

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

**ESTIMAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DE MÚLTIPLAS FONTES
HARMÔNICAS UTILIZANDO REGRESSÃO NÃO PARAMÉTRICA**

(capa dura)

THIAGO MOTA SOARES

DM 07 / 2012

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2012

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

THIAGO MOTA SOARES

**ESTIMAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DE MÚLTIPLAS FONTES
HARMÔNICAS UTILIZANDO REGRESSÃO NÃO PARAMÉTRICA**

DM 07 / 2012

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará - Brasil
2012

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

THIAGO MOTA SOARES

**ESTIMAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DE MÚLTIPLAS FONTES
HARMÔNICAS UTILIZANDO REGRESSÃO NÃO PARAMÉTRICA**

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

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2012

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

ESTIMAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DE MÚLTIPLAS FONTES HARMÔNICAS
UTILIZANDO REGRESSÃO NÃO PARAMÉTRICA

AUTOR: THIAGO MOTA SOARES

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

APROVADA EM: 22/03/2012

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dra. Maria Emilia de Lima Tostes
(ORIENTADORA – UFPA)

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra
(MEMBRO – UFPA)

Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
(MEMBRO – UFPA)

Prof. Dr. Raimundo Nonato das Mercês Machado
(MEMBRO – UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
(COORDENADOR DO PPGEE / ITEC / UFPA)

Aos meus pais Celso e Vilma pelo amor e dedicação.

Ao meu irmão Bruno pelo apoio e companheirismo.

À minha namorada Gisele, pelo amor e carinho

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a Deus por ter me concedido o dom da vida, sem a qual nada seria possível.

Aos meus pais Celso e Vilma, pela educação, dedicação e amor, e ao meu irmão Bruno pelo apoio, amizade e companheirismo em todos os momentos de minha vida.

À minha família por estarem sempre torcendo pela minha vitória.

À minha namorada Gisele pelo apoio, amor, companheirismo e confiança.

À minha orientadora prof^a Emília pela confiança, amizade, aprendizagem e oportunidade dadas a mim.

Ao Rogério, Allan, Paulo, Vitor, João Paulo, e todas outras pessoas que fazem parte da família CEAMAZON pela aprendizagem, confiança e amizade.

Ao Professor Ubiratan pela amizade e aprendizagem dadas a mim.

Ao Marcelo, Thiago, Lourival, Daniel, Marcos e Davi pela amizade e aprendizagem oferecidas a mim.

À CAPES através do custeio da bolsa de estudo.

E a todos que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Resumo

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para estimar a contribuição harmônica de múltiplas cargas geradoras de harmônicos na distorção de tensão de um sistema elétrico. Essa metodologia cria modelos estatísticos que descrevem o comportamento da tensão harmônica de um sistema elétrico qualquer em função da corrente harmônica das cargas presentes nele, de tal forma, que seja possível avaliar o impacto das cargas geradoras de harmônicos nos níveis de distorção harmônica de tensão do sistema elétrico em análise. A criação desses modelos é realizada com base no método estatístico chamado de regressão polinomial local de kernel, que é um método de regressão não paramétrica, cuja característica principal é criar modelos não condicionados a uma família específica de curvas de regressão, ou seja, os dados são os únicos responsáveis pelo formato do modelo. Uma vez criado o modelo, estima-se a tensão harmônica que as cargas provocaram no período em análise e, por fim, avalia-se seu valor em relação à medida.

Palavras Chaves: regressão polinomial local de kernel, distorção harmônica, regressão não paramétrica, cargas geradoras de harmônicos.

Abstract

This paper presents a new methodology for estimating the contribution of multiple harmonic-producing loads in the voltage harmonic distortion in an electrical system. This method creates statistical models that describe the behavior of the harmonic voltage of an electrical system in function of the harmonic current of the loads present in the system so that it is possible to evaluate the impact of harmonic-producing loads in the levels of harmonic voltage in the electrical system under consideration. The creation of these models is performed based on the statistical method called local polynomial kernel regression, which is a nonparametric regression method, whose main feature is to create models not conditional on a specific family of regression curves, that is, data are solely responsible for the shape of the model. Once the model is created, it is estimated the harmonic voltage caused by the loads in the period under consideration, and, finally, this voltage is evaluated in relation to the harmonic voltage measured.

Keywords: local polynomial kernel regression, nonparametric regression, harmonic distortion, harmonic-producing loads

Sumário

Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 – Considerações Iniciais	1
1.2 – Estado da Arte	2
1.3 – Estrutura do Trabalho	4
Capítulo 2 – Harmônicos nos Sistemas Elétricos	6
2.1 – Introdução	6
2.2 – Distorção Harmônica	6
2.3 – Fontes de Correntes Harmônicas	11
2.3.1 – Transformadores	12
2.3.2 – Fornos Elétrico a Arco	14
2.3.3 – Lâmpada Fluorescente	16
2.3.4 – Conversor de Frequência	18
2.4 – Efeitos das Distorções Harmônicas	20
2.4.1 – Efeito Skin	21
2.4.2 – Ressonância Harmônica	22
2.5 – Normas para Distorção Harmônica	23
2.6 – Conclusão	25
Capítulo 3 – Análise de Regressão.....	27
3.1 – Introdução.....	27
3.2 – Conceitos Fundamentais	27
3.2.1 – Probabilidade	28
3.2.2 – Variável Aleatória	28
3.2.3 – Função Discreta de Probabilidade	31
3.2.4 – Função de Distribuição de Probabilidade	31
3.2.5 – Função de Densidade de Probabilidade	32
3.3 – Análise de Regressão	33

3.3.1 – Regressão Linear Simples	34
3.3.2 – Regressão Polinomial Local de Kernel	37
3.4 – Conclusão	41
Capítulo 4 – Metodologia e Resultados	42
4.1 – Introdução	42
4.2 – Metodologia Proposta	43
4.3 – Estudo de Casos	49
4.3.1 – Estudo de Caso 1	49
4.3.1.1 – Avaliação do Impacto da Casa A na Distorção de Tensão do Transformador.....	56
4.3.1.2 – Avaliação do Impacto da Casa B na Distorção de Tensão do Transformador.....	65
4.3.2 – Estudo de Caso 2.....	67
4.3.2.1 – Avaliação do Impacto da Fonte Harmônica 1 na Tensão do 3º Harmônico da Barra de 34,5 kV.....	70
4.3.2.2 – Avaliação do Impacto da Fonte Harmônica 2 na Tensão do 3º Harmônico da Barra de 34,5 kV.....	78
4.4 – Conclusão.....	84
Capítulo 5 – Conclusão.....	85
Referência Bibliográfica.....	87

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente de uma lâmpada fluorescente compacta.....	7
Figura 2.2 – Carga não linear provocando o surgimento de distorção na tensão de uma rede elétrica.....	8
Figura 2.3 – Decomposição de uma onda distorcida em suas componentes harmônicas.....	9
Figura 2.4 – Diagrama esquemático e curva de magnetização de um transformador.....	12
Figura 2.5 – Geração de harmônicos na corrente de magnetização de um transformador.....	13
Figura 2.6 – Forma de onda da corrente de magnetização e o seu conteúdo harmônico.....	13
Figura 2.7 – Forno elétrico a arco trifásico.....	14
Figura 2.8 – Gráfico Tensão-corrente de um forno a arco.....	15
Figura 2.9 – Forma de onda da corrente de um forno a arco.....	15
Figura 2.10 – (a) Conteúdo harmônico gerado por um forno a arco durante a etapa de fusão (b) Conteúdo harmônico gerado por um forno a arco gerado na etapa de refinamento.....	16
Figura 2.11 – Forma de onda tensão e corrente de um reator eletromagnético.....	17
Figura 2.12 – Espectro da corrente harmônica de um reator eletromagnético.....	17
Figura 2.13 - Forma de onda tensão e corrente de um reator eletrônico.....	18
Figura 2.14 - Espectro da corrente harmônica de um reator eletrônico.....	18
Figura 2.15 – Estrutura de um conversor de frequência.....	19
Figura 2.16 – (a) Forma de onda da corrente de um conversor de frequência (b) Espectro harmônico gerado por um conversor de frequência.....	19
Figura 2.17 – Corrente de neutro devido a corrente do 3º harmônico das fases A, B e C.....	21
Figura 2.18 – Circuito ressonante série.....	22
Figura 2.19 – Circuito paralelo ressonante.....	23
Figura 3.1 – Uma variável aleatória associada com o lançamento de uma moeda.....	29
Figura 3.2 – Distribuição binomial com $n = 20$ e $p = 0,25$	32
Figura 3.3 – Três distribuições normais	33

Figura 3.4 – Modelo de regressão linear simples.....	36
Figura 3.5 – Exemplo de ajuste de uma curva de regressão pelo método de regressão polinomial local de kernel.....	38
Figura 3.6 - - (a) Função de Kernel Gaussiana (b) Função de Kernel Epanechnikov.....	38
Figura 3.7 – (a) Sobsuavização da curva de regressão (b) Sobresuavização da curva de regressão.....	40
Figura 4.1 – Sistema típico de transmissão ou distribuição.....	44
Figura 4.2 – Gráficos da corrente e da tensão do 7º harmônico medidos na carga A e na barra X, respectivamente.....	44
Figura 4.3 – Modelo de regressão entre a tensão e a corrente do 7º harmônico da barra X e da carga A, respectivamente.....	46
Figura 4.4 – Tensão do 7º harmônico na barra X provocada pela carga A.....	47
Figura 4.5 – Impacto da carga A na tensão do 7º harmônico da barra X durante o período e medição.....	47
Figura 4.6 – Fluxograma da metodologia proposta de estimação dos impactos harmônicos de múltiplas cargas.....	48
Figura 4.7 – Sistema típico de transmissão ou distribuição.....	50
Figura 4.8 – Gráfico da tensão do 3º e 5º harmônicos nas fases A, B e C do secundário do transformador T1.....	51
Figura 4.9 – Gráfico da corrente do 3º e 5º harmônicos nas fases A, B e C do secundário do transformador T1.....	52
Figura 4.10 – Gráfico da corrente do 3º e 5º harmônicos nas fases A, B e C da casa A.....	53
Figura 4.11 – Gráfico da corrente fundamental nas fases A, B e C da casa A.....	53
Figura 4.12 – Gráfico da corrente do 3º e 5º harmônicos nas fases A, B e C da casa B.....	54
Figura 4.13 – Gráfico da corrente fundamental nas fases A, B e C da casa B.....	55
Figura 4.14 – Modelo de regressão entre a tensão e corrente do 3º harmônico medidos na fase A do transformador de entrada e da casa A, respectivamente.....	56
Figura 4.15 – Tensão do 3º harmônico da fase A do transformador T1 provocada somente pela casa A.....	57
Figura 4.16 – Impacto da Casa A no nível de tensão do 3º harmônico da fase A do transformador de entrada do condomínio.....	58

Figura 4.17 – Modelo de regressão entre a tensão e corrente do 3º harmônico medidos na fase B do transformador de entrada e da casa A, respectivamente.....	59
Figura 4.18 – Tensão do 3º harmônico da fase B do transformador de entrada do condomínio devido à casa A.....	60
Figura 4.19 – Impacto da Casa A no nível de tensão do 3º harmônico da fase B do transformador de entrada do condomínio.....	61
Figura 4.20 – Modelo de regressão entre a tensão e corrente do 3º harmônico medidos na fase C do transformador de entrada e da casa A, respectivamente.....	62
Figura 4.21 – Tensão do 3º harmônico da fase C do transformador de entrada do condomínio devido à casa A.....	63
Figura 4.22 – Impacto da Casa A no nível de tensão do 3º harmônico da fase C do transformador de entrada do condomínio.....	63
Figura 4.23 – Diagrama unifilar da subestação em estudo.....	68
Figura 4.24 – Gráfico da taxa de distorção de tensão do 3º harmônico na barra de 34,5 kV.....	69
Figura 4.25 – Gráfico da taxa de distorção de corrente do 3º harmônico da fonte harmônica 1.....	69
Figura 4.26 – Gráfico da taxa de distorção de corrente do 3º harmônico da fonte harmônica 2.....	70
Figura 4.27 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 1.....	71
Figura 4.28 – Tensão do 3º harmônica da fase A da barra de 34,5 kV provocada pela FH1.....	72
Figura 4.29 – Tensão do 3º harmônica da fase A da barra de 34,5 kV provocada pela FH1.....	73
Figura 4.30 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase B da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase B da fonte harmônica 1.....	73
Figura 4.31 – Tensão do 3º harmônica da fase B da barra de 34,5 kV provocada pela FH1.....	74
Figura 4.32 – Tensão do 3º harmônica da fase B da barra de 34,5 kV provocada pela FH1.....	75
Figura 4.33 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase C da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase C da fonte harmônica 1.....	76

Figura 4.34 – Tensão do 3º harmônica da fase C da barra de 34,5 kV provocada pela FH1.....	77
Figura 4.35 – Tensão do 3º harmônica da fase C da barra de 34,5 kV provocada pela FH1.....	77
Figura 4.36 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2	78
Figura 4.37 – Tensão do 3º harmônica da fase A da barra de 34,5 kV provocada pela FH2.....	79
Figura 4.38 – Tensão do 3º harmônica da fase C da barra de 34,5 kV provocada pela FH1.....	80
Figura 4.39 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2.....	80
Figura 4.40 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2.....	81
Figura 4.41 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2.....	82
Figura 4.42 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2.....	82
Figura 4.43 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2.....	83
Figura 4.44 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica.....	84

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Relação existente entre componentes simétricas e ordem harmônica.....	11
Tabela 2.2 – Espectro das correntes harmônicas para fornos com diferentes potências.....	16
Tabela 2.3- Limites para distorção harmônica de tensão, segundo a norma IEEE-519.....	24
Tabela 2.4. Limites para distorção harmônica total e individual de corrente.....	24
Tabela 2.5. Valores de referência globais para distorções harmônicas totais.....	24
Tabela 2.6. Valores de referência globais para taxas de distorção harmônica individual.....	25
Tabela 4.1 – Aspectos relevantes dos modelos que descrevem a relação entre a casa A e a tensão do 5º harmônico do transformador.....	64
Tabela 4.2 – Aspectos relevantes dos modelos que descrevem a relação entre a casa B e a tensão do 3º harmônico do transformador.....	65
Tabela 4.3 – Aspectos relevantes dos modelos que descrevem a relação entre a casa B e a tensão do 5º harmônico do transformador.....	66

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Considerações Iniciais

O crescente desenvolvimento da eletrônica, propiciado pelo avanço da tecnologia dos semicondutores, tem provocado o aparecimento de diversos equipamentos eletrônicos como computadores, televisores digitais, máquinas de lavar roupa, lâmpadas compactas, inversores de frequência e outros, que por sua vez têm proporcionado uma série de benefícios e facilidades para os consumidores de um modo geral.

No entanto, a proliferação desses equipamentos eletrônicos nos sistemas elétricos também tem provocado um aumento significativo da distorção harmônica da corrente, e, conseqüentemente, da tensão nesses sistemas, uma vez que a natureza não linear desses equipamentos gera correntes harmônicas que são injetadas nas redes elétricas causando desvios nas formas de onda da corrente e da tensão.

Esse aumento dos níveis de distorção harmônica da tensão e da corrente são bastante danosos aos diversos equipamentos eletrônicos, entre outros, presentes nas redes elétricas, em virtude dos mesmos apresentarem uma alta sensibilidade a essas distorções, e, portanto, aumentando a probabilidade de ocorrência de falhas nesses equipamentos, e, conseqüentemente, a interrupção de processos industriais, interrupção do fornecimento de energia elétrica, queima de equipamentos, perdas econômicas, entre outros.

De forma a contornar essa situação, centros nacionais e internacionais de pesquisa do setor elétrico têm desenvolvido estudos que possibilitem descrever e caracterizar o problema da distorção harmônica, além de estabelecer limites para a quantidade de poluição harmônica presente nos sistemas elétricos e gerados pelos equipamentos eletro-eletrônicos, de tal forma a mitigar e controlar os níveis de distorção harmônica das redes elétricas.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) desenvolveu os procedimentos de distribuição de energia (PRODIST), que é um conjunto de documentos composto de oito módulos voltados para a normatização e padronização das atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de

distribuição de energia elétrica, dentre os quais no 8º módulo são estabelecidos limites de distorção harmônica total e individual de tensão para um sistema de distribuição qualquer.

Diante desse contexto, as concessionárias de energia elétrica tem se tornado cada vez mais preocupadas com o problema da distorção harmônica, uma vez que as mesmas podem sofrer sanções caso suas redes apresentem violações dos limites de distorção harmônica estabelecidos pelo PRODIST.

Então, observa-se que é de fundamental importância a implantação de um sistema de monitoração ou a realização de campanhas de medição em suas redes, de tal forma a acompanhar, periodicamente, a evolução dos níveis de distorção das mesmas visando a mitigação do problema antecipadamente à avaliação da ANEEL.

Atualmente, a forma mais comum de mitigação do problema da distorção harmônica se baseia na aplicação de filtros passivos, porém um aspecto importante que deve ser levado em consideração é identificar as principais fontes de harmônicos num sistema elétrico e conhecer a porcentagem de contribuição de cada uma de tal forma a mitigar com maior eficiência o problema.

Porém, atualmente, não há metodologias consolidadas que sejam capazes de estimar, com segurança, a contribuição harmônica das cargas geradoras de harmônicas nos sistemas elétricos, e, portanto, que sejam capazes de atribuir a parcela de responsabilidade a essas cargas pela distorção.

Sob esta ótica, o presente trabalho apresenta uma nova metodologia de avaliação do impacto de múltiplas cargas geradoras de harmônicos no sistema elétrico de tal forma que possibilite estimar a porcentagem de contribuição de múltiplas fontes harmônicas na distorção de um sistema qualquer.

1.2 – Estado da Arte

Atualmente, há poucos trabalhos voltados para a determinação do impacto de cargas geradoras de harmônicos na distorção da forma de onda da tensão de um sistema elétricos. A seguir, são abordados brevemente e de forma cronológica esses trabalhos.

Em Xu e Liu (1999), foi proposto um método capaz de decompor as correntes e tensões harmônicas do ponto de acoplamento comum em duas componentes: uma devida ao consumidor e outra devido à rede de suprimento de energia, de tal forma a quantificar a responsabilidade da concessionária e do consumidor para a violação dos

limites permissível de distorção, devida a ambas as variações de da fonte harmônica e da impedância. Neste método, tanto o consumidor quanto a rede elétrica é modelada como um equivalente de Norton.

Em Xu e Liu (2000), foi proposto um método voltado para determinar a contribuição harmônica do consumidor e da concessionária de energia no ponto de acoplamento comum. Esse método também é capaz de separar a corrente e tensão harmônicas em duas componentes: uma devido ao consumidor e a outra devido à rede elétrica. Além disso, esse trabalho realizou testes de sensibilidade quanto ao efeito do ângulo de fase, do erro de medição do ângulo de fase, do efeito da ressonância e do efeito do cancelamento harmônico.

Em Xu, Liu e Liu (2003), foi apresentado um estudo com objetivo de investigar a validade do método da direção da potência para a localização de fontes harmônicas, no qual mostrou-se que este método, que está baseado na direção da potência ativa, está teoricamente incorreto, e, portanto pode levar a resultado incorreto. A principal razão para afirmar que . Além disso, este trabalho sugere que a potência reativa possa representar uma melhor opção para avaliar a contribuição das fontes harmônicas.

Em Li, Xu e Tayjasanant (2003), foi proposto um método para determinar se o consumidor ou a concessionária apresenta maior contribuição harmônica no ponto de acoplamento comum, inspirado no fato de que a potência reativa, em detrimento da potência ativa, constitui um indicador mais confiável para identificar fontes harmônicas dominantes.

Em Nino e Xu (2007), foi apresentado um método de medição que pode determinar a fonte e a impedância harmônica para sistemas residenciais e comerciais supridos por um transformador monofásico, de tal forma que seja possível determinar a contribuição da fonte supridora de energia elétrica e do consumidor no ponto de acoplamento comum.

Em Dán (2009), foi proposta um método de identificação de fontes harmônicas com base em medições *on-site*. A partir das medições de tensão e corrente harmônica, este método propõe que seja calculada a impedância da rede e da carga, e que seja separada a contribuição da rede e da carga de tal forma a quantificar essa contribuição.

Em Xu, Mazin e Tayjasanant (2009), foi proposta uma metodologia, baseada no método de correlação de dados, para determinar a contribuição e o impacto harmônico de múltiplas cargas geradoras de harmônicos distribuídas num sistema elétrico. Nessa

metodologia, foi aplicado o método de regressão linear simples nos dados de corrente das fontes harmônicas e de tensão de uma barra do sistema.

Em Mazin, Xu e Huang (2011), foi proposto um indicador quantitativo para mensurar o impacto harmônico de múltiplas cargas geradoras de harmônico num sistema de transmissão ou distribuição. Este indicador foi obtido, a partir, das medições da tensão e da corrente harmônica com base da teoria de inferência estatística e da regressão linear múltipla.

Em Santos, Oliveira e Junior (2011), foi apresentado um estudo, onde, baseado no teorema da superposição de correntes e tensões harmônicas, buscou-se determinar a parcela de contribuição do consumidor e da rede elétrica no ponto de acoplamento comum. Além disso, um dos pontos focais desse trabalho foi propor um procedimento que possibilite a utilização do método da superposição sem o prévio conhecimento das impedâncias do consumidor e do sistema supridor.

Em Santos e Oliveira (2011), foi apresentado um estudo que visou avaliar o desempenho, via experimentos laboratoriais, da metodologia, baseada no método da superposição, para a atribuição de responsabilidade quanto à distorção harmônica no ponto de acoplamento comum entre a rede e o consumidor.

1.3 – Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos de tal forma a apresentar os resultados do estudo realizado assim como os fundamentos teóricos necessários para a realização do mesmo.

O capítulo 2 aborda os principais fundamentos a respeito do fenômeno da distorção harmônica, buscando conceituá-la, apresentando suas principais fontes, seus efeitos nas redes elétricas e as principais normas associadas à mesma.

O capítulo 3 aborda principalmente as técnicas utilizadas numa análise de regressão, voltando-se principalmente para a regressão linear e para regressão polinomial de kernel. Além disso, apresenta-se alguns conceitos básicos da estatística que são fundamentais para que se tenha um bom entendimento das técnicas utilizadas numa análise de regressão.

No capítulo 4, apresenta-se a metodologia proposta neste trabalho para estimar a contribuição das múltiplas cargas geradoras de harmônicos num sistema elétrico

qualquer. Além disso, apresentam-se os resultados provenientes de estudos de caso, nos quais foi utilizada a metodologia proposta.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e propostas para trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos nesta área.

Capítulo 2 – Harmônicos nos Sistemas Elétricos

2.1 – Introdução

Idealmente, as tensões e correntes presentes nos diversos pontos de uma rede elétrica, inclusive nos pontos de acoplamento comum entre a rede e os consumidores, devem ser puramente senoidais e, no Brasil, apresentar uma frequência de 60 Hz. Entretanto, na realidade, essas grandezas apresentam desvios em sua forma de onda senoidal, que, segundo Dugan *et al* (2003), tendem a serem maiores perto dos consumidores.

Esses desvios nas formas de onda da tensão e corrente são conhecidos como distorção da forma de onda, ou, de forma mais comum, como distorção harmônica e se devem à presença de harmônicos de corrente e tensão, nas diversas redes elétricas [ROSA, 2006].

Segundo Baggini (2008) e Rosa (2006), as distorções harmônicas sempre estiveram presentes nos sistemas elétricos, porém, no passado, não ofereciam grandes perigos aos equipamentos elétricos e, conseqüentemente aos sistemas elétricos, uma vez que os aspectos construtivos desses equipamentos eram conservativos, e, portanto, robustos. Além disso, os níveis de distorção harmônica eram pequenos, uma vez que haviam poucos equipamentos geradores de harmônicos, como: transformadores operando em regime de saturação, fornos a arco e máquinas de solda, e outros.

Atualmente, com avanço da eletrônica, os níveis de distorção harmônica de tensão e corrente têm aumentado de tal forma a se tornarem nocivos aos diversos equipamentos elétricos e eletrônicos ligados à rede elétrica, uma vez que os mesmos têm se tornado cada vez mais sensíveis à presença dos harmônicos.

O presente capítulo se propõe a apresentar alguns aspectos sobre os harmônicos como: o que são, como são gerados, quais são seus principais efeitos nos sistemas elétricos e quais normas estão associadas aos mesmos.

2.2 - Distorção Harmônica

A distorção harmônica pode ser definida como um desvio na forma de onda da tensão e corrente provocado pela presença de harmônicos de tensão e corrente nos

sistemas elétricos. E os harmônicos, por sua vez, são componentes senoidais, cujas frequências são múltiplas inteiras de uma frequência de referência denominada de frequência fundamental, que no caso do Brasil é 60 Hz.

A presença de harmônicos num sistema elétrico provoca de distorções na forma de onda da tensão e da corrente, uma vez que os mesmos se somam à componente fundamental. Além disso, os harmônicos são gerados por equipamentos ou cargas que apresentam características não lineares entre tensão e corrente. A figura 2.1 mostra a forma de onda e o espectro de harmônicos da corrente de uma lâmpada fluorescente compacta.

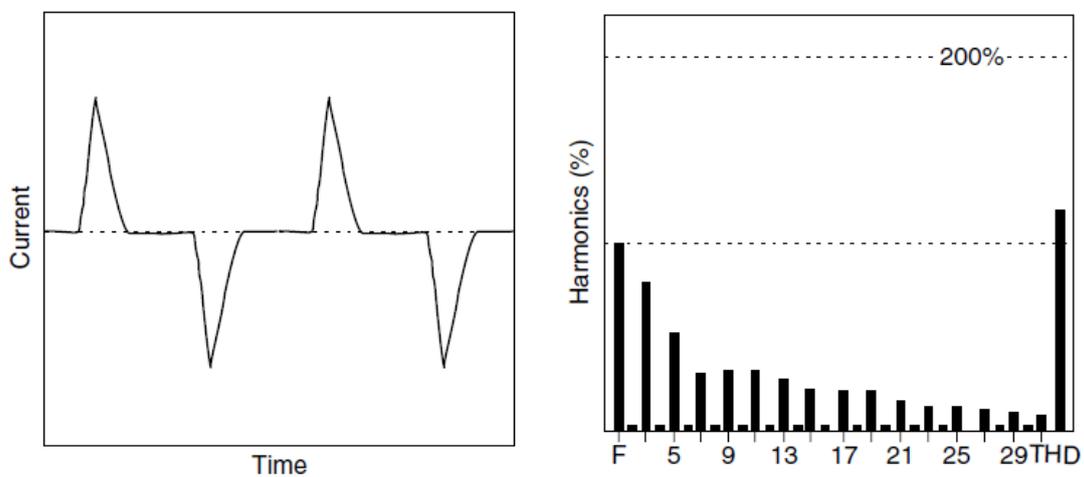


Figura 2.1 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente de uma lâmpada fluorescente compacta [BAGGINI, 2008]

As cargas não lineares, embora alimentadas por uma fonte de tensão puramente senoidal, absorvem uma corrente distorcida em virtude da não proporcionalidade existente entre tensão e corrente, que por sua vez provoca quedas de tensão em cada harmônico com sua passagem pela impedância série dos cabos e linhas de transmissão, e, conseqüentemente, causando uma distorção na tensão em diversos pontos de uma rede elétrica. Devido a esse fato, as cargas não lineares são normalmente tidas como fontes de correntes harmônicas, que, quando ligadas a um sistema elétrico, injetam correntes harmônicas no mesmo. A figura 2.2 ilustra como uma carga não linear que provoca o surgimento de distorção na tensão de uma rede elétrica.

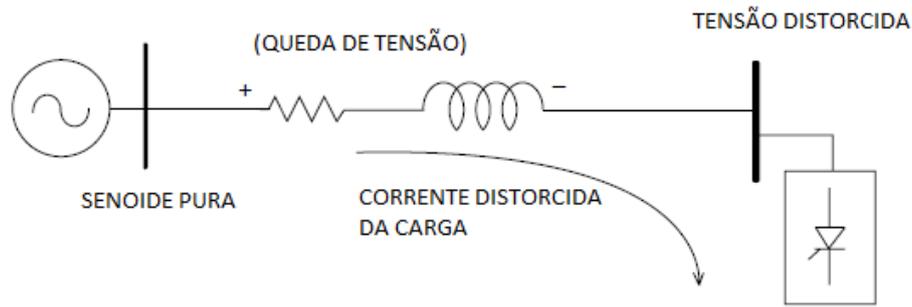


Figura 2.2 – Carga não linear provocando o surgimento de distorção na tensão de uma rede elétrica
[DUGAN *et al*, 2003]

Segundo Dugan *et al* (2003), com a presença dos harmônicos nos sistemas elétricos, os mesmos passam a não operar mais em condições senoidais, logo as simplificações realizadas por engenheiros nas análises para a frequência fundamental não são mais aplicáveis. Diante dessa situação, as grandezas elétricas como tensão rms, corrente rms, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência passam a ser calculadas de tal forma a considerar os efeitos dos harmônicos, conforme as equações 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6, respectivamente.

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \quad (2.1)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} \quad (2.2)$$

$$P = \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos \varphi_h \quad (2.3)$$

$$Q = \sum_{h=1}^n V_h I_h \sin \varphi_h \quad (2.4)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.5)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.6)$$

onde: V_h é a tensão rms dos harmônicos, I_h é a corrente rms dos harmônicos, φ_h é o ângulo de defasagem existente entre a tensão e corrente, P é a potência ativa, Q é a potência reativa, S é a potência aparente e D são as componentes ortogonais de distorção [BAGGINI, 2008].

Um modo de analisar uma onda de tensão ou corrente distorcida baseia-se na aplicação da análise de Fourier, que segundo Arrillaga (1997) pode ser definida como o processo de conversão de uma forma de onda do domínio do tempo em suas componentes de frequência, e, portanto, possibilita que as ondas de tensão e corrente distorcidas possam ser decompostas em suas respectivas componentes harmônicas, conforme pode ser visto na figura 2.3, de tal forma que seja possível o emprego dos métodos padrões de análise de circuitos para cada harmônico separadamente.

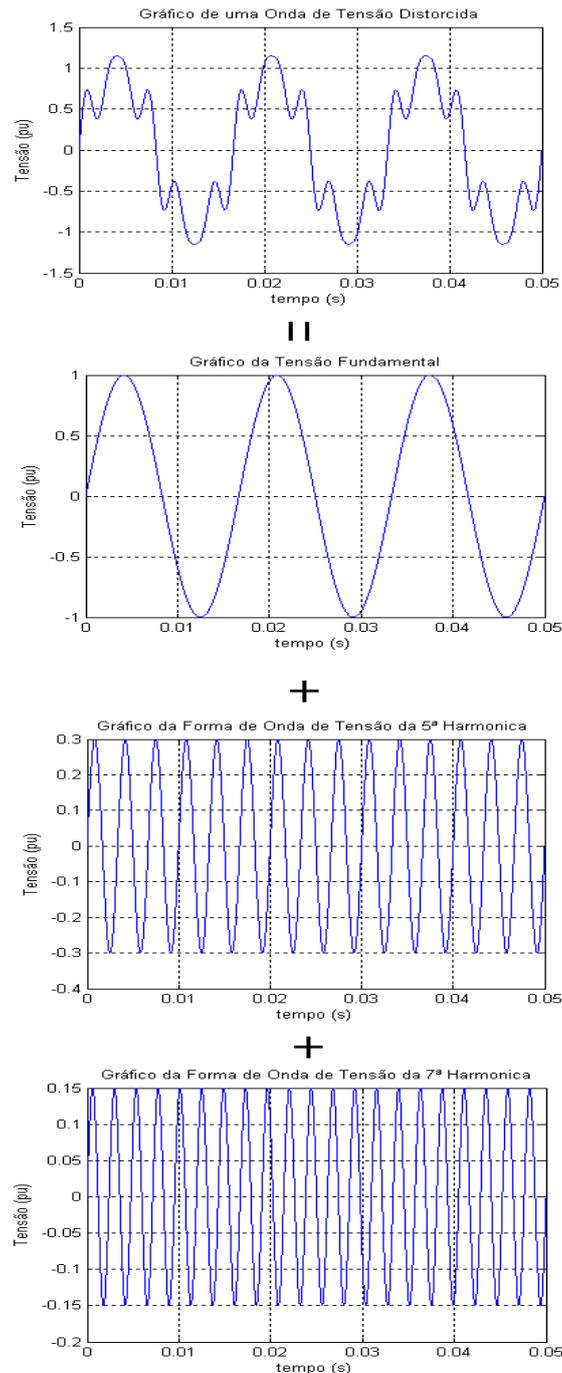


Figura 2.3 – Decomposição de uma onda distorcida em suas componentes harmônicas [SOARES, 2009]

A escolha da técnica a ser utilizada durante a análise de Fourier é influenciada pelas características do sinal distorcido. A série de Fourier é aplicada em sinais periódicos e contínuos no tempo. A transformada de Fourier pode ser aplicada tanto em sinais periódicos quanto em sinais aperiódicos e contínuos no tempo. A transformada discreta de Fourier é aplicada também em sinais periódicos e aperiódicos, porém discretos, ou seja, sinais amostrados no tempo.

No caso da série de Fourier, o sinal é decomposto num somatório de senos e cossenos utilizando-se a expressão 2.7, conhecida como representação trigonométrica.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (2.7)$$

onde: a_0 é o sinal DC, e a_n e b_n são os coeficiente de Fourier, calculados pelas equações 2.8, 2.9 e 2.10, respectivamente.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (2.8)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.9)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.10)$$

Nessa representação, os coeficientes de Fourier são componentes retangulares dos harmônicos, logo o módulo e o ângulo dos harmônicos são calculados com as expressões 2.11 e 2.12, respectivamente.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.11)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n} \quad (2.12)$$

Já a transformada de Fourier decompõe um sinal distorcido em suas componentes harmônicas utilizando a equação 2.13.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.13)$$

Na prática, tanto a série de Fourier quanto a transformada de Fourier não são utilizadas, pois as ondas de tensão e corrente são amostradas e digitalizadas para que possam ser processadas e, posteriormente, analisadas num computador. Então, a decomposição da onda distorcida amostrada passa a ser realizada pela aplicação da transformada discreta de Fourier utilizando a equação 2.14.

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nK/N} \quad (2.14)$$

Os qualímetros atuais se baseiam na transformada rápida de Fourier (FFT), que é um algoritmo computacional responsável por aumentar a velocidade de processamento da transformada discreta de Fourier, o que resulta na otimização do processo de extração dos módulos e fases dos harmônicos de um sinal distorcido.

Segundo Baggini (2008), num sistema trifásico equilibrado, o emprego do método de componentes simétricas em cada harmônico mostra que há uma simples relação entre as componentes simétricas e a ordem harmônica, conforme pode ser visto na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Relação existente entre componentes simétricas e ordem harmônica [BAGGINI, 2008]

Relação existente entre Componentes Simétricas e Ordem Harmônica			
Componentes Simétricas	Sequência Positiva	Sequência Negativa	Sequência Zero
Ordem Harmônica	1	2	3
	4	5	6
	7	8	9
	10	11	12

	3k+1	3k+2	3k+3 para k=0, 1, 2, ...

O grau de distorção de uma onda de tensão ou corrente pode ser caracterizado por um importante indicador denominado de taxa de distorção harmônica total (THD), sendo que o mesmo é definido pelo valor rms do conteúdo harmônico de uma onda dividido pelo valor rms da componente fundamental. A equação 2.15 é usada para calcular o THD de tensão ou corrente.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n M_h^2}}{M_1} \times 100\% \quad (2.15)$$

onde M_h pode ser o valor rms das tensões ou correntes harmônicas.

2.3 – Fontes de Correntes Harmônicas

As cargas não lineares, conforme mencionado anteriormente, são consideradas como fontes de correntes harmônicas, em virtude da não proporcionalidade linear existente entre tensão e corrente. De acordo com Tostes (2005), essas cargas podem ser classificadas em três categorias de acordo com a natureza do conteúdo harmônico gerado pelas mesmas.

- Categoria 1 é composta de cargas cuja características operativa se baseiam em arco voltaico como: fornos a arco, máquinas de solda, iluminação fluorescente, e outros. Deve-se ressaltar que a natureza da distorção harmônica da corrente é oriunda da não linearidade do arco;
- Categoria 2 é composta de equipamentos com núcleo magnético saturado como reatores e transformadores de núcleo saturado. A natureza da distorção harmônica da corrente é oriunda da não linearidade do núcleo magnético;
- Categoria 3 é composta de equipamentos eletrônicos como conversos estáticos, computadores, fornos microondas, lâmpadas compactas fluorescentes, UPS, no-

breaks, e outros. A distorção harmônica da corrente é oriunda da não linearidade de componentes eletrônicos como diodos, transistores e outros.

Nos itens a seguir é apresentada uma descrição sucinta sobre as características de algumas fontes de correntes harmônicas assim como a natureza do conteúdo harmônico gerado pelas mesmas.

2.3.1 - Transformadores

De acordo com Baggini (2008), os transformadores constituem uma das primeiras fontes de harmônicos dos sistemas elétricos de potência, sendo que a geração de harmônico por parte desses equipamentos se deve às características magnéticas não lineares do núcleo dos mesmos, uma vez que o material ferromagnético do núcleo de um transformador suporta uma quantidade máxima de densidade de fluxo magnético independentemente se há aumento no campo magnético. A figura 2.4 mostra o diagrama esquemático e a curva de magnetização de um transformador.

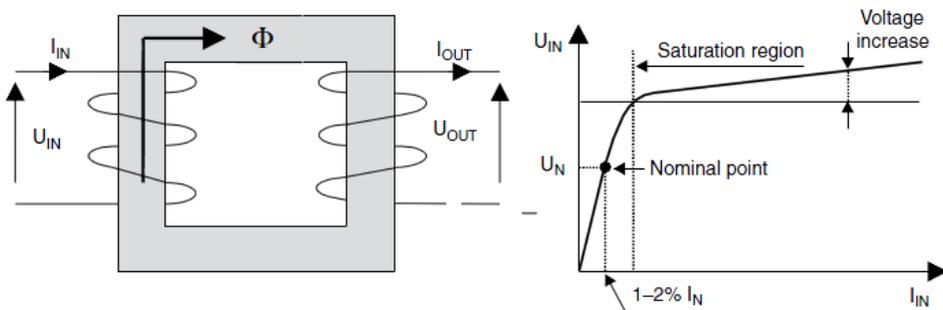


Figura 2.4 – Diagrama esquemático e curva de magnetização de um transformador [BAGGINI, 2008]

Os transformadores são normalmente projetados para operar com uma corrente de magnetização de 1% à 2% da corrente nominal, que é o ponto em que um transformador opera com a tensão nominal ou próximo a ela, conforme pode ser visto na curva de saturação de transformador mostrado na figura 2.4.

Quando um transformador está operando acima da tensão nominal ou da potência nominal, o mesmo entra na região de saturação onde uma pequena variação na tensão de alimentação resulta num grande variação da corrente de magnetização e no aumento do conteúdo harmônico da corrente.

O mecanismo de geração de harmônicos de um transformador está ilustrado na figura 2.5, onde para cada instante de tempo, o formato da onda da corrente de magnetização distorcida pode ser reconstruído a partir dos valores subsequentes da onda na curva de magnetização [BAGGINI, 2008].

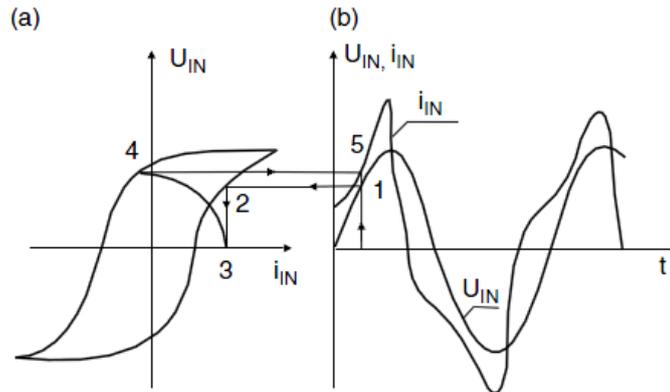


Figura 2.5 – Geração de harmônicos na corrente de magnetização de um transformador [BAGGINI, 2008]

A onda distorcida da corrente de magnetização e o conteúdo harmônico dessa onda, gerados pela não linearidade do núcleo, estão mostrados na figura 2.6. De acordo com a figura 2.6, pode-se verificar que as correntes harmônicas mais significativas são as de ordem 3, 5, 7 e 9, onde o terceiro harmônico é o mais dominante.

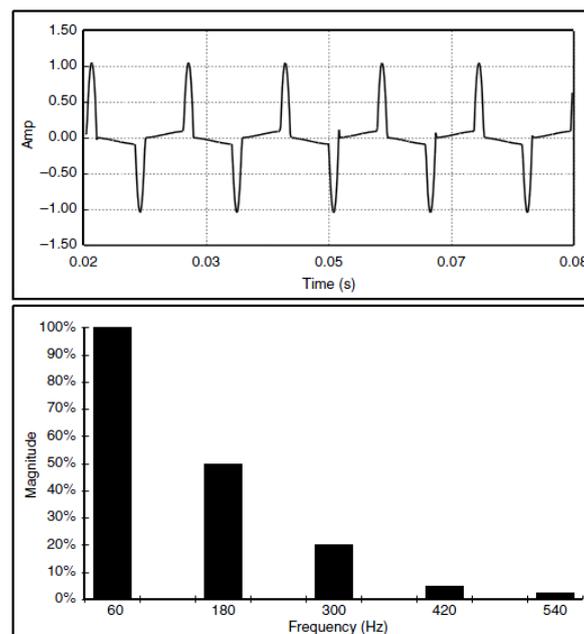


Figura 2.6 – Forma de onda da corrente de magnetização e o seu conteúdo harmônico [DUGAN *et al*, 2003]

2.3.2 – Fornos Elétricos a Arco

Os fornos a arco são equipamentos elétricos, frequentemente, utilizados em siderúrgicas no processo de fusão e refinamento de metais (principalmente do ferro) para a produção de aço. Segundo Tostes (2005), esses equipamentos transformam energia elétrica em energia térmica por meio de um arco elétrico. A figura 2.7 mostra a estrutura de um forno elétrico a arco trifásico.

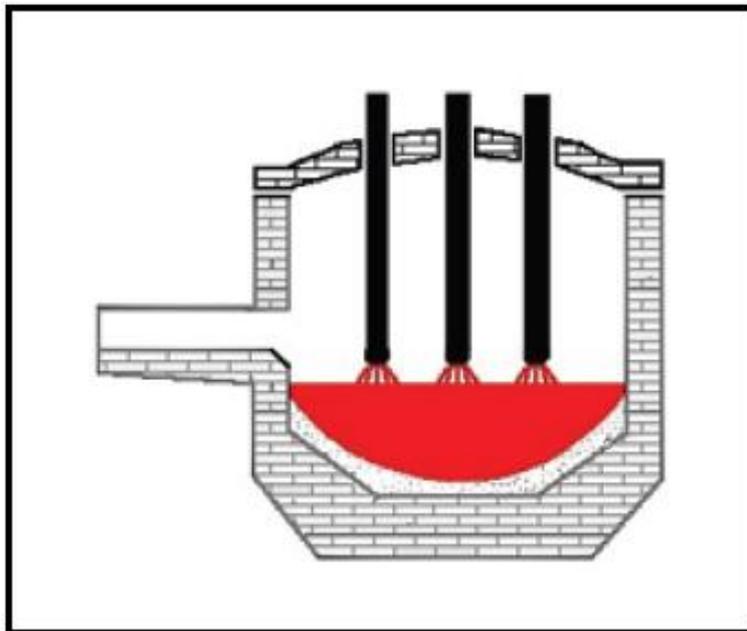


Figura 2.7 – Forno elétrico a arco trifásico [EBERHARD *et al*, 2011]

Os fornos a arco são considerados como uma fonte de distúrbio bastante intensa, uma vez que os mesmos são responsáveis pelo aparecimento de desequilíbrios, flutuações de tensão e correntes harmônicas no sistema elétrico.

Segundo Arrillaga (2003), a relação tensão-corrente de um forno a arco possui uma forma quase trapezoidal, conforme mostrado na figura 2.8, e seu módulo depende do tamanho do arco.

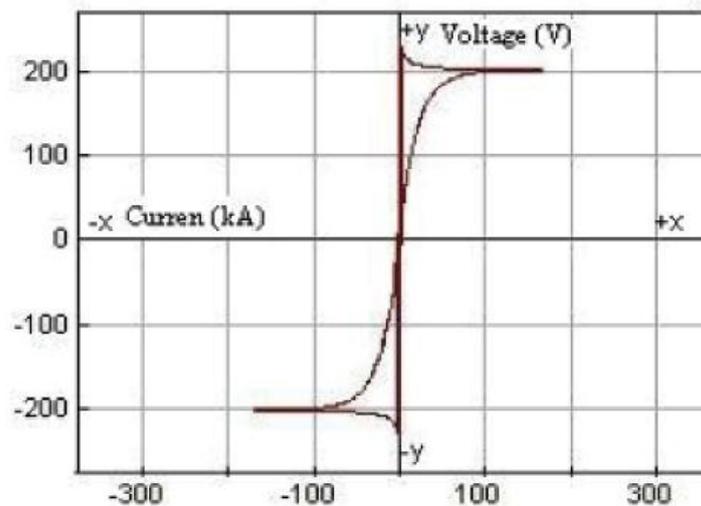


Figura 2.8 – Gráfico Tensão-corrente de um forno a arco [EBERHARD *et al*, 2011]

As formas de onda da tensão e corrente de um forno a arco são funções não periódicas no tempo e de natureza estocástica. A figura 2.9 mostra a forma de onda da corrente de um forno a arco.

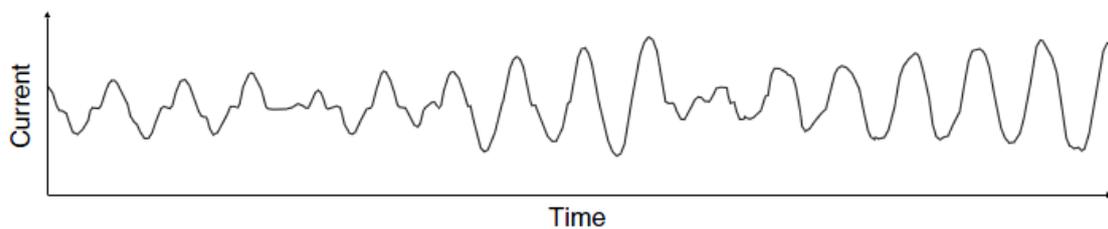


Figura 2.9 – Forma de onda da corrente de um forno a arco [BAGGINI, 2008]

O espectro harmônico da corrente gerada por um forno a arco varia com a etapa de operação do mesmo. Durante a etapa de fusão do metal, os níveis dos componentes harmônicos de corrente apresentam-se mais elevados, enquanto que durante a etapa do refinamento, os níveis das correntes harmônicas diminuem. Além disso, independente da etapa, os fornos a arco geram harmônicos pares, sendo que o segundo harmônico se sobressai em relação aos outros. A figura 2.10 mostra o espectro harmônico gerado por um forno a arco nas etapas de fusão e refinamento do metal.

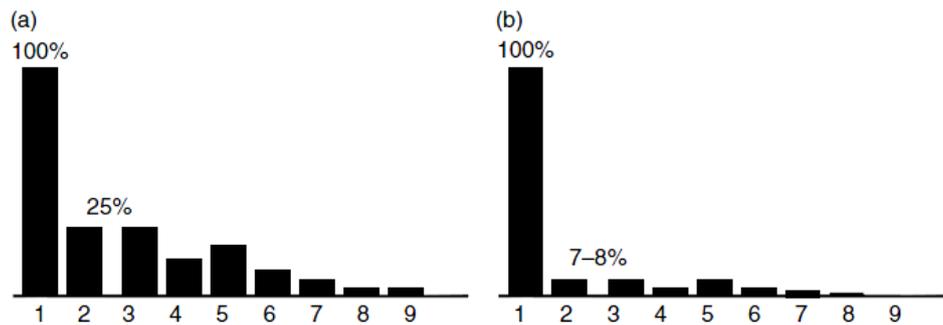


Figura 2.10 – (a) Conteúdo harmônico gerado por um forno a arco durante a etapa de fusão (b) Conteúdo harmônico gerado por um forno a arco gerado na etapa de refinamento [BAGGINI, 2008]

As correntes harmônicas geradas por um forno a arco também dependem da potência do forno, ou seja, quanto maior a potência nominal de um forno, menor será o nível das correntes harmônicas. No entanto, o aumento da potência nominal do forno provoca um aumento na distorção de tensão. A tabela 2.2 mostra o espectro de corrente harmônica para diferentes fornos de diferentes potências.

Tabela 2.2 – Espectro das correntes harmônicas para fornos com diferentes potências [BAGGINI, 2008]

Potência nominal do transformador de um forno	Ordem Harmônica								
	2	3	4	5	6	7	9	11	13-25
MVA	%	%	%	%	%	%	%	%	%
2,5	36	25	8	10	4	3	2	1	0
5	26	20	5	7	2	3	2	1	0
10	26	13	4	5	1	2	1	1	0
16	16	18	6	8	3	3	2	1	0
60	7	10	4	5	1	2	2	1	0

2.3.3 – Lâmpada Fluorescente

As lâmpadas fluorescentes constituem uma das fontes de correntes harmônicas mais comuns dos sistemas elétricos, uma vez que são lâmpadas de descarga, e, portanto, necessitam de um reator para fornecer uma elevada tensão inicial e iniciar uma descarga de tal forma que a corrente flua entre os dois eletrodos no tubo fluorescente.

O reator da lâmpada fluorescente é o principal responsável pela geração de correntes harmônicas, sendo que o mesmo pode ser eletromagnético ou eletrônico. O reator eletromagnético é formado por um transformador de núcleo de ferro e um capacitor envolto num material isolante. E o reator eletrônico emprega uma fonte de alimentação do tipo chaveada para converter a tensão de entrada, cuja frequência é fundamental, numa tensão de frequência maior [DUGAN et al, 2003].

As figuras 2.11 e 2.12 mostram a forma de onda e o espectro harmônico da corrente do reator eletromagnético, respectivamente. Pode-se notar que as correntes harmônicas mais dominantes são 3º, 5º, 7º e 9º harmônicos.

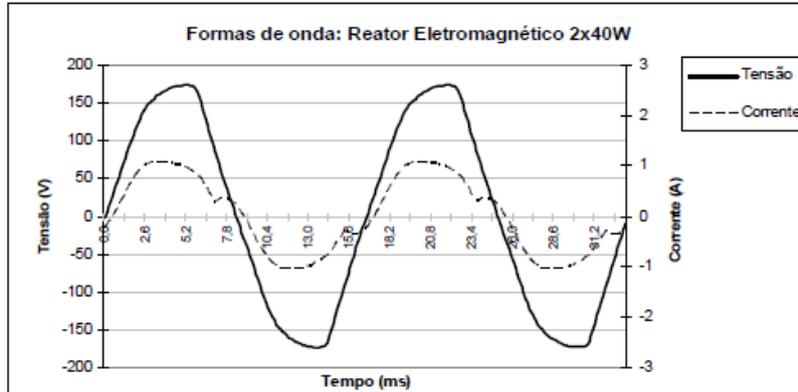


Figura 2.11 – Forma de onda tensão e corrente de um reator eletromagnético [SILVA, LIMA e GONZALEZ, 2009]

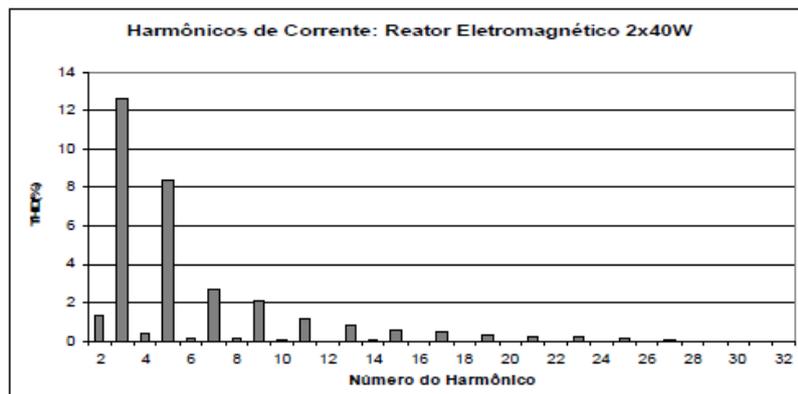


Figura 2.12 – Espectro da corrente harmônica de um reator eletromagnético [SILVA, LIMA e GONZALEZ, 2009]

O reator eletrônico provoca níveis mais elevados de distorção na forma de onda da corrente quando comparado com o reator eletromagnético, conforme pode ser visto na figura 2.13. Isso se deve ao fato dos harmônicos gerados por um reator eletrônico apresentarem níveis elevados, conforme mostrado na figura 2.14.

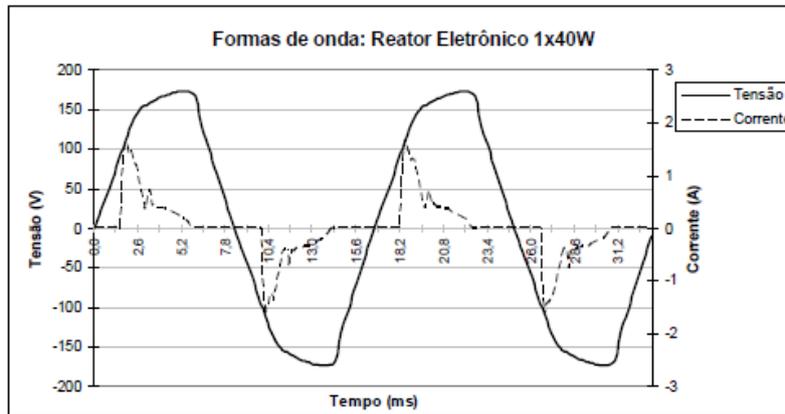


Figura 2.13 - Forma de onda tensão e corrente de um reator eletrônico [SILVA, LIMA e GONZALEZ, 2009]

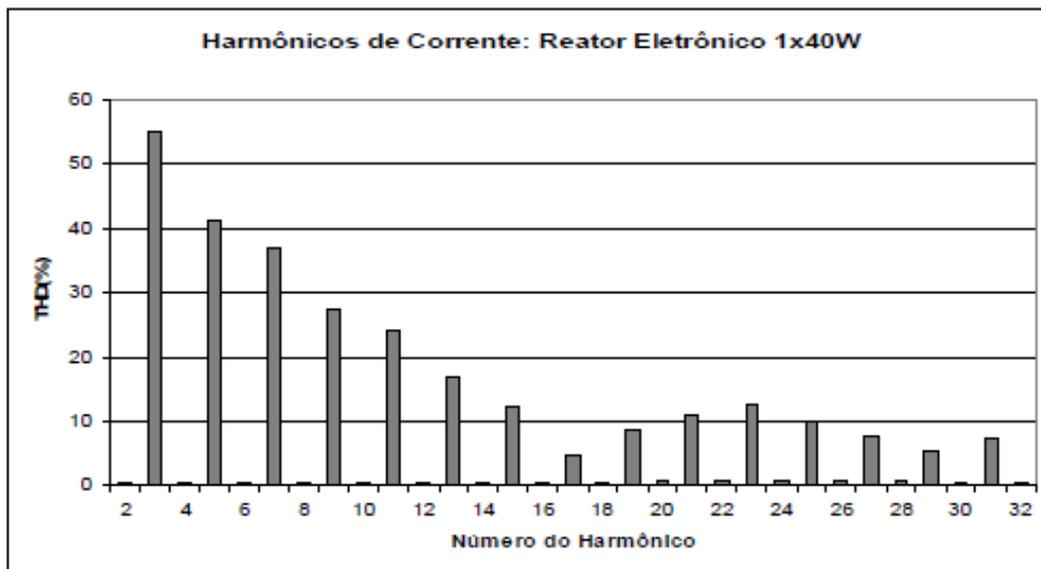


Figura 2.14 - Espectro da corrente harmônica de um reator eletrônico [SILVA, LIMA e GONZALEZ, 2009]

2.3.4 – Conversor de frequência

Os conversores de frequência são equipamentos eletrônicos bastante importantes no ramo industrial, uma vez que são responsáveis por controlar a velocidade dos motores. Segundo Magalhães (2010), esses equipamentos eletrônicos proporcionam uma alta confiabilidade no controle dos motores, economia de energia e uma redução da frequência de manutenção dos mesmos.

Os conversores de frequência são compostos de um estágio de retificação, um estágio intermediário “link DC” e um inversor. A figura 2.15 mostra a estrutura de um conversor de frequência.

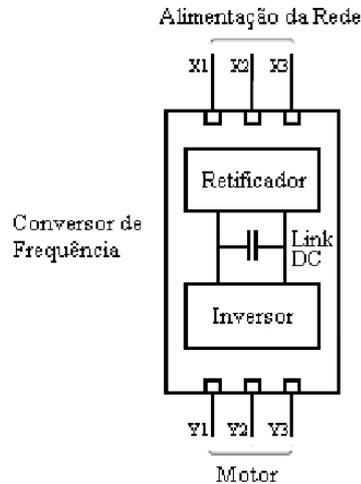


Figura 2.15 – Estrutura de um conversor de frequência [MAGALHÃES, 2010]

Embora os conversores de frequência ofereçam uma série de facilidades e benefícios para a indústria, os mesmos provocam elevadas distorções na forma de onda da corrente, pois geram harmônicos de correntes com elevados níveis. A figura 2.16 mostra a forma de onda e o espectro da corrente de um conversor de frequência.

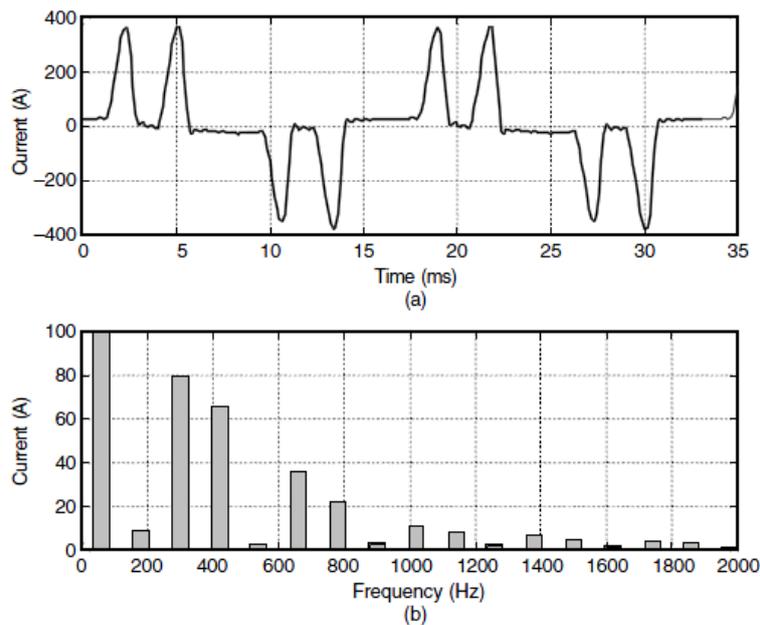


Figura 2.16 – (a) Forma de onda da corrente de um conversor de frequência (b) Espectro harmônico gerado por um conversor de frequência [DUGAN *et al*, 2003]

2.4 – Efeitos das Distorções Harmônicas

A presença de tensões e correntes harmônicas nos sistemas elétricos tem ocasionado uma série de efeitos nocivos nos inúmeros equipamentos de um sistema elétrico como a redução da vida útil, perdas adicionais e a queima desses equipamentos. Além disso, os harmônicos podem afetar inclusive a economia de uma indústria tendo em vista que os dispositivos elétricos e eletrônicos presentes nas indústrias apresentam grande sensibilidade a esses distúrbios.

Nas máquinas rotativas, os harmônicos são responsáveis pelo surgimento de torques parasitas contrários à direção de movimento do rotor em virtude da presença de harmônicos de sequência negativa. Além disso, os harmônicos provocam deformações elásticas, vibrações, aquecimentos das bobinas e reduzem a eficiência da máquina [DAS, 2002].

Nos transformadores, as perdas por correntes parasitas aumentam com o quadrado da ordem harmônica, e, portanto, provocando uma redução da vida útil do mesmo. Além disso, há também as perdas provenientes dos harmônicos de sequência zero, que ficam presos nos enrolamentos ligados em delta.

No condutor do neutro das instalações elétricas, há uma sobrecarga e perdas adicionais por efeito joule, uma vez que as correntes harmônicas de sequência zero das fases A, B e C se somam neste condutor. A figura 2.17 mostra a corrente de neutro devido à corrente do 3º harmônico das fases A, B e C.

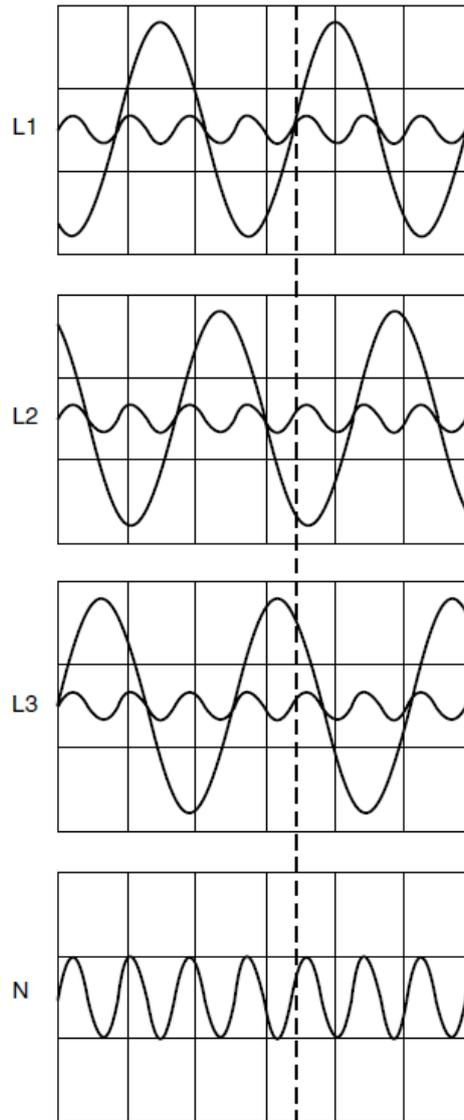


Figura 2.17 – Corrente de neutro devido a corrente do 3º harmônico das fases A, B e C [BAGGINI, 2008]

Nos cabos, as correntes harmônicas provocam a degradação do cabo por aquecimentos e perdas por efeito skin. Além disso, segundo Das (2002), as distorções harmônicas podem causar uma possível ruptura de dielétrico.

Os harmônicos aumentam a probabilidade de ocorrência de ressonâncias entre os bancos de capacitores e o sistema elétrico, o que pode provocar uma amplificação dos níveis de distorção harmônica no sistema elétrico.

2.4.1 - Efeito Skin

O efeito skin (também conhecido como efeito pelicular) é a tendência da corrente alternada em fluir pela superfície do condutor. Esse efeito normalmente é

desprezado na frequência fundamental devido causar pequenos efeitos, porém, segundo Baggini (2008), esses efeitos passam a ser significativo para frequências acima de 350 Hz, uma vez que provocam aquecimentos e perdas adicionais. O grau de penetração harmônica pode ser calculado utilizando a equação 2.16.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2.16)$$

onde δ é o grau de penetração harmônica, ρ é a resistividade do cabo e μ é a permeabilidade magnética.

2.4.2 – Ressonância Harmônica

A ressonância é um fenômeno na qual uma frequência de excitação coincide com a frequência natural do sistema. No caso da ressonância harmônica, a frequência de um harmônico se torna igual à frequência natural da rede elétrica, considerando que essa rede é composta de elementos resistivos (resistências dos cabos), indutivos (transformadores e reatores) e capacitivos (banco de capacitores).

A ressonância pode ser classificada de duas formas: ressonância série e ressonância paralela. Na ressonância série, as reatâncias capacitivas e indutivas se anulam de tal forma que a impedância do sistema diminui e passa a ser numericamente igual à resistência do sistema, logo a corrente sofre uma amplificação em seu nível. No caso da ressonância harmônica série, a corrente harmônica, cuja frequência coincidiu com a do sistema, sofre a amplificação, o que resulta num aumento da distorção de corrente. A figura 2.18 mostra um circuito ressonante série.

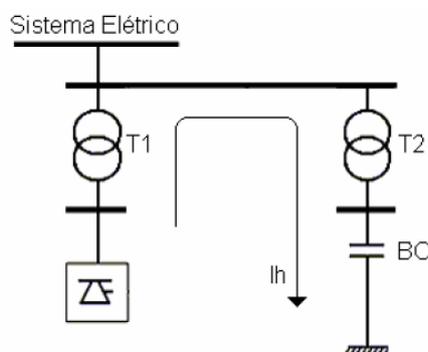


Figura 2.18 – Circuito ressonante série [JESUS e OLIVEIRA, 2007]

No caso da ressonância paralela, a admitância se torna mínima, o que resulta numa amplificação do nível da tensão. No caso da ressonância harmônica paralela, será amplificada a tensão harmônica, cuja frequência entrou em ressonância com o sistema, o que provocará um aumento do nível de distorção harmônica de tensão. A figura 2.19 mostra um circuito paralelo ressonante.

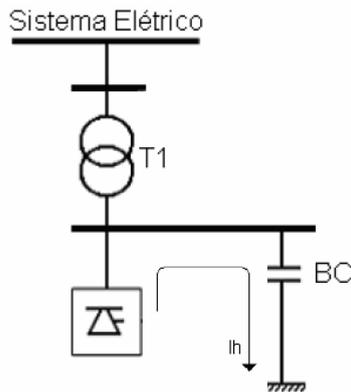


Figura 2.19 – Circuito paralelo ressonante [JESUS e OLIVEIRA, 2007]

2.5 – Normas para Distorção Harmônica

Atualmente, existem algumas organizações nacionais e internacionais voltadas para o desenvolvimento de recomendações associadas a vários aspectos da qualidade da energia, dentre eles a distorção harmônica. Algumas dessas organizações são: International Electrotechnical Commission (IEC), Institute of Electric and Electronic Engineers (IEEE) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

O IEC desenvolveu normas que estabelecem limites de emissão de correntes harmônicas de diversos tipos de equipamentos, como as normas IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4; e metodologias de teste e técnicas de medição de harmônicos como a IEC 61000-4-7.

O IEEE desenvolveu a IEEE 519, que é uma recomendação para práticas e controle de harmônicos nos sistemas elétricos. Nessa recomendação são abordados assuntos referentes às fontes de geração de harmônicos, os efeitos dos harmônicos, como o sistema se comporta na presença de harmônicos, métodos de análise e outros. Além disso, são definidos limites de distorção harmônica de tensão e corrente. As tabelas 2.3 e 2.4 mostram os limites de distorção harmônica de tensão e corrente, respectivamente.

Tabela 2.3- Limites para distorção harmônica de tensão, segundo a recomendação IEEE-519

Tensão no PAC	Distorção Individual	THDv
69 kV e abaixo	3%	5%
69001 V até 161000 V	1,5%	2,5%
Acima 161000 V	1%	1,5%

Tabela 2.4. Limites para distorção harmônica total e individual de corrente [IEEE 519:1992]

Máxima corrente harmônica em porcentagem da corrente de carga (I_o – valor da componente fundamental); (I_{cc} corrente de curto-circuito)						
Harmônicos Ímpares						
I_{cc}/I_o	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 < h$	THDi (%)
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

A ANEEL desenvolveu os procedimentos de distribuição da energia elétrica (PRODIST) composto de 8 módulos de tal forma a lidar com alguns aspectos dos sistemas de distribuição. Dentre esses módulos, o módulo 8 está voltado para a qualidade da energia, onde estão definidos limites de distorção harmônica total e individual de tensão. Esses limites estão mostrados nas tabelas 2.5 e 2.6.

Tabela 2.5. Valores de referência globais para distorções harmônicas totais (PRODIST)

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

Tabela 2.6. Valores de referência globais para taxas de distorção harmônica individual (PRODIST)

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

2.6 – Conclusão

A distorção harmônica é um fenômeno gerado pela não linearidade de equipamentos e cargas presentes nas redes elétricas, onde basicamente as formas de onda da tensão e da corrente apresentam desvios da forma senoidal. Esses equipamentos e cargas geram e injetam correntes harmônicas nos sistemas elétricos, que por sua vez provocam as distorções na forma de onda da tensão.

O espectro harmônico de uma corrente está intimamente ligado à natureza da não linearidade da carga que o gerou, ou seja, diferentes cargas não lineares geram diferentes perfis harmônicos de corrente.

A presença das tensões e correntes harmônicas nos sistemas elétricos é responsável pelo surgimento de uma série de problemas nocivos aos diversos equipamentos ligados nas redes elétricas, indo desde erros de medição dos medidores de energia até a queima de equipamentos elétricos e eletrônicos.

De forma a quantificar e avaliar os níveis de distorção presentes em vários pontos do sistema elétrico, há organizações que têm desenvolvido recomendações que estabelecem técnicas de medição dos níveis de distorção nos vários pontos de uma rede elétrica, e limites aceitáveis de distorção.

O próximo capítulo abordará os diferentes métodos de regressão que serão utilizados para estimar a contribuição de fontes harmônicas na distorção harmônica de tensão qualquer sistema elétrico.

Capítulo 3 – Análise de Regressão

3.1 – Introdução

A estatística é o ramo da matemática que busca, de forma sistemática, organizar, descrever, analisar e interpretar dados provenientes de algum estudo ou experimento realizado em qualquer área do conhecimento. Em Ross (2010), a estatística é definida como sendo a arte de aprender a partir dos dados.

De acordo com Magalhães e Lima (2008), a estatística pode ser dividida em três grandes áreas: a estatística descritiva, que busca descrever e resumir os dados de tal forma a obter conclusões de características de interesse; a probabilidade, que está voltada para o estudo das incertezas provenientes de fenômenos de natureza aleatória; e a estatística inferencial, que está voltada para o estudo de técnicas que possibilitam a extrapolação das informações e conclusões obtidas a partir de uma amostra de dados.

Uma prática comum nas diversas áreas do conhecimento é tentar explicar o comportamento de uma variável com base na variação de um conjunto de outras variáveis, o que é possível com a análise de regressão, uma vez que a mesma possibilita a criação de modelos estatísticos capazes de descrever as relações existentes entre duas ou mais variáveis aleatórias.

Em virtude dessa característica da análise de regressão, a metodologia proposta neste trabalho faz uso de técnicas da análise de regressão, como a regressão polinomial local de kernel, visando obter um modelo estatístico que descreva a relação casual entre a corrente harmônica de uma carga e tensão harmônica de um sistema elétrico.

Diante disso, este capítulo aborda os principais aspectos da análise de regressão de tal forma a fornecer ao leitor uma base teórica concisa das técnicas de regressão utilizadas na realização deste trabalho. Além disso, este capítulo também apresenta alguns conceitos fundamentais da estatística.

3.2 – Conceitos Fundamentais

Nesta seção, são abordados alguns conceitos da estatística que são fundamentais para que se tenha um bom entendimento dos métodos de regressão, especificamente, a regressão linear simples e a regressão polinomial local de Kernel, dentre os quais se

podem citar a probabilidade, variável aleatória, função discreta de probabilidade, função de distribuição de probabilidade, função de densidade de probabilidade, esperança, variância, covariância e correlação.

3.2.1 - Probabilidade

Todos os dias, as pessoas lidam com uma variedade de fenômenos ou experimentos aleatórios como: o simples lançamento de uma moeda no início das partidas de futebol, a cotação das bolsas de valores, as mudanças no clima, o carregamento dos sistemas elétricos e outros, cuja característica principal é a imprevisibilidade de ocorrência dos eventos desses fenômenos, o que torna impossível afirmar com toda certeza se determinado evento de um fenômeno aleatório qualquer irá ocorrer.

Uma forma de lidar com esse tipo de fenômeno se baseia na determinação de um valor numérico que indica a chance de ocorrência de seus eventos. Esse valor numérico é denominado de probabilidade.

A probabilidade pode ser definida como sendo uma função P que atribui valores numéricos, definidos no intervalo $[0,1]$, aos eventos de um espaço amostral Ω , sendo que esses valores numéricos estão relacionados à frequência de ocorrência deste evento. Considere-se que A seja um evento de um espaço amostral qualquer, a probabilidade de ocorrência de A , indicado por $P(A)$, deve satisfazer as seguintes condições:

- 1) $P(\Omega)=1$;
- 2) $P(\cup_{j=1}^n A_j) = \sum_{j=1}^n P(A_j)$, sendo que A_j são eventos disjuntos.

Deve-se entender como espaço amostral o conjunto de todos os resultados possíveis de um fenômeno ou experimento aleatório, que por sua vez pode ser definido como uma situação ou um acontecimento cujos resultados não podem ser previstos com certeza.

3.2.2 – Variável Aleatória

A variável aleatória é definida com uma função que associa cada resultado possível de um espaço amostral a um valor numérico. Por exemplo, considere o

experimento de lançar uma moeda, cujo espaço amostral é $S=\{\text{cara, coroa}\}$. Pode-se definir uma variável aleatória X , de tal forma que $X(\text{cara})=0$ e $X(\text{coroa})=1$. A figura 3.1 ilustra melhor este exemplo.

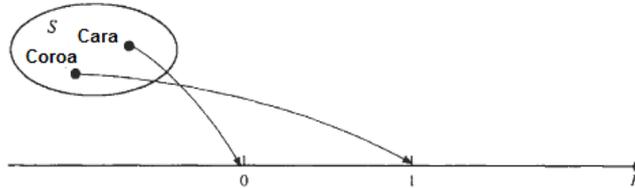


Figura 3.1 – Uma variável aleatória associada com o lançamento de uma moeda [HSU, 1997]

As variáveis aleatórias podem ser classificadas de duas formas: discretas e contínuas. As variáveis aleatórias discretas assumem valores num conjunto enumerável, ou seja, mensurável, enquanto que as variáveis aleatórias contínuas assumem valores num conjunto não enumerável.

Normalmente, as informações sobre comportamento das variáveis aleatórias podem ser sumarizadas com a utilização de algumas medidas como: o valor esperado, variância, covariância e os coeficientes de correlação.

O valor esperado, também conhecido como esperança ou média, de uma variável aleatória é uma medida de tendência central que representa o ponto de equilíbrio da distribuição de seus valores. Considerando que X é uma variável aleatória, o valor esperado dessa variável pode ser calculado utilizando a equação (3.1).

$$E(X) = \mu_X = \sum_{i=1}^k x_i p_i \quad (3.1)$$

onde: x_i : são os possíveis valores da variável aleatória X ;

p_i : são as correspondentes probabilidades dos valores da variável aleatória.

A variância de uma variável aleatória é uma medida de dispersão que está relacionada com a variabilidade dos valores da variável. Considerando que X é uma variável aleatória, a variância dessa variável pode ser calculada utilizando a equação (3.2).

$$Var(X) = \sigma_X^2 = E[(X - \mu_X)^2] = \sum_{i=1}^k (x_i - \mu_X)^2 p_i \quad (3.2)$$

onde: x_i : são os possíveis valores da variável aleatória X ;

μ_X : é a esperança da variável aleatória X ;

p_i : são as correspondentes probabilidades dos valores da variável aleatória.

A covariância é uma medida de dependência linear entre duas variáveis aleatórias. Quando duas variáveis aleatórias são independentes entre si, o valor da covariância é zero. Considerando que X e Y são duas variáveis aleatórias qualquer, a covariância entre essas variáveis pode ser calculada utilizando a equação (3.3).

$$Cov(X, Y) = \sigma_{XY} = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)] = E(XY) - E(X)E(Y) \quad (3.3)$$

O coeficiente de correlação, assim como a covariância, também mede o grau de dependência linear entre duas variáveis aleatórias, porém, diferentemente da covariância, assume valores no intervalo $[-1,1]$ ou $[-100\%, 100\%]$, o que torna mais fácil a avaliação do grau de dependência existente entre as variáveis aleatórias. Os graus de correlação podem ser classificados da seguinte forma:

Correlação Forte: Ocorre quando o coeficiente de correlação assume valores nos seguintes intervalos: $[80\%, 100\%]$ e $[-80\%, -100\%]$;

Correlação Intermediária: Ocorre quando o coeficiente de correlação assume valores nos seguintes intervalos: $[40\%, 80\%[$ e $[-40\%, -80\%[$;

Correlação Fraca: Ocorre quando o coeficiente de correlação assume valores nos seguintes intervalos: $[10\%, 40\%[$ e $[-10\%, -40\%[$

Inexistência de Correlação: Ocorre quando o coeficiente de correlação assume valores no seguinte intervalo: $] -10\%, 10\%[$.

Considerando que X e Y são duas variáveis aleatórias qualquer, a correlação entre essas variáveis pode ser calculada utilizando a equação (3.4).

$$\rho_{XY} = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{\sigma_X^2} \sqrt{\sigma_Y^2}} \quad (3.4)$$

3.2.3 – Função Discreta de Probabilidade

A função discreta de probabilidade é uma função que atribui a cada valor da variável aleatória a sua probabilidade. Considerando que X é uma variável aleatória qualquer, a função discreta de probabilidade pode ser calculada com equação (3.5).

$$P(X = x_i) = p(x_i) = p_i \quad (3.5)$$

onde: p_i é a probabilidade do valor x_i da variável aleatória X ;
 x_i é o valor da variável aleatória X .

3.2.4 – Função de Distribuição de Probabilidade

A função de distribuição de probabilidade (também conhecida como função acumulada de probabilidade) de uma variável aleatória discreta X é definida, para qualquer número real, de acordo com a equação (3.6).

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (3.6)$$

Existem algumas distribuições de probabilidade padrões como a distribuição de Bernoulli, binomial, Poisson, geométrica e outros. Abaixo, são mostradas algumas dessas distribuições.

A distribuição de Bernoulli é utilizada para modelar um experimento com somente dois resultados possíveis, normalmente referidos como “sucesso” ou “fracasso”, e codificado como “1” ou “0”, respectivamente.

Uma variável aleatória discreta X tem uma distribuição de Bernoulli com parâmetro p , onde $0 \leq p \leq 1$, se a sua função de probabilidade discreta é dada pelas equações (3.7) e (3.8).

$$p_X(1) = P(X = 1) = p \quad (3.7)$$

$$p_X(0) = P(X = 0) = 1 - p \quad (3.8)$$

No caso da distribuição binomial, a mesma conta o número total de sucessos de n ensaios de Bernoulli independentes e todos com a mesma probabilidade de sucesso p .

Logo a distribuição binomial de uma variável aleatória X com os parâmetros n e p , onde $n = 1, 2, 3, \dots$ e $0 \leq p \leq 1$, pode ser definida pela equação (3.9).

$$p_X(k) = P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k} \quad (3.9)$$

onde: $n = 1, 2, 3, \dots, n$

A figura 3.2 mostra um exemplo gráfico de uma função de distribuição de probabilidade binomial com $n = 20$ e $p = 0,25$.

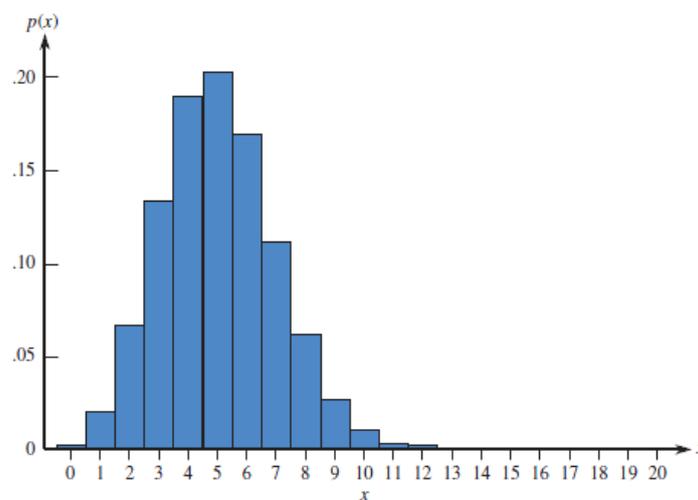


Figura 3.2 – Distribuição binomial com $n = 20$ e $p = 0,25$ [PECK, OLSEN e DEVORE, 2010]

3.2.4 – Função de Densidade de Probabilidade

A função de densidade de probabilidade é uma função de distribuição para variáveis aleatórias contínuas que auxilia na atribuição de probabilidade. Considerando que $f(x)$ é uma função de densidade de probabilidade de uma variável contínua X , essa função deve satisfazer as seguintes condições:

- $f(x) \geq 0$, para todo $x \in (-\infty, \infty)$;
- A área definida por $f(x)$ é igual a 1, ou seja, $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$;

A distribuição normal, ou também conhecida como distribuição gaussiana, tem um importante papel nas análises estatísticas, uma vez que a mesma apresenta uma aproximação razoável para a distribuição de uma diversidade de variáveis.

A distribuição normal de uma variável aleatória contínua X pode ser definida conforme a equação (3.10).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.10)$$

A figura 3.3 ilustra graficamente a distribuição normal de uma variável aleatória contínua qualquer.

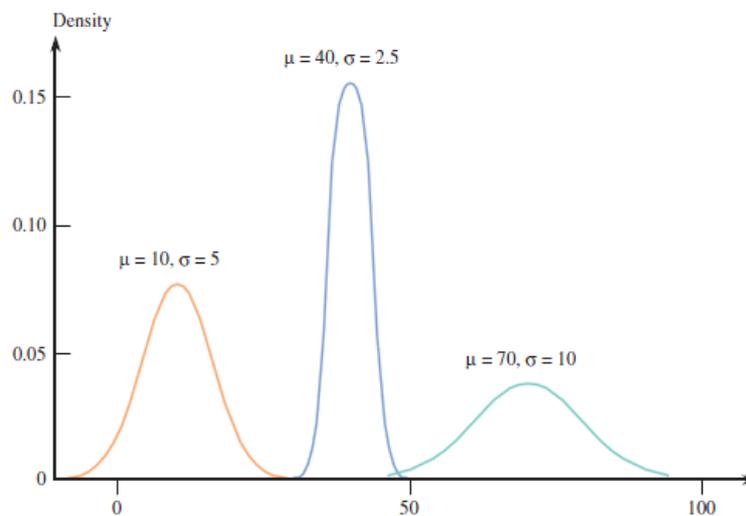


Figura 3.3 – Três distribuições normais [PECK, OLSEN e DEVORE, 2010]

3.3 – Análise de Regressão

A análise de regressão, de um modo geral, é um método estatístico que consiste num conjunto de técnicas voltadas para investigar e descobrir a relação existente entre uma variável aleatória, denominada de variável resposta, e uma ou mais variáveis aleatórias, denominadas variáveis regressoras. O produto da análise de regressão é um modelo estatístico (também conhecido como modelo de regressão ou função de regressão), que contém uma simples descrição de um estado ou um processo [YAN e SU, 2009]. A equação (3.11) ilustra o formato de um modelo de regressão.

$$Y = m(X) + \epsilon \quad (3.11)$$

onde: $m(x)$ é o modelo de regressão ou função de regressão;

ϵ é a variável aleatória associada com o erro do modelo;

Os principais objetivos da análise de regressão são:

- Estabelecer uma relação casual entre duas ou mais variáveis;
- Prever o valor da variável resposta para um conjunto de valores das variáveis regressoras;
- Investigar as variáveis regressoras de tal forma a identificar quais variáveis são mais importantes para descrever a variável resposta.

Pode-se classificar a análise de regressão de duas formas: regressão paramétrica e regressão não paramétrica. A regressão paramétrica é um tipo de regressão cujo desenvolvimento do modelo estatístico está condicionado a uma família de equações conhecida. No entanto, na regressão não paramétrica, desconhece-se o formato do modelo de regressão.

Nesta seção, são abordados dois tipos de métodos de regressão: a regressão linear simples, que é um tipo de regressão paramétrica cujo modelo estatístico é representado por uma reta; e a regressão polinomial local utilizando o método de kernel, que é um tipo de regressão não paramétrica.

3.3.1 – Regressão linear simples

A regressão linear simples é um método estatístico que busca relacionar uma variável aleatória resposta a uma única variável aleatória regressora, condicionado à equação de uma reta, conforme mostrado na equação (3.11).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (3.11)$$

onde: Y : é uma variável aleatória resposta;

β_0, β_1 são constantes;

ϵ é o erro;

$E[\epsilon] = 0$;

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

No modelo de equação (3.10), supõe-se, normalmente, que a variável aleatória ϵ é possui uma distribuição normal com esperança igual a zero e variância igual à variância de um modelo gaussiano, ou seja, $\epsilon \sim N(0; \sigma^2)$.

O ajuste da curva de regressão é realizado com base no método dos mínimos quadrados, que, por sua vez, seleciona o modelo que apresenta a menor soma de quadrados dos erros. Então, com a aplicação do método dos mínimos quadrados, os parâmetros β_0 e β_1 do modelo de regressão mostrado na equação (3.11) são estimados de acordo com as equações (3.12) e (3.12), respectivamente.

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{y} - \widehat{\beta}_1 \bar{x} \quad (3.12)$$

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.13)$$

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.

E a variância do modelo de regressão pode ser obtida pela equação (3.14).

$$\hat{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2} \quad (3.14)$$

A figura 3.4 ilustra graficamente o modelo estatístico mostrado na equação 3.10. De acordo com essa figura, pode-se observar que a parte determinística do modelo é numericamente igual à média da distribuição normal, e a variância do mesmo representa a variabilidade das variáveis aleatórias.

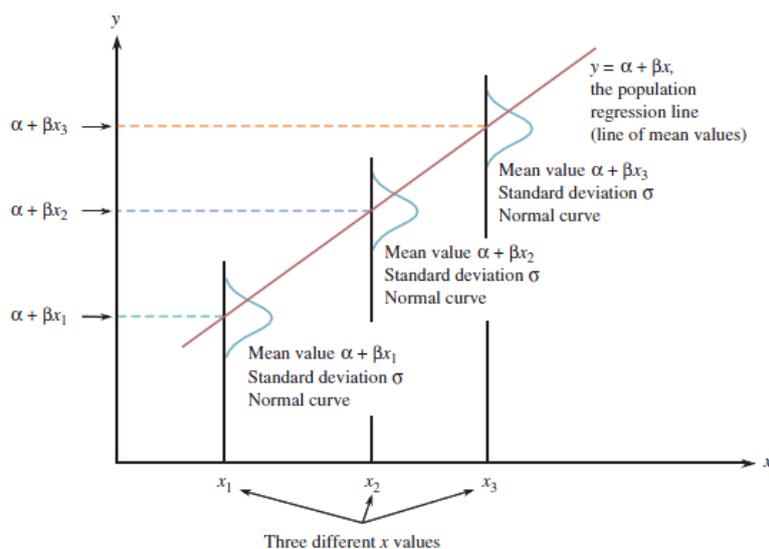


Figura 3.4 – Modelo de regressão linear simples [PECK, OLSEN e DEVORE, 2010]

Uma vez obtido o modelo de regressão por meio da aplicação da regressão linear simples, avalia-se esse modelo por meio da análise da variância, de tal forma a verificar se o modelo de regressão obtido é adequado para explicar a relação entre as variáveis resposta e regressora.

A análise de variância é uma ferramenta estatística que, por meio de técnicas da inferência estatística, testa duas hipóteses principais: a hipótese nula, que representa a possibilidade do parâmetro β_1 (também conhecido como a declividade da reta) ser nulo; e a hipótese alternativa, que representa a possibilidade desse mesmo parâmetro não ser nulo.

Durante a análise de variância, são obtidos três parâmetros principais: a soma de quadrados total (SQT), a soma de quadrados de erro (SQE) e a soma de quadrados de regressão (SQR_{eg}). Esses parâmetros são calculados por meio das equações (3.15), (3.16) e (3.17), respectivamente.

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

$$SQE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.16)$$

$$SQReg = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.17)$$

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;

Com base nesses três parâmetros, calcula-se o valor da estatística do teste, conhecida com F_o , através da divisão do quadrado médio de regressão pelo quadrado médio do erro, conforme a equação (3.18). Com base no valor do parâmetro F_o , pode-se rejeitar ou não o modelo de regressão.

$$F_o = \frac{SQReg}{SQE/n-2} \quad (3.18)$$

3.3.2 – Regressão Polinomial Local de Kernel

Assim como na regressão paramétrica, a regressão não paramétrica também busca estimar um modelo estatístico, normalmente representado por uma curva de regressão, que descreva a relação funcional existente entre um conjunto de variáveis regressoras e uma variável de interesse.

De acordo com Wand e Jones (1995), há muitas abordagens para o problema da regressão não paramétrica, sendo que as mais populares são aquelas baseadas nas funções de kernel, funções splines e wavelets. Cada uma dessas abordagens tem seus pontos fortes e fracos particulares, porém os estimadores de kernel apresentam vantagens relacionadas com sua simplicidade matemática e lógica.

Com base nesse fato, escolheu-se uma classe de estimadores de kernel (ou também denominados de suavizadores de Kernel) conhecida como estimadores polinomiais locais de kernel para a realização do presente trabalho. Esses estimadores criam modelos não paramétricos, ou seja, modelos que não são restritos a uma família de equações específica. Logo, diferentemente do caso paramétrico, os modelos não paramétricos consistem de um conjunto de valores estimados a partir da amostra de dados provenientes dos experimentos aleatórios.

No caso da regressão polinomial local de kernel, cada ponto do modelo de regressão é estimado pelo ajuste de um polinômio de grau p à amostra de dados 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 3.5 apresenta um exemplo do ajuste da curva de regressão utilizando a regressão polinomial local de kernel, onde a curva de regressão (linha sólida) foi estimada utilizando um polinômio de 1º grau, e as linhas pontilhadas mostram como a curva foi construída em dois pontos distintos.

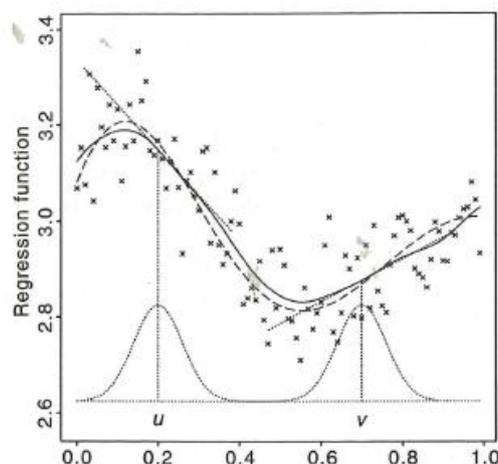


Figura 3.5 – Exemplo de ajuste de uma curva de regressão pelo método de regressão polinomial local de kernel [WAND e JONES, 1995]

O termo Kernel se refere a qualquer função de suavização K , tal que $K(x) \geq 0$, $\int K(x)dx = 1$, $\int xK(x)dx = 0$, e $\sigma_K^2 = \int x^2K(x)dx > 0$. Há diferentes tipos de função de Kernel, sendo que as funções mais utilizadas são a função Gaussiana e a função Epanechnikov. Além disso, deve-se ressaltar que, embora existam diferentes tipos de funções de kernel, a escolha da mesma pouco influencia para a construção dos modelos, uma vez que os modelos criados com diferentes funções de kernel são numericamente parecidos. A figura 3.6 ilustra a forma das funções Gaussiana e Epanechnikov.

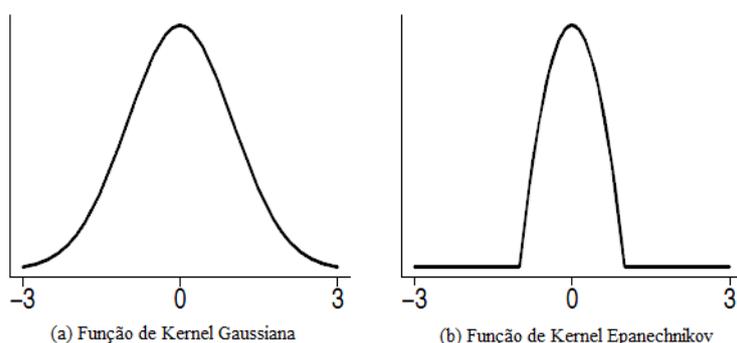


Figura 3.6 – (a) Função de Kernel Gaussiana (b) Função de Kernel Epanechnikov [WASSERMAN, 2006]

Considerando o polinômio de grau p da equação (3.19), a regressão polinomial local de kernel se baseia na aplicação do método dos mínimos quadrados ponderados ao conjunto de dados vizinhos ao ponto x_i , ou seja, estimar os coeficientes $\beta =$

$(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)^T$ de tal forma a minimizar equação (3.20). Para isso, basta utilizar o estimador linear $\hat{\beta}$, mostrado na equação (3.21). Além disso, deve-se ressaltar que a função de kernel está escalada do parâmetro h , conhecido como “bandwidth”, cuja função é selecionar a vizinhança do ponto x_i .

$$P_x = \beta_0 + \beta_1(x_i - x) + \beta_2(x_i - x)^2 + \dots + \beta_p(x_i - x)^p \quad (3.19)$$

$$\sum_{i=1}^n \{Y_i - \beta_0 - \beta_1(x_i - x) - \dots - \beta_p(x_i - x)\}^2 K_h(x_i - x) \quad (3.20)$$

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{Y} \quad (3.21)$$

onde:

$$K_h(x_i - x) = h^{-1} K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \quad (3.22)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 - x & \dots & (x_1 - x)^p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_p - x & \dots & (x_n - x)^p \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T \quad (3.24)$$

$$\mathbf{W} = \text{diag}\{K_h(x_1 - x), \dots, K_h(x_n - x)\} \quad (3.25)$$

Diante disso, o estimador polinomial local de kernel $\hat{m}(x)$, responsável por criar o modelo de regressão, é numericamente igual ao valor do coeficiente β_0 , logo o mesmo pode ser calculado pela equação (3.26).

$$\hat{m}(x) = \mathbf{e}^T (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{Y} \quad (3.26)$$

onde: $\mathbf{e}^T = (1, 0, 0, \dots)$, e \mathbf{X} , \mathbf{Y} e \mathbf{W} são definidos pelas equações (3.23), (3.24) e (3.25), respectivamente.

Um caso especial da regressão polinomial local de kernel é a regressão local de kernel, no qual o grau do polinômio é zero. Neste caso, a função de regressão é obtida pelo estimador Nadaraya-Watson mostrado na equação (3.27).

$$\hat{m}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n K_h(x_i-x)Y_i}{\sum_{i=1}^n K_h(x_i-x)} \quad (3.27)$$

A influência das observações próximas a um ponto da reta é controlada pelo parâmetro de suavização chamado de “*bandwidth*”, de tal forma que ele for muito pequeno, a curva pode sofrer uma subsuavização. E, no caso do parâmetro de suavização ser muito, a curva pode sofrer uma sobresuavização e tender para uma reta. A figura 3.7 mostra as duas situações.

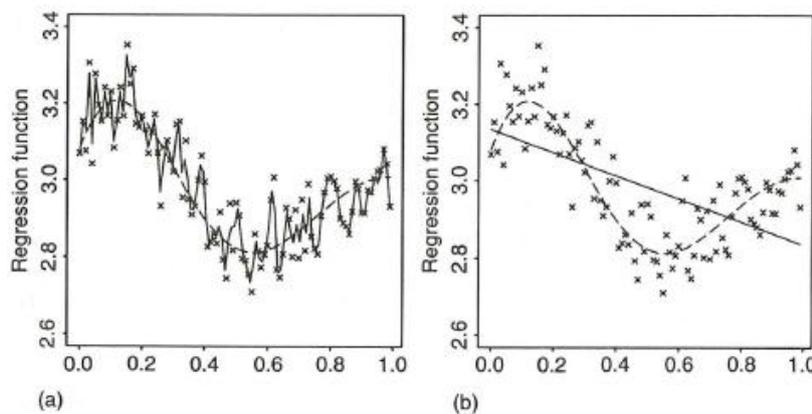


Figura 3.7 – (a) Subsuavização da curva de regressão (b) Sobresuavização da curva de regressão [WAND e JONES, 1995]

Então, a seleção do parâmetro de suavização é de fundamental importância para a construção da curva de regressão. Em virtude disso, há métodos que, baseado no erro quadrático médio da curva, fornece o valor do parâmetro de suavização que construirá a curva de regressão mais eficiente.

A seleção do parâmetro de suavização utilizado neste trabalho foi realizada com base no método “*plug-in direto*”. Este método se baseia em escrever a fórmula do “*bandwidth*” ótimo assintoticamente e inserir estimativas de grandezas desconhecidas na mesma. Diante disso, a equação (3.28) foi utilizada para calcular o “*bandwidth*” ótimo.

$$h_* = \left(\frac{C(h,p) \int \frac{\sigma^2(x)}{f(x)} dx}{n \int (m^{p+1}(x))^2 dx} \right)^{1/(2p+3)} \quad (3.28)$$

onde:

$$C(h, p) = \left(\frac{(p+1)!^2 (2h+1) \int K_h^{*2}(t) dt}{2(p+1-h) \left(\int t^{p+1} K_h^*(t) dt \right)^2} \right)^{1/(2p+3)} \quad (3.29)$$

3.4 - Conclusão

A análise de regressão é uma importante ferramenta da estatística que permite estudar e analisar o comportamento de uma variável de interesse em função da variação de um conjunto de variáveis.

Os métodos de regressão não paramétrica apresentam grande flexibilidade na construção de modelos regressão em detrimento dos métodos de regressão paramétrica, uma vez que não são limitados a uma família de equações, logo podem fornecer modelos com ajustes mais eficientes em relação ao conjunto de observações.

O próximo capítulo apresentará a metodologia desenvolvida para avaliar a contribuição harmônica de múltiplas cargas geradoras de harmônicos tendo como base a regressão polinomial local de kernel apresentada neste capítulo.

Capítulo 4 – Metodologia e Resultados

4.1 – Introdução

Estimar a contribuição de múltiplas fontes harmônicas num ponto qualquer de um sistema elétrico não é uma tarefa trivial, uma vez que as correntes harmônicas provenientes das diversas cargas não lineares presentes neste sistema podem se cancelar ou se somar, de tal forma a diminuir ou aumentar os níveis de distorção harmônica de tensão do mesmo.

Além disso, muito dos qualímetros presentes atualmente no mercado registram somente os módulos das componentes harmônicas de tensão e corrente, o que dificulta a determinação da contribuição das múltiplas cargas geradoras de harmônicos, somente a partir da análise das medições, e, portanto, sendo necessário o auxílio de um estudo de fluxo de carga harmônico, que por sua vez fornece os níveis de distorção harmônica de tensão e corrente somente para um cenário operativo estático do sistema.

De forma a contornar esta situação, em Mazin, Xu e Huang (2011) e Xu *et al* (2009), foram propostas metodologias baseadas em técnicas de inferência estatística e regressão linear múltipla, e regressão linear simples, respectivamente, que, a partir das medições dos módulos dos harmônicos, possibilitavam estimar a contribuição de cada fonte harmônica num ponto qualquer de um sistema elétrico. No entanto, estas técnicas também apresentam uma estimativa para um único cenário operativo estático do sistema, uma vez que é necessário selecionar um conjunto de dados de forma que o modelo linear obtido apresente um alto coeficiente de correlação, e, portanto, baixa variância. Logo, essas metodologias também são incapazes de descrever a influência das fontes harmônicas durante todo o período de medição.

Diante dessa situação, este capítulo apresenta uma metodologia para estimar a contribuição de múltiplas fontes harmônicas na distorção harmônica de tensão em qualquer ponto de um sistema elétrico, baseada em técnicas de regressão não paramétrica, de tal forma que somente os dados provenientes das medições de tensão e corrente sejam responsáveis pelo ajuste do modelo que descreve a relação entre a tensão e a corrente harmônica, e, portanto, eliminando a restrição imposta pelas técnicas de regressão paramétrica de adaptar esse modelo a uma família de equações pré-

definidas. Além disso, esta metodologia é aplicada em dois estudos de casos, de tal forma, a mostrar a sua eficácia frente ao problema mencionado acima.

4.2 – Metodologia Proposta

A metodologia proposta neste trabalho se baseia na realização de uma análise de correlação de dados, utilizando técnicas de regressão não paramétrica, de tal forma a extrair um modelo de regressão (curva de regressão) que descreva a relação existente entre a corrente harmônica de uma carga não linear e a tensão harmônica de um ponto qualquer na rede elétrica que se deseja analisar, e, portanto, possibilite uma melhor visualização da influência da carga no nível de distorção harmônica da tensão.

Este modelo é construído com base nas medições do valor rms das tensões e correntes harmônicas obtidas em campo com os qualímetros. Logo, os transdutores de tensão e corrente, e o intervalo de integralização desses equipamentos de medição exercem uma grande influência na construção desses modelos de regressão. Além disso, deve-se salientar que essas tensões e correntes harmônicas devem estar em sua unidade base (volts e ampere, respectivamente), ao invés de normalizadas em relação à componente fundamental de forma a impedir que a mesma influencie na estimação do modelo de regressão.

Para a escolha do intervalo de integralização dos qualímetros a serem utilizados nas campanhas de medição, deve-se levar em consideração a natureza das cargas geradoras de harmônicos presentes na rede elétrica. Por exemplo, se uma das fontes harmônicas for um forno elétrico a arco, o intervalo de integralização de 10 minutos se torna inadequado, uma vez que as tensões e corrente harmônicas apresentam rápidas variações de seus valores rms.

Um aspecto importante nesta metodologia está na utilização das técnicas de regressão não paramétrica, mais especificamente na regressão polinomial local de Kernel, para a estimação das curvas de regressão entre a tensão e a corrente harmônica, ao invés da utilização da técnica de regressão linear proposta em Xu *et al* (2009), e Manzin, Xu e Huang (2011).

A escolha da regressão não paramétrica se justifica pela grande flexibilidade que a mesma oferece na estimação do modelo de regressão, uma vez que a mesma proporciona um ajuste mais efetivo do modelo às amostras de dados, e, portanto, é capaz de caracterizar a influência de cada fonte harmônica durante todo o período de

medição, diferentemente do modelo estimado por regressão paramétrica. Por exemplo, a regressão linear se limita a uma família de equações, que por sua vez pode não ser capaz de proporcionar o modelo de regressão mais adequado para estimar a contribuição das diversas fontes harmônicas durante todo o período de medição.

Para ilustrar com maior detalhe os procedimentos dessa metodologia, escolheu-se uma pequena rede elétrica do sistema elétrico brasileiro, a qual possui três cargas não lineares dominantes, conforme mostrado na a figura 4.1. De forma a avaliar a influência da carga A na tensão do 7º harmônico da barra X, aplicou-se a regressão polinomial local de kernel nas medições da tensão e corrente do 7º harmônico da barra X e da carga A, respectivamente, mostradas na figura 4.2. Deve-se salientar que a escolha do 7º harmônico foi somente para ilustrar como funciona esta metodologia.

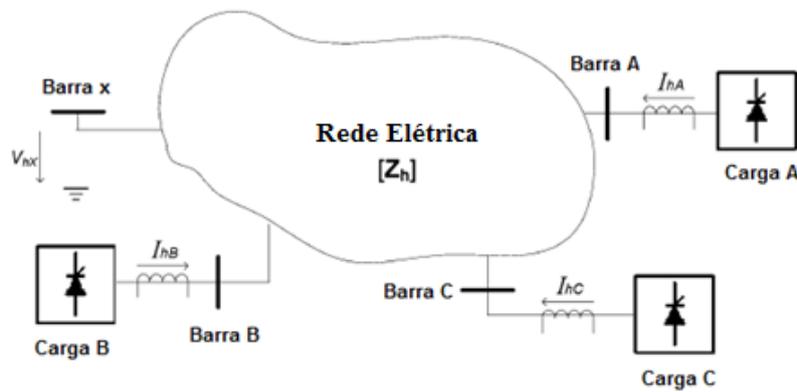


Figura 4.1 – Sistema típico de transmissão ou distribuição

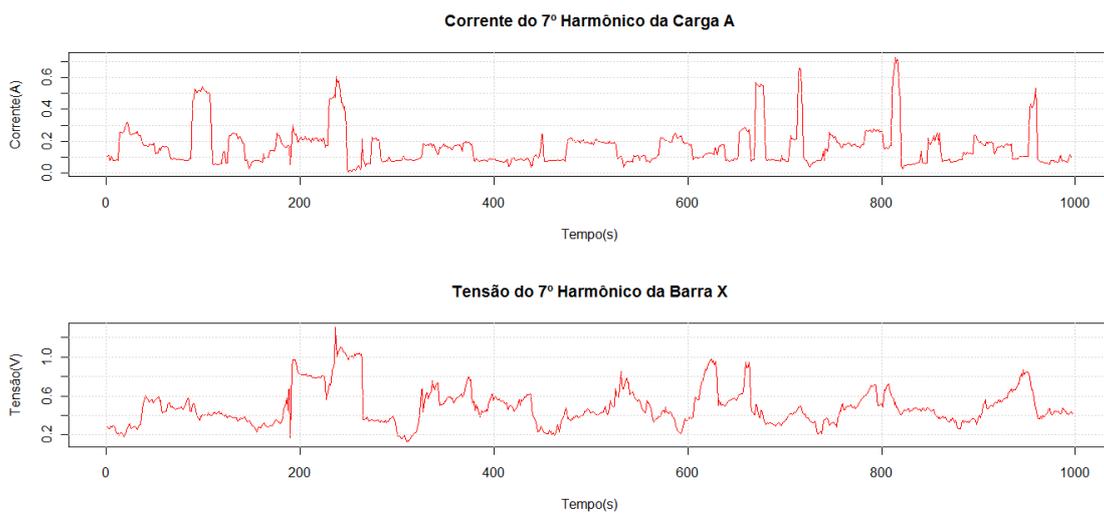


Figura 4.2 – Gráficos da corrente e da tensão do 7º harmônico medidos na carga A e na barra X, respectivamente

Com a aplicação da regressão polinomial local de kernel nos dados de tensão e corrente do 7º harmônico da barra X e da carga A, respectivamente, obteve-se o modelo de regressão, cuja representação gráfica está mostrada na figura 4.3 através da curva de regressão vermelha. Esse modelo, em virtude do método de regressão não paramétrica, consiste numa base de dados que associa a corrente do 7º harmônico da carga à tensão de mesma ordem harmônica da barra X.

Esse modelo de regressão é composto da influência da carga A quanto da influência das outras cargas na tensão do 7º harmônico da barra X, uma vez as medições das tensões e correntes harmônicas é resultado da interação das diversas fontes harmônicas presentes nesta rede elétrica. Logo, diante dessa situação, pode-se considerar que o modelo de regressão é composto de duas componentes principais: a componente de tensão do 7º harmônico provocada somente pela carga A, e a componente tensão do 7º harmônico provocada pela interação das outras cargas, denominada de tensão harmônica residual.

É razoável supor que a tensão harmônica residual é o valor da tensão do 7º harmônico quando a corrente de mesma ordem harmônica da carga A é zero, ou seja, é o valor de tensão que intercepta o eixo das ordenadas do gráfico da figura 4.3. Então, cada valor de tensão do 7º harmônico estimado pelo modelo e representado pela curva de regressão vermelha, mostrada no gráfico da figura 4.3, deve ser subtraído da tensão residual de forma a obter a contribuição harmônica somente da carga A, uma vez que no modelo da figura 4.3 está também inserido a contribuição das outras fontes harmônicas.

De acordo com esse modelo, o valor da tensão residual do 7º harmônico na barra X (tensão existente na barra X quando não houver injeção de corrente do 7º harmônico na rede elétrica pela carga A) é 1,1 V. Diante disso, o valor máximo e mínimo de distorção harmônica de tensão que a componente de 7ª ordem da carga A provoca na barra X são 0,05 V e -0,93 V, respectivamente.

Comparando o modelo de regressão criado com a regressão polinomial local de kernel com o modelo criado com a regressão linear (curva azul na figura 4.3), pode-se observar que o modelo linear não é capaz de se ajustar de maneira mais efetiva à amostra de dados, conforme o modelo não paramétrico mostrado na curva vermelha, e, portanto, apresenta valores bastante discrepantes em relação ao modelo não paramétrico.

Além disso, ao analisar o coeficiente de correlação linear de Pearson entre a tensão e a corrente do 7º harmônico, calculado pela equação 3.4, que é 16 %, percebe-se

que a correlação linear é fraca, o que indica que o modelo obtido pela regressão linear simples possui alta variância e baixa confiabilidade, o que ratifica que o modelo de regressão da curva azul não é capaz de representar satisfatoriamente a relação entre a carga A e a tensão do 7º harmônico da barra X.

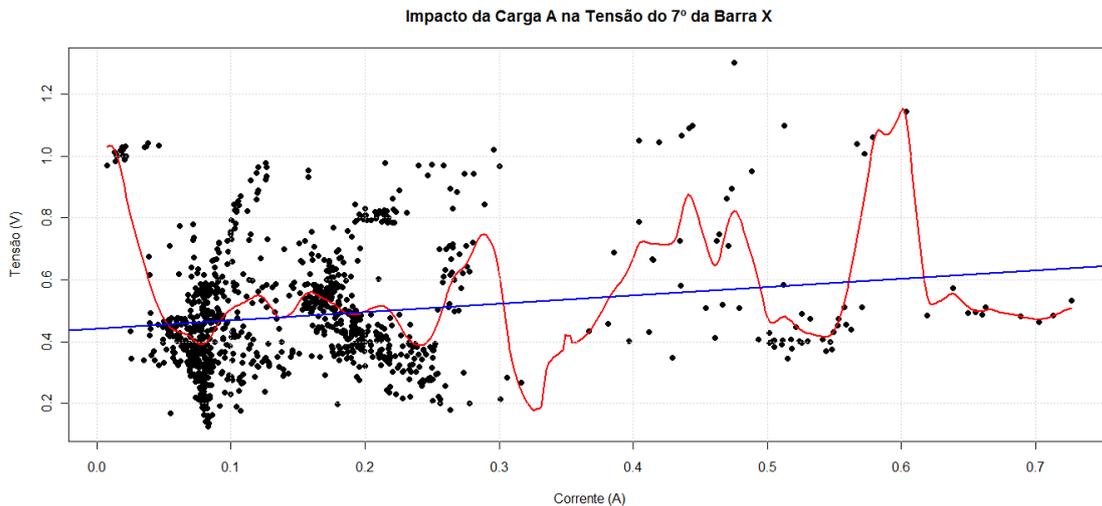


Figura 4.3 – Modelo de regressão entre a tensão e a corrente do 7º harmônico da barra X e da carga A, respectivamente

Para avaliar a influência da carga A na tensão do 7º harmônico da barra X durante o período de medição, primeiramente, estima-se, o modelo representado pela curva vermelha, os valores de tensão do 7º harmônico da barra X provocados somente pela carga A, conforme mostrado na figura 4.4.

De acordo com a figura 4.4, pode-se perceber que a carga A influencia negativamente a tensão do 7º harmônico na barra X durante todo o período de medição, uma vez que a tensão residual do 7º harmônico (tensão provocada pelas outras fontes harmônicas) é maior que a tensão harmônica provocada pela carga A, e, portanto, mostrando que a carga A causa uma redução na taxa de distorção de tensão do 7º harmônico.

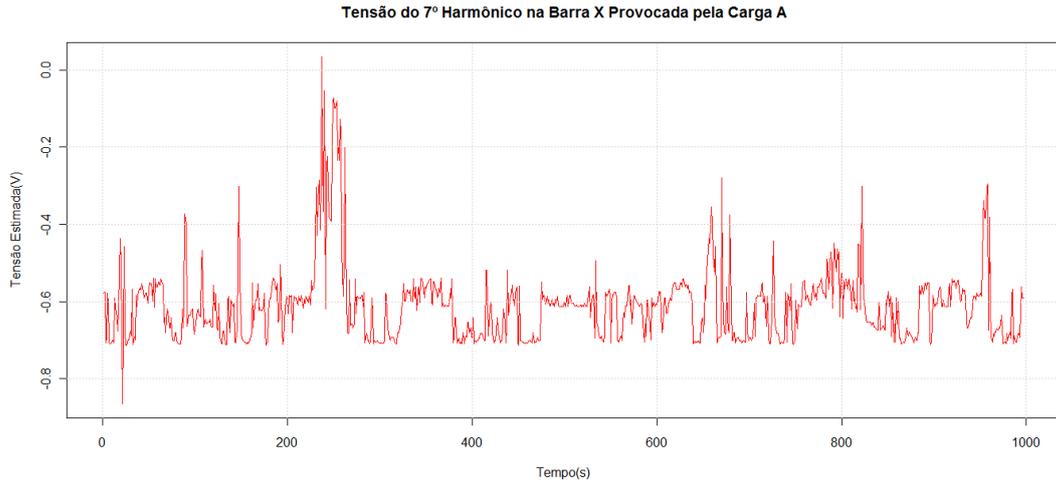


Figura 4.4 – Tensão do 7º harmônico na barra X provocada pela carga A

Uma vez estimada a tensão do 7º harmônico provocada somente pela carga A, como mostrado no gráfico da figura 4.4, avalia-se o impacto dessa carga na barra X durante todo período de medição pela multiplicação da razão entre a tensão harmônica estimada da figura 4.4 e tensão harmônica medida por 100%, conforme pode ser visto no gráfico da figura 4.5.

De acordo o gráfico da figura 4.5, pode-se verificar que a carga A gera tensões cujo valor varia entre 0% e -500%, ou seja, a carga A gera uma taxa alta de distorção do 7º harmônico, embora seja no sentido de reduzir a distorção desse harmônico na barra X.

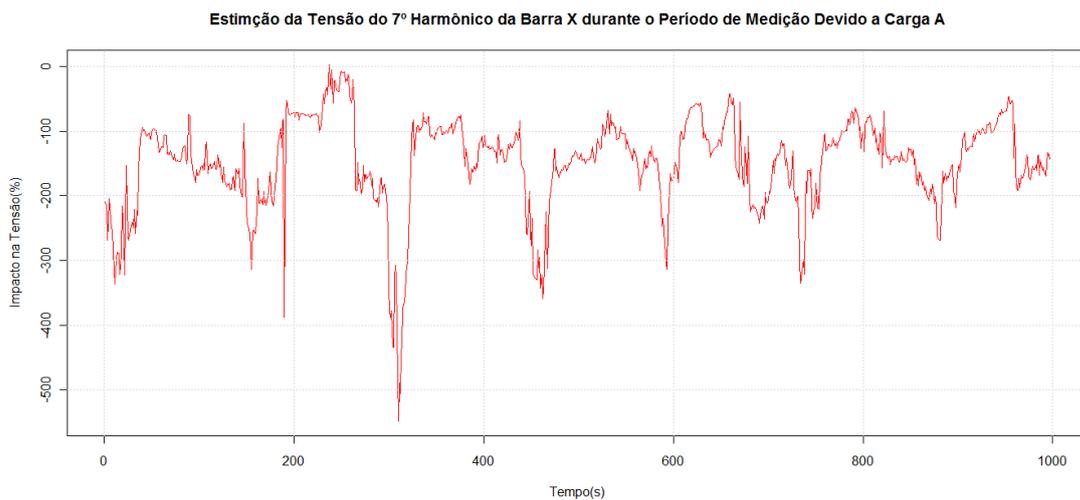


Figura 4.5 – Impacto da carga A na tensão do 7º harmônico da barra X durante o período e medição

Na figura 4.6 está mostrado um fluxograma que resume a metodologia descrita anteriormente, com o objetivo de tornar claro cada uma das etapas dessa metodologia.

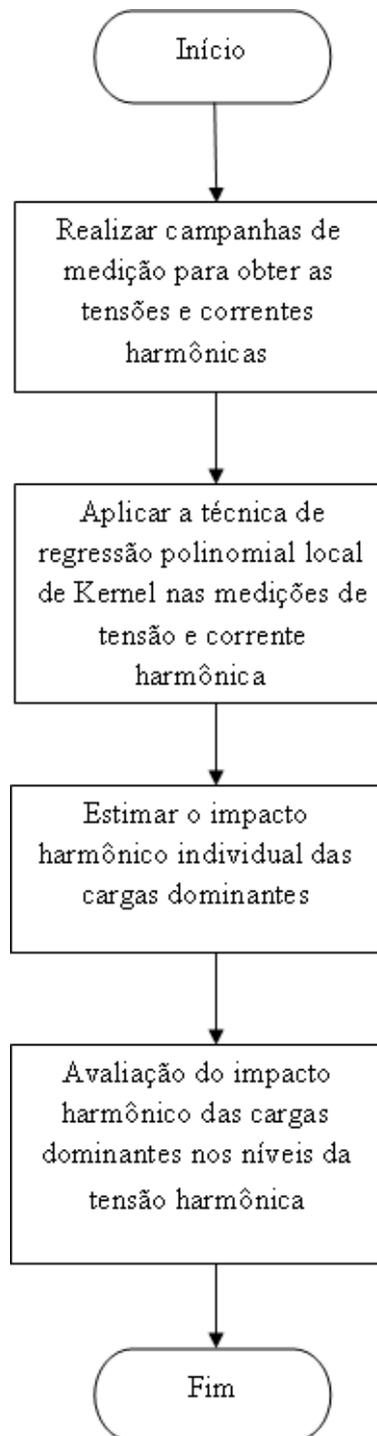


Figura 4.6 – Fluxograma da metodologia proposta de estimação dos impactos harmônicos de múltiplas cargas

4.3 – Estudos de Casos

De forma a avaliar a metodologia proposta anteriormente, realizou-se um estudo em dois sistemas elétricos reais com perfis de cargas distintos, de tal forma, a determinar a influência de algumas cargas não lineares na distorção harmônica de tensão em alguns pontos desses sistemas.

Durante o estudo em ambos os sistemas, obtiveram-se medições de tensões e correntes harmônicas em pontos estratégicos dos mesmos, o que possibilitou a construção de modelos de regressão que descrevessem a relação existente entre essas grandezas.

Estes modelos foram construídos utilizando a técnica de regressão polinomial local de kernel, onde a escolha do grau de polinômio foi realizada de forma manual, ou seja, sem o auxílio de um algoritmo de otimização que forneça de forma automática esse parâmetro. E o parâmetro de suavização, chamado *bandwidth*, foi escolhido de forma automática utilizando a metodologia *plug-in direto*, ou seja, esse parâmetro foi obtido pela aplicação da equação (3.28) mostrada no capítulo 3.

Os modelos de regressão resultantes da aplicação da técnica de regressão não paramétrica nas tensões e correntes harmônicas medidas foram construídos por meio do software R, que é um software estatístico disponível na internet sob uma licença pública geral (no inglês conhecido como General Public License ou GPL). Ele possui um conjunto de ferramentas integradas voltadas para a manipulação de dados, cálculos matemáticos e exibição de gráficos.

4.3.1 – Estudo de Caso 1

O estudo de caso 1 foi realizado em um condomínio de casas localizado na cidade de Manaus. Esse condomínio é composto de um transformador de entrada, que é responsável por reduzir a tensão de 13,8 kV, fornecida pela distribuidora de energia local, para a tensão de 127 V; um conjunto de 10 casas com alimentação trifásica; e uma área de recreação. A figura 4.7 mostra um diagrama simplificado dessa rede elétrica.

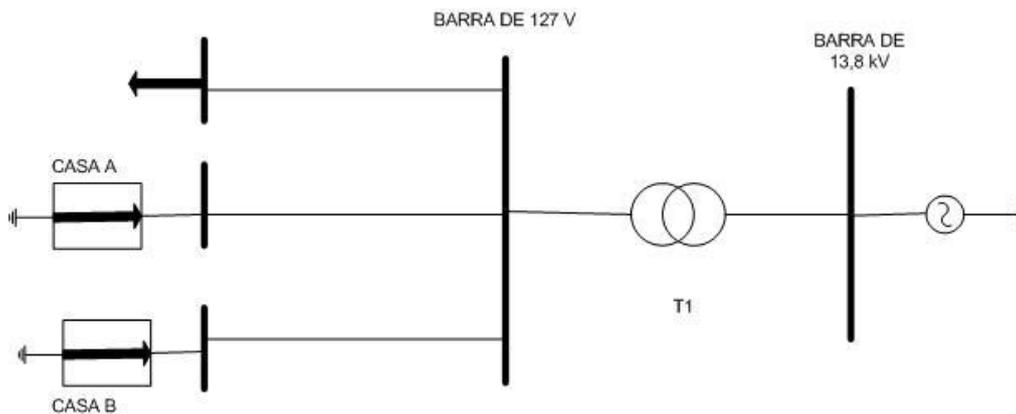


Figura 4.7 – Rede elétrica do condomínio em estudo

Neste sistema, realizaram-se campanhas de medição de uma semana na entrada de todas as casas e de um mês no secundário do transformador T1 na entrada do condomínio utilizando o analisador Power Visa, porém, devido à pequena quantidade qualímetros utilizados nessa campanha de medição, as medições nas casas foram realizadas aos pares, ou seja, as medições foram realizadas somente em duas casas num mesmo período.

Diante dessa situação, utilizaram-se somente as medidas das correntes harmônicas das casas A e B, uma vez que as mesmas foram obtidas sincronizadamente na mesma semana. Além disso, essas medidas das correntes harmônicas estavam também em sincronia com as medidas da tensão harmônica do transformador de alimentação do condomínio.

Durante essas campanhas, obtiveram-se medições das tensões e correntes tanto para a frequência fundamental quanto para as frequências harmônicas. Porém, neste estudo, foram utilizados somente as tensões e correntes harmônicas de 3ª e 5ª ordens, em virtude das mesmas normalmente apresentarem níveis mais significativos do que as demais ordens. Logo, deve-se ressaltar que foram utilizadas as medições de tensão e corrente do 3º e 5º harmônicos do secundário do transformador T1, e as correntes harmônicas de 3ª e 5ª ordens das casas A e B.

De acordo com a figura 4.8, que mostra os níveis de distorção do 3º e 5º harmônicos de tensão obtidos durante a campanha de medição no secundário do transformador T1, pode-se verificar que os níveis de distorção para ambos 3º e 5º harmônicos de tensão não apresentaram violações dos limites estabelecidos pelo PRODIST (mostrados na tabela 2.6) e pela recomendação 519:1992 (mostrados na tabela 2.3) nas três fases.

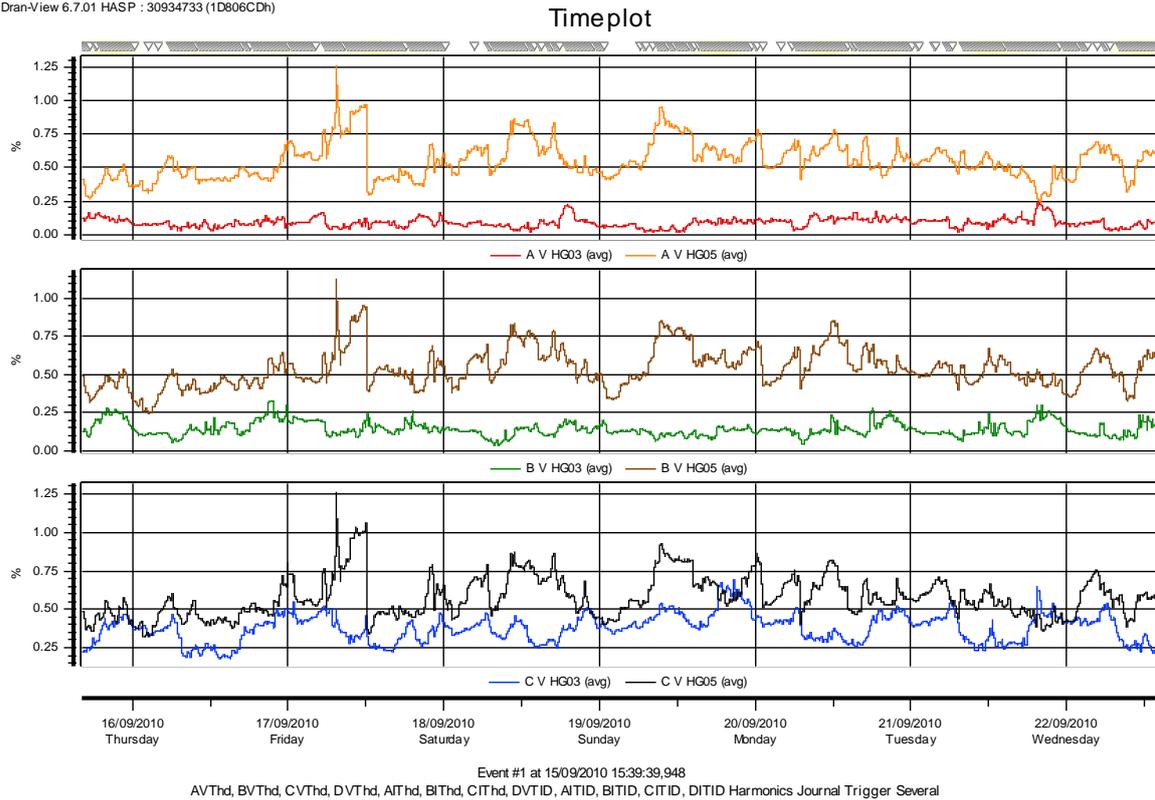


Figura 4.8 – Gráficos da tensão do 3º e 5º harmônicos nas fases A, B e C do secundário do transformador T1

Entretanto, no caso das correntes harmônicas do secundário do transformador de entrada do condomínio, observou-se que somente a corrente do 5º harmônico nas três fases e a corrente do 3º harmônico da fase A se mantiveram dentro do limite de 10 %, estabelecido pela recomendação IEEE 519:1992 (mostrado na tabela 2.4), enquanto que as correntes do 3º harmônico das fases B e C violaram esse limite. A figura 4.9 mostra os níveis de distorção das correntes harmônicas de 3ª e 5ª ordens nas fases A, B e C.

Analisando melhor os gráficos das correntes do 3º harmônico das fases B e C da figura 4.9, pode-se observar que as violações dos limites de distorção harmônica individual de corrente foram mais frequentes durante os dias da semana, enquanto que, no final de semana, a quantidade de violação reduziu.

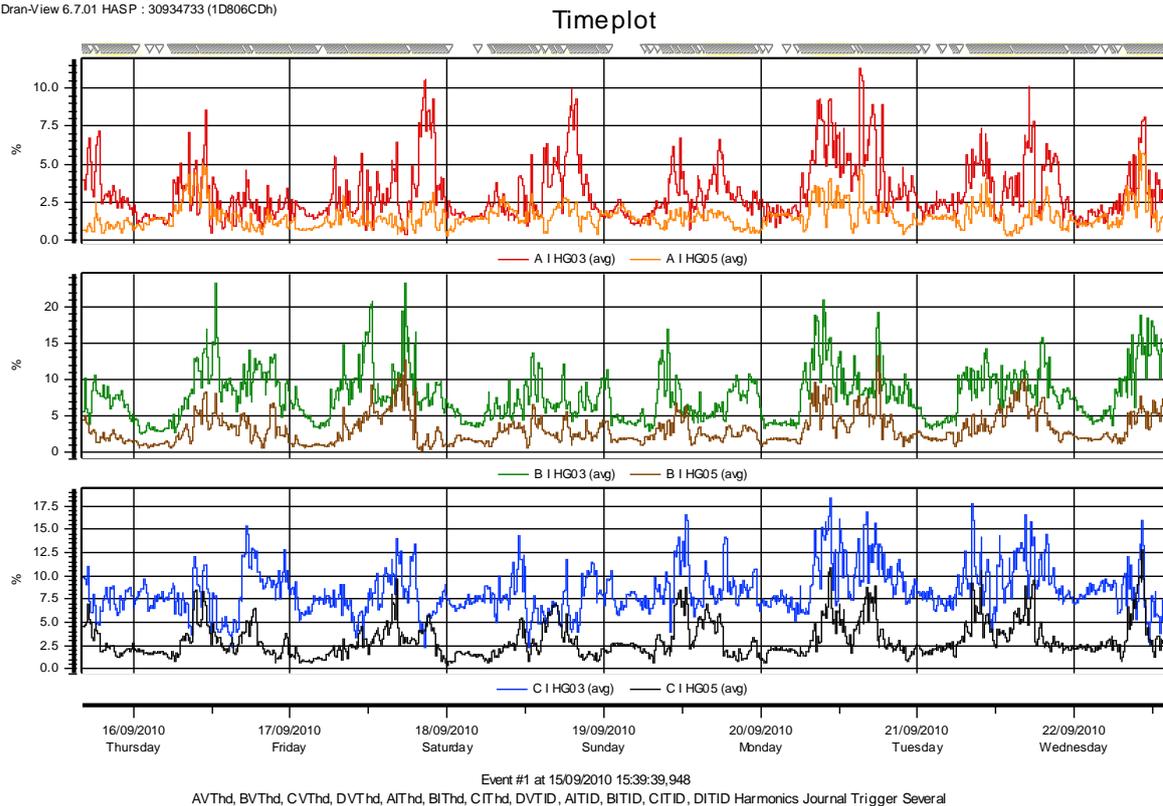


Figura 4.9 – Gráficos das correntes do 3º e 5º harmônicos nas fases A, B e C do secundário do transformador T1

Analisando os gráficos das correntes do 3º e 5º harmônicos das três fases da casa A, mostrado na figura 4.10, observou-se que as correntes de ambos 3º e 5º harmônicos das fases A e B apresentaram violações do limite de 10 %, enquanto que, na fase C, somente a corrente do 3º harmônico apresentou violações.

Além disso, deve-se ressaltar que a corrente fundamental das fases B e C da casa A apresentou valores praticamente iguais a zero em alguns momentos, e, portanto, invalidando as medições nestes momentos, uma vez que a medição de distorção de corrente ficou fora da faixa de leitura confiável do medidor. A figura 4.11 mostra o gráfico da corrente nas fases A, B e C da casa A.

Timeplot

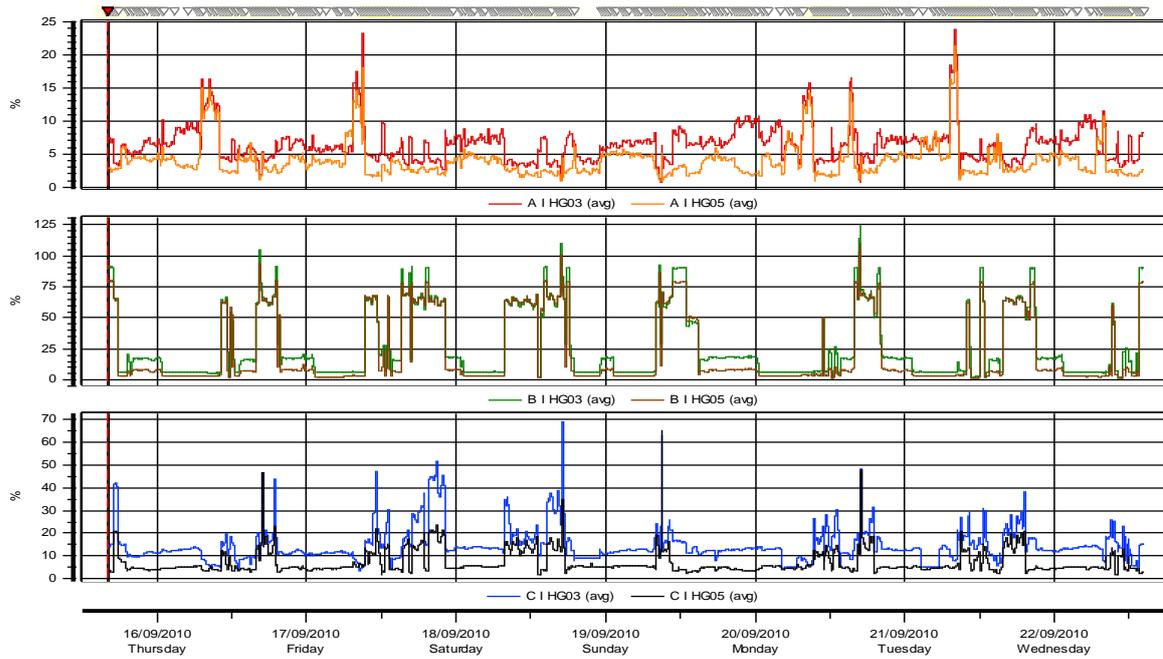


Figura 4.10 – Gráficos das correntes do 3° e 5° harmônicos nas fases A, B e C da casa A

Timeplot

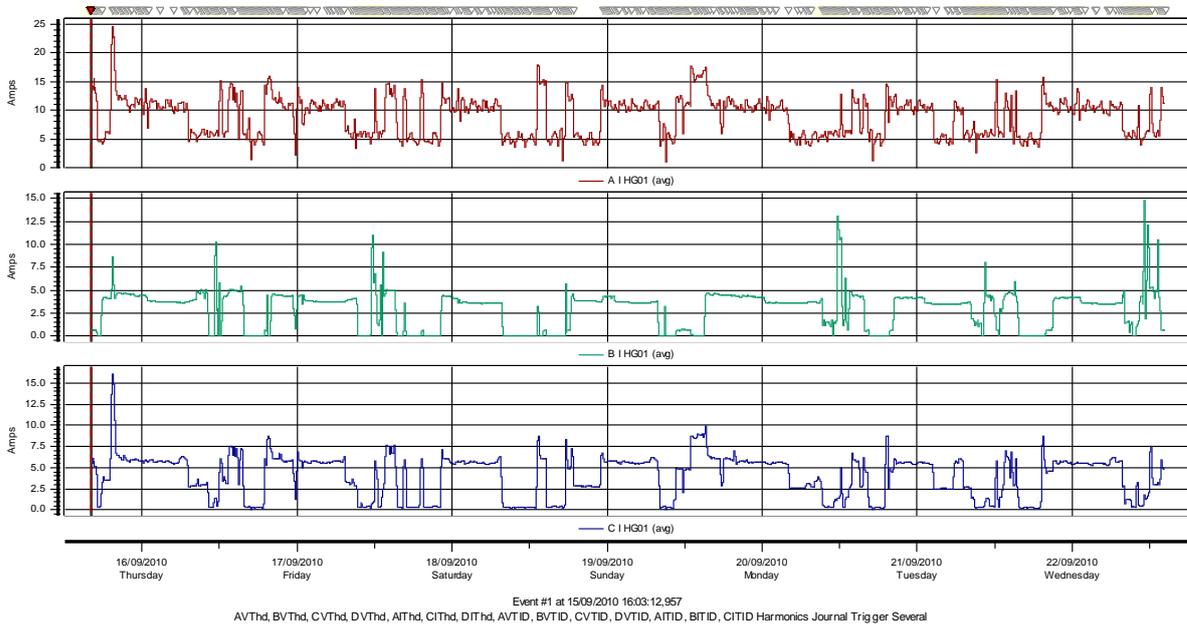


Figura 4.11 – Gráficos das correntes fundamental nas fases A, B e C da casa A

Analisando o gráfico da corrente do 3° e 5° harmônicos das três fases da casa B, mostrado na figura 4.12, observou-se que as correntes de ambos 3° e 5° harmônicos da fase C apresentaram violações do limite de 10 %, enquanto que, na fase B, somente a

corrente do 3º harmônico apresentou violações. E na fase A, não se observou violações da recomendação IEEE 519:1992.

Além disso, deve-se ressaltar que a corrente fundamental das fases A e B da casa B apresentaram valores praticamente iguais a zero em alguns momentos, e, portanto, invalidando as medições nestes momentos. A figura 4.13 mostra o gráfico da corrente nas fases A, B e C da casa A.

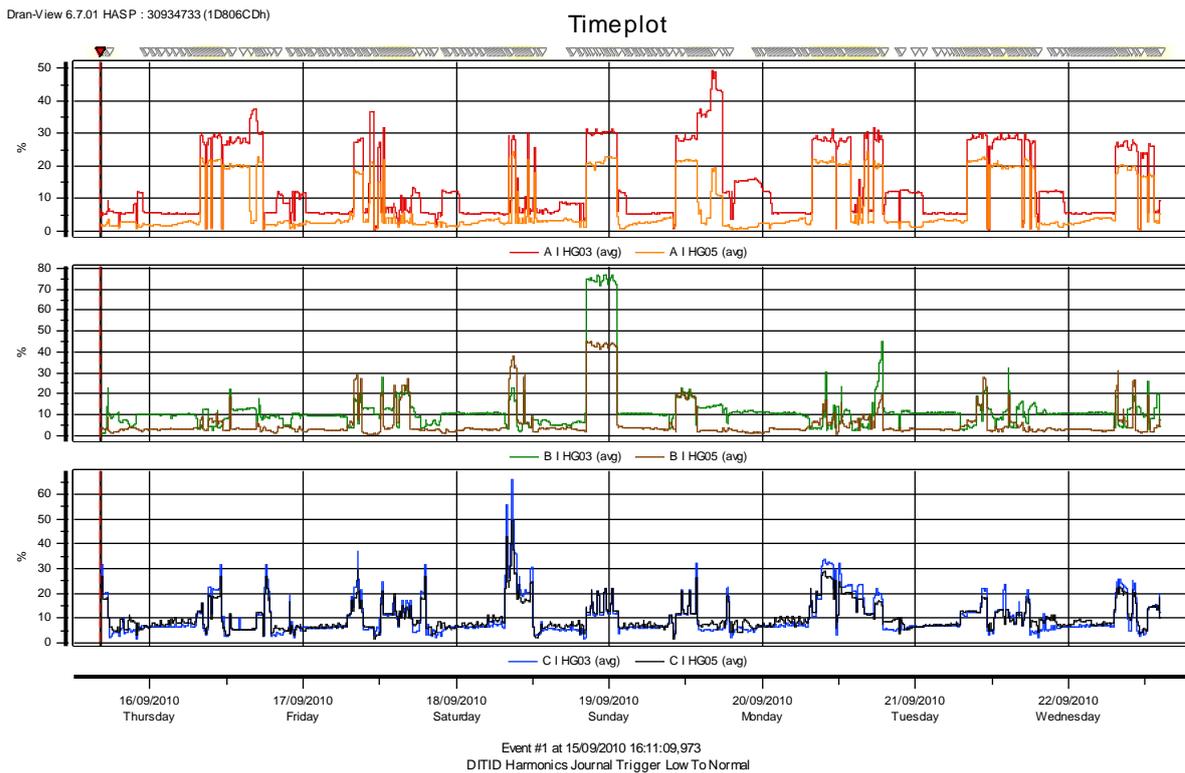


Figura 4.12 – Gráficos das correntes do 3º e 5º harmônicos nas fases A, B e C da casa B

Um aspecto importante que pode ser observado nos gráficos da corrente fundamental, mostrados na figura 4.13, é a semelhança existente entre o perfil da corrente da fase B e da fase C, o que pode indicar a presença de cargas bifásicas conectadas nessas fases.

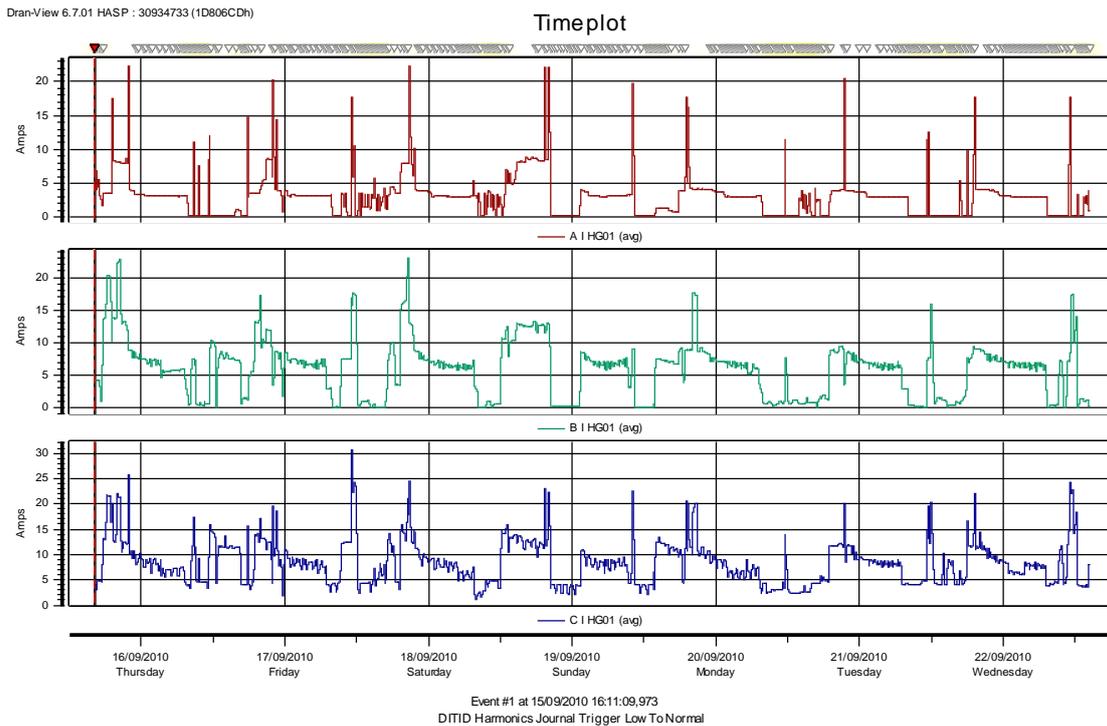


Figura 4.13 – Gráficos da corrente fundamental nas fases A, B e C da casa B

A partir da análise das medições de tensão e corrente do 3º e 5º harmônicos no secundário do transformador T1, na casa A e na casa B, pode-se perceber que, embora a corrente harmônica, em algumas fases, tenha apresentado níveis de distorção considerados inadequados, de acordo com o PRODIST e a recomendação IEEE 519:1992, as tensões harmônicas na entrada do condomínio apresentaram níveis aceitáveis de distorção, ou seja, níveis compatíveis com os limites estabelecidos pelas recomendações mencionadas no capítulo 2. Então, diante dessa situação, a metodologia proposta anteriormente é aplicada nas medições de corrente e tensão harmônica das casas A e B, e do transformador T1, respectivamente, de tal forma a estimar a contribuição de cada casa no nível de distorção harmônica de tensão do secundário do transformador T1 de entrada desse condomínio.

O estudo de caso 1 foi dividido em 2 etapas principais: avaliação da relação existente entre as tensões harmônicas de 3ª e 5ª ordens do secundário do transformador T1 e as correntes harmônicas de 3ª e 5ª ordens da casa A; e avaliação da relação existente entre as tensões harmônicas de 3ª e 5ª ordens do secundário do transformador T1 e as correntes harmônicas de 3ª e 5ª ordens da casa B.

4.3.1.1 – Avaliação do Impacto da Casa A na Distorção de Tensão do Transformador

Na primeira etapa do estudo da contribuição harmônica das casas A e B no transformador T1 do condomínio na cidade de Manaus, concentrou-se na avaliação da contribuição harmônica da casa A na distorção harmônica do secundário do transformador T1.

Aplicando a regressão polinomial local de kernel nos valores de tensão e corrente do 3º harmônico medidos na fase A do transformador T1 e da casa A, respectivamente, extraiu-se o modelo de regressão cuja representação gráfica está mostrada na figura 4.14.

De acordo com esse modelo, a tensão residual do 3º harmônico (tensão do transformador no momento em que a corrente injetada na rede pela casa A é zero) é aproximadamente 0,098 V. Além disso, o valor máximo e mínimo da tensão do 3º harmônico, gerados pela corrente do 3º harmônico da casa A, na fase A do transformador T1 são aproximadamente 0,068 V e -0,015 V, respectivamente, conforme mostrado na figura 4.15.

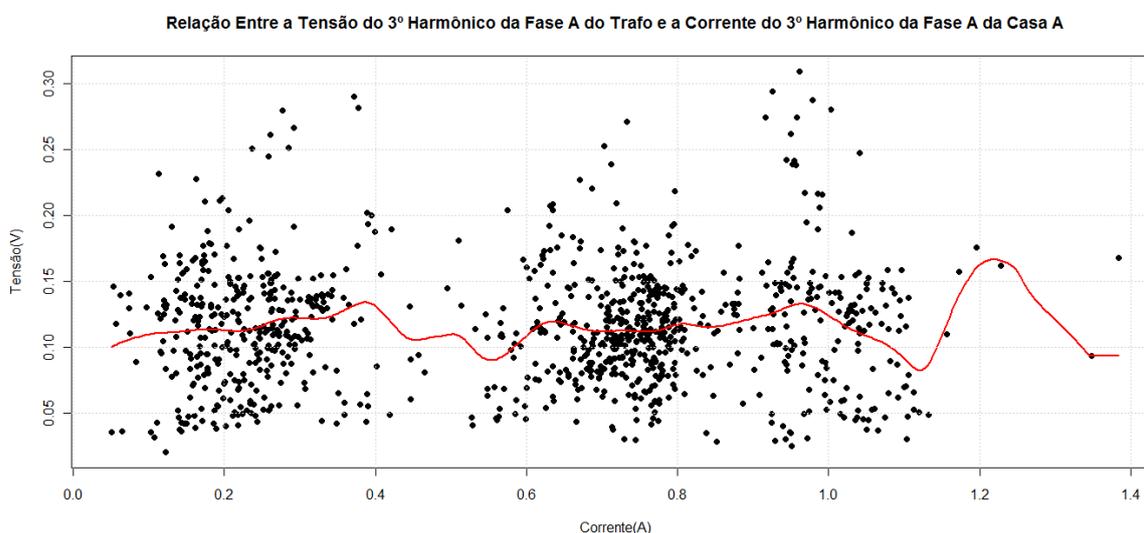


Figura 4.14 – Modelo de regressão entre a tensão e corrente do 3º harmônico medidos na fase A do transformador de entrada e da casa A, respectivamente

Com base no modelo de regressão mostrado na figura 4.14, estimou-se os valores da tensão do 3º harmônico da fase A do transformador T1 provocado somente pela casa A durante o período de medição, conforme mostrado na figura 4.15.

De acordo com o gráfico da figura 4.15, pode-se verificar que a casa A influencia positivamente a tensão do 3º harmônico na fase A do transformador T1 do condomínio em quase todo período de medição, uma vez que a tensão residual do 3º harmônico é menor que a tensão harmônica gerada pela casa A, e, portanto, mostrando que a casa A contribui no aumento da distorção do 3º harmônico na fase A do transformador T1 em quase todo período de medição.

Entretanto, pode-se observar que a casa A também influencia negativamente a tensão do 3º harmônico em alguns momentos, uma vez que essa tensão apresentou valores menores que o da tensão harmônica residual.

Em média, a tensão do 3º harmônico provocada pela casa A na fase A do transformador T1 foi 0,017 V, e o valor máximo da tensão harmônica foi igual 0,07 V e o valor mínimo foi -0,02 V, conforme a figura 4.15.

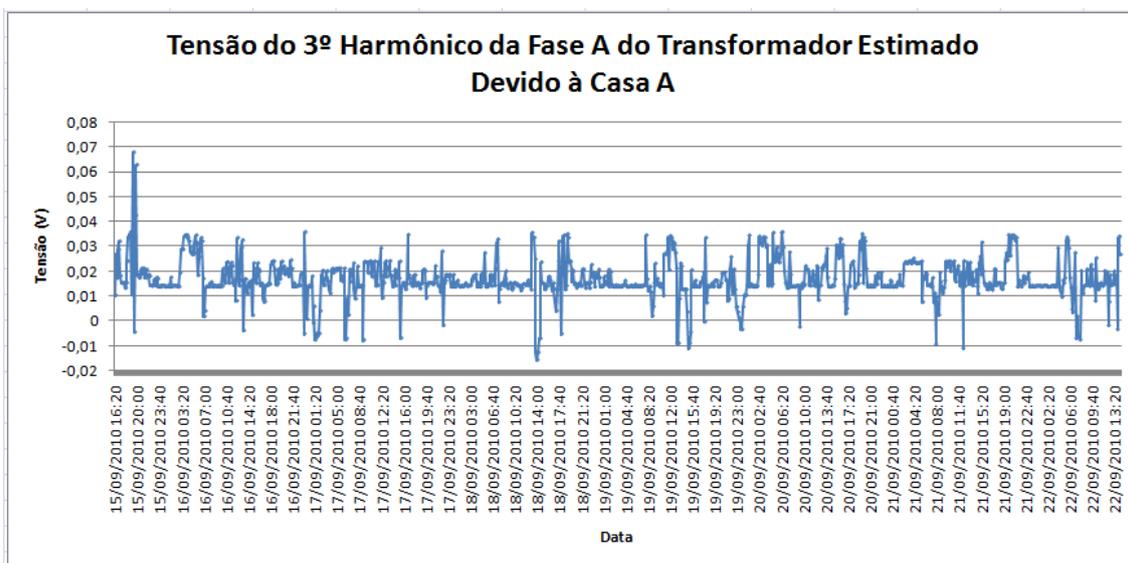


Figura 4.15 – Tensão do 3º harmônico da fase A do transformador T1 provocada somente pela casa A

A partir dos valores da tensão do 3º harmônico mostrados na figura 4.15, obteve-se o gráfico da figura 4.16, que mostra o impacto da casa A na tensão do 3º harmônico da fase A do transformador T1.

De acordo com o gráfico da figura 4.16, pode-se verificar que, na maior parte do período de medição, a tensão do 3º harmônico da fase A do transformador T1 correspondeu, em média, a 16,99% da tensão harmônica medida neste ponto, e

apresentou uma variação entre 0 e 40 % dessa mesma tensão harmônica. No entanto, pode-se observar que, às 14:00hs do dia 18/09/2010, a tensão do 3º harmônico gerada pela casa A atingiu um valor que corresponde à 133,78 % da tensão do 3º harmônico medido, e, portanto, indicando, que a tensão do 3º harmônico gerada pelas outras cargas não lineares provocou uma redução no nível de distorção gerado pela casa A, e então indicando a ocorrência de um possível cancelamento harmônico nesta fase.

Além disso, observou-se também que o impacto da casa A na tensão do 3º harmônico no sentido de aumentar o nível dessa tensão foi maior do que no sentido de reduzir-la.

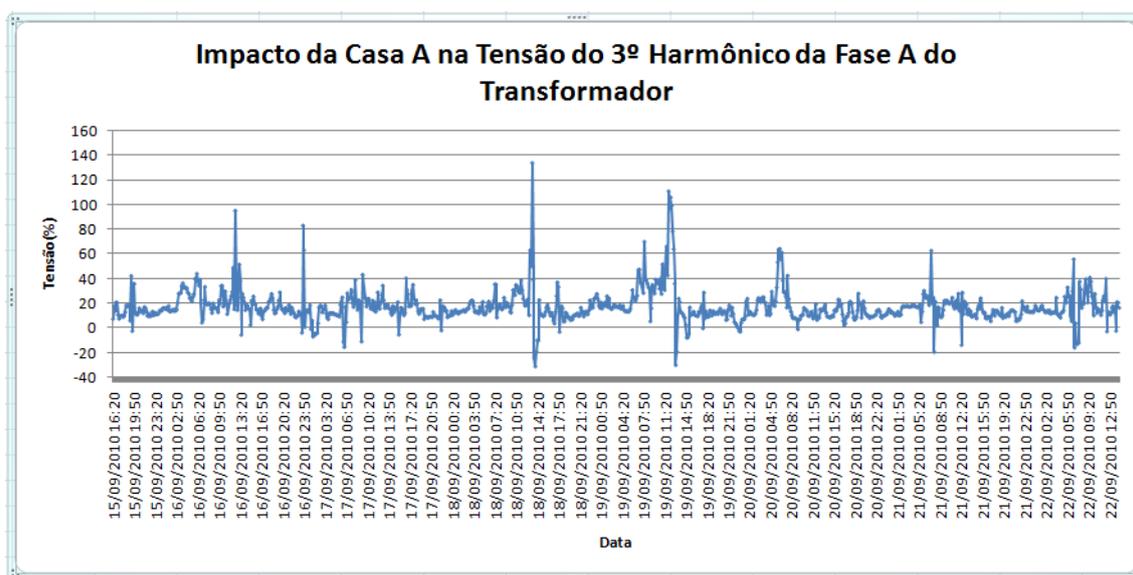


Figura 4.16 – Impacto da Casa A no nível de tensão do 3º harmônico da fase A do transformador de entrada do condomínio

Aplicando a regressão polinomial local de kernel nos valores da tensão e corrente do 3º harmônico medidas na fase B do transformador T1 e da casa A, respectivamente, obteve-se o modelo de regressão mostrado na figura 4.17.

De acordo com esse modelo, a tensão residual do 3º harmônico (tensão do transformador no momento em que a corrente injetada na rede pela casa A é zero) é aproximadamente 0,16 V. E o valor máximo e mínimo da tensão do 3º harmônico provocados pela corrente do 3º harmônico da casa A na fase B do transformador T1 são aproximadamente 0,11 V e -0,075 V, respectivamente.

Além disso, pode-se perceber a presença de discontinuidades na curva de regressão da figura 4.16, que se deve ao valor do parâmetro de suavização escolhido,

porém, em virtude do mesmo ter sido selecionado com o auxílio do método *Plugin direto*, essa curva já apresenta um erro quadrático médio mínimo, e, portanto, os valores após a descontinuidade podem ser considerados como dados espúrios ou também conhecidos como *outliers*.

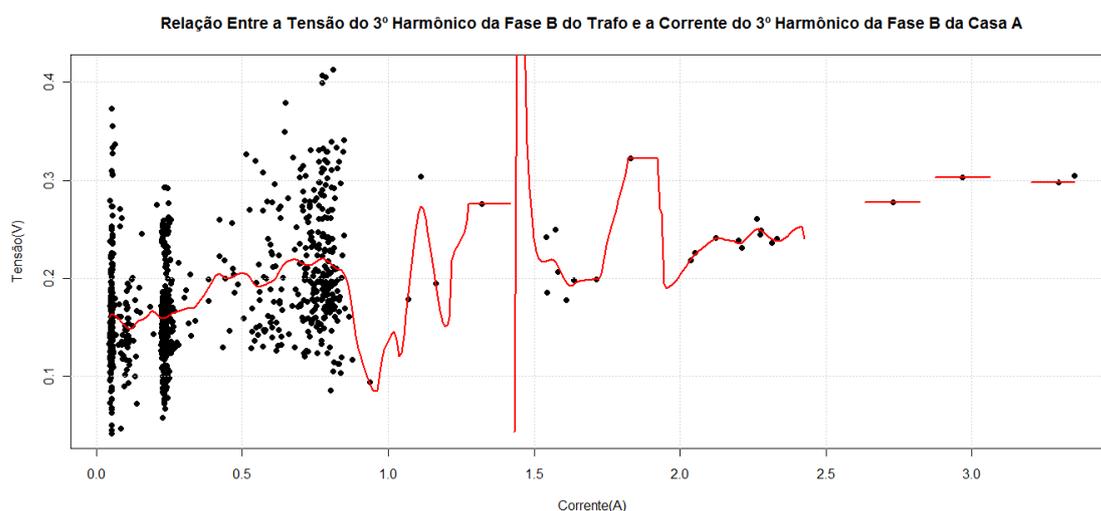


Figura 4.17 – Modelo de regressão entre a tensão e corrente do 3º harmônico medidos na fase B do transformador de entrada e da casa A, respectivamente

Com base no modelo de regressão mostrado na figura 4.17, estimou-se os valores da tensão do 3º harmônico da fase B do transformador T1 provocado somente pela casa A durante o período de medição, conforme mostrado na figura 4.18.

De acordo com o gráfico da figura 4.18, pode-se perceber que há momentos em que a tensão do 3º harmônico gerada pela casa A na fase B do transformador T1 foi 0 V, sendo que, ao compará-lo com o gráfico da corrente do 3º harmônico na fase B da casa A mostrado na figura 4.10 e com o gráfico da corrente fundamental na mesma fase da casa A mostrado na figura 4.11, verifica-se que os períodos que a tensão do 3º harmônico do transformador é zero coincidem com os períodos inválidos mencionados durante as análises dos níveis de distorção de corrente, e, portanto, reforçam que nesses momentos realmente não há correntes harmônicas de 3ª ordem sendo injetadas na rede pela fase B da casa A.

Além disso, em quase todo período de medição, a casa A influenciou positivamente a tensão do 3º harmônico na fase B do transformador T1, o que significa que a casa A contribui para o aumento do nível da tensão do 3º harmônico na fase B do transformador T1, devido a essa tensão harmônica apresentar um valor maior que a

tensão residual do 3º harmônico. Além disso, o valor médio da tensão do 3º harmônico foi aproximadamente 0,06 V nos períodos válidos.

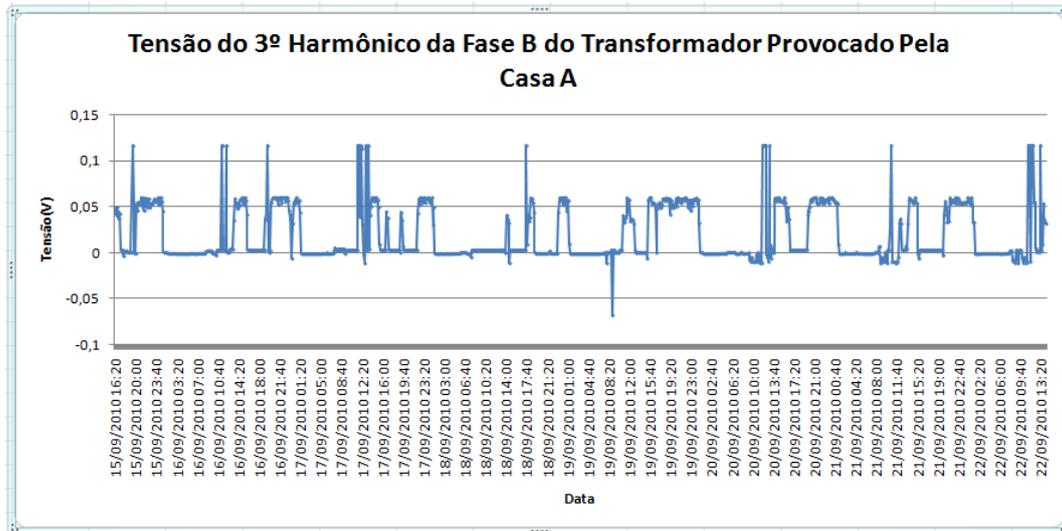


Figura 4.18 – Tensão do 3º harmônico da fase B do transformador de entrada do condomínio devido à casa A

A partir dos valores da tensão do 3º harmônico mostrados na figura 4.18, criou-se o gráfico da figura 4.19, que mostra o impacto da casa A na tensão do 3º harmônico da fase B do transformador T1.

De acordo com o gráfico da figura 4.19, pode-se verificar que o valor da tensão do 3º harmônico da fase B do transformador T1, provocado pela casa A, apresentou uma variação de 10% à 60% da tensão harmônica medida neste ponto, com exceção no dia 19/09/2010 às 08:20 hs, que foi aproximadamente -70%.

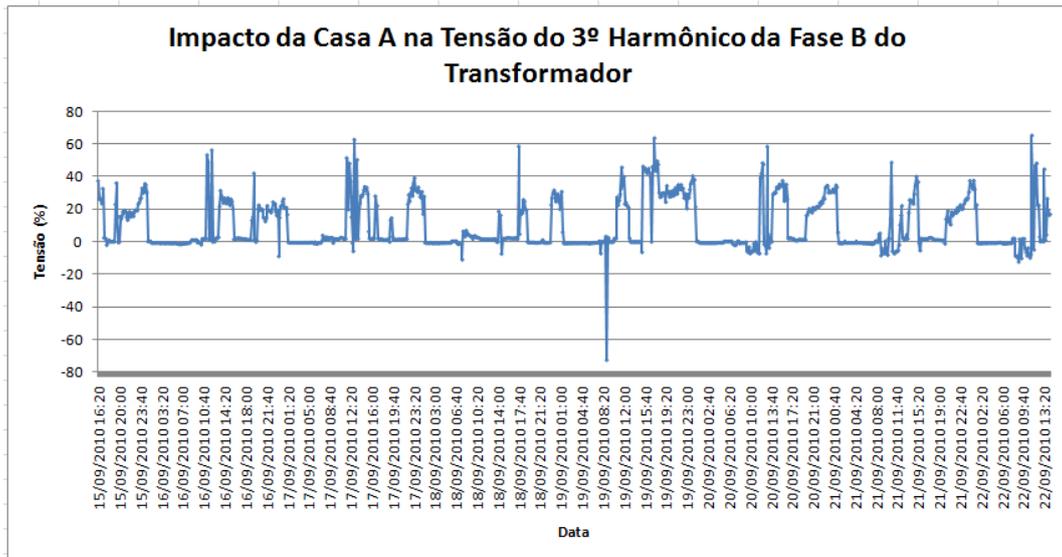


Figura 4.19 – Impacto da Casa A no nível de tensão do 3º harmônico da fase B do transformador de entrada do condomínio

Aplicando a regressão polinomial local de kernel nos valores da tensão e corrente do 3º harmônico medidas na fase C do transformador de entrada e da casa A, respectivamente, obteve-se o modelo de regressão mostrado na figura 4.20.

De acordo com esse modelo, a tensão residual do 3º harmônico na fase C do transformador T1 é aproximadamente 0,46 V, e o valor máximo e mínimo da tensão do 3º harmônico, provocados pela casa A, na fase C do transformador T1 são aproximadamente 0,12 V e -0,093 V, respectivamente.

Além disso, assim como no modelo mostrado na figura 17, esse modelo também apresenta uma descontinuidade em sua curva de regressão. Logo, é razoável considerar que os pontos após essa descontinuidade sejam “outlier”.

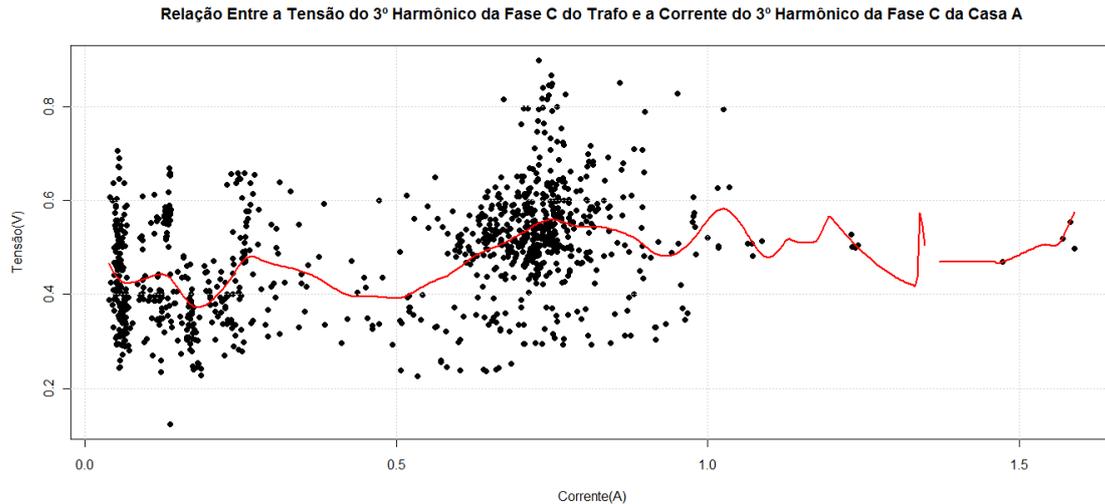


Figura 4.20 – Modelo de regressão entre a tensão e corrente do 3º harmônico medidos na fase C do transformador de entrada e da casa A, respectivamente

Com base no modelo de regressão mostrado na figura 4.20, estimou-se os valores da tensão do 3º harmônico da fase C do transformador T1 provocado somente pela casa A durante o período de medição, conforme mostrado na figura 4.21.

De acordo com o gráfico da figura 4.21, pode-se perceber que há momentos em que a tensão do 3º harmônico da fase C do transformador T1, gerado pela casa A, apresentou valores próximos de 0 V, sendo que, ao compará-lo com o gráfico da corrente do 3º harmônico na fase C da casa A mostrado na figura 4.10 e com o gráfico da corrente fundamental na mesma fase da casa A mostrado na figura 4.11, verifica-se que os períodos que a tensão do 3º harmônico do transformador esteve próximo de zero coincidem com os períodos inválidos mencionados durante as análises dos níveis de distorção corrente, e, portanto, reforçam que nesses momentos não há correntes harmônicas de 3ª ordem sendo injetadas na rede pela fase C da casa A.

Além disso, pode-se observar que a casa A influencia tanto positivamente quanto negativamente a tensão do 3º harmônico medida na fase C do transformador T1, logo, dependendo do momento, a casa A contribui no aumento ou na redução da distorção do 3º harmônico, sendo que seu valor variou entre 0,1 V e -0,1 V.

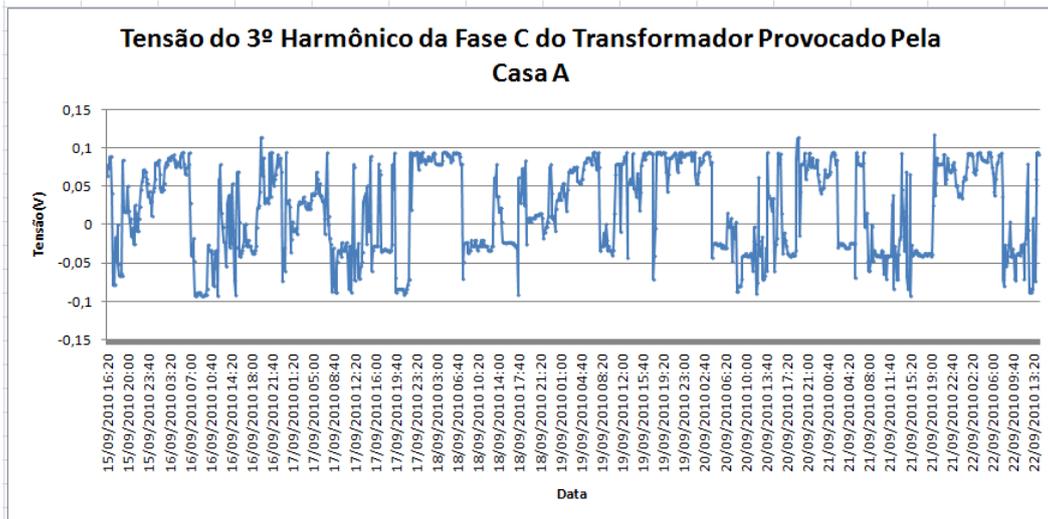


Figura 4.21 – Tensão do 3º harmônico da fase C do transformador de entrada do condomínio devido à casa A

A partir dos valores da tensão do 3º harmônico mostrados na figura 4.21, criou-se o gráfico da figura 4.22, que mostra o impacto da casa A na tensão do 3º harmônico da fase C do transformador T1.

De acordo com a figura 4.22, pode-se verificar que a casa A provocou distorções de tensão do 3º harmônio, na fase C do transformador T1, cujos valores apresentaram variações entre -40% e 30% da tensão harmônica medida neste ponto.

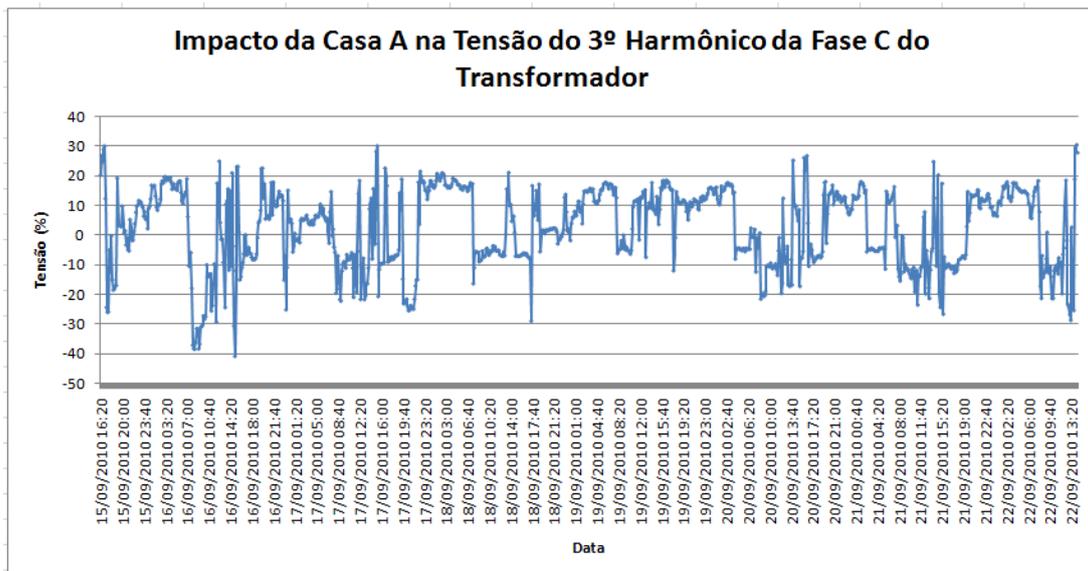


Figura 4.22 – Impacto da Casa A no nível de tensão do 3º harmônico da fase C do transformador de entrada do condomínio

Analisando, de uma maneira geral, o impacto da casa A na tensão do 3º harmônico do secundário do transformador T1, verifica-se que, tanto na fase A quanto na fase B, a casa A provocou um aumento na taxa de distorção harmônica de 3ª ordem durante quase todo período de medição, porém, na fase C, a mesma causou tanto uma elevação quanto uma redução da taxa de distorção do 3º harmônico de forma freqüente.

Para analisar o impacto da casa A na distorção de tensão do 5º harmônico nas três fases do transformador T1, aplicou-se a mesma metodologia descrita anteriormente nas medições de tensão e corrente do 5º harmônico. A tabela 4.1 resume os aspectos mais relevantes de cada modelo.

Tabela 4.1 – Aspectos relevantes dos modelos que descrevem a relação entre a casa A e a tensão do 5º harmônico do transformador

Modelos de regressão	Aspectos relevantes
Entre a corrente do 5º harmônico da casa A e a tensão desse mesmo harmônico na fase A do transformador T1	A casa A influencia negativamente a tensão do 5º harmônico na fase A do transformador T1, uma vez que a tensão residual harmônica é maior do que a tensão harmônica provocada pela carga A. Logo, a casa A contribui para redução da distorção da tensão do 5º harmônico neste ponto.
Entre a corrente do 5º harmônico da casa A e a tensão desse mesmo harmônico na fase B do transformador	A casa A influencia negativamente a tensão do 5º harmônico na fase B do transformador T1 durante todo período de medição, e, portanto, a mesma contribui para redução da distorção de tensão do 5º harmônico neste ponto. Além disso, o modelo apresentou descontinuidades em sua curva devido a presença de “outliers” nas medidas de tensão e corrente.
Entre a corrente do 5º harmônico da casa A e a tensão desse mesmo harmônico na fase C do transformador	A casa A influencia negativamente a tensão do 5º harmônico na fase C do transformador T1 em quase todo período de medição, e, portanto, mostrando que a mesma contribui para redução da distorção de tensão do 5º harmônico neste ponto. Além disso, esse modelo apresentou descontinuidades em sua curva de regressão, o que indica a presença de “outliers” nas medidas de tensão e corrente.

Analisando, de forma geral, o impacto da casa A na taxa de distorção de tensão do 5º harmônico no secundário do transformador T1, pode-se observar que, em todas as fases, essa casa predominantemente reduz a taxa de distorção de tensão do 5º harmônico no secundário do transformador T1, de tal forma que a fase A sofre uma influência mais forte da casa A.

Então, pode-se afirmar que a casa A influencia mais contundentemente para o aumento da distorção do 3º harmônico e redução da distorção do 5º harmônico no secundário do transformador T1.

4.3.1.2 – Avaliação do Impacto da Casa B na Distorção de Tensão do Transformador

Na segunda etapa do estudo da contribuição harmônica das casas A e B no transformador T1 de um condomínio no cidade de Manaus, concentrou-se na avaliação da contribuição harmônica da casa B na distorção harmônica do secundário do transformador T1.

Num primeiro momento, concentrou-se na avaliação do impacto da casa B na tensão do 3º harmônico nas três fases do transformador T1. Para isso, aplicou-se novamente a metodologia descrita anteriormente, e obteve-se os resultados mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Aspectos relevantes dos modelos que descrevem a relação entre a casa B e a tensão do 3º harmônico do transformador

Modelos de regressão	Aspectos relevantes
Entre a corrente do 3º harmônico da casa B e a tensão desse mesmo harmônico na fase A do transformador T1	A casa B influencia positivamente a tensão do 3º harmônico na fase A do transformador T1. Logo, a casa B contribui para o aumento da distorção da tensão do 3º harmônico neste ponto. Além disso, observou-se que a influência da casa B é praticamente zero em alguns momentos, devido à corrente fundamental ser zero nesses momentos.
Entre a corrente do 3º harmônico da casa B e a tensão desse mesmo harmônico na fase B do transformador	A casa B influencia positivamente a tensão do 3º harmônico na fase B do transformador T1 durante todo período de medição, e, portanto, a mesma contribui para o aumento da distorção de tensão do 3º harmônico neste ponto. Assim como no modelo

	anterior, há momentos em que a casa B não influencia na distorção de tensão do 3º harmônico.
Entre a corrente do 3º harmônico da casa B e a tensão desse mesmo harmônico na fase C do transformador	A casa B influencia positivamente a tensão do 3º harmônico na fase C do transformador T1 em quase todo período de medição, e, portanto, mostrando que a mesma contribui também para o aumento da distorção de tensão do 3º harmônico neste ponto. Além disso, esse modelo apresentou descontinuidades em sua curva de regressão, o que indica a presença de “outliers” nas medidas de tensão e corrente.

E para no caso do impacto da casa B na distorção de tensão do 5º harmônico no secundário do transformador T1, obteve-se os resultados mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Aspectos relevantes dos modelos que descrevem a relação entre a casa B e a tensão do 5º harmônico do transformador

Modelos de regressão	Aspectos relevantes
Entre a corrente do 5º harmônico da casa B e a tensão desse mesmo harmônico na fase A do transformador T1	A casa B influencia positivamente a tensão do 5º harmônico na fase A do transformador T1. Logo, a casa B contribui para o aumento da distorção da tensão do 5º harmônico neste ponto.
Entre a corrente do 5º harmônico da casa B e a tensão desse mesmo harmônico na fase B do transformador	A casa B influencia negativamente a tensão do 5º harmônico na fase B do transformador T1 durante todo período de medição, e, portanto, a mesma contribui para redução da distorção de tensão do 5º harmônico neste ponto. Além disso, observou-se a presença de descontinuidades na curva de regressão, o que eu indica a presença de “outliers” nas medições de tensão e corrente.
Entre a corrente do 5º harmônico da casa B e a tensão desse mesmo harmônico na fase C do transformador	A casa B influencia negativamente a tensão do 5º harmônico na fase C do transformador T1 em quase todo período de medição, e, portanto, mostrando que a mesma contribui também para redução da distorção de tensão do 5º harmônico neste ponto. Além disso, esse modelo apresentou descontinuidades em sua curva de regressão, o que indica a presença de “outliers” nas medidas de tensão e corrente.

Analisando, de maneira geral, o impacto da casa B na taxa de distorção do 5º harmônico do transformador T1, pode-se observar que a mesma causa predominantemente o aumento da taxa de distorção de tensão do 5º harmônico na fase A no transformador T1, enquanto que, nas fases B e C, a casa B reduz a taxa de distorção do 5º harmônico.

Comparando a influência da casa B na distorção de tensão do 3º harmônico com a do 5º harmônico no secundário do transformador T1, verifica-se que a casa B provoca o aumento da distorção do 3º harmônico e a redução da distorção do 5º harmônico, com exceção da fase A, no secundário do transformador T1.

4.3.2 – Estudo de Caso 2

O estudo de caso 2 foi realizado numa subestação localizada na região nordeste do estado do Pará, com atendimento a indústrias, cargas residenciais e cargas rurais, sendo que a mesma é composta de três barramentos principais: barramento de 138 kV, 13,8 kV e 34,5 kV.

Entre os barramentos de 138 kV e 13,8 kV, há dois transformadores de 10 MVA responsáveis por abaixar o nível de tensão de 138 kV para 13,8 kV. E entre os barramentos de 13,8 kV e 34,5 kV, há também dois transformadores, porém de 2,5 MVA, responsáveis por elevar o nível de tensão de 13,8 kV para 34,5 kV.

No barramento de 13,8 kV, há quatro alimentadores cujos perfis das cargas são comercial e residencial, uma vez que esses alimentadores são responsáveis por suprir energia elétrica para a cidade local, e, no barramento de 34,5 kV, há um alimentador responsável por fornecer energia elétrica para consumidores rurais da região. Além disso, há uma indústria de fabricação de cimento ligada no barramento de 138 kV. A figura 4.23 mostra o diagrama unifilar dessa subestação.

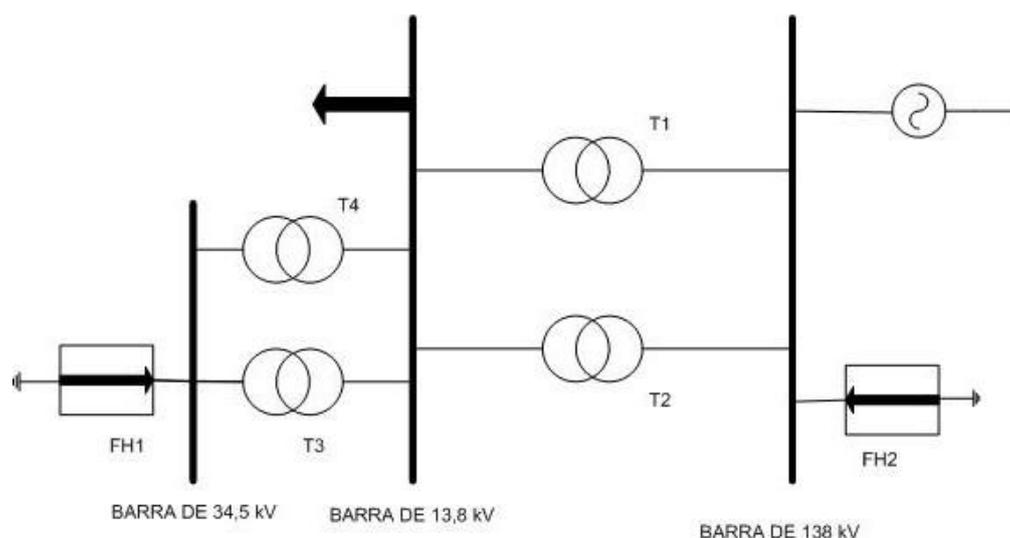


Figura 4.23 – Diagrama unifilar da subestação em estudo

Nesse estudo de caso, considerou-se que há duas fontes harmônicas dominantes nesta subestação: o alimentador rural do barramento de 34,5 kV, denominada de fonte harmônica 1 (FH1) ; e a indústria de cimento denominada de fonte harmônica 2 (FH2).

Num primeiro momento, realizou-se uma campanha de medição nessa subestação de tal forma a obter medições das tensões harmônicas do barramento de 34,5 kV, com o objetivo de verificar se havia violações dos limites de distorção estabelecido pelo PRODIST, uma vez que os transformadores T3 e T4, que estavam conectados neste barramento, estavam apresentando aquecimentos excessivos. Além disso, mediram-se as correntes harmônicas dos alimentadores rurais (conectados ao barramento de 34,5 kV) e da indústria de cimento, pois as mesmas foram consideradas como fontes harmônicas.

Analisando o gráfico da figura 4.24, que mostra a taxa de distorção de tensão do 3º harmônico da barra de 34,5 kV, pode-se intuir que os aquecimentos dos transformadores podem estar associados ao problema da distorção harmônica, uma vez que o nível de distorção de tensão do 3º harmônico atingiu níveis acima de 4%, que é o limite estabelecido pelo PRODIST, conforme mostrado na tabela 2.6, e, portanto, apresentando níveis bastante elevados de distorção do 3º harmônico.

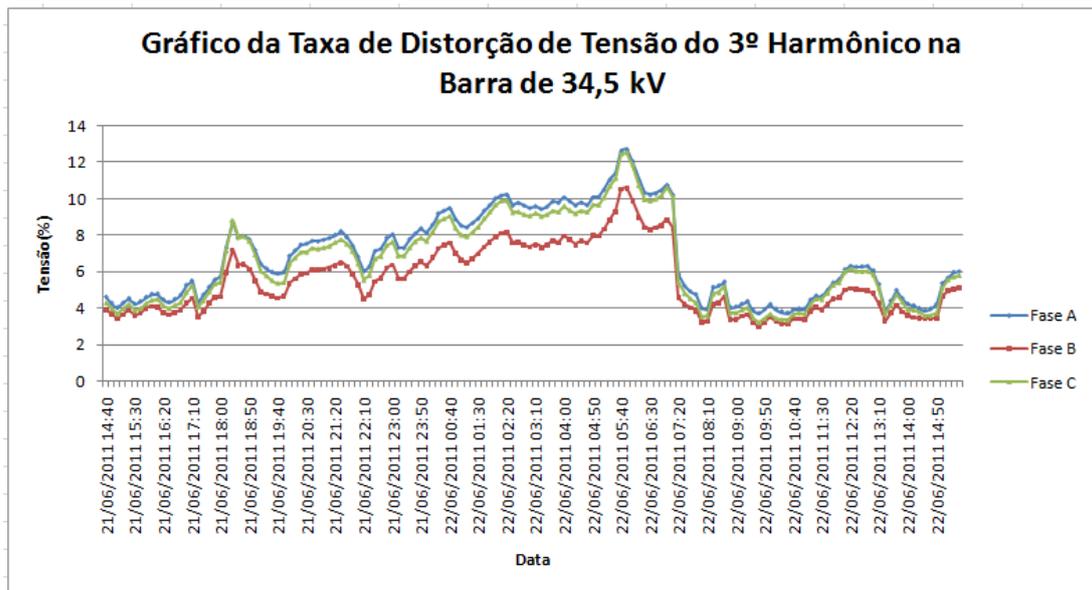


Figura 4.24 – Gráfico da taxa de distorção de tensão do 3º harmônico na barra de 34,5 kV

Analisando a taxa de distorção de corrente do 3º harmônica do alimentador rural, mostrado na figura 4.25, pode-se observar que o mesmo também apresentou níveis elevados de distorção, uma vez que, para o nível de curto-circuito do barramento de 34,5 kV (que foi igual 774 A/fase), o mesmo violou o limite estabelecido pela recomendação IEEE 519:1992 que é 4% , conforme mostrado na tabela 2.4, e, portanto, ratificando a escolha desse alimentador como fonte harmônica.

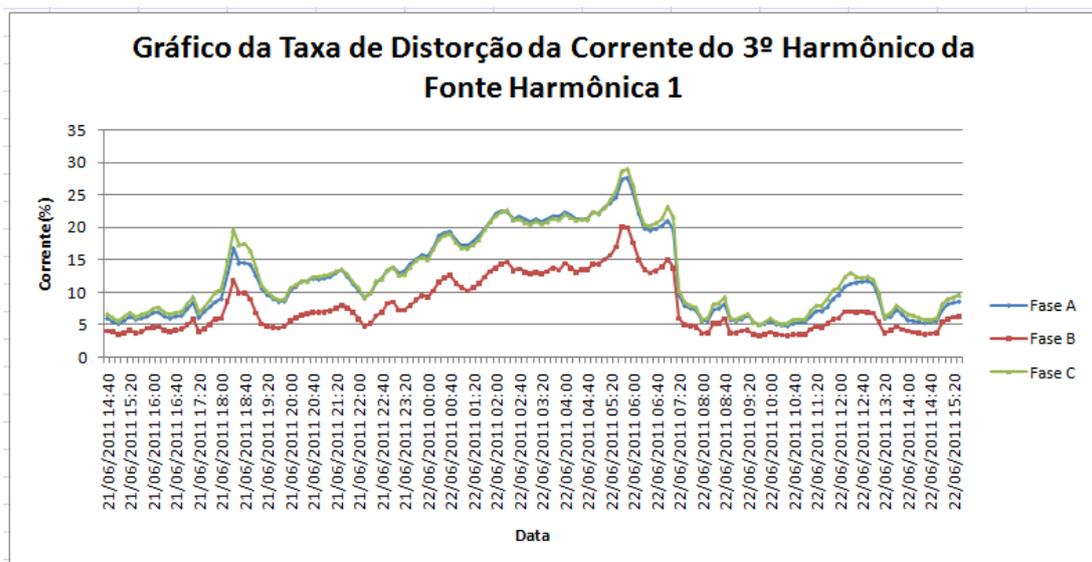


Figura 4.25 – Gráfico da taxa de distorção de corrente do 3º harmônico da fonte harmônica 1

Analisando também o gráfico da figura 4.26, que mostra a taxa de distorção do 3º harmônico da indústria de cimento, observou-se que a mesma somente violou o limite de 4% estabelecido pela recomendação IEEE 519:1992, mostrada na tabela 2.4, na fase B no dia 21/06/2011 de 21:40 às 22:00, porém ela apresentou níveis que podem influenciar na distorção harmônica de tensão, uma vez que as corrente geradas apresentam valores mais elevados.

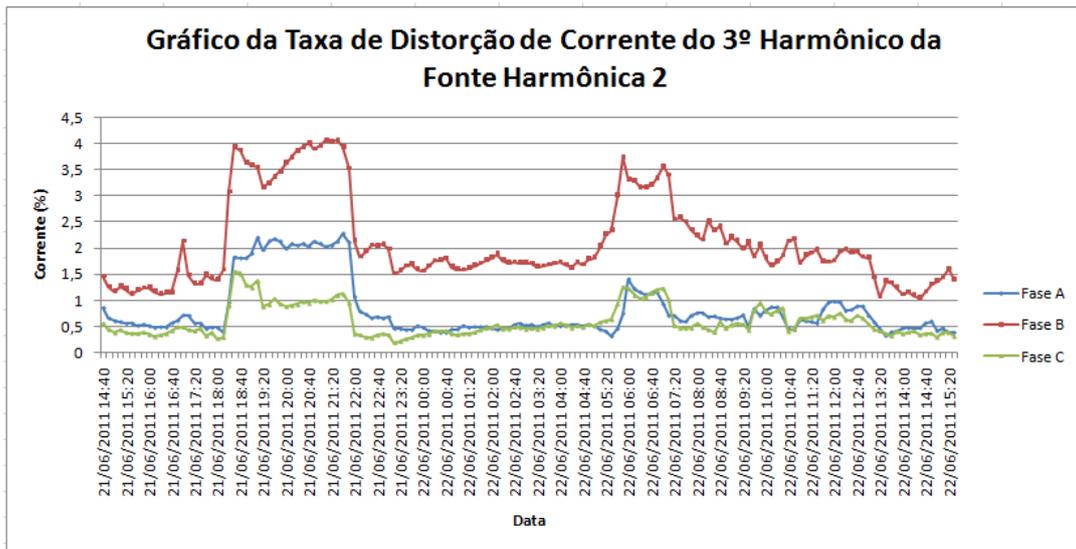


Figura 4.26 – Gráfico da taxa de distorção de corrente do 3º harmônico da fonte harmônica 2

Este estudo foi dividido em duas etapas principais: avaliação da contribuição da fonte harmônica 1 na tensão do 3º harmônico da barra 34,5 kV e avaliação da contribuição da fonte harmônica 2 na tensão do 3º harmônico da barra de 34,5 kV.

4.3.2.1 – Avaliação da Contribuição da Fonte Harmônica 1 na Tensão do 3º harmônico da barra de 34,5 kV

Aplicando a regressão polinomial local de kernel nas medições de tensão do 3º harmônico da fase A da barra de 34,5 kV da subestação da figura 4.49, e de corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 1, obteve-se o modelo de regressão mostrado na figura 4.27.

De acordo com esse modelo, observa-se que a tensão residual do 3º harmônico na barra de 34,5 kV é 75,67 V, e o valor máximo de mínimo de tensão provocado pela FH1 são 2581,12 V e 657,99 V, respectivamente. Além disso, pode-se observar que a curva de regressão, mostrada na figura 4.27, é bastante semelhante a uma reta, embora

tenha sido obtida pela regressão polinomial local de kernel, e, portanto, mostrando que essas grandezas apresentam uma relação linear bastante forte. Então, nestes casos, a regressão linear ofereceria resultados bastante razoáveis.

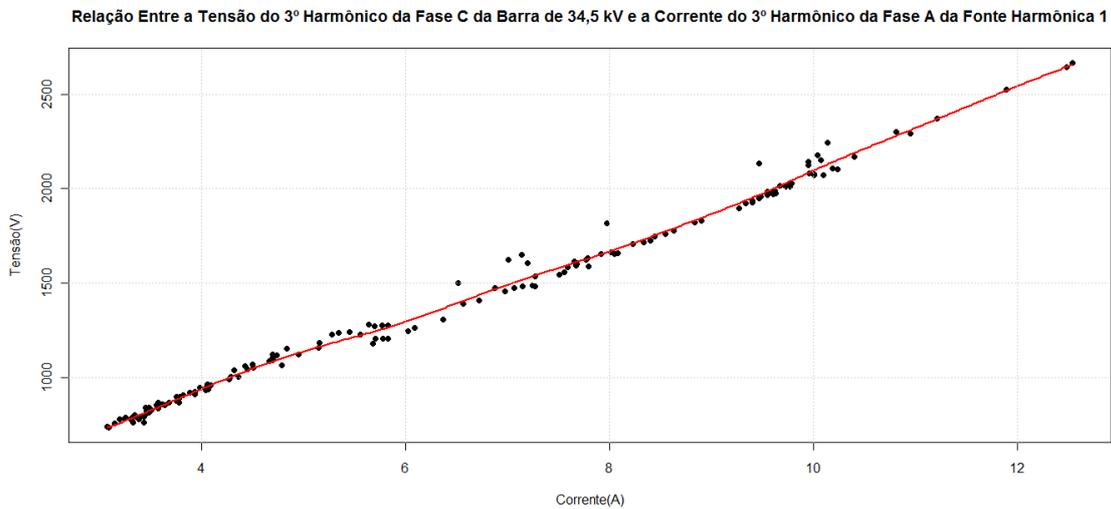


Figura 4.27 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 1

Com base no modelo mostrado na figura 4.27, estimou-se a tensão do 3º harmônico na fase A da barra de 34,5 kV provocado somente pela fonte harmônica 1 durante todo o período de medição, mostrada na figura 4.28.

De acordo com o gráfico da figura 4.28, pode-se observar que fonte harmônica FH1 influencia positivamente a tensão do 3º harmônico da fase A da barra de 34,5 kV , logo a tensão residual do 3º harmônico neste ponto apresentou um valor menor que a tensão desse harmônico gerada pela FH1, e, portanto, mostrando que a FH1 tem contribuído no sentido de aumentar a distorção de tensão do 3º harmônico na fase A da barra de 34,5 kV as subestação da figura 4.49.

Em média, a tensão do 3º harmônico da fase A da barra de 34,5 kV gerada pela FH1 foi aproximadamente 1328,35 V, e o valor máximo e mínimo gerados foram 2581 V e 658 V, respectivamente.

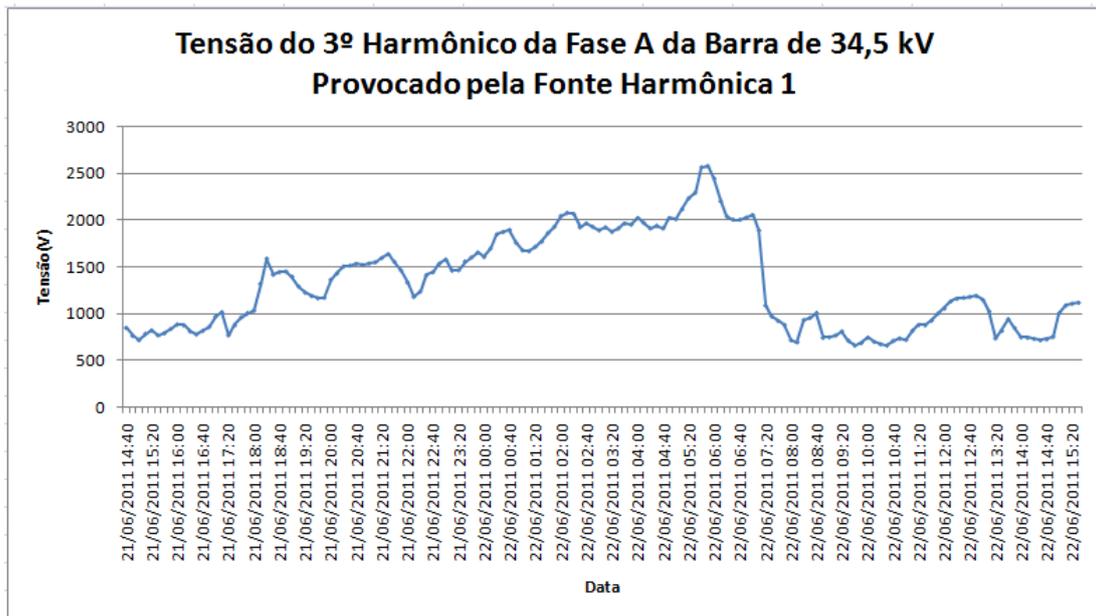


Figura 4.28 – Tensão do 3º harmônica da fase A da barra de 34,5 kV provocada pela FH1

De forma a avaliar o impacto da fonte harmônica 1 na tensão 3º harmônico medida na fase A da barra de 34,5 kV da subestação mostrada na figura 4.23, obteve-se o gráfico da figura 4.29.

De acordo com figura 4.29, pode-se observar o impacto da FH1 na tensão do 3º harmônico medida na fase A da barra de 34,5 kV foi bastante elevado, uma vez que, em média, a tensão do 3º harmônico provocada pela FH1 correspondeu a aproximadamente 93 % da tensão do 3º harmônico medida neste ponto, porém, deve-se salientar, que entre às 19:00 hs do dia 21/06/2011 e às 06:00 hs do dia 22/06/2011, o impacto da FH1 na tensão do 3º harmônico da fase A da barra de 34,5 kV aumentou de tal forma que essa tensão correspondeu, em média, à aproximadamente 97% da tensão deste harmônico medida neste ponto.

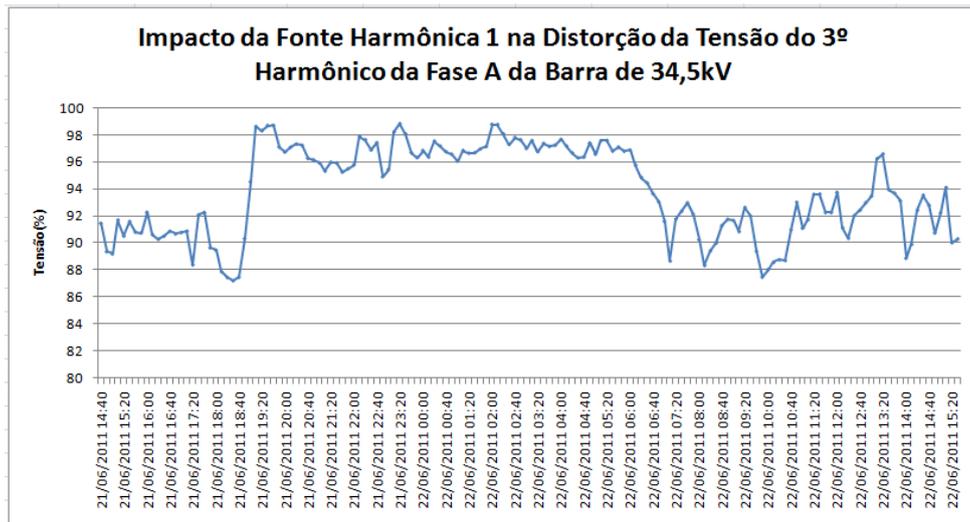


Figura 4.29 – Tensão do 3º harmônica da fase A da barra de 34,5 kV provocada pela FH1

Aplicando a regressão polinomial local de kernel nas medições de tensão do 3º harmônico da fase B da barra de 34,5 kV da subestação da figura 4.23, e de corrente do 3º harmônico da fase B da fonte harmônica 1, obteve-se o modelo de regressão mostrado na figura 4.30.

De acordo com esse modelo, observa-se que a tensão residual do 3º harmônico na barra de 34,5 kV é -65,49 V, e o valor máximo de mínimo de tensão provocado pela FH1 são 2278,3 V e 658,6 V, respectivamente. Além disso, pode-se observar que, assim como visto na fase A, a curva de regressão da fase B é bastante semelhante a uma reta, e, portanto, mostrando que essas grandezas apresentam uma relação linear bastante forte.

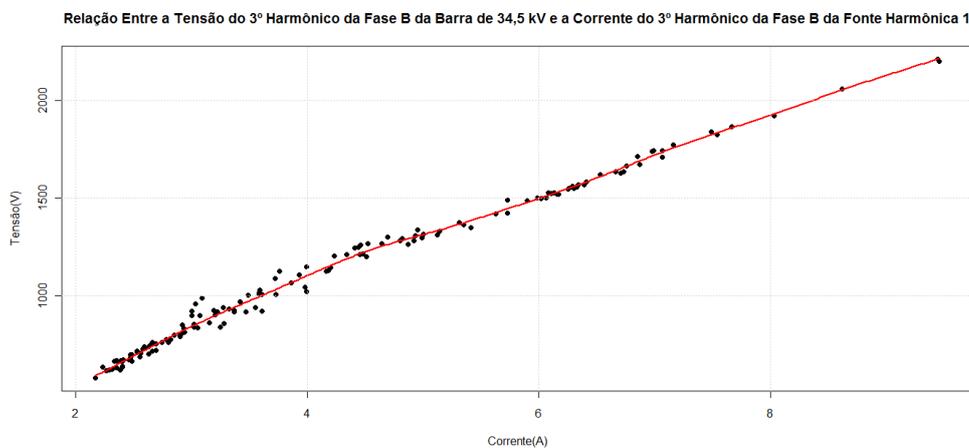


Figura 4.30 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase B da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase B da fonte harmônica 1

Com base no modelo mostrado na figura 4.30, estimou-se a tensão do 3º harmônico na fase B da barra de 34,5 kV provocado somente pela fonte harmônica 1 durante todo o período de medição, mostrada na figura 4.31.

De acordo com o gráfico da figura 4.31, pode-se observar que a tensão do 3º harmônico da fase B da barra de 34,5 kV provocada pela FH1 apresentou somente valores positivos, logo a tensão residual do 3º harmônico neste ponto apresentou um valor menor que a tensão harmônica gerada pela FH1, e, portanto, mostrando que a FH1 tem contribuído no sentido de aumentar a distorção de tensão do 3º harmônico na fase B da barra de 34,5 kV as subestação da figura 4.23.

Em média, a tensão do 3º harmônico da fase B da barra de 34,5 kV gerada pela FH1 foi aproximadamente 1185 V, e o valor máximo e mínimo gerados foram 2278,3 V e 658,6 V, respectivamente.

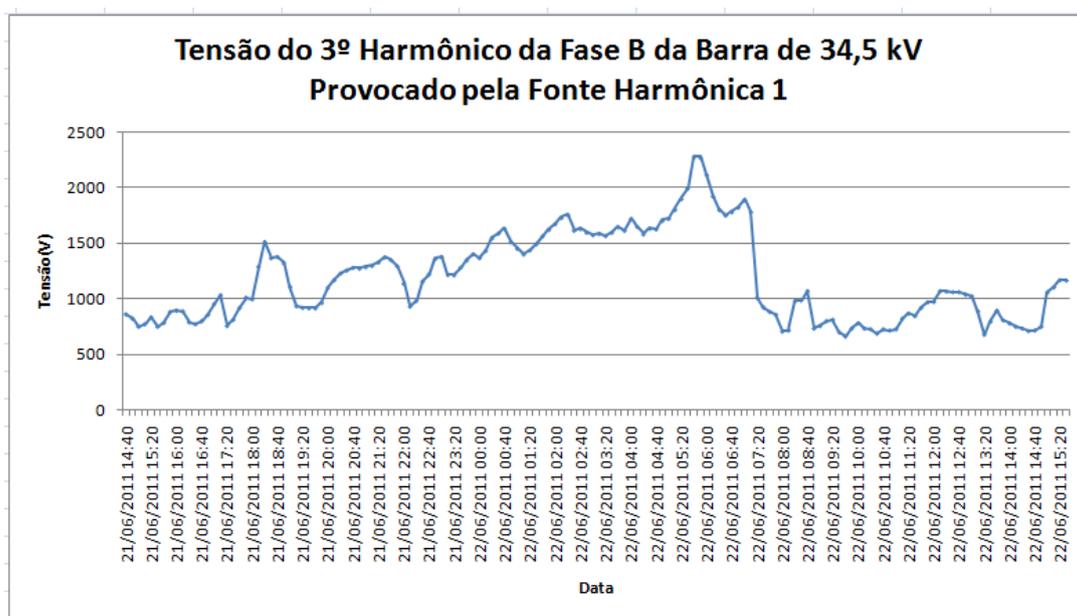


Figura 4.31 – Tensão do 3º harmônica da fase B da barra de 34,5 kV provocada pela FH1

De forma a avaliar o impacto da fonte harmônica 1 na tensão 3º harmônico medida na fase B da barra de 34,5 kV da subestação mostrada na figura 4.23, obteve-se o gráfico da figura 4.32.

De acordo com figura 4.32, pode-se observar o impacto da FH1 na tensão do 3º harmônico medida na fase B da barra de 34,5 kV foi bastante elevado, uma vez que, em média, a tensão do 3º harmônico provocada pela FH1 neste ponto correspondeu a aproximadamente 106,5 % da tensão do 3º harmônico medida, e, portanto, indicando

que há tensão residual que provoca uma redução na tensão do 3º harmônico gerado pela FH1 desta fase, o que caracteriza a ocorrência de um cancelamento harmônico.

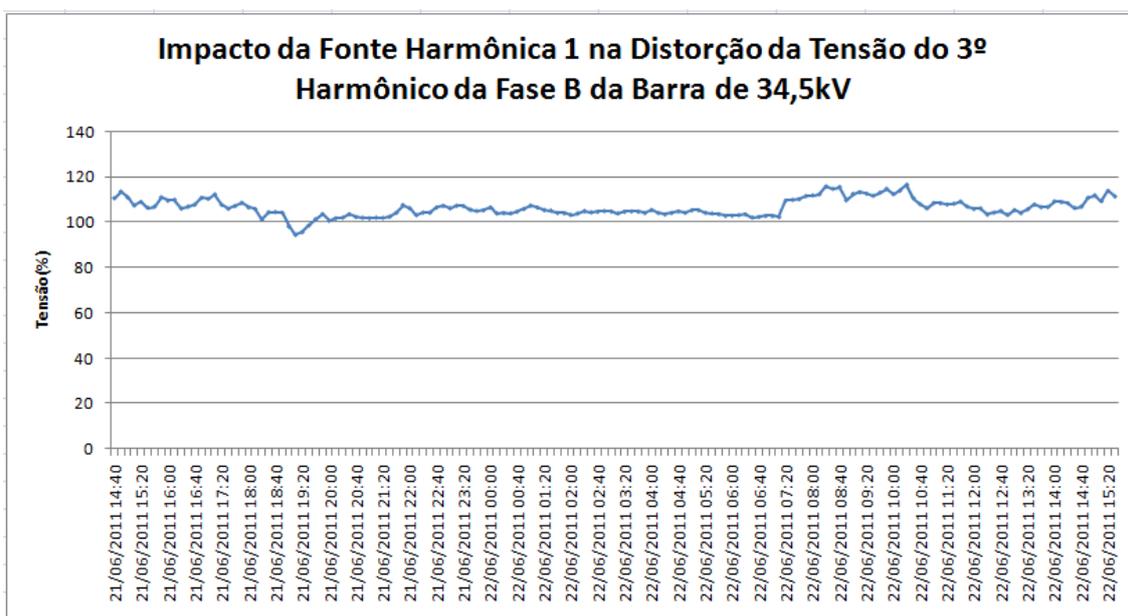


Figura 4.32 – Tensão do 3º harmônica da fase B da barra de 34,5 kV provocada pela FH1

Aplicando a regressão polinomial local de kernel nas medições de tensão do 3º harmônico da fase C da barra de 34,5 kV da subestação da figura 4.23 e de corrente do 3º harmônico da fase C da fonte harmônica 1, obteve-se o modelo de regressão mostrado na figura 4.33.

De acordo com esse modelo, observa-se que a tensão residual do 3º harmônico na fase C da barra de 34,5 kV é 138,67 V, e o valor máximo de mínimo de tensão provocado pela FH1 são 2501,12 V e 496,68 V, respectivamente. Além disso, pode-se observar que, assim como visto na fase A, a curva de regressão da fase C é bastante semelhante a uma reta, e, portanto, mostrando que essas grandezas apresentam uma relação linear bastante forte entre si.

Relação Entre a Tensão do 3º Harmônico da Fase C da Barra de 34,5 kV e a Corrente do 3º Harmônico da Fase C da Fonte Harmônica 1

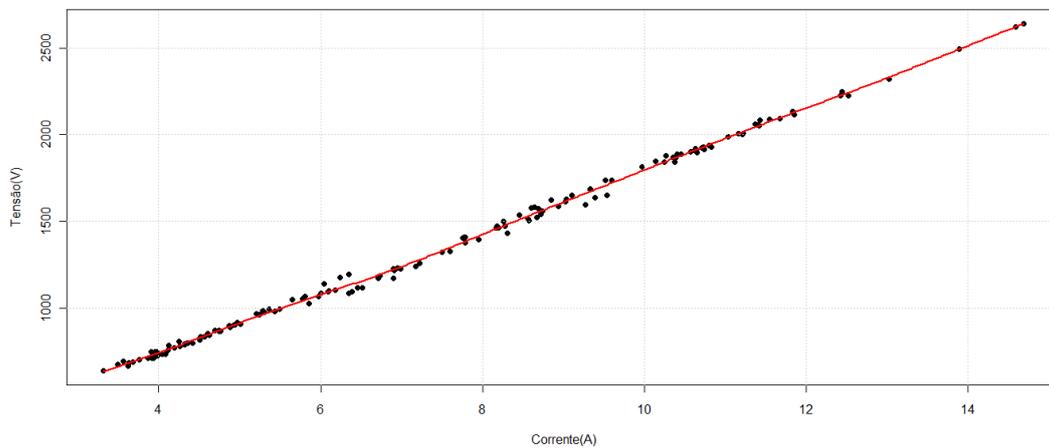


Figura 4.33 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase C da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase C da fonte harmônica 1

Com base no modelo mostrado na figura 4.33, estimou-se a tensão do 3º harmônico na fase C da barra de 34,5 kV provocado somente pela fonte harmônica 1 durante todo o período de medição, mostrada na figura 4.34.

De acordo com o gráfico da figura 4.34, pode-se observar que a fonte FH1 influenciou positivamente tensão do 3º harmônico da fase C da barra de 34,5 kV, logo a tensão residual do 3º harmônico neste ponto apresentou um valor menor que a tensão harmônica gerada pela FH1, e, portanto, mostrando que a FH1 tem contribuído no sentido de aumentar a distorção de tensão do 3º harmônico na fase C da barra de 34,5 kV da subestação da figura 4.23.

Em média, a tensão do 3º harmônico da fase C da barra de 34,5 kV gerada pela FH1 foi aproximadamente 1203,09 V, e o valor máximo e mínimo gerados foram 2501,12 V e 496,68 V, respectivamente.

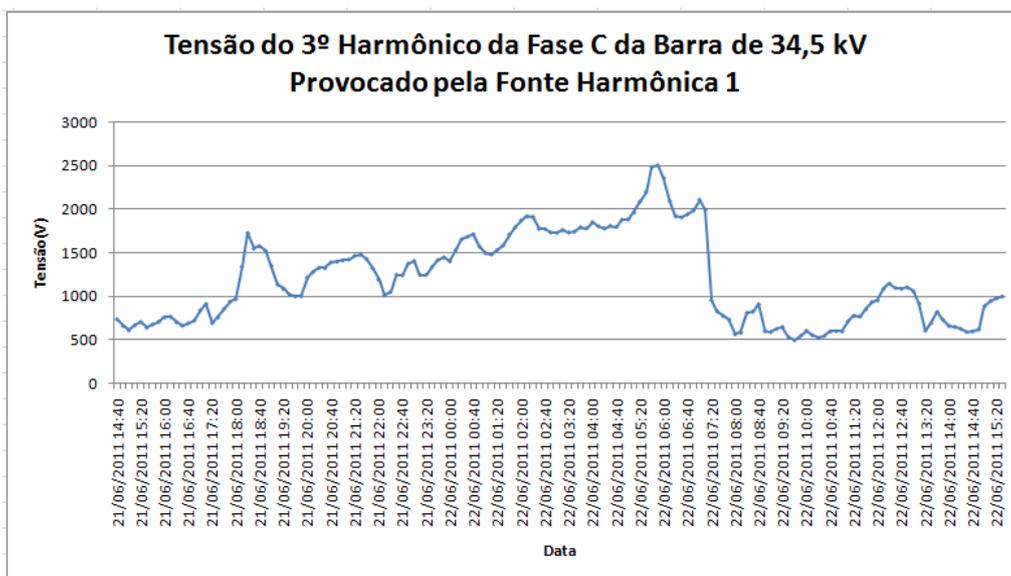


Figura 4.34 – Tensão do 3º harmônica da fase C da barra de 34,5 kV provocada pela FH1

De forma a avaliar o impacto da fonte harmônica 1 na tensão 3º harmônico medida na fase C da barra de 34,5 kV da subestação mostrada na figura 4.23, obteve-se o gráfico da figura 4.35.

De acordo com figura 4.35, pode-se observar o impacto da FH1 na tensão do 3º harmônico medida na fase C da barra de 34,5 kV foi bastante elevado, uma vez que, em média, a tensão do 3º harmônico provocada pela FH1 neste ponto correspondeu a aproximadamente 88,11% % da tensão do 3º harmônico medida.

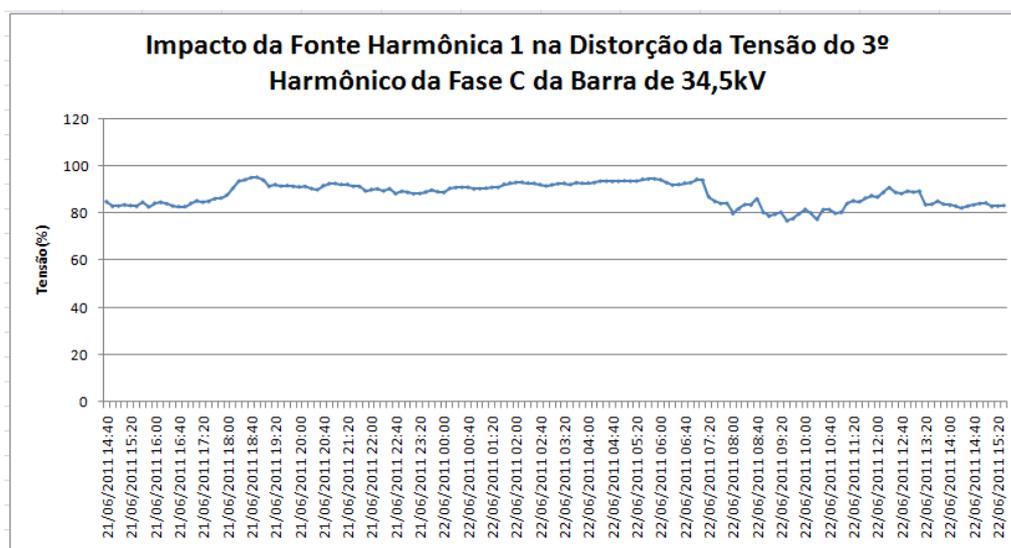


Figura 4.35 – Tensão do 3º harmônica da fase C da barra de 34,5 kV provocada pela FH1

4.3.2.2 – Avaliação da Contribuição da Fonte Harmônica 2 na Tensão do 3º harmônico da barra de 34,5 kV

Aplicando a regressão polinomial local de kernel nas medidas de tensão do 3º harmônico da fase A da barra de 34,5 kV da subestação da figura 4.23 e de corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2, obteve-se o modelo de regressão mostrado na figura 4.36.

De acordo com esse modelo, observa-se que a tensão residual do 3º harmônico na barra de 34,5 kV é 1500 V, e o valor máximo de mínimo de tensão provocado pela FH2 são 192,56 V e -542 V, respectivamente.

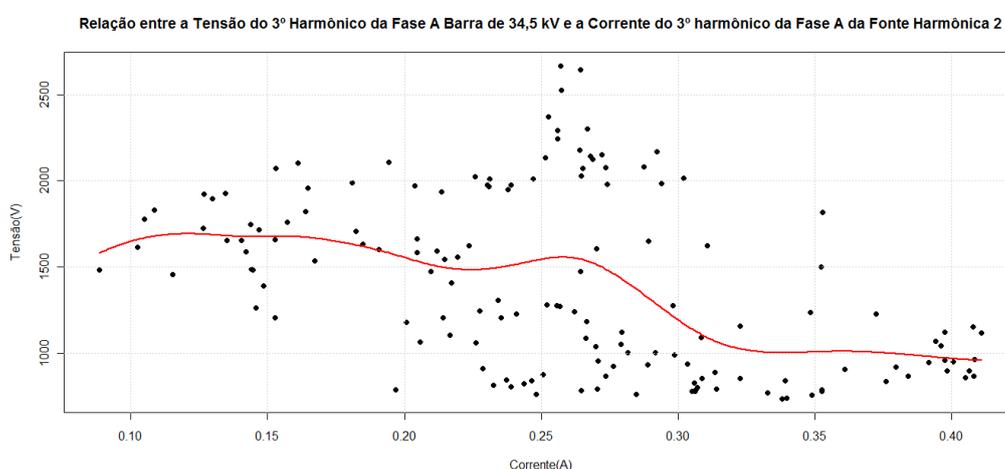


Figura 4.36 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2

Com base no modelo mostrado na figura 4.36, estimou-se a tensão do 3º harmônico na fase A da barra de 34,5 kV provocado somente pela fonte harmônica 2 durante todo o período de medição, mostrada na figura 4.37.

De acordo com o gráfico da figura 4.37, pode-se observar que a tensão do 3º harmônico da fase A da barra de 34,5 kV provocada pela FH2 apresentou valores tanto positivos quanto negativos, logo houve momentos em que a tensão residual do 3º harmônico neste ponto apresentou um valor menor que a tensão desse harmônico gerada pela FH2 e houve momentos em que a tensão residual apresentou um valor maior que a tensão gerada pela FH1, e, portanto, mostrando que a FH2 tem contribuído no sentido tanto de aumentar quanto reduzir a distorção de tensão do 3º harmônico na fase A da barra de 34,5 kV as subestação da figura 4.49.

Em média, a tensão do 3º harmônico da fase A da barra de 34,5 kV gerada pela FH2 foi aproximadamente -103,98 V, e o valor máximo e mínimo gerados foram 190 V e -542 V, respectivamente.

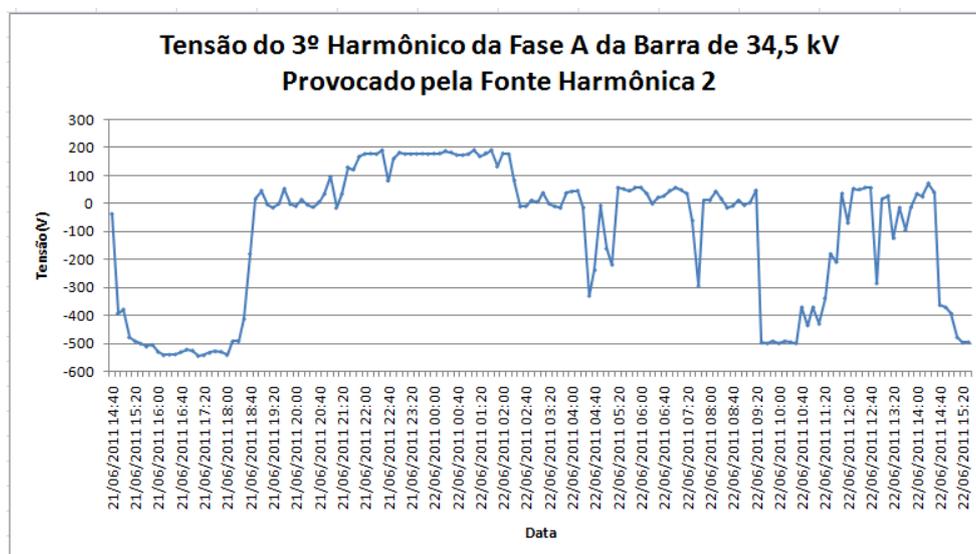


Figura 4.37 – Tensão do 3º harmônica da fase A da barra de 34,5 kV provocada pela FH2

De forma a avaliar o impacto da fonte harmônica 2 na tensão 3º harmônico medida na fase A da barra de 34,5 kV da subestação mostrada na figura 4.23, obteve-se o gráfico da figura 4.38.

De acordo com figura 4.38, pode-se observar que, nos momentos em que FH2 contribuiu para o aumento da distorção de tensão do 3º harmônico na fase A da barra de 34,5 kV, a tensão gerada por FH2 correspondeu, em média, à 10% da tensão medida, logo o impacto de FH2 na distorção de tensão do 3º harmônico foi pequeno.

No entanto, nos momentos em que a fonte harmônica 2 contribuiu para a redução da distorção do 3º harmônico da fase A da barra de 34,5 kV, a tensão gerada por FH2 apresentou um valor médio de -60% da tensão medida neste ponto, e, portanto, mostrando que o impacto da fonte harmônica 2 foi mediano.

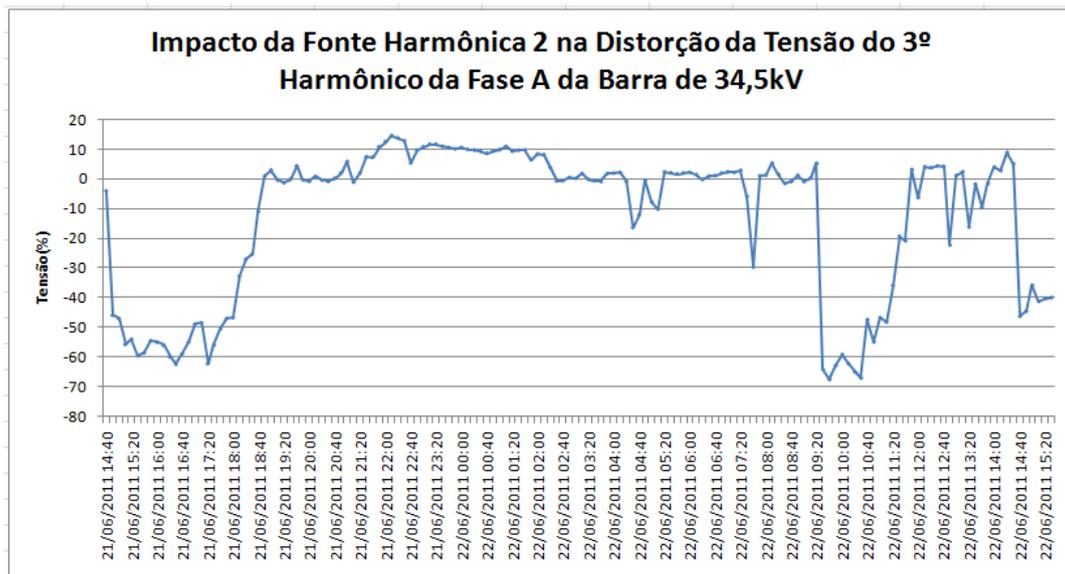


Figura 4.38 – Tensão do 3º harmônica da fase C da barra de 34,5 kV provocada pela FH1

Aplicando a regressão polinomial local de kernel nas medições de tensão do 3º harmônico da fase B da barra de 34,5 kV da subestação da figura 4.23 e de corrente do 3º harmônico da fase B da fonte harmônica 2, obteve-se o modelo de regressão mostrado na figura 4.39.

De acordo com esse modelo, observa-se que a tensão residual do 3º harmônico na barra de 34,5 kV é 1400 V, e o valor máximo e mínimo de tensão gerados pela FH2 são -1,79 V e -531,6 V, respectivamente.

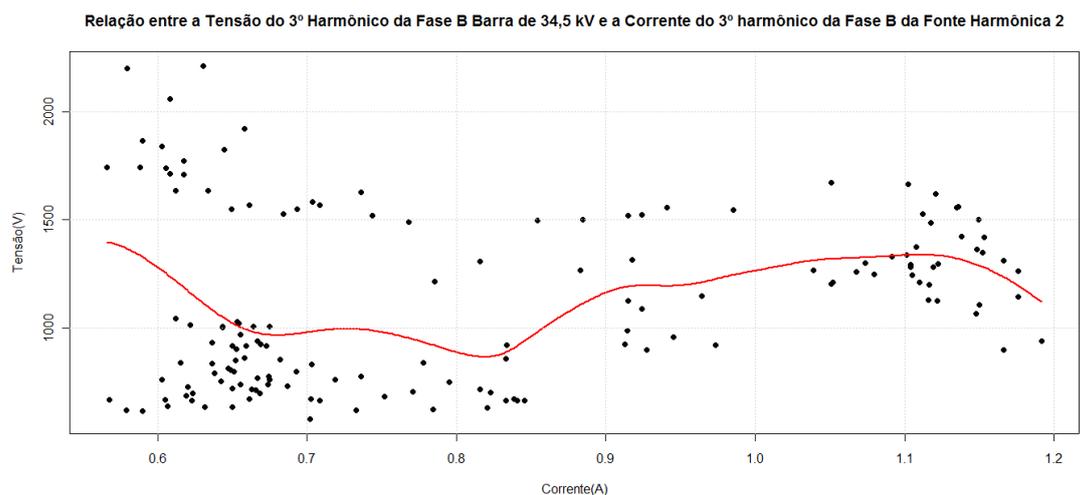


Figura 4.39 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2

Com base no modelo mostrado na figura 4.39, estimou-se a tensão do 3º harmônico na fase B da barra de 34,5 kV provocado somente pela fonte harmônica 2 durante todo o período de medição, mostrada na figura 4.40.

De acordo com o gráfico da figura 4.40, pode-se observar que a fonte FH2 influenciou negativamente a tensão do 3º harmônico da fase B da barra de 34,5 kV, logo a tensão residual do 3º harmônico nesse ponto apresentou um valor maior que a tensão harmônica gerada pela FH2, e, portanto, mostrando que a FH2 tem contribuído para a redução da distorção de tensão do 3º harmônico na fase B da barra de 34,5 kV da subestação da figura 4.23.

Em média, a tensão do 3º harmônico da fase B da barra de 34,5 kV gerada pela FH2 foi aproximadamente -271,31 V, e o valor máximo e mínimo gerados foram -1,79 V e -531 V, respectivamente.

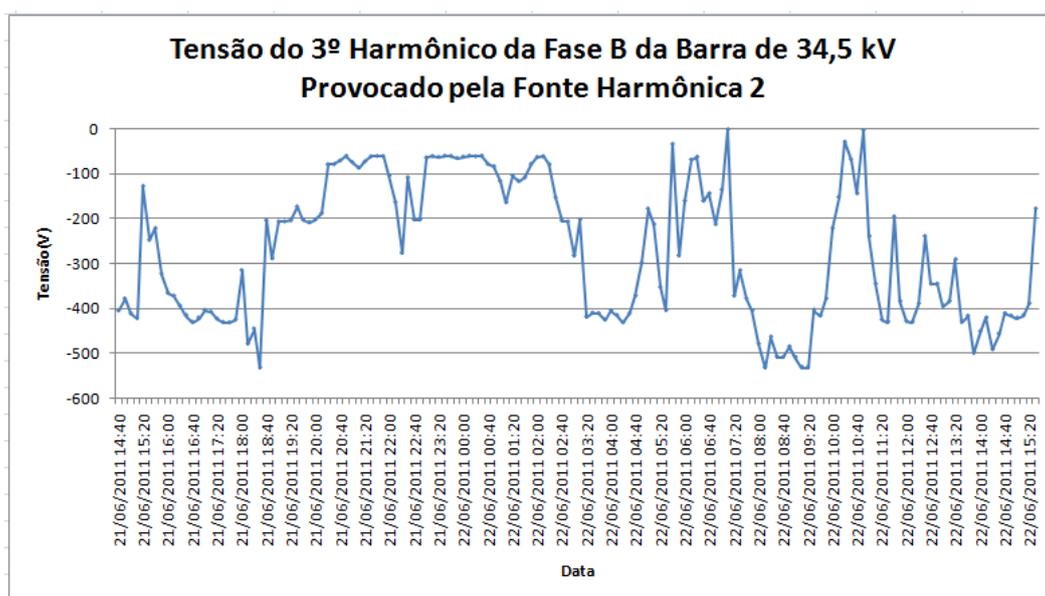


Figura 4.40 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2

De forma a avaliar o impacto da fonte harmônica 2 na tensão 3º harmônico medida na fase B da barra de 34,5 kV da subestação mostrada na figura 4.23, obteve-se o gráfico da figura 4.41.

De acordo com figura 4.41, pode-se observar que a tensão do 3º harmônico da fase B da barra de 34,5 kV gerada pela fonte harmônica 2 correspondeu, em média, à -29,63% da tensão medida, logo o impacto de FH2 na distorção de tensão do 3º harmônico foi pequeno.

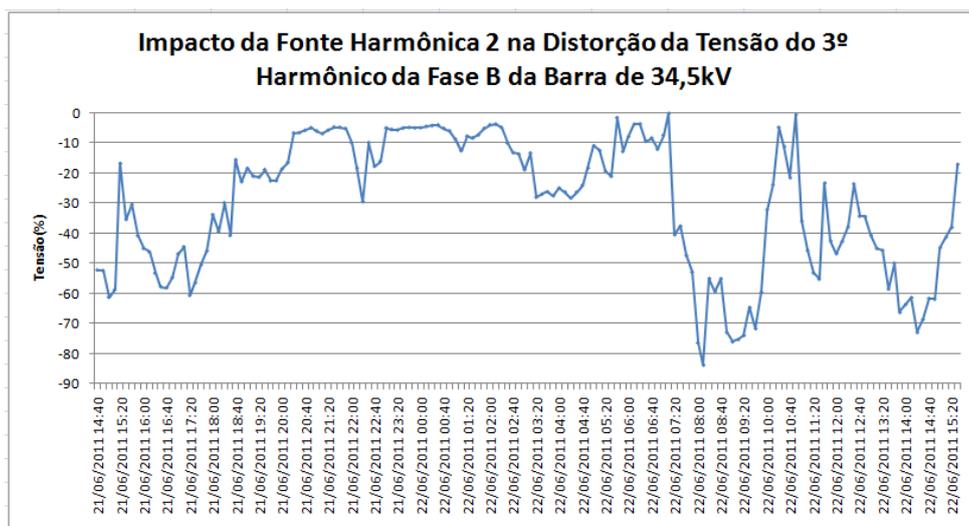


Figura 4.41 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2

Aplicando a regressão polinomial local de kernel nas medições de tensão do 3º harmônico da fase C da barra de 34,5 kV da subestação da figura 4.23 e de corrente do 3º harmônico da fase C da fonte harmônica 2, obteve-se o modelo de regressão mostrado na figura 4.42.

De acordo com esse modelo, observa-se que a tensão residual do 3º harmônico na barra de 34,5 kV é 2000 V, e o valor máximo e mínimo de tensão gerados pela FH2 são -60,7 V e -991 V, respectivamente.

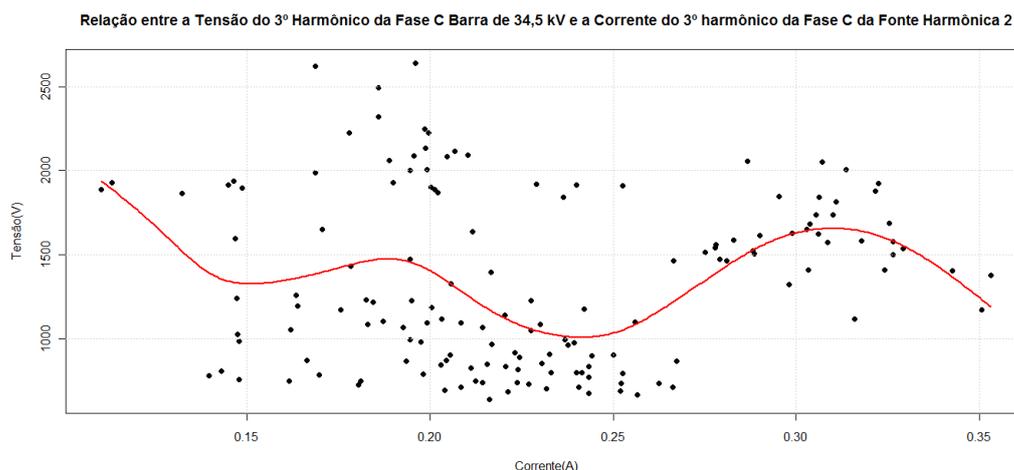


Figura 4.42 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2

Com base no modelo mostrado na figura 4.42, estimou-se a tensão do 3º harmônico na fase C da barra de 34,5 kV provocado somente pela fonte harmônica 2 durante todo o período de medição, mostrada na figura 4.42.

De acordo com o gráfico da figura 4.43, pode-se observar que a fonte FH2 influenciou negativamente a tensão do 3º harmônico da fase C da barra de 34,5 kV, logo a tensão residual do 3º harmônico nesse ponto apresentou um valor maior que a tensão harmônica gerada pela FH2, e, portanto, mostrando que a FH2 tem contribuído para a redução da distorção de tensão do 3º harmônico na fase C da barra de 34,5 kV da subestação da figura 4.23.

Em média, a tensão do 3º harmônico da fase C da barra de 34,5 kV gerada pela FH2 foi aproximadamente -660,17 V, e o valor máximo e mínimo gerados foram -60 V e -991 V, respectivamente.

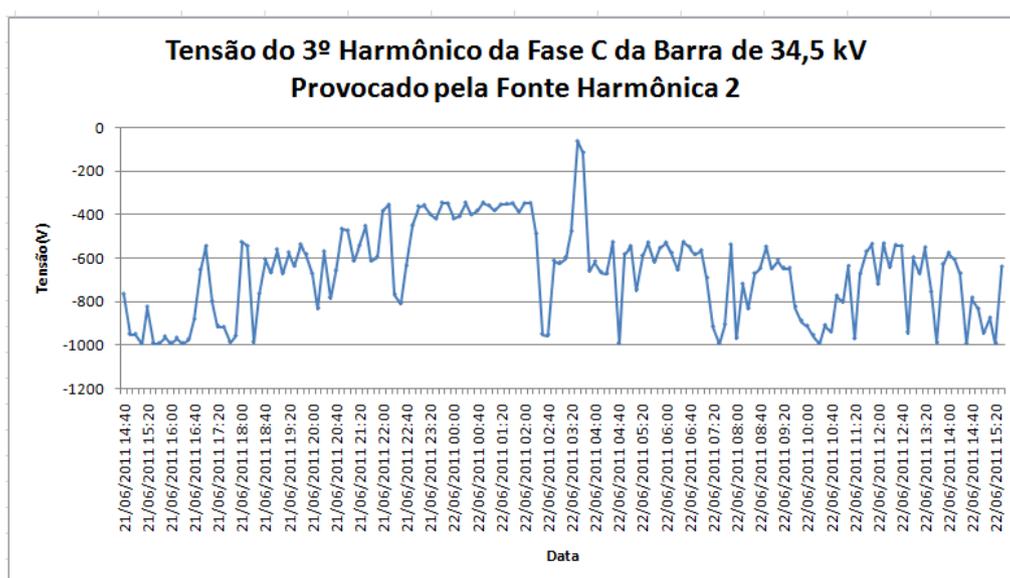


Figura 4.43 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2

De forma a avaliar o impacto da fonte harmônica 2 na tensão 3º harmônico medida na fase C da barra de 34,5 kV da subestação mostrada na figura 4.23, obteve-se o gráfico da figura 4.44.

De acordo com figura 4.44, pode-se observar que a tensão do 3º harmônico da fase C da barra de 34,5 kV gerada pela fonte harmônica 2 correspondeu, em média, à -146,47% da tensão medida, logo o impacto de FH2 na distorção de tensão do 3º harmônico foi elevado.

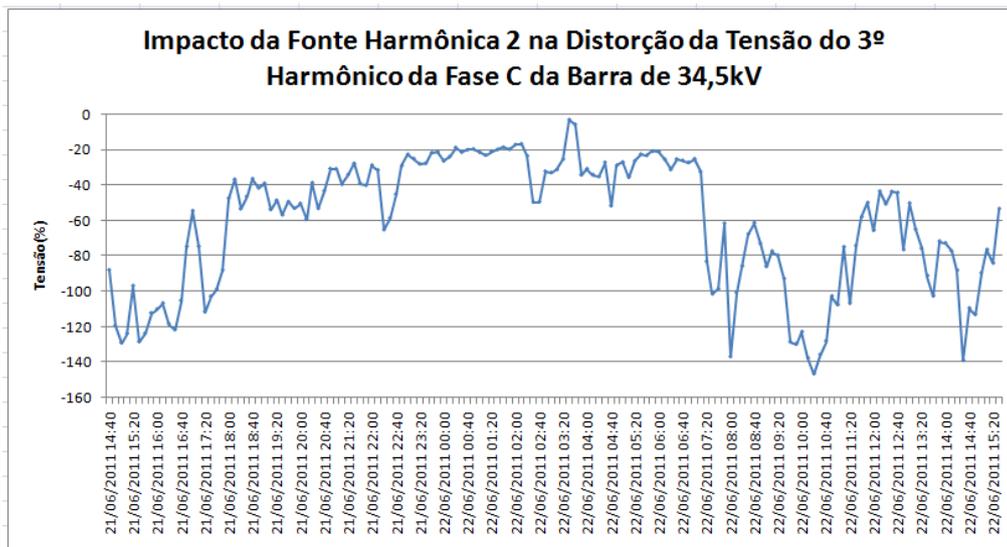


Figura 4.44 – Modelo de regressão da tensão o 3º harmônico da fase A da barra de 34,5kV com a corrente do 3º harmônico da fase A da fonte harmônica 2

4.5 - Conclusão

Este capítulo propôs uma metodologia, baseada na análise de regressão não paramétrica, para estimar a contribuição de múltiplas fontes harmônicas no nível de distorção harmônica de tensão de um sistema elétrico.

Esta metodologia possibilitou o desenvolvimento de modelos de regressão que descrevem, de forma mais exata, a relação existente entre a tensão harmônica do sistema elétrico e a corrente harmônica de uma carga não linear, em virtude da grande flexibilidade que as técnicas não paramétricas oferecem em detrimento as técnicas paramétricas.

No estudo de caso 1, esta metodologia mostrou que a casa A contribui no aumento da distorção do 3º harmônico no secundário do transformador T1, porém na redução da distorção do 5º harmônico neste mesmo ponto.

Na casa B, a metodologia mostrou que ela também proporciona o aumento da taxa de distorção do 3º harmônico no secundário do transformador, e a redução da taxa de distorção do 5º harmônico no mesmo ponto, com exceção na fase A, o que mostra que uma fonte harmônica pode causar diferentes impactos numa rede elétrica.

No estudo de caso 2, a metodologia mostrou que a fonte harmônica 1 contribui fortemente no aumento do nível de distorção do 3º harmônico na barra de 34,5 kV, enquanto que a fonte harmônica 2 contribui fortemente para a redução da distorção do 3º harmônico neste mesmo ponto.

Capítulo 5 – Conclusão

O problema da determinação da contribuição harmônica de múltiplas cargas geradoras de harmônicos é um tema de grande importância nos dias atuais, em virtude do crescimento desse tipo de carga nos sistemas elétricos. Logo, é fundamental o desenvolvimento de novas metodologias que permitam solucionar este tipo de problema, de tal forma que as concessionárias e os consumidores possam ser penalizados na proporção de seus impactos, e, portanto, possibilite a melhoria e a manutenção da qualidade da energia elétrica.

De forma a tentar solucionar este problema, o presente trabalho se propôs a apresentar uma metodologia cuja idéia principal é construir modelos estatísticos, através do método de regressão polinomial local de kernel, que sejam capazes de estimar a influência das cargas geradoras de harmônicos nos níveis de distorção de tensão dos sistemas elétricos.

A escolha de um método com abordagem não paramétrica se baseou principalmente em sua grande flexibilidade na criação de um modelo estatístico, uma vez que esses métodos não ficam condicionados a uma família específica de curvas, e, portanto, permitem a estimação de modelos de regressão com ajustes bastante eficientes.

A metodologia proposta neste trabalho, diferentemente do método de regressão linear, foi capaz de descrever o comportamento da tensão harmônica de um sistema elétrico em função da corrente harmônica de uma carga com características não lineares durante todo o período de medição.

Logo, essa metodologia dispensa a necessidade de selecionar um intervalo específico, no qual somente a corrente de uma das fontes harmônicas esteja variando, em virtude do método não paramétrico conseguir incorporar na forma da curva de regressão sua característica dinâmica.

No estudo de caso 1, a metodologia proposta foi aplicada num condomínio de casas, onde se buscou avaliar a influência das *casas A* e *B* na distorção de tensão do 3º e 5º harmônicos do transformador T1, localizado na entrada deste condomínio.

A *casa A*, de uma forma geral, contribuiu para o aumento do nível de tensão do 3º harmônico das três fases na entrada do condomínio, uma vez que a tensão residual deste apresentou um valor menor que a tensão gerada somente pela *casa A*. No entanto,

no caso do 5º harmônico, a casa A apresentou um impacto oposto ao do 3º harmônico, ou seja, essa casa contribuiu para a redução do nível de tensão do 5º harmônico das três fases na entrada do condomínio.

De uma forma geral, a casa B, assim como na casa A, contribuiu para o aumento do nível da tensão do 3º harmônico ao mesmo tempo em que para a redução do nível da tensão do 5º harmônico na entrada do condomínio, com exceção na fase A, uma vez que essa casa provocou um aumento do nível de tensão do 5º harmônico.

Além disso, uma fonte harmônica pode provocar diferentes efeitos na tensão harmônica de um sistema elétrico qualquer, como no caso da casa B do estudo de caso 1, no qual a mesma contribuiu para o aumento da distorção do 5º harmônico na fase A e para a redução da distorção do 5º harmônico nas fases B e C.

No estudo de caso 2, a metodologia proposta foi aplicada numa subestação de subtransmissão na região norte do Brasil, onde se buscou avaliar a influência de duas fontes harmônicas na distorção de tensão do 3º harmônico no barramento de 34,5 kV desta subestação.

De uma forma geral, a fonte harmônica 1, denominada de FH1, apresentou uma forte influência no nível de tensão do 3º harmônico, além de contribuir para o aumento da distorção da tensão do 3º harmônico do barramento de 34,5 kV.

De uma forma geral, a fonte harmônica 2, denominada de FH2, contribuiu para a redução do nível de tensão do 3º harmônico do barramento de 34,5 kV desta subestação. Além disso, deve-se salientar que esta fonte também contribuiu para o aumento da distorção do 3º harmônico num certo período de tempo, porém seu efeito foi pequeno.

Trabalhos Futuros

Nesta área, ainda há muito a ser desenvolvido e consolidado. Então, como trabalhos futuros, sugere-se a inclusão de outras grandezas elétricas como ângulo de fase, carregamento, e outros na análise de correlação. Além disso, sugere-se uma abordagem ótima para ajustar o parâmetro p da regressão não paramétrica.

Referência Bibliográfica

ANEEL. Módulo 8 – *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*. 2007.

ARRILLAGA, Jos, SMITH, Bruce C., WATSON, Neville R., WOOD, Alan R. *Power System Harmonic Analysis*. John Wiley & Sons. 1997.

ARRILLAGA, Jos, WATSON, Neville R. *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons. 2003.

ARRILLAGA, J., WATSON, N. R. and CHEN, S. *Power System Quality Assessment*. John Wiley & Sons, 2001. 300p.

BAGGINI, Angelo. *Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons, 2008. 618p.

BIRKES, David, DODGE, Yadolah. *Alternatives Methods of Regression*. John Wiley and Sons, Inc. 1993.

CHARNET, R., FREIRE C., CHARNET E. and BONVINO H.. *Análise de Modelos de Regressão Linear com Aplicações*. Editora Unicamp. 2008.

DÁN, A. M. *Identification of Individual Harmonic Sources and Evaluation their Contribution in the Harmonic Distortion Level*. Power and Energy Society General Meeting 2009. Budapest – Hungary. 2009.

DAS, J. C. *Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics*. Marcel Dekker Inc. 2002.

DUGAN, Roger C., MCGRANAGHAN, Mark F., SANTOSO, Surya, BEATY, H. Wayne. *Electrical Power Systems Quality*. Second Edition. McGraw-Hill, 2004.

EBERHARD, Andreas. *Power Quality*. Intech. 2011.

FUCHS, Ewald F., MASOUM, Mohammad A. S., *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Elsevier, 2008. 638p.

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

IEEE Std. 519-1992 *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*.

JESUS, Nelson, OLIVEIRA, H. R. P. M. *Amplificação da Distorção Harmônica em Sistemas de Distribuição*. VII CBQEE – Congresso Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Santos – São Paulo. 2007.

LI, Chun, XU, Wilsun, TAYJASANANT, Thavatchai. *A “Critical Impedance” –Based Method for Method for Identifying Harmonic Sources*. IEEE Transaction on Power Delivery. Vol 19, NO. 2, April. 2004

KUSKO, Alexander, THOMPSON, Marc T., *Power Quality in Electrical Systems*. McGraw-Hill, 2007. 225p.

MAGALHÃES, Christiane Marques Sousa. *Análise do Impacto de Conversores de Frequência na Qualidade da Energia do Sistema de Distribuição de uma Indústria de Petróleo*. Belém. 2010: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, 2010, 124p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica).

MAGALHÃES, Marcos N., LIMA, Antônio Carlos P. *Noções de Probabilidade e Estatística*. Edusp. 2008.

MAZIN, Hooman E., XU, Wilsun, HUANG, Biao. *Determining the Harmonic Impact of Multiple Harmonic-Producing Loads*. IEEE Transaction on Power Delivery. Vol 26, NO. 2, April. 2011.

MONTGOMERY, Douglas C. and RUNGER, George C.. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley & Sons. 2002.

NINO, Edwin E., XU, Wilsun. *Measurement of Harmonic Sources in Three-Wire Single-Phase Supply System*. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 22, NO. 4, October, 2007.

PECK, Roxy, OLSEN, Chris, DEVORE, Jay. *Introduction to Statistics & Data Analysis*. Brooks/Cole, CANGAGE Learning. 2012.

PECK, Roxy, DEVORE, Jay L. *Statistics: The Exploration and Analysis of Data*. Brooks/Cole, CANGAGE Learning. 2012.

RAWLLINGS , J. O., PANTULA S. G. and DICKEY D. A., *Applied Regression Analysis: A Research Tool*. Springer (1998).

ROSA, Francisco C. De La. *Harmonics and Power Systems*. CRC PRESS, 2006. 179p.

ROSS, Sheldon M. *Introductory Statistics*. Elsevier. 2010.

SANKARAN, C. *Power Quality*. CRC PRESS, 2002. 202p.

SANTOS, Ivan Nunes, OLIVEIRA, José Carlos, JUNIOR, José Rubens Macedo. *Uma Proposta de Metodologia para Atribuição de Responsabilidade sobre as Distorções Harmônicas Utilizando o Princípio da Superposição*. XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Florianópolis – Santa Catarina. 2011.

SANTOS, I. N., OLIVEIRA, J. C. *Avaliação Laboratorial de uma Nova Proposta Metodológica para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas*. The 9th Latin-American on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE 2011. Mar Del Plata – Argentina. 2011.

SILVA, Márcio Melquíades, LIMA, Davisson Garcia de, GONZALEZ, Manuel Losada y. *Correntes Harmônicas em Lâmpadas e Reatores*. III CBEE – Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Belém. 2009.

SOARES, Thiago M. *Estudo do Comportamento de Modelos de Transformadores Submetidos a Harmônicos e Transitórios*. 2009. Belém. (Trabalho de Conclusão de Curso)

TOSTES, Maria Emilia de Lima. *Avaliação dos Impactos Causados Pela Geração de Harmônios na Rede de Distribuição em Consumidores em Baixa Tensão*. 2003. Belém: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, 2003, 184p. (Tese, Doutorado em Engenharia Elétrica).

XU, Wilsun, LIU, Yilu. *A Method to Determine Customer Harmonic Contributions for Incentive-Based Harmonic Control Applications*. 1999 IEEE PES Summer Meeting: Panel on Harmonic Measurements and Allocation. 1999.

XU, Wilsun, LIU, Yilu. *A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling*. IEEE Transaction on Power Delivery. Vol 15, NO. 1, April. 2000.

XU, Wilsun, LIU, Xian, LIU, Yilu. *An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination*. IEEE Transaction on Power Delivery. Vol 18, NO. 1, April. 2003.

XU, Wilsun, BAHRY, Richard, MAZIN, Hooman E., TAYJASANANT, Thavatchai. *A Method to Determine the Harmonic Contribution of Multiples Loads*. Power & Energy Society General Meeting, 2009.

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

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

YAN, Xin, and SU, Xiao Gang. *Linear Regression Analysis: Theory and Practice*. World Scientific. 2009.