campus* Universitário do Guamá”, localizado na cidade de Belém/PA, às margens do rio Guamá, é identificado pela concessionária de distribuição de energia elétrica local como

Unidade Consumidora (UC) 19.

Considerada como a principal UC de energia elétrica da Universidade Federal do Pará, a UC-19 engloba 84 (oitenta e quatro) unidades acadêmicas e/ou administrativas ao longo do *Campus* Universitário do Guamá e tem o seu fornecimento de energia elétrica em 13.8 kV, através do alimentador Guamá GM-06, proveniente da Subestação Guamá da concessionária de energia local. Todos os seus prédios são atendidos pelos circuitos oriundos da cabine de medição geral, localizada no *Campus* Básico, onde é instalada a proteção primária geral.

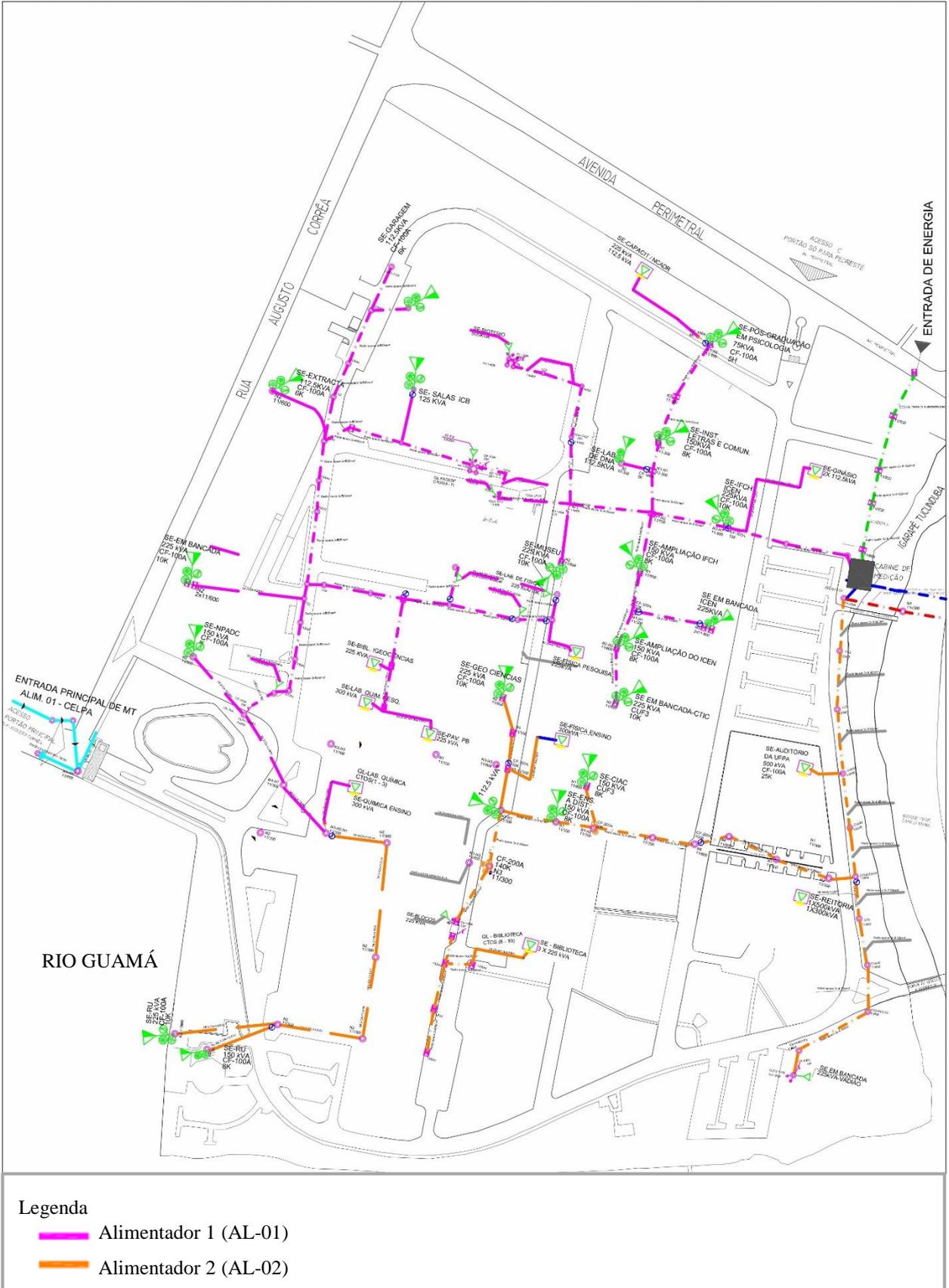
A partir desse ponto de entrega de energia e medição, o atendimento interno é feito em rede de distribuição primária através de quatro alimentadores, sendo dois para o setor básico, um para o setor profissional e um para o setor de saúde. O sistema elétrico é constituído de uma rede predominante aérea protegida compacta (rede compacta – *Spacer Cable*) e caracteriza-se por uma concepção radial de alimentadores. A Figura 08 apresenta o diagrama unifilar do sistema de distribuição interno do *Campus* Universitário do Guamá.

Os modelos de regressão, desenvolvidos no Capítulo 3, serão testados na rede elétrica de distribuição do *Campus* Universitário do Guamá, com o objetivo de identificação de fontes harmônicas e seus impactos no Ponto de Acoplamento Comum entre a concessionária de energia elétrica e o consumidor.

Com base no Projeto de Modernização da Rede Elétrica da UFPA, elaborado pela Prefeitura do *Campus* Universitário (PCU), a rede de distribuição aérea protegida compacta é uma solução tecnológica que possibilita melhorar o nível de qualidade da energia distribuída e a confiabilidade do sistema. A rede compacta é um conjunto formado por cabo de aço e cabos cobertos, fixados em estruturas compostas por braços metálicos, espaçadores losangulares ou separadores de fase confeccionados em material polimérico. Todo o conjunto é sustentado pelo cabo de aço aluminizado que, além da função de sustentar o conjunto, compartilha também como neutro do sistema de distribuição, denominado, nesta padronização, de cabo mensageiro/neutro.

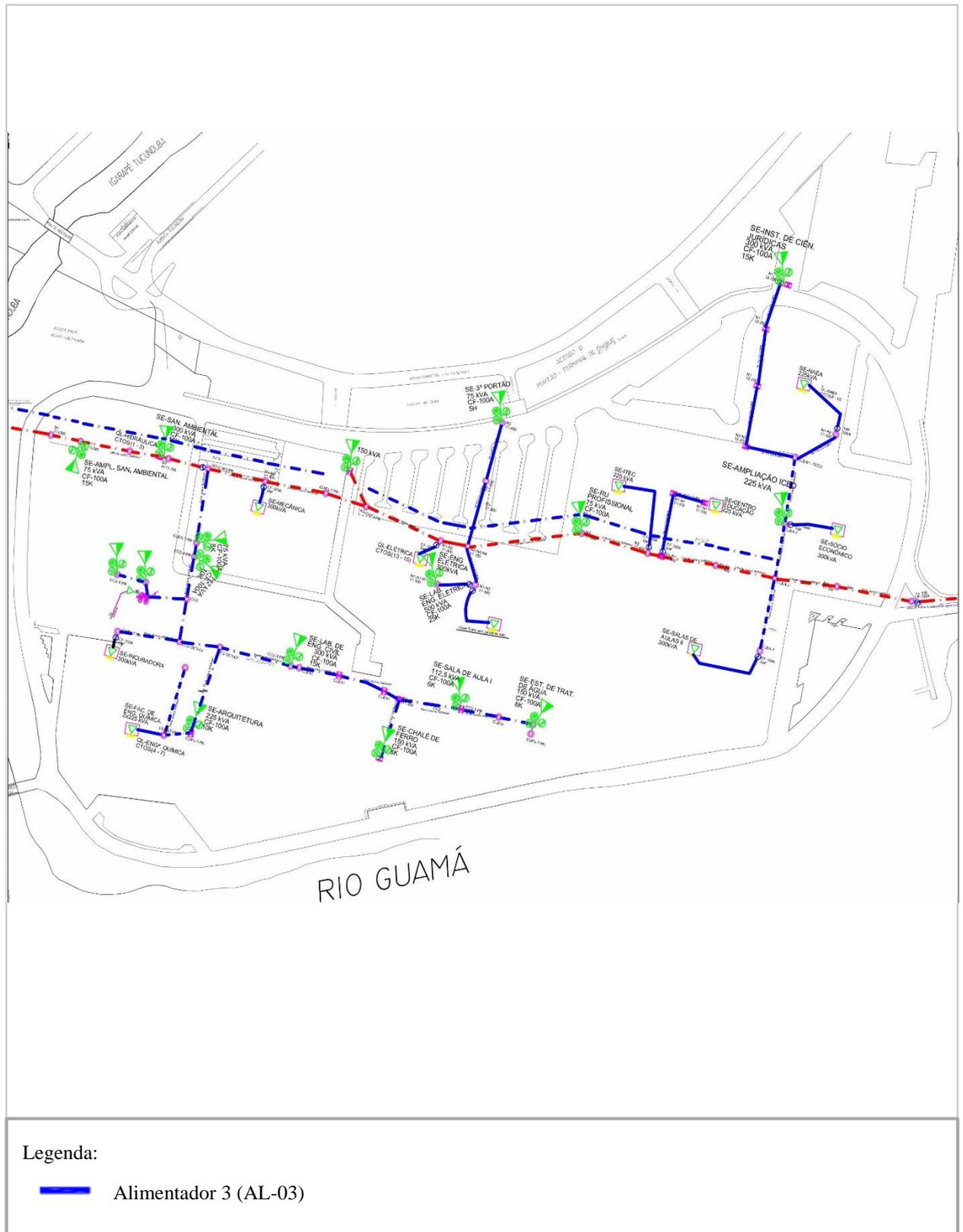
As subestações são predominantemente aéreas, possuindo ainda algumas subestações abrigadas, as quais são alimentadas por ramais subterrâneos a partir da rede aérea. Nas Figuras 09, 10 e 11 mostra-se o detalhamento da rede interna, com as respectivas subestações e seus alimentadores.

Figura 09 – Rede Alta Tensão – Básico 1 e 2



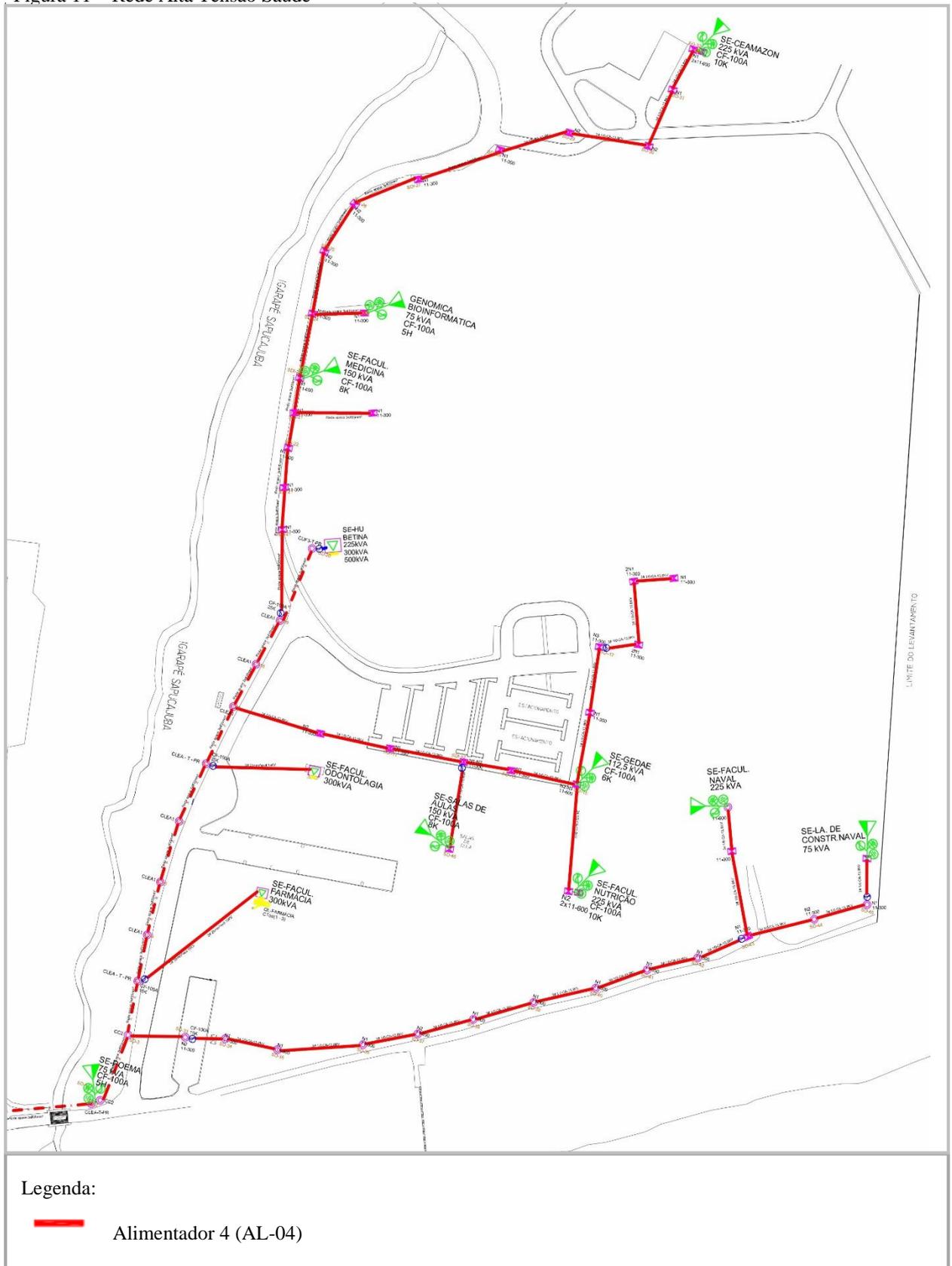
Fonte: Prefeitura do Campus Universitário do Guamá (2015)

Figura 10 – Rede Alta Tensão Profissional



Fonte: Prefeitura do Campus Universitário do Guamá (2015)

Figura 11 – Rede Alta Tensão Saúde



4.3. Os Alimentadores AL-01, AL-02, AL-03 e AL-04

Com o objetivo de atender à necessidade de distribuição de energia elétrica, foram instalados quatro alimentadores (AL) para energizar todo o *Campus* Universitário do Guamá, identificados como AL-01, AL-02, AL-03 e AL-04, distribuídos entre os *Campi* Básico, Profissional e Saúde.

A cabine de medição geral destes alimentadores possui um sistema de seccionamento e proteção para o alimentador, constituído de uma chave seccionadora sob a carga instalada a montante de um disjuntor a vácuo, acionado, remotamente, a partir de uma sala destinada ao sistema de proteção, o qual é constituído por um rele digital multifunção. Na Tabela 06, demonstra-se as especificidades de cada um dos alimentadores.

Tabela 06- Os Alimentadores da Universidade Federal do Pará

ALIMENTADOR	COMPRIMENTO	LOCALIZAÇÃO	Nº DE UNIDADES ATENDIDAS	POTENCIA (KVA)
AL – 01	1.682,56 m	CAMPUS BÁSICO 1	30	5.587,50
AL – 02	1269,19 m	CAMPUS BÁSICO 2 (Reitoria)	13	3.775
AL – 03	2.055 m	CAMPUS PROFISSIONAL	26	5.950
AL – 04	2.959,53 m	CAMPUS SAÚDE	15	3.012,50

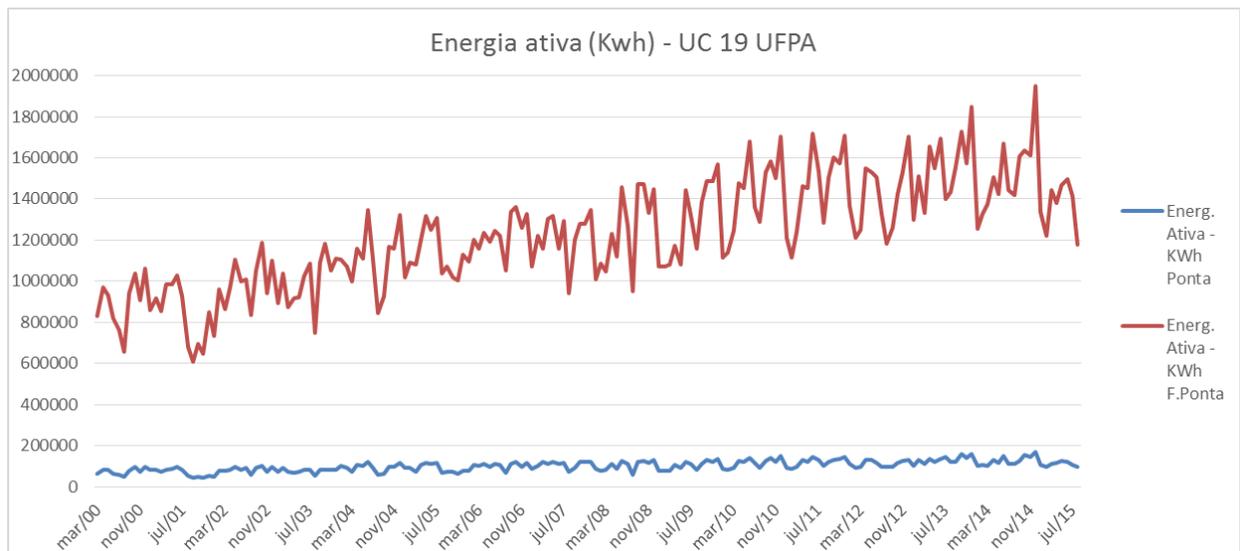
Fonte: Prefeitura do Campus (2015)

A UFPA, desde o ano de 2000, realiza o monitoramento e análise das contas de fornecimento de energia elétrica da Unidade Consumidora 19 (UC-19). Tais procedimentos possibilitaram o conhecimento do histórico de demanda e consumo da instituição; o levantamento das características do sistema elétrico da UFPA; e permitiu, ainda, a atualização dos contratos de fornecimento de energia elétrica com a concessionária local.

Anteriormente, o contrato de fornecimento de energia elétrica da UC – 19, era definido pelos seguintes valores de demanda: Tarifa Horó-Sazonal: Tarifa Azul – Demanda na Ponta: 2.300 kW e Fora de Ponta: 3.200 kW. Após análise das contas de fornecimento de energia elétrica da UC-19, realizada em 2000, a UFPA solicitou a alteração do contrato de fornecimento junto a rede para os seguintes valores de demanda: Tarifa Horó-Sazonal: Tarifa Azul – Demanda na Ponta: 2.300 kW e Fora de Ponta: 3.750 kW. Tal alteração representou sensível redução no valor do contrato de fornecimento de energia elétrica.

O contrato atual de fornecimento de energia da UC-19 estabelece a opção da instituição pela Tarifa Horó-Sazonal: Tarifa Verde – Demanda: 5900 kW. Sobre este valor contratado é admitido uma tolerância de +5% para aplicação da tarifa normal. A Figura 12 expressa a evolução da demanda de energia da UC-19, referente ao período de 2000 a 2015.

Figura 12 – Demanda de energia – UC-19 no período de 2000 a 2015.



Fonte: Centrais Elétricas do Pará, adaptada pelo autor (2015).

Neste contexto, com base na demanda histórica da concessionária, pode-se constatar que a evolução da demanda contratada da UC-19 foi 63% e de consumo de 200%, ao longo desse período.

Com o intuito de monitorar tal situação, a Universidade Federal do Pará (UFPA) criou uma Comissão responsável pela elaboração de um plano, com o objetivo de propor estratégias para o uso racional e, assim, reduzir o desperdício. Com base nessa premissa, a UFPA assinou, inicialmente, um contrato com a concessionária local de energia elétrica, no intuito de melhorar a eficiência das instalações do prédio do Centro de Ciências Biológicas (CCB), hoje, Instituto de Ciências Biológicas (ICB) e, posteriormente, do prédio do Centro Tecnológico (CT), atual Instituto de Tecnologia (ITEC).

De acordo com Miranda (2015), a implantação de um Sistema de Informação Gerencial (SIG) possibilita o processamento de informações de modo eficiente e de qualidade, o qual possa ser controlado e acessado em tempo real, para auxiliar a tomada de decisões de toda a organização; além de permitir um nível elevado de padronização e integração dos processos e possibilitar a atualização tecnológica da informação.

Portanto, decidiu-se implantar um SIG que realize o monitoramento da UC-19 da UFPA, possibilitando uma análise dos indicadores de qualidade de energia, conforme o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia (PRODIST), elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Tal Sistema foi denominado de “Sistema de Gestão de Energia Elétrica” (SISGEE).

4.4. O Sistema de Gestão de Energia Elétrica – SISGEE

O Sistema de Gestão de Energia Elétrica (SISGEE) é um Sistema de Informação Gerencial (SIG) *online* que possibilita à análise das características operacionais da rede elétrica de distribuição da UFPA, em tempo real, como também, a realização de simulações e supervisão.

O Governo Federal, através da Portaria nº 23/2015, do Ministério do Planejamento, determinou medidas para monitoramento do uso da energia elétrica e água, além da adoção de práticas e providências que contribuam para redução de consumo. Além disto, determinou o cadastro, mensalmente, dos dados referentes ao consumo de energia elétrica e água através do Sistema do Projeto Esplanada Sustentável (SIPAES). Na UFPA, a Prefeitura do Campus é responsável pelo cadastro de tais dados.

Portanto, a implantação do SISGEE, juntamente com a utilização do SIPAES, permite aprimorar o gerenciamento e monitoramento de tais valores, possibilitado que a UFPA obtenha dados completos e determine formas efetivas de gerenciamento do consumo da energia elétrica.

4.5. Descrição do SISGEE

O SISGEE é composto por instrumentos medidores de energia elétrica, os quais são instalados nos principais pontos de consumo, de forma que possam caracterizar eficientemente os hábitos de consumo dessas instalações e uma medição geral, que registre o consumo, demanda, fator de potência e grandezas elétricas relacionadas a qualidade de energia do Campus Universitário do Guamá.

Os instrumentos medidores de energia elétrica deverão ter recurso de comunicação, de modo que os dados adquiridos sejam transmitidos, em tempo real, para uma central de processamento e o meio de comunicação será preferencialmente via fibra óptica, aproveitando o enlace ótico existente na UFPA. Posteriormente, esse sistema será ampliado para monitorar e gerenciar todas as unidades consumidoras desta universidade, via *Internet*.

O SISGEE é dividido em três módulos principais:

- *Medição de Energia Elétrica* - instalado no terminal do usuário do medidor da concessionária, através da tomada de isolamento ótica. Este módulo é constituído de um gerenciador de energia conectado, via rede interna de fibra óptica da instituição, a um servidor exclusivo do Centro de Tecnologia e Informação (CTIC) da UFPA, onde os dados são armazenados. Possuindo memória de massa de 35 dias, esse sistema de gestão é capaz de monitorar, em tempo real, a demanda, consumo, fator de potência e fator de carga.

- *Qualidade de Energia Elétrica* – equipamento de medição instalado no barramento de entrada da concessionária. Este equipamento possui uma memória ativa por eventos, capazes de monitorar as seguintes grandezas elétricas:

- a) Afundamentos de tensão (SAG) e sobretensões (SWELL);
- b) Variações rápidas de tensão (TRANSITÓRIOS);
- c) Variações de frequência;
- d) Espectro das harmônicas até a 49ª ordem;
- e) Ocorrências de variações de tensão entre NEUTRO-TERRA;
- f) Medição de energia elétrica;
- g) Fator de potência;
- h) Qualidade de energia

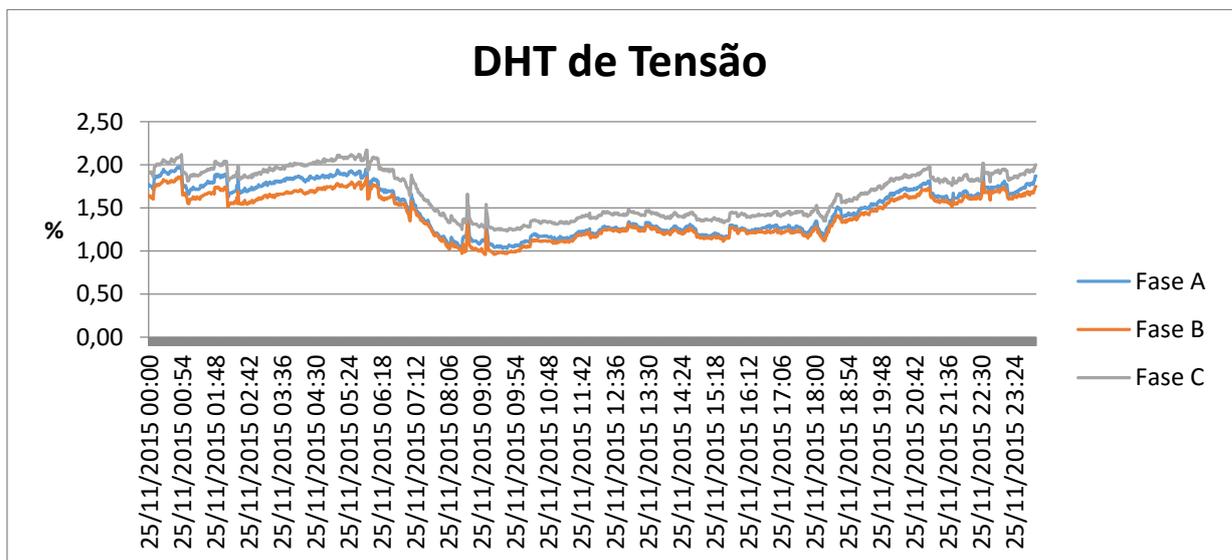
- *Medidores de Consumo de Energia* - esses equipamentos serão instalados nos principais pontos de consumo e demanda de energia elétrica; e as medidas adquiridas serão transmitidas a central de processamento de dados. Essa central contará com infraestrutura de *hardware* e *software* para o armazenamento e análise dessas informações. Esse módulo encontra-se em fase de instalação.

Com base nas medidas obtidas por esse sistema de gestão, foi possível identificar a característica elétrica das diversas cargas instaladas, principalmente em relação à produção de correntes harmônicas. Dentre essas cargas comumente encontradas e que geram distorções

harmônicas, destacam-se as cargas do hospital universitário, laboratórios, salas de aulas, centro de computação e auditórios.

Uma grande parte das cargas existentes na instalação elétrica do campus universitário tem características não lineares e geram componentes de distorções harmônicas. A Figura 13 mostra o registro de Distorção Harmônica Total Tensão (DTHv) no PAC para as fases A, B e C. De acordo com a norma IEEE Std. 519, 1992 o limite de 5% de distorção harmônica não foi violado, para tensão de alimentação de 13.8kV.

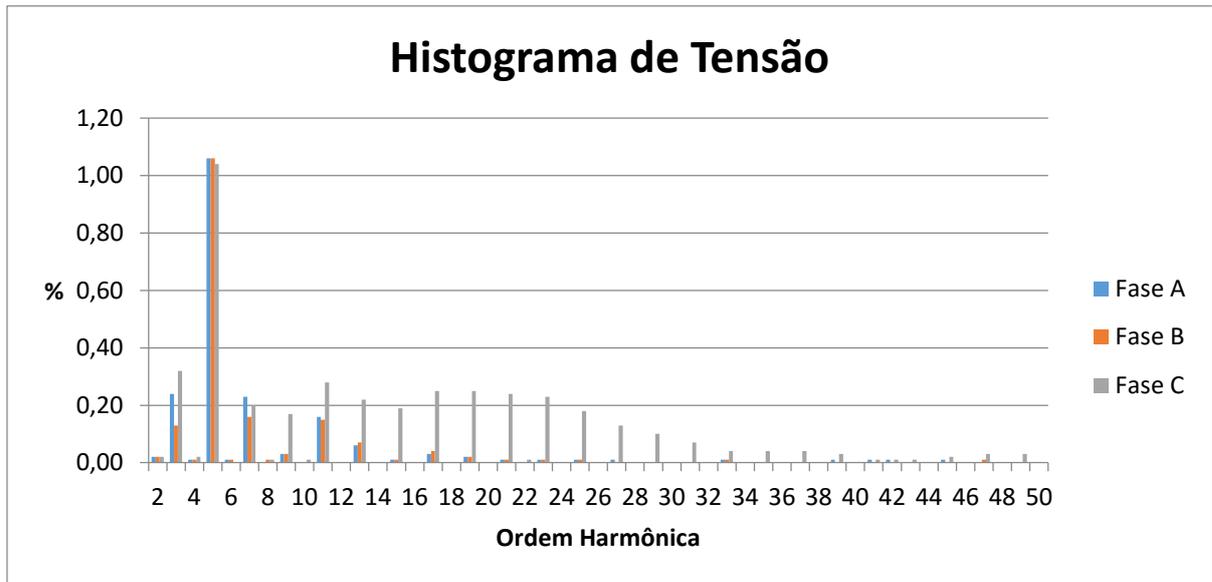
Figura 13 – DHT de tensão para as fases A, B e C no PAC



Fonte: SISGEE (2015)

A Figura 14 mostra o espectro das componentes harmônicas no Ponto de Acoplamento Comum do sistema elétrico.

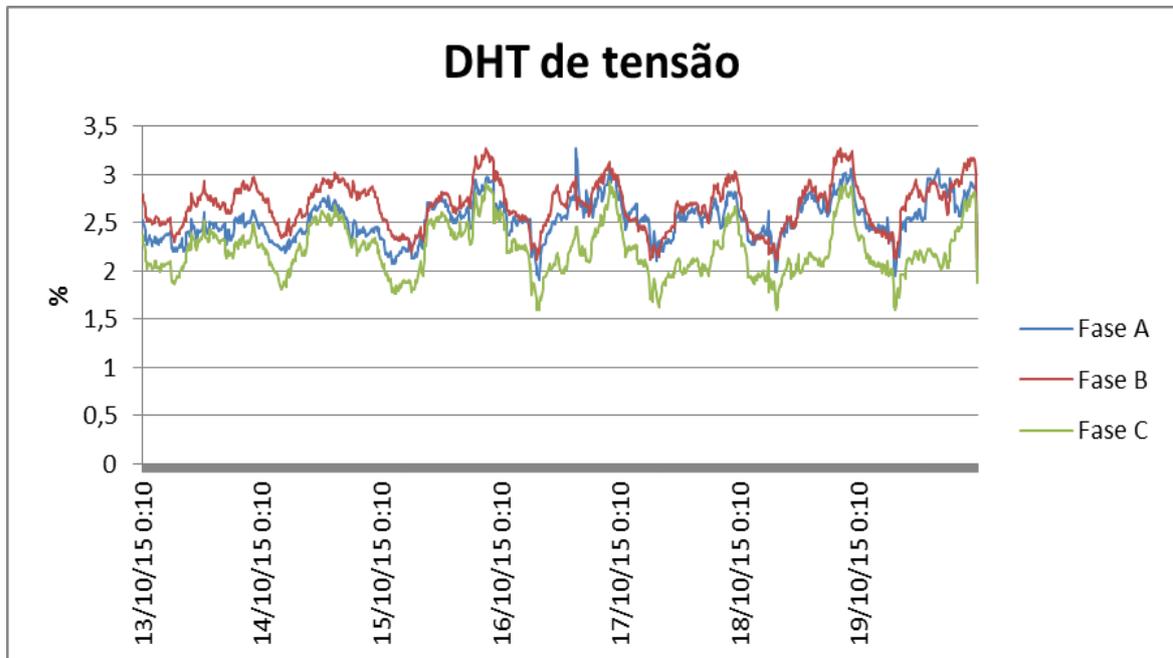
Figura 14 – Histograma de tensão no PAC do Sistema Elétrico



Fonte: SISGEE (2015)

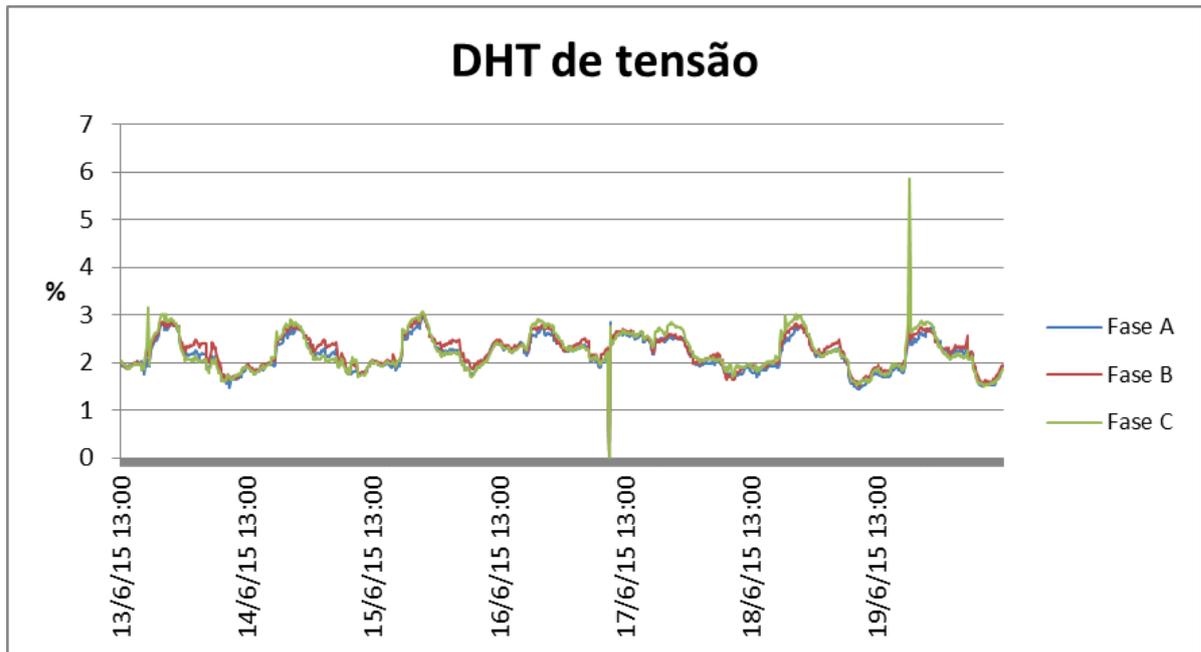
Com base nas medições realizadas pelo SISGEE, as Figuras 15, 16, 17 e 18 apresentam os níveis de DHT de tensão em diversos pontos de interesse, nas quais podem ser verificadas as características de não linearidade das cargas.

Figura 15 – DHT de tensão para as fases A, B e C – Básico 1 - CTIC



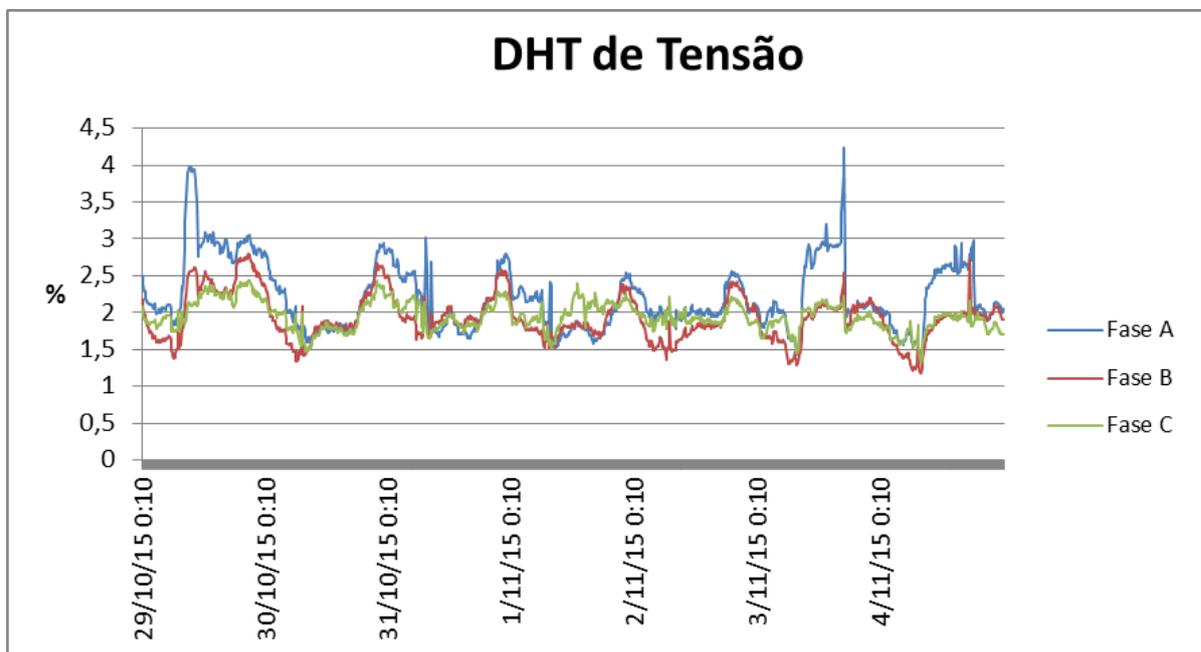
Fonte: SISGEE (2015)

Figura 16– DHT de tensão para as fases A, B e C – Básico 2 – Benedito Nunes



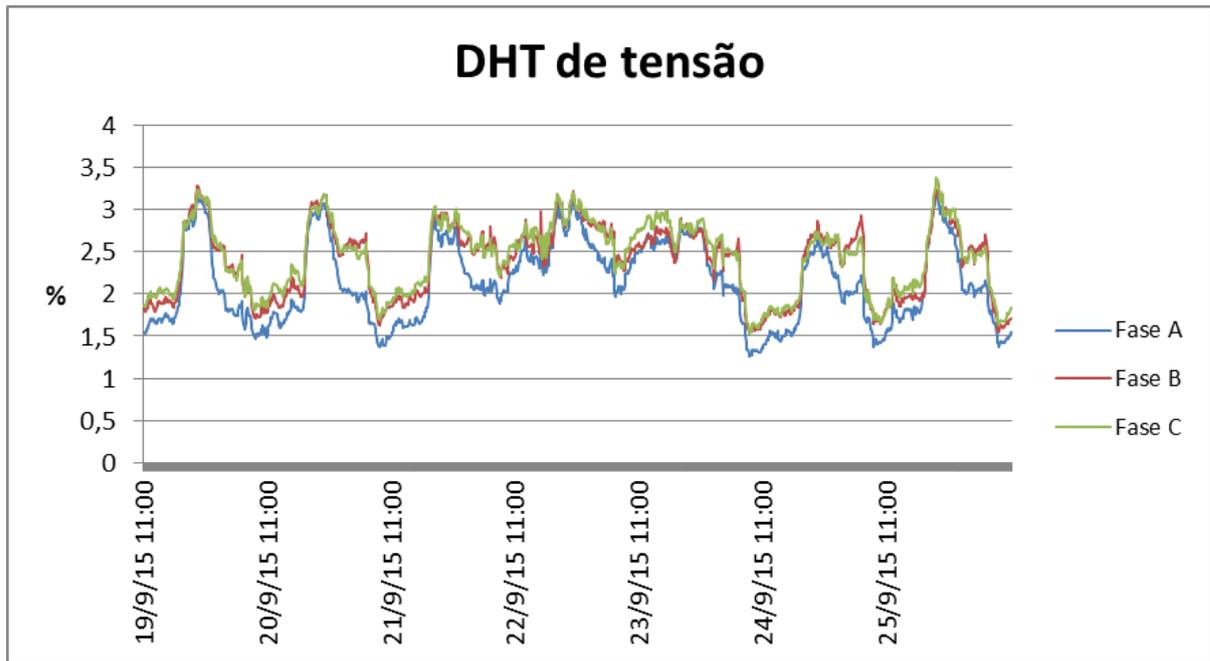
Fonte: SISGEE (2015)

Figura 17 – DHT de tensão para as fases A, B e C – Profissional – Salas de aula GM



Fonte: SISGEE (2015)

Figura 18 – DHT de tensão para as fases A, B e C – Saúde – Hospital Bettina de Sousa Ferro



Fonte: SISGEE (2015)

Portanto, seria extremamente difícil, com as metodologias existentes, identificar quais dessas cargas tem maior impacto nos níveis de distorções harmônicas no Ponto de Acoplamento Comum, principalmente levando em consideração a característica da rede e o quantitativo das cargas instaladas.

4.6. Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado o sistema elétrico do Campus Universitário do Guamá da UFPA, que servirá de sistema teste para a validação da proposta de tese. Inicialmente, foram apresentadas as características técnicas dos alimentadores internos da instituição, diagrama unifilar e as plantas gerais das cargas. Além disso, foi apresentado o sistema de gestão de energia elétrica da UFPA (SISGEE), em fase de conclusão.

Dessa forma, o capítulo seguinte utilizará os dados do SISGEE e o sistema elétrico do Campus para a realização das simulações propostas e análise dos resultados obtidos.

CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. Considerações iniciais

O Campus Universitário do Guamá tem o seu fornecimento de energia elétrica em 13.8 kV, através do alimentador Guamá GM-06, proveniente da Subestação Guamá da concessionária de energia local e todos os seus prédios são atendidos pelos circuitos oriundos da cabine de medição geral localizada no Campus Básico.

A partir desse ponto de entrega de energia e medição, o atendimento interno é feito em rede de distribuição primária através de quatro alimentadores, sendo dois para o setor básico, um para o setor profissional e um para o setor de saúde.

Nesse capítulo, são apresentados os resultados de um estudo de caso no sistema elétrico da Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Universitário do Guamá, no qual aplicou-se a metodologia descrita no Capítulo 3 para determinar quais cargas da UFPA influenciavam mais nos níveis de distorção harmônica da tensão no ponto de entrada da mesma. Para tal, realizaram-se duas campanhas de medição:

- a) A primeira campanha, denominada de “caso 1”, foi realizada no período de 13 a 24 de agosto de 2015, onde são apresentados os impactos harmônicos das cargas dos alimentadores dos setores: Básico 1 (AL-01), Básico 2 (AL-02), Profissional (AL-03) e Saúde (AL-04). Destaca-se que a UFPA, neste caso, encontrava-se em período de greve;
- b) A segunda campanha, nomeada “caso 2”, onde apresentam-se os impactos harmônicos das cargas dos alimentadores supracitados; AL-01, AL-02, AL-03 e AL-04, na tensão de entrada da UFPA, durante o período de 24 (vinte e quatro) de novembro a 01 de dezembro de 2015. É importante ressaltar que neste período a universidade estava funcionando a plena carga.

As medições utilizadas para a simulação dos modelos de regressão linear e não paramétricas foram obtidas através da instalação de 5 equipamentos da marca HIOKI, modelo PW3198, com as seguintes especificações:

- Analisador de Qualidade de Energia, da marca *Hioki* PW3198, trifásico, aderente aos padrões IEC 61000-4-30; 61000-4-7; 61000-4-15, Classe A (exatidão de 0,1%), para instalação em BT até 600 V. Mede tensões, correntes, potências ativa e reativa, energias ativa e reativa, fator de potência, harmônicos individuais de tensão e corrente

até a 50ª. ordem, distorções harmônicas totais de corrente e tensão; 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*. Na Figura 19, a seguir, apresenta-se uma ilustração deste equipamento.

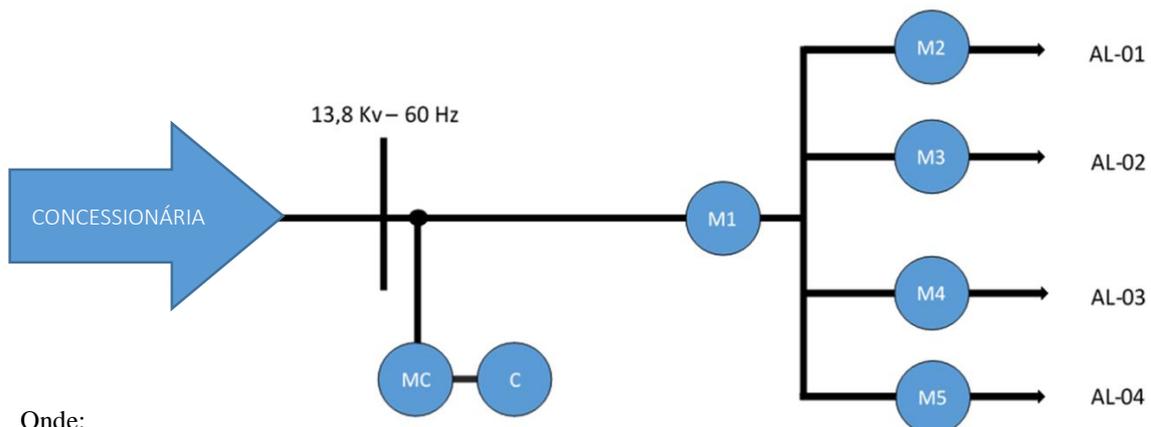
Figura 19- Imagem ilustrativa do Analisador de QEEE HIOKI PW3198



Fonte: HIOKI (2015)

O estudo foi realizado com base na configuração do sistema, demonstrado na Figura 20. Toda a análise da metodologia foi realizada somente para os harmônicos de 3ª e 5ª, por serem consideradas as componentes harmônicas de maior importância nesse sistema elétrico.

Figura 20 – configuração do sistema elétrico da UFPA



Onde:
M – Medidor da Concessionária
M1 – Medidor instalado na entrada de tensão
C – Medidor da UFPA
M2 a M5 – Medidores instalados nos alimentadores

Fonte: Elaborado pelo autor (2015)

5.2. Caso 1 – impacto harmônico das cargas dos diversos alimentadores durante a primeira campanha

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.

Aplicou-se essa metodologia somente para quantificar o impacto da corrente de 5º harmônico dos alimentadores internos (AL-01, AL-02, AL-03 e AL-04) no barramento de entrega de energia do Campus Universitário do Guamá da UFPA. É evidente que essa seleção decorre dos indicadores de distorções harmônicas de maior relevância. Outra razão é que esta seleção simplifica a análise em questão.

Durante essa campanha de medição, registrou-se os níveis de tensão e corrente harmônicas dos pontos onde foram instalados os analisadores de qualidade da energia (barramento de entrega de energia, alimentador do campus básico 01, alimentador do campus básico 02, alimentador do campus profissional, alimentador do campus da saúde).

No Gráfico 2 mostra-se a tensão do 5º harmônico registrada na fase A do barramento de entrega de energia da UFPA, enquanto que nos Gráficos 03, 04, 05 e 06 mostram-se as correntes do 5º harmônico registradas nos alimentadores dos Campuses: básico 1, básico 2, profissional e saúde, respectivamente.

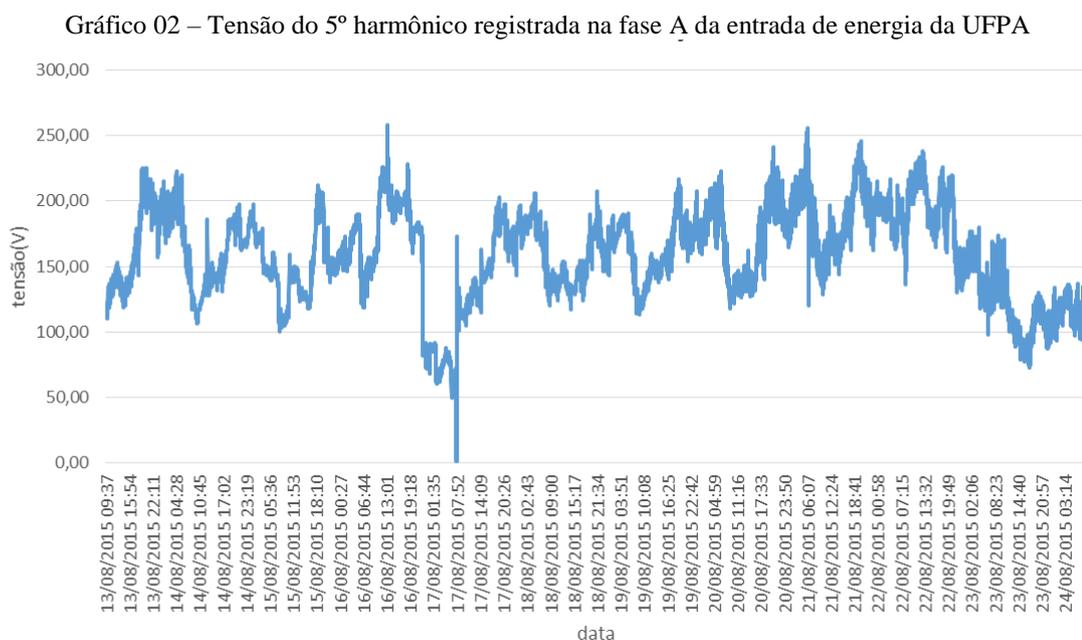
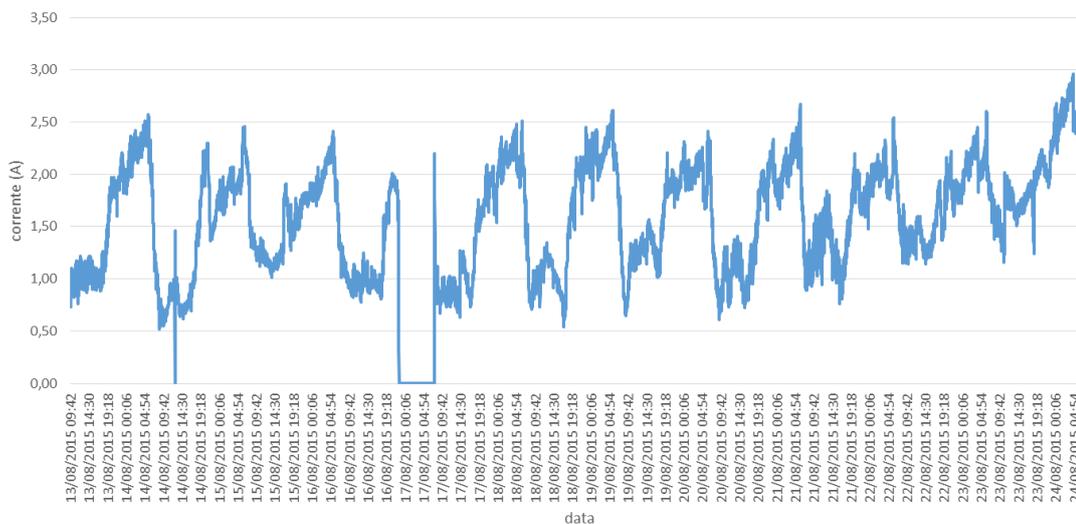
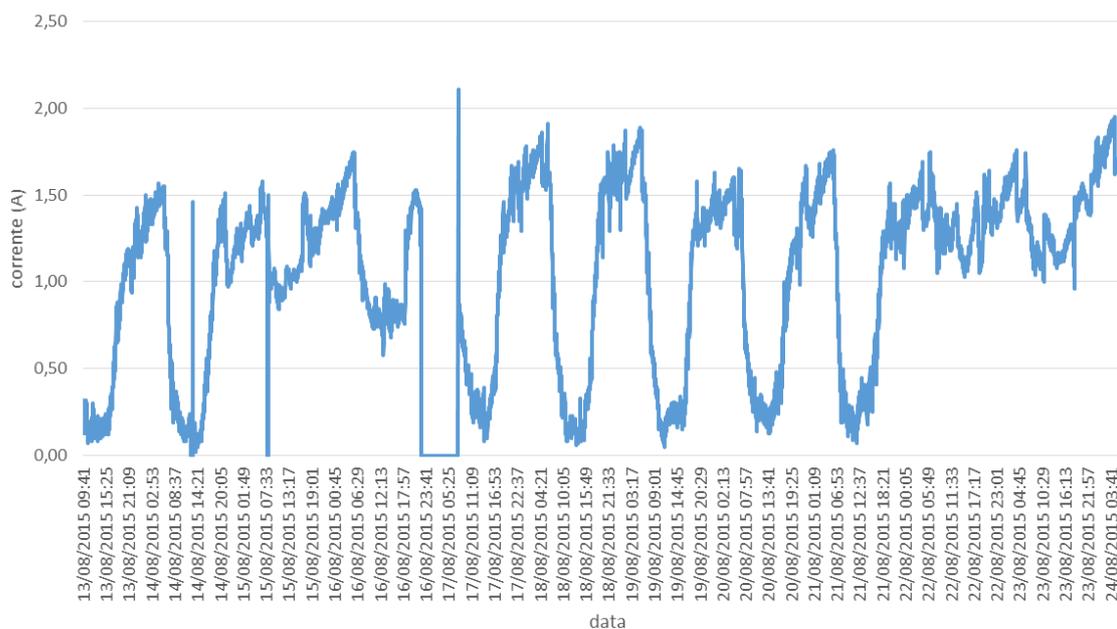


Gráfico 03 – Corrente do 5º harmônico registrada na fase A do alimentador do Campus básico 1



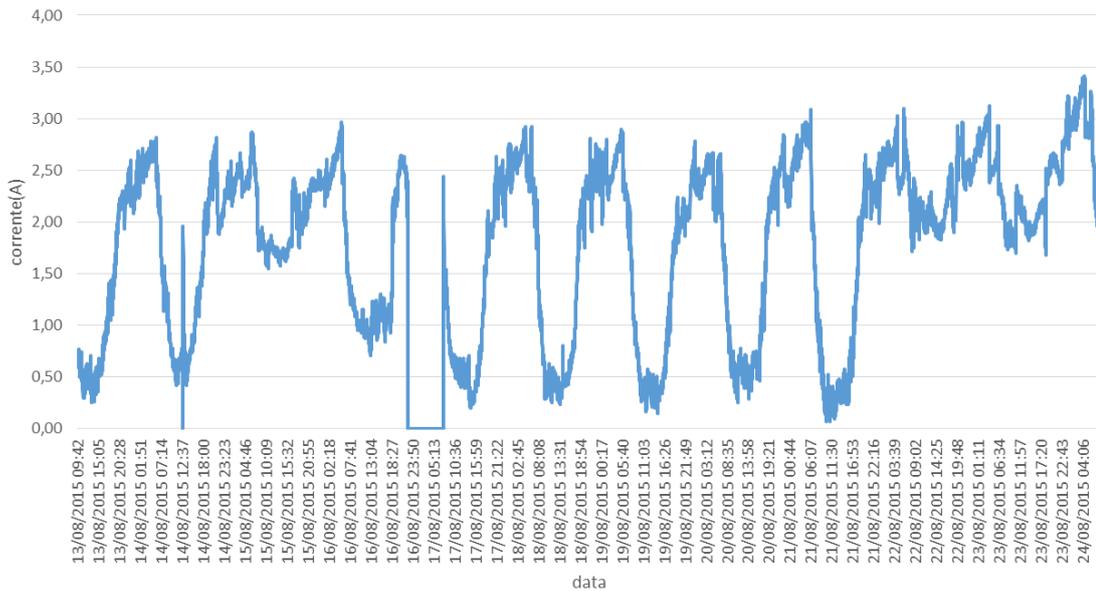
Fonte: SISGEE (2015)

Gráfico 04 – Corrente do 5º harmônico registrada na fase A do alimentador do Campus básico 2



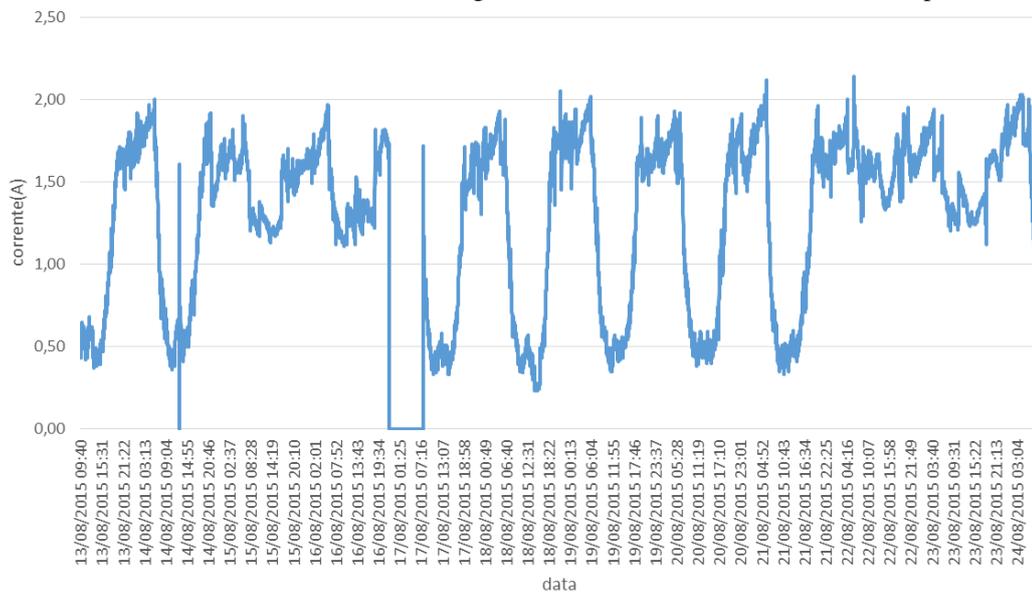
Fonte: SISGEE (2015)

Gráfico 05 – Corrente do 5º harmônico registrada na fase A do alimentador do Campus profissional



Fonte: SISGEE (2015)

Gráfico 06 – Corrente do 5º harmônico registrada na fase A do alimentador do Campus saúde



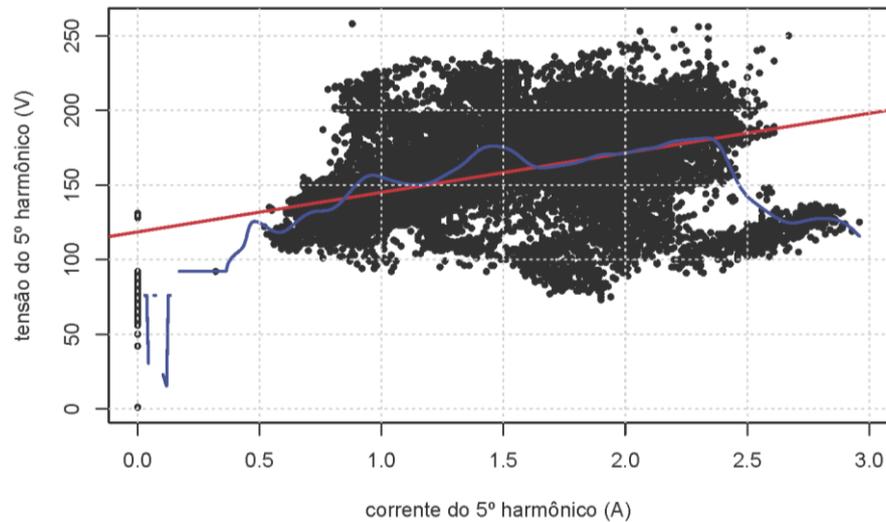
Fonte: SISGEE (2015)

5.2.1. Avaliação do impacto harmônico considerando todo o período de medição

Em um primeiro momento, criaram-se modelos de regressão linear e não paramétricos, tendo como base o período completo de medição, de tal forma a caracterizar a correlação existente entre as correntes harmônica de 5ª ordem dos alimentadores do básico 1, básico 2, profissional e da saúde, e a tensão harmônica de mesma ordem do barramento de entrada de energia. Nas Figuras 21, 22, 23 e 24 mostra-se os modelos de regressão linear (vermelho) e

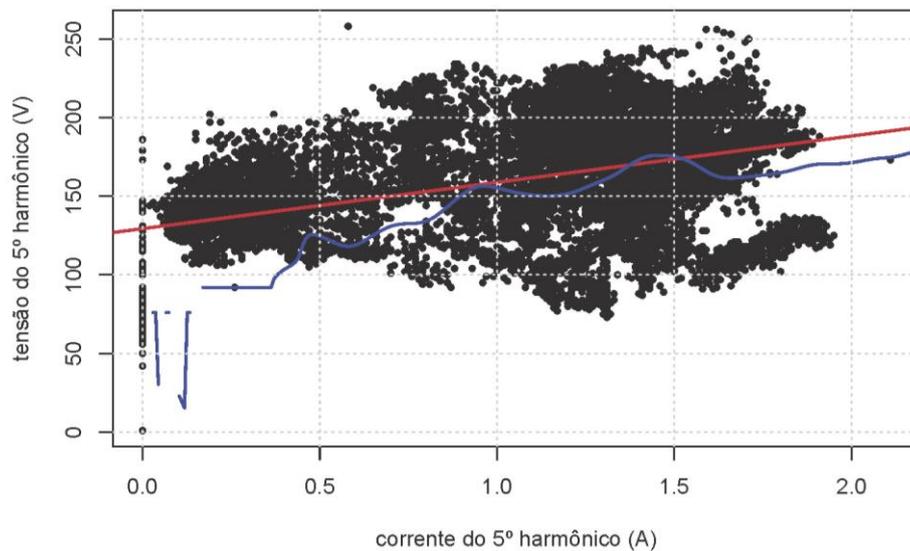
não paramétrico (azul) do alimentador do básico 1, básico 2, profissional e saúde, respectivamente.

Figura 21 – Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus básico 1 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrada de energia na fase A considerando o período completo de medição



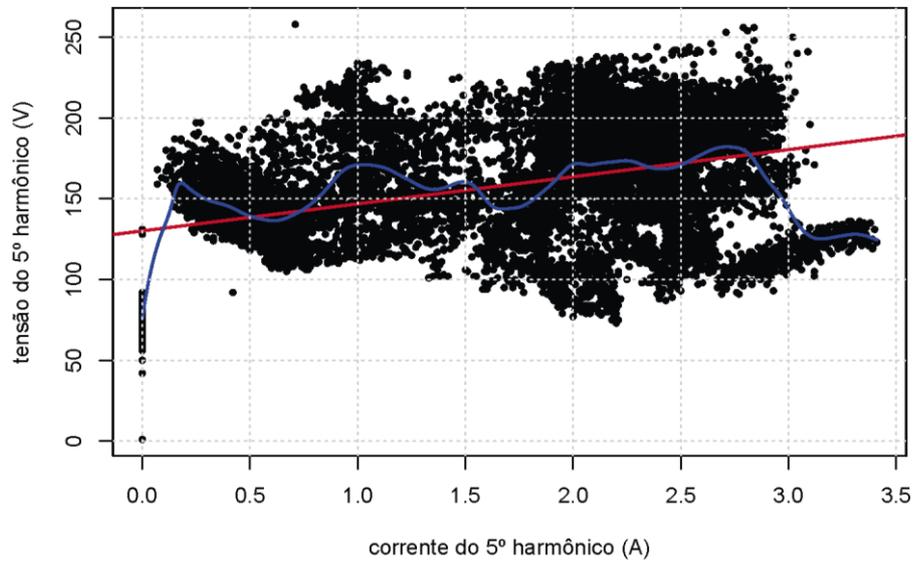
Fonte: SISGEE (2015)

Figura 22 – Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus básico 2 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A considerando o período completo de medição



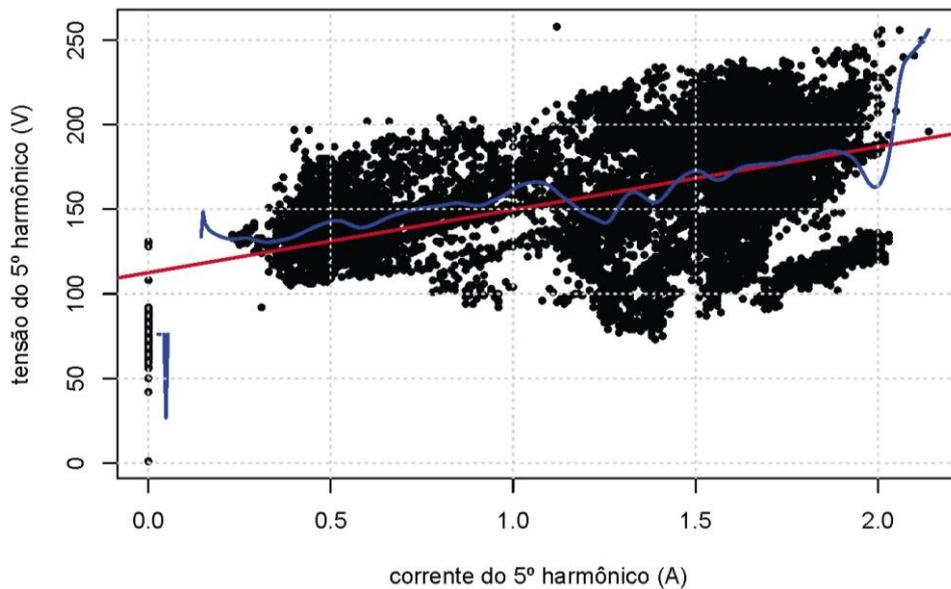
Fonte: SISGEE (2015)

Figura 23 – Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus profissional e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A considerando o período completo de medição



Fonte: SISGEE (2015)

Figura 24 – Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus da saúde e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A considerando o período completo de medição



Fonte: SISGEE (2015)

No caso dos modelos de regressão linear simples, os fatores de determinação (R^2) apresentaram os seguintes valores 0,18; 0,20; 0,17; e 0,32, para os modelos mostrados nas Figuras 21, 22,23 e 24, respectivamente; ou seja, todos apresentaram um R^2 moderado.

Além disso, é importante ressaltar que a técnica de regressão não paramétrica forneceu um modelo com coeficiente de determinação maior em relação ao modelo proveniente da regressão linear simples e, portanto, caracterizando com maior exatidão a correlação existente entre a corrente harmônica de 5ª ordem do alimentador do profissional com a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia.

A partir dos modelos apresentados anteriormente, foi possível calcular os fatores de impactos harmônicos médios dos alimentadores do campus básico 1, básico 2, profissional e saúde, cujos valores são: 22,6%, 2,96%, 16,28% e 28%, respectivamente.

É possível observar que, no período de 13 a 24 de agosto de 2015, ocorreram eventos de interrupção de energia ou quedas consideráveis do nível de tensão que reduziram o valor da corrente a zero. Para contornar esse problema, foi selecionado um determinado período sem esses eventos de falta de energia.

5.2.2. Avaliação do impacto harmônico considerando o período 18/08/2015 a 20/08/2015

Para avaliar o desempenho das técnicas de regressão linear e não paramétrica foi selecionado somente o período de 18 a 20 de agosto de 2015.

Nas Figuras 25, 26, 27 e 28 é mostrado o desenvolvimento dos modelos de regressão linear (vermelho) e não paramétrica (azul) dos alimentadores do básico 1, básico 2, profissional e saúde, respectivamente quando não existe o evento interrupção de energia.

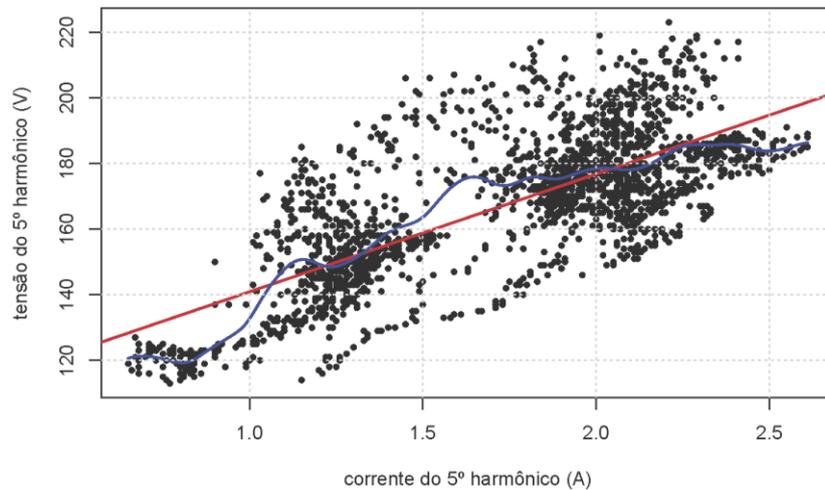
Nos modelos de regressão linear simples, os fatores de determinação apresentaram os seguintes valores 0,53; 0,50; 0,45; e 0,58, para os modelos mostrados nas Figuras 25, 26, 27 e 28 respectivamente; ou seja, todos os modelos apresentaram um R^2 alto.

Além disso, é possível verificar que o alimentador da saúde apresentou o maior coeficiente de determinação (em relação aos outros alimentadores), o que indica que esse alimentador apresenta maior influência no nível de distorção harmônica da tensão de entrada do Campus Universitário do Guamá.

Para os modelos de regressão não paramétrica, também mostrados nas Figuras 25, 26, 27 e 28, os fatores de determinação R^2 apresentaram os seguintes valores: 0,58; 0,57; 0,51; e 0,61, respectivamente. Logo, é possível observar que a técnica de regressão não paramétrica forneceu um modelo capaz de descrever melhor a correlação existente entre as correntes har-

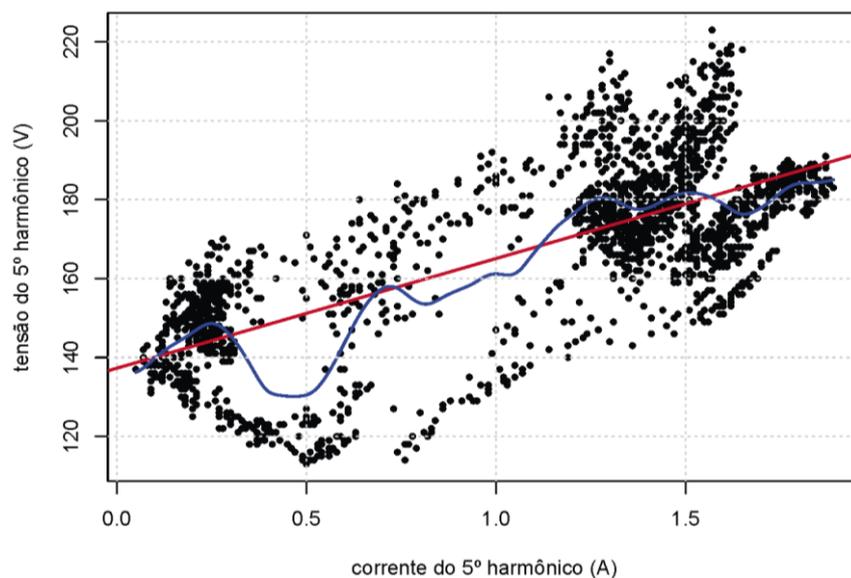
mônicas dos alimentadores internos do Campus Universitário do Guamá com a tensão harmônica do barramento de entrega, tendo em vista que o R^2 dos modelos de regressão não paramétricos apresentou valores maiores do que os dos modelos de regressão linear.

Figura 25 – Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus básico 1 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A no período de 18/08/2015 a 20/08/2015



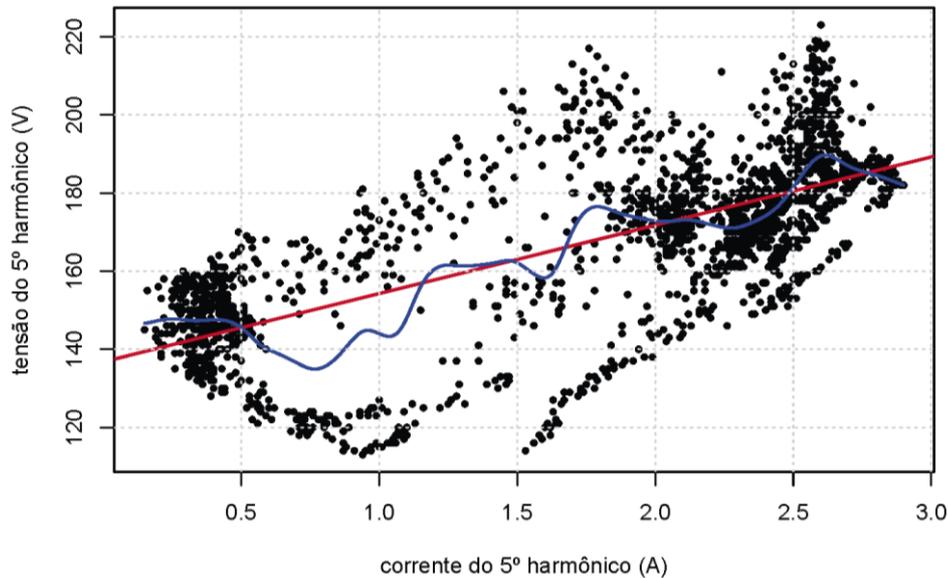
Fonte: SISGEE (2015)

Figura 26 – Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus básico 2 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A no período de 18/08/2015 a 20/08/2015



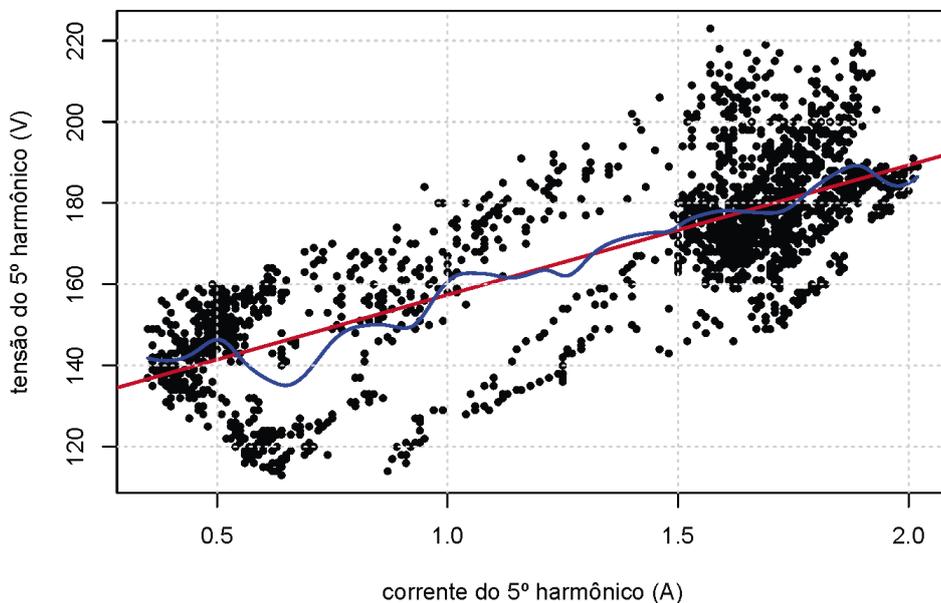
Fonte: SISGEE (2015)

Figura 27 – Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do prédio do alimentador do campus profissional e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na Fase A no período de 18/08/2015 a 20/08/2015



Fonte: SISGEE (2015)

Figura 28 – Correlação existente entre a corrente do 5º harmônico do alimentador do campus saúde e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia na fase A no período de 18/08/2015 à 20/08/2015



Fonte: SISGEE (2015)

A partir dos modelos apresentados anteriormente, foi possível calcular os fatores de impactos harmônicos dos alimentadores do campus Básico 1, Básico 2, Profissional e Saúde, cujos valores são: 26,54%, 10,23%, 10,92% e 16,58%, respectivamente.

5.3. Caso 2 - impacto harmônico das cargas dos diversos alimentadores durante a segunda campanha

No segundo caso, realizou-se a análise do impacto das correntes harmônicas das cargas dos alimentadores dos setores básico 1, básico 2, profissional e saúde na tensão do barramento de entrada de energia elétrica da UFPA, no período de 24/11/2015 à 01/12/2015.

5.3.1. Modelo de regressão

No estudo de caso apresentado, o objetivo foi avaliar o desempenho dos modelos de regressão linear e não paramétrico, tendo por base a análise das componentes harmônicas de 3^a e 5^a ordem. Vale ressaltar que, essas são as componentes que apresentaram os maiores níveis de distorções harmônicas.

5.3.1.1. 3^o harmônico

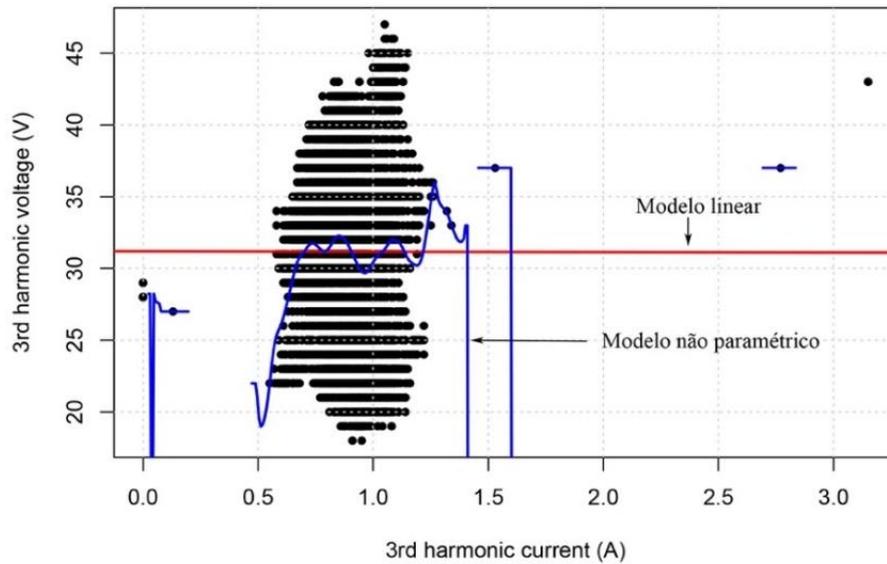
5.3.1.1.1. Alimentador básico 1 – AL-01

As Figuras 29, 30 e 31 apresentam os modelos lineares e não paramétricos que correlacionam a tensão harmônica de ordem 3 na entrada da UFPA com a corrente harmônica de mesma ordem do alimentador básico 1 nas fases A, B e C, respectivamente.

De acordo com a Figura 29, pode-se observar que o modelo linear é praticamente paralelo ao eixo da corrente. Então, a corrente do 3^o harmônico medido na fase A do alimentador do básico 1 praticamente não possui correlação linear com a tensão de 3^o harmônico na fase A da cabine de medição da UFPA, tendo em vista que o R^2 apresentou um valor próximo de zero, conforme mostrado na Tabela 07.

O modelo não paramétrico também não foi capaz de caracterizar a correlação existente entre a tensão harmônica de ordem 3 na fase A da cabine de medição da UFPA com a corrente harmônica de mesma ordem na fase A do alimentador do básico 1. Além disso, é possível visualizar descontinuidades na curva não paramétrica, o que indica a existência de dados espúrios.

Figura 29 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do Campus básico 1 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase A

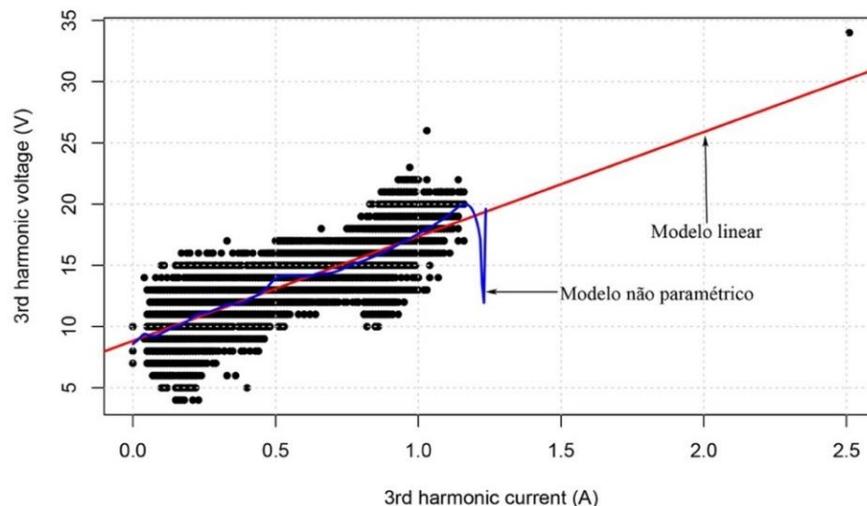


Fonte: SISGEE (2015)

De posse dos resultados, a Figura 30 mostra que o modelo linear da fase B apresenta uma declividade maior que o modelo da fase A, o que indica que há uma correlação entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do básico 1 com a tensão do 3º harmônico na fase B da cabine de medição.

Além disso, o modelo não paramétrico da fase B não apresentou descontinuidades em sua curva, o que mostra que esse modelo não sofreu a influência de dados espúrios presentes nas medidas de tensão e corrente.

Figura 30 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do Campus básico 1 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase B

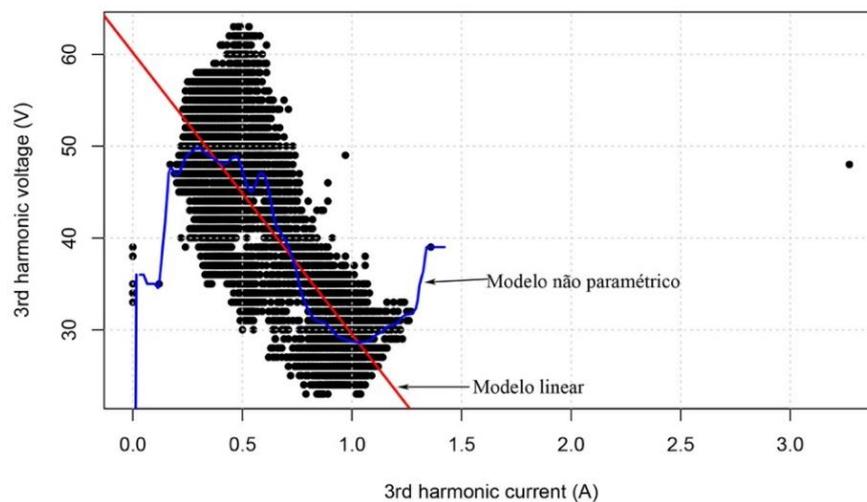


Fonte: SISGEE (2015)

Analisando a Figura 31, é possível observar que o modelo linear da fase C também apresenta uma declividade maior que o modelo da fase A, o que indica que há uma correlação entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do básico 1 com a tensão do 3º harmônico na fase C, da cabine de medição. No entanto, deve-se ressaltar que a tensão e a corrente harmônicas de ordem 3 nessa fase apresentam relação inversamente proporcional.

Conforme mostrado na Figura 31, é possível perceber que o modelo não paramétrico da fase C também não apresentou descontinuidades em sua curva, o que mostra que esse modelo não sofreu a influência dados espúrios presentes nas medidas de tensão e corrente.

Figura 31 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do Campus básico 1 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase C



Fonte: SISGEE (2015)

A Tabela 07 apresenta, resumidamente, os valores coletados.

Tabela 07 – Tabela resumo dos valores R^2 dos modelos linear e não paramétrico que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico do alimentador do básico 1, na tensão de entrada da UFPA

Modelos	Fase A	Fase B	Fase C
Modelo linear	0	0,70	0,61
Modelo não paramétrico	0,06	0,71	0,69

Fonte: SISGEE (2015)

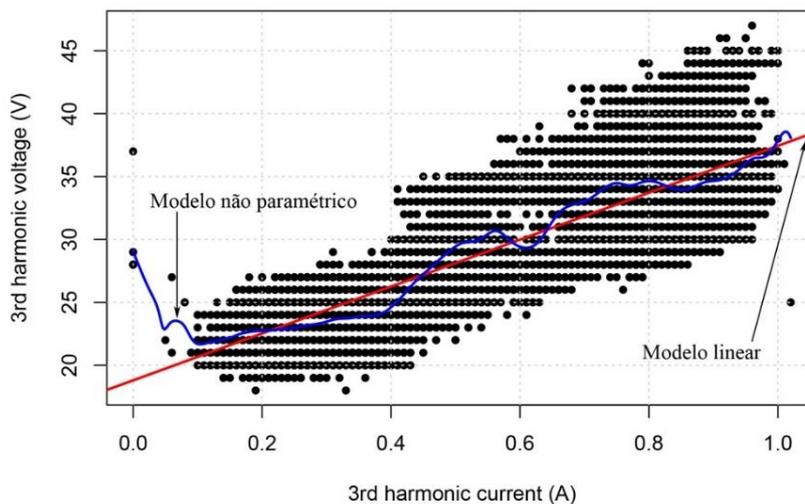
5.3.1.1.2. Alimentador básico 2 – AL-02

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os modelos lineares e não paramétricos que correlacionam a tensão harmônica de ordem 3 na entrada da UFPA com a corrente harmônica de mesma ordem do alimentador do básico 2 nas fases A, B e C, respectivamente.

Analisando o modelo mostrado na Figura 32, verifica-se que o modelo linear apresenta uma relação diretamente proporcional entre a corrente do 3º harmônico do alimentador básico 2 com a tensão de mesma ordem harmônica na fase A da cabine de medição de UFPA. De acordo com a Tabela 08, o modelo linear apresenta um R^2 alto, e, portanto, indica que o alimentador do básico 2 apresenta uma correlação significativa com a tensão harmônica.

O modelo não paramétrico, mostrado na Figura 32, também apresentou uma alta correlação entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do básico 2 com a tensão na fase A da cabine de medição. Além disso, este modelo apresentou um ajuste melhor que o modelo linear, tendo em vista que o valor R^2 do modelo não paramétrico apresentou um valor maior que o do modelo linear, conforme também mostrado na Tabela 08.

Figura 32 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do campus básico 2 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase A



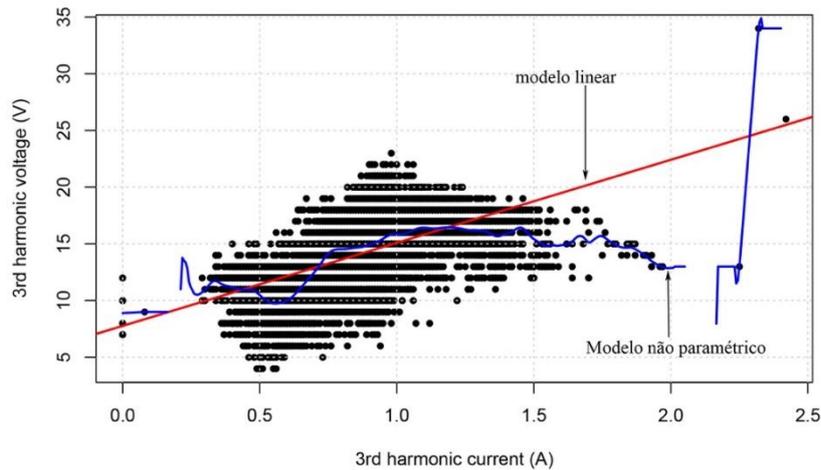
Fonte: SISGEE (2015)

Analisando o modelo mostrado na Figura 33, verifica-se que este modelo linear apresenta uma relação diretamente proporcional entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do básico 2 com a tensão de mesma ordem harmônica na fase B da cabine de medição de UFPA.

De acordo com a Tabela 08, o modelo linear apresenta um R^2 moderado, o que indica que o alimentador do básico 2 apresenta uma correlação não tão significativa com a tensão

harmônica. No entanto, o modelo não paramétrico, mostrado na Figura 33, apresentou um ajuste bem melhor que do modelo linear, tendo em vista que o valor R^2 do modelo não paramétrico apresentou um valor de R^2 alto, enquanto que o do modelo linear foi baixo, conforme mostrado na Tabela 08.

Figura 33 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do campus básico 2 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase B

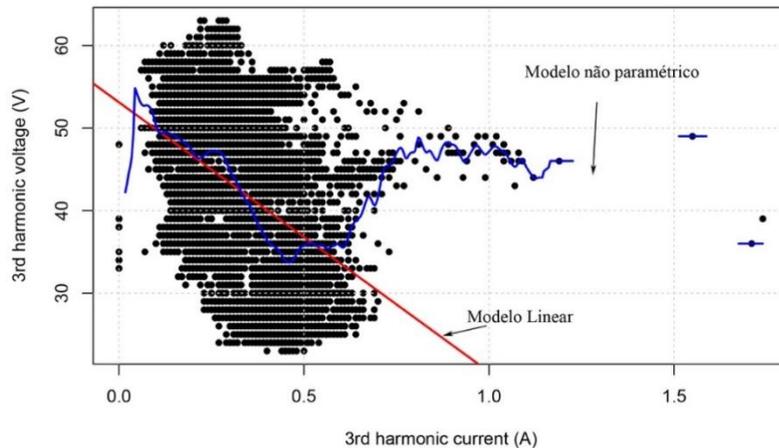


Fonte: SISGEE (2015)

Analisando o modelo mostrado na Figura 34, verifica-se que o modelo linear apresenta uma relação inversamente proporcional entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do básico 2 com a tensão de mesma ordem harmônica na fase C da cabine de medição de UFPA.

Conforme mostrado na Tabela 08, o modelo linear apresenta um R^2 moderado, o que indica que o alimentador do básico 2 apresenta uma correlação não tão significativa com a tensão harmônica. Entretanto o modelo não paramétrico, mostrado na Figura 34, apresentou um ajuste bem melhor que do modelo linear, tendo em vista que o valor R^2 do modelo não paramétrico foi superior ao do modelo linear. Além disso, é possível verificar que há dados espúrios nas medições, uma vez que o modelo não paramétrico apresentou descontinuidades em sua curva.

Figura 34 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do campus básico 2 e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase C



Fonte: SISGEE (2015)

Tabela 08 – Tabela resumo dos valores R^2 dos modelos linear e não paramétricos que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico do alimentador do básico 2 na tensão de entrada da UFPA

Modelo	Fase A	Fase B	Fase C
Modelo linear	0,61	0,33	0,23
Modelo não paramétrico	0,65	0,46	0,34

Fonte: SISGEE (2015)

5.3.1.1.3. Alimentador profissional – AL-03

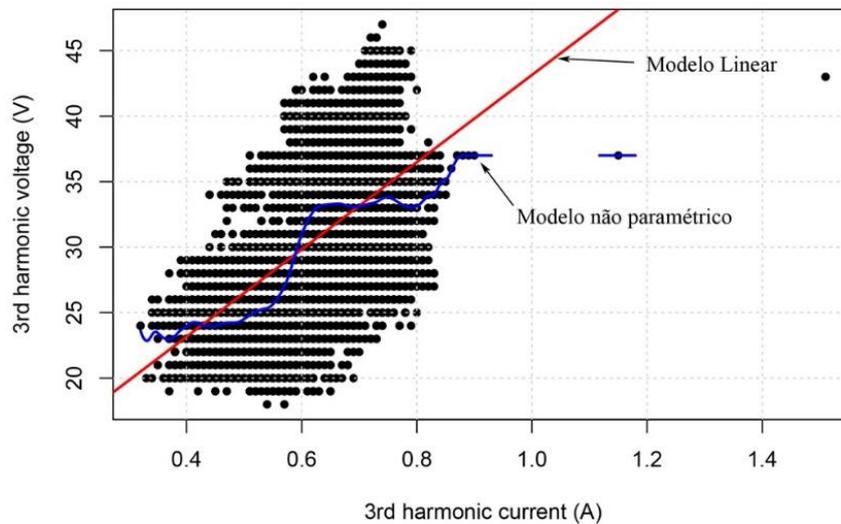
As Figuras 35, 36 e 37 apresentam os modelos lineares e não paramétricos que correlacionam a tensão harmônica de ordem 3 na entrada da UFPA com a corrente harmônica de mesma ordem do alimentador do profissional (AL-03) nas fases A, B e C, respectivamente.

Na Figura 35, mostra-se o comportamento e desempenho do modelo linear e pode ser observado que a existência de uma relação diretamente proporcional entre a corrente do 3º harmônico do AL-03, com a tensão de mesma ordem harmônica na fase A, da cabine de medição de UFPA. Na Tabela 09, é mostrado que o modelo linear apresenta um R^2 moderado e, portanto, indica que o alimentador do profissional apresenta uma correlação pouco significativa com a tensão harmônica na fase A, do referido barramento de entrada de energia elétrica.

Para a simulação usando o modelo de regressão não paramétrico, conforme mostrado na Figura 35, pode ser observado uma alta correlação entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do profissional com a tensão na fase A da cabine de medição. Observa-se que este apresenta um desempenho melhor que o modelo de regressão linear, tendo por base o

valor do valor R^2 do modelo não paramétrico maior que o do modelo linear, conforme mostrado na Tabela 08.

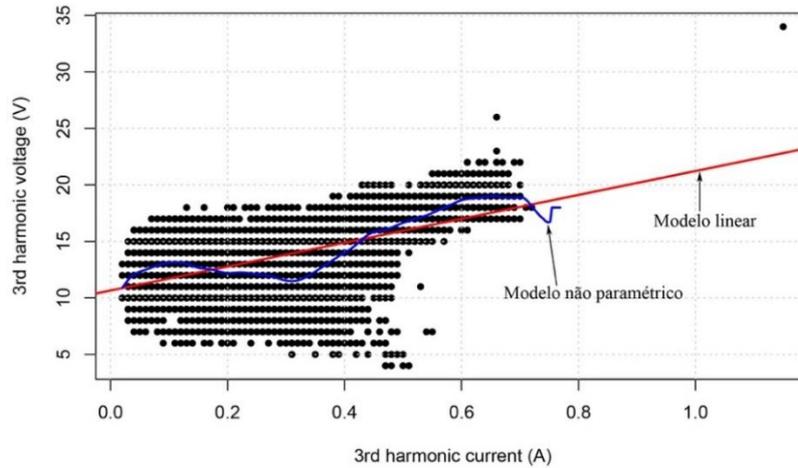
Figura 35 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do profissional e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase A



Fonte: SISGEE (2015)

Analisando o modelo mostrado na Figura 36, verifica-se que o modelo linear apresenta uma relação diretamente proporcional entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do profissional com a tensão de mesma ordem harmônica na fase B, da cabine de medição de UFPA. De acordo com a Tabela 09, o modelo linear apresenta um R^2 moderado, indicando que o alimentador profissional apresenta uma correlação pouco significativa com a tensão harmônica na fase B. Já o modelo não paramétrico, mostrado na Figura 36, apresentou uma alta correlação entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do profissional com a tensão na fase A da cabine de medição. Este modelo apresentou um desempenho superior, proporcionando um valor de R^2 maior que o do modelo linear, conforme mostrado na Tabela 09.

Figura 36 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do profissional e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase B

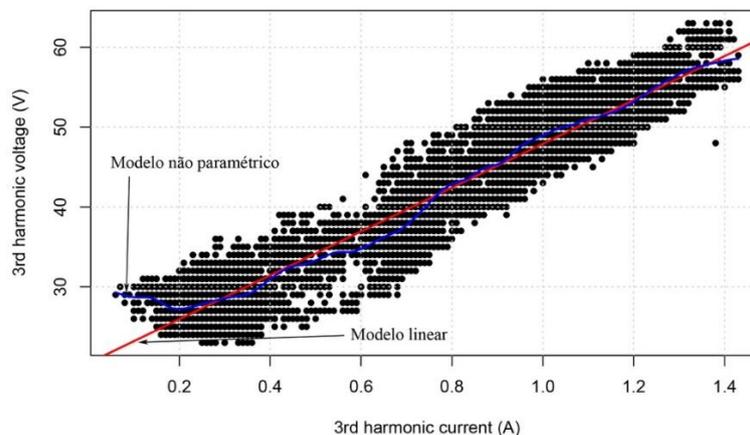


Fonte: SISGEE (2015)

O modelo de regressão linear, conforme mostrado na Figura 37, apresenta uma relação diretamente proporcional entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do profissional com a tensão de mesma ordem harmônica na fase C da cabine de medição de UFPA. Pode-se observar, ainda, na Tabela 09, que o modelo de regressão linear apresenta um R^2 muito alto, o que demonstra a uma correlação bastante significativa com a tensão harmônica na fase C.

O modelo não paramétrico, também mostrado na Figura 37, apresentou uma correlação muito alta entre a corrente do 3º harmônico e a tensão na fase A. Além disso, é importante ressaltar que, embora o modelo não paramétrico tenha apresentado um ajuste melhor, o modelo linear é capaz de caracterizar de forma satisfatória a relação existente entre a corrente do 3º harmônico e a tensão na fase C.

Figura 37 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador do profissional e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase C



Fonte: SISGEE (2015)

Tabela 09 – Tabela resumo dos valores R^2 dos modelos linear e não paramétrico que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico do alimentador profissional na tensão de entrada da UFPA

Modelo	Fase A	Fase B	Fase C
Modelo linear	0,32	0,31	0,91
Modelo não paramétrico	0,40	0,46	0,92

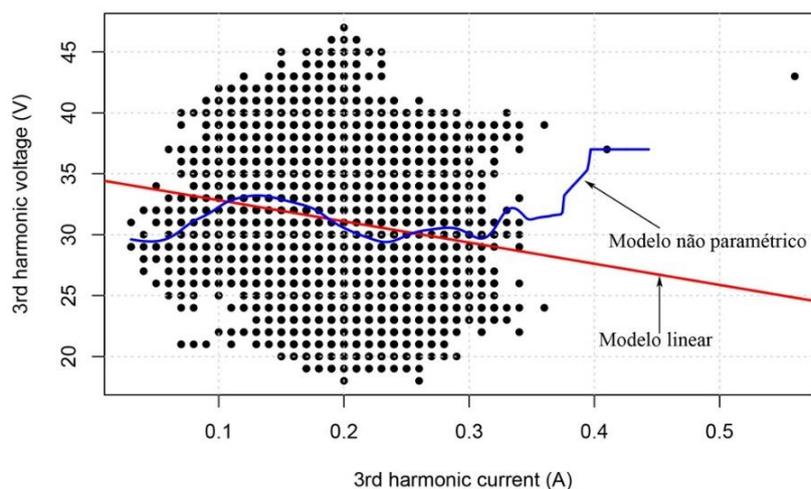
Fonte: SISGEE (2015)

5.3.1.1.4. Alimentador saúde – AL-04

As Figuras 38, 39 e 40 apresentam os modelos de regressão linear e não paramétricos que correlacionam a tensão harmônica de ordem 3, no barramento de entrada, com a corrente harmônica de mesma ordem do alimentador da saúde nas fases A, B e C, respectivamente.

Analisando o modelo mostrado na Figura 38, verifica-se que o modelo linear apresenta uma relação inversamente proporcional entre a corrente do 3º harmônico do alimentado da saúde, com a tensão de mesma ordem harmônica na fase A. Na Tabela 10, pode ser observado que este apresenta um R^2 baixo. Logo, indica a inexistência de influência na tensão harmônica na fase A. O modelo de regressão não paramétrico apresentou uma baixa correlação entre a corrente e tensão do 3º harmônico do alimentador da saúde, o que demonstra que o alimentador da saúde praticamente não influencia na tensão do 3º harmônico da fase A da cabine de medição.

Figura 38 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador saúde e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase A



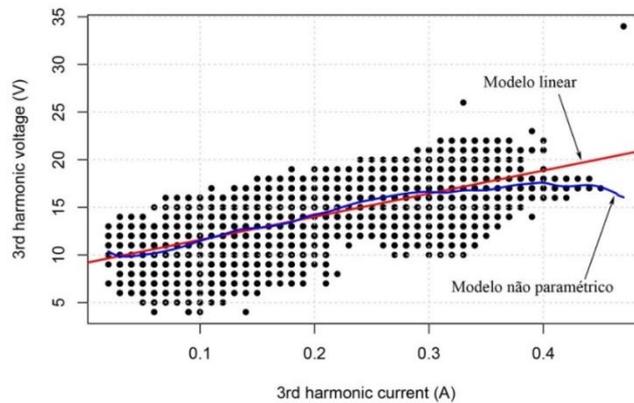
Fonte: SISGEE (2015)

Na Figura 39, verifica-se que o modelo de regressão linear apresenta uma relação diretamente proporcional entre a corrente do 3º harmônico do alimentador da saúde com a tensão

de mesma ordem harmônica na fase B. A Tabela 10, mostra que o modelo de regressão linear apresenta um R^2 alto, e, portanto, indica que o alimentador da saúde influencia significativamente a tensão harmônica na fase B.

O modelo não paramétrico, mostrado na Figura 39, também apresentou uma alta correlação entre a corrente do 3º harmônico do alimentador saúde com a tensão na fase B da cabine de medição.

Figura 39 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador saúde e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase B

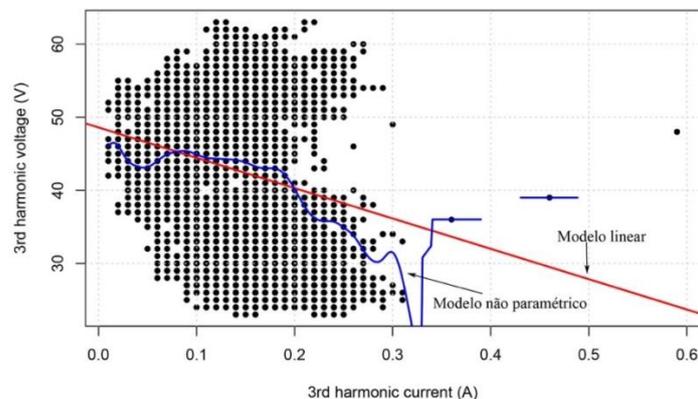


Fonte: SISGEE (2015)

A Figura 40 apresenta o comportamento da corrente da fase C do alimentador do alimentador saúde. Como pode ser observado, o modelo de regressão linear apresenta uma relação inversamente proporcional, entre a corrente e tensão do 3º harmônico. Na Tabela 10 observa-se o valor de R^2 baixo, o que indica uma baixa correlação.

O modelo não paramétrico, mostrado na Figura 40, apresentou uma baixa correlação entre a corrente e tensão do 3º harmônico da fase C.

Figura 40 – Correlação existente entre a corrente do 3º harmônico do alimentador saúde e a tensão de mesma ordem harmônica do barramento de entrega de energia da fase C



Fonte: SISGEE (2015)

Tabela 10 – Tabela resumo dos valores R^2 dos modelos linear e não paramétrico que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico do alimentador saúde na tensão de entrada da UFPA

Modelo	Fase A	Fase B	Fase C
Modelo linear	0,028	0,54	0,05
Modelo não paramétrico	0,05	0,56	0,08

Fonte: SISGEE (2015)

Para uma melhor visualização dos dados obtidos, apresenta-se a Tabela 11, que demonstra todos os valores apresentados na análise.

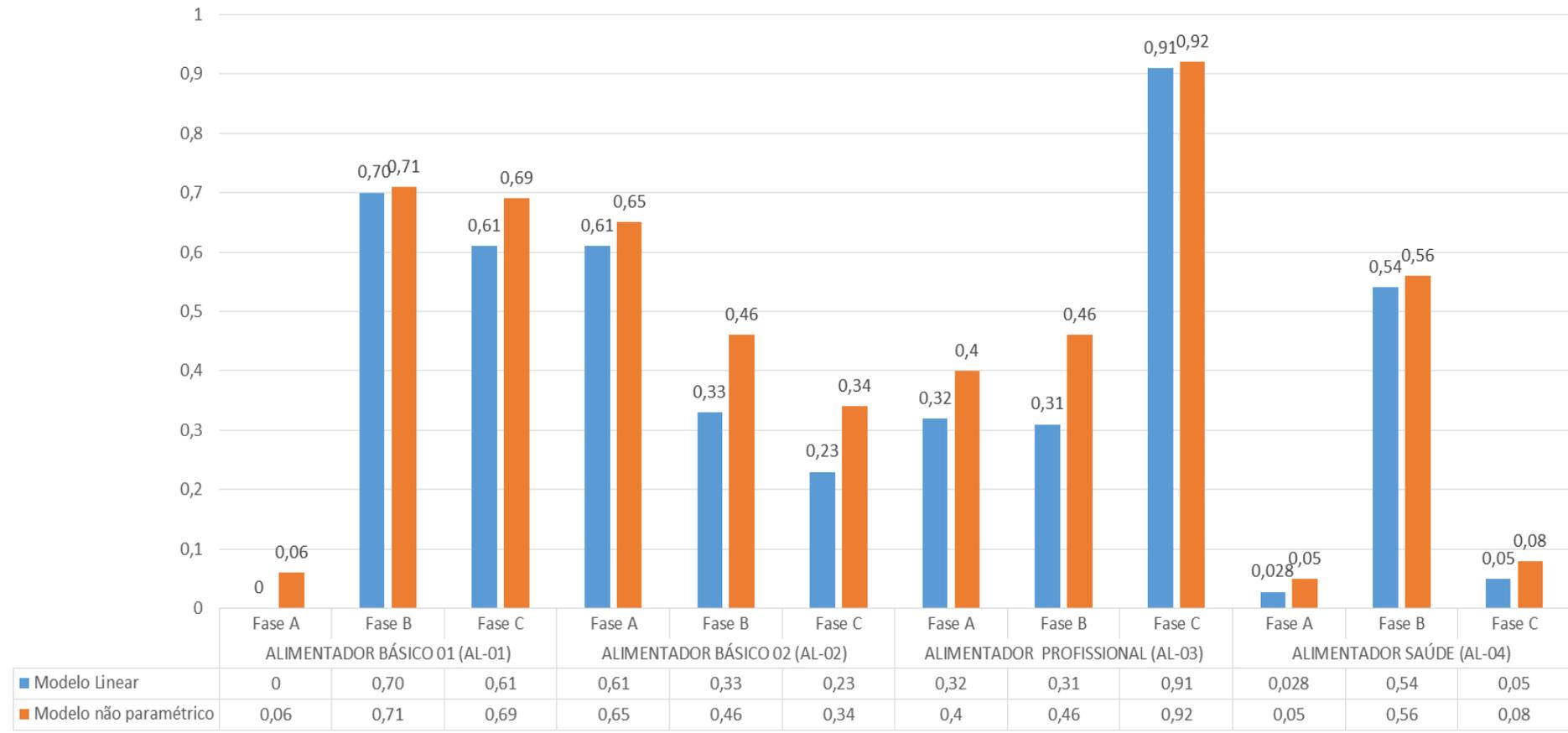
Tabela 11 – R² dos modelos linear e não paramétrico, que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico dos alimentadores AL-01, AL-02, Al-03 e Al-04, na tensão de entrada da UFPA

Fases	ALIMENTADOR BÁSICO 01 (AL-01)		ALIMENTADOR BÁSICO 02 (AL-02)		ALIMENTADOR PROFISSIONAL (AL-03)		ALIMENTADOR SAÚDE (AL-04)	
	Modelo Linear	Modelo não paramétrico	Modelo Linear	Modelo não paramétrico	Modelo Linear	Modelo não paramétrico	Modelo Linear	Modelo não paramétrico
A	0	0,06	0,61	0,65	0,32	0,4	0,028	0,05
B	0,70	0,71	0,33	0,46	0,31	0,46	0,54	0,56
C	0,61	0,69	0,23	0,34	0,91	0,92	0,05	0,08

Fonte: SISGEE (2015)

Para uma melhor visualização e interpretação dos dados obtidos na simulação dos modelos linear e não paramétrico que caracterizam a relação da corrente do 3º harmônico dos alimentadores AL-01, AL-02, Al-03 e Al-04, na tensão de entrada do Sistema, elaborou-se o Gráfico 07.

Gráfico 07 – Diagrama geral da relação da corrente do 3º harmônico dos alimentadores, na tensão de entrada do sistema



Fonte: SISGEE (2015)

5.3.1.2. 5º harmônico

Para a análise do desempenho dos modelos de regressão linear e não paramétricos que correlacionam a tensão harmônica de 5ª ordem no barramento de entrada da UFPA com a corrente de mesma ordem dos diversos alimentadores (básico 1, básico 2, profissional e saúde), aplicou-se a mesma metodologia desenvolvida para a determinação da correlação de tensão e corrente harmônica de 3ª ordem. O resultado desta análise pode ser observado na Tabela 12 que mostra o grau de correlação em cada simulação.

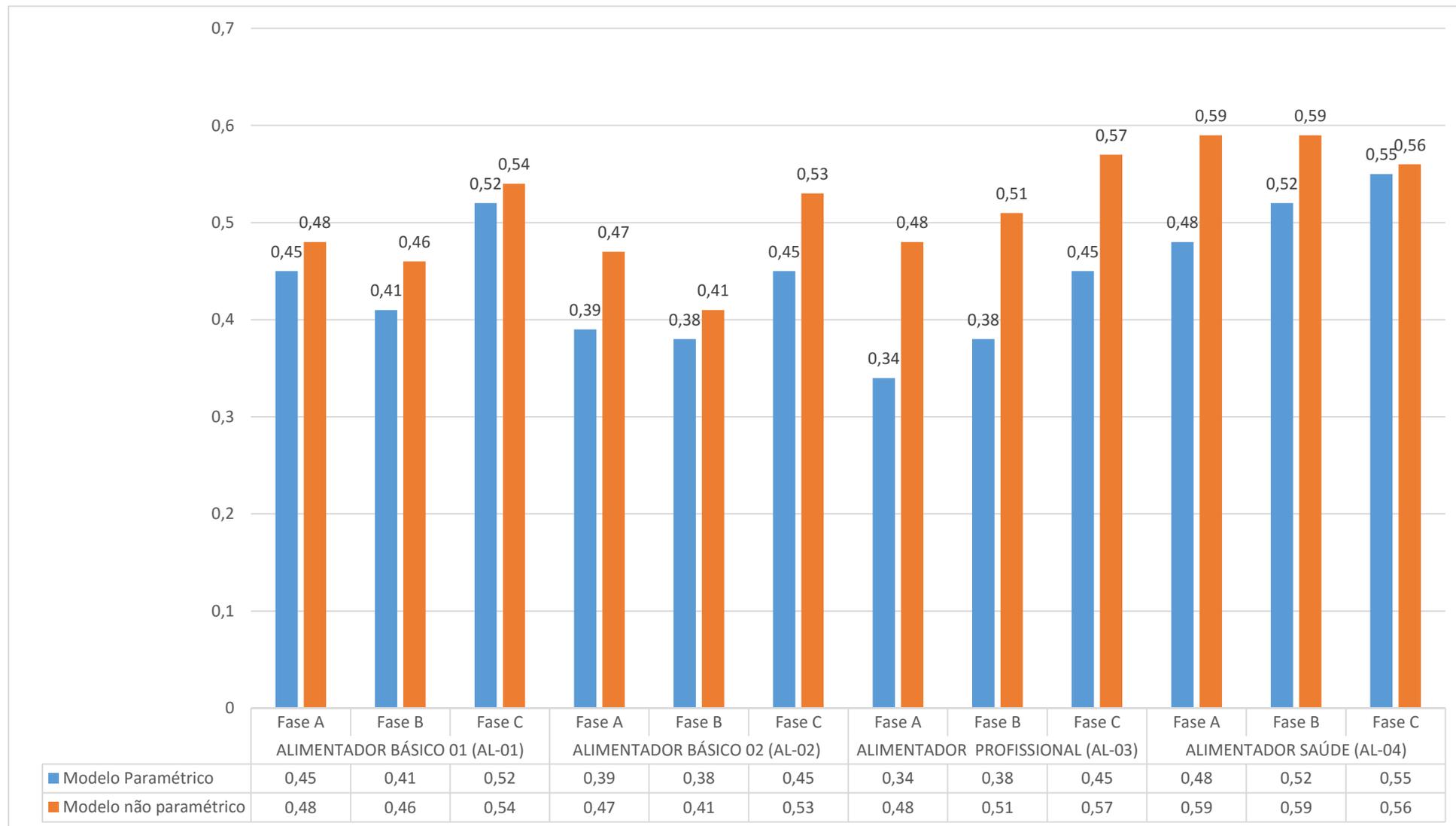
Tabela 12 – R² dos modelos linear e não paramétrico, que caracterizam a relação da corrente do 5º harmônico dos alimentadores AL-01, AL-02, AL-03 e AL-04, na tensão de entrada da UFPA

Fases	ALIMENTADOR BÁSICO 01 (AL-01)		ALIMENTADOR BÁSICO 02 (AL-02)		ALIMENTADOR PROFISSIONAL (AL-03)		ALIMENTADOR SAÚDE (AL-04)	
	Modelo Linear	Modelo não paramétrico	Modelo Linear	Modelo não paramétrico	Modelo Linear	Modelo não paramétrico	Modelo Linear	Modelo não paramétrico
A	0,45	0,48	0,39	0,47	0,34	0,48	0,48	0,59
B	0,41	0,46	0,38	0,41	0,38	0,51	0,52	0,59
C	0,52	0,54	0,45	0,53	0,45	0,57	0,55	0,56

Fonte: elaborada pelo autor (2015)

Para uma melhor visualização e interpretação dos dados obtidos na simulação dos modelos linear e não paramétrico que caracterizam a relação da corrente do 5º harmônico dos alimentadores AL-01, AL-02, AL-03 e AL-04, na tensão de entrada do Sistema, elaborou-se o Gráfico 08.

Gráfico 08 – Diagrama geral da relação da corrente do 5º harmônico dos alimentadores, na tensão de entrada do sistema



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

5.3.2. Impacto harmônico a partir dos Modelos Lineares

Nessa seção, são apresentados os impactos na tensão do 3º e 5º harmônicos da cabine de medição da UFPA, provocados pelos alimentadores básico 1, básico 2, profissional e saúde.

5.3.2.1. 3º harmônico

As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam os impactos gerais provocados pelos alimentadores básico 1, básico 2, profissional e saúde na tensão do 3º harmônico nas fases A B C, da cabine de medição geral da UFPA, respectivamente, para o segundo período de medição.

Como pode ser visto na Tabela 13, o impacto harmônico na tensão da fase A, da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador profissional, apresentou um valor percentual elevado, enquanto que o impacto devido ao *background* apresentou um valor percentual menor, em relação ao outro.

Então, espera-se que os impactos dos outros alimentadores apresentem um percentual menor que o do *background* do modelo 3. Entretanto, na Tabela 13 mostra que o impacto percentual do alimentador básico 2 apresenta um valor maior que o respectivo impacto do *background* do modelo 3.

Essa situação deve-se ao R^2 do modelo 3 ter apresentado um grau moderado, enquanto que o R^2 do modelo 2 apresentou um grau forte. Logo, o modelo 2 apresentou resultados com um grau de confiabilidade maior que o do modelo 3.

Além disso, é importante ressaltar que os modelos 1 e 4 apresentaram R^2 com valores muito baixos, o que indica que esses modelos não foram capazes de reproduzir a relação existente entre a tensão e a corrente do 3º harmônico causado pelo alimentador básico 1.

Tabela 13 – Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase A, da cabine de medição – modelo linear

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	0	100 %
Modelo 2 (Básico 2)	37,4%	62,59%
Modelo 3 (Profissional)	68,04%	31,95 %
Modelo 4 (Saúde)	9,83%	90,16 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

No caso da fase B, a Tabela 14 mostra que, o impacto harmônico na tensão da fase B,

da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador básico 2, apresentou um valor percentual que se destacou em relação aos outros alimentadores da UFPA, atingindo um valor 43,2%, enquanto que seu respectivo *background* atingiu um valor de 56,79%.

No entanto, é importante frisar que o R^2 do modelo 2 apresentou um grau moderado, assim como o do modelo 3, o que implica que esses modelos apresentam impactos com um grau de confiabilidade menor que os provenientes dos modelos 1 e 4, que, por sua vez, apresentaram R^2 graus fortes.

Em consequência disso, os intervalos de confiança dos modelos 1 e 3 são maiores, e, consequentemente, graus de incerteza menores. Logo, os impactos dos modelos 1 e 3 podem ser menores ou maiores que os apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase B, da cabine de medição - modelo linear

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	34,24 %	65,75 %
Modelo 2 (Básico 2)	43,2%	56,79 %
Modelo 3 (Profissional)	23,39%	76,6 %
Modelo 4 (Saúde)	33,35%	66,94 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

No caso da fase C, a Tabela 15 mostra que o impacto harmônico, na tensão da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador profissional, apresentou um valor percentual que se destacou em relação aos outros alimentadores da UFPA, atingindo um valor 49,60%, enquanto que seu respectivo *background* atingiu um valor de 50,39%.

Nesse caso, é importante frisar que o R^2 do modelo 3 apresentou um grau muito alto, o que implica que esse modelo apresentou um impacto com um grau de confiabilidade bem maior que os provenientes dos modelos restantes.

Além disso, deve-se ressaltar que o modelo 4 apresentou R^2 com valor muito baixo, o que indica que esse modelo não foi capaz de reproduzir a relação existente, entre a tensão e a corrente do 3º harmônico, causado pelo alimentador da saúde. Em consequência disso, o impacto harmônico percentual devido a esse alimentador mostrado na Tabela 15 deve ser ignorado durante a análise em questão.

Tabela 15 – Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase C, da cabine de medição – modelo linear

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	27,69%	72,3 %
Modelo 2 (Básico 2)	39,89%	60,10 %,
Modelo 3 (Profissional)	49,60%	50,39 %,
Modelo 4 (Saúde)	11,45%	88,54 %,

Fonte: Elaborado pelo autor (2015)

Embora os impactos harmônicos globais mostrados nas Tabelas 13, 14 e 15 sejam importantes para avaliar a influência das fontes harmônicas durante todo período de medição, a avaliação do impacto harmônico em cada instante de tempo é fundamental, tendo em vista que a rede elétrica está variando constantemente o seu ponto de operação. A partir desse ponto de vista, os Gráficos 09, 10 e 11 apresentam o impacto na tensão 3º harmônico da cabine de medição da UFPA devido ao alimentador profissional.

Na fase A, o impacto harmônico percentual, devido ao alimentador profissional, manteve-se acima do provocado pelo *background* durante todo o período de medição. Sendo que, durante o período da noite e nos finais de semana, o impacto devido ao alimentador profissional sofreu uma diminuição, enquanto que os das demais fontes, sofreram um aumento.

Gráfico 09 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase A, da cabine de medição – modelo linear

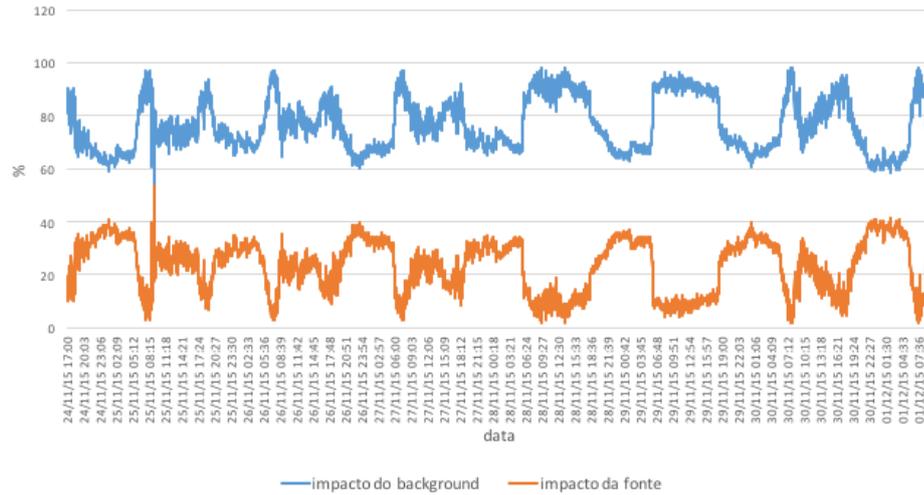


Fonte: SISGEE, adaptado pelo autor (2015)

Na fase B, o impacto harmônico percentual, devido ao alimentador profissional, manteve-se abaixo do provocado pelo *background* durante todo o período de medição. Sendo

que, durante o período da noite, o impacto devido ao alimentador do profissional sofreu um aumento em seu valor percentual, enquanto que os das demais fontes, sofreram um decréscimo.

Gráfico 10 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase B, da cabine de medição – modelo linear



Fonte: SISGEE, adaptado pelo autor (2015)

Na fase C, o impacto harmônico percentual, devido ao alimentador profissional, manteve-se acima do provocado pelo *background* durante turno da noite. Enquanto que, durante o turno do dia, os outros alimentadores exerceram uma influência maior no nível de distorção harmônica da cabine de medição, conforme demonstrado no Gráfico 11.

Gráfico 11 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase C, da cabine de medição – modelo linear



Fonte: SISGEE, adaptado pelo autor (2015)

Resumidamente, na Tabela 16, demonstramos os impactos dos alimentadores da UFPA, na tensão do 3º harmônico, aplicando-se o modelo linear.

Tabela 16 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico das fases A, B e C da cabine de medição – modelo linear

MODELO LINEAR 3º HARMÔNICO	Modelo 1 (básico 1)			Modelo 2 (Básico 2)			Modelo 3 (Profissional)			Modelo 4 (Saúde)		
	FASES			FASES			FASES			FASES		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
IMPACTO DA FONTE HARMÔNICA (%)	0	34,24	27,69	37,4	43,2	39,89	68,4	23,39	49,60	9,83	33,35	11,45
IMPACTO DO BACKGROUND (%)	100	65,75	72,3	62,59	56,79	60,10	31,95	76,6	50,39	90,16	66,94	88,54
R ²	0	0,70	0,61	0,61	0,33	0,23	0,32	0,31	0,91	0,028	0,54	0,05

Fonte: SISGEE (2015)

5.3.2.2. 5º harmônico

As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam os impactos gerais provocados pelos alimentadores AL-01, AL-02, AL-03 e AL-04 na tensão do 5º harmônico, nas fases A B C da cabine de medição geral da UFPA, respectivamente, para o segundo período de medição.

Como pode-se perceber na Tabela 17, o impacto harmônico na tensão da fase A da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador básico 1, apresentou um valor percentual maior que os provocados pelos outros alimentadores da UFPA. Porém, é importante ressaltar que o impacto foi relativamente baixo.

Além disso, é importante ressaltar que todos os modelos lineares apresentaram R^2 com valores moderados, o que indica que esses modelos apresentaram um grau confiabilidade bastante similar entre si.

Tabela 17 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase A, da cabine de medição – modelo linear

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	30,58%	69,41%
Modelo 2 (Básico 2)	22,70 %	77,29 %
Modelo 3 (Profissional)	23,32 %	76,67 %
Modelo 4 (Saúde)	29,48 %	70,51 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Na Tabela 18, pode se perceber que o impacto harmônico na tensão da fase B, da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador da saúde, apresentou um valor percentual maior que os provocados pelos outros alimentadores da UFPA. Porém, é importante ressaltar que o impacto é relativamente baixo.

Além disso, é importante destacar que todos os modelos lineares apresentaram R^2 com valores moderados, o que indica que esses modelos apresentam um grau de confiabilidade bastante similar entre si, assim como visto na fase A.

Tabela 18 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase B da cabine de medição modelo linear

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	23,03%	76,96%
Modelo 2 (Básico 2)	37,98 %	60,01 %
Modelo 3 (Profissional)	23,28 %	76,71 %
Modelo 4 (Saúde)	39 %	60,99 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Pode ser visto, na Tabela 19, que o impacto harmônico na tensão da fase C, da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador da saúde, apresentou um valor percentual maior que os provocados pelos outros alimentadores da UFPA; porém é importante ressaltar que o impacto é relativamente baixo.

Além disso, é importante ressaltar que todos os modelos lineares apresentaram R^2 com valores moderados, o que indica que esses modelos apresentaram um grau confiabilidade bastante similar entre si, assim como visto nas fases A e B.

Tabela 19 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase C da cabine de medição – modelo linear

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	23,67%	76,32%
Modelo 2 (Básico 2)	24,05 %	75,94 %
Modelo 3 (Profissional)	23,77 %	76,22 %
Modelo 4 (Saúde)	38,28 %	61,71 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

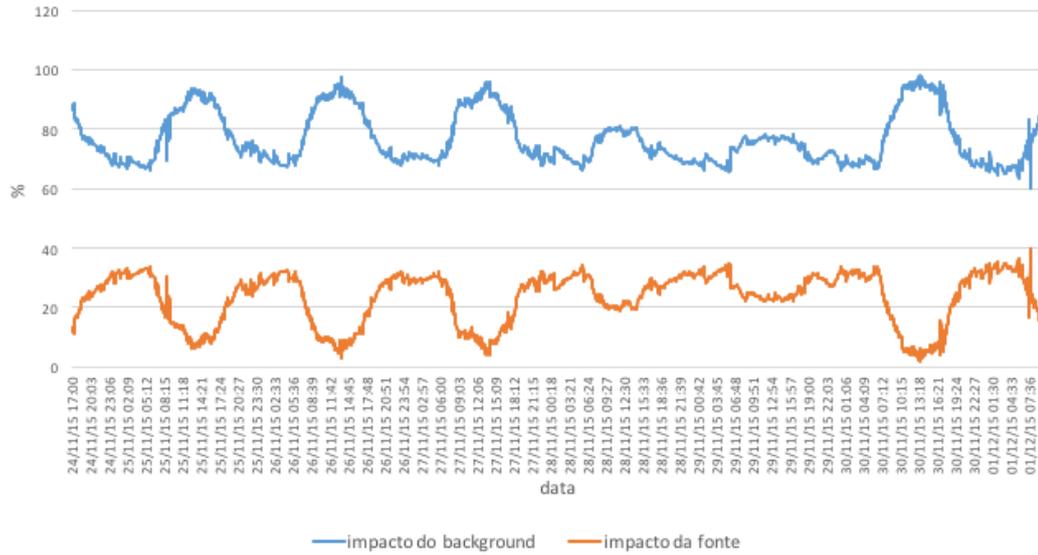
Analisando os Gráficos 12, 13 e 14, que apresentam os impactos provocados pelo alimentador profissional da UFPA, na tensão do 5º harmônico, nas fases A, B e C, da cabine de medição, respectivamente, para cada instante de tempo, pode-se verificar que o impacto percentual, devido ao alimentador profissional, mantém-se em níveis inferiores em relação as demais cargas.

Gráfico 12 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase A, da cabine de medição – modelo linear



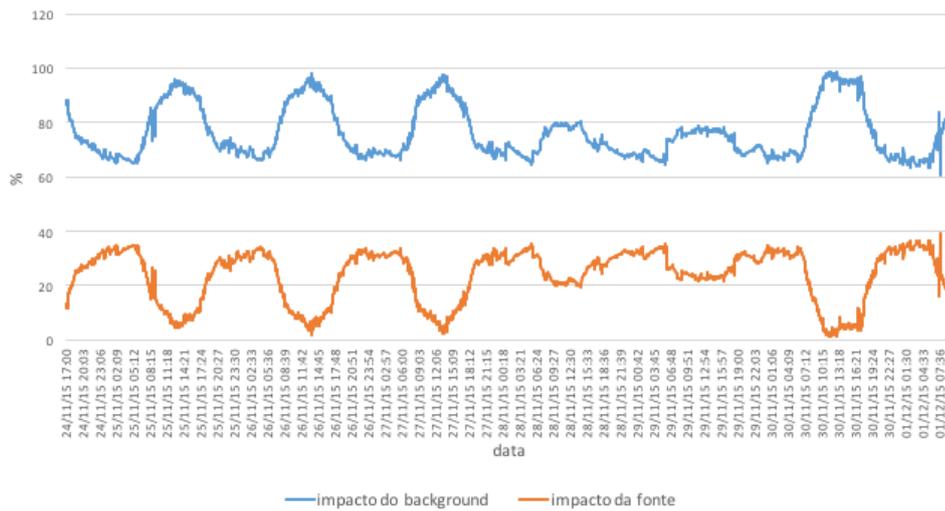
Fonte: SISGEE, elaborado pelo autor (2015)

Gráfico 13 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase B, da cabine de medição – modelo linear



Fonte: SISGEE, elaborado pelo autor (2015)

Gráfico 14 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase C, da cabine de medição – modelo linear



Fonte: SISGEE, elaborado pelo autor (2015)

Resumidamente, na Tabela 20, demonstra-se os impactos dos alimentadores da UFPA, na tensão do 5º harmônico, aplicando-se o modelo linear.

Tabela 20 – Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico das fases A, B e C da cabine de medição – modelo linear

MODELO LINEAR 5º HARMÔNICO	Modelo 1 (básico 1)			Modelo 2 (Básico 2)			Modelo 3 (Profissional)			Modelo 4 (Saúde)		
	FASES			FASES			FASES			FASES		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
IMPACTO DA FONTE HARMÔNICA (%)	30,58	23,03	23,67	22,70	37,98	24,05	23,32	23,28	23,77	29,48	39	38,28
IMPACTO DO BACKGROUND (%)	69,41	76,96	76,32	77,29	60,01	75,94	76,67	76,71	76,22	70,51	60,99	61,71
R²	0,45	0,41	0,52	0,39	0,38	0,45	0,34	0,38	0,45	0,48	0,52	0,55

Fonte: SISGEE (2015)

5.3.3. Impacto harmônico a partir dos modelos não paramétricos

Nessa seção, são apresentados os impactos na tensão do 3º e 5º harmônicos da cabine de medição da UFPA, provocados pelos alimentadores básico 1, básico 2, profissional e saúde, utilizando-se o modelo não paramétrico.

5.3.3.1. 3º harmônico

As Tabelas 21, 22 e 23 apresentam os impactos gerais provocados pelos alimentadores básico 1, básico 2, profissional e saúde, na tensão do 3º harmônico, nas fases A B e C da cabine de medição geral da UFPA, respectivamente, para o segundo período de medição, utilizando-se os modelos não paramétricos.

Pode ser visto, na Tabela 21, que o impacto harmônico na tensão da fase A, da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador profissional, destacou-se em relação aos impactos causados pelos outros alimentadores da UFPA.

Além disso, diferentemente do que se observou na seção anterior, os impactos dos outros alimentadores apresentem um percentual menor que o do *background* do modelo 3, que se justifica pelo aumento do R^2 dos modelos 2 e 3, utilizando a regressão não paramétrica.

Quanto aos modelos 1 e 4, os mesmos ainda apresentaram R^2 com valores muito baixos, o que indica que a regressão não paramétrica não foi capaz criar modelos que pudessem reproduzir a relação existente entre a tensão e a corrente do 3º harmônico causado pelo alimentador básico 1.

Tabela 21 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase A, da cabine de medição - modelo não paramétrico

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	44,15 %	55,84 %
Modelo 2 (Básico 2)	36,16 %	63,83 %
Modelo 3 (Profissional)	45,71 %	54,28 %
Modelo 4 (Saúde)	19,65 %	80,34 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

No caso da fase B, a Tabela 22 mostra que o impacto harmônico, na tensão da fase B, da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador saúde, apresentou um valor percentual que se destacou em relação aos outros alimentadores da UFPA.

Além disso, é importante ressaltar que todos os modelos apresentaram um grau R^2 alto, sendo que o modelo 2 se destacou entre os modelos.

Tabela 22 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase B, da cabine de medição - modelo não paramétrico

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	43,21 %	43,21 %
Modelo 2 (Básico 2)	51,07 %	48,92 %
Modelo 3 (Profissional)	43,35 %	56,64 %
Modelo 4 (Saúde)	65,61 %	34,38 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

No caso da fase C, a Tabela 23 mostra que o impacto harmônico na tensão da fase C, da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador profissional, apresentou um valor percentual que se destacou em relação aos outros alimentadores da UFPA, semelhante ao resultado proveniente do modelo linear visto na seção anterior. Logo, nesse caso, o modelo linear poderia substituir o modelo não paramétrico, sem apresentar erro elevado.

Tabela 23 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico da fase C, da cabine de medição - modelo não paramétrico

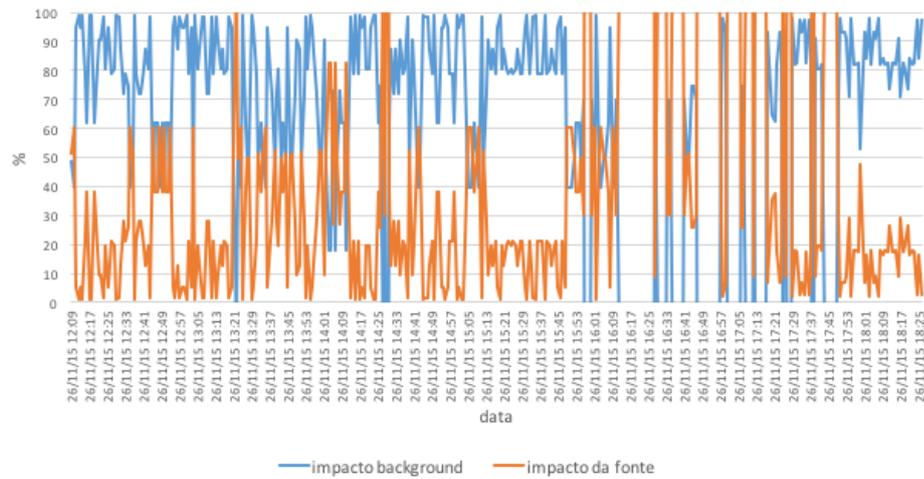
Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	22,30 %	77,69 %
Modelo 2 (Básico 2)	27,05 %	72,94 %
Modelo 3 (Profissional)	50,32 %	49,67 %
Modelo 4 (Saúde)	13,40 %	86,59 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Os Gráficos 15, 16 e 17 apresentam os impactos provocados pelo alimentador profissional da UFPA, na tensão do 3º harmônico, nas fases A, B e C da cabine de medição, respectivamente, utilizando o modelo não paramétrico.

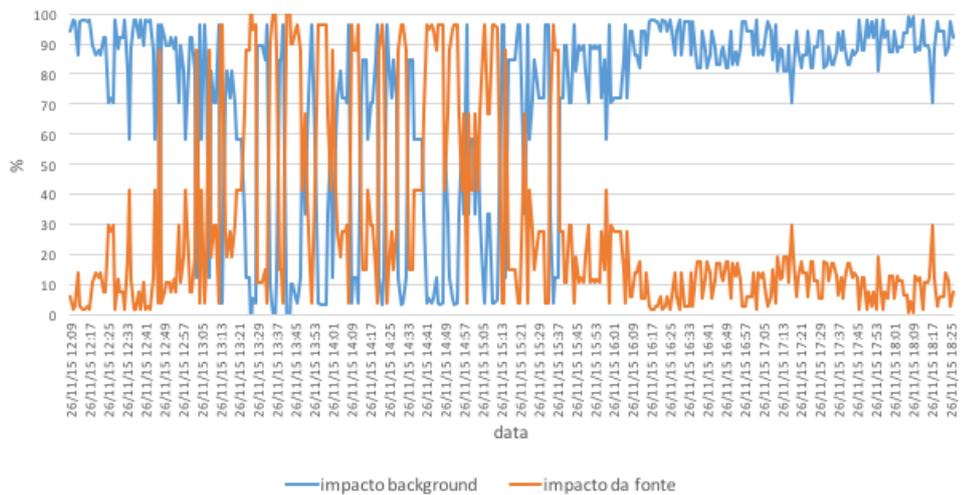
A partir dos Gráficos, é possível observar que há uma variabilidade bastante elevada dos impactos utilizando os modelos não paramétricos, sendo que, em certos instantes, o impacto do alimentador profissional está acima do causado pelo *background*, e vice-versa.

Gráfico 15 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase A, da cabine de medição - modelo não paramétrico



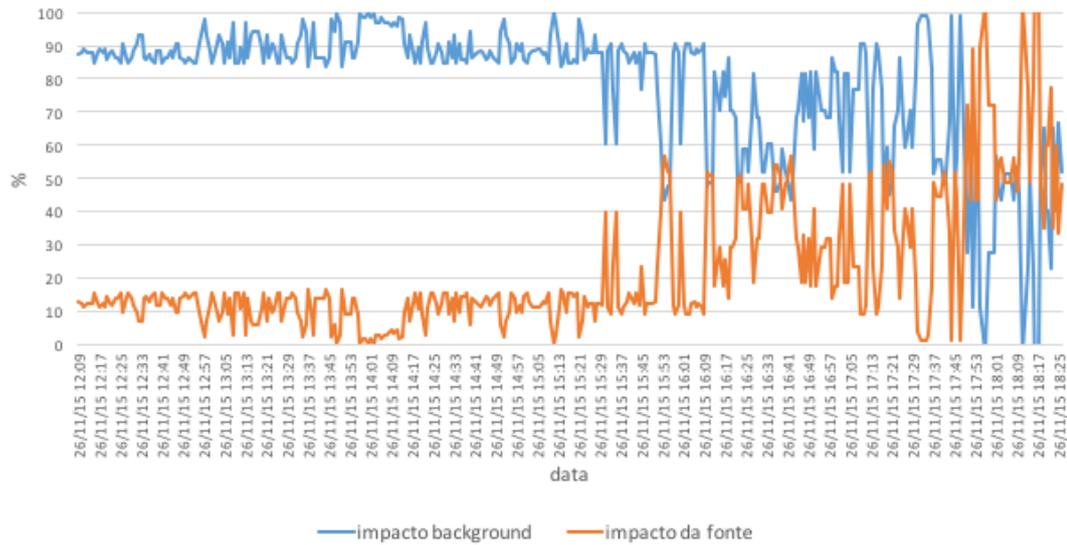
Fonte: SISGEE, elaborado pelo autor (2015)

Gráfico 16 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase B, da cabine de medição - modelo não paramétrico



Fonte: SISGEE, elaborado pelo autor (2015)

Gráfico 17 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 3º harmônico da fase C, da cabine de medição - modelo não paramétrico



Fonte: SISGEE, elaborado pelo autor (2015)

Resumidamente, na Tabela 24, apresentam-se os impactos dos alimentadores da UFPA, na tensão do 3º harmônico, aplicando-se o modelo não paramétrico.

Tabela 24 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 3º harmônico das fases A, B e C da cabine de medição – modelo não paramétrico

MODELO NÃO PARAMÉTRICO 3º HARMÔNICO	Modelo 1 (básico 1)			Modelo 2 (Básico 2)			Modelo 3 (Profissional)			Modelo 4 (Saúde)		
	FASES			FASES			FASES			FASES		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
IMPACTO DA FONTE HARMÔNICA (%)	44,15	43,21	22,30	36,16	51,07	27,05	45,71	43,35	50,32	19,65	65,31	13,40
IMPACTO DO BACKGROUND (%)	55,84	43,21	77,69	63,83	48,92	72,94	54,28	56,64	49,67	80,34	34,38	86,59
R ²	0,06	0,71	0,69	0,65	0,46	0,34	0,40	0,46	0,92	0,05	0,56	0,08

Fonte: SISGEE (2015)

5.3.3.2. 5º harmônico

As Tabelas 25, 26 e 27 apresentam os impactos gerais provocados pelos alimentadores básico 1, básico 2, profissional e saúde, na tensão do 5º harmônico, nas fases A B e C da cabine de medição geral da UFPA, respectivamente, para o segundo período de medição, utilizando os modelos não paramétricos.

Podemos observar, nas Tabelas 25 e 26 que o impacto harmônico na tensão da fase A e B, da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador da profissional, apresentou um valor percentual maior que os provocados pelos outros alimentadores.

Além disso, é importante ressaltar que todos os modelos lineares apresentaram R^2 com valores altos, o que indica que esses modelos apresentam um grau de confiabilidade bastante similar entre si, assim como visto nas fases A e B.

Tabela 25 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase A, da cabine de medição - modelo não paramétrico

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	91,89 %	8,1 %
Modelo 2 (Básico 2)	85,40 %	14,59 %
Modelo 3 (Profissional)	91,32 %	8,68 %
Modelo 4 (Saúde)	85,65 %	14,34 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Tabela 26 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase B, da cabine de medição - modelo não paramétrico

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	96,66 %	3,33 %
Modelo 2 (Básico 2)	87,41 %	12,58 %
Modelo 3 (Profissional)	91,30 %	8,69 %
Modelo 4 (Saúde)	91,02 %	8,97 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Porém, o impacto harmônico na tensão da fase C. da cabine de medição da UFPA, devido ao alimentador da saúde, apresentou um valor percentual maior que os provocados pelos outros alimentadores da UFPA.

Além disso, é importante ressaltar que todos os modelos lineares apresentaram R^2 com

valores altos, o que indica que esses modelos apresentam um grau confiabilidade bastante similar entre si, assim como visto nas fases A e B, conforme Tabela 27.

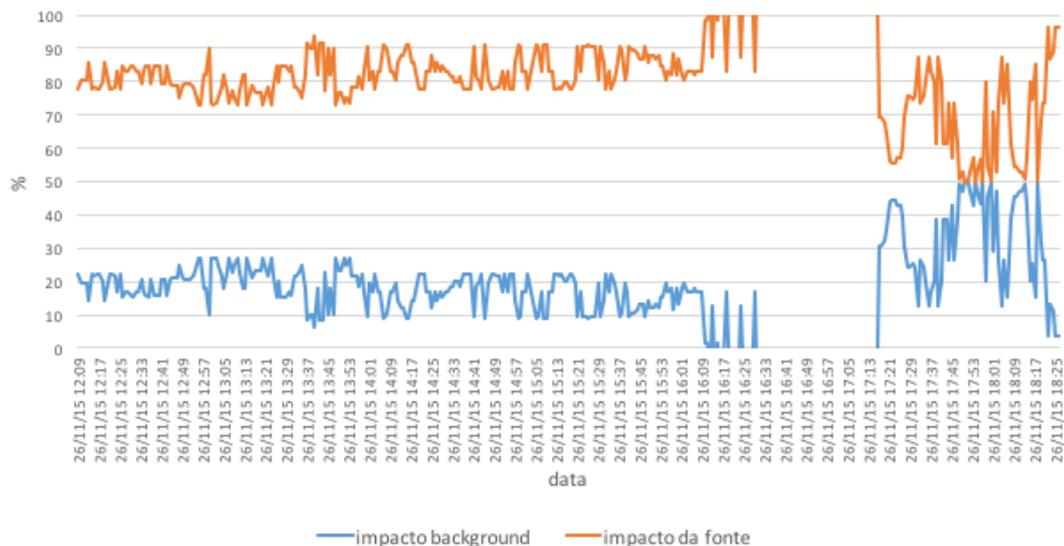
Tabela 27 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico da fase C, da cabine de medição - modelo não paramétrico

Modelos	Impacto da fonte harmônica (%)	Impacto do <i>Background</i> (%)
Modelo 1 (Básico 1)	25,35 %	74,64 %
Modelo 2 (Básico 2)	48,22 %	51,77 %
Modelo 3 (Profissional)	46,08 %	53,91 %
Modelo 4 (Saúde)	73,98 %	26,01 %

Fonte: elaborado pelo autor (2015)

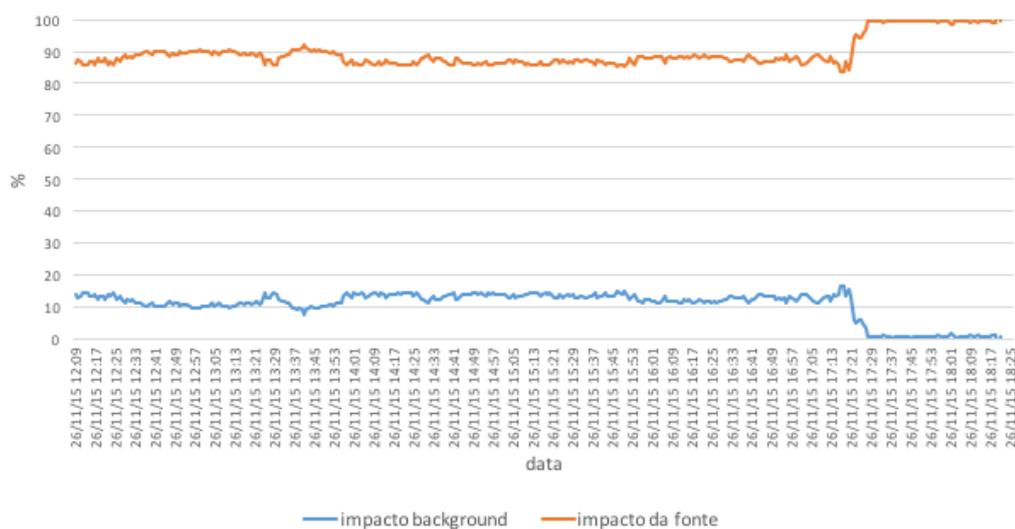
Os Gráficos 18, 19 e 20 apresentam os impactos provocados pelo alimentador profissional da UFPA, na tensão do 5º harmônico nas fases A, B e C da cabine de medição, respectivamente, utilizando o modelo não paramétrico. De acordo com os Gráficos, o impacto do alimentador profissional manteve-se acima do causado pelo *background* somente na fase C.

Gráfico 18 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase A, da cabine de medição - modelo não paramétrico



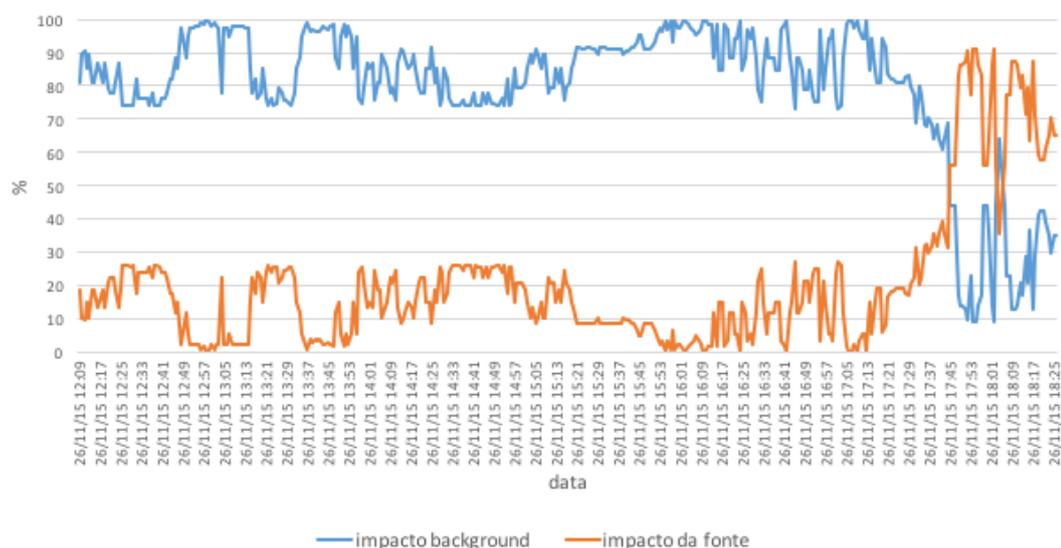
Fonte: SISGEE, adaptado pelo autor (2015)

Gráfico 19 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase B, da cabine de medição - modelo não paramétrico



Fonte: SISGEE, adaptado pelo autor (2015)

Gráfico 20 – Impacto do alimentador profissional na tensão do 5º harmônico da fase C, da cabine de medição - modelo não paramétrico



Fonte: SISGEE, adaptado pelo autor (2015)

Resumidamente, na Tabela 28, demonstram-se os impactos dos alimentadores da UFPA, na tensão do 5º harmônico, aplicando-se o modelo não paramétrico.

Tabela 28 - Impactos dos alimentadores da UFPA na tensão do 5º harmônico das fases A, B e C da cabine de medição – modelo não paramétrico

MODELO NÃO PARAMÉTRICO 5º HARMÔNICO	Modelo 1 (básico 1)			Modelo 2 (Básico 2)			Modelo 3 (Profissional)			Modelo 4 (Saúde)		
	FASES			FASES			FASES			FASES		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
IMPACTO DA FONTE HARMÔNICA (%)	91,89	96,66	25,35	85,40	87,41	48,22	91,32	91,30	46,08	85,65	91,02	73,98
IMPACTO DO BACKGROUND (%)	8,1	3,33	74,64	14,59	12,58	51,77	8,68	8,69	53,91	14,34	8,97	26,01
R ²	0,48	0,46	0,54	0,47	0,41	0,53	0,48	0,51	0,57	0,59	0,59	0,56

Fonte: SISGEE (2015)

5.4. Considerações finais

No presente capítulo, apresentou-se os modelos de regressão lineares e não paramétricos que caracterizam as relações existentes entre as correntes harmônicas de ordem 3 e 5 dos blocos básico 1, básico 2, profissional e saúde com as tensões de mesma ordem harmônica nas fases A, B e C da cabine de medição da UFPA.

Durante o caso 2, as medidas obtidas geram modelos lineares e não paramétricos com R^2 maiores do que os modelos criados no caso 1. Esse fato pode ter ocorrido em virtude dos blocos da UFPA terem funcionado normalmente durante o período do caso 2, enquanto que, no caso 1, a UFPA estava em greve.

Os modelos não paramétricos apresentaram melhores ajustes do que os modelos lineares, com exceção dos modelos da Figura 29, no qual ambos mostraram que o bloco básico 1 não exercer influência na tensão do 3º harmônico na fase da cabine de medição.

Os modelos lineares e não paramétricos que apresentaram o R^2 com um valor muito alto e próximos implicaram em impactos com valores próximos, como os modelos mostrados na Figura 37, cujo o impacto determinado pelo modelo linear foi 49,6%, enquanto que o impacto determinado pelo não paramétrico foi de aproximadamente 50 %.

Nas situações em que os modelos não paramétricos aumentavam o valor do R^2 de moderado para alto, os impactos sofriam uma mudança significativa, como no caso do modelo da Figura 36, cujo impacto sofreu uma alteração de 32,39% para 43,35 %.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia para a identificação das fontes de distorção harmônica e o impacto destas nas tensões nos pontos de interesse da rede elétrica. A metodologia foi baseada, exclusivamente, em medições simultâneas das magnitudes de corrente e tensão, e na aplicação dos modelos de regressão para expressar a correlação entre a tensão no ponto de interesse da rede elétrica e as correntes das cargas não lineares de mesma ordem harmônica.

Dois modelos de regressão foram utilizados, denominados modelo linear e não paramétrico e avaliados seus desempenhos com base no coeficiente de explicação ou de determinação (R^2), que descreve o grau de correlação entre as variáveis envolvidas. Em seguida, determinou-se os impactos dessas fontes no respectivo ponto de interesse.

O modelo de regressão não paramétrico supera a limitação do modelo linear, que considera o *background* (contribuição das outras fontes) constante durante todo o período de análise, o que não é uma boa hipótese para a maioria dos casos práticos, pois se sabe que os harmônicos apresentam um caráter bastante variável ao longo do tempo de observação inclusive comportamento desequilibrado entre as fases. A hipótese de *background* constante usualmente é verdadeira somente para pequenos intervalos de tempo, como aqueles de alguns segundos ou poucos minutos. Destaca-se que este é um ponto de contribuição desta tese, o que torna a regressão não paramétrica possível de ser aplicada para intervalos de tempo mais longos, como por exemplo, de uma semana, com integralização de 10 minutos, correspondendo aos procedimentos recomendados pelo PRODIST.

Para a análise de fontes harmônicas com variações mais rápidas, como por exemplo, fornos elétricos a arco, o intervalo de integralização deve ser menor para representar adequadamente a dinâmica dessas cargas. Nestes casos, o uso da regressão linear simples pode dar bons resultados, comparáveis àqueles obtidos com a regressão não paramétrica.

O modelo de regressão não paramétrica apresentou uma grande flexibilidade na estimação do modelo, uma vez que torna possível a realização de um ajuste mais efetivo das amostras de dados, e, portanto, é capaz de caracterizar a influência de cada fonte harmônica de forma mais detalhada e para todo o período de medição, diferentemente do modelo estimado por regressão linear, a qual se limita a uma única equação de reta, para modelar todo o conjunto de dados.

Dessa forma, entende-se que a principal contribuição desta tese consiste na proposição

de metodologia capaz de identificar as fontes harmônicas e quantificar os impactos dessas fontes na tensão do sistema, a partir de campanhas de medição simultâneas, envolvendo somente os valores RMS das tensões e correntes. Isso torna este procedimento de cunho prático para a utilização nas empresas de energia elétrica, agentes reguladores, e outras aplicações, antecipando-se a regulamentação das responsabilidades com relação à geração de harmônicos.

6.1. Propostas para trabalhos futuros

Como propostas para futuros trabalhos podem-se apresentar

- Desenvolver modelos para a identificação de fontes harmônicas e calcular seus impactos, com a utilização de medições fasoriais síncronas (MFS);
- Realizar estudos experimentais, em ambiente controlado de laboratório, para a avaliação do desempenho de modelos para a identificação de fontes harmônicas e seus impactos;
- Investigar o emprego de outros modelos de regressão não paramétrica, e inteligência computacional como Redes Neurais Artificiais, Árvores de Regressão, entre outros, de tal forma a determinar o desempenho dos mesmos na identificação e estimação do impacto harmônico.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica – Revisão 6**. In: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2015.
- ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo; SAMPAIO, Raimundo Furtado; LEÃO, Ruth Pastôra Saraiva. **Harmônicos em Sistemas Elétricos** – São Paulo: Elsevier, 2014.
- ARRILLAGA, Jos et al. **Power System Harmonic Analysis**. John Wiley & Sons, 2008.
- ARRILLAGA, Jos; WATSON, Neville R. e CHEN, S. **Power System Quality Assessment**. John Wiley & Sons, 2001.
- ARRILLAGA, Jos; WATSON, Neville R. **Power System Harmonics**. John Wiley & Sons, 2003.
- ARRUDA, E. F.; KAGAN, N. **Estimação de Estados Harmônicos Usando Estratégias Evolutivas**. In: Revista Controle & Automação, São Paulo, v. 20, n. 2, p.177-191, abril, maio e junho, 2009.
- BAGGINI, Angelo. **Handbook of Power Quality**. John Wiley & Sons, 2008.
- BARBOSA, Tiago; SALLES, Diogo; FREITAS, Walmir. **Fluxo de Carga Harmônico Multifásico**. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, Campinas. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012. São Paulo: Unicamp, 2012. p. 4739 - 4746.
- BARROS, Benjamim Ferreira de; BORELI, Reinaldo e GEDRA, Ricardo L. **Gerenciamento de energia: ações administrativas e técnicas de uso adequado da energia elétrica**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2010.
- BLOOMING, Thomas M. et al. **Application of IEEE Std 519-1992 Harmonic Limits**. Conference Record of the 2006 IEEE IAS Pulp and Paper Conference. IEEE Std 519-1992 Harmonic Limits Discussion, 2006.
- BOLLEN M. H. J. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sag and interruptions** – Piscataway: IEEE Press on Power Engineering, 2000.
- CHARNET, R. *et al.* **Análise de Modelos de Regressão Linear com aplicações** – São Paulo: Editora Unicamp, 2008.
- CONCEIÇÃO, G. M., SALDIVA, P. H., SINGER, J. M. **Modelos MLG e MAG para análise da associação entre poluição atmosférica e marcadores de morbi-mortalidade: uma introdução baseada em dados da cidade de São Paulo**. In: Ver. Bras. Epidemiol., vol. 4, 2011, p. 203-219.
- COSTA, G.G.O. **Curso de Estatística inferencial e probabilidades: teoria e prática**. – São Paulo: Atlas, 2012.

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

DAVIS, Eric J.; EMANUEL, Alexander E. e PILEGGI, David J. **Harmonic Pollution Metering: Theoretical Considerations**. In: IEEE transactions on power delivery, vol. 15, no. 1, January 2000, p. 19-23.

DUGAN, Roger C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. Second Edition. McGraw-Hill, 2004.

ELETROBRÁS *et al.* **7-Energia Elétrica: Conceito, Qualidade e Tarifação, Guia Básico**. Brasília: IEL/NC, 2008.

ELGERD, Olle I. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica - Computação Aplicada a Sistemas de Geração e Transmissão de Potência**. São Paulo: McGraw-Hill, 1978.

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

GARCIA, Flávio Resende. **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>. Acesso em: 10 nov. 2015.

HSU, HWEI P. **Schaum's Outline series of Theory and Problems of Probability, Random Variables, and Random Process**. McGraw Hill, 1997.

IEC. **Std. 61000-3-2, ed.3.2: Electromagnetic compatibility (EMC): Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)**. Internacional Electrotechnical Commission, 2009.

IEEE-SA. **Std. 519: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 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). Sept. 2010, p. 1-7.

KENNEDY B. W. **Power Quality Primer**. McGraw-Hill, 2000.

LI, Chun; XU, Wilsun; TAYJASANANT, Thavatchai. **A "Critical Impedance"-Based Method for Identifying Harmonic Sources**. In: IEEE transactions on power delivery, vol. 19, no. 2, April 2000, p.671-678.

LIU, Yilu; XU, Wilson; **A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling**. In: IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 2, April 2000, p. 804 –

MAGALHÃES, Christiane Marques Sousa. **Análise do impacto de conservadores de frequência na qualidade da energia do sistema de distribuição de uma indústria de petró-**

leo. 2010, 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2010.

MARCELO JR., José Rubens; OLIVEIRA, José Carlos de; SANTOS, Ivan Nunes. **Modified Superposition Method for Assignment of Responsibilities on Harmonic Distortions**. In: IEEE Electrical Power Quality and Utilization (EPQU), oct. 2011, p.1-5.

MAZIN, Hooman E.; XU, Wilson. **Determining the Harmonic Impacts of Multiple Harmonic-Producing Loads**. In: IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, April 2011, p. 1187 –

MAZIN, Hooman Erfanian; TAYJASANANT Thavatchai; XU, Wilsun. **A Method to Determine the Harmonic Contributions of Multiple Loads**. In: IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 2009, p.1-6.

MAZUMDAR, Joy; et al. **A Novel Method Based on Neural Networks to Distinguish Between Load Harmonics and Source Harmonics in a Power System**. In: Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa. July 2005, p. 477-484.

MCEACHERN, Alex. **Designing Electronic Devices to Survive Power-Quality Events**. In: IEEE Industry Applications Magazine, vol. 6, no. 6, p. 66-69, November – December, 2000.

MCGRANAGHAN, Mark; ROETTGER, Bill. **Economic Evaluation of Power Quality**. In: IEEE power Engineering review, vol. 22, no. 2, pp.8-12, February,2002.

MIRANDA, Thiago N. **Fatores críticos de sucesso na implantação de um sistema de informação na Pró-Reitoria de Administração da UFPA**. 2015, 110 f. Monografia (Especialização Em Gestão da Tecnologia da Informação) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2015.

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

MORENO, Hilton **Harmônicas nas Instalações Elétricas: causas, efeitos e soluções**. São Paulo: Procobre, 2001, p.66

OLIVEIRA, D.sc. J. T. et al. **Fluxo de Carga Harmônico para Operação e Planejamento de Sistemas Radiais de Distribuição através dos Métodos Soma de Potências e Montagem da Matriz Impedância de Barras**. In: II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2003, Bahia. Anais do II CITENEL. Bahia: UNIFACS, 2004. v. 2, p. 777 - 781.

ONS. **Módulo 2: Requisitos mínimos para instalações de transmissão e gerenciamento de indicadores de desempenho – Revisão 2.0**. In: Procedimentos de Rede Operador Nacional do Sistema Elétrico. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2011.

PAULILLO, Gilson; TEIXEIRA, Mateus Duarte. **Capítulo II – Harmônicos – Conceitos**. In: Revista o Setor Elétrico – Qualidade de Energia, Nº 85, p.35-42, fev. 2013. Disponível em:

<http://www.osestoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed85_fasciculo_qualidade_ca p2.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2015.

PAULILLO, Gilson; TEIXEIRA, Mateus Duarte. **Capítulo VII – Flutuações de Tensão**. In: Revista o Setor Elétrico – Qualidade de Energia, N° 90, p.38-47, jul. 2013. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed-90_Fasciculo_Cap-VII-Qualidade-de-energia.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2015.

PECK, Roxy; OSLEN, Chris; DEVORE, Jay. **Introduction to Studies & Data Analysis**. Brooks/Cole, CANGAGE Learning. 2012.

PFAJFAR, Tomaz; et al. **Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method**. In: IEEE transactions on power delivery, vol. 23, no. 1, January 2008, p. 425-433.

RYAN, Thomas P. **Modern Regression Methods**. 2ª Ed. Wiley, 2009.

SCHNEIDER. **Workshop Instalações Elétricos de Baixa Tensão – Qualidade de Energia Harmônicas**. Schneider/Procobre, 2003. Disponível em: <http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2015.

SMITH, D.M.; VENABLES, W.N. **An Introduction to R. Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics Version 3.2.3**. R Core team, 2015. Disponível em <<https://cran.r-project.org/manuals.html>> Acesso em: 20 out. 2015.

SOARES, Thiago Mota. **Estimação da contribuição de múltiplas fontes harmônicas utilizando regressão não paramétrica**. 2012, 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2012.

STAGG, Glenn W, EL-ABIAD, Ahmed H. **Computação Aplicada a Sistemas de Geração e Transmissão de Potência**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.

STOTT, B., **Power System Load Flow Calculation**. Rio de Janeiro: Comissão de Publicações da COPPE/UFRJ – PDD 16/78, 1978.

STYVAKTAKIS, Emmanouil. **Automating Power Quality Analysis**. 2002. 218 f. Tese (Doutorado) - Curse of Philosophy, Department Of Electric Power Engineering And Department Of Signals And Systems, Chalmers University Of Technology, Suécia, 2002. Disponível em: <<http://webfiles.portal.chalmers.se/et/PhD/StyvaktakisEmmanouilPhD.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2015.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise das Distorções Harmônicas - Estudo de Caso de um Sistema Industrial**. 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/308M.PDF>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

THOMPSON Marc, Kusko Alex. **Power Quality in Electrical Systems**. 12 st ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

TOSTES, Maria Emília de Lima et al. **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.

TOSTES, Maria Emília de Lima. **Avaliação dos impactos causados pela geração de harmônicos na rede de distribuição em consumidores em baixa tensão**. 2003, 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Minicurso de Estatística Básica: Introdução ao Software R**. In: Programa de Educação Tutorial – Engenharia Elétrica. Santa Maria, 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Curso sobre o Programa Computacional R**. Paraná, 2005. Disponível em: <<http://www.leg.ufpr.br/Rpira/Rpira.pdf>> Acesso em: 12 dez. 2015.

UNRAR, Ozgur *et al.* **Identification of Harmonic Current Contributions of Iron and Steel Plants Based on Time-Synchronized Field Measurements—Part I: At PCC**. IEEE transactions on industry applications, vol. 50, no. 6, November/December 2014, p.4336-4347.

UNRAR, Ozgur *et al.* **Identification of Harmonic Current Contributions of Iron and Steel Plants Based on Time-Synchronized Field Measurements—Part II: Inside Plants**. IEEE transactions on industry applications, vol. 50, no. 6, November/December 2014, p.1-7.

VARIZ, Abílio Manuel et al. **Cálculo do Fluxo de Harmônicos em Sistemas de Potência Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes com Solução Iterativa**. In: Revista Controle e Automação, Rio de Janeiro, v. 19, maio e junho 2008, p.178-198

VARIZ, Abilio Manuel. **Cálculo do Fluxo de Harmônicas em Sistemas Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes**. 2006, 258 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2006.

WAND, M.P.; JONES, M.C. **Kernel Smoothing**. Chapman and Hall, 1995.

WASSERMAN, Larry. **All of Nonparametric Statistics**. Springer, 2006.

YIN, Zhiming; SUN, Yuanyuan e YU, Tao. **New Methods Exploration for Harmonic Sources Identification Technologies**. In: Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), July 2011 p. 399-402.

TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE A ELABORAÇÃO DA TESE

BARBOSA, R.O. *et al.* **Proposta de Sistema de Gestão do Consumo de Energia da Universidade Federal do Pará.** In: 10th Latin-American Congress of Electricity Generation and Transmission, 2013.

RODRIGO, Allan *et al.* **Sistema de Monitoramento *On Line* de Qualidade de Energia na Universidade Federal do Pará.** In: 11th Latin-American Congress of Electricity Generation and Transmission, 2015.

FILHO, Alcenor S. *et al.* **Avaliação da Eficiência Energética em Edificações de um Campus Universitário de Acordo com o Processo Analítico do RTQ-C.** In: XI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, julho, 2015.

TRABALHO EM FASE DE PUBLICAÇÃO

MATOS, E. O.; *et al.* **Using Linear and Nonparametric Regression Models to Determinate the Contribution of Nonlinear Loads on the Voltage Harmonic Distortions in the Electrical Grid.** Em análise para publicação no periódico Generation, Transmission and Distribution (IET). ID: GTD-2015-0948.