

DENER JEFERSON HORTA DE AQUINO

**ANÁLISE DE IMPACTOS HARMÔNICOS EM REDES ELÉTRICAS:
DESENVOLVIMENTO DE UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS
REGRESSÃO LINEAR E ÁRVORE DE DECISÃO**

MANAUS – AM
2022

DENER JEFERSON HORTA DE AQUINO

**ANÁLISE DE IMPACTOS HARMÔNICOS EM REDES ELÉTRICAS:
DESENVOLVIMENTO DE UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS
REGRESSÃO LINEAR E ÁRVORE DE DECISÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental - PPG.EGPSA, do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia- ITEGAM, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Jandecy Cabral Leite

**MANAUS – AM
2022**

DENER JEFERSON HORTA DE AQUINO

**ANÁLISE DE IMPACTOS HARMÔNICOS EM REDES ELÉTRICAS:
DESENVOLVIMENTO DE UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS
TÉCNICAS REGRESSÃO LINEAR E ÁRVORE DE DECISÃO.**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de Mestre do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia – ITEGAM.

Manaus-AM, 28 de outubro de 2022.



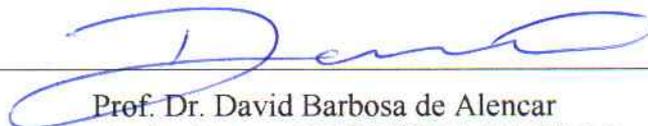
Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite

Coordenador do PPG.EGPSA - ITEGAM

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite
Orientador (PPG.EGPSA/ITEGAM)



Prof. Dr. David Barbosa de Alencar
Examinador Interno (PPG.EGPSA/ITEGAM)



Prof. Dr. Manoel Socorro Santos Azevedo
Examinador Externo (UEA)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Biblioteca do ITEGAM

Aquino, Dener Jeferson Horta, 2022 - ANÁLISE DE IMPACTOS HARMÔNICOS EM REDES ELÉTRICAS: DESENVOLVIMENTO DE UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS REGRESSÃO LINEAR E ÁRVORE DE DECISÃO / Dener Jeferson Horta Aquino - 2022. 80 f., il: Colorido

Orientador: Dr(a). Jandecy Cabral Leite

Dissertação: Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental (PPG-EGPSA), Manaus - AM, 2022.

1. Distorção Harmônica de Tensão 2. Distorção Harmônica de Corrente 3. Qualidade de Energia Elétrica

CDD - 1002.ed.2022.30

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus o dono da vida, aquele que me guiou até aqui e nos concedeu o dom do raciocínio, sabedoria e inteligência.

A minha família que apoiou e me incentivou do início ao fim dessa grande jornada, com palavras gestos e atitudes de incentivo e motivação, além de se acostumar com minha ausência por conta desse sonho que chega ao fim.

A todo Corpo docente dessa instituição que foi responsável pela construção desse saber, dessa ferramenta que usei no exercício dessa profissão, todo esse conhecimento adquirido não seria possível sem a presença desses grandes mestres e doutores que passaram por minha vida e plantaram a semente do bem e do conhecimento, agora é minha responsabilidade, cuidar para que esse conhecimento cresça e se multiplique, em especial agradeço ao Dr. Orientador Jandecy Cabral Leite.

Por fim agradecemos ao INSTITUTO DE TECNOLOGIA ITEGAM, por ter proporcionado momentos de muito aprendizado dentro dessa instituição.

Epígrafe

Aos profissionais que estão na base de toda a formação da nossa sociedade, e que fazem de seu trabalho uma verdadeira devoção. Especialmente, a todos os professores que deixaram suas marcas em nossas vidas, a primeiras delas aos nossos avós, mãe, pai, irmão amigos, professor e inspirador: Prof. Dr. Jandecy Cabral.

RESUMO

AQUINO, Dener Jeferson Horta. **ANÁLISE DE IMPACTOS HARMÔNICOS EM REDES ELÉTRICAS: DESENVOLVIMENTO DE UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS REGRESSÃO LINEAR E ÁRVORE DE DECISÃO**. 2022. p. 80. Dissertação do programa de pós-graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental (EGPSA), Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM), Manaus, 2022.

A análise do impacto dessas harmônicas no sistema elétrico é bastante prejudicial, tanto para os consumidores quanto para as concessionárias. O objetivo desta dissertação é realizar um estudo comparativo de resultados da aplicação das técnicas Arvore de Decisão e Regressão Linear Simples em análise de impactos harmônicos em um sistema elétrico. Realizou – se um estudo comparativo entre as técnicas de Regressão Linear Simples e Árvore de Decisão na avaliação dos impactos causados pela geração de harmônicos, na rede de distribuição, em uma subestação de média tensão. Foi feita a coleta de dados através de uma campanha de medição em uma subestação de nível 13,8 kV que alimenta uma parcela das empresas do distrito industrial da cidade de Manaus. A campanha de medição foi realizada por um período mínimo de 7 dias corridos de acordo com o PRODIST. As técnicas utilizadas na metodologia desta dissertação são a técnica Árvore de Decisão que possui como característica a construção de modelos não – paramétricos e a técnica de Regressão Linear Simples que possui como característica a construção de modelos paramétricos e cálculo matemático simples, de fácil interpretação e análise de dados. Desta forma esta dissertação apresentou e aplicou na prática com estudos de caso ações para análise de impactos harmônicos em sistemas de distribuição de energia elétrica através da construção de modelos matemáticos utilizando análise de Regressão Linear Simples e análise de Árvores de Regressão, obtendo resultados importantes e esclarecedores nos estudos realizados, validando assim as técnicas aplicadas em análise de impactos harmônicos em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Palavras-Chave: Distorção Harmônica de Tensão; Distorção Harmônica de Corrente; Qualidade de Energia Elétrica.

ABSTRACT

AQUINO, Dener Jefferson Horta. **ANALYSIS OF HARMONIC IMPACTS IN ELECTRICAL GRIDS: DEVELOPMENT OF A COMPARATIVE STUDY BETWEEN LINEAR REGRESSION AND DECISION TREE TECHNIQUES**. 2022. p. 80. Dissertation of the postgraduate program in Engineering, Process, Systems and Environmental Management (EGPSA), Galileo Institute of Technology and Education of the Amazon (ITEGAM), Manaus, 2022.

A comparative study was carried out between the Simple Linear Regression and Decision Tree techniques in the evaluation of the impacts caused by the generation of harmonics, in the distribution network, in a medium voltage substation. Data collection was carried out through a measurement campaign in a 13.8 kV substation that feeds a portion of the companies in the industrial district of the city of Manaus. The objective of this dissertation is to carry out a comparative study of the results of the application of Decision Tree and Simple Linear Regression techniques in the analysis of harmonic impacts in an electrical system. The measurement campaign was carried out for a minimum period of 7 calendar days according to PRODIST. The impact of these harmonics on the electrical system is quite harmful, both for consumers and for utilities. The techniques used in the methodology of this dissertation are the Decision Tree technique, which features the construction of non-parametric models and the Simple Linear Regression technique, which features the construction of parametric models and simple mathematical calculation, easy to interpret and analyze. of data. In this way, this dissertation presented and applied in practice with case studies actions for the analysis of harmonic impacts in electrical energy distribution systems through the construction of mathematical models using Simple Linear Regression analysis and Regression Tree analysis, obtaining important and enlightening results. in the studies carried out, thus validating the techniques applied in the analysis of harmonic impacts in electrical energy distribution systems.

Keywords: Voltage Harmonic Distortion; Current Harmonic Distortion; Electric Power Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Série de Fourier representando uma forma de onda distorcida. Fonte: (Dugan et al, 2004).....	24
Figura 2.2 - Onda distorcida e o espectro da onda distorcida. Fonte: (Kamenka, 2014)	25
Figura 2.3 - Distorção de corrente causada por resistor não linear.	27
Figura 2.4 - Diagrama do transformador e curva de magnetização.	29
Figura 2.5 - Diagrama de blocos de um conversor DC-DC controlado digitalmente. Fonte: (YU, et al., 2018).....	30
Figura 2.6 - Circuito equivalente ao forno elétrico. Fonte: NIKOLAEV et al, 2016.....	31
Figura 2.7 - Formas de onda da tensão do arco em estágios individuais de fundição: (a) ignição do arco; (b) início da fusão da carga; (c) fase de fusão principal; (d) estágio final de fundição. Fonte: (LUKASIK AND OICZYKOWSKI, 2020).	31
Figura 2.8 - Ponto de acoplamento comum (PAC).....	36
Figura 2.9 - Um exemplo de árvore de decisão: Atributos {Taxa de produção de lágrimas, Astigmatismo, receita de óculos}, Classes {Nenhum, Rígida, Macia}.....	42
Figura 2.10 – Modelo de regressão linear simples. Fonte: WELHAM et al. (2015)	43
Figura 3.1 – Fluxograma da pesquisa	49
Figura 4.1 - Identificação do impacto harmônico de cada alimentador em um barramento comum em uma subestação	50
Figura 4.2 - 3ª harmônica da FASE A, $R_2 = 0,526$	52
Figura 4.3 - 3ª harmônica da FASE B, $R_2 = 0,385$	52
Figura 4.4 - 3ª harmônica da FASE C, $R_2 = 0,043$	52
Figura 4.5 - 3ª harmônico FASE A, $R_2 = 0,009$	53
Figura 4.6 - 3ª harmônico FASE B, $R_2 = 0,165$	53
Figura 4.7 - 3ª harmônico FASE C, $R_2 = 0,561$	54
Figura 4.8 - 3ª harmônico da FASE A, $R_2 = 0,755$	54
Figura 4.9 - 3ª harmônico da FASE B, $R_2 = 0,009$	55
Figura 4.10 - 3ª harmônico da FASE C, $R_2 = 0,438$	55

Figura 4.11 - 5ª harmônico da FASE A, $R2 = 0$	56
Figura 4.12 - 5ª harmônico da FASE B, $R2 = 0,875$	56
Figura 4.13 - 5ª harmônico da FASE C, $R2 = 0$	57
Figura 4.14 - 5ª harmônico da FASE A, $R2 = 0,857$	57
Figura 4.15 - 5ª harmônico da FASE B, $R2 = 0,903$	58
Figura 4.16 - 5ª harmônico da FASE C, $R2 = 0,873$	58
Figura 4.17 - 5ª harmônico da FASE A, $R2 = 0,034$	59
Figura 4.18 - 5ª harmônico da FASE B, $R2 = 0,192$	59
Figura 4.19 - 5ª harmônica da FASE C, $R2 = 0,075$	59
Figura 4.20 - 7ª harmônico da FASE A, $R2 = 0,057$	61
Figura 4.21 - 7ª harmônico da FASE B, $R2 = 0,896$	61
Figura 4.22 - 7ª harmônico da FASE C, $R2 = 0,581$	61
Figura 4.23 - 7ª harmônico FASE A, $R2 = 0,511$	62
Figura 4.24 - harmônico FASE B, $R2 = 0,521$	62
Figura 4.25 - 7ª harmônico FASE C, $R2 = 0,626$	62
Figura 4.26 - 7ª harmônico da FASE A, $R2 = 0,393$	63
Figura 4.27 - 7ª harmônico da FASE B, $R2 = 0$	63
Figura 4.28 - 7ª harmônico da FASE C, $R2 = 0,656$	64
Figura 4.29 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 1 fase A.....	65
Figura 4.30 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 1 fase B.....	65
Figura 4.31 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 1 fase C.....	66
Figura 4.32 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 2 fase A.....	67

Figura 4.33 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 2 fase B.....	68
Figura 4.34 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 2 fase C.....	68
Figura 4.35 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 3 fase A.	70
Figura 4.36 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 3 fase B.....	70
Figura 4.37 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 3 fase C.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Frequências harmônicas	24
Tabela 2.2 - Terminologia	34
Tabela 2.3 - Limites das distorções harmônicas totais.	35
Tabela 2.4 - Limite de distorção de tensão.	37
Tabela 2.5 - Limites de distorção de corrente para sistemas de 120V a 69kV.....	37
Tabela 2.6 - Valores de cada harmônico de tensão.	38
Tabela 2.7 - Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de baixa tensão (BT) e média tensão (MT).	39
Tabela 2.8 - Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média (MT), alta (AT) e extra-alta tensão (EHT).	40
Tabela 3.1 - Intensidade de correlação R_2	47
Tabela 4.1 - Patamar de carga, coeficiente de determinação e fator de impacto dos DIAL2 – 16, DIAL2 – 17 e DIAL2 – 19.....	51
Tabela 4.2 - Patamar de carga, coeficiente de determinação e fator de impacto dos DIAL2 – 16, DIAL2 – 17 e DIAL2 – 19.....	56
Tabela 4.3 - Patamar de carga, coeficiente de determinação e fator de impacto dos DIAL2 – 16, DIAL2 – 17 e DIAL2 – 19.....	60
Tabela 4.4 - Fator de Impacto harmônico para 3ª ordem (%) MAE.....	64
Tabela 4.5 - Fator de Impacto harmônico para 5ª ordem (%) MAE.....	67
Tabela 4.6 - Fator de Impacto harmônico para 7ª ordem (%) MAE.....	69

LISTA DE SIGLAS

a_0	SINAL FUNDAMENTAL (DC)
A_n	AMPLITUDE DO VETOR DE COMPONENTE HARMÔNICA DE ORDEM N
ANEEL	AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
AT	ALTA TENSÃO
b_n, c_n	COEFICIENTES DE FOURIER
BT	BAIXA TENSÃO
DIT_h %	DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL DE TENSÃO DE ORDEM H
DTT %	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO
DTT_{95} %	VALOR DO INDICADOR $DTT\%$ QUE FOI SUPERADO EM APENAS 5 % DAS 1008 LEITURAS VÁLIDAS
DTT_3 %	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO PARA AS COMPONENTES MÚLTIPLAS DE 3
DTT_3_{95} %	VALOR DO INDICADOR $DTT_3\%$ QUE FOI SUPERADO EM APENAS 5 % DAS 1008 LEITURAS VÁLIDAS
DTT_i %	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO PARA AS COMPONENTES ÍMPARES NÃO MÚLTIPLAS DE 3
DTT_i_{95} %	VALOR DO INDICADOR $DTT_i\%$ QUE FOI SUPERADO EM APENAS 5 % DAS 1008 LEITURAS VÁLIDAS
DTT_p %	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO PARA AS COMPONENTES PARES NÃO MÚLTIPLAS DE 3
DTT_p_{95} %	VALOR DO INDICADOR $DTT_p\%$ QUE FOI SUPERADO EM APENAS 5 % DAS 1008 LEITURAS VÁLIDAS
f	FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL
h	ORDEM HARMÔNICA

<i>hmáx</i>	ORDEM HARMÔNICA MÁXIMA
<i>hmin</i>	ORDEM HARMÔNICA MÍNIMA
Iac	CORRENTE ALTERNADA
IEC	INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEEE	INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS
<i>Ih</i>	CORRENTE HARMÔNICA
IHD	DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL
IHDI	DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL DE CORRENTE
IHDV	DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL DE TENSÃO
IL	CARGA DO CONSUMIDOR
<i>I_n</i>	CORRENTE HARMÔNICA PARA <i>n</i> NÍVEL HARMÔNICO
Isc	CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO
MT	MÉDIA TENSÃO
P	POTÊNCIA REAL
PAC	PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM
PCC	PONTO DE CONEXÃO COMUM
<i>Pmédia</i>	POTENCIA MÉDIA
PRODIST	PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL
pu	POR UNIDADE
QQE	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
RMS	RAIZ QUADRÁTICA MÉDIA
T	PERÍODO
TC	TRANSFORMADOR DE CORRENTE
THD	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL
THDI	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE

THDV	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO
TL	TENSÃO DE LINHA
TP	TRANSFORMADOR DE CORRENTE
TR	TENSÃO DE REFERÊNCIA
V_1	TENSÃO FUNDAMENTAL MEDIDA
Vac	TENSÃO ALTERNADA
V_n	TENSÃO HARMÔNICA PARA n NÍVEL HARMÔNICO
V_n	TENSÃO HARMÔNICA DE ORDEM H
ω_1	FREQUÊNCIA ANGULAR
%TDD	INDICADOR DE DISTORÇÃO HARMÔNICA DA DEMANDA TOTAL
δ_n	ÂNGULO DE FASE DE CORRENTE HARMÔNICA PARA n Nível HARMÔNICO
θ_n	ÂNGULO DE FASE DE TENSÃO HARMÔNICA PARA n NÍVEL HARMÔNICO

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	19
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO	20
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 GERAL	22
1.2.2 ESPECÍFICOS	22
1.3 ESCOPO DO TRABALHO	22
CAPÍTULO 2	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 FUNDAMENTOS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	23
2.1.1 DEFINIÇÃO DE CARGAS LINEARES	26
2.1.2 DEFINIÇÃO DE CARGAS NÃO LINEARES	26
2.1.3 SERIE DE FOURIER	27
2.2 FONTES HARMÔNICAS	28
2.2.1 TRANSFORMADORES	28
2.2.2 CONVERSORES DE FREQUÊNCIA	29
2.2.3 FORNO ELÉTRICO A ARCO	30
2.3 EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS	32
2.4 NORMAS E RECOMENDAÇÕES PARA MONITORAÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	32
2.4.1 PRODIST - PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL (MODULO 8)	33
2.4.2 IEEE STD. - 519-2014	35
2.4.3 EN 50160 - POWER QUALITY STANDARD	38
2.4.4 NORMA IEC 61000-3-6 DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA	38

2.5 TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL	41
2.5.1 ÁRVORE DE DECISÃO	41
2.5.2 REGRESSÃO LINEAR	42
CAPÍTULO 3	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 SOFTWARE AAQEE	48
3.2 - ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA HIOKI PW 3198	48
3.3 – FLUXOGRAMA DA PESQUISA	49
CAPÍTULO 4	50
4 APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REGRESSÃO LINEAR E ÁRVORE DE DECISÃO	50
4.1 – APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE REGRESSÃO LINEAR	51
4.1.1 - ESTUDO DE CASO 1: IMPACTO DO 3 ^A HARMÔNICO	51
4.1.2 ESTUDO DE CASO 2: IMPACTO DO 5 ^A HARMÔNICO	55
4.1.3 ESTUDO DE CASO 3: IMPACTO DO 7 ^A HARMÔNICO	60
4.2 – APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ÁRVORE DE DECISÃO	64
4.2.1 ESTUDO DE CASO 1: IMPACTO DO 3 ^A HARMÔNICO	64
4.2.2 ESTUDO DE CASO 2: IMPACTO DO 5 ^A HARMÔNICO	66
4.2.3 ESTUDO DE CASO 3: IMPACTO DO 7 ^A HARMÔNICO	69
4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS TÉCNICAS REGRESSÃO LINEAR E ARVORE DE DECISÃO	71
1.1.1 4.3.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 1 (3 ^a HARMÔNICA)	71
4.3.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 2 (5 ^a HARMÔNICA)	71
4.3.3COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 3 (7 ^a HARMÔNICA)	72

CAPÍTULO 5	73
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	73
5.1 CONCLUSÕES	73
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS	75
ANEXOS	80

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é utilizada como produto em todos os setores da vida humana, possui um conjunto de propriedades específicas e está diretamente envolvida no desenvolvimento de outros tipos de produtos, exigindo assim ótima qualidade da energia elétrica, e cada produto elétrico/eletrônico é projetado para operar em determinados parâmetros de energia elétrica: frequência nominal, tensão, corrente, etc., portanto, para seu funcionamento normal, deve ser fornecida a qualidade de energia da eletricidade (NAZIROV et al, 2021).

A qualidade de energia elétrica é definida com base em quatro medições importantes de parâmetros elétricos, ou seja, tensão, corrente, frequência e fase; portanto, tanto a tensão quanto a corrente devem estar em forma senoidal com magnitude especificada em uma frequência constante, sem qualquer mudança de fase (ZOBAA AND ALEEM, 2017).

As cargas não lineares são definidas como fontes de correntes harmônicas que contaminam o sistema elétrico com perturbações como distorção na forma de onda de tensão (SOUZA et al., 2021).

As empresas de energia produzem energia elétrica onde a tensão gerada é mantida senoidal usando geradores síncronos e após algumas operações, essa energia elétrica é transferida para os consumidores em baixa tensão, exceto para alguns consumidores industriais e consumidores de Alta Tensão (AT) e Media Tensão (MT). A utilização de cargas não lineares gera altas correntes harmônicas que acabam afetando as tensões de fase e linha do sistema elétrico. Essas correntes harmônicas ocasionam aquecimento na superfície do condutor e causam maior perda de correntes parasitas nos transformadores, e além disso, as correntes harmônicas aumentam a queda de tensão não linear nas linhas de transmissão, causando uma distorção na forma de onda da tensão de alimentação que afeta os consumidores em geral (SALAM, UDDIN AND MOINUDDIN, 2019)

Os efeitos das correntes harmônicas nas redes de energia elétrica são refletidos nas perdas de energia que ocorrem devido aos regimes deformantes nas formas de onda de tensão e corrente da rede elétrica, levando ao aumento dos custos de produção de eletricidade e ao superdimensionamento dos elementos da rede, e a maioria dos equipamentos elétricos é muito sensível à deformação das formas ondas de tensão e corrente, bem como à presença de um ou mais harmônicos particulares (DOBREF, POPOV AND MOCANU, 2018).

Segundo (ULLAH et al., 2019), é essencial o conhecimento das fontes de harmônicas instaladas no sistema elétrico, distúrbios de tensão e interrupções na forma de onda, para então implementar melhorias para qualidade de energia elétrica. Segundo (ALMEIDA AND LEITE, 2018), para solucionar o problema da distorção harmônica, a técnica mais comum se baseia na aplicação de filtros passivos, no entanto um processo importante que deve ser realizado antes de implementar a solução, é identificar as principais fontes de harmônicos num sistema elétrico e conhecer a porcentagem de contribuição de cada uma fonte, de maneira a solucionar com maior efetividade o problema das distorções harmônicas de tensão e corrente.

Assim, faz - se necessário identificar, medir os níveis de distorções harmônicas no sistema elétrico em estudo e identificar em quais alimentadores ou pontos há a maior contribuição nas distorções harmônicas, ou seja, identificar as cargas não - lineares que estão prejudicando o sistema elétrico, para então poder tomar a melhor decisão na solução deste problema. Esta dissertação utiliza duas técnicas de inteligência computacional denominadas *Árvore de Decisão* e *Regressão Linear*, para identificar e mensurar os impactos harmônicos causados pelas injeções de correntes harmônicas geradas por cargas não-lineares. As técnicas utilizadas buscam uma correlação entre corrente harmônica injetada e a tensão harmônica na barra do sistema elétrico, identificando assim onde há a maior contribuição de fontes harmônicas.

Esta dissertação apresenta um estudo comparativo de resultados na aplicação das técnicas *Arvore de Decisão* e *Regressão Linear* em análise de impactos harmônicos em um sistema elétrico.

Com o propósito de estabelecer a simultaneidade harmoniosa entre os equipamentos perturbadores, ou seja, as cargas não - lineares, e equipamentos sensíveis, faz-se necessário o estabelecimento de limites e normas para controle de tais feitos ou fenômenos. As normas são: *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, nos Estados Unidos, *International Electrotechnical commission (IEC)*, na Europa e *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)*, no Brasil. No decorrer desta dissertação essas normas serão abordadas com mais detalhes.

1.1 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO

Atualmente, as concessionárias de energia elétrica e os consumidores estão dedicando maior atenção para melhorar a qualidade da energia elétrica gerada e distribuída, e os principais objetivos são produzir energia elétrica limpa e distribuí-la aos clientes finais com desempenho de qualidade de energia aceitável de maneira econômica (ZOBAA, ALEEM AND BALCI,

2018). A qualidade da energia elétrica compreende uma ampla gama de fenômenos eletromagnéticos, dentre os quais se destacam os harmônicos, definidos como componentes de frequência que são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema elétrico, que afetam as comunicações telefônicas e os sistemas de controle e proteção, além de aumentar perdas na rede, danificar equipamentos sensíveis, causar aquecimento excessivo em máquinas elétricas e ser causa de ressonância (MARRERO et al, 2021). As concessionárias de energia estão, portanto, sob pressão para manter as formas de onda de tensão de fase de linha puras senoidais, evitando harmônicos gerados pelas cargas não lineares do consumidor. Por outro lado, esses harmônicos não afetam apenas a forma de onda da tensão, mas também produzem potência reativa afetando o fator de potência, e além disso, o padrão de qualidade de energia está se tornando uma questão sensível devido ao número adicional de dispositivos não lineares conectados que impõem uma forma de onda de corrente não senoidal ao sistema, e muitas cargas sensíveis ligadas a um sistema de energia dependem de uma tensão de alimentação senoidal pura e estável (SALAM, UDDIN AND MOINUDDIN, 2019).

Como foi abordado acima o problema das distorções harmônicas é um fato. Logo, a presente pesquisa é relevante diante da necessidade de se mensurar e identificar os níveis de distorções harmônicas, os impactos na rede elétrica, para então propor soluções que possam reduzir os impactos causados na rede elétrica, entre os quais também podemos citar:

- a) Sobrecarga nos sistemas elétricos devido ao aumento da corrente eficaz;
- b) Sobrecarga nos condutores de neutro devido as correntes harmônicas de 3ª ordem;
- c) Aquecimento, vibrações e envelhecimento de alternadores, transformadores e motores;
- d) Aquecimento e envelhecimento dos capacitores de compensação de energia reativa;
- e) Falsa atuação de sensores e equipamentos de proteção;
- f) Queima ou operação inadequada de aparelho sensível;
- g) Perturbação das redes de comunicação ou das linhas telefônicas;
- h) Erros de medição.

Esta pesquisa tem como contribuição a aplicação prática de uma metodologia válida utilizando duas técnicas de inteligência computacional aplicadas estudos de caso para análises de impactos harmônicos considerando as recomendações do IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014 e PRODIST/MODULO 8/ANEEL, revisão ano 2021, que sirva como um material de base e apoio para pesquisas mais avançadas sobre distorção harmônica e qualidade de energia como um todo.

Essa dissertação contribui também, não só ao incentivo da criação de documentos normativos que imputem responsabilidades sobre violações de limites de distorções

harmônicas, mas também ao estímulo da inclusão na tarifação de energia elétrica as implicações do conteúdo harmônico das cargas que poluem o sistema de alimentação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Realizar um estudo comparativo de resultados na aplicação das técnicas Árvore de Decisão e Regressão Linear em análise de impactos harmônicos em um sistema elétrico.

1.2.2 Específicos

- Coletar de dados (níveis de harmônicos) do sistema elétrico estudado;
- Analisar a correlação entre as correntes harmônicas injetadas no sistema e a distorção de tensão no ponto em análise através das técnicas de Árvore de Decisão e Regressão Linear;
- Comparar os resultados obtidos da aplicação das técnicas de Árvore de Decisão e Regressão Linear em análise de impactos harmônicos.
- Desenvolver um perfil dos alimentadores ou pontos medidos para melhor gerenciamento do sistema elétrico;

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O **capítulo 1** apresenta a motivação, os objetivos, as contribuições da dissertação e a forma de organização do trabalho.

No **capítulo 2**, apresenta-se os conceitos de distorções harmônicas no qual descrevem assuntos relacionados aos fundamentos de distorções harmônicas, as causas das distorções harmônicas. Bem como, as normas de qualidade de energia elétrica e um estudo sobre as técnicas de Regressão Linear Simples e Árvore de decisão.

No **capítulo 3**, apresentam-se os materiais e métodos.

No **capítulo 4**, apresentam-se os resultados esperados.

No **capítulo 5**, apresenta-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentos de Distorções Harmônicas e Qualidade de Energia Elétrica

Segundo (IEEE-1159, 2019), a definição de qualidade de energia é a grande variedade de fenômenos eletromagnéticos que ocorrem na rede elétrica em determinado momento e local que caracterizam a tensão e a corrente; essas medições são comparadas com valores ideais ou aceitáveis.

Na era atual de desregulamentação e concorrência das concessionárias, o impacto dos harmônicos e inter-harmônicos nas operações de equipamentos e sistemas tem gerado sérias preocupações. Hoje em dia, é bem conhecido que os harmônicos têm efeitos adversos em todo o sistema de energia, como o mau funcionamento de importantes equipamentos de controle e proteção, superaquecimento de transformadores e sobrecarga de outros aparelhos de energia, e por outro lado, os inter-harmônicos causam oscilações de iluminação, disparo errôneo de aparelhos de tiristores e flutuação da imagem do monitor ou exibição (AMOO, ALIYU AND BAKARE, 2018).

(ZOBAA, ALEEM AND BALCI, 2018) afirma, todos os equipamentos elétricos podem falhar ou funcionar mal quando se deparam com distúrbios de qualidade de energia, dependendo da gravidade do distúrbio, é essencial que engenheiros, técnicos, fabricantes e operadores de sistemas de energia entendam bem e enfrentem os diversos distúrbios de qualidade de energia. Os problemas de qualidade de energia incluem variações de tensão (quedas, interrupções, oscilações, etc.), transientes (surtos, raios e eventos de comutação) e problemas de aterramento. A Figura 1 resume os problemas comuns de qualidade de energia.

O fenômeno de distorção de potência harmônica foi reconhecido pelas concessionárias no início dos anos 1920 e 1930, quando formas de onda de tensão e corrente distorcidas foram observadas em linhas de transmissão [9, 10]. Harmônicos são energia de estado estacionário de alta frequência envolvendo múltiplas frequências da fundamental (60 Hz) fluindo junto com a frequência fundamental em uma rede de energia que pode afetar adversamente o desempenho do sistema de energia (AMOO, ALIYU AND BAKARE, 2018).

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

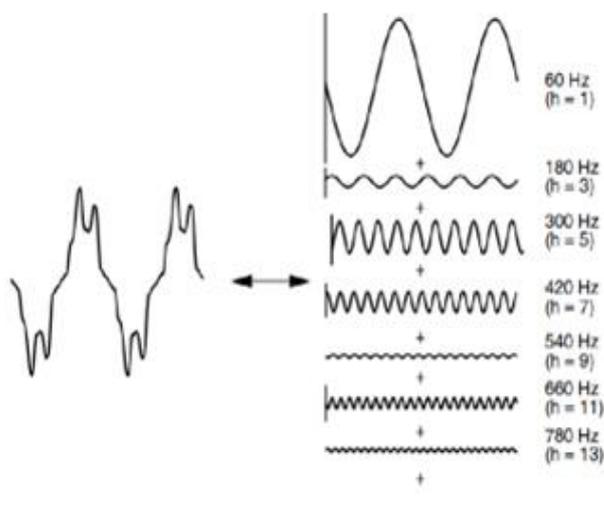
senoidais e uma componente constante. Segundo (DE OLIVEIRA, 2018), a noção de harmônicos no sentido elétrico tornou-se conhecida na segunda metade do século XX, quando a componente senoidal é da mesma frequência do sinal original denomina-se fundamental e para as demais componentes senoidais, cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental, são denominadas frequências harmônicas conforme mostrado na **Tabela 2.1** e na Figura 2.1.

Tabela 2.1 - Frequências harmônicas

Ordem Harmônica	Frequência em rede de 50 Hz	Frequência em rede de 60 Hz
1 ^a	50	60
2 ^a	100	120
3 ^a	150	180
4 ^a	200	240
5 ^a	250	300
...
N ^a	50 x n	60 x n

Fonte: (KAMENKA, 2014).

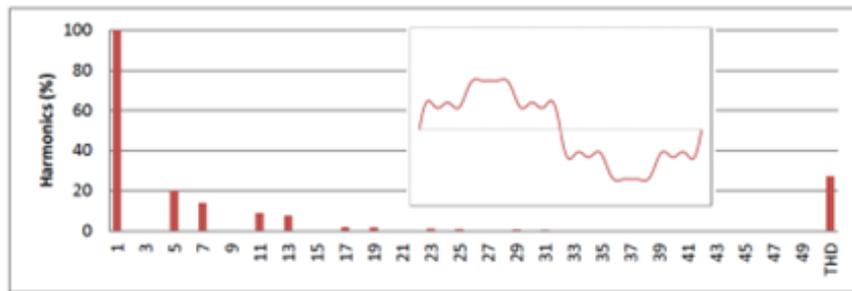
Figura 2.1 - Série de Fourier representando uma forma de onda distorcida.



Fonte: (DUGAN et al, 2004)

Para (DE OLIVEIRA,2018), uma forma de onda distorcida sempre pode ser escrita como a superposição de uma forma de onda da frequência fundamental com outras formas de onda de diferentes frequências e amplitudes harmônicas. O espectro harmônico mostrado na figura 2.2 é uma boa maneira de identificar a decomposição da forma de onda da figura 2.1. Esse tipo de espectro também é usado por quase todos os dispositivos de medição de qualidade de energia.

Figura 2.2 - Onda distorcida e o espectro da onda distorcida. Fonte: (Kamenka, 2014)



(ALBADI, et al, 2017) afirma, a distorção harmônica total (THD) é usada para definir o efeito dos harmônicos na tensão do sistema de potência. A IEEE 519-2014 define o THD como “a razão da raiz quadrada média do conteúdo harmônico, considerando componentes harmônicos até a 50ª ordem e excluindo especificamente os inter-harmônicos, expressos em porcentagem da fundamental”. Em outras palavras, o THD é a contribuição de todos os harmônicos para a fundamental. O THD é calculado conforme descrito pela seguinte fórmula:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (2.1)$$

onde M_1 , é o componente fundamental do valor rms do sinal de tensão ou corrente. Para avaliar a distorção harmônica de corrente, a distorção de demanda total (TDD) é comumente utilizada. A IEEE 519-2014 define o TDD como “a razão entre o raiz quadrada média do conteúdo harmônico, considerando componentes harmônicos até a 50ª ordem e excluindo especificamente inter-harmônicos, expressos em porcentagem da corrente máxima de demanda”

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_m} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_m} \quad (2.2)$$

onde I_m é a corrente de carga de demanda máxima e I_1 é o valor rms do componente fundamental.

As sequências das harmônicas podem ser positivas, negativas e zero, como é descrito abaixo (PROCOBRE, 2003):

- a) Sequência positiva: tendem a fazer os motores a girarem no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando assim, uma sobrecorrente nos seus enrolamentos;
- b) Sequência negativa: tendem a fazer motores girarem em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e também causando aquecimento indesejado;
- c) Sequência zero: surgimento de uma corrente de neutro 3 (três) vezes maior que a corrente de fase, ocasionando aquecimento excessivo do condutor neutro (PROCOBRE, 2003).

2.1.1 Definição de Cargas Lineares

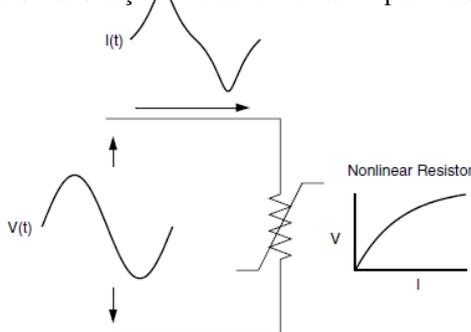
(DA SILVEIRA, BERNARDON AND RADUNS, 2018) explica, as cargas lineares são constituídas por resistências, indutâncias e capacitâncias, onde as formas de onda de corrente e tensão serão sempre senoidais, exceto quando alimentados por sinais não senoidais, ou seja, a forma de onda da corrente de uma carga linear será idêntica a forma de onda da tensão que a alimenta, havendo apenas o deslocamento de fase. Exemplo de cargas lineares: aquecedores, caldeira, lâmpadas incandescentes e motores de (ventiladores, compressores, bombas, torno mecânico, furadeira elétrica, fresadora, etc.) (NASSAR et al, 2020).

2.1.2 Definição de Cargas não Lineares

(DE OLIVEIRA, 2018) explica, uma carga é considerada não linear se a corrente projetada pela carga não for senoidal mesmo quando estiver conectada a uma tensão senoidal. Essa corrente não linear contém componentes de frequência que são múltiplos da frequência do sistema de energia. Essas correntes harmônicas interagem com a impedância da rede de energia elétrica para criar distorção de tensão que pode afetar a própria rede elétrica e as cargas conectadas a ela. Exemplos de cargas não lineares: soldadores elétricos, lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de sódio de alta pressão, instrumento e controle, controle de (elevadores, moedores de guindastes, ventiladores, compressores, bombas, torno mecânico,

furadeira elétrica, fresadora , etc . . .) e todas essas cargas controladas ou operadas por dispositivos eletrônicos (NASSAR et al, 2020). . A Figura 2.3 mostra um exemplo deste conceito no caso de uma tensão senoidal aplicada a um simples resistor não-linear em que a tensão e a corrente variam de acordo com a curva mostrada. Enquanto a forma de onda da tensão aplicada é uma senoide pura, a corrente resultante tem forma de onda distorcida. Aumentar a tensão em alguns por cento pode causar o aumento da corrente para o dobro e assumir uma forma de onda diferente. Esta é a fonte da maioria das distorções harmônicas em um sistema de elétrico (DUGAN *et al.*, 2004).

Figura 2.3 - Distorção de corrente causada por resistor não linear.



Fonte: DUGAN *et al.* (2004).

2.1.3 Serie de Fourier

A decomposição de uma forma de onda de tensão e corrente distorcidas em componentes harmônicas da corrente fundamental, com amplitudes e defasamentos angulares, é devida ao matemático Francês Jean Baptiste J. Fourier (1768-1830). Esta decomposição torna possível o emprego dos métodos padrões de análise de circuitos para cada harmônico separadamente.

Analisar uma forma de onda de tensão ou corrente com conteúdo harmônico baseia-se na análise de Fourier. Segundo ARRILLAGA (1997), a análise de Fourier é o processo de transformação de formas de onda do domínio do tempo em formas de onda no domínio da frequência, que possibilita instituir uma relação simples entre uma função no domínio do tempo e uma função no domínio da frequência.

(LEI et al., 2022) explica, a forma de onda de tensão ideal no sistema de potência existe na forma de onda senoidal. Para a forma de onda não ideal, podemos considerar um sinal aperiódico como um sinal cujo período t tende ao infinito. A frequência fundamental f_0 e o intervalo da linha espectral Δf_0 desta forma de onda aproximam-se basicamente de 0. Obviamente, neste momento, as linhas espectrais tornam-se cada vez mais concentradas,

tornando as linhas espectrais discretas próximas das linhas espectrais contínuas. As fórmulas (2.3) e (2.4) são obtidas:

Definição de transformada de Fourier positiva:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.3)$$

Definição da transformada inversa de Fourier:

$$y(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Y(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.4)$$

Ao analisar um sinal, é impossível para um computador analisar um sinal infinito contínuo. O sinal deve ser amostrado para discretizá-lo em uma série temporal finita $\{y(n), n = 0, 1, 2, \dots, N - 1\}$. O par de transformadas discretas de Fourier é o seguinte: onde N é o comprimento da sequência e k é o número da linha espectral.

Transformada direta de Fourier discreta:

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)e^{-j2\pi nk/N}, (n, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1) \quad (2.5)$$

Transformada de Fourier discreta inversa:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k)e^{-j2\pi nK/N}, (n, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1) \quad (2.6)$$

2.2 FONTES HARMÔNICAS

Atualmente, como consequência do uso extensivo de componentes baseados em eletrônica de potência em todas as aplicações de sistemas de potência, a maioria das cargas atuais são não lineares. Para generalizar, três categorias podem ser reconhecidas como fontes primárias de harmônicos em sistemas de potência. Eles são dados do seguinte modo (ZOBAA, ALEEM AND BALCI, 2018):

- a) Equipamentos baseados em núcleos magnéticos como motores elétricos, transformadores de potência e geradores;
- b) Soldadores de arco e indução e arco;
- c) Equipamento baseado em eletrônica de potência.

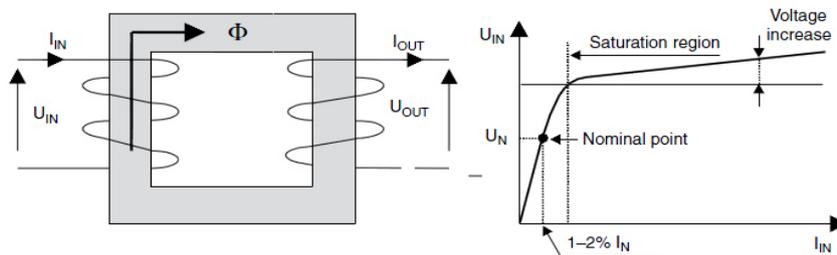
2.2.1 Transformadores

Os transformadores são projetados para que funcione com corrente de magnetização na faixa de 1% a 2% da corrente nominal. O ponto em que o transformador funciona com tensão nominal é então localizado abaixo do “joelho” da curva de magnetização, que é a região linear de funcionamento de um transformador, ver Figura 2.6. Mesmo que haja uma grande

quantidade transformadores operando em um sistema de energia elétrica, os mesmos não são considerados uma fonte significativa de harmônicos em condições normais de operação. Porém se esta condição mudar devido, por exemplo, a um ligeiro aumento de tensão dentro da região de saturação, mesmo um pequeno aumento de tensão acima do valor nominal resulta em um grande aumento na corrente de magnetização e conseqüentemente o conteúdo harmônico aumenta significativamente (BAGGINI, 2008).

A não linearidade do núcleo do transformador de corrente pode ser avaliada usando o teste de circuito aberto (sem carga), onde os resultados mostram que a corrente de magnetização de um TC contém componentes harmônicos, e a distorção harmônica total nestas condições pode atingir um valor em torno de 51%, resultando em um THD de 9% no secundário (MURRAY AND DE KOCK, 2018).

Figura 2.4 - Diagrama do transformador e curva de magnetização.



Fonte: SOARES (2012).

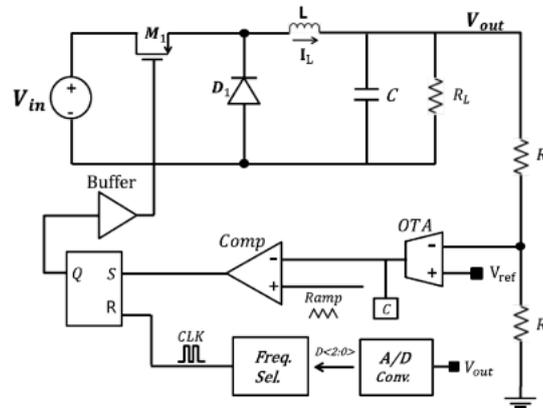
2.2.2 Conversores de frequência

A modelagem linearizada de conversores eletrônicos de potência é fundamental para revelar as causas da instabilidade harmônica em sistemas de potência baseados em eletrônica de potência (WANG AND BLAABJERG, 2018).

(AHMED et al., 2021) afirma, os conversores DC-DC são os componentes inevitáveis dos modernos sistemas de distribuição DC, sendo que o comportamento não linear desses circuitos conversores individuais é minuciosamente realizado nos estudos de circuitos de eletrônica de potência, e o comportamento variante no tempo desses circuitos conversores é devido às oscilações de baixa e alta frequência que resultam em bifurcações de múltiplos períodos. (WANG AND BLAABJERG, 2018) detalha, os conversores de potência são sistemas dinâmicos não lineares e variantes no tempo, onde a não linearidade se deve ao ciclo de trabalho dinamicamente variado (entrada de controle do modulador) com o sistema de controle em malha fechada, e a variação no tempo resulta do processo de modulação de comutação e do tempo - trajetórias operacionais periódicas de sistemas Na era moderna da tecnologia, a maioria

dos dispositivos de consumo são compostos por circuitos conversores DC-DC que exigem que os engenheiros de projeto se concentrem principalmente na eliminação de sub-harmônicos (AHMED et al., 2021)

Figura 2.5 - Diagrama de blocos de um conversor DC-DC controlado digitalmente.



. Fonte: (YU, et al., 2018)

2.2.3 Forno Elétrico a Arco

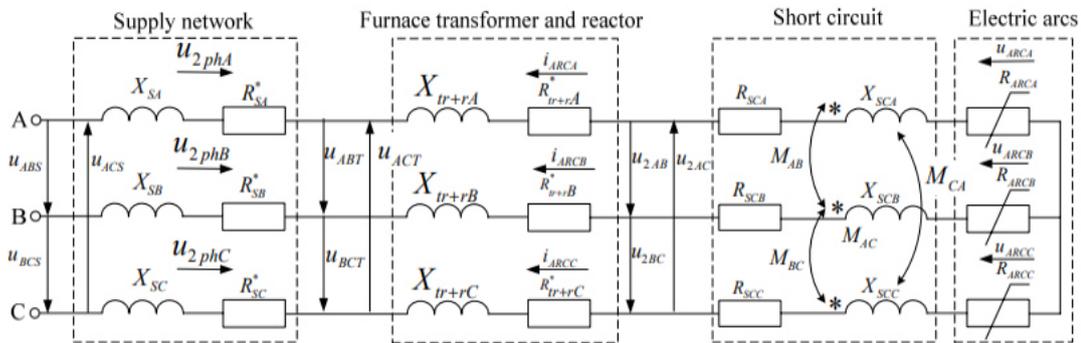
De acordo com (JR AND SIMONETTI, 2019), os fornos elétricos a arco são os principais equipamentos responsáveis pela transformação da sucata metálica em aço no processo de fusão e refinamento de metais, sendo de essencial relevância na indústria siderúrgica justo ao seu benefício ambiental a partir da reciclagem de materiais metálicos. Portanto, o forno elétrico a arco no processo siderúrgico, torna-se de substancial importância na sustentabilidade da cadeia de produção e consumo humano de materiais fabricados a partir do aço como matéria-prima.

A análise do impacto de fornos elétricos a arco DC (EAFs DC) como fonte de distorções harmônicas em uma rede elétrica é um objetivo complexo e relevante, e uma característica dos fornos CC é uma faixa de frequência muito ampla de harmônicos e a natureza aleatória não estacionária de sua aparência durante a fusão, juntamente com determinados harmônicos canônicos da corrente que são determinados pelo circuito de retificação, e o surgimento de harmônicos não canônicos está ligado à assimetria dos pulsos de controle do processo tecnológico devido a discrepâncias naturais, à natureza fortemente variável da carga e às distorções de sinal nas malhas de corrente do sistema de controle. As amplitudes desses harmônicos não excedem as amplitudes dos harmônicos canônicos e, na maioria dos casos, não requerem compensação (ABDULVELEEV et al., 2021).

(NIKOLAEV et al., 2016) explica, o estudo da composição harmônica de tensão de arco elétrico, necessita de análise de valores instantâneos, e essa análise é viabilizada pelo modelo

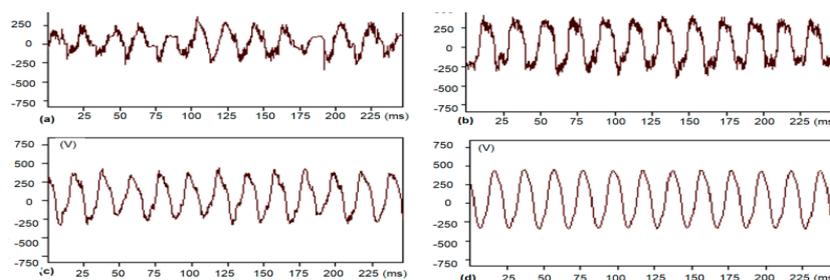
matemático do circuito conforme Figura 2.5, baseado nas leis de Kirchoff, diferenciais equação da condutividade instantânea do arco, bem como equações de força eletromotriz do arco considerando a ação elétrica semelhante a uma válvula.

Figura 2.6 - Circuito equivalente ao forno elétrico. Fonte: NIKOLAEV et al, 2016



O grau de distorção da tensão do arco tem um efeito direto na forma de onda da corrente elétrica do forno, e a corrente distorcida que flui na rede de alimentação causa uma queda de tensão distorcida na impedância da rede, que subtraindo da tensão de alimentação senoidal (fonte) faz com que a tensão de alimentação da usina siderúrgica e siderúrgica não seja senoidal. As formas de onda de tensão de arco medidas mostram mudanças na forma de tensão durante o processo de fusão no forno a arco, visto na Figura 17 abaixo. Na fase inicial, após a ignição do arco, a tensão mostra grandes mudanças estocásticas que resultam da mudança no comprimento do arco se movendo ao longo da carga. (LUKASIK AND OICZYKOWSKI, 2020).

Figura 2.7 - Formas de onda da tensão do arco em estágios individuais de fundição: (a) ignição do arco; (b) início da fusão da carga; (c) fase de fusão principal; (d) estágio final de fundição.



Fonte: (LUKASIK AND OICZYKOWSKI, 2020).

2.3 EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

O impacto nos harmônicos pode variar desde o rebaixamento do desempenho do equipamento até sua falha grave. Os efeitos das harmônicas do sistema de energia podem ser agrupados em dois grandes grupos: como efeitos nas redes e equipamentos do sistema de energia e efeitos nos sistemas de telecomunicações. Segundo (ZOBAA, ALEEM AND BALCI, 2018), as consequências mais comuns nos diferentes setores de um sistema elétrico estão resumidas abaixo:

- a) Perdas excessivas de energia devido às altas correntes não senoidais, levando a altas contas de energia elétrica.
- b) A presença de corrente no fio neutro com perdas adicionais. Pode ocorrer um problema de superaquecimento.
- c) Falha de equipamentos, paralisação de motores, sobrecarga de condutores, queima de fusíveis e apagões de lâmpadas.
- d) Erros na medição do consumo de energia.
- e) Interferência em sistemas e redes de telecomunicações.
- f) Perda de dados em sistemas de transmissão de dados.
- g) Mau funcionamento do desempenho do sistema de controle e proteção.
- h) Ressonância harmônica em série e paralela, que pode causar danos aos componentes do sistema, falha do equipamento e interrupção do serviço.
- i) Instabilidade harmônica que leva a danos nos eixos dos geradores.
- j) Ruído audível em transformadores, máquinas rotativas e vibrações de motores.
- k) Bloqueios de controladores lógicos programáveis e computadorizados e em operação correta.
- l) Mau funcionamento dos reguladores de tensão e geradores com frequentes problemas de manutenção.
- m) Envelhecimento prematuro dos equipamentos.
- n) Problemas de dimensionamento de UPS.
- o) Piora do fator de potência das cargas com seus efeitos adversos e de utilidade penalidades.

2.4 NORMAS E RECOMENDAÇÕES PARA MONITORAÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Nesta seção serão apresentadas as normas que limitam os níveis de distorções harmônicas em redes elétricas de distribuição.

Existem normas internacionais e nacionais para o controle da distorção harmônica das formas de onda de tensão e corrente. São elas: IEEE Std. 519-2014, EN 50160 e a IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02). No Brasil, estão vigentes os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 (ANEEL-PRODIST, 2021).

2.4.1 PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Módulo 8)

O objetivo do PRODIST é estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado (PRODIST MODULO 8, 2021).

Quanto a qualidade do produto, o módulo 8 define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores limites de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às anomalias na forma de onda de tensão, determinando mecanismos que permitam à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE (PRODIST MODULO 8, 2021).

Quanto a qualidade dos serviços prestados, o módulo 8 estabelece a metodologia para averiguação dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento das ocorrências urgentes, definindo padrões e responsabilidades (PRODIST MODULO 8, 2021). Esta dissertação aborda procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica somente relacionada a distorções harmônicas.

Nesta subseção serão apresentados valores limites de referências para distorções harmônicas totais aceitáveis para cada classe de tensão nos sistemas de energia elétrica (BT – Baixa Tensão, MT - Média Tensão e AT - Alta Tensão). Esta dissertação está delimitada em análise de impactos harmônicos em redes elétricas de média tensão.

A **Tabela 2.2** resume a terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas.

As expressões para o cálculo das grandezas DIT_h %, DTT %, DTT_p %, DTT_i %, DTT_3 % são apresentadas nas Equações (2.7), (2.8), (2.9), (2.10) e (2.11), respectivamente:

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.7)$$

Sendo:

h = ordem harmônica individual.

Tabela 2.2 - Terminologia

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h \%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT \%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p \%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i \%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3 \%$
Tensão harmônica de ordem h	V_n
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	$hmáx$
Ordem harmônica mínima	$hmin$
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTTP\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_p_{95\%}$
Valor do indicador $DTTI\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_i_{95\%}$
Valor do indicador $DTT3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_3_{95\%}$

Fonte: PRODIST MODULO 8 (2021).

$$DTT \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmáx} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.8)$$

Sendo:

h = todas as ordens harmônicas de 2 até hmáx;

hmáx = conforme a classe A ou S.

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.9)$$

Sendo:

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

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

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.10)$$

Sendo:

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

h_i = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.11)$$

Sendo:

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

h_3 = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

De acordo com PRODIST MODULO 8 (2021), os valores limites para as distorções harmônicas totais são apresentados na **Tabela 2.2**.

Tabela 2.3 - Limites das distorções harmônicas totais.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0kV$	$1,0kV < V_n < 69kV$	$69kV \leq V_n < 230kV$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0	5,0
$DTT_p_{95\%}$	2,5%	2,0	1,0
$DTT_i_{95\%}$	7,5%	6,0	4,0
$DTT_3_{95\%}$	6,5%	5,0	3,0

Fonte: PRODIST MODULO 8 (2021).

Os limites correspondem ao máximo valor almejado a ser observado no sistema de distribuição. É importante observar que o PRODIST MODULO 8 ainda não estabelece limites para as distorções harmônicas totais de corrente, somente para distorção harmônica de tensão.

Em medições realizadas utilizando o secundário de TPs com ligação do tipo V ou delta aberto, os valores limites permitidos para o indicador $DTT_{395\%}$ deverão corresponder a 50% dos respectivos valores indicados na **Tabela 3.2** (PRODIST MODULO 8, 2021).

Os responsáveis pela implantação de quaisquer equipamentos na rede básica precisarão seguir o determinado nos Procedimentos de Rede ou em regulamentação específica.

2.4.2 IEEE STD. - 519-2014

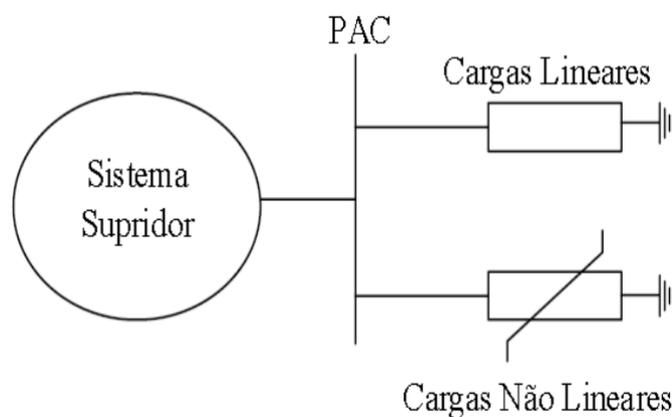
A norma IEEE STD. 519 de 2014 é conceituada como "práticas recomendadas e requisitos da norma para o controle de harmônicos em sistemas elétricos de potência". A característica desta norma é a determinação dos valores limites para ambos, não só a distorção

da tensão fornecida pela concessionária distribuidora, mas também a corrente de carga do consumidor (IEEE STD. 519, 2014).

Limites de harmônicas da norma IEEE 519 – 2014 foram estabelecidas para o PCC entre a concessionária e vários consumidores. A Figura 2.9 mostra um exemplo de uma configuração de forma geral de um sistema elétrico visto a partir do ponto de acoplamento comum entre a concessionária de energia elétrica e a unidade consumidora. Nesta figura, a unidade consumidora é representada por cargas lineares e não-lineares, enquanto o sistema da concessionária de energia elétrica, é representada de forma simplificada através de um complexo não detalhado que inclui suas partes fundamentais. São elas: geração, transmissão, distribuição, outros consumidores etc.

Analisando o nível de distorção de tensão (THD) no PCC, a concessionária é responsável por manter a qualidade da forma de onda de tensão no PCC, abaixo dos valores limites máximos em regime permanente apresentados na **Tabela 2.3**.

Figura 2.8 - Ponto de acoplamento comum (PAC).



Fonte:

<http://200.19.146.153/bitstream/123456789/14588/1/contribuicaoprocessocompartilhamento.pdf>.(2018).

Estes limites devem ser cumpridos para a pior condição de operação do sistema com duração maior que uma hora. Para períodos de curto prazo, durante as condições iniciais ou transitórias, esses limites podem ser ultrapassados em 50%. Os limites de distorção de corrente dependem da relação que existe entre a carga do consumidor (IL) e a corrente de curto-circuito (Isc) no PCC. Um elevado I_{sc}/I_L significa que o sistema admiti níveis de distorção harmônica mais elevados (IEEE STD. 519, 2014).

Utiliza-se o indicador de distorção harmônica de demanda total (TDD) para analisar os limites de distorção harmônica de corrente. O Indicador TDD pode ser calculado pela razão

entre a raiz quadrada da média quadrática do conteúdo harmônico, ponderando as componentes harmônicas até a ordem 50 e excluindo as inter-harmônicas, expressas como uma percentagem da corrente de máxima de demanda, expressa pela Eq. (2.51) (IEEE STD. 519, 2014).

Tabela 2.4 - Limite de distorção de tensão.

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

Fonte: IEEE STD. 519 (2014).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h}}{I_1} \times 100 \quad (2.12)$$

Os limites de distorção harmônica de corrente são apresentados na **Tabela 2.5**.

Tabela 2.5 - Limites de distorção de corrente para sistemas de 120V a 69kV.

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

Fonte: IEEE STD. 519 (2014).

Sendo:

I_{sc} - é a corrente de fase do curto-circuito trifásico no PCC;

I_L - é a corrente máxima de demanda do consumidor calculada como a média das registradas nos últimos 12 meses.

2.4.3 EN 50160 - Power Quality Standard

A norma europeia EN 50160 determina parâmetros de qualidade de energia no PCC, indicando os desvios aceitáveis. Relativamente aos harmônicos de tensão, por um período de uma semana, 95% dos valores eficazes de cada harmônico de tensão (valores médios em cada 10 minutos), não devem exceder os valores limites indicados na **Tabela 2.6** (EN 50160, 2004).

Tabela 2.6 - Valores de cada harmônico de tensão.

Harmônicos ímpares				Harmônicos Pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem	% da tensão nominal	Ordem	% da tensão nominal	Ordem	% da tensão nominal
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6 até 24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				
DHTt < 8%					

Fonte: EN 50160 (2004).

2.4.4 Norma IEC 61000-3-6 de Compatibilidade Eletromagnética

A norma IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 61000-3-6, 2008) da série 61000 da IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) determina os valores limites de harmônicos para as cargas conectadas nos sistemas elétricos de potência. Para a tensão elétrica esta norma define (LEITE, 2013):

- a) A Distorção Harmônica Total de Tensão (%THDV). Calculada como a relação entre a tensão rms dos harmônicos superiores considerados e a tensão fundamental (V_1), apresentado na Eq. (2.12) (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

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

- b) A Distorção Harmônica Individual de tensão de ordem h (%IHDVh). Calculada como a relação entre a tensão de um harmônico individual (V_h) e a tensão fundamental de acordo com a Eq. (2.13) abaixo (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

$$\%IHDV_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.14)$$

A referência (IEC/TR 61000-3-6, 2008) estabelece dois tipos de limites: (1) níveis de compatibilidade como é mostrado na **Tabela 2.6**, e (2) níveis de planejamento, como apresentado na **Tabela 2.7**. Quando as correntes harmônicas geradas por cargas não lineares não ultrapassam os valores limites de compatibilidade estabelecidos, garante-se uma boa qualidade de energia. De outra forma, os valores limites de planejamento (mais restritivos que os de compatibilidade) são adotados como roteiros para o planejamento do sistema e os mesmos garantem o cumprimento dos valores limites de compatibilidade (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

Tabela 2.7 - Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de baixa tensão (BT) e média tensão (MT).

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

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

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

- a) Os efeitos de regime permanente são referidos a aquecimento em capacitores, cabos, transformadores, motores e o outros, e são medidos em média a intervalo de 10 minutos (IEC/TR 61000-3-6, 2008);
- b) Os efeitos a curto período de tempo são os que se manifestam em equipamentos eletrônicos sensíveis aos valores limites de harmônicos, e com intervalo para registro a faixa de 3 segundos ou menos (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

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

Segundo LEITE (2013), os limites de compatibilidade da **Tabela 2.6** e de planejamento da **Tabela 2.7** para as tensões harmônicas individuais são válidos para harmônicos estacionários. Estes limites devem ser modificados pelo fator K_{hvs} para ser utilizados com harmônicos de curta duração conforme Eq. (2.14).

$$K_{hvs} = 1.3 + 0.7 \frac{h-5}{45} \quad (2.15)$$

Tabela 2.8 - Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média (MT), alta (AT) e extra-alta tensão (EHT).

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

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

De acordo com LEITE (2013), esta norma não determina expressamente valores limites para a distorção harmônica de corrente no PCC, entretanto, a mesma considera a casualidade de converter os valores limites de distorção harmônica de tensão em limites de distorção harmônica de corrente ao utilizar a impedância em frequências harmônicas do sistema externo de energia.

2.5 TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

Nesta seção serão abordadas as técnicas de inteligência computacional utilizadas para realização das análises dos dados coletados neste trabalho.

2.5.1 Árvore de Decisão

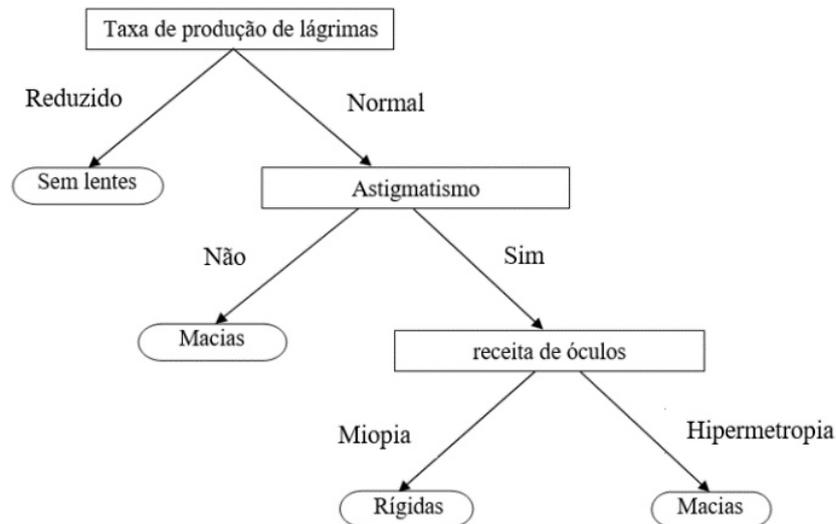
Segundo (CHEN et al, 2019), a técnica de Árvore de Decisão é um tipo de algoritmo de aprendizado supervisionado que é usado principalmente em problemas de classificação sem nenhuma suposição prévia colocada nos dados, e este algoritmo possui uma estrutura de árvore semelhante a um fluxograma, onde cada nó interno denota um teste em um atributo, cada ramo representa um resultado do teste e os nós folha representam classes ou distribuições de classes. Comparado a outros algoritmos de aprendizado, as árvores de decisão apresentam algumas vantagens, como serem robustas ao ruído, baixo custo computacional na construção dos modelos classificadores, capacidade de lidar com atributos repetitivos e excluir recursos desnecessários.

Duas metodologias diferentes podem ser distinguidas dentro da árvore de decisão: árvores de classificação e árvores de regressão. Segundo (RODRIGUEZ-GALIANO et al, 2015), o algoritmo de aprendizagem da técnica de árvore de decisão é executado da seguinte forma: (a) Para induzir a DT, o particionamento recursivo e as regressões múltiplas são realizadas a partir do conjunto de dados, (b) A partir do nó raiz, o processo de divisão de dados em cada nó interno de uma regra da árvore é repetido até que uma condição de parada previamente especificada seja atingida, (c) Cada um dos nós terminais, ou folhas, tem anexado a ele um modelo de regressão simples que se aplica apenas a esse nó, (d) Terminado o processo de indução da árvore, pode-se fazer a poda com o objetivo de melhorar a capacidade de generalização da árvore reduzindo sua complexidade estrutural. O número de casos em nós pode ser considerado como critério de remoção.

A Fig1 abaixo descreve um exemplo de árvore de decisão projetada para classificação, obtida executando o algoritmo J48 (C4.5) no conjunto de dados Weka "lentes de contato",

considera se o paciente deve usar lentes de contato rígidas, macias ou sem lentes de contato. Os nós internos (teste de atributos) são referidos como retângulos, embora os nós folha sejam indicados como círculos.

Figura 2.9 - Um exemplo de árvore de decisão: Atributos {Taxa de produção de lágrimas, Astigmatismo, receita de óculos}, Classes {Nenhum, Rígida, Macia}



2.5.2 Regressão Linear

A regressão linear é uma técnica de análise de dados utilizada para modelar a relação entre diversas variáveis (variáveis independentes) e uma variável de resultado (variável dependente). Um modelo de regressão linear é um modelo probabilístico que leva em conta a aleatoriedade que pode afetar um determinado resultado. Dependendo dos valores de entrada conhecidos anteriormente, um modelo de regressão linear prevê um valor para a variável dependente (resultado) (SEDKAOUI AND KHELFAOUI, 2020).

A análise de regressão é utilizada para determinar a relação de causa e efeito entre duas ou mais variáveis e pode variar de acordo com os níveis de medição da variável dependente, e a análise de regressão linear é usada se o tipo de variável dependente for quantitativa e houver uma relação linear entre a variável dependente e a(s) variável(eis) independente(s). A análise de regressão aplicada é denominada Análise de Regressão Linear Simples se o número de variáveis independentes for uma e Análise de Regressão Linear Múltipla quando houver mais de uma (YASAR et al, 2019) e (LI et al, 2019).

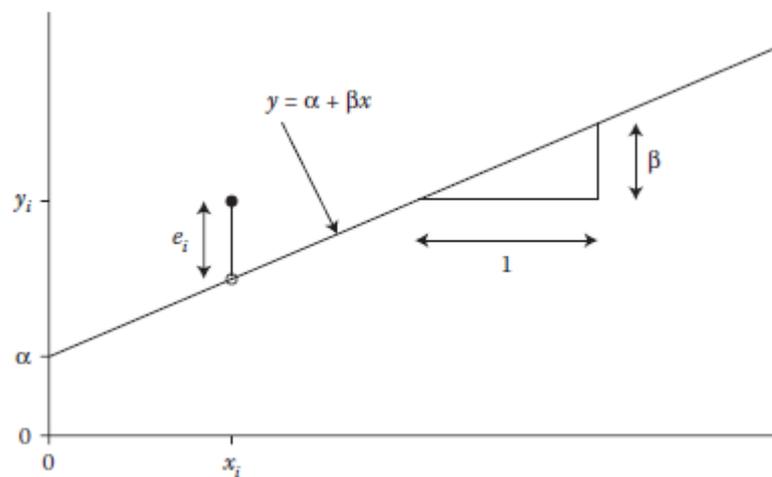
Segundo WELHAM *et al.* (2015), o modelo de regressão linear simples é utilizado para descrever a relação entre uma variável de resposta (y_i) e uma variável explicativa quantitativa

(x_i) e assume a forma de uma reta passando pela dispersão de pontos que surgem quando os valores da variável de resposta são plotados em relação aos valores da variável explicativa. Este modelo pode ser representado pela Eq. (2.15).

$$y_i = \alpha + \beta x_i + e_i \quad (2.16)$$

Onde y_i e x_i são os valores da resposta e as variáveis explicativas, respectivamente, para a i -ésima observação. A quantidade e_i representa um desvio aleatório para a i -ésima observação, as vezes chamado de erro residual, e o subíndice i varia de 1 a N , onde N é o número total de observações. O modelo é uma reta definida em termos dos parâmetros α e β , sendo que o parâmetro α é denominado de parâmetro de interceptação, que corresponde ao ponto em que a reta intercepta o eixo y quando x_i é igual a 0 (zero), e o parâmetro β é denominado de coeficiente da variação explicativa, é a inclinação da reta, isto é, a mudança na resposta produzida por uma mudança de unidade na variável explicativa. O modelo de regressão linear simples é chamado de simples, pois contém uma única variável explicativa, e, linear pois a resposta é expressa em uma forma linear, isto é, como uma soma de termos que cada um consiste de um coeficiente multiplicado por uma variável explicativa. A **Figura 4.5** ilustra com detalhes o modelo de regressão linear simples (WELHAM *et al.*, 2015).

Figura 2.10 – Modelo de regressão linear simples.



Fonte: WELHAM *et al.* (2015)

Segundo SICHANI e KHALAFINEJAD (2011), o método mais comum para encontrar a reta de regressão é o mínimo de quadrados. Este método calcula a reta de melhor ajuste para os dados observados, minimizando a soma dos quadrados das distâncias verticais de cada ponto para a reta, como ilustrado na figura 2.10.

A soma dos quadrados dessas distâncias pode então ser escrita como:

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \quad (2.17)$$

Os valores de α e β que minimizam $S(\alpha, \beta)$ são dados:

$$\hat{\beta} = \frac{\sum (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.18)$$

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} \quad (2.19)$$

Os parâmetros $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$ são chamadas estimativas de mínimos quadrados de α e β pois eles são a solução para o método dos mínimos quadrados, a intercepção e a inclinação da reta que tem a menor soma possível de quadrados das distâncias verticais de cada ponto para a reta. Por esta razão, esta reta é chamada de reta de regressão de mínimos quadrados (LOFTUS, 2022).

Após construir o modelo de regressão através da aplicação da regressão linear simples, é essencial avaliar esse modelo por meio da análise da variância, de tal maneira a garantir se o modelo de regressão construído é adequado para explicar a relação entre a variável dependente e as variáveis independentes.

A análise de variância é um instrumento de estatística que, por meio de técnicas da inferência estatística, analisa duas proposições principais: a proposição nula, que significa a possibilidade do parâmetro β (inclinação da reta) ser nulo; e a suposição alternativa, que significa a possibilidade desse mesmo parâmetro não ser nulo (MATLOFF, 2017).

Segundo (LOFTUS, 2022), na análise de variância, são obtidos três parâmetros essenciais: a soma de quadrados total (SS_{Total}), a soma de quadrados de erro (SS_{Res}) e a soma de quadrados de regressão (SS_{Reg}). Esses parâmetros são calculados por meio das Eqs. (2.19), (2.20) e (2.21), respectivamente.

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.20)$$

$$SS_{Reg} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.21)$$

$$SS_{Res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.22)$$

Em que:

- \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.

De posse desses três parâmetros, SS_{Total} , SS_{Res} , SS_{Reg} , pode-se calcular o valor do indicador de confiabilidade do modelo construído, denominado como coeficiente de determinação R^2 . De acordo com RAWLINGS *et al.* (2001), o coeficiente de determinação R^2 é a proporção da soma total dos quadrados da variável dependente pelas variáveis independentes no modelo, conforme a Eq. (2.22). Com base no valor do coeficiente de determinação R^2 , pode-se rejeitar ou não o modelo de regressão.

$$R^2 = \frac{SS_{Reg}}{SS_{Total}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{SS_{Res}}{SS_{Total}} \quad (2.23)$$

No capítulo seguinte serão apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento desta dissertação.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta nesta dissertação se baseia na realização de um estudo comparativo de uma análise de correlação de dados, utilizando as técnicas de Árvore de decisão e Regressão linear, de tal maneira a extrair um modelo de árvore de regressão e modelo de regressão linear que descreva a relação existente entre a corrente harmônica de uma carga não linear (fonte geradora de corrente harmônicas) e a tensão harmônica no PCC da rede elétrica que se deseja analisar, e, deste modo, propicia um melhor diagnóstico da influência da carga não linear no nível de distorção harmônica da tensão do ponto em análise. Estes modelos são construídos com base nas medições do valor rms das tensões e correntes harmônicas obtidas em campo com analisadores de qualidade de energia elétrica, portanto 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. O equipamento aplicado para realizar as campanhas de medições em campo foi o analisador de qualidade de energia elétrica HIOKI MODELO PW3198, que será abordado com mais detalhes nos subtópicos posteriores. As técnicas utilizadas na metodologia desta dissertação são a técnica árvore de decisão que possui como característica a construção de modelos não – paramétricos e a técnica de regressão linear que possui como característica a construção de modelos paramétricos e cálculo matemático simples, de fácil interpretação e análise de dados.

Uma árvore de decisão é um método baseado em árvore em que cada caminho começando no nó raiz representa uma sequência de divisão de dados até que um resultado booleano seja alcançado no nó folha, onde cada caminho na árvore de decisão é uma regra de decisão que pode ser facilmente traduzida em linguagens humanas ou linguagens de programação.

Uma árvore de regressão (um tipo de técnica de aprendizado supervisionado) é um modelo de predição, o qual é estruturado em árvore, para um dado objetivo numérico caracterizado por um vetor de atributos também numéricos. A árvore de regressão é uma categoria da árvore de decisão, portanto, ela é treinada e testada usando o algoritmo chamado de Classification and Regression Tree (CART).

A técnica regressão linear simples, possui como característica a construção de modelos paramétricos e cálculo matemático simples. Como abordado anteriormente a técnica regressão linear simples é utilizada para descrever a relação entre uma variável de resposta (y_i) e uma variável explicativa quantitativa (x_i) e assume a forma de uma reta passando pela dispersão de pontos que surgem quando os valores da variável de resposta são plotados em relação aos valores da variável explicativa.

O indicador de confiabilidade do modelo construído é coeficiente de determinação R^2 . O coeficiente de determinação R^2 é a proporção da soma total dos quadrados da variável dependente pelas variáveis independentes no modelo, conforme a Eq. (4.25). De acordo com valor do coeficiente de determinação R^2 , pode-se rejeitar ou não o modelo de regressão construído. A intensidade de correlação associada ao valor de R^2 é apresentada na **Tabela 3.1** abaixo.

Tabela 3.1 - Intensidade de correlação R^2 .

Valor R^2	Intensidade de correlação
0,00	Nula
(0,00 – 0,09)	Baixa
0,09 – 0,36)	Moderada
(0,36 – 0,81)	Alta
(0,81 – 0,98)	Muito Alta
1,00	Perfeita

Fonte: MATOS (2016).

A utilização das técnicas de árvore de decisão e regressão linear se justifica pela simplicidade e fácil interpretação computacional na criação dos modelos, uma vez que a simplicidade de tais modelos ajuda a garantir que os modelos de regressão construídos sejam fáceis de interpretar, obtendo assim um tempo de resposta mais rápido.

Os modelos de regressão resultantes da aplicação das técnicas de árvore de regressão e regressão linear nas tensões e correntes harmônicas medidas foram construídos através do software AAQEE, que será abordado no próximo subtópico.

A metodologia consiste em comparar os resultados das análises dos impactos harmônicos realizadas pelas duas técnicas conforme texto acima, tanto qualitativamente quanto quantitativamente, porém somente a análise qualitativa não é suficiente, é necessário quantificar a contribuição harmônica de cada cliente ou alimentador do sistema elétrico analisado, pois

provavelmente todos os clientes ou alimentadores do sistema elétrico em análise apresentaram contribuição para as distorções de tensão harmônica no ponto ou barra do sistema elétrico analisado.

As técnicas utilizadas, nesta dissertação foram aplicadas em três estudos de casos de tal maneira a mostrar a validade de suas aplicações em solucionar problemas que buscam investigar a relação de dependência entre duas variáveis.

3.1.1

3.2 Software AAQEE

O software AAQEE é uma ferramenta de mineração de dados dedicada para análise de qualidade de energia elétrica (QEE) capaz de estimar o grau do impacto harmônico individual de consumidores industriais nas redes de distribuição de energia elétrica, utilizando medições simultâneas de tensões, correntes e potências harmônicas, bem como técnicas de inteligência computacional. Com o mesmo, é possível realizar análises gráficas dos dados de grandezas elétricas obtidos de campanhas de medição por analisadores de QEE, calculando os respectivos indicadores de QEE estabelecidos pelo PRODIST2021, como também apresenta a funcionalidade de cálculo de impactos harmônicos provocados pelas unidades consumidoras na rede de distribuição da concessionária.

3.3 - Analisador de Qualidade de Energia Elétrica HIOKI PW 3198

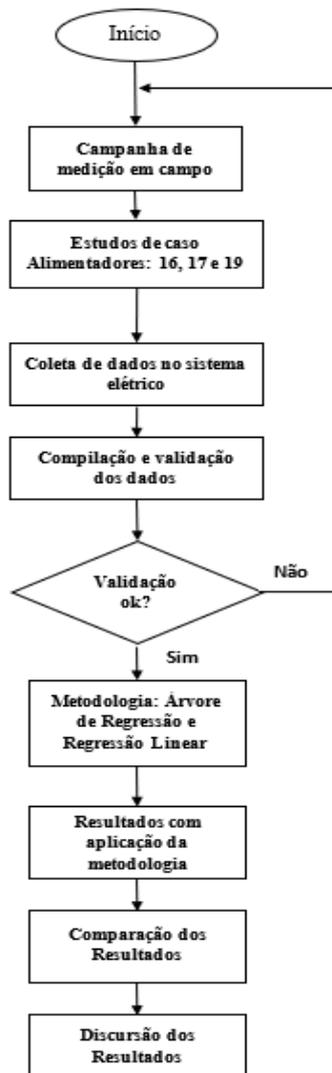
O analisador de qualidade de energia PW3198 é um instrumento analítico para monitoração e gravação de anomalias no fornecimento de energia elétrica, permitindo investigar rapidamente as causas. Este equipamento pode ser aplicado para analisar problemas durante o fornecimento de energia elétrica, como por exemplo: queda de tensão, flutuações, harmônicos, etc.

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

3.4 – FLUXOGRAMA DA PESQUISA

A estrutura geral da pesquisa como mostra a Figura 3.1 define as etapas a serem seguidas de acordo com metodologia adotada para a mesma, o escopo do trabalho e a estrutura da revisão bibliográfica.

Figura 3.1 – Fluxograma da pesquisa.



No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação das técnicas de regressão linear simples e árvore de decisão para avaliação de impactos harmônicos em redes elétricas.

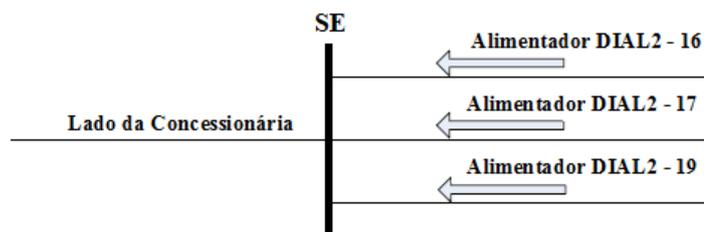
CAPÍTULO 4

4. APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REGRESSÃO LINEAR E ÁRVORE DE DECISÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados das aplicações técnicas Regressão Linear Simples e Árvore de Decisão através de estudos de casos.

Os estudos de casos foram realizados no sistema elétrico de uma concessionária de energia elétrica, que por motivos de ética não será mencionado seu nome. De maneira a avaliar a metodologia proposta anteriormente, realizou-se um estudo em três alimentadores e um barramento do sistema elétrico de tal forma a determinar a influência de algumas cargas não lineares na distorção harmônica de tensão do barramento em estudo, como ilustrado na **Figura 4.1**.

Figura 4.1 - Identificação do impacto harmônico de cada alimentador em um barramento comum em uma subestação.



Durante os estudos no sistema, obtiveram-se medições de tensões e correntes harmônicas em pontos estratégicos do sistema, o que permitiu a construção de modelos de regressão que apresentassem a relação existente entre essas grandezas.

As análises foram realizadas através de uma campanha de medição em campo realizada no período de 15 de maio de 2017 à 22 de maio de 2017 em uma subestação do Distrito Industrial de nível de tensão 13.8 kV, no qual instalaram-se 4 analisadores de QEE modelo PW 3198 da HIOKI para a realização de medições simultâneas, nos seguintes pontos de medição: transformador DITF4-04; e alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19. O anexo A mostra o diagrama unifilar da subestação do Distrito Industrial e a localização dos pontos de instalação dos analisadores de qualidade de energia (pontos com círculo em azul), para esta campanha de medição, totalizando 4 pontos de medição simultânea. O objetivo da instalação

do analisador de QEE no transformador DITF4-04 é monitorar a tensão harmônica na barra DIBR2-03 (em círculo verde).

Essas análises buscaram avaliar a correlação existente entre as correntes harmônicas de ordem 3ª, 5ª e 7ª dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19, e as tensões harmônicas de mesma ordem na barra DIBR2-03 (13.8 kV) dessa subestação e abrangendo assim as três sequências, zero (3ª), negativa (5ª) e positiva (7ª). Estes alimentadores atendem a empresas que possuem grandes quantidades de cargas não lineares instaladas, como por exemplo, máquinas CNC, fornos a arco elétrico, máquinas injetoras de plástico e alumínio e outras, portanto, grandes fontes de harmônicas.

4.1 – APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE REGRESSÃO LINEAR

4.1.1 - Estudo de caso 1: Impacto do 3ª harmônico

Com base nos dados de medição em campo, a **Tabelas** 4.1 apresenta o impacto percentual da corrente harmônica de 3ª ordem na barra DIBR2 – 03 das fases A, B e C dos alimentadores DIAL2 – 16, DIAL2 – 17 e DIAL2 – 19 respectivamente em relação ao background (VBG – alimentadores não medidos) usando a técnica de regressão linear.

Analisando os valores da métrica R^2 do alimentador DIAL2 – 16, observa-se que as fases A e B apresentam alta intensidade de correlação e baixa intensidade de correlação na fase C cujo R^2 é de 0,043. A **Tabela** 4.1 indica que a fase A é responsável por cerca de 37% do impacto de distorção harmônica de tensão na barra DIBR2 – 03 causado pelas correntes harmônicas injetadas no alimentador DIAL2 – 16 em relação ao VBG, a fase B é responsável por cerca de 100% em relação ao VBG e a fase C é responsável por cerca de 12% em relação ao VBG. Os modelos de regressão linear simples entre as correntes harmônicas de 3º ordem e tensão de mesma ordem harmônica da barra DIBR2-03, nas fases A, B e C do alimentador DIAL2 – 16 estão ilustrados nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente.

Tabela 4.1 - Patamar de carga, coeficiente de determinação e fator de impacto dos DIAL2 – 16, DIAL2 – 17 e DIAL2 – 19.

Patamar de Carga - Manhã e Tarde			
HORÁRIO INÍCIO		HORÁRIO FIM	
00:00:00		14:00:00	
R^2			
ALIMENTADORES	FASE	FASE B	FASE C
DIAL2 – 16	00,526	00,385	00,043
DIAL2 – 17	00,009	00,165	00,561
DIAL2 – 19	00,755	00,009	00,438
Fator de Impacto (%)			

BASE	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2 – 16	37,225	104,527	12,367
VBG-16	62,775	-04,527	87,633
DIAL2 – 17	05,784	41,570	28,812
VBG-17	94,216	58,430	71,188
DIAL2 – 19	59,494	10,680	73,474
VBG-19	40,506	89,320	26,526

Figura 4.2 - 3ª harmônica da FASE A, $R^2 = 0,526$

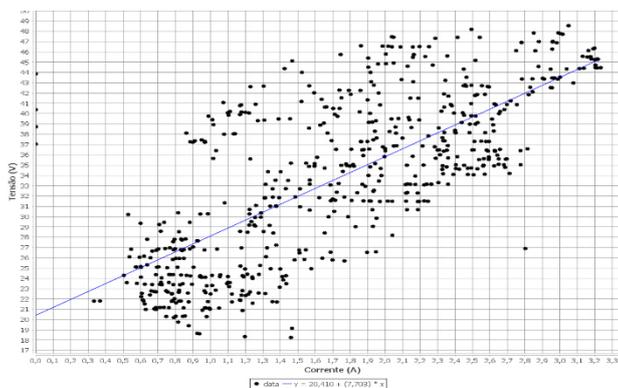


Figura 4.3 - 3ª harmônica da FASE B, $R^2 = 0,385$.

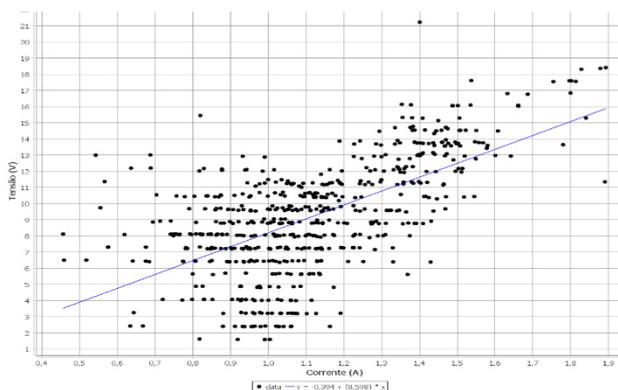
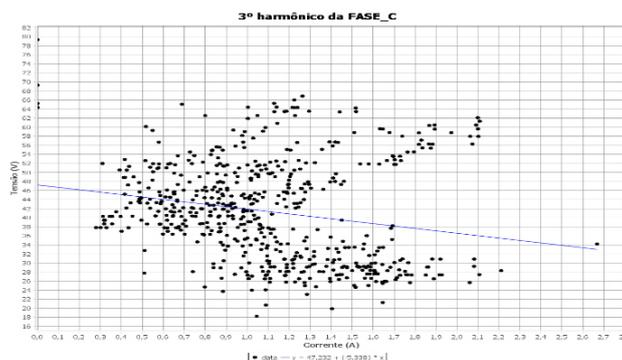


Figura 4.4 - 3ª harmônica da FASE C, $R^2 = 0,043$.



Analisando os valores da métrica R^2 do alimentador DIAL2 – 17, observa-se que a fase A tem baixa intensidade de correlação, fase B apresenta intensidade de correlação moderada e na fase C apresenta alta intensidade de correlação cujo R^2 é de 0,561. A **Tabela 2.9** indica que a fase A é responsável por cerca de 5% do impacto de distorção harmônica de tensão na barra DIBR2 – 03 causado pelas correntes harmônicas injetadas no alimentador DIAL2 – 17 em relação ao VBG, a fase B é responsável por cerca de 41% em relação ao VBG e a fase C é responsável por cerca de 28% em relação ao VBG.

Os modelos de regressão linear simples entre as correntes harmônicas de 3º ordem e tensão de mesma ordem harmônica da barra DIBR2-03, nas fases A, B e C do alimentador DIAL2 – 17 estão ilustrados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente.

Figura 4.5 - 3ª harmônico FASE A, $R^2 = 0,009$.

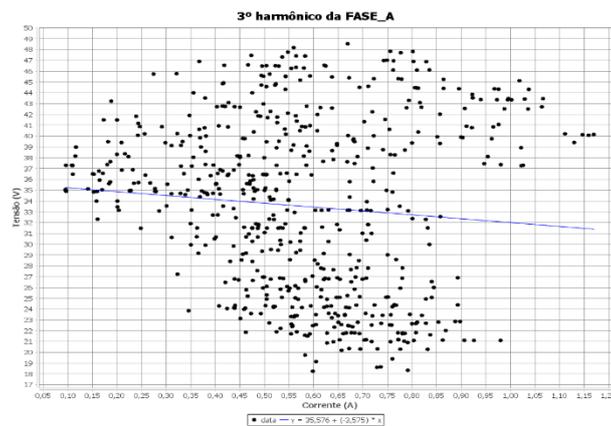


Figura 4.6 - 3ª harmônico FASE B, $R^2 = 0,165$.

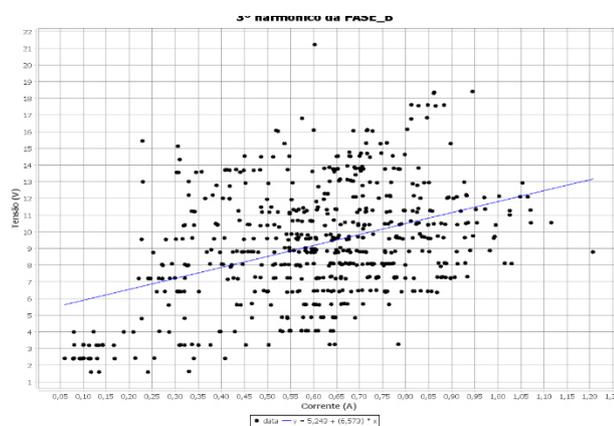
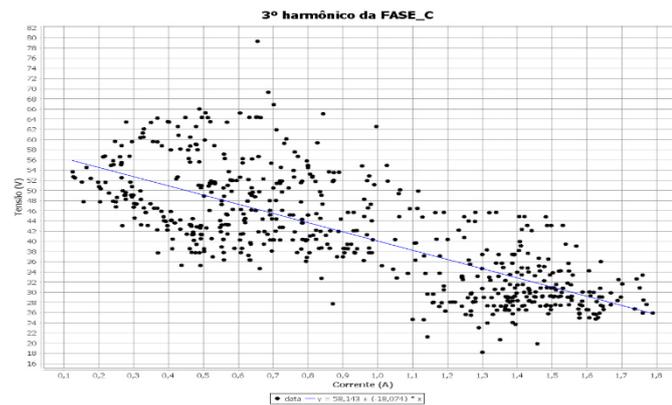


Figura 4.7 - 3ª harmônico FASE C, $R^2 = 0,561$.



Conforme a **Figura 4.7** a contribuição da fase C é negativa, o que significa que a corrente harmônica injetada na fase C ajudará a reduzir os níveis de distorção de tensão na barra DIBR2 - 03. É importante observar, no entanto, que os resultados são derivados da análise de regressão linear e há uma margem de erro. É mais prudente concluir que a fase C do alimentador DIAL2 – 17 tem impacto insignificante nos níveis de distorção de tensão na barra DIBR2 - 03. E analisando a **Figura 4.5**, o impacto da fase A também é insignificante.

Analisando os valores da métrica R^2 do alimentador DIAL2 – 19, observa-se que a fases A tem intensidade de correlação alta cujo R^2 é de 0,755, a fase B apresenta intensidade de correlação baixa e a fase C apresenta intensidade de correlação alta tal qual R^2 é de 0,438. A **Tabela 2.9** indica que a fase A é responsável por cerca de 59% do impacto de distorção harmônica de tensão na barra DIBR2 – 03 causado pelas correntes harmônicas injetadas no alimentador DIAL2 – 19 em relação ao VBG, a fase B é responsável por cerca de 10% em relação ao VBG e a fase C é responsável por cerca de 73% em relação ao VBG.

Os modelos de regressão linear simples entre as correntes harmônicas de 3ª ordem e tensão de mesma ordem harmônica da barra DIBR2-03, nas fases A, B e C do alimentador DIAL2 – 19 estão ilustrados nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, respectivamente.

Figura 4.8 - 3ª harmônico da FASE A, $R^2 = 0,755$

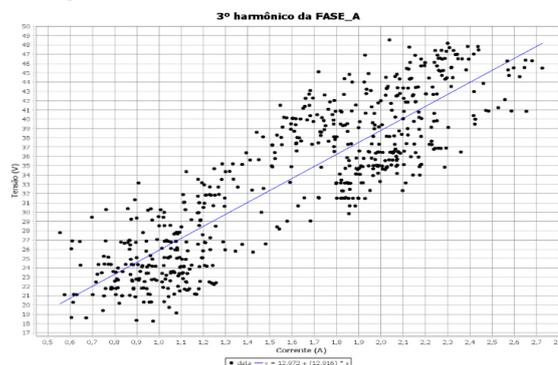


Figura 4.9 - 3ª harmônico da FASE B, $R^2 = 0,009$.

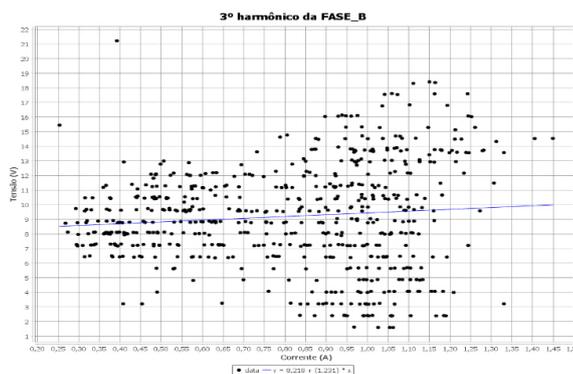
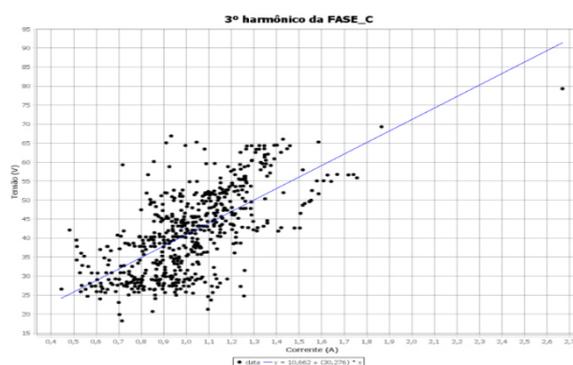


Figura 4.10 - 3ª harmônico da FASE C, $R^2 = 0,438$.



4.1.2 Estudo de caso 2: Impacto do 5ª Harmônico

Com base nos dados de medição em campo, a **Tabela 4.2** apresenta o impacto percentual da corrente harmônica de 5ª ordem na barra DIBR2 – 03 das fases A, B e C dos alimentadores DIAL2 – 16, DIAL2 – 17 e DIAL2 – 19 respectivamente em relação ao background (VBG – alimentadores não medidos) usando a técnica de regressão linear.

Analisando os valores da métrica R^2 do alimentador DIAL2 – 16, observa-se que as fases A e C apresentam intensidade correlação nula e intensidade de correlação muito alta na fase B cujo R^2 é de 0,875. A **Tabela 4.2** indica que a fase B é responsável por cerca de 72% do impacto de distorção harmônica de tensão na barra DIBR2 – 03 causado pelas correntes harmônicas injetadas no alimentador DIAL2 – 16 em relação ao VBG e os impactos das fases A e C são baixos próximos de zero. Os modelos de regressão linear simples entre as correntes harmônicas de 5ª ordem e tensão de mesma ordem harmônica da barra DIBR2-03, nas fases A, B e C estão ilustrados nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13, respectivamente.

Tabela 4.2 - Patamar de carga, coeficiente de determinação e fator de impacto dos DIAL2 – 16, DIAL2 – 17 e DIAL2 – 19.

Patamar de Carga - Manhã e Tarde			
HORÁRIO INICIO		HORÁRIO FIM	
00:00:00		14:00:00	
R^2			
ALIMENTADORES	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2 – 16	00,000	00,875	00,000
DIAL2 – 17	00,857	00,903	00,873
DIAL2 – 19	00,034	00,192	00,075
Fator de Impacto (%)			
BASE	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2 – 16	00,575	72,239	00,619
VBG-16	99,425	27,761	99,381
DIAL2 – 17	77,224	101,140	73,759
VBG-17	22,776	-01,140	26,241
DIAL2 – 19	24,746	36,609	24,038
VBG-19	75,254	63,391	75,962

Figura 4.11 - 5ª harmônico da FASE A, $R^2 = 0$

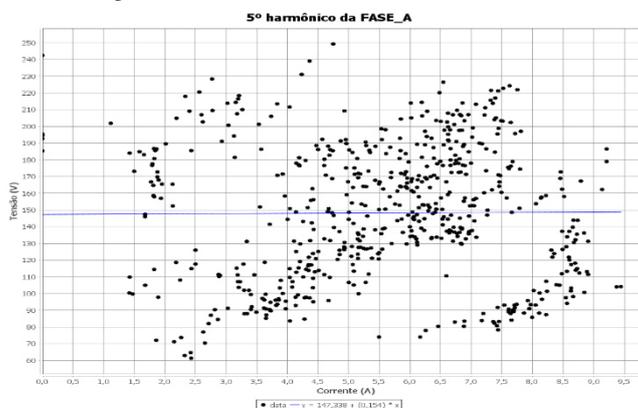


Figura 4.12 - 5ª harmônico da FASE B, $R^2 = 0,875$.

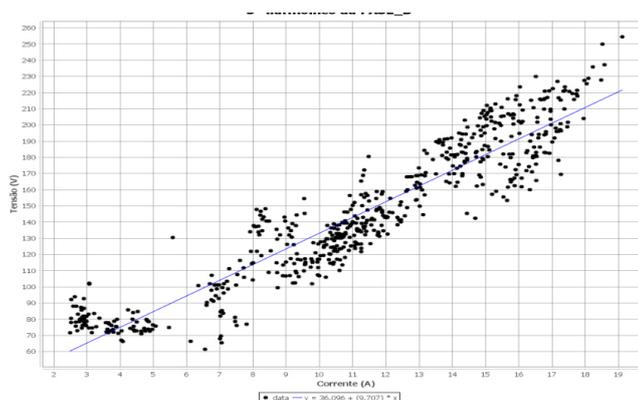
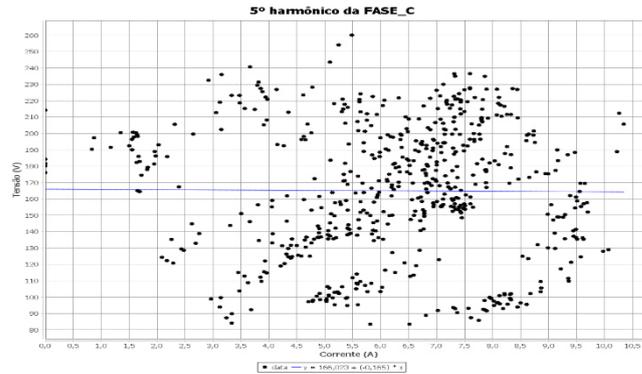


Figura 4.13 - 5ª harmônico da FASE C, $R^2 = 0$.



Analisando os valores da métrica R^2 do alimentador DIAL2 – 17, observa-se que as fases A, B e C apresentam intensidade de correlação muito alta, cujo os R^2 são 0,857; 0,903 e 0,873 respectivamente. A **Tabela 2.10** indica que a fase A é responsável por cerca de 77% do impacto de distorção harmônica de tensão na barra DIBR2 – 03 causado pelas correntes harmônicas injetadas no alimentador DIAL2 – 17 em relação ao VBG, a fase B é responsável por cerca de 100% em relação ao VBG e a fase C é responsável por cerca de 73% em relação ao VBG.

Os modelos de regressão linear simples entre as correntes harmônicas de 5ª ordem e tensão de mesma ordem harmônica da barra DIBR2-03, nas fases A, B e C estão ilustrados nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, respectivamente.

Figura 4.14 - 5ª harmônico da FASE A, $R^2 = 0,857$

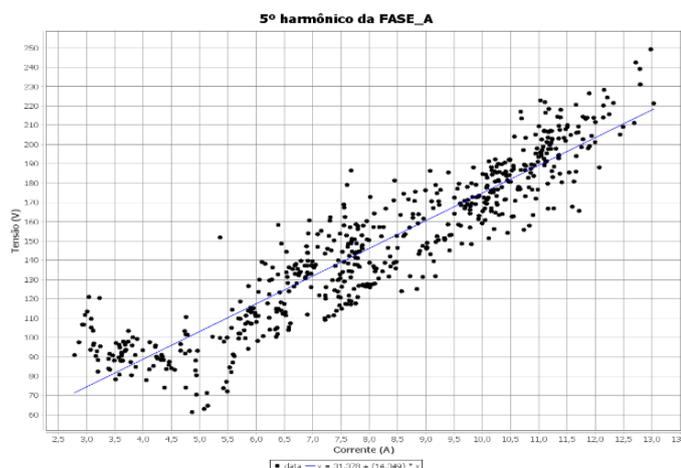


Figura 4.15 - 5ª harmônico da FASE B, $R^2 = 0,903$.

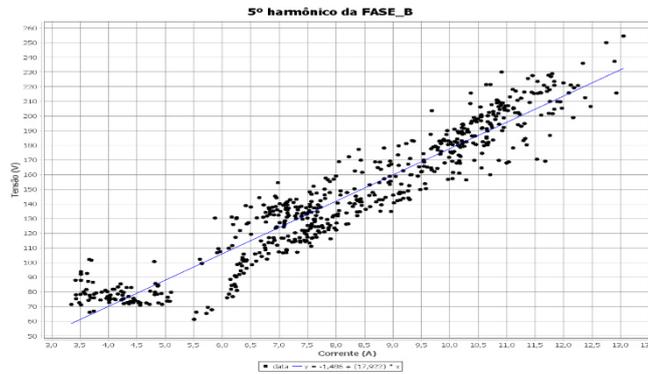
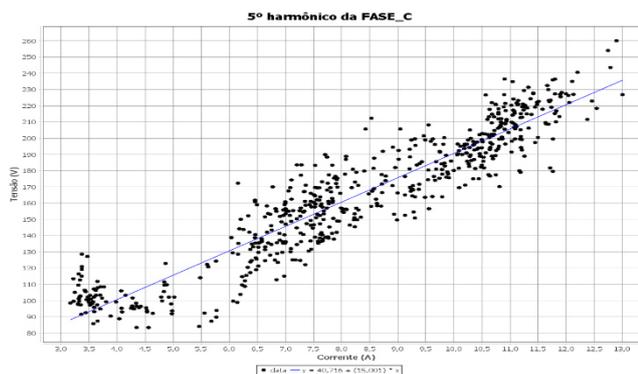


Figura 4.16 - 5ª harmônico da FASE C, $R^2 = 0,873$.



Analisando os valores da métrica R^2 do alimentador DIAL2 – 19, observa-se que as fases A e C apresentam baixa intensidade de correlação, a fase B apresenta intensidade de correlação moderada cujo R^2 é de 0,192. A **Tabela 2.10** indica que a fase A é responsável por cerca de 24% do impacto de distorção harmônica de tensão na barra DIBR2 – 03 causado pelas correntes harmônicas injetadas no alimentador DIAL2 – 19 em relação ao VBG, a fase B é responsável por cerca de 36% em relação ao VBG e a fase C é responsável por cerca de 24% em relação ao VBG.

Os modelos de regressão linear simples entre as correntes harmônicas de 5ª ordem e tensão de mesma ordem harmônica da barra DIBR2-03, nas fases A, B e C estão ilustrados nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19, respectivamente.

Figura 4.17 - 5ª harmônico da FASE A, $R^2 = 0,034$.

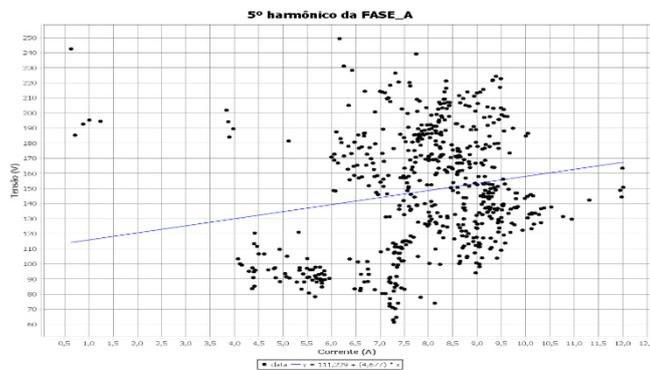


Figura 4.18 - 5ª harmônico da FASE B, $R^2 = 0,192$

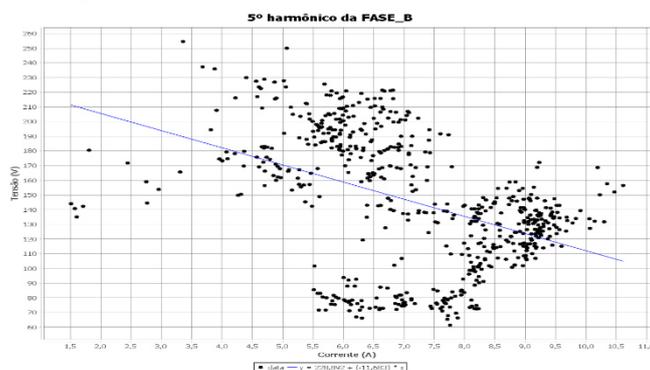
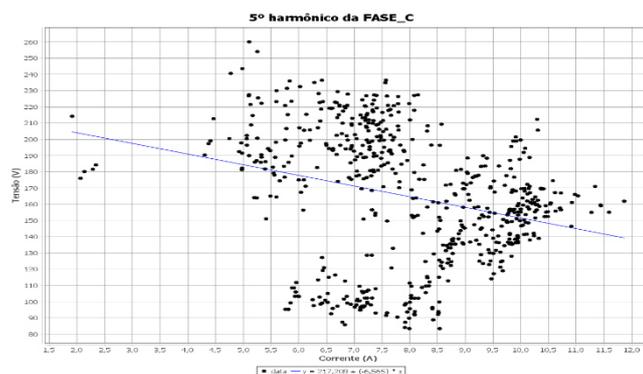


Figura 4.19 - 5ª harmônica da FASE C, $R^2 = 0,075$.



Conforme a **Figura 4.18** a contribuição da fase B é negativa, o que significa que a corrente harmônica injetada na fase B ajudará a reduzir os níveis de distorção de tensão na barra DIBR2 - 03. É importante observar, no entanto, que os resultados são derivados da análise de regressão linear e há uma margem de erro. É mais prudente concluir que a fase B do alimentador DIAL2 – 19 tem impacto insignificante nos níveis de distorção de tensão na barra DIBR2 - 03. E analisando a **Figura 4.19**, o impacto da fase C também é insignificante.

4.1.3 Estudo de caso 3: Impacto do 7ª harmônico

Com base nos dados de medição em campo, a **Tabela 4.3** apresenta o impacto percentual da corrente harmônica de 7ª ordem na barra DIBR2 – 03 das fases A, B e C dos alimentadores DIAL2 – 16, DIAL2 – 17 e DIAL2 – 19 respectivamente em relação ao background (VBG – alimentadores não medidos) usando a técnica de regressão linear.

Analisando os valores da métrica R^2 do alimentador DIAL2 – 16, observa-se que a fase A tem baixa intensidade de correlação, fase B apresenta muito alta intensidade de correlação cujo R^2 é de 0,896 e na fase C apresenta alta intensidade de correlação. A **Tabela 4.3** indica que a fase A é responsável por cerca de 12% do impacto de distorção harmônica de tensão na barra DIBR2 – 03 causado pelas correntes harmônicas injetadas no alimentador DIAL2 – 16 em relação ao VBG, a fase B é responsável por cerca de 96% em relação ao VBG e a fase C é responsável por cerca de 56% em relação ao VBG. Os modelos de regressão linear simples entre as correntes harmônicas de 7ª ordem e tensão de mesma ordem harmônica da barra DIBR2-03, nas fases A, B e C estão ilustrados nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22, respectivamente.

Tabela 4.3 - Patamar de carga, coeficiente de determinação e fator de impacto dos DIAL2 – 16, DIAL2 – 17 e DIAL2 – 19.

Patamar de Carga - Manhã e Tarde			
HORÁRIO INÍCIO		HORÁRIO FIM	
00:00:00		14:00:00	
R^2			
ALIMENTADORES	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2 – 16	00,057	00,896	00,581
DIAL2 – 17	00,511	00,521	00,626
DIAL2 – 19	00,393	00,000	00,656
Fator de Impacto (%)			
BASE	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2 – 16	12,307	96,059	56,726
VBG-16	87,693	03,941	43,274
DIAL2 – 17	92,554	100,969	93,929
VBG-17	07,446	-00,969	06,071
DIAL2 – 19	36,596	00,348	57,047
VBG-19	63,404	99,652	42,953

Figura 4.20 - 7ª harmônico da FASE A, $R^2 = 0,057$.

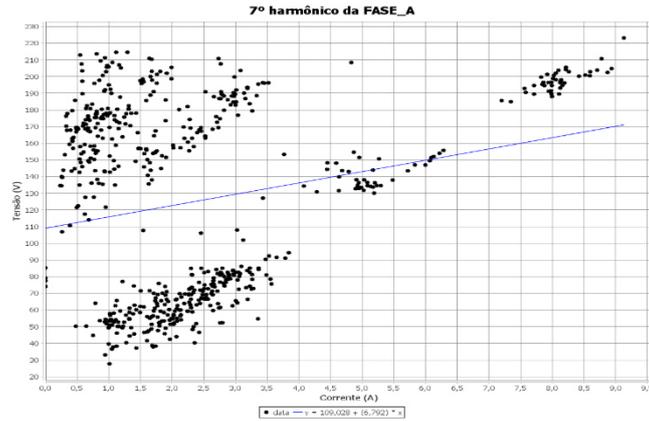


Figura 4.21 - 7ª harmônico da FASE B, $R^2 = 0,896$.

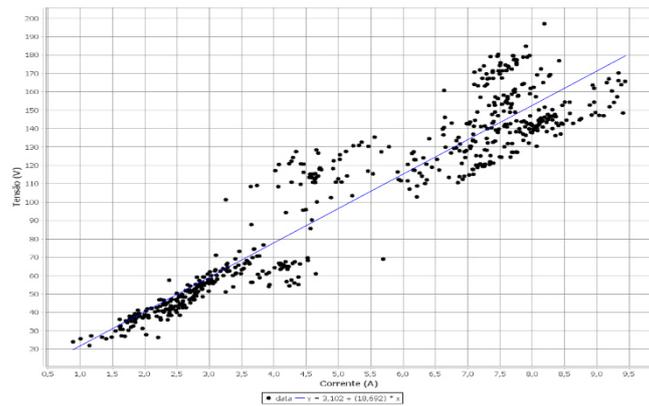
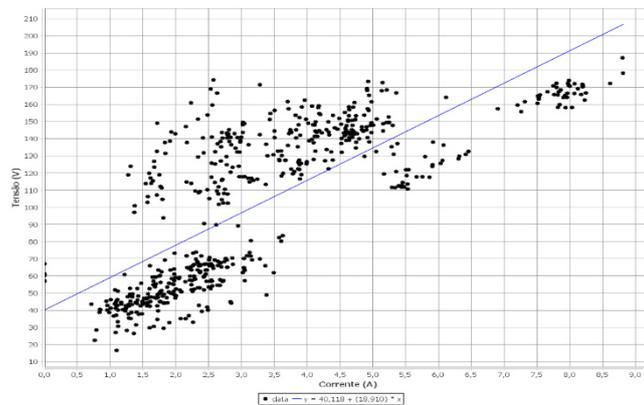


Figura 4.22 - 7ª harmônico da FASE C, $R^2 = 0,581$.



Analisando os valores da métrica R^2 do alimentador DIAL2 – 17, observa-se que as fases A B e C apresentam intensidade de correlação alta, cujo os R^2 são 0,511; 0,521 e 0,626 respectivamente. A **Tabela 4.3** indica que a fase A é responsável por cerca de 92% do impacto

de distorção harmônica de tensão na barra DIBR2 – 03 causado pelas correntes harmônicas injetadas no alimentador DIAL2 – 17 em relação ao VBG, a fase B é responsável por cerca de 100% em relação ao VBG e a fase C é responsável por cerca de 94% em relação ao VBG.

Os modelos de regressão linear simples entre as correntes harmônicas de 7ª ordem e tensão de mesma ordem harmônica da barra DIBR2-03, nas fases A B e C estão ilustrados nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25, respectivamente.

Figura 4.23 - 7ª harmônico FASE A, $R^2 = 0,511$.

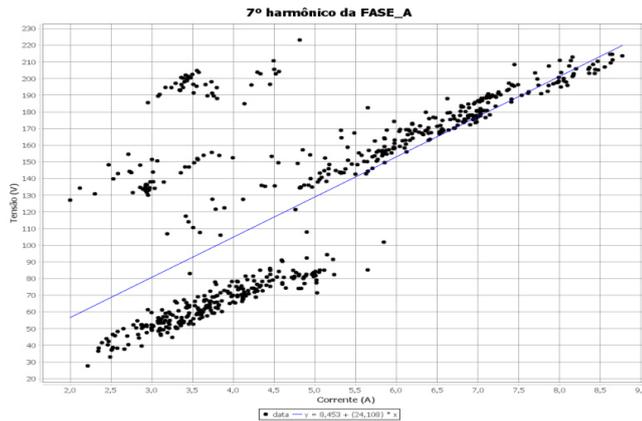


Figura 4.24 - harmônico FASE B, $R^2 = 0,521$.

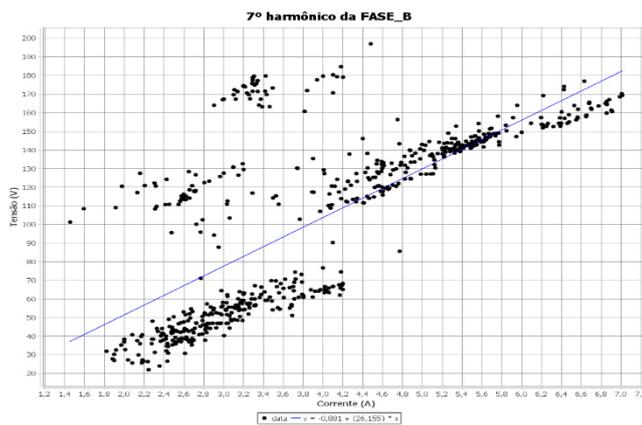
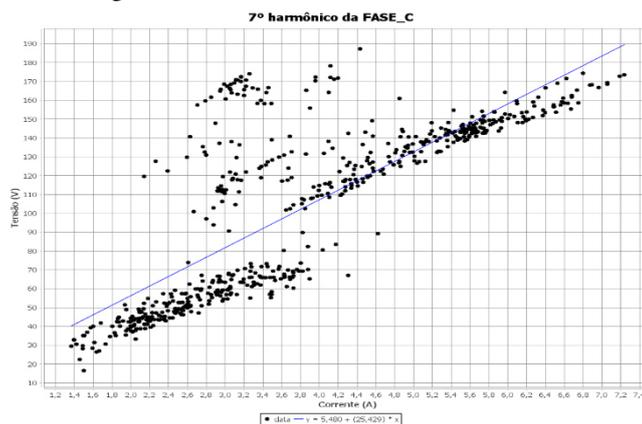


Figura 4.25 - 7ª harmônico FASE C, $R^2 = 0,626$.



Analisando os valores da métrica R^2 do alimentador DIAL2 – 19, observa-se que as fases A e C apresentam intensidade de correlação alta cujo os R^2 são de 0,393 e 0,656, respectivamente, a fase B apresenta intensidade de correlação nula. A **Tabela 4.3** indica que a fase A é responsável por cerca de 36 % do impacto de distorção harmônica de tensão na barra DIBR2 – 03 causado pelas correntes harmônicas injetadas no alimentador DIAL2 – 19 em relação ao VBG, a fase B é responsável por cerca de 0,34% próximo de zero, ou seja, impacto muito pequeno em relação ao VBG e a fase C é responsável por cerca de 57% em relação ao VBG.

Os modelos de regressão linear simples entre as correntes harmônicas de 7ª ordem e tensão de mesma ordem harmônica da barra DIBR2-03, nas fases A, B e C estão ilustrados nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28, respectivamente.

Figura 4.26 - 7ª harmônico da FASE A, $R^2 = 0,393$

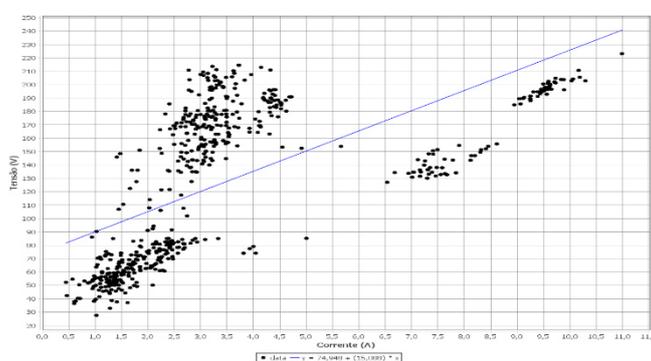


Figura 4.27 - 7ª harmônico da FASE B, $R^2 = 0$.

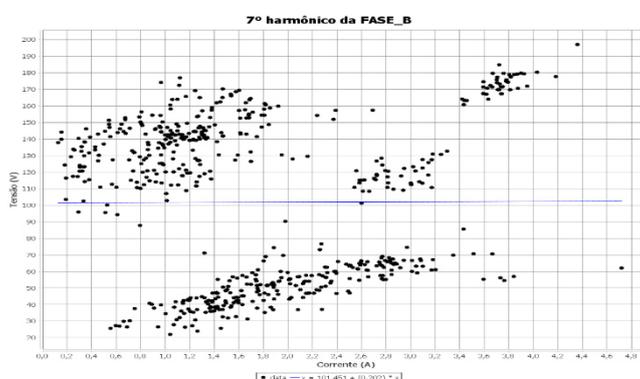
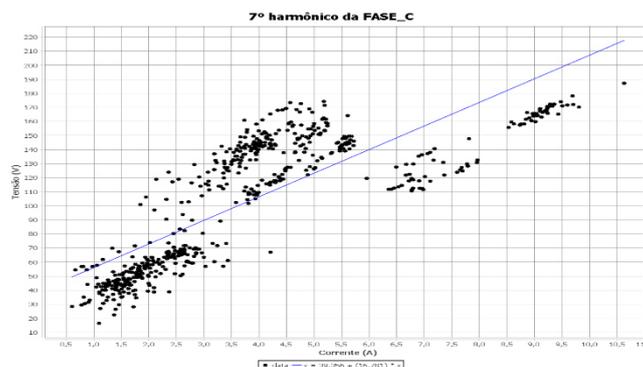


Figura 4.28 - 7ª harmônico da FASE C, $R^2 = 0,656$.



4.2 – APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ÁRVORE DE DECISÃO

4.2.1 Estudo de caso 1: Impacto do 3ª harmônico

No estudo de caso 1 foi analisado a contribuição dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19 para o aumento da distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-O3 para 3ª ordem harmônica nas fases A, B e C. Durante a análise dos resultados fornecidos pela aplicação da técnica de árvore de decisão foi constatado que as fases A e B do alimentador DIAL2-16, fases B e C do alimentador DIAL2-17 e fases A e C do alimentador DIAL2-19 possuem maior contribuição na distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-O3 quando comparado com os resultados das fases B e C do alimentador DIAL2-19 e fases A e C do alimentador DIAL2-19.

A **Tabela 4.4** apresenta o fator de impacto da 3ª harmônica, através do erro médio absoluto – MAE (dado em porcentagem) das três fases para cada alimentador, inclusive o background que são os outros alimentadores não medidos.

Tabela 4.4 - Fator de Impacto harmônico para 3ª ordem (%) MAE.

BASE	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2-16	30,366	36,407	23,660
DIAL2-17	16,017	25,852	26,434
DIAL2-19	43,587	15,507	36,422
BACKGROUND	10,030	22,233	13,484
BASE	MAE		
DIAL2-16	5.5054	2.681	10.8398
DIAL2-17	6.7343	3.0231	7.0766
DIAL2-19	4.1127	3.5136	9.2344

No estudo de caso 1, o alimentador DIAL2-19 contribui com o fator de impacto na 3ª harmônica para a fase A com 43,587%. O alimentador DIAL2-16 contribui com fator de

impacto 36,407% para a fase B. Para a fase C o alimentador DIAL2-17 contribui com fator de impacto 26,434%.

Em virtude de as árvores de decisão criadas pelo software de mineração de dados serem bastante grandes, escolheu-se cinco sub-árvores para cada fase de cada alimentador da subestação em estudo, que são capazes de generalizar o conhecimento adquirido com o uso da técnica empregada na avaliação dos dados para 3ª ordem harmônica das fases A, B e C dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19. As figuras 4.29, 4.30 e 4.31 ilustram as cinco sub-árvores para cada fase de cada alimentador.

Figura 4.29 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 1 fase A

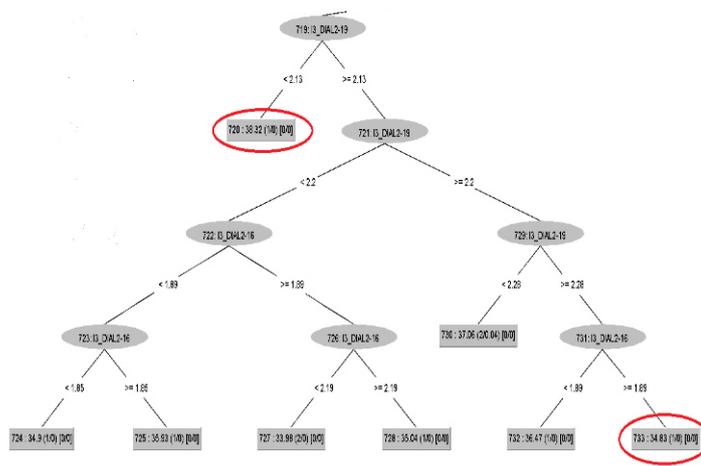


Figura 4.30 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 1 fase B

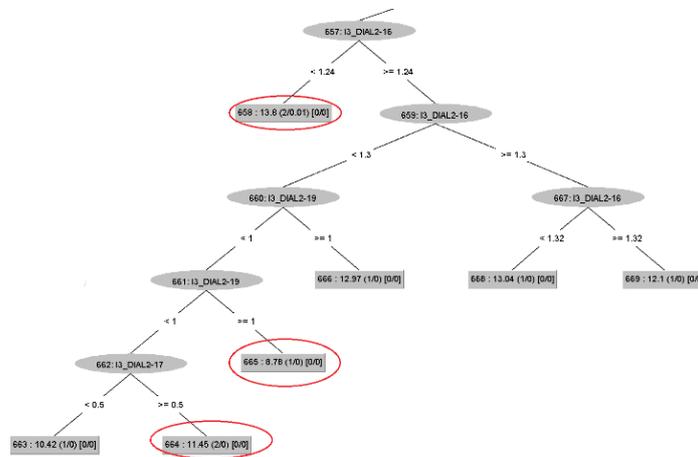
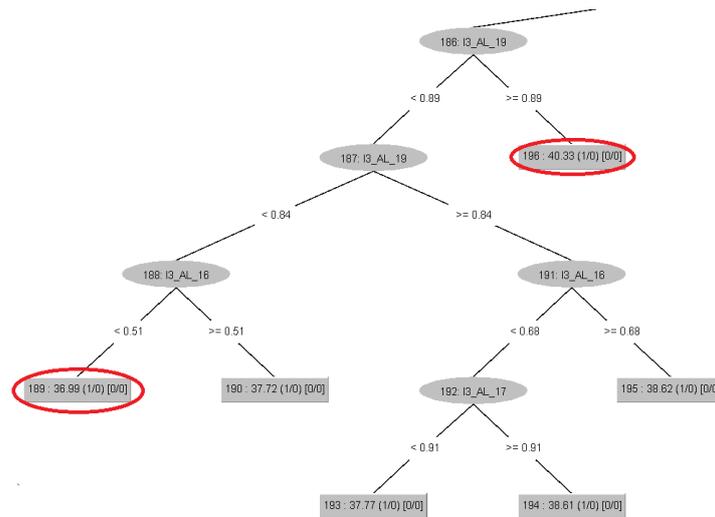


Figura 4.31 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 1 fase C



Esses foram os alimentadores que mais contribuíram para o aumento da distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-O3 para 3ª ordem harmônica nas fases A, B e C (DIAL2-19, DIAL2-16 e DIAL2-17, respectivamente). Esse resultado possibilita uma melhor tomada de decisão na gestão do sistema elétrico, ou seja, direcionar as ações de tratamento dos impactos harmônicos causados por cargas não lineares primeiramente para as fases e os alimentadores que causam maiores impactos.

4.2.2 Estudo de caso 2: Impacto do 5ª harmônico

No estudo de caso 2 foi analisado a contribuição dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19 para o aumento da distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-O3 para 5ª ordem harmônica nas fases A, B e C. Durante a análise dos resultados fornecidos pela aplicação da técnica de árvore de decisão foi constatado que as fases A, B e C do alimentador DIAL2-17 e a fase B do alimentador DIAL2-16 possuem maior contribuição na distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-O3 quando comparada com os resultados das fases A e C do alimentador DIAL2-16, fase B do alimentador DIAL2-17.

A **Tabela 4.5** apresenta o fator de impacto da 5ª harmônica, através do erro médio absoluto – MAE (dado em percentagem) das três fases para cada alimentador, inclusive o background que são os outros alimentadores não medidos.

Tabela 4.5 - Fator de Impacto harmônico para 5ª ordem (%) MAE.

BASE	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2-16	19,135	39,697	20,421
DIAL2-17	50,257	33,954	52,319
DIAL2-19	22,767	20,170	20,719
BACKGROUND	07,841	06,178	06,541

BASE	MAE		
DIAL2-16	44.6889	14.04	48.947
DIAL2-17	13.7529	12.9975	13.4247
DIAL2-19	39.8228	45.4306	45.9236

No estudo de caso 2, o alimentador DIAL2-17 contribui com o fator de impacto na 5ª harmônica para as fases A e C, com 50,257% e 52,319%, respectivamente. O alimentador DIAL2-16 contribui com fator de impacto 39,697% para a fase B.

Em virtude de as árvores de decisão criadas pelo software de mineração de dados serem bastante grandes, escolheu-se cinco sub-árvores para cada fase de cada alimentador da subestação em estudo, que são capazes de generalizar o conhecimento adquirido com o uso da técnica empregada na avaliação dos dados para 5ª ordem harmônica das fases A, B e C dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19. As figuras 4.32, 4.33 e 4.34 ilustram as cinco sub-árvores para cada fase de cada alimentador.

Figura 4.32 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 2 fase A

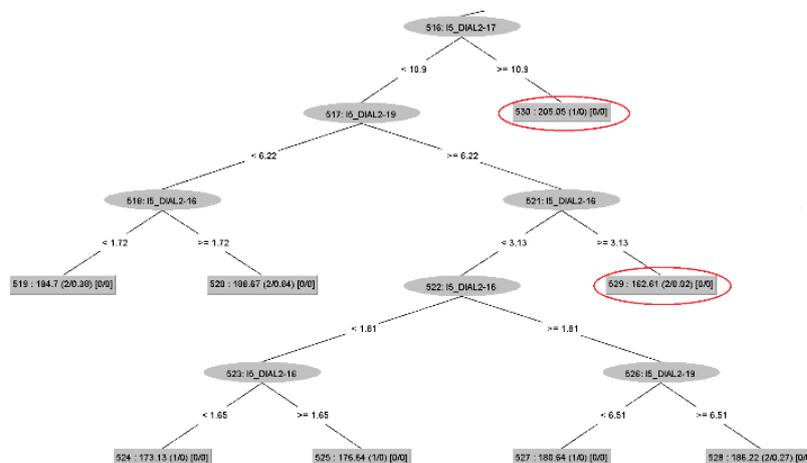


Figura 4.33 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 2 fase B

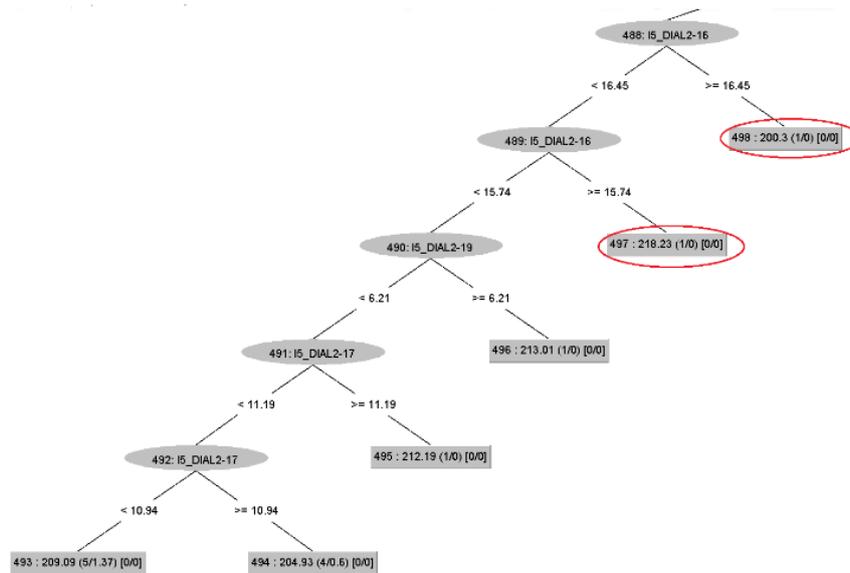
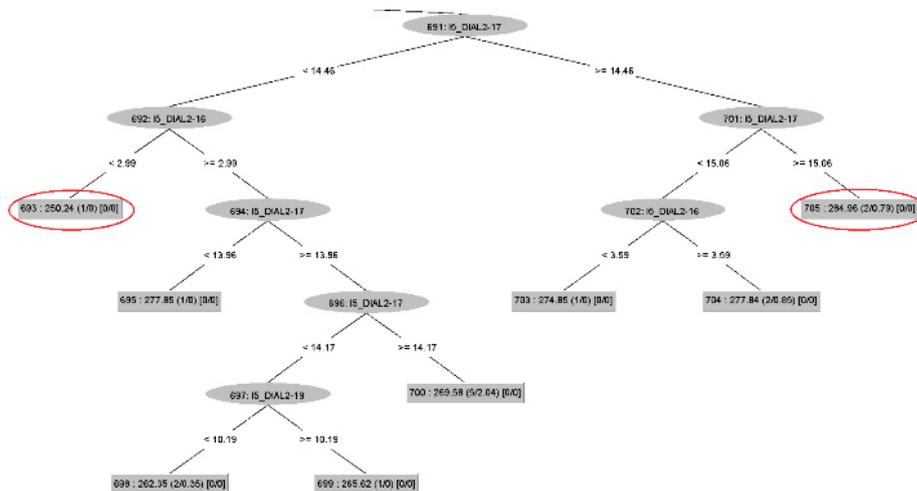


Figura 4.34 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 2 fase C



Esses foram os alimentadores que mais contribuíram para o aumento da distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-O3 para 3ª ordem harmônica nas fases B e C (DIAL2-16 e DIAL2-17, respectivamente). Esse resultado possibilita uma melhor tomada de decisão na gestão do sistema elétrico, ou seja, direcionar as ações de tratamento dos impactos harmônicos causados por cargas não lineares primeiramente para as fases e os alimentadores que causam maiores impactos.

4.2.3 Estudo de caso 3: Impacto do 7ª harmônico

No estudo de caso 3 foi analisado a contribuição dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19 para o aumento da distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-O3 para 7ª ordem harmônica nas fases A, B e C. Durante a análise dos resultados fornecidos pela aplicação da técnica de árvore de decisão foi constatado que a fase A e C do alimentador DIAL2-19, fase B do alimentador DIAL2-16 e nas fases A, B e C do DIAL2-17 possuem maior contribuição na distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-O3 quando comparado com os resultados das fases A e C do alimentador DIAL2-16 e fase B do alimentador DIAL2-19.

Observou – se também que valores do MAE ficaram muito altos para os modelos de regressão das fases A e C dos Alimentador DIAL2-16, nas fases A, B e C do DIAL2-17 e nas fases A, B e C do DIAL2-19, ou seja, os modelos criados não são confiáveis.

A **Tabela 4.6** apresenta o fator de impacto da 7ª harmônica, através do erro médio absoluto – MAE (dado em percentagem) das três fases para cada alimentador, inclusive o background que são os outros alimentadores não medidos.

Tabela 4.6 - Fator de Impacto harmônico para 7ª ordem (%) MAE.

BASE	FASE A	FASE B	FASE C
DIAL2-16	12,180	48,891	12,173
DIAL2-17	48,481	33,171	53,778
DIAL2-19	30,058	12,138	25,950
BACKGROUND	09,281	05,800	08,098

BASE	MAE		
DIAL2-16	47.2768	12.2526	25.1764
DIAL2-17	32.217	27.5956	22.4892
DIAL2-19	20.8357	37.1033	14.0713

No estudo de caso 3, o alimentador DIAL2-16 contribui com o fator de impacto na 7ª harmônica para a fase B, com 48,891%. O alimentador DIAL2-17 contribui com fator de impacto para as fases A, B e C, com 48,481%, 33,171% e 53,778%, respectivamente.

Em virtude de as árvores de decisão criadas pelo software de mineração de dados serem bastante grandes, escolheu-se cinco sub-árvores para cada fase de cada alimentador da subestação em estudo, que são capazes de generalizar o conhecimento adquirido com o uso da técnica empregada na avaliação dos dados para 7ª ordem harmônica das fases A, B e C dos

alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19. As figuras 4.35, 4.36 e 4.37 ilustram as cinco sub-árvores para cada fase de cada alimentador.

Figura 4.35 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 3 fase A.

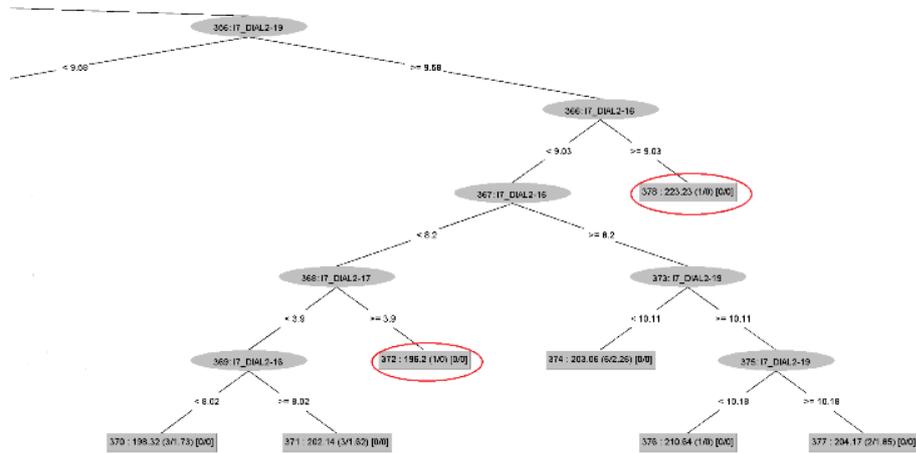


Figura 4.36 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 3 fase B

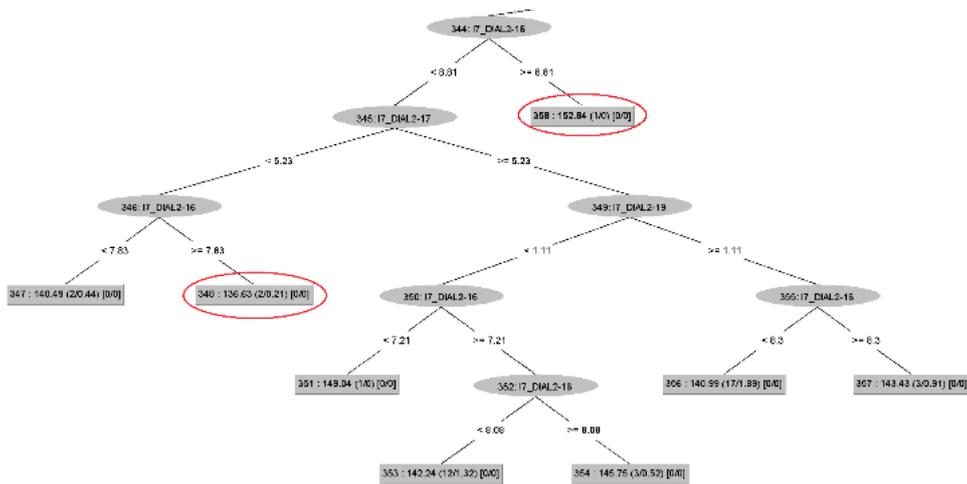
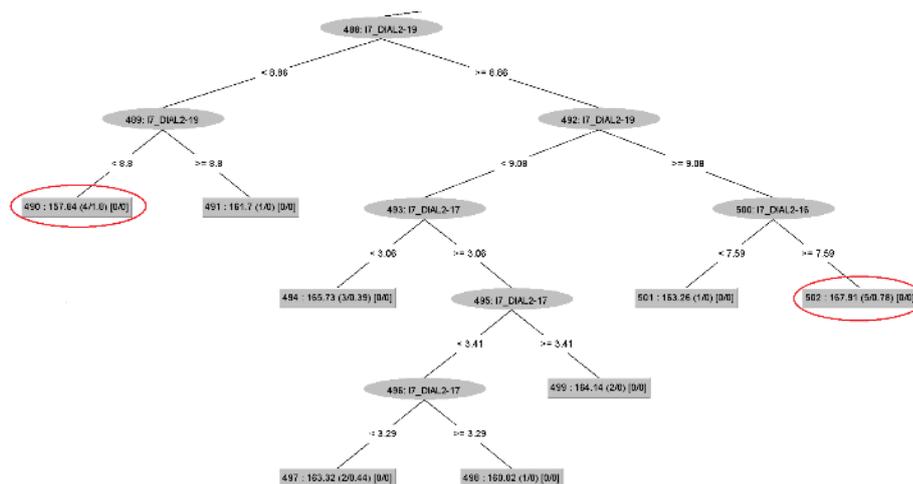


Figura 4.37 - Ramo direito oriundo do nó raiz da árvore de regressão do estudo de caso 3 fase C



4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS TÉCNICAS REGRESSÃO LINEAR E ARVORE DE DECISÃO

4.3.1 Comparação dos Resultados do Estudo de Caso 1 (3ª harmônica)

Analisando os resultados das aplicações das técnicas árvore de decisão e regressão linear simples, pode-se observar nas **Tabelas** 4.1 e 4.4 que as técnicas árvore de regressão e regressão linear simples apresentaram resultados similares com relação aos impactos harmônicos ($h=3$) nas fases A e B do DIAL2-16, fases B e C do DIAL2-17 e fases A e C do DIAL2-19.

Os resultados da aplicação das duas técnicas para o estudo de caso 1 (3ª harmônica) convergem para os alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19. Os maiores impactos foram apresentados com a aplicação da técnica de regressão linear simples nos alimentadores DIAL2-16 (fase A e B) e DIAL2-19 (fase A e C).

4.3.2 Comparação dos Resultados do Estudo de Caso 2 (5ª harmônica)

Analisando os resultados das aplicações das técnicas de árvore de decisão e regressão linear simples, pode-se observar nas **Tabelas** 4.2 e 4.5 que as técnicas árvore de decisão e regressão linear simples apresentaram resultados similares com relação aos impactos harmônicos ($h=5$) na fase B do DIAL2-16 e nas fases A, B e C do DIAL2-17, sendo que a técnica de regressão linear apresentou resultados muito altos para as fases A, B e C do alimentador DIAL2-17 e impacto moderado para a fase B do alimentador DIAL2-19, ou seja,

a técnica de regressão linear apresentou um ponto adicional de impacto harmônico em comparação com os resultados apresentados pela técnica de árvore de decisão.

Os valores do MAE ficaram muito altos para os modelos de árvore de decisão das fases A e C dos Alimentador DIAL2-16 e das fases A, B e C do DIAL2-17. Métodos de otimização aplicados à etapa de treinamento do modelo de árvore de decisão devem ser realizados em trabalhos futuros, no sentido de maximizar a acurácia de cada modelo, ou seja, os esses modelos não são confiáveis. MAE é o índice de acurácia do modelo criado pela técnica de árvore de decisão. A técnica de regressão linear simples apresentou melhor performance na investigação dos impactos harmônicos na rede elétrica, com modelos confiáveis de acordo com os valores do R^2 , ver **Tabela 4.2**.

Os resultados da aplicação das duas técnicas para o estudo de caso 2 (5ª harmônica) convergem para os alimentadores DIAL2-16 e DIAL2-17. Os maiores impactos foram apresentados com a aplicação da técnica de regressão linear simples nos alimentadores DIAL2-16 (fase B) e DIAL2-17 (fase A, B e C).

4.3.3 Comparação dos Resultados do Estudo de Caso 3 (7ª harmônica)

Analisando os resultados das aplicações das técnicas árvore de decisão e regressão linear simples, pode-se observar nas **Tabelas 4.3 e 4.6** que as técnicas árvore de decisão e regressão linear simples apresentaram resultados similares com relação aos impactos harmônicos ($h=7$) na fase B do DIAL2-16, nas fases A B e C do DIAL2-17 e nas fases A e C do DIAL2-19.

Os valores do MAE ficaram muito altos para os modelos de árvore de decisão das fases A e C dos Alimentador DIAL2-16, nas fases A, B e C do DIAL2-17 e nas fases A, B e C do DIAL2-19. Métodos de otimização aplicados à etapa de treinamento do modelo de árvore de decisão devem ser realizados em trabalhos futuros, no sentido de maximizar a acurácia de cada modelo, ou seja, esses modelos não são confiáveis. MAE é o índice de acurácia do modelo criado pela técnica de árvore de decisão. A técnica de regressão linear simples apresentou melhor performance na investigação dos impactos harmônicos na rede elétrica, com modelos confiáveis de acordo com os valores do R^2 , como apresenta a **Tabela 4.6**.

Os resultados da aplicação das duas técnicas para o estudo de caso 3 (7ª harmônica) convergem para os alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19. Os maiores impactos foram apresentados com a aplicação da técnica de regressão linear simples nos alimentadores DIAL2-16 (fase B), DIAL2-17 (fase A, B e C) e DIAL2-19 (fases A e C).

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Utilizando as técnicas de regressão linear simples e árvore de decisão foi desenvolvido um estudo comparativo na análise de impactos ocasionados por correntes harmônicas em três alimentadores em um barramento de um sistema elétrico. As análises foram realizadas por meio de campanhas de medições em campo por um período de 7 dias corridos de acordo com o modulo 8 do PRODIST 2021. Com os dados coletados desta campanha de medição foi possível fazer uma análise de correlação entre as correntes harmônicas injetadas nos alimentadores e a distorção de tensão na barra do sistema elétrico em estudo, através das técnicas de regressão linear simples e árvore de decisão.

Com essas análises foi possível identificar qual das duas técnicas utilizadas nas análises obteve melhor desempenho na aplicação, e criar um perfil dos alimentadores DIAL2-16, DIAL2-17 e DIAL2-19 para então mitigar a distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-03 em estudo causada pelos os impactos das correntes harmônicas destes alimentadores, e além disso, descreveu – se um relatório das análises dos impactos harmônicas realizadas dos pontos medidos; obtendo assim um melhor gerenciamento do sistema elétrico, promovendo a inclusão na tarifa de energia elétrica as implicações do conteúdo harmônico injetados no sistema elétrico. A técnica que obteve melhor desempenho nas análises dos impactos harmônicos na distorção harmônica de tensão na barra DIBR2-03 em estudo foi técnica de Regressão Linear Simples.

Portanto esta dissertação apresentou e aplicou na prática com estudos de caso e ações para análise de impactos harmônicos em sistemas de distribuição de energia elétrica através da construção de modelos matemáticos utilizando análise Regressão Linear Simples e análise de Árvore de Decisão, obtendo resultados importantes nos estudos realizados, evidenciando assim a eficiência da aplicação das técnicas em análise de impactos harmônicos em sistemas de distribuição de energia elétrica.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Estudo comparativo para análise de impactos harmônicos entre as técnicas de Regressão Linear e Redes Neurais;

- Desenvolver métodos de otimização aplicados à etapa de treinamento do modelo de árvore de decisão, no sentido de maximizar a acurácia de cada modelo;
- Realizar um estudo sobre o aumento do consumo da energia reativa causado pelas distorções harmônicas;
- A aplicação de filtros de filtros ativos e passivos nos alimentadores analisados para tratamento do problema de distorções harmônicas de tensão.
- Descrever um relatório das análises dos impactos harmônicas realizadas, que sirva como um documento de diagnóstico dos pontos analisados;

REFERÊNCIAS

ABDULVELEEV, I. R.; KHRAMSHIN, T. R.; KORNILOV, G. P.; ABDULVELEEVA, R. R. Experimental Study of the Impact of a DC Electric Arc Furnace on a Power Grid. 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), IEEE, Sochi, Russia, 2021.

AHMED, SAJJAD; KASHIF, SYED ABDUL RAHMAN; AIN, NOOR UL, RASOOL AKHTAR; SHAHID, MUHAMMAD SOHAIB; PADMANABAN, SANJEEVIKUMAR; OZSOY, EMRE AND SAQIB, MUHAMMAD ASGHAR. Mitigation of Complex Non-Linear Dynamic Effects in Multiple Output Cascaded DC-DC Converters, IEEE, 2021.

CHEN, GUANGWU; ZHU, YUHAN; WIEDMANN, THOMAS; YAO, LINA; XU, LIXIAO; WANG, YAFEI. Urban-rural disparities of household energy requirements and influence factors in China: Classification tree models. School of Statistics and Institute of National Accounts, Beijing Normal University, Beijing 100875, China. Sustainability Assessment Program (SAP), School of Civil and Environmental Engineering, UNSW Sydney, New South Wales 2052, Australia Centre for Integrated Sustainability Analysis, School of Physics, The University of Sydney, New South Wales 2006, Australia. School of Computer Science and Engineering, UNSW Sydney, New South Wales 2052, Australia, 2019.

JR, D. S., E SIMONETTI, D. S. Análise harmônica e inter-harmônica de um forno elétrico a arco. IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. Acesso em 21 de janeiro de 2020. Disponível em https://scihub.tw/https://www.researchgate.net/publication/224226659_Analise_harmonica_e_inter-harmonica_de_um_Forno_Eletrico_a_Arco

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

WANG, XIONGFEI; BLAABJERG, FREDE. Harmonic Stability in Power Electronic Based Power Systems: Concept, Modeling, and Analysis, IEEE, 2018.

YASAR, SEYMA; ARSLAN, A. KADIR; ÇOLAK, CEMIL; YOLOGLU, SAIM. A Developed web-based software can easily fulfill the assumptions of correlation, classification and regression tasks in data processing, Dept. of Biostatistics and Medical Informatics, Faculty

of Medicine, Inonu University Malatya/TURKEY, Published in: International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), IEEE, 2019.

YU, JUNHO; JEON, SEUNGKI; CHOI, HOYONG; KIM, NAMSOO. CMOS Integrated PFM DC-DC Converter with Digitally-Controlled Frequency Selector, School of ECE, Chungbuk National University Cheong-ju, chungbuk, 361-763 Korea, 2018.

ARRILLAGA, J. *et al.* *Power System Harmonic Analysis*. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1997.

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

SALAM, S M, UDDIN, M. Iftekher, MOINUDDIN, M. Rifat Bin. Impact Analysis of Large Number of Non-Linear Lighting Loads on Power Quality in Distribution Network. Dept. of EEE Southern University Bangladesh Chattagram, 2021.

ZOBAA, AHMED F. AND ALEEM, SHADY H. E. ABDEL. *Power Quality in Future Electrical Power Systems*, Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2017.

NAZIROV, KHURSHED B.; GANIEV, ZOKIRJON S. Experimental Evaluation and Analysis of Electric Power Quality in Electric Networks MunicipalHouseholds, Electric Power Industry Department, Electric Power Industry Department, Branch of the National Research University, 2021.

AMOO, ABDULLAHI IANRE, ALIYU, USMAN O. AND BAKARE, GANIYU AYINDE. *Compendium of Computational Tools for Power Systems Harmonic Analysis*, 2018.

ZOBAA, AHMED F., ALEEM, SHADY H.E. ABDEL AND BALCI, MURAT E. *Introductory Chapter: Power System Harmonics—Analysis, Effects, and Mitigation Solutions for Power Quality Improvement*, 2018).

DE OLIVEIRA, EDSON FARIAS. Avaliação da distorção harmônica total de tensão no ponto de acoplamento comum industrial usando o processo kdd baseado em medição, Instituto de Tecnologia Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará – (UFPA), 2018.

DA SILVEIRA, Lucas C.; BERNARDON, Daniel P.; RADUNS, Caroline. Elaboration of an impact study on the medium voltage electrical system caused by nonlinear loads. In: 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). IEEE, 2018. p. 1-6.

DA SILVEIRA, Lucas C.; BERNARDON, Daniel P.; RADUNS, Caroline. Elaboration of an impact study on the medium voltage electrical system caused by nonlinear loads. In: 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). IEEE, 2018. p. 1-6.

DUGAN, R.; GRANAGHAN, M. Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill. ISBN 0-07-018031-8 1996, 2004.

LEI, HONG; HUANG, YA; JIANG, LI; GAO, GE; ZHANG, JIE; WU, PENG. Research on Fourier and Prony analysis algorithm of inter-harmonic in power system. 2021 The International Conference on Power Engineering (ICPE 2021), December 9–11, 2021, Nanning, China, 2022.

LEITE, Jandecy Cabral. Projeto multicritério de filtros harmônicos passivos para instalações industriais utilizando técnicas de inteligência computacional. Pará: UFPA, 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Belém- Pará, 2013.

LUKASIK, ZBIGNIEW, OICZYKOWSKI, ZBIGNIEW. Estimating the Impact of Arc Furnaces on the Quality of Power in Supply Systems. Faculty of Transport, Electrical Engineering and Computer Science, Kazimierz Pulaski, University of Technology and Humanities, Malczewskiego 29, 26-600 Radom, Poland, 2020.

NAZIROV, KHURSHED B.; GANIEV, ZOKIRJON S. Experimental Evaluation and Analysis of Electric Power Quality in Electric Networks MunicipalHouseholds, Electric Power Industry Department, Electric Power Industry Department, Branch of the National Research University IEEE-1159. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. IEEE Std 1159-2019, v. 99, p. 1–98, 2019.

IEEE Std 1453-2015. IEEE Recommended Practice for the Analysis of Fluctuating Installations on Power Systems, 2015.

IEEE Std 519™-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA–ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional–PRODIST: Módulo 8–Qualidade da Energia Elétrica. 2018.

MURRAY, RUAN ; DE KOCK, JAN. Instrument transformers influence on harmonic measurements for grid code compliance, 2018 IEEE 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON), 2018.

NASSAR, SAMIRA REDA; EISA, AYMAN A.; SALEH, A. A.; FARAHAT, M.A. AND ABDEL-GAWAD, AMAL F. Evaluating the Impact of Connected Non Linear Loads on Power Qualitya Nuclear Reactor case study, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, (2020). <https://doi.org/10.1080/16878507.2020.1828018>.

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

SOUZA, JAYNE DO NASCIMENTO, LEITE, JANDECY CABRAL, ALMEIDA, RIVANILDO DUARTE. Analysis of Harmonic Impacts on an Electric System Bus Using Artificial Neural Networks. Post-Graduation Program in Process Engineering of the Institute of Technology of the Federal University of Pará, Federal University of Pará (UFPA), Belém-Pará, Brazil, Institute of Technology and Education Galileo of the Amazon (ITEGAM), Manaus-Amazonas, Brazil, 2021.

SEDKAOUI, SORAYA AND KHELFAOUI, MOUNIA. Linear Regression, Published by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, IEEE, 2020.

DOBREF, VASILE, POPOV, Petrica, MOCANU, Vlad. The Quality of Electricity Assessment in Marine Power Systems, Marine Engineering Faculty, Naval Academy “Mircea cel Btrân” Constana, Romania, 2018.

ULLAH, ASAD; SHEIKH, INAM UL HASAN; ARSHAD, SHAHZAD; SALEEM, FAISAL. Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System, Department of Electrical Engineering, University of Engineering and Technology, Taxila Taxila, Pakistan, 2019.

ALMEIDA, RIVANILDO DUARTE; LEITE, JANDECY CABRAL. Análise de Impactos Harmônicos em Redes Elétricas de Média Tensão. 1. ed., v. 2. 125p, Novas Edições Acadêmicas, Alemanha, 2018.

RODRIGUEZ-GALIANO, V.; SANCHEZ-CASTILLO, M.; CHICA-OLMO, M.; CHICA-RIVAS, M. Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines. Global Environmental Change and Earth Observation Research Group, Geography and Environment, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom. Department of Haematology, Wellcome Trust and MRC Cambridge Stem Cell Institute and Cambridge Institute for Medical Research, University of Cambridge, Cambridge CB2 0XY, United Kingdom. Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. Departamento de Análisis Matemático, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain, 2015.

MARRERO, L., GARCÍA-SANTANDER, L., HERNÁNDEZ-CALLEJO, L., BAÑUELOS-SÁNCHEZ, P., and JARA, V. Harmonic Distortion Characterization in Groups of Distribution Networks Applying the IEEE Standard 519-2014, 2021.

PROCOBRE, S. Qualidade de Energia - Harmonicas. Workshop Instalações. Elétricas de Baixa Tensão. 2003.

LI, LIANPENG; DONG, JIAN; ZUO, DECHENG; WU, JIN. SLA-aware and Energy-efficient VM Consolidation in Cloud Data Centers Using Robust Linear Regression Prediction Model, Department of Computer Science and Technology, Harbin Institute Of Technology, No.92, Xidazhi Street, Harbin, China, 2019.

WELHAM, S. J., GEZAN, S. A, CLARK, S. J., MEAD, A. *Statistical Methods in Biology - Design and Analysis of Experiments and Regression*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.

MATLOFF, N. *Statistical Regression and Classification - From Linear Models to Machine Learning*. University of California, Davis, USA, 2017.

RAWLINGS, J. O., PANTULA, S. G., DICKEY, D. A. *Applied Regression Analysis: A Research Tool*, Second Edition. Department of Statistics - North Carolina State University, USA, 2001.

SICHANI, M. H., KHALAFINEJAD, S. *Regression, Knowledge-Oriented Applications in Data Mining*. Sharif University of Technology, Iran, 2011.

