



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

Ádrea Lima de Sousa

DM: 20/23

**Detecção de Falhas de Alta Impedância em
Redes Aéreas de Distribuição: Testes
Experimentais em Laboratório e Análises no
Domínio do Tempo e da Frequência**

Belém – Pará – Brasil

2023

Ádrea Lima de Sousa

**Detecção de Falhas de Alta Impedância em Redes
Aéreas de Distribuição: Testes Experimentais em
Laboratório e Análises no Domínio do Tempo e da
Frequência**

DM: 20/23

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

Universidade Federal do Pará

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira

Belém – Pará – Brasil

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

- S725d Sousa, Ádrea Lima de.
Detecção de Falhas de Alta Impedância em Redes
Aéreas de Distribuição: Testes Experimentais em
Laboratório e Análises no Domínio do Tempo e da
Frequência / Ádrea Lima de Sousa. — 2023.
99 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2023.
1. Falta de Alta impedância. 2. Proteção de redes de
distribuição. 3. Transformada rápida de Fourier. 4.
Detecção de falhas de alta impedância. I. Título.

CDD 621.3191

Ádrea Lima de Sousa

Detecção de Falhas de Alta Impedância em Redes Aéreas de Distribuição: Testes Experimentais em Laboratório e Análises no Domínio do Tempo e da Frequência

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

APROVADA EM: 04/07/2023

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
Orientador – PPGEE/UFPA

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
Avaliador Interno – PPGEE/UFPA

Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes
Avaliador Externo ao Programa – UFPA

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA

Dedico esta dissertação à minha amada mãe, fonte de inspiração e suporte inabalável.

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer de coração à minha amada mãe, Enilda. Seu amor incondicional, apoio constante e incentivo incansável foram fundamentais para me manter motivada e superar os desafios ao longo dessa jornada. Suas palavras de encorajamento e seu apoio emocional foram verdadeiramente inspiradores.

Ao meu professor orientador, João Paulo, sou imensamente grata pela sua orientação, sabedoria e paciência durante todo o processo. Suas valiosas contribuições, sugestões e ensinamentos foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. Sua dedicação em compartilhar seu conhecimento e seu compromisso em me ajudar a alcançar meus objetivos são inestimáveis.

À minha querida irmã, Alana, agradeço por sempre estar presente, me apoiar e torcer por mim. Seu carinho, compreensão e palavras de encorajamento foram fundamentais para minha motivação e bem-estar emocional.

Gostaria de agradecer também ao meu amigo Mateus, que esteve ao meu lado durante essa jornada acadêmica. Sua amizade e apoio constante foram um verdadeiro presente. Compartilhamos momentos e motivação mútua, e sou grata por ter você como um parceiro de jornada.

Sou imensamente grata aos meus amigos de faculdade, Thiago, João, Gabriel, Lauro e Jorge. Durante nossa jornada acadêmica, compartilhamos momentos de companheirismo e apoio mútuo, que foram a base para minha entrada no mestrado. Nossa união e colaboração foram essenciais para meu crescimento e sucesso acadêmico.

Quero expressar minha gratidão ao Laboratório GSEI (Grupo de Sistemas Energia e Inovação) pela oportunidade de realizar os testes experimentais neste ambiente colaborativo. O apoio e recursos disponibilizados foram essenciais para o sucesso desta pesquisa.

Por fim, gostaria de agradecer à Equatorial Pará por financiar esta pesquisa, permitindo que fosse realizada. Sua visão e compromisso com o avanço científico e tecnológico são notáveis, e sou grata pela oportunidade de contribuir com conhecimentos que possam impactar positivamente o setor de distribuição de energia elétrica.

A todos que de alguma forma estiveram presentes em minha jornada, oferecendo suporte, incentivo e inspiração, meu mais profundo agradecimento. Esta conquista não seria possível sem o apoio e contribuição de cada um de vocês.

Que este trabalho possa contribuir para o avanço do conhecimento e trazer benefícios para a detecção de faltas de alta impedância.

“Nãõ falhei. Apenas descobri 10.000 maneiras que nãõ funcionam.”
(Thomas Edison)

Resumo

O presente trabalho trata da análise de faltas de alta impedância (FAI) em redes aéreas de distribuição de energia elétrica. É realizado um estudo aprofundado e abrangente sobre esse tipo de falta, bem como sobre alguns importantes métodos de detecção de FAI. Após isso, é explicado o laboratório desenvolvido para testes experimentais de FAI, que reproduz a rede de média tensão de 13,8 kV presente no Brasil, com três fases e neutro aterrado na subestação. A partir do laboratório, foram realizados 127 testes em 18 cenários diferentes, de FAI dos tipos shunt e shunt série, esta última localizada do lado da fonte. Visando realizar uma análise comparativa em relação à literatura existente sobre detecção de faltas de alta impedância baseada em harmônicos, foi avaliado o espectro harmônico, especialmente os harmônicos pares, ímpares (principalmente de terceira ordem) e o ângulo do terceiro harmônico, os quais são obtidos por meio da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, abreviada FFT). A principal contribuição deste trabalho reside na avaliação das peculiaridades do espectro harmônico dos sinais de tensão e corrente obtidos a partir de testes experimentais em laboratório para diferentes topologias de solo e galhos de árvore e sua correlação com o sinal no domínio do tempo. Isso proporciona um importante fundamento para o desenvolvimento de algoritmos de detecção de FAI. Os resultados obtidos na análise revelaram que as faltas de alta impedância do tipo shunt e shunt série apresentam comportamentos distintos no espectro harmônico e no domínio do tempo, e uma grande parte dos testes realizados não se encontra dentro dos limiares estabelecidos pela literatura. Além disso, destaca-se que foi realizada a avaliação do espectro harmônico da tensão, que geralmente não é considerado em algoritmos de detecção de FAIs.

Palavras-chave: Falta de Alta impedância. Proteção de redes de distribuição. Transformada rápida de Fourier. Detecção de faltas de alta impedância.

Abstract

The present work deals with the analysis of high impedance faults (HIFs) in overhead distribution networks. A comprehensive and in-depth study is conducted on this type of fault, as well as on some existing methods to detect HIFs. Next, the laboratory developed for experimental testing of HIFs is explained, which replicates the three-phase, three-wire medium voltage distribution network with solidly grounded system at the primary substation typically used in Brazil. From the laboratory, 127 tests were performed in 18 different scenarios, including shunt faults and series shunt faults on the source side. In order to perform a comparative analysis with the existing literature on high impedance fault detection based on harmonics, the harmonic spectrum was evaluated, based on even harmonics, odd harmonics (especially the third order), and the angle of the third harmonic, obtained through the Fast Fourier Transform (FFT). The main contribution of this work lies in evaluating the peculiarities of the harmonic spectrum of voltage and current signals obtained from experimental laboratory tests for different soil topologies and tree branch configurations, and their correlation with the signal in the time domain. This provides an important foundation for the development of HIF detection algorithms. The results obtained in the analysis revealed that shunt and series shunt high impedance faults exhibit distinct behaviors in the harmonic spectrum and time domain, and a large portion of the tests performed does not fall within the thresholds established in the literature. Furthermore, it should be noted that the evaluation of the harmonic spectrum of voltage was carried out, which is usually not considered in HIF detection algorithms.

Keywords: High Impedance Faults. Distribution Network Protection. Fast Fourier Transform. High Impedance Fault Detection.

Lista de ilustrações

Figura 1.	Acidentes fatais nos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil.	23
Figura 2.	Níveis de proteção de um alimentador.	28
Figura 3.	Características de tensão x corrente de uma FAI.	30
Figura 4.	Curva tensão-corrente para: (a) Areia; (b) Asfalto; (c) Cascalho; (d) Paralelepípedo; (e) Grama; (f) Solo local dos testes.	31
Figura 5.	Características da forma de onda de uma FAI.	32
Figura 6.	Relação de terceiro harmônico na corrente de FAI.	33
Figura 7.	FAI shunt com árvore.	34
Figura 8.	Simulação do comportamento da corrente de FAI shunt.	34
Figura 9.	Sequência de eventos considerada para a FAI ativa shunt-série em rede de distribuição aérea primária.	36
Figura 10.	O desenvolvimento do arco elétrico em solo arenoso.	38
Figura 11.	Cenários possíveis para a ocorrência da FAI ativa shunt-série.	39
Figura 12.	Simulação do comportamento da corrente de FAI shunt - Rompimento do lado da fonte.	40
Figura 13.	FAI no lado da carga.	40
Figura 14.	Simulação do comportamento da corrente de FAI shunt - Rompimento do lado da carga.	41
Figura 15.	Simulação do comportamento da corrente de FAI shunt - Rompimento em ambos os lados.	41
Figura 16.	Esquema básico de ligação de sistemas monofilar com retorno pelo terra.	43
Figura 17.	Fluxograma do algoritmo de detecção proposto por Wontroba (2020).	47
Figura 18.	Fluxograma do algoritmo de detecção e classificação proposto por Lima (2016).	52
Figura 19.	Projeto elétrico do LabFAI.	57
Figura 20.	Transformador de 225 kVA e contatora.	59
Figura 21.	Rede de média tensão e sala de operação.	59
Figura 22.	TCs e TPs.	59
Figura 23.	Teste com galho de castanhola de 0,5 metro em contato com o condutor.	61
Figura 24.	Teste com galho de castanhola de 0,5 metro próximo ao condutor.	61
Figura 25.	Teste com galho de bambu de 0,5 metro em contato com o condutor.	62
Figura 26.	Teste com galho de bambu de 0,5 metro próximo ao condutor.	62
Figura 27.	Galho 4 de ipê roxo antes dos testes.	63
Figura 28.	Galho 4 de ipê roxo após os testes.	63
Figura 29.	Caixa de testes.	64
Figura 30.	Teste com concreto molhado.	66

Figura 31.	Teste com grama molhada.	66
Figura 32.	Teste com seixo molhado.	66
Figura 33.	Galho Teste com areia molhada.	66
Figura 34.	Condeúdo harmônico teste 10 - Castanhola.	68
Figura 35.	Condeúdo harmônico dos testes 12 - Castanhola	68
Figura 36.	Condeúdo harmônico teste 6 - Oscilografia 2 - Castanhola.	69
Figura 37.	Condeúdo harmônico teste 6 - Oscilografia 3 - Castanhola.	69
Figura 38.	Condeúdo harmônico teste 11 - Oscilografia 1 - Castanhola.	69
Figura 39.	Condeúdo harmônico teste 11 - Oscilografia 2 - Castanhola.	69
Figura 40.	Corrente testes 6 (oscilografia 3) e 10 - Castanhola.	70
Figura 41.	Corrente testes 6 (oscilografia 2) e 12 - Castanhola.	70
Figura 42.	Corrente do teste 11 - Castanhola.	70
Figura 43.	Condeúdo harmônico teste 9 - Castanhola.	70
Figura 44.	Condeúdo harmônico teste 22 - Oscilografia 1 - Castanhola.	71
Figura 45.	Condeúdo harmônico teste 22 - Oscilografia 4 - Castanhola.	71
Figura 46.	Corrente início e fim do teste 22 - Castanhola.	71
Figura 47.	Soma hos harmônicos do teste 22 - Castanhola.	71
Figura 48.	Condeúdo harmônico teste 7 - Oscilografia 1 - Bambu.	73
Figura 49.	Condeúdo harmônico teste 7 - Oscilografia 2 - Bambu.	73
Figura 50.	Condeúdo harmônico teste 8 - Oscilografia 1 - Bambu.	73
Figura 51.	Condeúdo harmônico teste 8 - Oscilografia 2 - Bambu.	73
Figura 52.	Condeúdo harmônico teste 9 - Oscilografia 1 - Bambu.	74
Figura 53.	Condeúdo harmônico teste 9 - Oscilografia 2 - Bambu.	74
Figura 54.	Condeúdo harmônico teste 15 - Bambu.	74
Figura 55.	Condeúdo harmônico teste 16 - Bambu.	74
Figura 56.	Corrente teste 7 - Bambu.	75
Figura 57.	Corrente teste 8 - Bambu.	75
Figura 58.	Corrente teste 9 - Bambu.	75
Figura 59.	Corrente teste 15 e 16 - Bambu.	75
Figura 60.	Condeúdo harmônico teste 1 - Bambu.	76
Figura 61.	Condeúdo harmônico teste 2 - Bambu.	76
Figura 62.	Condeúdo harmônico teste 3 - Bambu.	77
Figura 63.	Corrente testes 1 e 3 - Bambu.	77
Figura 64.	Condeúdo harmônico teste 25 - Oscilografia 1 - Bambu.	77
Figura 65.	Condeúdo harmônico teste 25 - Oscilografia 2 - Bambu.	77
Figura 66.	Condeúdo harmônico teste 27 - Oscilografia 1 - Bambu.	78
Figura 67.	Condeúdo harmônico teste 27 - Oscilografia 2 - Bambu.	78
Figura 68.	Corrente teste 25 - Bambu.	78
Figura 69.	Corrente do teste 27 - Bambu.	78

Figura 70.	Condeúdo harmônico teste 17 - Bambu.	79
Figura 71.	Condeúdo harmônico teste 19 - Bambu.	79
Figura 72.	Corrente dos testes 17 e 19 - Bambu.	79
Figura 73.	Condeúdo harmônico teste 1 - Magueira.	80
Figura 74.	Condeúdo harmônico teste 4 - Magueira.	80
Figura 75.	Condeúdo harmônico teste 11 - Magueira.	80
Figura 76.	Corrente testes 1 e 4 - Magueira.	81
Figura 77.	Corrente teste 11 - Magueira.	81
Figura 78.	Condeúdo harmônico teste 1 - Ipê roxo.	81
Figura 79.	Condeúdo harmônico teste 2 - Ipê roxo.	81
Figura 80.	Condeúdo harmônico teste 3 - Ipê roxo.	82
Figura 81.	Condeúdo harmônico teste 4 - Ipê roxo.	82
Figura 82.	Corrente testes 1 e 2 - Ipê roxo.	82
Figura 83.	Corrente testes 3 e 4 - Ipê roxo.	82
Figura 84.	Condeúdo harmônico teste 14 - Ipê roxo.	83
Figura 85.	Corrente teste 14 - Ipê roxo.	83
Figura 86.	Condeúdo harmônico tensão teste 9 - Castanhola.	83
Figura 87.	Condeúdo harmônico tensão teste 11 - Magueira.	83
Figura 88.	Condeúdo harmônico tensão teste 7 - Bambu.	84
Figura 89.	Condeúdo harmônico teste 20 - Concreto.	84
Figura 90.	Corrente e corrente teste 20 - Concreto.	84
Figura 91.	Condeúdo harmônico teste 24 - Oscilografia 1 - Concreto.	85
Figura 92.	Condeúdo harmônico teste 24 - Oscilografia 2 - Concreto.	85
Figura 93.	Condeúdo harmônico teste 24 - Oscilografia 3 - Concreto.	85
Figura 94.	Condeúdo harmônico teste 24 - Oscilografia 4 - Concreto.	85
Figura 95.	Corrente teste 24 - Oscilografias 1 e 2 - Concreto.	86
Figura 96.	Corrente teste 24 - Oscilografia 3 e 4 - Concreto.	86
Figura 97.	Condeúdo harmônico teste 1 - Oscilografia 1 - Grama.	86
Figura 98.	Condeúdo harmônico teste 1 - Oscilografia 2 - Grama.	86
Figura 99.	Corrente teste 1 - Grama.	87
Figura 100.	Soma dos harmônicos pares e ímpares teste 1 - Grama.	87
Figura 101.	Corrente teste 3 - Seixo.	88
Figura 102.	Condeúdo harmônico teste 3 - 15 primeiros ciclos - Seixo.	88
Figura 103.	Condeúdo harmônico teste 3 - 5 últimos ciclos - Seixo.	88
Figura 104.	Soma dos harmônicos teste 3 - Seixo.	88
Figura 105.	Condeúdo harmônico teste 4 - Oscilografia 1 - Seixo.	89
Figura 106.	Condeúdo harmônico teste 4 - Oscilografia 2 - Seixo.	89
Figura 107.	Condeúdo harmônico teste 4 - 7 primeiros ciclos - Seixo.	89
Figura 108.	Condeúdo harmônico teste 4 - 3 últimos ciclos - Seixo.	89

Figura 109. Conteúdo harmônico teste 15 - Oscilografia 2 - Areia.	90
Figura 110. Conteúdo harmônico teste 15 - Oscilografia 3 - Areia.	90
Figura 111. Corrente teste 15 - Areia.	90
Figura 112. Corrente e tensão teste 15 - Oscilografia 2 - Areia.	91
Figura 113. Conteúdo harmônico tensão teste 15 - Oscilografia 2 - Areia.	91
Figura 114. Conteúdo harmônico tensão teste 2 - Concreto.	91
Figura 115. Conteúdo harmônico tensão teste 1 - Grama.	91

Lista de quadros

Quadro 1.	Características harmônicas - Testes com castanhola.	72
Quadro 2.	Características harmônicas - Testes com bambu.	76
Quadro 3.	Características harmônicas - Testes com mangueira.	78
Quadro 4.	Características harmônicas - Testes com ipê roxo.	80
Quadro 5.	Características harmônicas - Testes com concreto.	82
Quadro 6.	Características harmônicas - Testes com grama, seixo, areia e asfalto. .	87

Lista de tabelas

Tabela 1.	Valores típicos de corrente de FAI em sistema de 12,5 kV para diferentes superfícies de contato.	27
Tabela 2.	Principais características da forma de onda da corrente de uma FAI. .	33
Tabela 3.	Limiars adotados.	52
Tabela 4.	Equipamentos e materiais do LabFAI.	55
Tabela 5.	Testes com castanhola.	61
Tabela 6.	Testes com bambu.	62
Tabela 7.	Testes com mangueira.	63
Tabela 8.	Testes com ipê roxo.	63
Tabela 9.	Testes com concreto - Dia 1.	65
Tabela 10.	Testes com concreto molhado - Dia 2.	65
Tabela 11.	Testes com grama, seixo, areia e asfalto.	65

Lista de abreviaturas e siglas

A	Ampère
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
COD	Centro de Operação da Distribuição
DHT	Distorção Harmônica Total
FAI	Falta de Alta Impedância
FFT	Fast Fourier Transform
GE	General Electric
HIF	High Impedance Fault
kV	Quilo-Volt
kVA	Quilo-Volt-Ampère
LabFAI	Laboratório de Testes Experimentais de FAI
LEAT	Laboratório de Alta e Extra Alta Tensão
MM	Morfologia Matemática
MVA	Mega-Volt-Ampère
PMU	Phasor Measurement Units
RMT	Ramal Monofásico com Retorno pelo Terra
RNA	Rede Neural Artificial
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SEL	Schweitzer Engineering Laboratories
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SiC	Carboneto de Silício
STFT	Short-Time Fourier Transform
SVM	Support Vector Machine

THD	Total Harmonic Distortion
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UFPA	Universidade Federal do Pará
V	Volt
W	Watt
WT	Wavelet Transform

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Considerações gerais	20
1.2	Motivação	21
1.3	Objetivos do trabalho	22
1.4	Estado da arte	23
1.5	Contribuições da dissertação	25
1.6	Organização da dissertação	26
2	FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	27
2.1	Considerações gerais	27
2.2	Características das FAIs	28
2.3	Tipos de FAI	31
2.3.1	Shunt	31
2.3.2	Shunt-série	35
2.4	Identificação e localização de FAIs	41
2.5	Considerações finais	44
3	MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA	46
3.1	Considerações gerais	46
3.2	Método de Wontroba (2020)	46
3.3	Método de Torres et al. (2014)	49
3.4	Método de Subramanian e Venkataraman (2012)	50
3.5	Método de Lima (2016)	51
3.6	Considerações finais	52
4	LABORATÓRIO EXPERIMENTAL DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA	54
4.1	Projeto do Laboratório Experimental de Falta de Alta Impedância	54
4.2	Montagem do LabFAI	58
4.3	Testes de FAI shunt	59
4.3.1	Castanhola	60
4.3.2	Bambu	61
4.3.3	Magueira	62
4.3.4	Ipê roxo	62
4.4	Testes de FAI shunt série	63
4.4.1	Concreto e terra	64
4.4.2	Grama, seixo, areia e asfalto	64

5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
5.1	FAI shunt	68
5.1.1	Castanhola	68
5.1.2	Bambu	72
5.1.3	Mangueira	76
5.1.4	Ipê roxo	78
5.2	FAI shunt-serie	79
5.2.1	Concreto e terra	79
5.2.2	Gramma, seixo, areia e asfalto	83
5.2.3	Considerações finais	87
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	92
6.1	Conclusões	92
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	93
	REFERÊNCIAS	94

1 Introdução

1.1 Considerações gerais

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) têm como finalidade principal prover energia elétrica, com confiabilidade, segurança e qualidade, aos consumidores. Em geral, um SEP é composto pelos segmentos de geração, transmissão e distribuição. Os Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), por sua vez, são constituídos por um conjunto de instalações e equipamentos elétricos pertencentes a concessionárias de distribuição e consumidores. Estes sistemas são fisicamente interligados aos sistemas de transmissão, unidades de geração distribuída de médio e pequeno porte, e aos consumidores finais. Desse modo, as distribuidoras têm a incumbência de entregar energia elétrica aos consumidores localizados em sua área de concessão (ABRADEE, 2015; ANEEL, 2011).

No território brasileiro, as redes aéreas de distribuição convencionais são amplamente predominantes, nas quais os cabos condutores são tipicamente nus, ou seja, desprovidos de isolamento (OLIVEIRA, 2006). Por conseguinte, tais redes de distribuição são completamente suscetíveis a perturbações externas, apresentando um elevado índice de falhas (SARDETO, 1999). Dentre as falhas, destaca-se a falta de alta impedância (FAI), considerada uma das mais críticas (YEH et al., 2014).

A FAI ocorre quando um condutor energizado entra em contato com uma superfície de alto valor de impedância. Isso pode acontecer quando o condutor se rompe e entra em contato com o solo, areia, árvores, calçadas e brita, ou permanece intacto e entra em contato com árvores e construções (COSTA et al., 2015; IURINIC, 2016). Essa falta gera baixos níveis de corrente, o que muitas vezes compromete sua detecção pelo sistema de proteção convencional, que se baseia em sobrecorrente. Em grande parte dos casos, a amplitude da corrente gerada é similar à corrente de outros fenômenos, como chaveamentos e desligamentos de cargas (SANTOS et al., 2012). Como resultado, a concessionária registra poucos eventos reais em seus registros oscilográficos.

Dessa forma, em muitas circunstâncias, as empresas distribuidoras identificam as FAIs por meio de reclamações apresentadas pelos consumidores (SOUZA, 2017). Como resultado, pessoas e animais são expostos a riscos de choques elétricos, além disso, há riscos significativos de incêndios em automóveis, fauna e flora. (LIMA, 2016). Além disso, a interrupção no fornecimento de energia elétrica devido à FAI pode causar transtornos aos consumidores e prejuízos financeiros às concessionárias (FARIAS, 2017). Portanto, a ocorrência de FAIs representa um grande desafio para as concessionárias de energia elétrica devido à complexidade do problema de detecção deste tipo de falta e dos malefícios

significativos resultantes.

No entanto, apesar dos esforços para desenvolver métodos de detecção de FAI, ainda não existe uma solução completamente assertiva que funcione plenamente, uma vez que o arco elétrico produzido por este tipo de falta é influenciado por vários fatores, como tipo de superfície, umidade, conteúdo mineral, espessura do material, e outros. Além disso, a baixa amplitude da corrente gerada pela FAI, que em alguns casos pode se assemelhar a uma carga normal, dificulta a identificação precisa por parte dos detectores. Uma vez que o nível de corrente gerado não é suficiente para sensibilizar as proteções por sobrecorrente, a obtenção de oscilografias reais se torna um desafio. A busca por algoritmos e técnicas mais eficientes para a detecção de FAI continua sendo um desafio para a comunidade científica e profissionais da área de distribuição de energia elétrica.

1.2 Motivação

A ocorrência de um evento de FAI em redes aéreas de distribuição apresenta riscos significativos para seres humanos, animais e equipamentos elétricos, especialmente quando há formação de arco elétrico. O contato do condutor energizado rompido ou não rompido com superfícies em vias públicas, construções ou árvores é um grande problema de segurança, visto que pessoas e animais próximas ao referido contato podem ser eletrocutadas devido ao fenômeno da tensão de passo. Além disso, existe o perigo de o condutor energizado, ao se romper e cair, atingir diretamente seres vivos. Tal contato pode causar queimaduras, eletrocussão e até mesmo levar à morte, uma vez que o elevado potencial elétrico pode ocasionar o aquecimento e a combustão de certos materiais (IURINIC, 2016; TENGDIN et al., 1996). Assim, dentre as diversas formas de FAI, aquela que mais preocupa as concessionárias de energia elétrica é aquela que ocorre quando há o rompimento e queda do condutor primário energizado ao solo. Essa situação não apenas aumenta significativamente o risco de acidentes graves envolvendo seres vivos, mas também resulta na interrupção do fornecimento de energia elétrica (IURINIC, 2016; NAKAGOMI, 2006). Já a permanência da FAI com árvores pode provocar incêndios e agravar a situação (IURINIC, 2016).

Com base nas pesquisas jurídicas realizadas por Landini (2001), existem argumentos substanciais que indicam a responsabilidade, em parte ou integralmente, das empresas concessionárias de serviços públicos de energia elétrica pelos danos decorrentes de faltas de alta impedância. Além disso, há um reiterado julgado sobre esse assunto, o que tem levado o sistema judiciário brasileiro a ser mais inclinado a condenar as concessionárias a pagar multas compensatórias às vítimas em casos de ocorrência desse tipo de falha em seus sistemas elétricos. Sendo assim, as FAIs geram grandes prejuízos financeiros para as distribuidoras com custos de ações indenizatórias por acidentes com a população, custos com acidentes envolvendo funcionários e fornecedores, custos com acidentes com animais e

custo com incêndios em bens materiais, matas e florestas.

O problema de detecção e localização de um condutor energizado rompido pode causar uma interrupção parcial de energia elétrica, por um longo tempo, no alimentador afetado pela FAI, impactando negativamente os índices de continuidade da concessionária. Além disso, o problema resulta em aumento de custos associados com o deslocamento de equipes para realização de reparos na rede, uma vez que longos caminhos, por vezes, precisam ser percorridos pelas equipes para identificação visual da FAI (FARIAS, 2017; IURINIC, 2016). Os índices de DEC e FEC podem acarretar muitos casos os seus valores não sejam satisfatórios, conforme definido no PRODIST (SOUZA, 2017). Ademais, a ocorrência desses casos prejudica a imagem da concessionária (FARIAS, 2017). Logo, é necessário detectar e eliminar essa falta o quanto antes (KOTLINSKI, 2013).

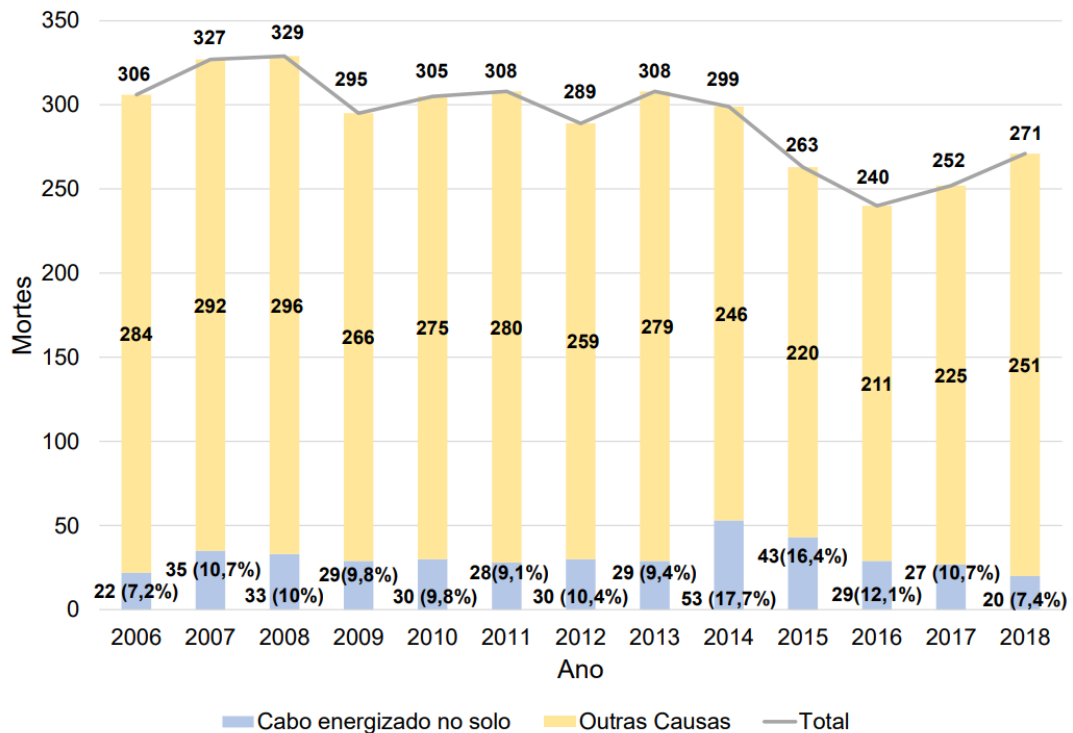
A Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE) relata, através de uma pesquisa sobre a segurança da população, que ocorreram 271 óbitos no ano de 2018 por acidentes em sistemas de distribuição de energia elétrica do Brasil. Dentre essas, 20 (7,4%) se devem às FAIs com condutores energizados rompidos ao solo, como mostrado na Figura 1. A figura também ilustra a quantidade e porcentagem de vítimas fatais desde 2006. Entre esses anos, o ano com maior quantidade de acidentes fatais é em 2014, com 53 óbitos, correspondente a 17,7%. Logo, comprova-se que acidentes fatais com FAI são casos recorrente e questão de segurança pública (ABRADEE, 2019). A atualização dessa pesquisa não ocorre desde 2018, possivelmente devido à pandemia.

1.3 Objetivos do trabalho

No âmbito da proteção de redes de distribuição de energia elétrica, o presente trabalho de mestrado tem como objetivo geral analisar no domínio do tempo e da frequência faltas de alta impedância ensaiadas em laboratório de rede de distribuição de média tensão. Para atingir esse objetivo geral, são estabelecidos objetivos específicos que se fazem necessários, sendo eles:

- Projetar e contruir laboratório de média tensão (13,8 kV) que possibilite ensaiar FAIs em ambiente similar ao real;
- Executar testes de FAI shunt e série em variadas superfícies, tais como: galho de árvore, areia, seixo, asfalto, concreto, etc;
- Analisar no domínio do tempo corrente e tensão de falta;
- Investigar o espectro harmônico de sinais de tensão e corrente FAIs, na qual inclui: Soma de harmônicos pares e ímpares, porcentagem do módulo do terceiro harmônico em relação à fundamental, ângulo do terceiro harmônico e comportamento dos harmônicos da tensão;

Figura 1. Acidentes fatais nos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil.



Fonte: Adaptado de ABRADDEE (2019).

- Analisar todos os testes ensaiados com a metodologia desenvolvida, correlacionando com o comportamento no domínio do tempo;
- Comparar os resultados obtidos com a literatura de detecção de faltas de alta impedância.

1.4 Estado da arte

Ao longo das últimas décadas, houve um crescente interesse em melhorar a confiabilidade dos detectores de FAI em redes de distribuição de energia elétrica. Vários estudos e pesquisas foram realizados com o objetivo de desenvolver métodos mais eficazes para detectar essas faltas. No entanto, mesmo com um extenso histórico de pesquisa nessa área, o problema da detecção de FAI ainda apresenta desafios significativos. Nesta seção, será feita uma revisão dos trabalhos relacionados à detecção de FAI por meio de harmônicos, explorando as abordagens e técnicas propostas pelos pesquisadores.

Zanjani (2013) propuseram um método para detectar falhas induzidas por arcos (FAI) usando Unidades de Medição Fasorial (do inglês: Phasor Measurement Units, abreviado PMU). O método consiste em duas etapas: a primeira analisa o erro entre os fasores

de corrente, identificando mudanças em caso de falha. A segunda etapa usa um índice baseado no ângulo de fase do terceiro harmônico para distinguir FAI de operação normal. O método mostrou bom desempenho ao detectar vários tipos de FAI e diferenciá-los de eventos normais, mas pode ser afetado por ruído e mistura de dados pré e pós-falha. Não foram realizados testes para diferenciar FAI de outros distúrbios, como chaveamento de banco de capacitores.

Yet et al. (2014) propuseram o uso da Fast Fourier Transform (FFT) e da Walsh Hadamard Transform para detectar FAIs com base no conteúdo harmônico de baixa frequência da corrente de fase. Os métodos foram testados em eventos de FAI causados por árvores, sendo analisados dois grupos distintos com características forma de onda. No primeiro grupo, a detecção foi feita com base na amplitude no domínio da frequência, enquanto no segundo grupo, foram necessárias análises adicionais, como o cruzamento por zero e a amplitude normalizada. Os métodos se mostraram eficientes nos testes realizados, mas é importante destacar que os limiares foram selecionados com base nos casos estudados.

Garcia (2014) propuseram um método de detecção de FAIs usando índices relacionados a componentes harmônicos, componentes de sequência e distorção harmônica total (DHT), calculados internamente por um medidor de qualidade de energia. O método consiste em três etapas: detecção inicial do evento com base em harmônicos específicos, cálculo de índices para classificação do evento e aplicação dos indicadores a uma Rede Neural Artificial (RNA) para classificação final. O método mostrou bom desempenho ao diferenciar FAI de outros distúrbios, como chaveamentos de cargas e capacitores, porém a aplicação em sistemas em tempo real pode ser dificultada devido ao treinamento necessário para as RNAs.

Subramanian e Venkataraman (2012) avaliaram três métodos de FAIs individualmente e propuseram a integração desses métodos para aumentar a confiabilidade da proteção. O método integrado utiliza características relevantes da corrente de FAI, como a presença do arco, a não linearidade da impedância de falta e a aleatoriedade da corrente. O método propõe o uso do 3^o harmônico da corrente e comparações com a componente fundamental, aplicando critérios de amplitude, fase e razão de amplitudes. É importante destacar que os autores usam a corrente de neutro e não de fase. Os testes mostraram que os métodos de alta frequência e do 3^o harmônico detectaram FAI de forma geral, mas não diferenciaram a saturação de transformadores de corrente. O método da componente fundamental teve algumas limitações na detecção. Embora os autores tenham proposto a integração dos métodos, não apresentaram resultados dessa abordagem combinada.

Santos et al. (2016) propuseram um algoritmo baseado em transitórios de FAI para identificar e localizar faltas desse tipo. Eles utilizaram a Transformada Wavelet para monitorar os componentes de baixa e alta frequência das tensões no sistema. O algoritmo foi validado por meio de simulações considerando vários distúrbios e um sistema

de distribuição de energia brasileiro real. A fase de detecção se baseou no crescimento da energia dos coeficientes wavelet acima de um limiar adaptável. O método apresentou bom desempenho na detecção de FAI e na redução do espaço de busca em até 70%. Ele pode ser aplicado em tempo real, não requer sincronização ou conhecimento dos parâmetros do sistema. O terceiro harmônico foi frequentemente utilizado, mas não é suficiente para distinguir FAI de outros distúrbios.

O método proposto por Benner e Russell (1997) utiliza a análise harmônica da corrente nos alimentadores, o comportamento randômico do sinal e a energia para gerar um índice de nível de confiança que identifica se o distúrbio presente é uma FAI. O método foi validado com a implementação em um relé comercial utilizando dados reais. No entanto, a confiabilidade do método para outros eventos na rede não foi apresentada.

Torres et al. (2014) propuseram um método de FAI que utiliza a Taxa de Distorção Harmônica (do inglês: Total Harmonic Distortion, abreviado THD) e avaliação de harmônicas ímpares e pares, além de analisar o 3° harmônico nas correntes de fase. O método, embora simples, apresentou uma boa capacidade de resposta para diferentes eventos de FAI. A utilização da THD permite identificar a presença de distorções harmônicas causadas pelas FAIs, enquanto a análise das harmônicas ímpares e pares ajuda a distinguir as falhas de arco de outros distúrbios. A detecção do 3° harmônico nas correntes de fase contribui para a identificação precisa das FAIs. O método proposto demonstrou ser uma abordagem eficiente e promissora para a detecção dessas falhas em sistemas elétricos.

Lima et al. (2018) propuseram o uso da Transformada Rápida de Fourier (do inglês: Short-Time Fourier Transform, abreviado STFT) para extrair os componentes harmônicos da corrente. Os harmônicos de ordem 2, 3 e 5 foram obtidos a partir da função da transformada. Uma lógica de detecção baseada nesses harmônicos foi empregada para identificar as FAIs. O algoritmo demonstrou robustez e conseguiu distinguir as FAIs de outros eventos com sucesso. Essa abordagem mostrou-se promissora para a detecção eficiente de FAI em sistemas elétricos.

Wontroba (2020) propôs um método baseado em componentes harmônicos, principalmente o terceiro harmônico, utilizando as correntes de fase e de neutro. Tais componentes são extraídas utilizando a FFT. O algoritmo desenvolvido apresentou uma taxa de acerto de 88% nos casos de FAI, superando outros métodos testados pelo autor. Foram realizados testes em tempo real utilizando uma plataforma de hardware e simulador OPAL-RT.

1.5 Contribuições da dissertação

- O trabalho apresenta um laboratório disruptivo e inovador, que permitiu e permitirá ensaiar FAIs em variadas provas de testes;

- Análise singular de FAIs sem interferência de outros sinais de rede;
- Estudo de FAIs que são de difícil detecção, como em asfalto e concreto, por gerarem corrente de falta praticamente nula;
- Avaliação do espectro harmônico da tensão de FAI;
- Relação do espectro harmônico com a corrente no domínio do tempo e características do ambiente de testes;
- Comparação de sinais puros de FAI com os limiares propostos em métodos de detecção.

1.6 Organização da dissertação

No Capítulo 2 será fornecida uma descrição abrangente das características das faltas de alta impedância. Serão discutidos os diferentes tipos de FAI e seus efeitos nos sistemas trifásicos. O capítulo fornecerá um embasamento teórico essencial para compreender a natureza e a complexidade das FAI, preparando o caminho para a análise dos métodos de detecção mais eficazes.

No Capítulo 3 serão descritos de forma minuciosa os métodos de detecção de faltas de alta impedância que serão utilizados na análise comparativa. Serão apresentados em detalhes os princípios e fundamentos desses métodos, bem como as técnicas e algoritmos empregados. Esse capítulo fornecerá uma compreensão aprofundada das estratégias de detecção existentes e servirá como base para a avaliação comparativa realizada neste trabalho.

No Capítulo 4 será apresentado o projeto e a montagem do laboratório destinado aos testes experimentais de FAI. Serão detalhadas as etapas e os procedimentos adotados para criar um ambiente de teste realista, reproduzindo a configuração de uma rede de distribuição de energia elétrica de média tensão. Serão descritos os equipamentos utilizados, a conexão das fases e do neutro, bem como os parâmetros de teste estabelecidos. Esse capítulo será fundamental para compreender a metodologia experimental adotada e garantir a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos nos testes realizados.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados da análise dos testes realizados, utilizando a técnica da FFT. Neste capítulo, é feita uma comparação dos resultados obtidos com os métodos da literatura abordados no Capítulo 3. É realizada uma análise detalhada do espectro harmônico das correntes de falta, correlacionando-o com o comportamento dessas correntes.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões alcançadas a partir dos resultados e análises realizadas neste trabalho. São destacados as principais descobertas, os pontos de destaque e as limitações identificadas.

2 Falhas de alta impedância

2.1 Considerações gerais

Faltas de alta impedância são distúrbios que ocorrem em sistemas de energia elétrica quando um condutor energizado entra em contato com uma superfície de alta resistividade elétrica, como árvores, solos de concreto, asfalto, grama, edificações, terra, etc (STEWART, 1979; HOU, 2007). A ocorrência destes eventos geralmente é observada em redes primárias de distribuição que operam com tensões entre 4 kV e 34,5 kV. A amplitude da corrente elétrica de uma FAI é baixa, variando de 0 A a menos de 100 A (HOU, 2007; TENGDIN et al., 1996).

Na Tabela 1, é possível verificar valores típicos de corrente de FAI em um sistema de distribuição de 12,5 kV para diversas superfícies de contato, observados em testes experimentais no trabalho de Russell (1982). É importante notar que esses valores são da mesma ordem de grandeza ou até inferiores às correntes de cargas dos alimentadores, podendo chegar a 0 A em alguns casos. Ademais, a amplitude de corrente de falta em solos pode variar de acordo com as estações do ano e a região geográfica em que se encontram (FARIAS, 2017).

Tabela 1. Valores típicos de corrente de FAI em sistema de 12,5 kV para diferentes superfícies de contato.

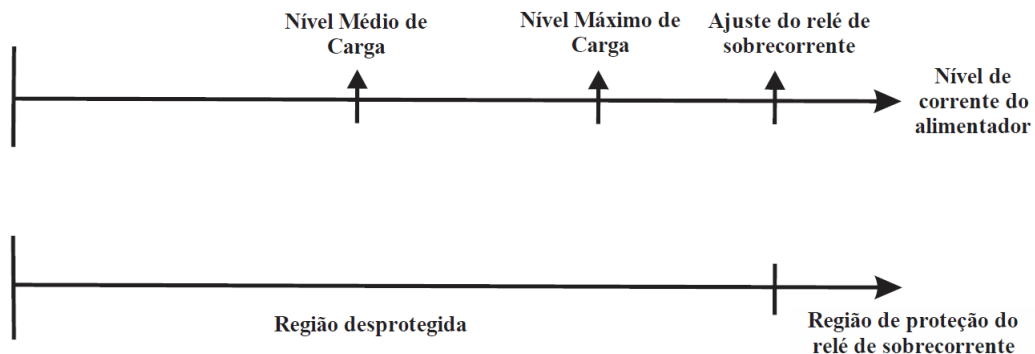
Superfícies	Corrente (A)
Asfalto seco	0
Areia seca	0
Concreto não armado	0
Areia molhada	15
Grama seca	25
Grama molhada	50
Concreto armado	75

Fonte: Russel (1989).

É válido destacar que, em sistemas com tensões acima de 34,5 kV, a corrente das faltas fase-terra apresentam amplitudes que permitem a detecção por meio de proteções baseadas em sobrecorrente (HOU, 2007). Na Figura 2, são apresentados os níveis de proteção dos relés de sobrecorrente, com ajuste acima do nível máximo de carga do alimentador. No entanto, em situações de FAI, a corrente elétrica apresenta baixa amplitude, o que resulta

no nível de corrente do alimentador permanecendo dentro da região desprotegida. Como consequência, a corrente de FAI muitas vezes não é detectada pelos sistemas de proteção convencionais (SANTOS, 2016). Diante dessa situação, é necessário adotar uma nova medida de proteção para identificar tais problemas, geralmente conhecida como detectores de FAI.

Figura 2. Níveis de proteção de um alimentador.



Fonte: Adaptado de Russel (1989).

Estudos recentes de Cordeiro et al. (2019) indicam que, em certas situações, a corrente de FAI pode atingir até aproximadamente 200 A, conforme evidenciado por oscilografias reais de FAI.

As distribuidoras de energia elétrica têm opiniões divergentes quanto à frequência real de ocorrência de FAIs, já que elas são registradas no banco de dados da concessionária apenas quando curtos-circuitos resultam na operação do sistema de proteção (FARIAS, 2017). Segundo Wester (1998), de 5% a 20% de todas as falhas que ocorrem no sistema de distribuição são FAIs.

No Brasil, alguns fatores favorecem a ocorrência de FAIs, incluindo a característica radial altamente ramificada da rede aérea convencional, a rede uniaterrada na subestação, a grande abrangência de área e a presença de cargas monofásicas (MAMEDE et al, 2013; ABRADÉE, 2019; SILVA, 1992; ROBERTS et al., 2001; OLIVEIRA, 2006). Embora não sejam tão frequentes quanto as falhas sólidas, as FAIs podem resultar em grandes riscos (NAKA et al., 1992).

2.2 Características das FAIs

As FAIs apresentam características peculiares em sua forma de onda, as quais são comuns independentemente da forma como são geradas (IURINIC, 2016). Além da baixa magnitude da corrente de falta, a presença do arco elétrico é uma das características

principais. Mesmo que a rede elétrica entre em contato com árvores, edifícios ou cabos caídos diretamente no solo, é comum que um arco elétrico seja formado. Isso ocorre devido ao alto potencial dos sistemas de distribuição de energia elétrica e à existência de lacunas de ar tanto abaixo do solo quanto próximo ao material em contato com o condutor (RUSSELL, 1982; IURINIC, 2016). As lacunas de ar surgem devido à fragilidade do contato entre o cabo e a superfície, tornando-o suscetível a perturbações até mesmo por movimentos bruscos do condutor (WONTROBA, 2020).

Pesquisadores identificaram algumas características nas correntes de FAI medidas no ponto da falta, as quais são geradas pela presença do arco elétrico, (JEERINGS et al., 1989; EMANUEL et al., 1990; DJURIC et al., 1995; NAM, 2001; NAKAGOMI, 2006), sendo estas: assimetria, não linearidade, intermitência, buildup e shoulder (IURINIC, 2016).

Emanuel et al. (1990) identificaram a assimetria, na qual a corrente apresenta o semiciclo positivo maior em amplitude do que o semiciclo negativo, fato decorrente das tensões de ruptura negativa e positiva serem diferentes. Esse comportamento não depende da amplitude da corrente, do formato do cabo ou do material utilizado na sua fabricação, e aparece principalmente por conta da porosidade e umidade da superfície de contato. Quando a falha ocorre em superfícies com sílica, a assimetria também pode ser atribuída ao aquecimento desta pelo arco elétrico, visto que uma vez aquecida forma uma “mancha catódica” capaz de emitir elétrons, facilitando o rompimento do dielétrico quando o condutor está submetido a uma tensão positiva. Essa característica causa o aparecimento de harmônicos de ordem par (NAKAGOMI, 2006).

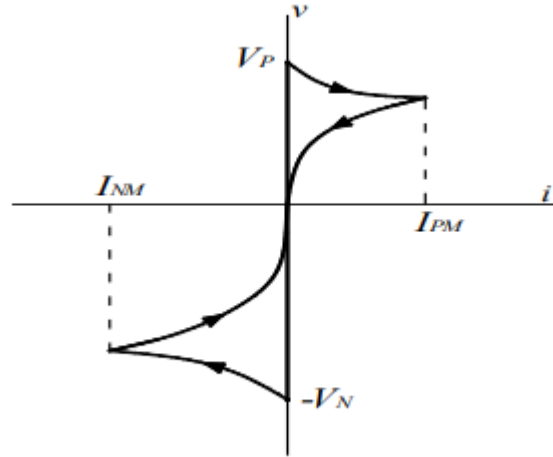
A FAI possui um comportamento puramente resistivo, pois no instante que a tensão é zero, a corrente também é zero (EMANUEL et al., 1990), diferente da maioria dos arcos elétricos verificados que ocorrem em circuitos de natureza altamente indutiva (JEERINGS et al., 1989). Entretanto, essa resistência tem comportamento não linear, devido às superfícies de contato que são não homogêneas, possuindo várias camadas com diferentes resistividades, e ao comportamento do arco elétrico (SOUZA, 2017; NAKAGOMI, 2006). Isso significa que a queda de tensão não é diretamente proporcional à corrente de falta. Essa não linearidade fica mais evidente na curva característica V_{xI} , que causa distorção da forma de onda (NAM et al., 2001).

A Figura 3 mostra uma curva V_{xI} real de experimentos realizados por Emanuel et al. (1990) com tensão sinusoidal em 60 Hz. Nessa é possível verificar a existência de uma tensão de ruptura dielétrica, na qual corrente começa a fluir a partir de um determinado valor de tensão, denominado de V_N para a tensão negativa e V_P para a tensão positiva. Quanto mais seco e denso o solo, maiores serão esses valores.

Conforme Santos et al. (2013), a deformação na curva V_{xI} apresenta variações de acordo com o tipo de solo. Na Figura 4, é possível observar as curvas V_{xI} para seis tipos

distintos de solo, ensaiados pelo autor. Tal característica ocasiona harmônicos de baixa ordem, aproximadamente do 3º ao 10º harmônico (NAKAGOMI, 2006).

Figura 3. Características de tensão x corrente de uma FAI.



Fonte: Emanuel et al. (1990).

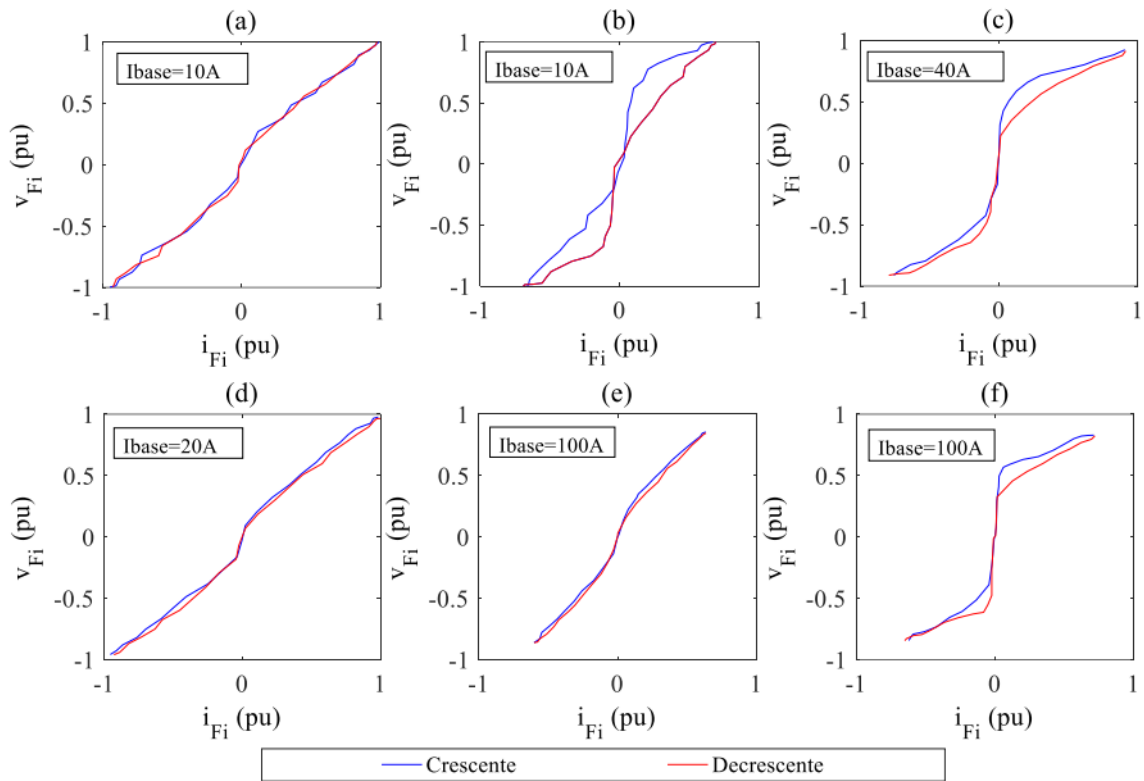
Devido à interrupção e reignição do arco elétrico a cada meio ciclo de rede, sua presença é notável na forma de onda da corrente, causando interrupções e reinícios abruptos próximos à passagem por zero. Na Figura 5, são exibidas as principais características da forma de onda da corrente durante uma FAI, incluindo as rápidas variações próximas à passagem por zero que geram harmônicos de ordem ímpar na corrente, com predominância do harmônico de 3ª ordem e ângulo deste próximo à 180° (LIU et al., 2016). De acordo com Liu et al. (2016), o harmônico de terceira ordem na corrente é responsável por 5% a 30% da corrente total de uma FAI, dependendo tanto do tipo de solo quanto da amplitude da corrente que ocorre durante a FAI, como mostrado na Figura 6.

A intermitência é uma descontinuidade momentânea da corrente provocada pela extinção e reignição do arco. Ocorre pelo processo da perda da umidade da superfície. Essa provoca o surgimento de um espectro de harmônicos de alta frequência (NAKAGOMI, 2006).

O buildup é o período de variação progressiva da corrente até o seu valor máximo. De acordo com (NAM et al., 2001), esse acontece devido à não acomodação física do cabo na superfície inicialmente, ou seja, o tempo que o cabo levar para assentar-se completamente no solo, determinando a resistência de contato final. Origina harmônicos intercalados (NAKAGOMI, 2006). O shoulder é o período em que a corrente de FAI permanece com os picos constantes entre o buildup (SANTOS, 2013). O buildup e shoulder podem repetir, alternadamente, mais de uma vez durante a falta (DJURIC et al., 1995).

As características citadas dependem das condições geométricas, espaciais, ambientais e elétricas do sistema (KAUFMANN et al., 1960). O comportamento das grandezas

Figura 4. Curva tensão-corrente para: (a) Areia; (b) Asfalto; (c) Cascalho; (d) Paralelepípedo; (e) Grama; (f) Solo local dos testes.



Fonte: Santos et al. (2013).

elétrica envolvidas nessa falha possui uma componente aleatória importante, como consequência das variações dessas condições (SANTOS, 2016). A Tabela 2 mostra um resumo de todas as características de FAI.

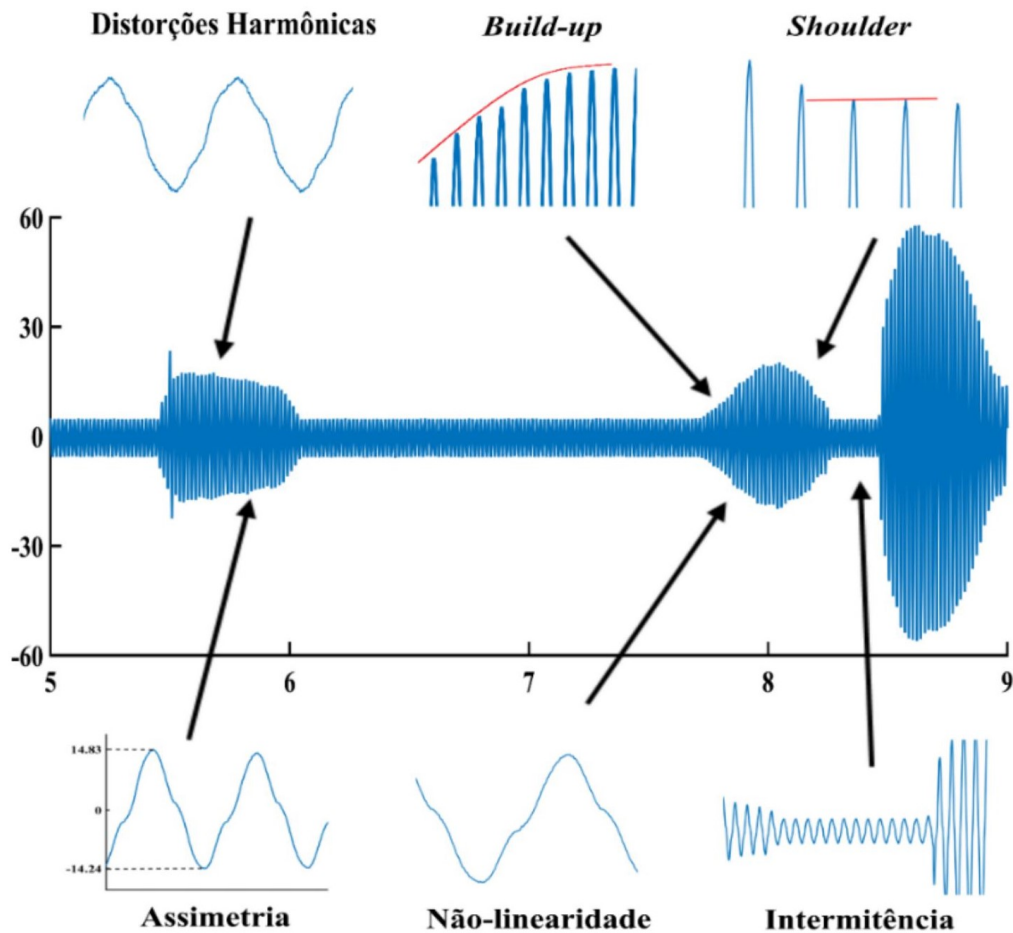
2.3 Tipos de FAI

Na literatura, é possível dividir as FAIs em dois tipos principais: shunt e shunt-série (IURINIC, 2016; SILVA, 1992). As FAIs shunt são caracterizadas pelo contato do condutor sem o rompimento do mesmo, já as shunt-série são aquelas na qual ocorre o rompimento de cabo. Dessa forma, a presente seção foi dividida com o objetivo de explicar separadamente cada tipo (RUSSELL, 1982).

2.3.1 Shunt

A falta shunt, também chamada de falta online, acontece quando há contato do condutor energizado não rompido com objetos estranhos, como galhos de árvore, animais ou construções. Vale frisar que não há desligamentos de cargas causados pela ocorrência de

Figura 5. Características da forma de onda de uma FAI.



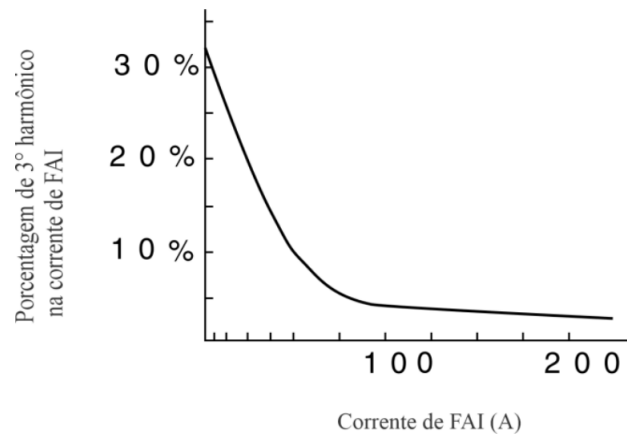
Fonte: Lima (2016).

uma FAI shunt no circuito primário de distribuição, uma vez que não há rompimento do condutor energizado. A Figura 7 ilustra uma FAI shunt resultante do contato de condutores energizados não rompidos com uma árvore (BALSER et al., 1986; IURINIC, 2016; SILVA, 1992). De tal forma, não há desequilíbrio significativo de tensão entre fases (OLIVEIRA, 2006).

A partir do momento que este tipo de FAI surge, é possível notar um aumento na corrente do alimentador, como pode ser observado na Figura 8 (ROSSINI et al., 2019). A magnitude da corrente de falta dependerá da impedância do objeto em contato (OLIVEIRA, 2006). Como essa situação provoca arcos elétricos, o tempo de permanência pode resultar em incêndios (IURINIC, 2016).

As linhas que compõem o sistema de distribuição muitas vezes necessitam atravessar zonas arborizadas, fato que torna inevitável o contato direto dos condutores energizado com folhas em crescimento, galhos ou troncos de árvores inclinados. Os troncos de árvores vivas

Figura 6. Relação de terceiro harmônico na corrente de FAI.



Fonte: Liu et al. (2016).

Tabela 2. Principais características da forma de onda da corrente de uma FAI.

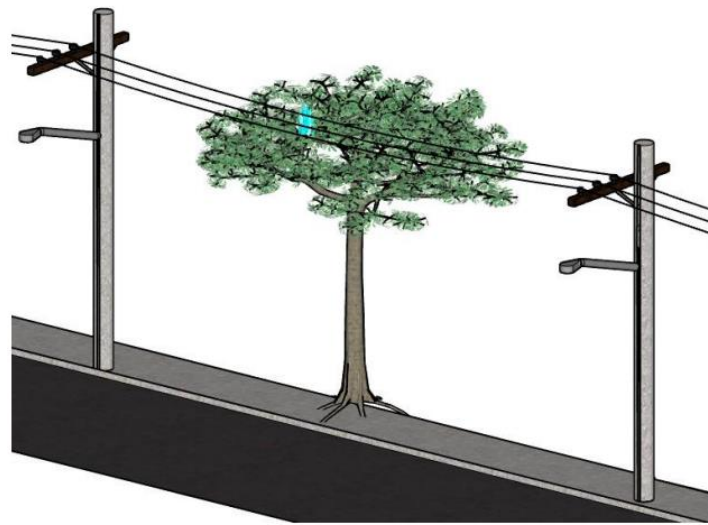
Intermitência	A corrente sofre interrupção em momentos específicos durante a ocorrência de uma FAI. Gera harmônicos de alta frequência
Assimetria	Diferença entre o semiciclo positivo e negativo, que ocorre devido à tensão de ruptura do arco elétrico. Gera harmônicos de ordem par.
Buildup e shoulder	Crescimento e estabilização da envoltória da corrente. O primeiro produz inter-harmônicos.
Não linearidade	A curva $V \times I$ apresenta comportamento não linear devido à presença do arco elétrico e também ao tipo de solo. Produz harmônicos de ordem ímpar.
Aleatoriedade	Variações aleatórias na amplitude e na intermitência.
Amplitude	Baixa magnitude da corrente.

Fonte: Adaptado de Ghaderi et al. (2017) e Souza (2017).

fornece um caminho para a corrente de falta através de suas raízes, que se comportam como um bom aterramento. Essa corrente estabelece uma distribuição de potencial elétrico ao longo do tronco da árvore, e em alguns pontos ao longo deste o valor de tensão pode ser suficientemente elevado para causar eletrocussão em seres vivos (BUTLER et al., 1999).

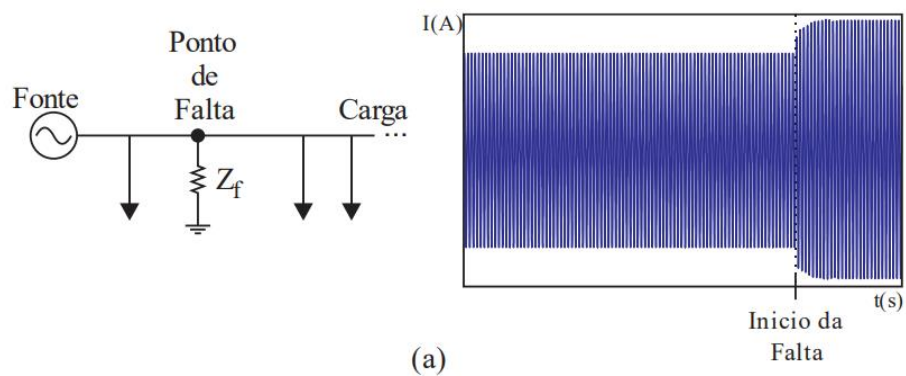
A resistividade do tronco de uma árvore, em alguns casos, pode ser considerada uniforme em todo o seu volume por conta do grau considerável de umidade (DAILY, 1999). Por sua vez, essa resistividade uniforme permite considerar que o tronco se comporta como uma resistência linear, fato comprovado por Elkalashy et al. (2007), que consideram os valores de resistência entre 200 k Ω e 800 k Ω . Vale ressaltar que essas considerações sobre a resistividade do tronco de árvores são restritas aos tipos de árvores, metodologia e condições dos testes dos trabalhos dos autores citados, não necessariamente abrangendo

Figura 7. FAI shunt com árvore.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8. Simulação do comportamento da corrente de FAI shunt.



Fonte: Wontroba (2020).

todos os tipos de árvores.

Normalmente, o contato entre um condutor energizado e uma árvore ocorre através de um arco elétrico, e como o tronco se comporta como um resistor linear, o arco se torna o maior responsável pela geração de harmônicos registrados nos sinais de tensão e corrente. O risco associado a esse caso pode ser mais ou menos fatal dependendo da resistividade da árvore ou do elemento em contato (IURINIC, 2016).

Nos testes realizados em laboratório por Elkalashy et al. (2007), foi relatado que o tempo em que o arco permanece extinto é mais prolongado no caso de contato com folhas e de menor duração no caso de contato com o tronco. Também foi verificado nos ensaios

que após o início do arco, ao afastar a árvore do condutor a uma distância maior que 4-7 cm, esse foi alongado e então extinto. Tal cenário mostra que a falha é autoextinguível. Contudo, se a distância entre a árvore e o condutor for constante, a FAI continua de forma permanente.

Dessa forma, essa falha pode ser permanente ou temporária, dependendo da situação de ocorrência (SILVA, 1992). O atrito com a casca da árvore e os efeitos do arco elétrico podem debilitar a estrutura mecânica do condutor e transformar a falta shunt em uma falta shunt-série (IURINIC, 2016). Defeitos de fabricação, poeira na superfície de isoladores e quebra parcial de postes também são causadores desse tipo de FAI (LEITE, 2017; FANUCCHI, 2014). Caso o poste em que esse isolador esteja instalado não seja aterrado e ainda estiver instalado sobre superfícies de alta impedância, a impedância de falta será elevada e a corrente de falta poderá não ser detectada pelo sistema de proteção (FANUCCHI, 2014).

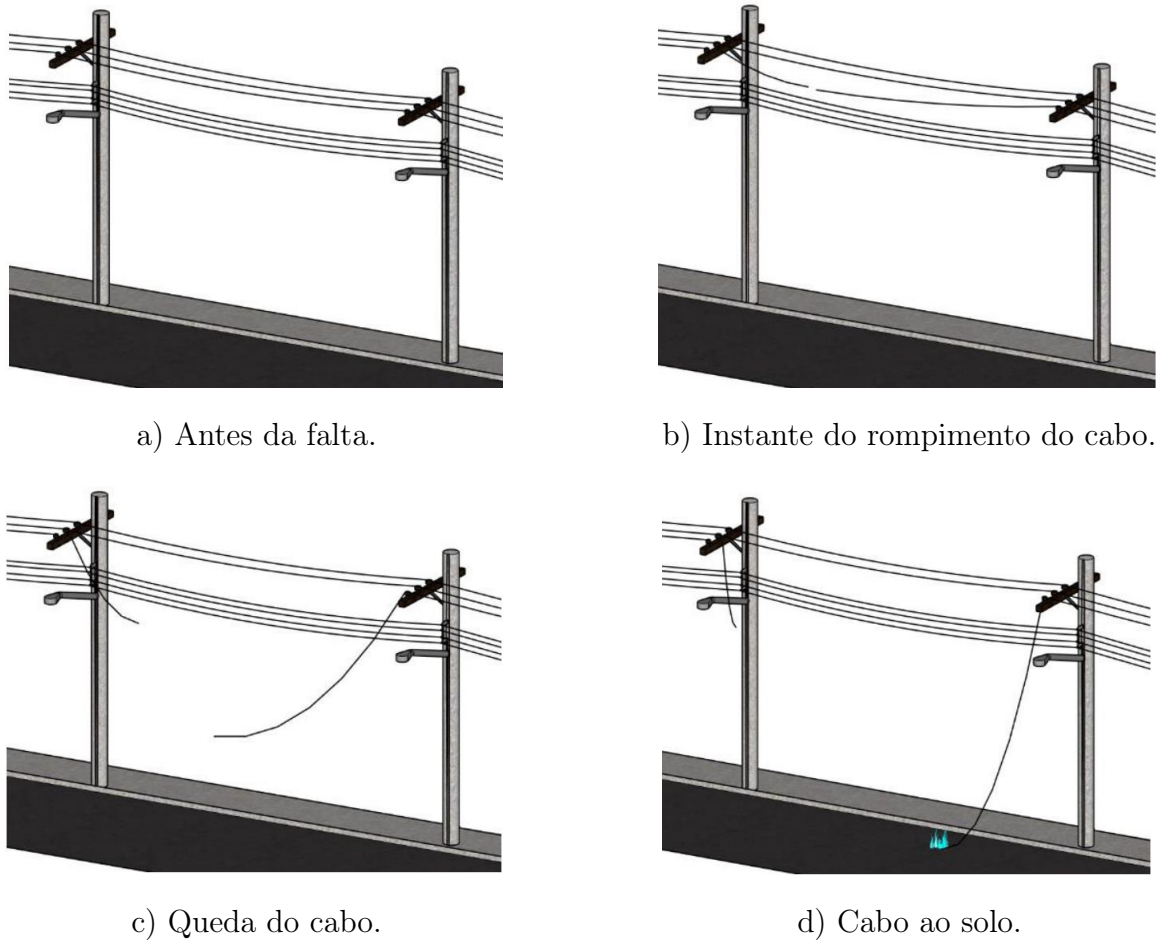
2.3.2 Shunt-série

A falta shunt-série, também chamada de falta série ou offline, é quando ocorre o rompimento, queda e contato do condutor primário energizado com superfícies de baixa condutividade, interrompendo a corrente de carga (BALSER; CLEMENTS; LAWRENCE, 1986; SILVA, 1992). Exemplo dessas superfícies são: asfalto, areia, concreto e grama (AUCOIN; JONES, 1996). Tipicamente, essa falta é permanente e necessita de localização e reparo (SILVA, 1992).

A Figura 9 ilustra essa sequência de eventos em quatro etapas. A primeira etapa corresponde à condição pré-falta, onde as correntes que circulam pela rede são devidas somente às cargas. Na segunda etapa ocorre o rompimento de um ou mais cabos das fases da rede primária. Após esse rompimento, o cabo leva um certo tempo, que dependerá da altura da rede primária, até atingir o solo, mostrado na terceira etapa. Na quarta e última etapa, o cabo chega ao solo e inicia a FAI (NAKAGOMI, 2006).

É comum o condutor energizado ao entrar em contato com superfícies de alta impedância não manter um contato elétrico firme, podendo não permanecer parado na superfície inicialmente. O ar se comporta como um bom isolante à uma pequena diferença de potencial com uma pequena distância. Ao aumentar essa diferença de potencial, a resistência do ar diminuirá significativamente a partir de um certo limiar e ao ultrapassar esse, ocorre o rompimento do dielétrico, permitindo a passagem de corrente elétrica. O rompimento inicia com os elétrons livres acelerados pelo campo elétrico. As moléculas neutras do ar são ionizadas a partir de uma certa quantidade de energia cinética contida por esses elétrons, através de colisões com as mesmas, e liberam novos elétrons livres que colidem com outras moléculas neutras. A repetição sucessiva dessas colisões em um curto espaço de tempo causa um fenômeno de avalanche, responsável por tornar o ar um

Figura 9. Sequência de eventos considerada para a FAI ativa shunt-série em rede de distribuição aérea primária.



Fonte: Autoria própria.

condutor elétrico (NAKAGOMI, 2006).

Com isso, pode ocorrer a condução de corrente de forma contínua, chamada de arco elétrico. Esse fenômeno acontece desde que a resistência associada ao arco seja suficientemente baixa e a diferença de potencial aplicada suficientemente alta. Geralmente o arco não ocorre imediatamente, é comum que ocorra um centelhamento antes, caracterizado como uma sequência rápida de rompimentos momentâneos do dielétrico (NAKAGOMI, 2006).

Emanuel et al. (1990) realizaram experimentos em uma montagem de laboratório a fim de estudar o comportamento do arco elétrico em faltas de alta impedância. Apesar dos resultados obtidos serem para uma situação específica, são úteis para a caracterização do comportamento do arco elétrico. Estes comprovaram que em solos arenosos com umidade em excesso (15% a 20%), o arco elétrico não é iniciado no momento que o condutor toca o solo, apenas quando o solo é aquecido, pois o vapor aumenta a porosidade deste. Como a área de contato é pequena, a densidade de corrente e gradiente de potencial elétrico

são elevados, resultando em um arco localizado. Com a propagação do arco no solo, se eleva tensão de arco e a área de contato efetiva. O condutor é aquecido pelo arco, devido do aumento do gradiente de potencial que esse provoca, e libera íons metálicos. Esse fenômeno produz o afastamento do condutor da capa condutiva do solo, contribuindo para o crescimento do arco e penetração no solo (JEERINGS et al., 1989).

O carboneto de silício (SiC) está presente na maioria dos solos e ao ser aquecido torna-se uma substância vitrificada, que funciona como um cátodo, emitindo elétrons quando a tensão do condutor é positiva, na qual reduz a queda de tensão e eleva a corrente. Quando o arco penetra o solo, a área em volta do cabo fica mais seca e o balanço entre a taxa de geração de calor e a taxa de transmissão de calor para o solo é alterado. Esses dois fatores resultam na extinção do arco e existem duas possibilidades a partir disso. A primeira é a umidade se difundir novamente no solo seco e o arco é reiniciado quando a umidade se aproxima do condutor a uma distância suficiente para romper o dielétrico. Como o caminho inicial possui fulguritos, que são estruturas tubulares rochosas provenientes da vitrificação de sílica, o caminho percorrido pelo arco será diferente. A segunda é o caso no qual o condutor caído toque em múltiplos pontos, outro ponto pode iniciar um arco devido às mudanças na distribuição do campo elétrico no solo (EMANUEL et al., 1990).

A resistência de contato de defeito é aleatória devido à natureza dos fenômenos envolvidos, mas com uma tendência definida. Pode-se considerar que é um processo aleatório com memória. Tal resistência é uma associação entre a resistência do solo, a resistência do arco e uma resistência diferenciada que surge ao longo dos fulguritos (NAKAGOMI, 2006).

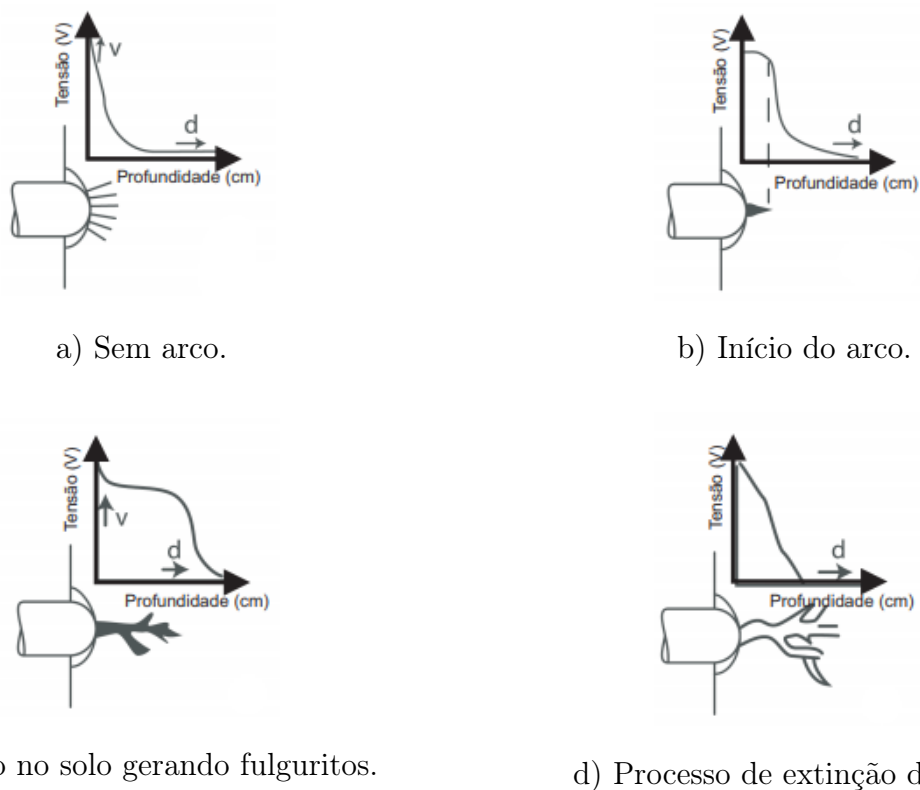
Os fulguritos se comportam como resistência lineares com resistividade na faixa de 2 a 100 k Ω /m, tipicamente menor que a do solo adjacente, modificando o gradiente de campo elétrico ao seu redor (EMANUEL et al., 1990; NAKAGOMI, 2006). Devido a isso que a árvore de fulguritos passa a ganhar volume, pois as regiões onde ocorrem os arcos tendem a migrar para o limite destes caminhos, se estendendo e alastrando. Isso faz com que surja uma espécie de eletrodo de aterramento para a corrente da falta, distribuindo-a no solo progressivamente. Essa resistência inicialmente não existe, mas influencia gradativamente na resistência equivalente de contato (NAKAGOMI, 2006).

A resistência do arco é variável e depende da distância entre a superfície do condutor e as partículas do solo, da composição do ar, do gradiente e da intensidade do campo elétrico, da temperatura, etc. À medida que ocorre o efeito e são formados os fulguritos, todas essas condições variam. Além disso, não ocorre apenas um arco contínuo, mas um conjunto de pequenos arcos simultâneos nos pontos de gradiente mais elevado, também variando ao decorrer do defeito (NAKAGOMI, 2006).

A resistividade do solo varia de acordo com o calor gerado pelo arco (NAKAGOMI, 2006). Ademais, a vaporização da vegetação ou da terra pelo calor do arco também pode afetar o comportamento do arco de maneira desconhecida (JEERINGS et al., 1989).

A Figura 10 ilustra o desenvolvimento do arco em quatro etapas. Na 10(a) mostra o condutor ainda sem a presença do arco. Na 10(b) o arco é iniciado, na qual a distribuição do campo elétrico no solo é modificada de forma drástica, com um crescimento acentuado desse na “ponta” do arco elétrico. Na 10(c) o arco já adentra ao solo e surgem fulguritos. Na 10(d) há a extinção do arco elétrico, permanecendo apenas o caminho vitrificado (NAKAGOMI, 2006). Jeerings et al. (1989) descrevem em seu trabalho que o comprimento do arco elétrico é curto, 5 cm ou menos, e a corrente desse arco apresenta baixa magnitude. Logo, é diferente do arco de uma linha de transmissão, na qual pode ter vários centímetros e a corrente inicial milhares de amperes.

Figura 10. O desenvolvimento do arco elétrico em solo arenoso.



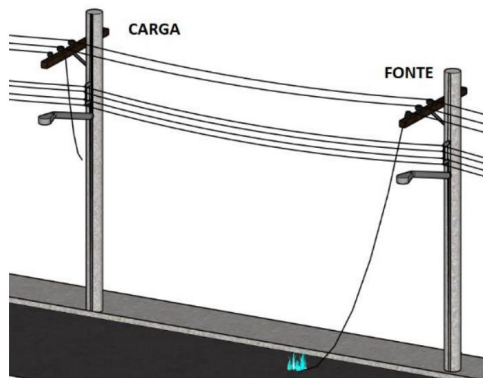
Fonte: Nakagomi (2006).

O cabo rompido pode entrar em contato com a superfície de alta impedância do lado da fonte, do lado da carga ou até mesmo com ambos os lados. Em casos de FAI que ocorre o rompimento do condutor, pode haver uma mudança no perfil de carga do alimentador. Essa mudança pode ou não interferir no algoritmo de detecção (WONTROBA, 2020).

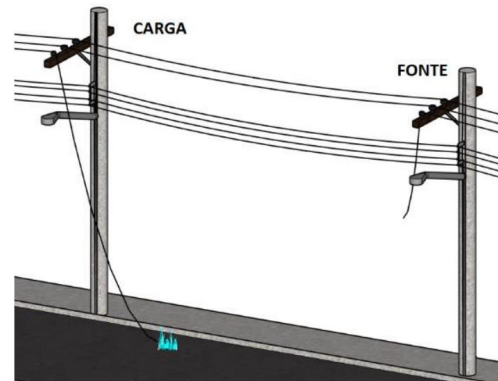
Quando o contato do cabo ao solo é do lado da fonte de energia do sistema, como mostra na Figura 11(a), irá ocorrer a redução da corrente de fase e após alguns instantes a corrente de FAI se somará à corrente de fase, como simula a Figura 12. A fonte irá alimentar diretamente a falta e a corrente é limitada pela impedância da superfície de contato.

Figura 11. Cenários possíveis para a ocorrência da FAI ativa shunt-série.

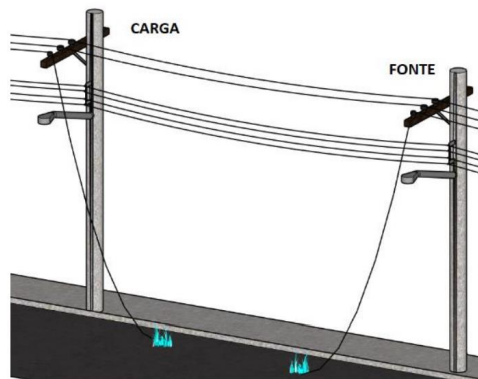
(a) Lado da fonte.



(b) Lado da carga



(c) Ambos os lados.



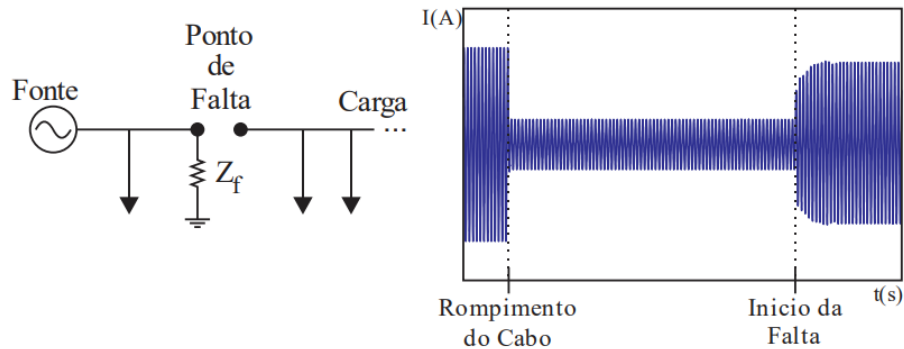
Fonte: Autoria própria.

Quando o rompimento é pelo lado da carga, como na Figura 11(b), a corrente de falta vai depender, além da impedância da superfície, da indução entre a fase faltosa e a corrente nas outras fases, do efeito capacitivo da linha e do carregamento de algum transformador à jusante (IURINIC, 2016). Ainda que não apresentem características visíveis de FAI, essas ocorrências podem ocasionar uma FAI. Isso se deve ao fato de que, em redes trifásicas, a tensão no lado da carga permanece presente em razão da interligação dos transformadores da rede. A única situação em que não se verifica tensão no ponto de falha no lado da carga são nos ramais monofásicos.

A corrente do arco elétrico é suprida pelas fases não afetadas por meio da conexão delta dos transformadores, como mostra a Figura 13. Embora essa seja a configuração predominante no sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil, é relevante ressaltar que essa situação ocorrerá somente em alimentadores trifásicos, nos quais o transformador da subestação está conectado em estrela aterrado e os transformadores distribuídos ao longo da rede estão conectados em delta.

Quando ocorre FAI com esse tipo de configuração, os algoritmos de detecção que

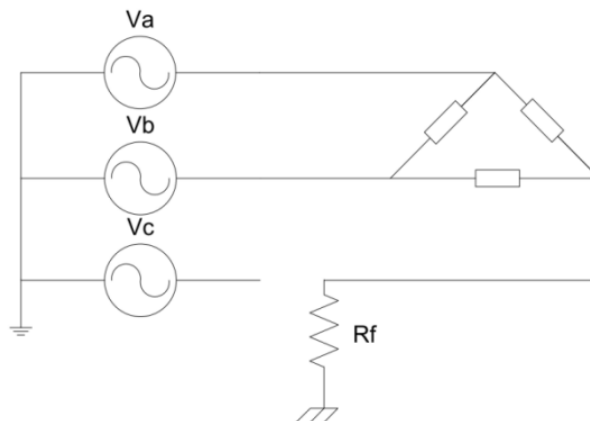
Figura 12. Simulação do comportamento da corrente de FAI shunt - Rompimento do lado da fonte.



Fonte: Wontroba (2020).

dependem da corrente de fase podem apresentar erros. Uma opção alternativa é utilizar a corrente de neutro ou das outras fases para detectar esse tipo de falha. Além disso, a tensão no condutor é bastante inferior à tensão nominal do alimentador (OLIVEIRA, 2006). A única consequência observada será a diminuição da corrente de carga, como mostra a Figura 14.

Figura 13. FAI no lado da carga.

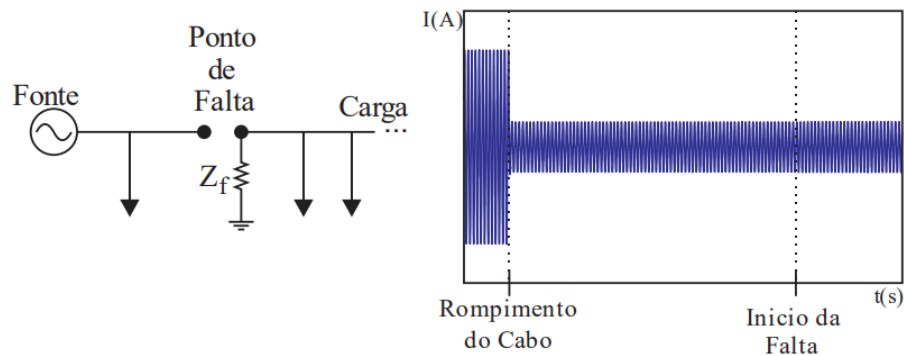


Fonte: Farias (2013).

A Figura 11(c) ilustra quando o cabo rompe e consegue tocar à superfície de contato em ambos os lados. Esse caso é uma combinação dos dois casos anteriores (IURINIC, 2016). A corrente irá se compartilhar da mesma forma que a falha pelo lado da fonte, como mostra a Figura 15.

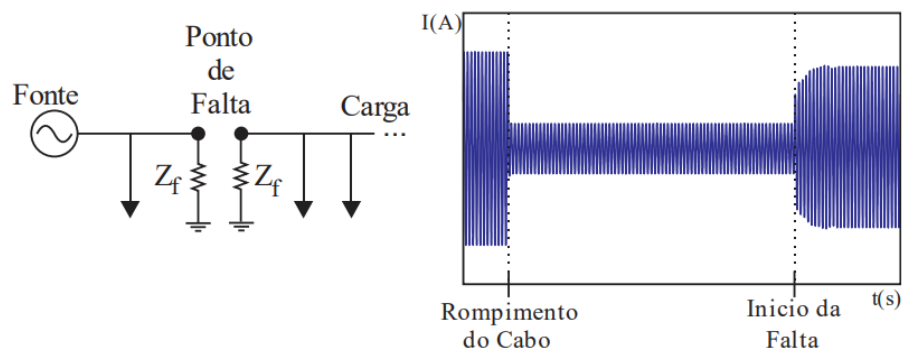
Além das superfícies citadas, o cabo pode romper e tocar qualquer outra superfície que apresente alta impedância, como árvores e veículos, com a possibilidade de surgimento

Figura 14. Simulação do comportamento da corrente de FAI shunt - Rompimento do lado da carga.



Fonte: Wontroba (2020).

Figura 15. Simulação do comportamento da corrente de FAI shunt - Rompimento em ambos os lados.



Fonte: Wontroba (2020).

de arco elétrico, dependendo das condições específicas da falta (LEITE, 2017). Em todos os casos há desequilíbrio de tensão à jusante do ponto de rompimento (OLIVEIRA, 2006).

2.4 Identificação e localização de FAIs

As FAIs são problemas recorrentes, desde 1960 são reportadas necessidades de sua identificação (KAUFMANN, 1960). As empresas Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) e General Electric (GE) comercializam detectores de FAI, porém não fornecem informações sobre a taxa de precisão desses dispositivos (SEL, 2022; GE, 2022). Quanto à localização, é reconhecido por pesquisadores e engenheiros como um problema difícil de solução. Até o momento, ainda não há uma função de estimação de distância ou localização disponível comercialmente em relés (LEÃO et al., 2020).

Devido as características dessa serem muitos sutis quando comparadas aos sinais presente no sistema de distribuição de energia elétrica, detectá-la é uma tarefa difícil a qual tem sido alvo de pesquisas há muito tempo. A detecção e classificação de um distúrbio eletromagnético no sistema elétrico de potência são os primeiros passos a serem dados para que se possa armazenar os sinais digitalizados e deste modo analisar e inferir sobre a probabilidade de um local de falta (IURINIC, 2016).

A corrente drenada por uma FAI tende a ser bem menor que a corrente de falta franca e geralmente é da mesma ordem de grandeza da corrente gerada por outros fenômenos na rede, como religamento de cargas e chaveamento de banco de capacitores, dificultando os ajustes do sistema de proteção por sobrecorrente (STEWART, 1979; ADAMIAK et al., 2006). A ordem de grandeza dessa corrente não produz um aumento substancial na corrente do sistema justamente pelo fato da superfície de contato da falta ter uma impedância muito alta frente à tensão aplicada do sistema de distribuição e/ou a ocorrência dessa falta estar em uma localização eletricamente remota em relação à subestação, reduzindo a corrente de curto-circuito (STEWART, 1979; SILVA, 1992). Por conseguinte, é uma falha mascarada pelas condições do sistema e não é suficiente para sensibilizar o sistema de proteção convencional, como fusíveis, relés e religadores, pois se fundamentam na proteção de sobrecorrente de fase e neutro, instantâneo e temporizado, baseando-se na curva que relaciona tempo e corrente (PAITHANKAR et al., 2010; SANTOS et al., 2012; NAKAGOMI, 2006).

Os limites dos relés de corrente são elevados pois não podem atuar para correntes de inrush, durante surtos de energização ou na presença de cargas monofásicas (SILVA, 1992). Para a proteção temporizada de fase, o pick-up geralmente é ajustado para valores entre a corrente de carga máxima e a corrente mínima de curto-circuito bifásico (GIGUER, 1988; CPFL ENERGIA, 2016). A proteção temporizada de neutro tem o objetivo de detectar as correntes de falta para a terra e correntes de desequilíbrio que ultrapassam os limites pré-determinados (OLIVEIRA, 2006). Normalmente, o ajuste da proteção temporizada de neutro é entre a corrente máxima de desequilíbrio entre fases e o menor valor da corrente de curto-circuito fase-terra (GIGUER, 1988).

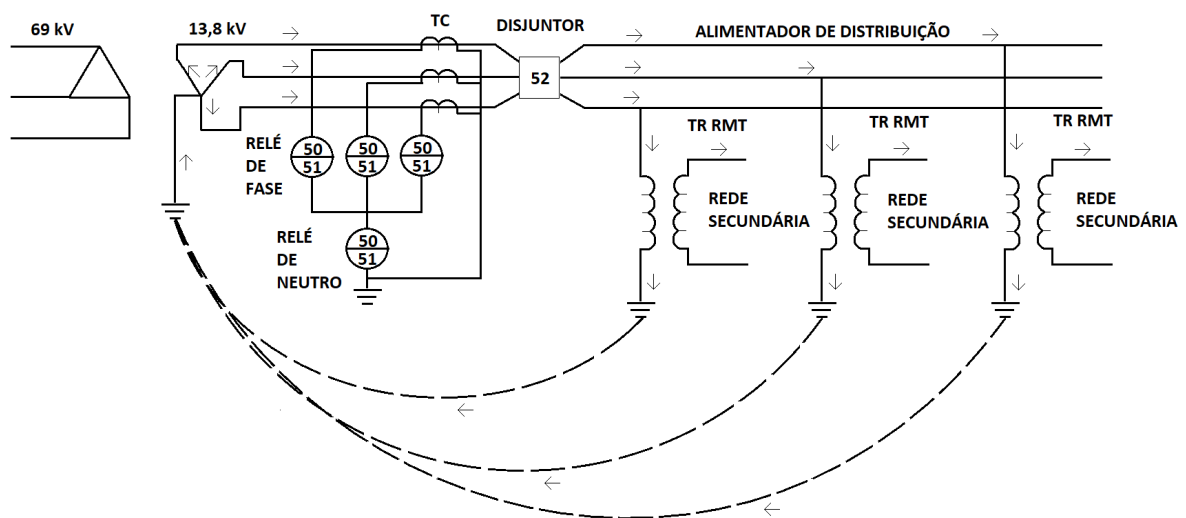
O sistema de aterramento adotado por grande parte das distribuidoras nas redes de média tensão no Brasil é o aterramento sólido, com o neutro uniaterrado, somente na subestação, com ou sem a presença do condutor neutro acompanhando as fases. Nesse, ao ocorrer uma falta fase-terra, apenas a corrente de defeito é conduzida à subestação pela terra, não há correntes residuais de retorno, somente correntes parasitas capacitivas e ruídos, já correntes de desbalanço do sistema ficam confinadas no delta do transformador de distribuição, na baixa tensão (COSTA, 2012, ROBERTS et al., 2001; SATO et al., 2015).

Os ramais monofásicos com retorno pelo terra (RMTs) são conectados diretamente

à rede primária, sem acompanhamento do neutro, e responsáveis por alimentarem cargas monofásicas (fase-terra), como é o caso de áreas rurais e, como já diz o nome, o caminho de retorno da corrente é pela terra devido possuírem um terminal à terra (FILHO; MAMEDE, 2013). Tais acabam que por drenar um fluxo de potência considerável levando em consideração a extensão territorial do Brasil. Apesar da concessionária se preocupar em dividir os fluxos de potência entre as fases nos diversos ramais para que não exista desbalanço, é impossível que não haja (COSTA, 2012; ROBERTS et al., 2001; SATO et al., 2015; HOU, 2007).

Dado que a maioria das FAIs são fase-terra (RUSSELL, 1982), essa falha se torna problemática para o tipo de aterramento adotado no Brasil por conta da presença de inúmeros RMTs visto que o retorno da corrente de FAI fase-terra é o mesmo caminho usado pelas correntes das cargas conectadas fase-terra, através da terra até o neutro da subestação (COSTA, 2012; ROBERTS et al., 2001; MAMEDE et al., 2013). A Figura 16 exhibe o esquema de conexão de cargas monofásicas à rede primária.

Figura 16. Esquema básico de ligação de sistemas monofilar com retorno pelo terra.



Fonte: MAMEDE et al. (2013).

As correntes primárias de carga dos RMTs, correntes de sequência zero, podem sensibilizar os relés de neutro, dependendo do valor do seu ajuste e do desequilíbrio de corrente do alimentador, o que exige que o pickup de neutro temporizado seja ajustado para valores na faixa superior aos valores normais (MAMEDE et al., 2013). Os critérios de desequilíbrio de fase podem variar de concessionária para concessionária, valores típicos de ajustes da proteção de terra estão na faixa de 30% a 50% do ajuste do relé de fase. Para atuar em casos de FAI, os ajustes da proteção de sobrecorrente precisariam ser definidos em valores tão baixos que cruzariam com os valores da corrente de carga, sacrificando a confiabilidade, de tal modo que o sistema proteção poderia atuar mesmo sem a ocorrência

de nenhuma falha na rede. Desse modo, como os relés de proteção tradicionais normalmente não podem ser ajustados para detectar FAI sem a operação incorreta para cargas pesadas, geralmente existem pontos cegos na proteção, que podem resultar em condições de risco para população e funcionários/prestadores de serviço da concessionária de distribuição (OLIVEIRA, 2006). Na Figura 2 pode ser vista a região não protegida pelas proteções de fase e neutro.

Logo, em muitos casos, o defeito permanece até que algum equipamento de manobra ou proteção seja aberto por decisão do Centro de Operação da Distribuição (COD) (OLIVEIRA, 2006). Em áreas urbanas, algumas FAIs podem sensibilizar a proteção convencional. Contudo, muitas vezes as distribuidoras nacionais tomam conhecimento da ocorrência de FAIs através de informações oriundas de consumidores (SOUZA, 2017; LIMA, 2016).

Ao cair um condutor energizado no solo, todos os consumidores alimentados por este serão prejudicados pela falta de energia. Dessa forma, quanto maior o tempo de identificação de FAIs pela concessionária, maior será o tempo que os condutores energizados ficam expostos à população e animais. Já em áreas rurais, devido à baixa densidade de consumidores, as FAIs podem permanecer por muito tempo, até dias (SOUZA, 2017; LIMA, 2016). Sendo assim, o tempo de reestabelecimento da energia elétrica pode ser ainda mais elevado do que para faltas de baixa impedância (FARIAS, 2017).

2.5 Considerações finais

A principal dificuldade de estudar a FAI é devido a carência de registros de oscilografias associadas a incidentes reais (OLIVEIRA, 2006). Como apenas os curtos-circuitos que resultam na operação de algum dispositivo de proteção são registrados no banco de dados das distribuidoras, dificilmente essas são registradas para realização de estudos (FARIAS, 2017). Eventos de FAI em campo podem ser encenados em redes de distribuição reais para captura da forma de onda da tensão e da corrente pelo relé na subestação, mas em locais com pouca movimentação de pessoas e animais. Contudo, impõem riscos elevados à integridade dos ativos da rede de distribuição e possibilidade de interrupção no fornecimento de energia, o que impacta nos índices de qualidade da concessionária (IURINIC, 2016).

Os modelos matemáticos de FAI são essenciais em muitas técnicas que se baseiam nas características inerente dessa para fins de detecção e localização em redes aéreas de distribuição. Entretanto, para alguns casos, as características de FAI ainda não foram totalmente determinadas e extraídas das formas de onda de tensão e corrente para fins de detecção e localização de FAI (LEÃO et al., 2020). As principais contribuições para o estudo da natureza dessas faltas foram de ensaios experimentais em laboratório (OLIVEIRA,

2006). Portanto, no capítulo seguinte serão abordados métodos de detecção fundamentados em harmônicos de baixa ordem, com limiares definidos a partir de sinais de FAI reais e/ou ensaiados em laboratório.

3 Métodos de Detecção de Falta de Alta Impedância

3.1 Considerações gerais

Vários algoritmos são propostos na literatura com o intuito de mitigar os riscos gerados por faltas de alta impedância. Estes utilizam diversas técnicas para analisarem as FAIs e propor métodos de detecção, como Wavelet Transform, Short-Time Fourier Transform, Fast Fourier Transform, Redes Neurais, etc. Dentre esses algoritmos, cinco métodos de detecção de FAIs são descritos neste capítulo e serão utilizados em uma análise comparativa com os resultados obtidos experimentalmente.

3.2 Método de Wontroba (2020)

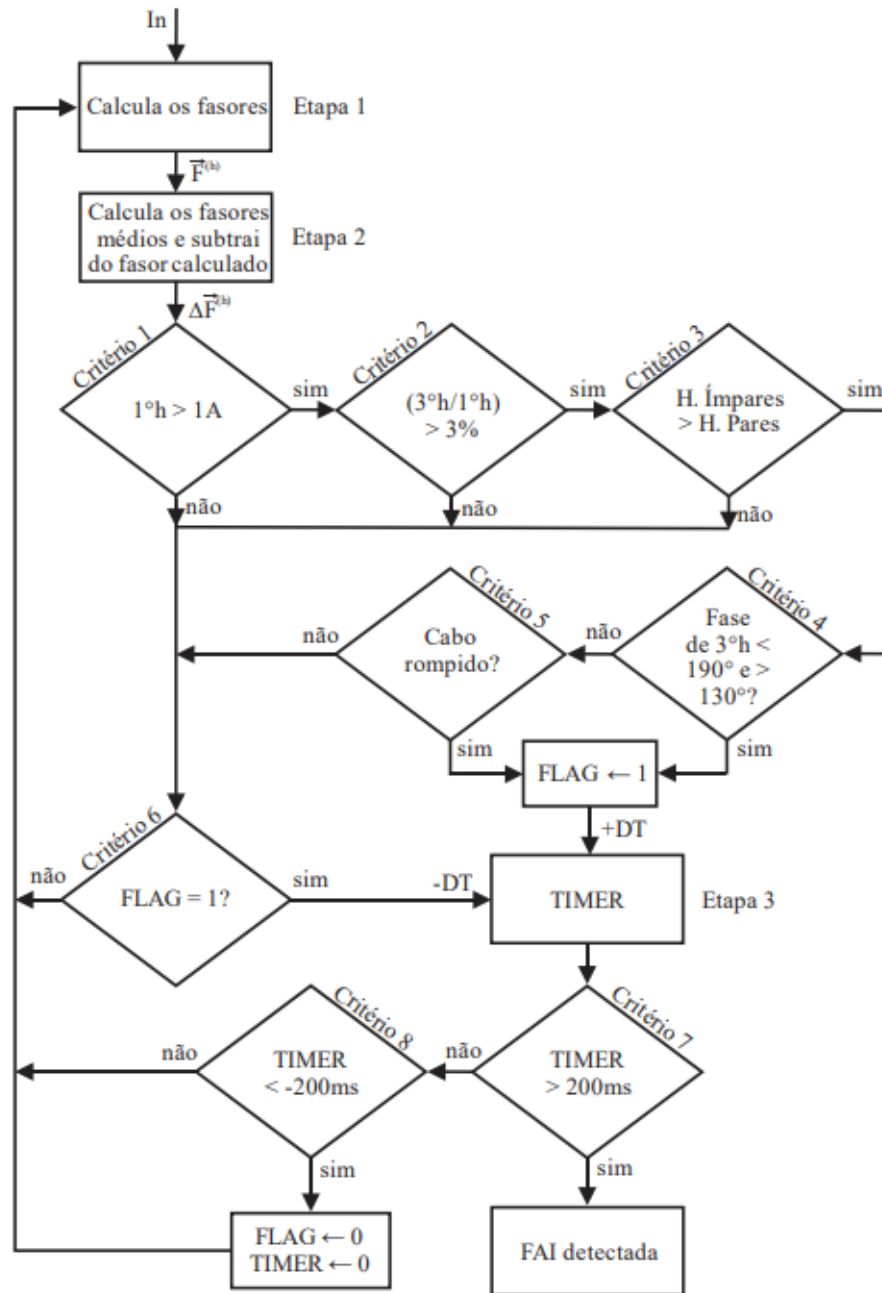
Wontroba (2020) extrai informações do espectro harmônico da corrente de neutro com a FFT de ciclo completo para seu método de detecção de FAI. O método desenvolvido é composto por três etapas e oito critérios, como exibe a Figura 17.

Etapa 1: A partir de uma FFT de ciclo completo, são calculados os fasores da corrente de neutro, tanto o módulo quanto o ângulo, utilizando como referência angular a tensão V_a , dos harmônicos de 1^a até a 7^a ordem. No fluxograma que representa o algoritmo, cada componente harmônica h é representada pelo símbolo $\vec{F}^{(h)}$.

Etapa 2: É calculada a média móvel ponderada do fasor de cada componente harmônico. Ainda nessa etapa, é calculada a diferença entre o fador medido e o fasor médio. O resultado é o fasor resultante $\Delta\vec{F}^{(h)}$ para cada componente harmônico, que é utilizado nas próximas etapas e critérios do algoritmo. Esse procedimento é importante porque remove os componentes harmônicos presentes na rede em regime permanente, ou seja, quando há uma mudança na corrente de neutro e em seus componentes harmônicos, $\Delta\vec{F}^{(h)}$ representa apenas os valores adicionais.

Critério 1: No primeiro critério, a magnitude da componente fundamental (1^oh) é monitorada. Se houver uma variação maior que 1 A, o algoritmo avança para os próximos critérios que avaliam se o incremento $\Delta\vec{F}^{(h)}$ é resultado de uma FAI. Caso seja verdadeiro, o algoritmo passa para os próximos critério e interrompe o cálculo do fasor médio, de modo que o fasor médio corresponde a um valor pré-falta. Esta variável permanece inalterada por 1 segundo ou até que a FLAG retorne para o valor zero. Esta, caso verdadeira, representa o início de um processo de detecção de FAI.

Figura 17. Fluxograma do algoritmo de detecção proposto por Wontroba (2020).



Fonte: Wontroba (2020).

Critério 2: É verificado o percentual de terceiro harmônico em relação à componente fundamental ($3^{\circ}h/1^{\circ}h$). Wontroba utiliza Liu et al.(2016) como referência para determinar seu limiar. Este definiu 3% como valor mínimo.

Critério 3: Neste critério, é feita uma comparação entre a soma dos módulos dos harmônicos ímpares (3^{a} , 5^{a} e 7^{a}) e a soma dos módulos dos harmônicos pares (2^{a} , 4^{a} e 6^{a}). Segundo Wontroba (2020), essa condição foi estabelecida para evitar que o algoritmo atue

indevidamente em situações de chaveamento monofásico de transformadores. Essa escolha foi feita após análises de simulações de FAI e de chaveamento de transformadores, levando em consideração que os harmônicos ímpares são mais significativos em casos de FAI e os harmônicos pares são mais evidentes no chaveamento de transformadores (considerando a saturação).

Critério 4: O ângulo do terceiro harmônico é analisado em relação à tensão da fase "A" da rede. Se o ângulo estiver compreendido entre 190° e 130° , a variável FLAG é definida como 1, o que indica que todos os critérios para detecção de FAI foram satisfeitos. É então iniciada uma contagem incremental do TIMER (intervalo de tempo entre as execuções do algoritmo), representada por DT.

Essa janela angular foi selecionada com base em análises de simulações de FAI. Embora teoricamente uma FAI possua um ângulo de terceiro harmônico próximo de 180° (LIU et al., 2016), na prática, o ângulo de referência é a tensão da fase "A" da rede elétrica. Como a tensão no ponto de falha pode estar ligeiramente defasada em relação à tensão na subestação, devido às cargas do alimentador serem predominantemente indutivas, a janela angular acaba não sendo centrada em 180° .

Critério 5: Nesse critério, o algoritmo verifica se houve um rompimento de cabo (informações proveniente de outro algoritmo), o que pode causar uma posição não coerente do ângulo do terceiro harmônico em relação ao Critério 4. Caso tenha sido identificado um rompimento de cabo, é iniciado o processo de incremento de DT ao TIMER.

Critério 6: Este é aplicado caso algum dos critérios 1, 2 ou 3 sejam falsos ou os critérios 4 e 5 forem ambos falsos. O critério 6 só é analisado caso $\vec{F}^{(h)}$ não corresponda a uma FAI. Se o Critério 6 for acionado, é necessário decrementar o tempo de contagem (DT) do TIMER. Por outro lado, se o FLAG for igual a zero, significa que não houve detecção de FAI e, portanto, o algoritmo deve retornar à etapa 1 para continuar analisando as amostras subsequentes.

Etapa 3: o TIMER é atualizado dinamicamente de acordo com as condições citadas nas etapas anteriores. O incremento do TIMER é feito apenas quando as condições de FAI são verdadeiras, evitando que o TIMER seja zerado prematuramente. Por outro lado, se as condições de FAI não são verificadas, o TIMER é decrementado. É importante lembrar que o TIMER começa em zero e pode ser decrementado para valores negativos, dependendo do resultado da análise dos critérios anteriores.

Critério 7: Estabelece um tempo mínimo de contagem do TIMER de 200ms antes de uma detecção de FAI ser confirmada, a fim de evitar detecções indevidas devido a eventos transitórios na rede.

Critério 8: Este critério é uma medida de segurança para evitar detecções falsas de FAI. Se o TIMER não tiver atingido o tempo de 200ms no critério 7, é verificado se ele

não tem um valor menor que -200ms. Se o valor for maior ou igual a -200ms, o algoritmo retoma a Etapa 1 e prossegue para a próxima execução. Caso contrário, o TIMER e a FLAG são zerados e o algoritmo retoma a Etapa 1, o que indica que não houve detecção de FAI e que outro evento disparou a FLAG, mas não foi caracterizado como uma FAI.

3.3 Método de Torres et al. (2014)

Torres et al. (2014) propuseram um algoritmo para detecção de faltas baseado na taxa de distorção harmônica (THD) e componentes harmônicos, que consiste em nove etapas.

Etapa 1: Medição das correntes de fase (valores instantâneos) no início do alimentador.

Etapa 2: Os componentes harmônicos pares de 2° até 8° ordem são calculados.

Etapa 3: Os componentes harmônicos ímpares de 3° até 9° ordem também são calculados.

Etapa 4: Cada sinal de corrente é dividido em três grupos: somatório dos harmônicos pares, somatório dos harmônicos ímpares e 3° harmônico.

Etapa 5 – Aplica-se a condição abaixo;

$$Se \left(\sum_{n=1}^H I_{a_{(2n+1)}} > I_{a_3} > \sum_{n=1}^H I_{a_{(2n)}} \right) \quad E \quad T_d > T - T_s$$

Onde:

H é o número de harmônicos considerado, tipicamente H = 4;

Ia é a corrente na fase A;

Td é a temporização para o TRIP de FAI (200 ms);

Ts é o tempo que ocorreu a FAI, ou a primeira detecção.

Etapa 6: Caso a condição mencionada na Etapa 5 não seja atendida, o algoritmo volta à Etapa 1. Se a condição for satisfeita, prossegue-se para a próxima etapa.

Etapa 7: Calcula-se a THD média (THDAvg) nas três fases.

Etapa 8: Aplica-se a condição abaixo.

$$Se (THDf > k * THDAvg) \quad \rightarrow \quad FAI \quad detectada$$

Etapa 9: Se a condição da Etapa 8 for verificada como verdadeira, o algoritmo detecta a presença de uma FAI. Em caso contrário, o algoritmo retorna à Etapa 1.

Onde:

THD_f é o THD da fase f em análise;

k é um coeficiente definido pelos autores (1,05).

Se a condição da Etapa 5 for atendida e persistir por um período superior a 200ms, uma possível ocorrência de FAI é identificada e a Etapa 8, usando o coeficiente k, fará a distinção entre FAI e a presença de cargas não lineares.

3.4 Método de Subramanian e Venkataraman (2012)

O método proposto por Subramanian e Venkataraman (2012) utiliza a análise dos harmônicos na corrente de neutro como base para a detecção de FAI. A principal distinção desse algoritmo é o uso da corrente de neutro como um indicador de FAI. Entretanto, essa abordagem não é apropriada para todos os tipos de SDEE.

A principal vantagem de usar a corrente de neutro para detecção de FAI é que, em alguns sistemas, a corrente em condições normais é de baixa magnitude ou até mesmo próxima a zero. Dessa forma, quando uma FAI ocorre, toda a corrente irá passar pelo neutro, aumentando a proporção entre a corrente proveniente da falha e a corrente de carga. Além disso, casos de FAI com ruptura de cabo no lado da carga podem ser mais facilmente detectados pela corrente de neutro.

Uma desvantagem dos métodos que utilizam a corrente de neutro para a detecção de FAI é que é necessário um classificador de fase, uma vez que uma FAI detectada no neutro pode ter ocorrido em qualquer uma das fases.

No algoritmo proposto por Subramanian e Venkataraman (2012), são avaliadas quatro etapas:

Etapa 1: É necessário que a amplitude da componente fundamental da corrente de neutro esteja acima de um limiar previamente definido, que é de 1A.

Etapa 2: Na corrente de neutro, a diferença entre o ângulo do terceiro harmônico e o ângulo da componente fundamental deve estar dentro de uma região próxima a 180° (entre +120° e -120°).

Etapa 3: A amplitude da corrente de 3° harmônico deve estar acima de um limite previamente definido (3% da amplitude da componente fundamental).

Etapa 4: Se os três critérios mencionados acima forem atendidos e permanecerem por um determinado período de tempo (200ms), então uma FAI pode ser considerada como ocorrida.

Como os autores não mencionaram valores utilizados pelas condições acima, os valores dos limites adotados para o comparativo foram os mesmos definidos por Wontroba

(2020).

3.5 Método de Lima (2016)

Lima (2016) propôs um método de detecção de FAI que utiliza a medição da corrente de 2°, 3° e 5° harmônico, juntamente com o ângulo de fase do 3° harmônico. A extração dos componentes harmônicos é realizada por meio da STFT, que é considerada mais difundida e possui implementação computacional mais simples do que outras transformadas.

A forma discreta da STFT é utilizada para a implementação em hardware do método proposto por Lima (2016). Isso permite que o sinal seja analisado em tempo real e com um consumo reduzido de recursos computacionais. A STFT discreta é baseada na Discret Fourier Transform (DFT), que divide o sinal em janelas de tempo e calcula a transformada de Fourier de cada janela. O resultado é uma matriz que representa a evolução do espectro do sinal ao longo do tempo, o que possibilita a detecção de eventos transientes como as FAIs.

A função da janela é muito importante para o desempenho da STFT. Para a detecção de FAI, a autora sugere que a janela de Blackman-Harris, com tamanho de cinco ciclos, seja a mais adequada. A STFT é utilizada para extrair os harmônicos desejados para cada fase da corrente. O algoritmo de detecção proposto por Lima (2016) é apresentado no fluxograma da Figura 18.

Primeiramente, são verificados os harmônicos de 3^a ordem e, caso estejam acima do limiar (L3) por mais de 5 ciclos de rede, são verificados os harmônicos de 2^a e 5^a ordem, que devem estar acima de seus respectivos limiares (L2 e L5) para ocorrer a detecção de FAI. Paralelamente, é utilizada uma lógica baseada no ângulo de 3° harmônico, que é verificado se permanece abaixo do limiar (L) por mais de 5 ciclos para detecção de FAI.

De acordo com Lima (2016), os valores de limiares simulados computacionalmente mostraram-se adequados para casos reais de FAI que foram testados pela autora. Para solucionar esse problema, é implementada uma média móvel de 20 amostras para cada harmônico, conforme a Equação 3.1. A Tabela 3 apresenta os valores adotados por Lima (2016).

$$M_N = \sum_{i=1}^N I_{[i]}/N$$

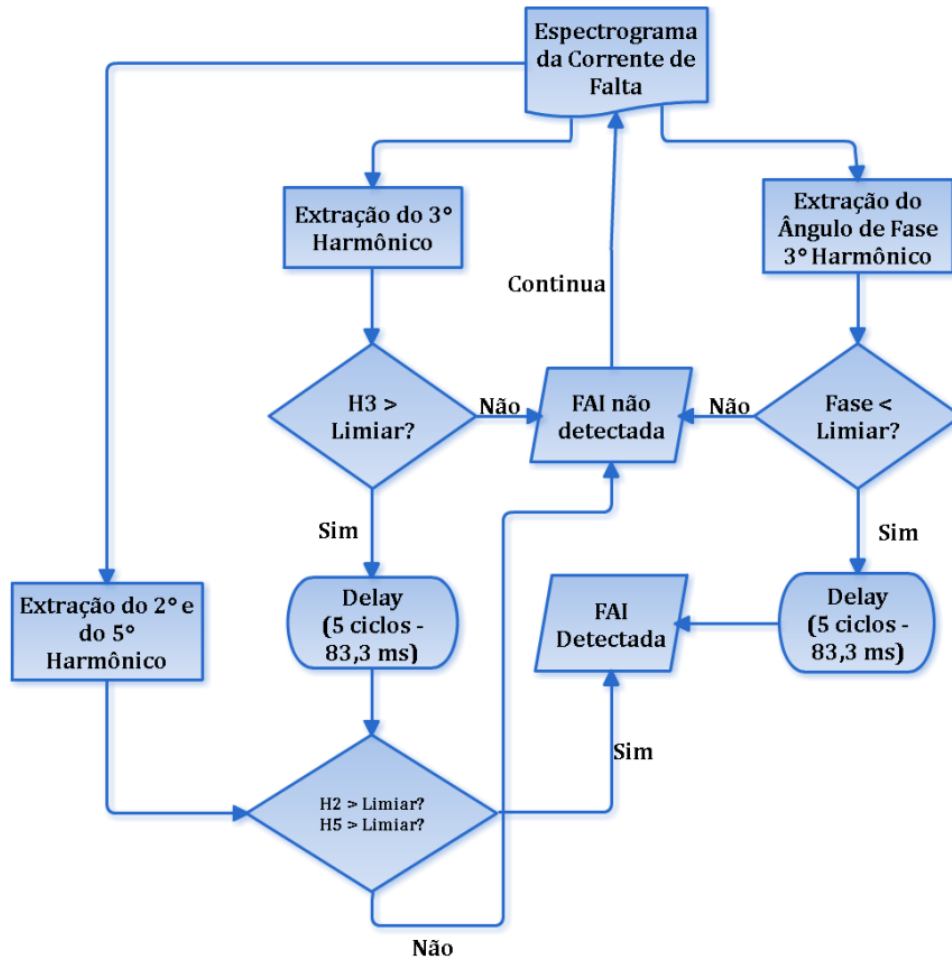
(3.1)

Onde:

x é as amostras;

N o número total de amostras;

Figura 18. Fluxograma do algoritmo de detecção e classificação proposto por Lima (2016).



Fonte: Lima (2016).

M é a média.

Tabela 3. Limiares adotados.

Simulados	Reais
$L_{\Phi} = -200^{\circ}$	$L_{\Phi} = -200^{\circ} = M_{20} - 100^{\circ}$
$L_3 = -50dB$	$L_3 = M_{20} + 5$
$L_2 = -80dB$	$L_2 = M_{20} + 5$
$L_5 = -60dB$	$L_5 = M_{20} + 2$

Fonte: Lima (2016)

3.6 Considerações finais

Os métodos utilizados para análise de sinais gerados por FAIs afetam diretamente a qualidade dos resultados obtidos e a complexidade do processo de detecção. Apesar disso,

a maioria dos métodos que se utilizam de harmônicos para essa finalidade se baseiam em três informações principais: a soma e amplitude dos harmônicos ímpares e pares, e o ângulo do terceiro harmônico.

No entanto, a definição de limiares para a detecção de FAIs varia entre os métodos, ainda que próximos, e é baseada em resultados reais. A determinação desses limiares é crítica para a qualidade da detecção de FAIs pelos algoritmos, e é complexa a definição uma vez que as falhas são de difícil detecção e não quase não há registro de oscilografias dos eventos reais.

Diante dessa dificuldade, o próximo capítulo deste trabalho descreverá a montagem de um laboratório experimental para geração de oscilografias mais próximas da realidade de FAIs, que serão analisadas para aprimorar os métodos de detecção.

4 Laboratório Experimental de Falta de Alta Impedância

Este capítulo tem como propósito descrever o projeto e a montagem de uma instalação elétrica trifásica, composta por dispositivos de proteção e medição, que visa realizar testes experimentais de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição. A construção do laboratório foi motivada pela necessidade de identificar características que possam servir como assinaturas elétricas da FAI, com o intuito de facilitar sua localização e detecção. O Laboratório para Testes Experimentais de FAI (LabFAI) está localizado no Laboratório de Alta e Extra Alta Tensão (LEAT) da Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém-PA, e foi financiado pela Equatorial Pará por meio do programa de pesquisa e desenvolvimento intitulado "Localizador de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição".

O LabFAI é composto por um transformador trifásico de 225 kVA - 220 V/13,8 kV, um relé de proteção, uma contatora, botoeiras, disjuntores, elos fusíveis, LEDs sinalizadores, cabos, TPs, TCs, um transformador trifásico de 75 kVA - 13,8 kV/220 V, cargas elétricas e as diferentes superfícies de contato como objetos de teste.

Foram conduzidos testes shunt e shunt serie na fase "C". Nos testes shunt, foram utilizados galhos de mangueira, ipê roxo, bambu e castanhola, nas configurações: enterrado em caixa com terra e apenas o galho. Já nos testes shunt-série, foram empregadas as seguintes superfícies: concreto seco sobre terra seca, concreto de lama vermelha seco sobre terra seca, terra úmida, concreto seco sobre terra úmida, concreto molhado sobre terra úmida, concreto de lama vermelha molhado sobre terra úmida, grama molhada sobre terra úmida, seixo molhado sobre terra úmida, areia molhada sobre terra úmida e asfalto molhado na terra úmida. A curva $V \times I$ desses testes são analisadas no trabalho de Sousa (2020).

Diversas características importantes da FAI foram identificadas nessas diferentes superfícies de contato. Desta forma, este capítulo foi organizado para explicar o projeto, a montagem e cada um dos testes separadamente.

4.1 Projeto do Laboratório Experimental de Falta de Alta Impedância

O LabFAI foi projetado de acordo com as características predominantes das redes de distribuição primárias no Brasil, as quais são do tipo aéreas convencionais, com neutro

aterrado na subestação, com o sistema supridor nos níveis de 13,8 kV, 23,1 kV ou 34,5 kV, alimentando transformadores de distribuição em ligação delta na média tensão e estrela aterrada na baixa tensão. A configuração e o nível de tensão de entrega ao cliente final dependem do padrão utilizado pela concessionária. Como o propósito do laboratório é poder reproduzir a maior quantidade e tipos de FAIs, viabilizando avaliar inúmeras condições e critérios, optou-se por construir uma rede trifásica com neutro aterrado. Muitas dessas condições e critérios não são abordados em outros experimentos laboratoriais de FAI já documentados (LEÃO et al., 2019; SANTOS et al., 2013; MARXSEN, 2015; ELKALASHY et al., 2006). Assim, o LabFAI possibilita simular FAIs:

- Monofásicas, bifásicas e trifásicas;
- Com cabos íntegros (shunt) ou rompidos (shunt-serie);
- Com a rede de distribuição com carga e sem carga;
- Do lado da fonte, da carga ou em ambos os lados simultaneamente.

A Tabela 4 apresenta os equipamentos e materiais previstos, juntamente com a quantidade de cada um, para a construção do laboratório, considerando sua montagem na área de testes do LEAT e alimentação por um dos circuitos da subestação geral, em baixa tensão.

Tabela 4. Equipamentos e materiais do LabFAI.

Equipamentos e materiais	Quantidade
Contatora	1 unidade
Transformador de 225 kVA	1 unidade
Chaves Fusíveis	3 unidades
Transformador de corrente	4 unidades
Transformador de potencial	4 unidades
Relé	1 unidade
Condutores	15 metros
Transformadore de 75 kVA	1 unidade

Fonte: Autoria própria.

As características elétricas dos equipamentos e materiais utilizados no LabFAI são apresentadas a seguir:

- Contatoar: Contatora trifásico WEG – CWM com corrente nominal (U_e 440 V) de 400 A, tensão de comando de 100-240 V 50/60 Hz ou 100-220 V CC, 3 contatos principais NA e contatos auxiliares: 2 NA e 2 NF;

- Transformador de 225 kVA: Relação de transformação de 0,220/13,8 kV (Δ -Yg) e impedância de 4,18%. A conexão original era Y- Δ e foi alterada para a conexão Δ -Yg, de forma a fornecer uma fonte de terra. O serviço foi realizado por meio de uma parceria

com a empresa TRAEI Ind. e Com. de Transformadores Elétricos do Pará;

- Chaves Fusíveis: 3 chaves fusíveis com tensão máxima de 15 kV, corrente nominal de 300 A, porta fusível de 100 A e capacidade de interrupção assimétrica de 10 kA. Foram utilizados 3 elos fusíveis de 15 kV e 8K;

- Transformador de corrente (TC): 1 TC de medição no neutro, com relação de transformação 10:1, tensão máxima de 15 kV, frequência de 60 Hz e exatidão 0,3C50. Corrente no primário de 50x100 A e no secundário de 5 A. 3 TCs de proteção nas fases, com relação de transformação 5:1, tensão máxima de 15 kV, frequência de 60 Hz e exatidão 10 a 100. Corrente no primário de 25 A e no secundário de 5 A;

- Transformador de potencial (TP): 3 TPs de medição nas fases com relação de transformação 120:1, tensão máxima de 15 kV, frequência de 60 Hz e exatidão 0,5P200. Tensão no primário de 13,8 kV e no secundário de 115 V;

- Relé de Proteção: Relé da fabricante SEL, Série 751. Esse possui diversas funções de proteção e é muito utilizado para proteção de alimentadores dos sistemas de distribuição da concessionária local – Equatorial Pará. Inicialmente, a proposta era utilizar este apenas para a captura de oscilografia, mas devido as características do LabFAI e visando o aumento da proteção da rede, tornou-se necessária a utilização da função de proteção instantânea (50), tanto de fase como de neutro. O SEL-751 fornece 65 ciclos em cada evento com uma taxa de amostragem de 32 amostras por ciclo, considerada elevada para captura de eventos de curtos de baixa impedância, mas se demonstrou boa também para captura das oscilografias dos testes de FAI;

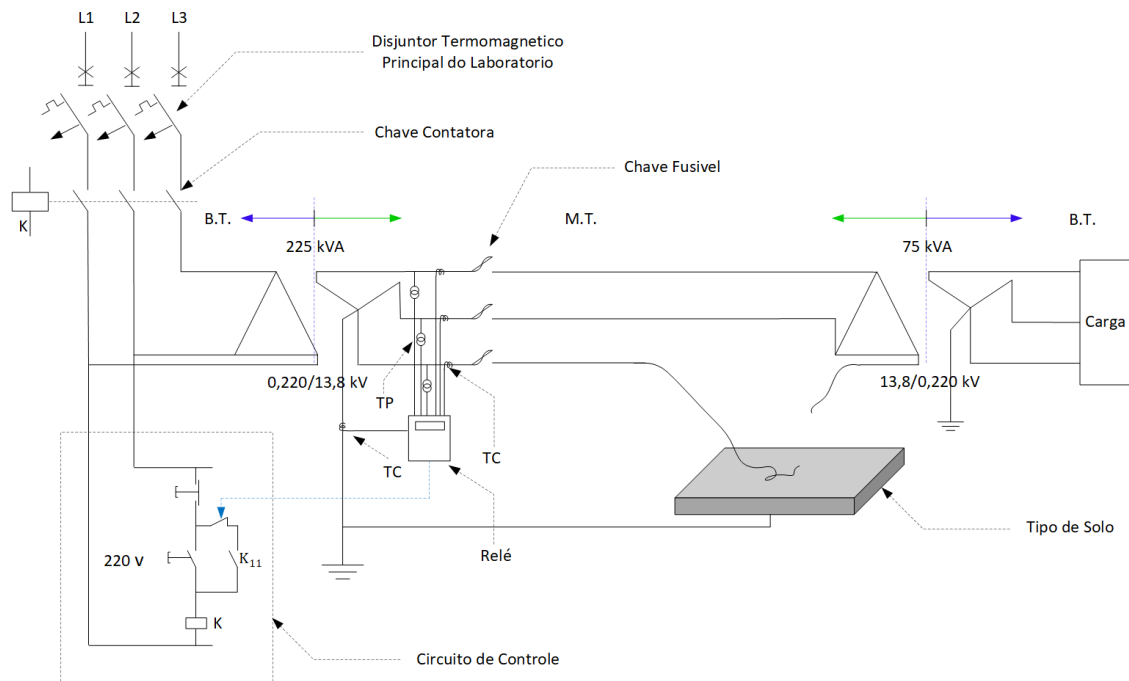
- Condutores: Cabo de alumínio, CA, sem alma, 2 AWG, capacidade de corrente a 75 °C de 207 A, resistência elétrica CC a 20 °C 0,8567á e área de 33,64 mm²;

- Transformador de 75 kVA: Relação de transformação e ligação: 13,8/0,220 kV (Δ -Y) e impedância de 3,68%. Esse transformador representa o transformador de distribuição.

O projeto elétrico do laboratório experimental de FAI é ilustrado na Figura 19, na qual se pode identificar a localização de cada equipamento. Antes da alimentação de baixa tensão (220 V), oriunda da subestação do LEAT, chegar ao transformador trifásico de 225 kVA, ela passa pelo disjuntor termomagnético, responsável por proteger a área de testes, e pela contatora

A contatora, acionada remotamente por meio de botoeiras na área de acompanhamento de testes em alta tensão do LEAT, foi utilizada para garantir a segurança operacional durante os testes, uma vez que o transformador de 225 kVA, responsável pela subestação primária do sistema de distribuição, só energiza o circuito em média tensão após o acionamento da contatora, mesmo que o disjuntor, localizado fora da área de testes, esteja acionado.

Figura 19. Projeto elétrico do LabFAI.



Fonte: Autoria própria

Foi realizada a instalação das chaves fusíveis, TPs e TCs na média tensão. A conexão entre os dois transformadores foi feita através de cabos nus de alumínio, que são similares aos utilizados nas redes primárias reais. Na baixa tensão do transformador de 75 kVA, foram conectadas as cargas que representam os consumidores. O transformador de 75 kVA simboliza o transformador de distribuição. A fase C na média tensão foi seccionada e entra em contato com as superfícies de teste. No entanto, quando os testes são do tipo shunt, esta permanece inalterada.

Para garantir a captura das oscilografias de tensão e corrente no laboratório experimental de FAI, as funções de proteção de sobrecorrente instantânea (50) de fase e neutro foram ativadas no relé SEL-751. Um trip mínimo de 0,5 A para correntes na média tensão foi estabelecido para assegurar o registro das oscilografias pelo relé. Dessa forma, a própria corrente de partida do transformador de alimentação do LabFAI é suficiente para acionar os registros pelo relé.

A alimentação em baixa tensão tem corrente máxima de 400 A, pois tanto o disjuntor que protege a área de testes quanto o disjuntor da subestação possuem corrente nominal de 400 A. Assim, pela relação de transformação do transformador de 225 kVA, a máxima corrente na média tensão é de 6,38 A. O elemento de sobrecorrente instantâneo foi usado para evitar a atuação indesejada do disjuntor geral do LEAT (subestação) ou do disjuntor da aérea de testes, no caso em que a FAI tenha seu valor de corrente elevado ou

evolua para um curto-circuito franco. Dessa forma, inicialmente as correntes de pick-up das proteções instantâneas de fase e neutro foram ajustadas em 6 A e 4,5 A, respectivamente. Em alguns testes, houve a abertura do disjuntor da área de testes ou do disjuntor da subestação e então foi reduzido para 2,5 A o pick-up instantâneo de neutro. De tal modo, em alguns testes o pick-up de neutro instantâneo é 4,5 A e em outros 2,5 A.

4.2 Montagem do LabFAI

A montagem física do laboratório foi iniciada após a aquisição dos equipamentos e materiais. Os primeiros equipamentos posicionados no pátio do LEAT foram: o transformador trifásico de 225 kVA – 220 V/13,8 kV, o transformador de 75 kVA – 13,8 kV/220 V, TCs e TPs. Posteriormente, a contatora foi fixada no corpo do transformador de 225 kVA e realizadas as conexões elétricas com a botoeira e LEDs de sinalização. As chaves fusíveis foram instaladas no mesmo transformador, mas próximas aos terminais de média tensão. O terminal neutro deste transformador, para maior precisão de medição, foi conectado em série ao TC com relação de transformação 5:1, que posteriormente foi aterrado.

Em seguida, os terminais de média tensão do transformador de 225 kVA foram ligados às respectivas chaves fusíveis e posteriormente conectados em série com TCs com relação de transformação 10:1, seguindo a alimentação da rede. Os TPs foram ligados em paralelo a todas as fases do transformador de 225 kVA. Por final, todos os terminais de saída dos TCs e TPs foram conectados ao relé. Uma das saídas do relé foi conectada em série com a bobina do contator. Logo, caso a corrente ultrapasse os limites pré-estabelecidos, o relé desenergizará a contatora, que conseqüentemente abrirá o circuito. A Figura 20, Figura 21 e Figura 22 mostram os equipamentos e conexões do laboratório experimental de FAI no LEAT.

O relé utilizado foi cedido pela Equatorial Pará à UFPA para capturar as oscilografias de tensão e corrente. Este foi entregue sem função comercial de detecção de falta de alta impedância.

Geralmente, são utilizados dispositivos como registrador digital de sinais e osciloscópio para o registro dessas oscilografias em laboratório. A relevância do LabFAI ao utilizar um modelo de relé de proteção que as concessionárias possuem nas suas SE's, está na possibilidade de que os testes experimentais, reproduzindo as FAIs em condições semelhantes às que ocorrem na realidade, sejam registrados pelos dispositivos que deveriam proteger o sistema, mas que atualmente sequer conseguem detectar estas FAIs.

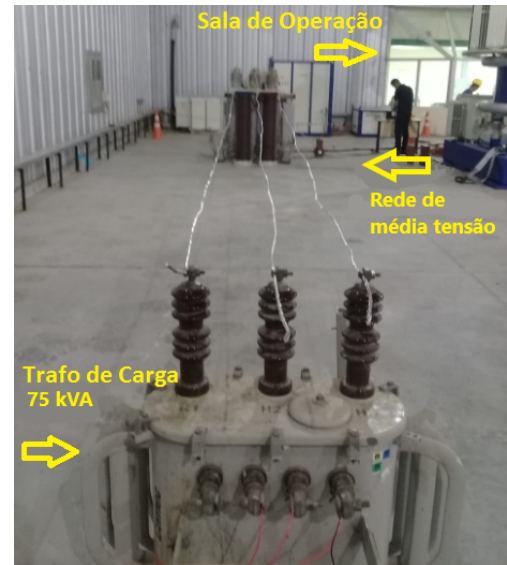
Após a montagem, foram realizados testes com diversas superfícies de alta impedância para verificar o funcionamento dos dispositivos de comando, os limites práticos de atuação da proteção, bem como a capacidade de captura de oscilografias pelo relé, já que não foram encontrados registros da utilização deste com esta finalidade, e a confirmação de

Figura 20. Transformador de 225 kVA e contatora.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21. Rede de média tensão e sala de operação.



Fonte: Autoria própria.

Figura 22. TCs e TPs.



Fonte: Autoria própria.

que as correntes obtidas apresentariam características de FAI. Com o relé parametrizado, foram realizados testes de FAI shunt e shunt-serie.

4.3 Testes de FAI shunt

A arborização urbana ainda é uma prática relativamente recente no Brasil, na qual sua implementação geralmente ocorre de forma empírica, sem um contexto técnico-

científico na maior parte das cidades brasileiras (SILVA, 2013). Cada município estabelece seu padrão, composição ou forma, o que resulta em danos causados sobretudo às redes elétricas e telefônicas (FUNVERDE, 1995). Segundo o estudo realizado por Brasil (1995), castanhola, bambu e mangueira estão entre as 10 espécies mais frequentes de árvores plantadas em Belém, o que correspondem a 90,9% do total de árvores na região. Fato semelhante também foi observado nas outras 12 maiores cidades do Pará. A castanhola tem cerca de 6 a 12 metros de altura, podendo alcançar 25 metros, e conta com diâmetro médio de 30 centímetros (SILVA, 2013). Já o bambu, classificado como gramínea e não árvore, possui altura média entre 15 a 20 metros (KERSCHBAUMER, 2014). De tal modo, atingem alturas similares a altura utilizada nas redes de distribuição da concessionária local Equatorial Pará, na qual variam entre 9 e 14 metros (EQUATORIAL, 2017).

As FAIs shunt foram realizadas utilizando galhos de castanhola, mangueira, bambu e ipê roxo, sendo esses os primeiros testes a serem realizados devido à sua simplicidade, já que não é necessário romper o cabo de média tensão. Além disso, a motivação para realizar esse tipo de teste é a escassez de literatura disponível sobre FAIs envolvendo árvores (MARXSEN, 2015; ELKALASHY et al., 2007; ELKALASHY et al., 2008).

A realização dos testes com galhos seguiu um padrão estabelecido para todos os casos. O teste foi realizado no condutor da fase "C", sem a necessidade de rompimento do cabo, com a rede equilibrada e sem cargas. Foram consideradas duas possibilidades: galho próximo ao condutor e galho em contato com o condutor. Todos os galhos foram retirados no dia da realização dos testes, de modo a manter a umidade constante.

Os galhos foram conectados à terra através de uma fita de cobre para proporcionar um caminho para a corrente de falta. Como resultado, a corrente de falta registrada pelo relé SEL-751 corresponde à corrente de terra (I_g) que flui através do galho para a terra. Vale resaltar que tal corrente de falta é medida, por meio do TC de neutro, e não calculada. Todos os testes foram realizados simultaneamente à energização do transformador de 225 kVA, já que não há nenhum mecanismo para aproximar o galho do condutor após a rede ter sido energizada. Ao todo, foram ensaios 76 testes.

4.3.1 Castanhola

Foram realizados 22 testes com galho de castanhola. Os testes 1 a 19 utilizando apenas o galho, enquanto os testes 20 a 22 foram realizados com galho enterrado em superfície composta por terra. No teste 10, o galho estava próximo, mas não em contato direto com o condutor. A Figura 23 e Figura 24 exibe o galho de bambu em contato e apenas próximo ao condutor, respectivamente. A configuração do teste é conforme apresentado na Tabela 5. Os testes 4 a 6, por exemplo, são três testes sequenciais realizados com apenas um galho, o de número 2, com 1 metro de comprimento e cada teste com tempo previsto de 7 segundos. Os testes 11 a 13 foram realizados, em sequência, com o galho de número 5

e com tempo de teste de 5, 3 e 1 segundo, respectivamente.

Tabela 5. Testes com castanhola.

Nº do teste	Nº do galho	Comprimento (m)	Tempo previsto (s)
1 a 3	1	1	7
4 a 6	2	1	7
7 a 9	3	1	7
10	4	0,5	15
11 a 13	5	0,5	5-3-1
14 a 16	6	1	5-3-1
17 a 19	7	1,5	5-3-1
20	8	1	7
21	9	1	60
22	10	1	60

Fonte: Autoria própria.

Figura 23. Teste com galho de castanhola de 0,5 metro em contato com o condutor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24. Teste com galho de castanhola de 0,5 metro próximo ao condutor.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Bambu

Foram ensaiados 28 testes com galho de bambu. Os testes de 1 a 22 utilizaram galhos de bambu como material de teste, enquanto os testes 23 a 28 foram realizados com galhos de bambu colocados sobre uma superfície de terra, conforme especificado na Tabela 6. No teste 13, o galho não estava em contato direto com o condutor, mas apenas próximo a ele. A Figura 25 e Figura 26 exibe o galho de bambu em contato e apenas próximo ao condutor, respectivamente.

Tabela 6. Testes com bambu.

Nº do teste	Nº do galho	Comprimento (m)	Tempo previsto (s)
1 a 3	1	1	7
4 a 6	2	1	7
7 a 9	3	1	7
10 a 12	4	1	5-3-1
13	5	0,5	15
14 a 16	6	0,5	5-3-1
17 a 19	7	1	5-3-1
20 a 22	8	1,5	5-3-1
23 a 25	9	1	14-60-14
26 a 28	10	1	14-14-14

Fonte: Autoria própria.

Figura 25. Teste com galho de bambu de 0,5 metro em contato com o condutor.



Fonte: Autoria própria

Figura 26. Teste com galho de bambu de 0,5 metro próximo ao condutor.



Fonte: Autoria própria

4.3.3 Magueira

Foram executados 12 testes com galho de magueira. Os testes 1 a 9 foram realizados apenas com o galho. Por outro lado, os testes 10 a 12 foram realizados com galho enterrado em superfície composta por terra, conforme a configuração apresentada na Quadro 3. Já no teste 1, o galho não estava em contato direto com o condutor, apenas próximo a ele. Não foram registradas fotos desses testes.

4.3.4 Ipê roxo

Foram ensaiados 14 testes. Os testes 1 a 10 foram realizados com galho de ipê roxo, enquanto do 11 ao 14 os testes foram realizados com galho de ipê roxo sob superfície composta por terra, com a configuração apresentada na Tabela 8. No teste 1, o galho não

Tabela 7. Testes com mangueira.

Nº do teste	Nº do galho	Comprimento (m)	Tempo previsto (s)
1	1	0,5	15
2 a 4	2	0,5	5-3-1
5 e 6	3	1	5-3-1
7 a 9	4	1,5	5-3-1
10 a 12	5	1	15

Fonte: Autoria própria.

estava em contato direto com o condutor, apenas próximo. Fotos desses ensaios podem ser vistas na Figura 27 e Figura 28.

Tabela 8. Testes com ipê roxo.

Nº do teste	Nº do galho	Comprimento (m)	Tempo previsto (s)
1	1	0,5	15
2 a 4	2	0,5	5-3-1
5 e 7	3	1	5-3-1
8 a 10	4	1,5	5-3-1
11 a 14	5	1	14-14-14-60

Fonte: Autoria própria.

Figura 27. Galho 4 de ipê roxo antes dos testes.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28. Galho 4 de ipê roxo após os testes.



Fonte: Autoria própria.

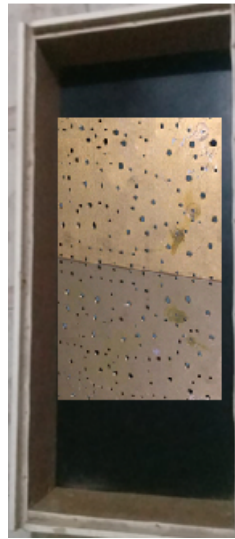
4.4 Testes de FAI shunt série

Para os testes de FAI shunt série, o condutor íntegro foi substituído por um condutor rompido e iniciado em contato com a superfície, sem a realização de simulação para o rompimento do cabo. Todos os experimentos foram executados com o rompimento do cabo

localizado no lado da fonte. A fim de controlar o fluxo de corrente FAI em alguns testes e evitar possíveis danos ao solo na área de testes do LEAT, uma caixa foi construída para proteger as amostras durante a ocorrência de falhas.

A estrutura em questão é composta por uma caixa confeccionada em madeira, com dimensões de comprimento de 67 centímetros, largura de 28 centímetros e altura de 12 centímetros. O fundo da caixa é revestido com um material impermeável, enquanto placas de alumínio recobertas com cobre são dispostas acima do fundo. Estas placas são conectadas ao sistema de aterramento do LEAT, permitindo que a superfície testada seja estabelecida como o dielétrico entre o cabo rompido e o aterramento. A imagem da referida estrutura pode ser observada na Figura 29.

Figura 29. Caixa de testes.



Fonte: Autoria própria.

Todos os testes foram realizados com a superfície de prova em cima da caixa com terra. Ao total, foram ensaiados 51 testes.

4.4.1 Concreto e terra

Foram conduzidos 30 ensaios com superfície de concreto, conforme a configuração apresentada no Tabela 9 e Tabela 10. Estes ensaios foram realizados em dias distintos, sendo que o primeiro conjunto de testes foi efetuado seguindo a Tabela 9 e, posteriormente, as amostras foram reutilizadas nos testes apresentados na Tabela 10. No dia 2, as amostras de concreto estavam sobre terra úmida.

4.4.2 Grama, seixo, areia e asfalto

A Tabela 11 contem a configuração dos testes executados com grama, seixo, areia e asfalto, ao todo foram 21 testes. A Figura 30, Figura 31, Figura 31 e Figura 32 exibem

Tabela 9. Testes com concreto - Dia 1.

Nº do teste	Superfície	Nº da amostra
1 a 6	Concreto seco sobre terra seca	1
7 a 12	Concreto seco sobre terra seca	2
13 a 18	Concreto de lama vermelha seco sobre terra seca	3
19 e 20	Concreto seco sobre terra úmida	1

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10. Testes com concreto molhado - Dia 2.

Nº do teste	Superfície	Nº da amostra
21	Terra úmida	-
22 e 23	Concreto molhado	1
24 e 25	Concreto molhado	4
26 e 27	Concreto molhado	2
28 a 30	Concreto de lama vermelha molhado	3

Fonte: Autoria própria.

testes shunt série em algumas superfícies.

Tabela 11. Testes com grama, seixo, areia e asfalto.

Nº do teste	Superfície	Nº da amostra
1 e 2	Grama molhada sobre terra úmida	1
3 a 8	Seixo molhado sobre terra úmida	2
9 a 17	Areia molhada sobre terra úmida	3
18 a 21	Asfalto molhado sobre terra úmida	4

Fonte: Autoria própria.

Figura 30. Teste com concreto molhado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31. Teste com grama molhada.



Fonte: Autoria própria.

Figura 32. Teste com seixo molhado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33. Galho Teste com areia molhada.



Fonte: Autoria própria.

5 Análise dos Resultados

A técnica da FFT de ciclo completo foi aplicada a cada ciclo da corrente de FAI (de terra) e da tensão de falta (fase C), após a corrente de inrush do transformador. Os resultados são os fasores de tensão e corrente dos harmônicos da ordem 1 a 15. A escolha dessa técnica baseou-se em sua simplicidade de aplicação, visando a sua futura utilização em um método de detecção. Isso porque técnicas mais complexas, como a WT e STFT, demandam maior capacidade computacional e/ou escolha de parâmetros arbitrários. A implementação do código foi realizada utilizando MATLAB, levando em consideração a análise dos dados sem a inclusão dos ciclos de energização.

Foram avaliados o ângulo e a amplitude do 3^o harmônico da corrente, a soma dos harmônicos pares e ímpares da corrente, bem como a amplitude dos harmônicos da tensão, juntamente com as características singulares observadas em cada teste e tipo de superfície. Os resultados obtidos foram gerados pela média a cada 5 ciclos para a soma dos harmônicos pares e ímpares e o ângulo do terceiro harmônico da corrente, visando avaliar se há algum padrão. O ângulo do 3^oh foi calculado com referência ao ângulo da fundamental da tensão da fase C.

A amplitude dos harmônicos da tensão e da corrente são decorrentes da média dos resultados de todos os ciclos de determinada oscilografia, com exceção para os casos onde se observou que o perfil de harmônico variava significativamente para determinados ciclos de uma mesma oscilografia. Cada oscilografia contém, no máximo, 60 ciclos de rede contendo FAI, de acordo com os parâmetros de captura de oscilografia definidos em cada teste. Na maioria das oscilografias do início dos testes, foram possíveis de analisar apenas 20 ciclos. Cabe ressaltar que entre uma oscilografia e outra de mesmo teste há um intervalo de 4,5 segundos, na qual o relé não é capaz de capturar.

Os limiares para análise dos resultados foram estabelecidos com base nos valores mencionados no capítulo anterior. Para o nível de terceiro harmônico, foi determinado um intervalo entre 5% e 30%, tal como definido por Liu et al (2016). Em relação à soma dos harmônicos pares e ímpares, a soma dos harmônicos ímpares deve ser superior, conforme estabelecido por Wontroba (2020) e Torres et al. (2014).

No que diz respeito ao ângulo, foi definido que deve estar entre 130^o e 190^o, como usado por Wontroba (2020) em sua pesquisa. Como o circuito em questão não alimenta cargas indutivas e/ou capacitivas, espera-se que o ângulo seja próximo a 180^o, como afirmou Liu et al (2016).

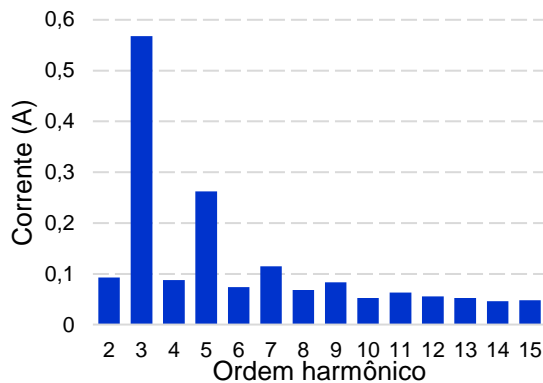
5.1 FAI shunt

5.1.1 Castanhola

Entre os testes realizados com a castanhola, somente os testes 13 e 21 não puderam ser analisados. O teste 13 teve uma duração inferior a 5 ciclos devido à atuação do relé por sobrecorrente, enquanto no teste 21 não foi possível obter a oscilografia.

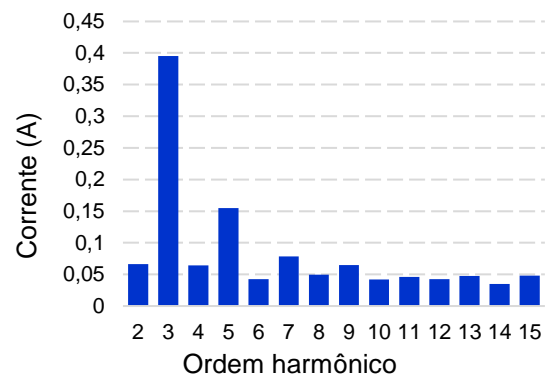
Os testes 10 e 12 geraram apenas uma oscilografia cada, ambas apresentaram uma considerável amplitude dos harmônicos ímpares, principalmente do 3º e 5º. Isso pode ser observado na Figura 34 e Figura 35.

Figura 34. Conteúdo harmônico teste 10 - Castanhola.



Fonte: Autoria própria.

Figura 35. Conteúdo harmônico dos testes 12 - Castanhola



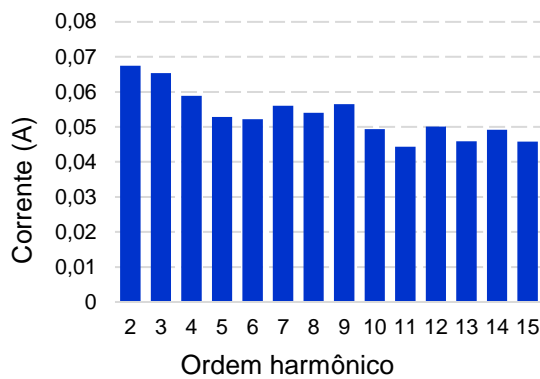
Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, o teste 6 gerou três oscilografias, das quais a segunda e terceira estão representadas nas Figura 36 e Figura 37, respectivamente. Na segunda oscilografia, não foram encontradas características de FAI, pois o conteúdo harmônico apresentou todas as ordens de harmônico elevadas. Já na terceira oscilografia, observou-se a predominância dos harmônicos ímpares, principalmente do 3º. Portanto, o teste 6 só apresentou características de FAI após 6 segundos de teste.

O teste 11 gerou duas oscilografias, presentes na Figura 38 e Figura 39. Mas, diferentemente do teste 6, apresentou desde a primeira oscilografia as características de preponderância da amplitude de harmônicos ímpares, aumentando ao longo do tempo, à medida que o teste continua.

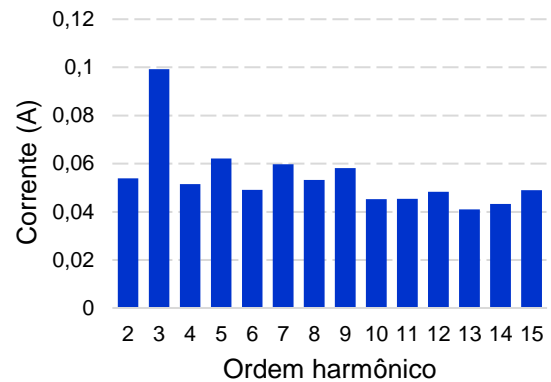
A rede elétrica possui um ruído intrínseco de aproximadamente 400 mA em seu pico de corrente. Isso explica a forma do conteúdo harmônico observado nos testes 6 e 11, que apresentaram uma média de pico de corrente de falha máxima de 3,7 A. No entanto, os testes 10 e 12 exibiram correntes de pico máxima de 2,96 A e 8,06 A, respectivamente. Embora o teste 10 tenha apresentado uma corrente de pico menor do que o teste 6, sua característica de interrupção e reignição do arco na passagem por zero, como evidenciado

Figura 36. Condeúdo harmônico teste 6 - Oscilografia 2 - Castanhola.



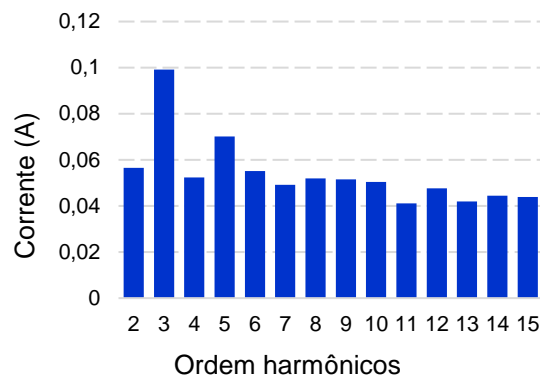
Fonte: Autoria própria.

Figura 37. Condeúdo harmônico teste 6 - Oscilografia 3 - Castanhola.



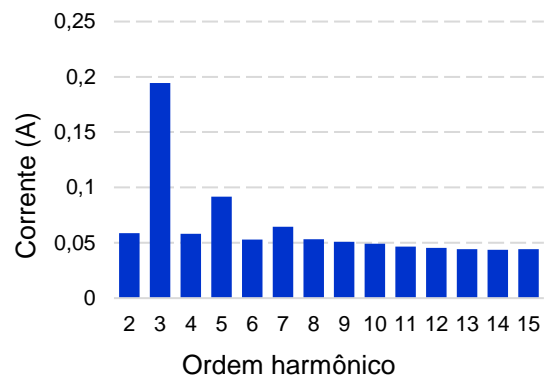
Fonte: Autoria própria.

Figura 38. Condeúdo harmônico teste 11 - Oscilografia 1 - Castanhola.



Fonte: Autoria própria.

Figura 39. Condeúdo harmônico teste 11 - Oscilografia 2 - Castanhola.



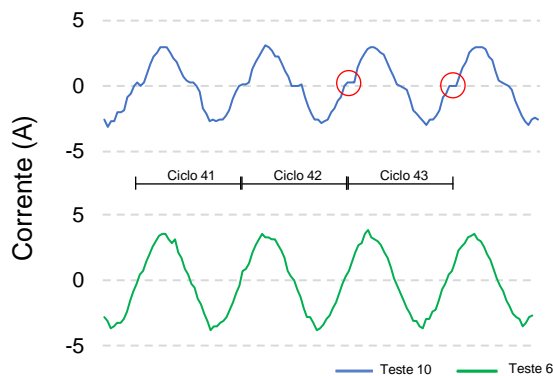
Fonte: Autoria própria.

na Figura 40, produz harmônicos de ordem ímpar, principalmente o 3^o. Essa interrupção de corrente na passagem por zero é causada pela falta de contato direto entre o condutor e o galho. A conexão foi estabelecida somente através do arco elétrico, o que justifica essa característica.

A Figura 41 ilustra as correntes registradas nos testes 12 e na oscilografia 2 do teste 6. Nota-se que a corrente da oscilografia 2 apresenta um ruído significativo, e ao compará-la com a oscilografia 3 da Figura 40, observa-se uma leve interrupção e reignição do arco elétrico na passagem pelo zero nesta última. A amplitude da corrente na oscilografia 3 é suficiente para não mascarar as características de FAI. Esse perfil harmônico distinto entre a oscilografia 3 e a oscilografia 2 é justificado pela presença de ruído na corrente registrada nesta última. Já o teste 12 também apresenta uma sutil quebra da corrente na passagem pelo zero, mas devido à sua amplitude, a presença de ruído não afeta as características de FAI.

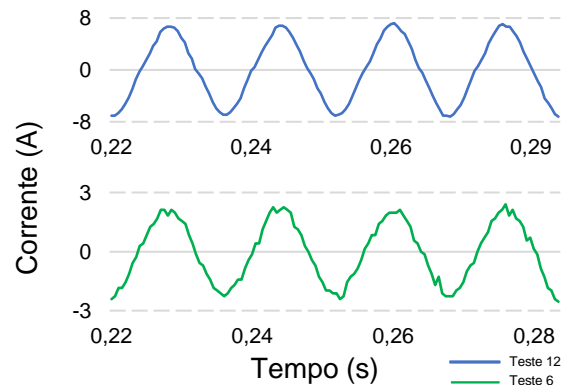
A Figura 42 apresenta as correntes das duas oscilografias geradas pelo teste 11,

Figura 40. Corrente testes 6 (oscilografia 3) e 10 - Castanhola.



Fonte: Autoria própria.

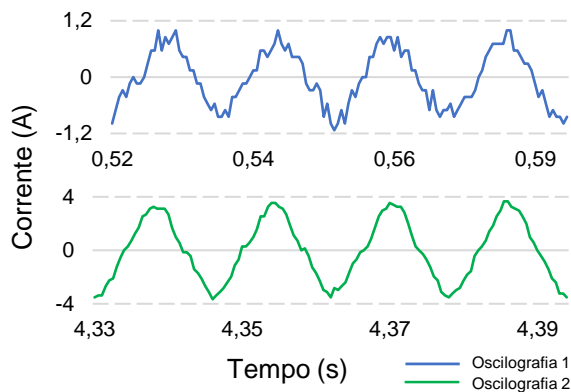
Figura 41. Corrente testes 6 (oscilografia 2) e 12 - Castanhola.



Fonte: Autoria própria.

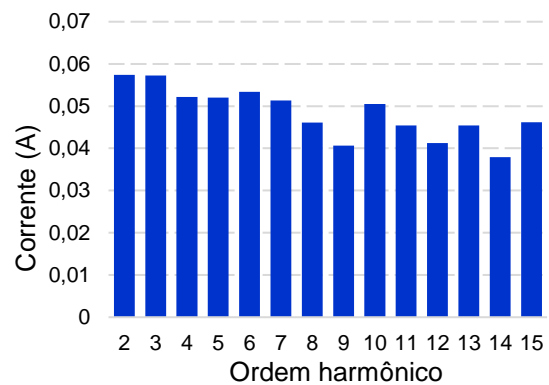
evidenciando o mesmo fenômeno de elevação de corrente acompanhada da reignição na passagem por zero na oscilografia 2.

Figura 42. Corrente do teste 11 - Castanhola.



Fonte: Autoria própria.

Figura 43. Condeúdo harmônico teste 9 - Castanhola.



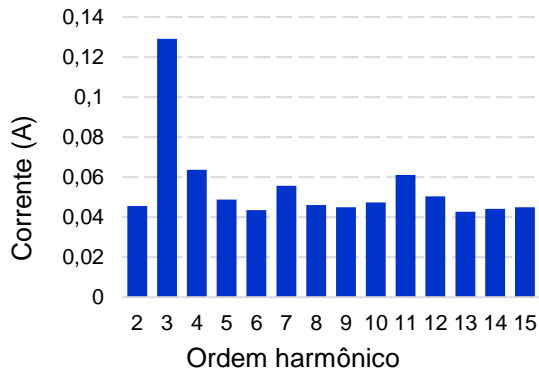
Fonte: Autoria própria.

O teste 22 possui quatro oscilografias e durou cerca de 14 segundos até o relé atuar. A primeira, o início do teste, há elevada amplitude de todo o espectro harmônico, apesar da relevância do 3º harmônico, como mostra a Figura 44. A última, o final do teste, possui elevada predominância do 3º e 5º harmônico, como exibe a Figura 45. À medida que o teste perdura, a corrente do teste cresce e as características de amplitude dos harmônicos ímpares se tornam mais evidentes. Ao comparar a corrente de início e fim deste, Figura 46, é notório que a corrente se eleva a um ponto na qual o ruído se torna imperceptível e as características de FAI se destacam, como a reignição do arco em zero. A característica da curva da soma dos harmônicos ímpares é uma crescente, Figura 47, enquanto a soma dos pares permanece constante.

Exceto pelos testes 6, 10, 11, 12 e 22, os demais testes exibem uma estrutura harmônica comparável à ilustrada na Figura 43, devido à reduzida amplitude da corrente

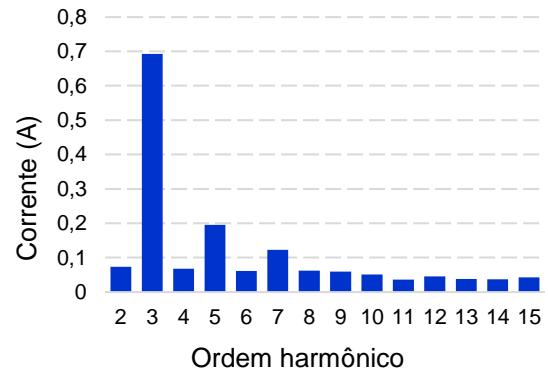
medida, que alcançou no máximo um pico de 3,11 A.

Figura 44. Condeúdo harmônico teste 22 - Oscilografia 1 - Castanhola.



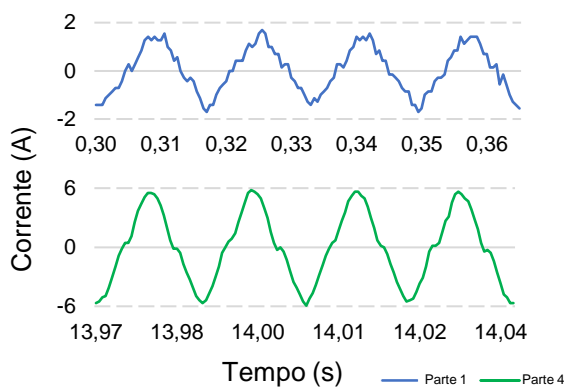
Fonte: Autoria própria.

Figura 45. Condeúdo harmônico teste 22 - Oscilografia 4 - Castanhola.



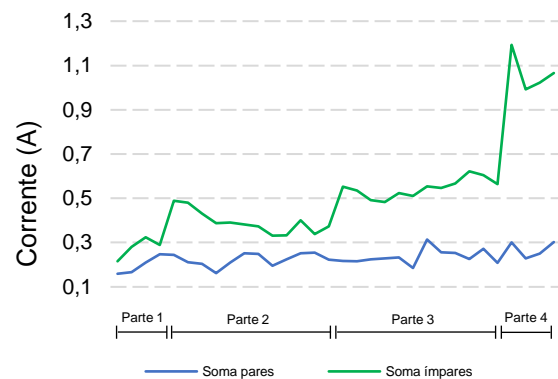
Fonte: Autoria própria.

Figura 46. Corrente início e fim do teste 22 - Castanhola.



Fonte: Autoria própria.

Figura 47. Soma dos harmônicos do teste 22 - Castanhola.



Fonte: Autoria própria.

Quanto ao ângulo do terceiro harmônico, apenas o teste 12 apresentou valores entre 130° e 190° , sendo o teste com maior corrente de pico. O Quadro 1 sintetiza as características de todos os testes com castanhola. Os testes 1, 2, 4, 7, 8 e 14 a 16, apesar da composição harmônica com distribuição quase uniforme, possuem a relação $3^{\text{oh}}/1^{\text{oh}}$ harmônico entre 5% e 30% da fundamental. Os testes 10, 11 e 22 só não apresentaram ângulo de 3^{oh} entre 130° e 190° .

Observou-se que apenas 5% dos testes apresentam todas as características desejadas para a detecção de FAIs, teste 12. Em particular, verificou-se que o ângulo do terceiro harmônico é o parâmetro mais difícil de estar dentro dos valores estabelecidos. Em contrapartida, a porcentagem da relação entre o terceiro harmônico e o primeiro harmônico está presente em 65% dos testes, contudo em 70% destes a presença deve-se ao ruído e não à amplitude do terceiro harmônico. O teste 6, embora apresente uma amplitude elevada do terceiro harmônico, não possui o terceiro harmônico acima de 3%.

Quadro 1. Características harmônicas - Testes com castanhola.

Teste	$5\% \leq 3^\circ h / 1^\circ h \leq 30\%$	$\sum \text{Ímpares} > \sum \text{Pares}$	$130^\circ \leq 3^\circ h \leq 190^\circ$
1 e 2	Sim	Não	Não
3	Não	Não	Não
4	Sim	Não	Não
5	Não	Não	Não
6	Não	Sim	Não
7 e 8	Sim	Não	Não
9	Não	Não	Não
10	Sim	Sim	Não
11	Sim	Sim	Não
12	Sim	Sim	Sim
14 a 16	Sim	Não	Não
17	Sim	Não	Não
18 e 19	Não	Não	Não
20	Não	Não	Não
22	Sim	Sim	Não

Fonte: Autoria própria.

Os testes que apresentaram maior relevância dos harmônicos ímpares, em especial do 3º, foram aqueles que possuíam maior corrente de pico e menor comprimento. Os testes 10, 11 e 12 possuem 0,5 metro, justamente os que apresentam maior amplitude dos harmônicos ímpares.

A partir de um comprimento acima de 0,5 metro, a relevância dos harmônicos ímpares só é observada quando a corrente apresenta valores significativos, como é o caso dos testes 6 e 22, onde os galhos já haviam sido submetidos a dois testes. Portanto, o tempo de permanência do teste é essencial para a observação dessas características em casos com provas de teste mais longas. Entretanto, os testes 3 e 9 apresentaram as mesmas características do teste 6, o que reforça a singularidade de cada teste, que dependerá, entre outras coisas, da composição interna do galho, como o teor de água.

5.1.2 Bambu

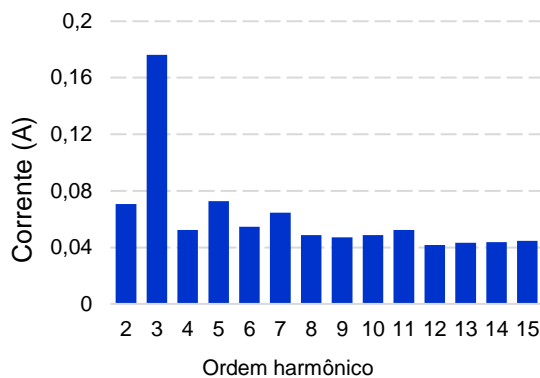
Entre os experimentos realizados com galhos de bambu, somente os testes 13, 14 e 18 não foram passíveis de análise, pois os dois primeiros apresentaram menos de 5 ciclos em virtude da atuação do relé por sobrecorrente, enquanto o último não foi registrado.

Os testes 7 a 9, 15 e 16 apresentam característica de composição de harmônico com perfil semelhante, presente nas Figuras 48 a 55. Estes testes apenas não apresentam a relação $3^\circ h / 1^\circ h$ entre 5% e 30%, como consta no Quadro 2, com exceção da segunda oscilografia do teste 7, na qual possui 7%. Caso o limite inferior fosse 3%, valor adotado por Wontroba (2020), todos os ensaios seriam possíveis de detecção. Tais testes são os com

maior corrente de pico, chegando ao máximo de aproximadamente 9,75 A.

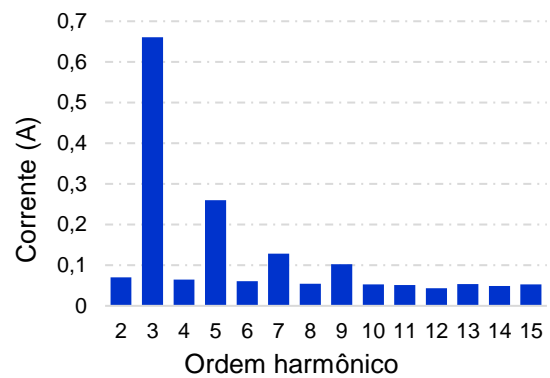
As Figuras 56 a 59, exibem as correntes dos testes citados anteriormente, que variam entre 6,36 A e 9,75 A. Ao comparar a corrente da segunda oscilografia do teste 7 com os demais, é verificado que esse possui maior não linearidade da corrente na passagem por zero. Os testes 15 e 16, com prova de teste de 0,5m, possuem elevação de corrente mais rápida quando comparada aos testes 7, 8 e 9, que possuem 1 metro. Isso leva à conclusão que quanto maior o galho, o teste deverá permanecer por mais tempo até que a corrente seja elevada o suficiente para sobrepor o ruído e gerar as características de FAI.

Figura 48. Condeúdo harmônico teste 7 - Oscilografia 1 - Bambu.



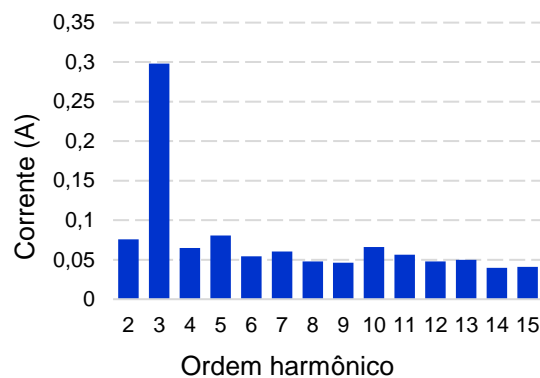
Fonte: Autoria própria.

Figura 49. Condeúdo harmônico teste 7 - Oscilografia 2 - Bambu.



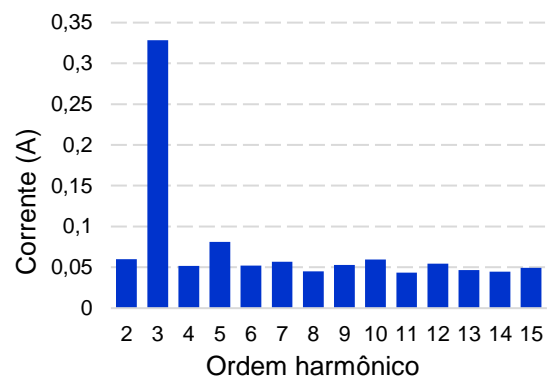
Fonte: Autoria própria.

Figura 50. Condeúdo harmônico teste 8 - Oscilografia 1 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

Figura 51. Condeúdo harmônico teste 8 - Oscilografia 2 - Bambu.

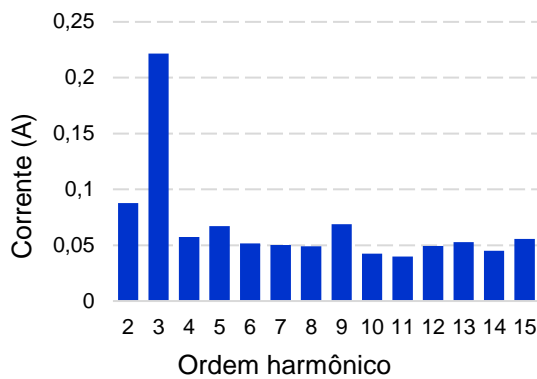


Fonte: Autoria própria.

Os testes 1 a 3 apresentam características de composição de harmônico semelhante, exibidos na Figura 60, Figura 61 e Figura 62, com corrente variando entre 3,67 A e 6,64 A. Esses testes apenas não apresentam o valor do ângulo do 3ºh entre 130° e 190°. A corrente dos testes 1 e 3 estão presentes na Figura 63.

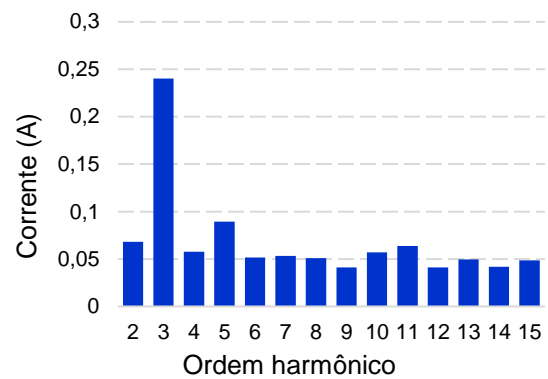
Embora os perfis harmônicos dos testes 1 e 3 sejam muito semelhantes, uma análise mais detalhada das correntes revela que o teste 3 apresenta uma corrente mais elevada

Figura 52. Condeúdo harmônico teste 9 - Oscilografia 1 - Bambu.



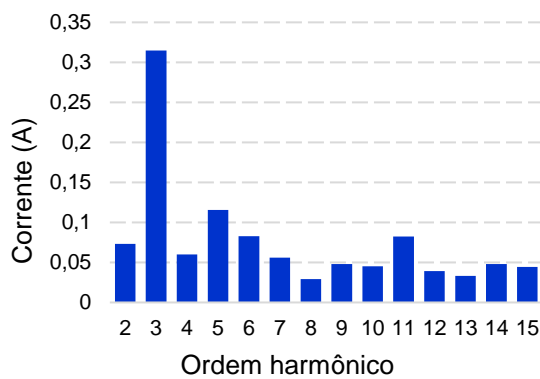
Fonte: Autoria própria.

Figura 53. Condeúdo harmônico teste 9 - Oscilografia 2 - Bambu.



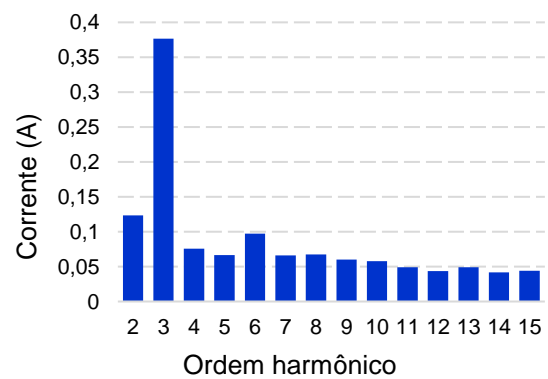
Fonte: Autoria própria.

Figura 54. Condeúdo harmônico teste 15 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

Figura 55. Condeúdo harmônico teste 16 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

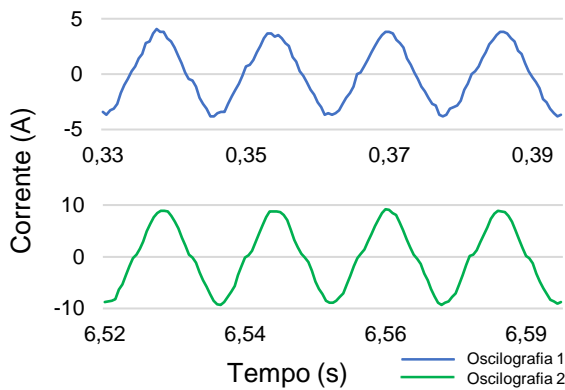
em comparação ao teste 1. No entanto, o teste 1 exibe uma maior tendência de reignição da corrente na passagem por zero. Como os testes 1, 2 e 3 foram realizados em sequência utilizando o mesmo galho, no teste 3 a resistência do galho já havia sido reduzida.

Apesar dos testes 1 a 3, 4 a 6 e 7 a 9 possuírem as mesmas características de tempo de teste e tamanho da prova de teste, produziram resultados distintos, como consequência das características de cada amostra.

Os testes 25 e 27 apresentam característica de composição de harmônico semelhante, exibidos nas Figuras 64 a 67, com corrente variando entre 1,27 A e 2,68 A. Esses testes também apenas não apresentam o valor do ângulo do terceiro harmônico entre 130° e 190° . As suas correntes estão presentes nas Figuras 68 e 69. O teste 25 é o último realizado com o galho 9, enquanto o teste 27 é o segundo com o galho 10.

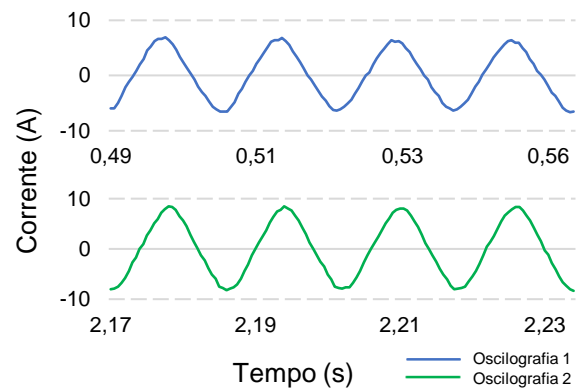
As oscilografias dos testes 1 a 3, 25 e 27 são semelhantes em termos de comprimento do galho, com 1 metro de extensão. No entanto, nos testes 25 e 27, o galho está enterrado em uma caixa com terra, o que reduz a amplitude da corrente e distorce o sinal devido

Figura 56. Corrente teste 7 - Bambu.



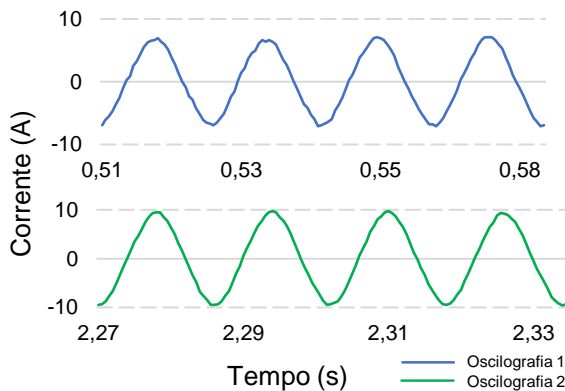
Fonte: Autoria própria.

Figura 57. Corrente teste 8 - Bambu.



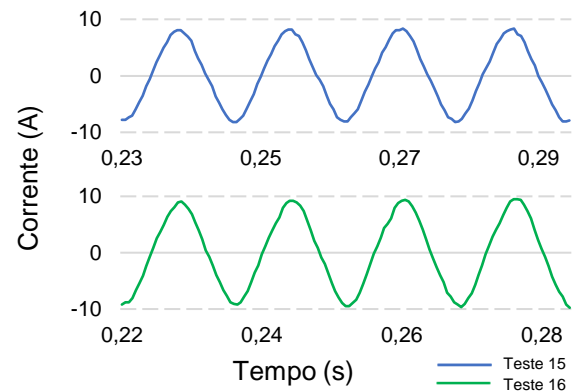
Fonte: Autoria própria.

Figura 58. Corrente teste 9 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

Figura 59. Corrente teste 15 e 16 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

ao ruído da rede elétrica. Na oscilografia 1 do teste 27, o ruído é considerável e acaba mascarando as características de FAI. Apesar da amplitude reduzida nos testes 25 e 27, é possível observar uma reigitação da corrente na passagem por zero.

O teste 17 não possui nenhuma das três características avaliadas, mas ao analisar o seu conteúdo harmônico, Figura 70, há a relevância do 3^o em relação aos demais. Apesar disso, não possui a soma dos harmônicos ímpares maior que a dos pares em todos os ciclos. O teste 19, Figura 71, possui somente a soma dos harmônicos ímpares maior que a dos pares, apesar da relevância do 3^o. Ambos os testes foram realizados com o galho 7, juntamente com o teste 18, na qual não foi registrado. A Figura 72 exibe a corrente desses testes, com amplitude semelhantes aos testes analisados anteriormente.

Os testes 4, 5, 6, 10 a 12, 20 a 24, 26 e 28 apresentam característica de composição de harmônico similar, como a da Figura 36, com corrente variando de 0,42 A a 2,68 A.

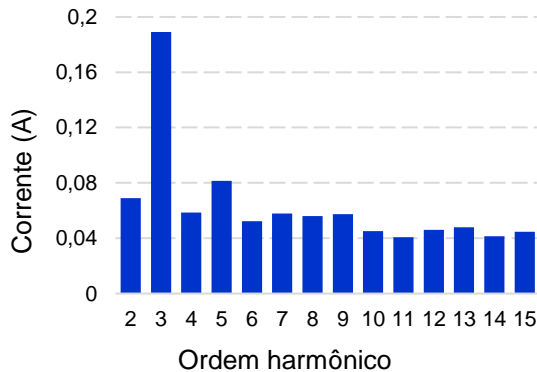
Em resumo, de acordo com o que se observa na Tabela 6, o ângulo do 3^oh só permanece nos limites estabelecidos para 12% dos testes. Enquanto, novamente, a relação 3^oh/1^oh não se mostrou um parâmetro confiável, visto que possui valores acima de 5%

Quadro 2. Características harmônicas - Testes com bambu.

Teste	$5\% \leq 3^{\circ}h/1^{\circ}h \leq 30\%$	$\sum \text{Impares} > \sum \text{Pares}$	$130^{\circ} \leq 3^{\circ}h \leq 190^{\circ}$
1 a 3	Sim	Sim	Não
4 a 6	Não	Não	Não
7	Sim	Sim	Sim
8, 9	Não	Sim	Sim
10 a 12	Não	Não	Não
15 e 16	Não	Sim	Sim
17	Não	Não	Não
19	Não	Sim	Não
20 e 21	Sim	Não	Não
22 a 24	Não	Não	Não
24	Não	Não	Não
25	Sim	Sim	Não
26	Não	Não	Não
27	Sim	Sim	Não
28	Sim	Não	Não

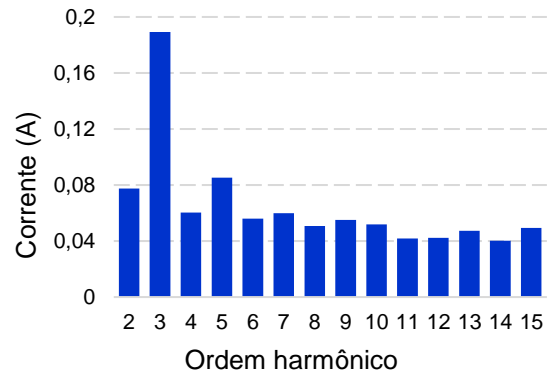
Fonte: Autoria própria.

Figura 60. Condeúdo harmônico teste 1 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

Figura 61. Condeúdo harmônico teste 2 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

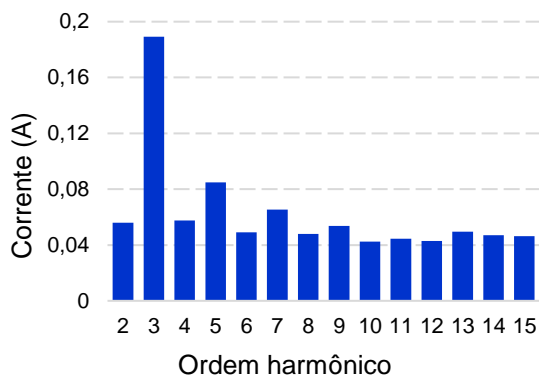
para testes com apenas ruído, caso dos testes 20, 21 e 28.

5.1.3 Mangueira

Dentre os testes com galho de mangueira, apenas o 3 e 9 não foram possíveis de analisar, pois não foram registrados. Nenhum dos testes apresentou ângulo do $3^{\circ}h$ entre 130° e 190° , conforme exibe a Quadro 3. Caso este parâmetro seja um critério impeditivo em um método de detecção, nenhum dos testes com mangueira seriam detectados.

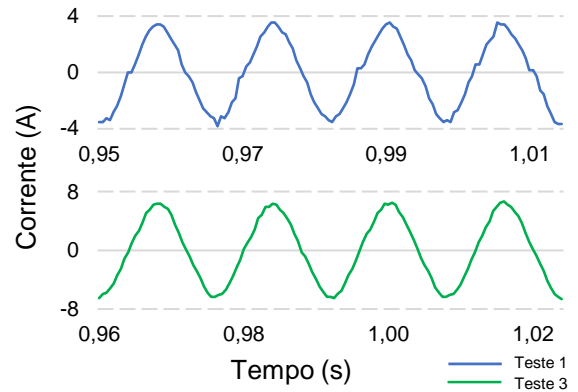
O teste 1, Figura 73, é o que apresentou maior corrente de pico, com 2,97 A, é o único que obteve os outros dois parâmetros harmônicos analisados. Os demais testes, com

Figura 62. Condeúdo harmônico teste 3 - Bambu.



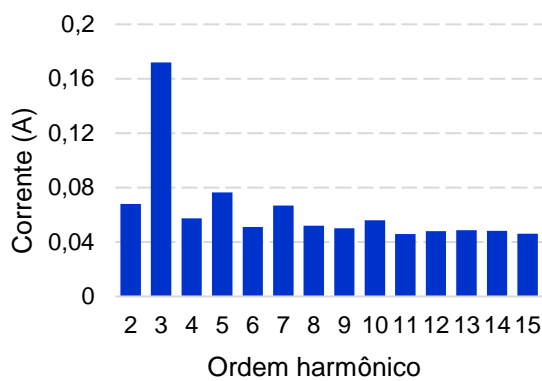
Fonte: Autoria própria.

Figura 63. Corrente testes 1 e 3 - Bambu.



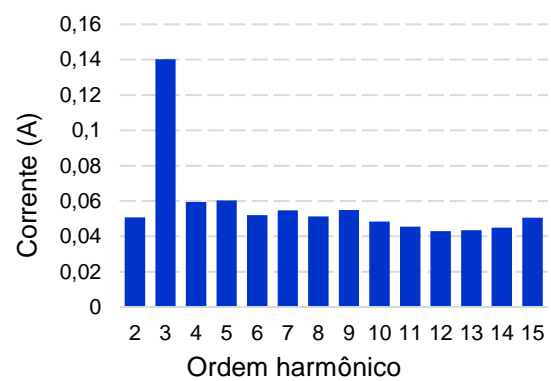
Fonte: Autoria própria.

Figura 64. Condeúdo harmônico teste 25 - Oscilografia 1 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

Figura 65. Condeúdo harmônico teste 25 - Oscilografia 2 - Bambu.



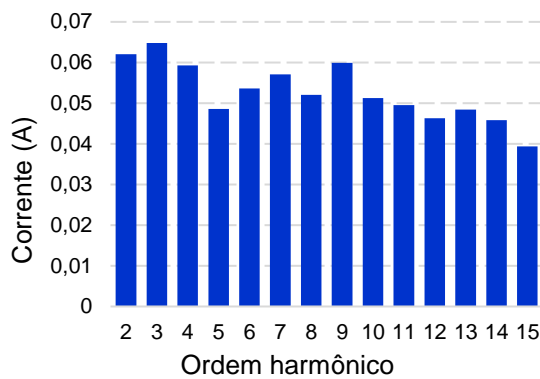
Fonte: Autoria própria.

execução do 4, possuem apenas a relação $3^{\text{oh}}/1^{\text{oh}}$ acima de 5% e inferior a 30%.

Os testes 4 e 11 apresentam a composição harmônica presente na Figura 74 e Figura 75, respectivamente, com corrente de pico máxima entre 2,68 A a 3,25 A. O teste 12 possui perfil de corrente e harmônicos semelhante ao teste 11. O restante dos testes contém composição harmônica uniforme. Este tipo de superfície, em comparação às anteriores, produz menor corrente de falta, apesar dos testes possuírem o mesmo padrão. O teste 4 possui relação $3^{\text{oh}}/1^{\text{oh}}$ abaixo de 5%, mas a cima de 3%.

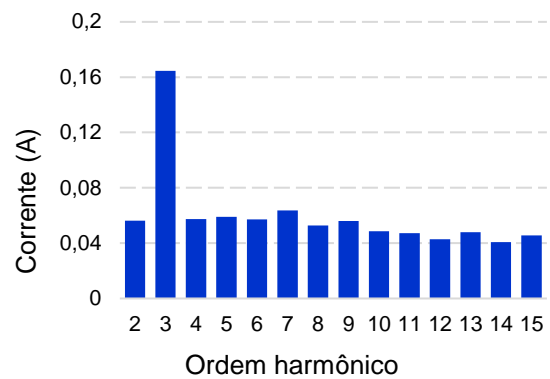
No teste 1, é fácil notar a reignição da corrente na passagem pelo zero, resultado do contato entre o condutor e o galho por meio do arco elétrico, o que também ocorreu no teste 1 com galho de castanhola. Em comparação com o teste 4, na qual há contato direto e apresentou corrente maior, os harmônicos ímpares não foram tão relevantes. Ambas as correntes estão presentes na Figura 76. A corrente do teste 11 é apresentada na Figura 77.

Figura 66. Condeúdo harmônico teste 27 - Oscilografia 1 - Bambu.



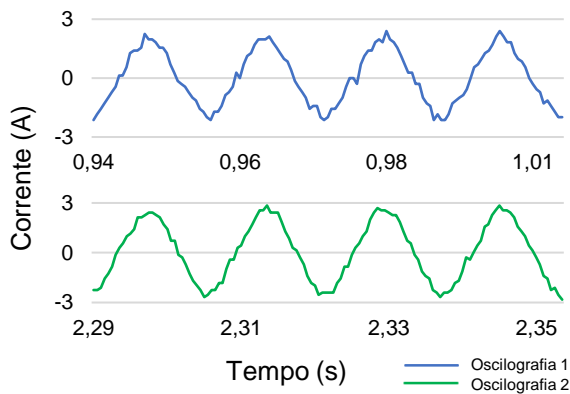
Fonte: Autoria própria.

Figura 67. Condeúdo harmônico teste 27 - Oscilografia 2 - Bambu.



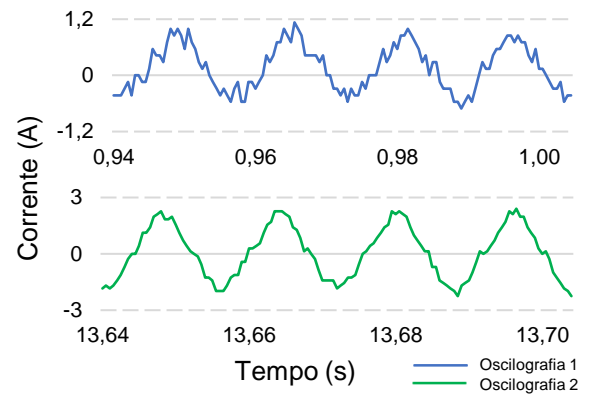
Fonte: Autoria própria.

Figura 68. Corrente teste 25 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

Figura 69. Corrente do teste 27 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

Quadro 3. Características harmônicas - Testes com mangueira.

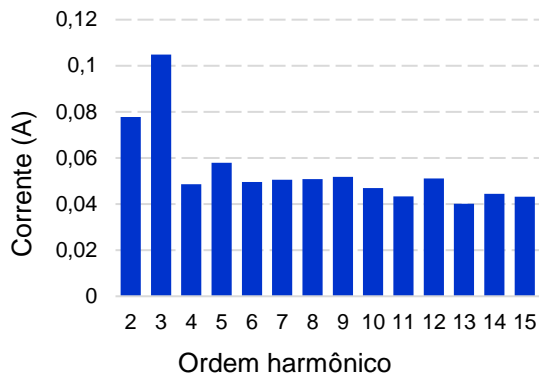
Teste	$5\% \leq 3^{\circ}h/1^{\circ}h \leq 30\%$	$\sum \text{Impares} > \sum \text{Pares}$	$130^{\circ} \leq 3^{\circ}h \leq 190^{\circ}$
1	Sim	Sim	Não
2 e 3	Sim	Não	Não
4	Não	Não	Não
5 e 6	Sim	Não	Não
7 a 9	Sim	Não	Não
10 a 12	Sim	Não	Não

Fonte: Autoria própria.

5.1.4 Ipê roxo

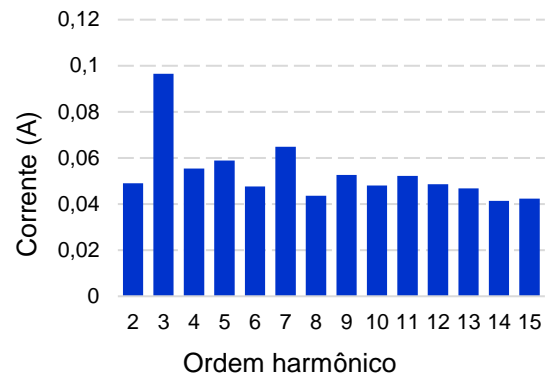
Os teste 1 a 4, todos de 0,5 metros, estão presentes na Figura 78, Figura 79, Figura 80, Figura 81, respectivamente, e possuem as maiores corrente e de pico, de 2,54 A a 3,53 A. Uma vez mais, é possível observar no teste 1 uma notável interrupção e subsequentemente, reigitação da corrente na passagem pelo zero, mesmo que esta apresente menor intensidade, o que se reflete na amplitude dos harmônicos ímpares.

Figura 70. Conteúdo harmônico teste 17 - Bambu.



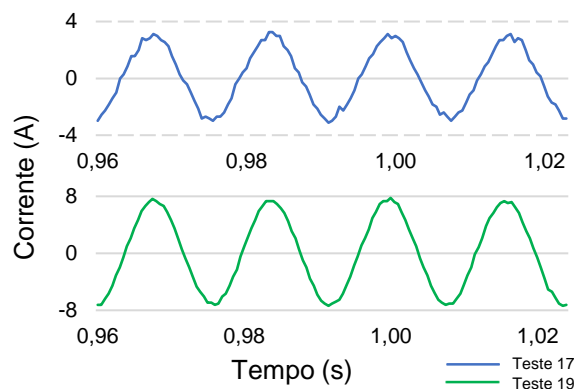
Fonte: Autoria própria.

Figura 71. Conteúdo harmônico teste 19 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

Figura 72. Corrente dos testes 17 e 19 - Bambu.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 84 e Figura 85 mostram o conteúdo harmônico e corrente do teste 14, respectivamente, na qual alcançou pico de 3,25 A. Este galho estava em terra, porém já havia sido submetido a 3 testes. Apesar disso, possui apenas a relação 3h/1^oh entre 5% e 30%, conforme consta na Quadro 4.

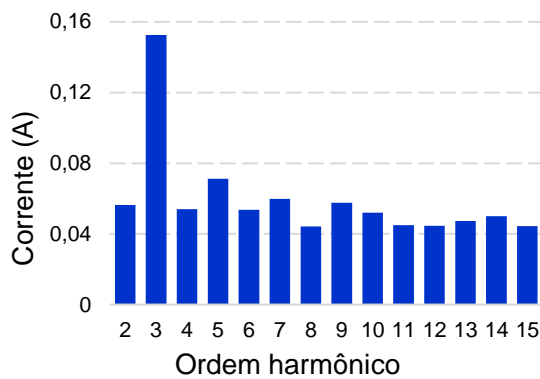
O Quadro 4 apresenta a avaliação de todos os testes, nos quais nenhum apresentou ângulo de 3^oh dentro dos limites, semelhante aos teste com mangueira. Os demais testes exibiram uma composição harmônica uniforme, uma vez que a corrente foi reduzida, variando de 0,84 A a 2,54 A.

5.2 FAI shunt-serie

5.2.1 Concreto e terra

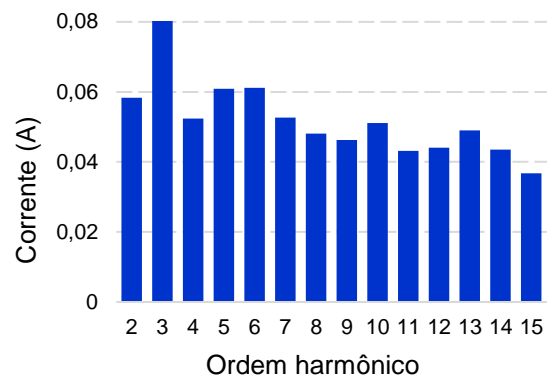
No primeiro dia de testes, todos os ensaios apresentaram características semelhantes a da Figura 89 e Figura 90. A corrente gerada em todos foi de 0 A, há apenas o ruído da

Figura 73. Condeúdo harmônico teste 1 - Magueira.



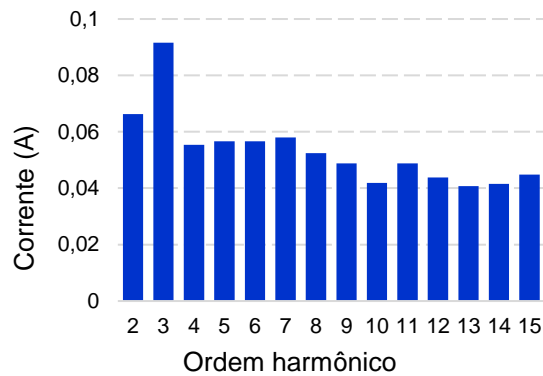
Fonte: Autoria própria.

Figura 74. Condeúdo harmônico teste 4 - Mangueira.



Fonte: Autoria própria.

Figura 75. Condeúdo harmônico teste 11 - Magueira.



Fonte: Autoria própria.

Quadro 4. Características harmônicas - Testes com ipê roxo.

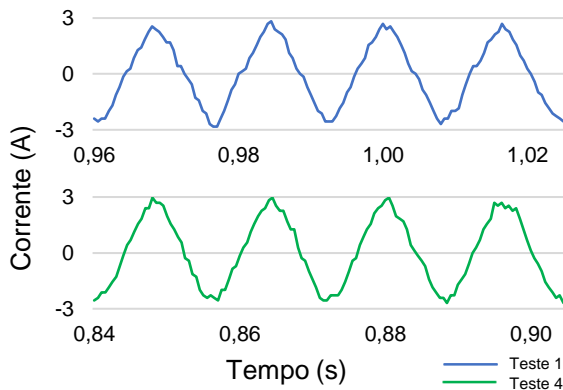
Teste	$5\% \leq 3^{\circ}h/1^{\circ}h \leq 30\%$	$\sum \text{Impares} > \sum \text{Pares}$	$130^{\circ} \leq 3^{\circ}h \leq 190^{\circ}$
1	Sim	Sim	Não
2 a 4	Sim	Sim	Não
5 a 7	Sim	Não	Não
8 a 10	Sim	Não	Não
11 a 14	Sim	Não	Não

Fonte: Autoria própria.

rede, não produzindo nenhuma característica de FAI.

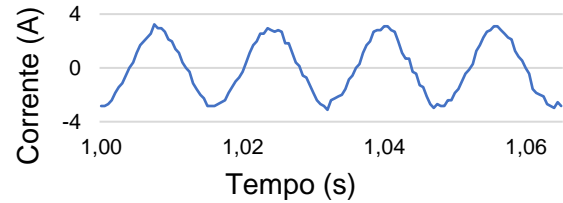
No segundo dia de testes, o máximo de corrente atingida foi de 3,67 A, para o teste 24. Esse perdurou por 4 oscilografias, com 14 segundos. Estas estão presentes na Figura 91, Figura 92, Figura 93 e Figura 94, na qual se verifica a evolução da composição harmônica. À medida que o teste avança, os harmônicos ímpares se tornam maiores. Vale salientar que o teste só apresenta todas as características de FAI na última oscilografia, após 13,3

Figura 76. Corrente testes 1 e 4 - Magueira.



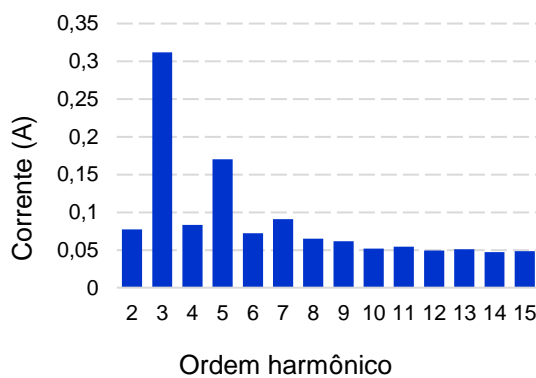
Fonte: Autoria própria.

Figura 77. Corrente teste 11 - Magueira.



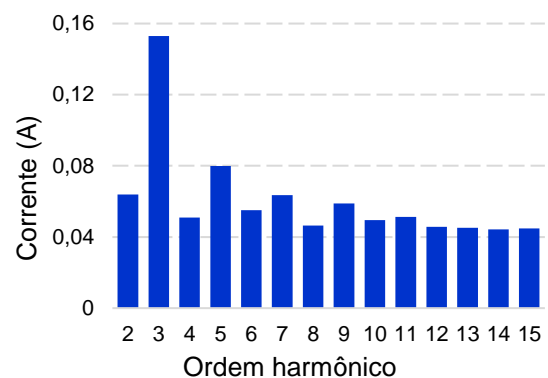
Fonte: Autoria própria.

Figura 78. Condeúdo harmônico teste 1 - Ipê roxo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 79. Condeúdo harmônico teste 2 - Ipê roxo.



Fonte: Autoria própria.

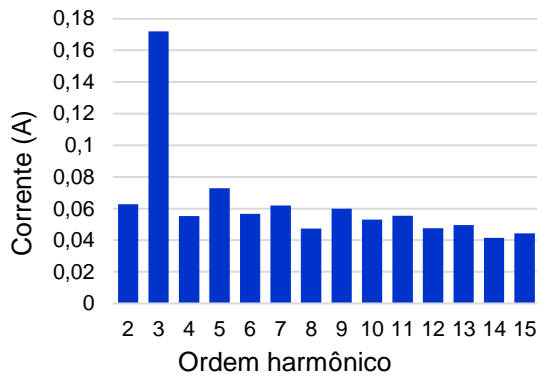
segundos de teste.

Os testes 22 e 28 possuem comportamento semelhante, porém em duas oscilografias e 9 segundos. As primeiras possuem muito ruído e as segundas são semelhantes à Figura 93 e Figura 92, respectivamente. Apenas estas últimas contêm todas as características analisadas. Os testes 23 e 29 já iniciam semelhante à Figura 92 e o perfil harmônico não sofre significativa alteração nas oscilografias subsequentes. Porém, o teste 23 possui todas as características avaliadas desde o início, enquanto o 29 apenas na última e terceira oscilografia. O teste 25 apresenta perfil semelhante à Figura 92, mas não possui ângulo 30° entre os limites.

O teste 21 consiste no ensaio apenas com a terra úmida, na qual as superfícies de concreto foram posicionadas posteriormente. Não foi possível de analisar este por gerar corrente elevada rapidamente e atuar o relé por sobrecorrente. Os teste 26 e 27 não foram possíveis de analisar por as oscilografias terem sido gravadas com 4 amostras por ciclo.

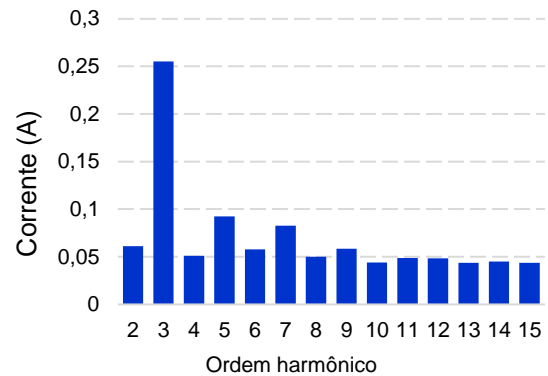
Os testes realizados com concreto apresentaram as características analisadas apenas

Figura 80. Condeúdo harmônico teste 3 - Ipê roxo.



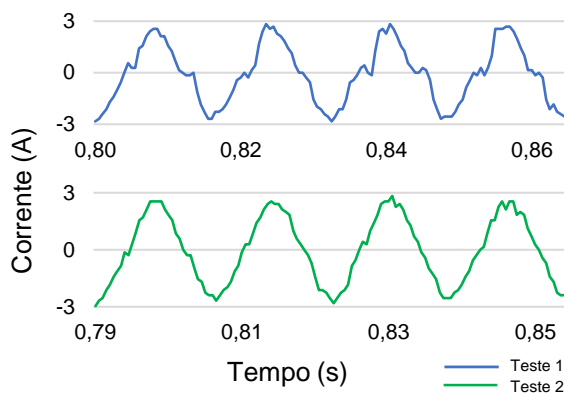
Fonte: Autoria própria.

Figura 81. Condeúdo harmônico teste 4 - Ipê roxo.



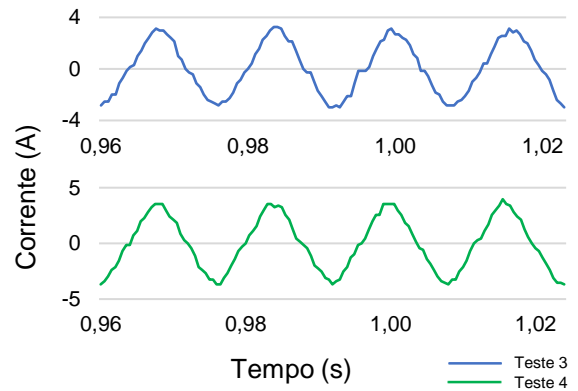
Fonte: Autoria própria.

Figura 82. Corrente testes 1 e 2 - Ipê roxo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 83. Corrente testes 3 e 4 - Ipê roxo.



Fonte: Autoria própria.

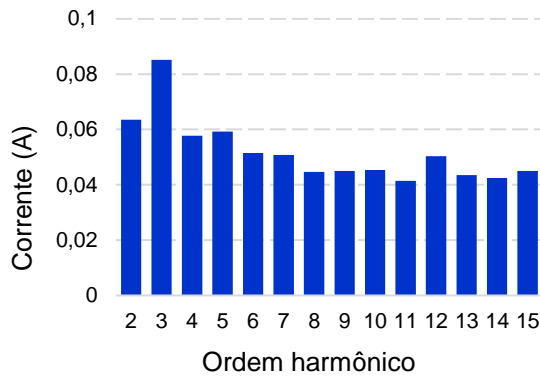
Quadro 5. Características harmônicas - Testes com concreto.

Teste	$5\% \leq 3^{\circ}h/1^{\circ}h \leq 30\%$	$\sum \text{Impares} > \sum \text{Pares}$	$130^{\circ} \leq 3^{\circ}h \leq 190^{\circ}$
22 e 23	Sim	Sim	Sim
24	Sim	Sim	Sim
25	Sim	Sim	Não
28	Sim	Sim	Sim
29	Sim	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria.

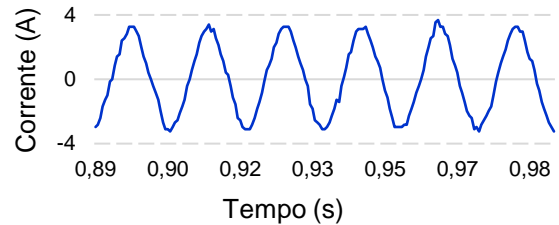
após a saturação do corpo de prova com água, proporcionando um caminho para a corrente elétrica. No entanto, o valor máximo de corrente observado foi de 3,67 A, valor inferior quando comparado aos testes realizados com galho de árvore. A maioria dos testes (83,3%) apresentou um ângulo do $3^{\circ}h$ entre 130° e 190° , enquanto todos os testes apresentaram uma relação $3^{\circ}h/1^{\circ}h$ acima de 5% e a soma dos harmônicos ímpares maior que a soma dos harmônicos pares. Esses parâmetros e limites demonstram uma boa confiabilidade para a

Figura 84. Condeúdo harmônico teste 14 - Ipê roxo.



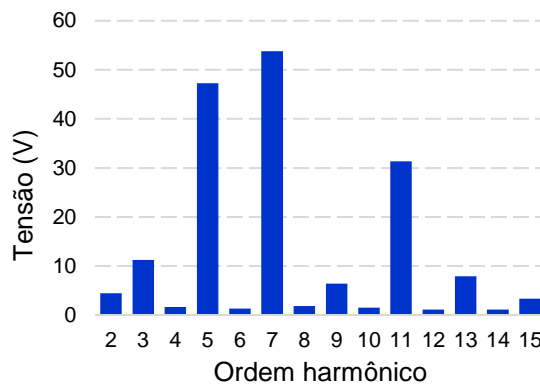
Fonte: Autoria própria.

Figura 85. Corrente teste 14 - Ipê roxo.



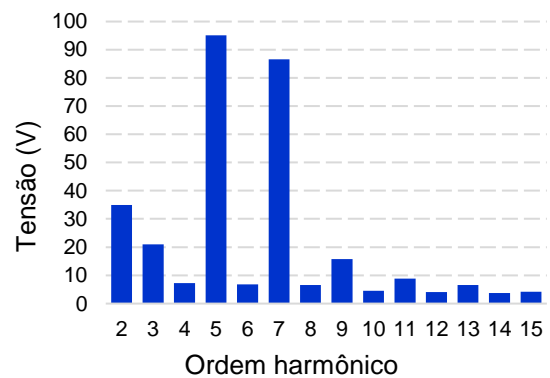
Fonte: Autoria própria.

Figura 86. Condeúdo harmônico tensão teste 9 - Castanhola.



Fonte: Autoria própria.

Figura 87. Condeúdo harmônico tensão teste 11 - Mangueira.



Fonte: Autoria própria.

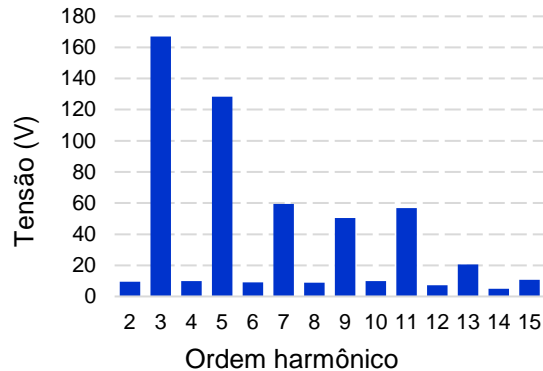
detecção de FAI em concreto saturado com água.

5.2.2 Grama, seixo, areia e asfalto

O teste 1 gerou duas oscilografias, na qual o conteúdo harmônico da primeira está presente na Figura 97 e da segunda na Figura 98. Este alcançou 3,81 A de pico de corrente de falta, durou 2,7 segundos e possui, desde o início do teste todas as três características avaliadas. A 3^oh tem maior amplitude na oscilografia 2, na qual já haviam decorrido cerca de 2,2 segundos de teste. A relação 3^oh/1^oh é 9,08% e 24,2% para as oscilografias 1 e 2, respectivamente. Em questão ao ângulo do 3^oh, possui mínimo de 159,9^o e máximo de 184,6^o.

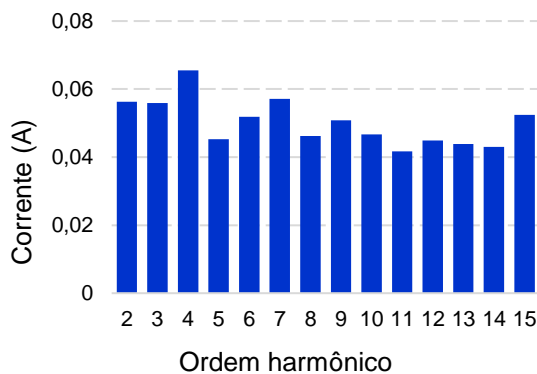
A Figura 99 mostra a corrente em ambas as oscilografias desse teste. É notória a interrupção e reignição da corrente na passagem por zero, principalmente na oscilografia 2, na qual contribui para o aumento do terceiro harmônico, o que comprova o aumento significativo da soma dos harmônicos ímpares na Figura 100. O teste 2, que foi realizado

Figura 88. Condeúdo harmônico tensão teste 7 - Bambu.



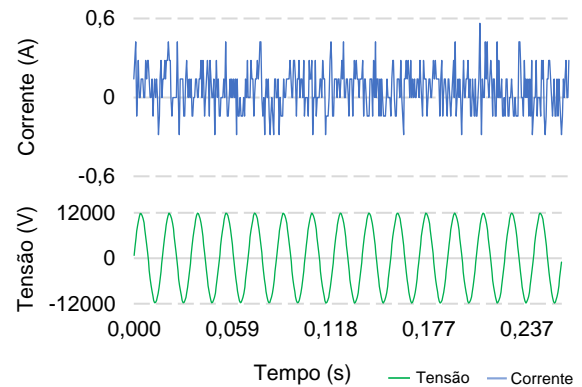
Fonte: Autoria própria.

Figura 89. Condeúdo harmônico teste 20 - Concreto.



Fonte: Autoria própria.

Figura 90. Corrente e corrente teste 20 - Concreto.



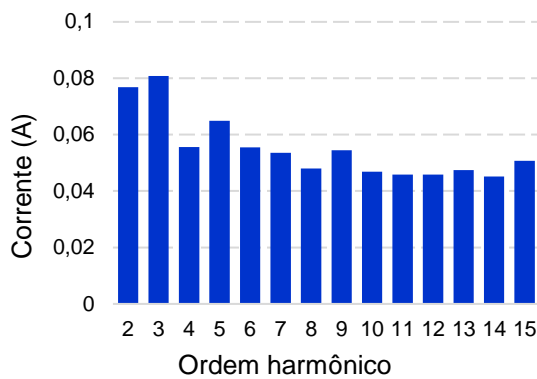
Fonte: Autoria própria.

na sequência, apresentou elevada corrente e atuou o relé antes de 10 ciclos de falta.

Os testes com seixo molhado apresentaram características peculiares ainda não observadas nos testes anteriores. A primeira oscilografia gerada pelo teste 3 apresentou corrente de FAI praticamente nula, na qual resultou apenas em ruído a o sinal de corrente registrado. Já a corrente da segunda está presente na Figura 101. Verifica-se que os últimos ciclos apresentam picos negativos elevados, o que influenciou diretamente no conteúdo harmônico da falta.

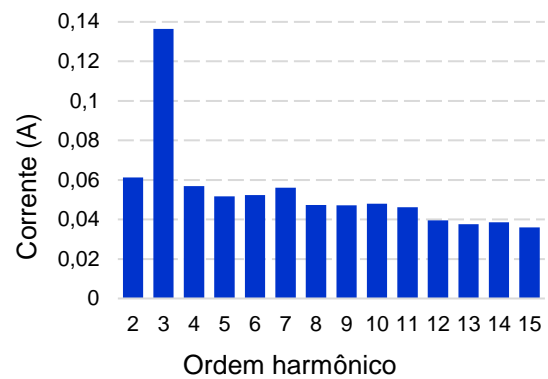
A Figura 102 apresenta o espectro harmônico dos primeiros 15 ciclos da oscilografia, nos quais não se observam picos negativos. O perfil harmônico exibe um comportamento característico de FAI, com um terceiro harmônico elevado e a presença de outras ordens de harmônicos em decorrência do ruído. Por outro lado, a Figura 103 exibe o espectro harmônico dos últimos 5 ciclos, nos quais não se observam características de FAI e o perfil harmônico é decrescente. Além disso, a Figura 104 exibe o comportamento da soma dos harmônicos pares e ímpares ao longo do teste. Durante os primeiros 15 ciclos, os

Figura 91. Conteúdo harmônico teste 24 - Oscilografia 1 - Concreto.



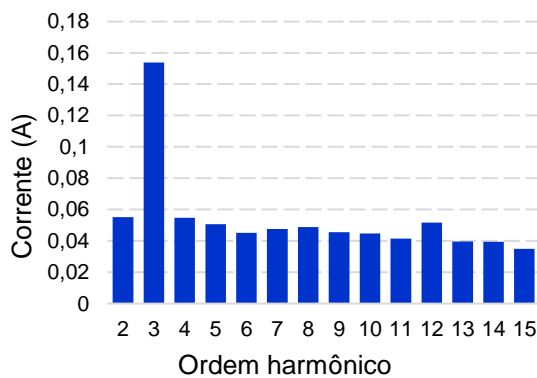
Fonte: Autoria própria.

Figura 92. Conteúdo harmônico teste 24 - Oscilografia 2 - Concreto.



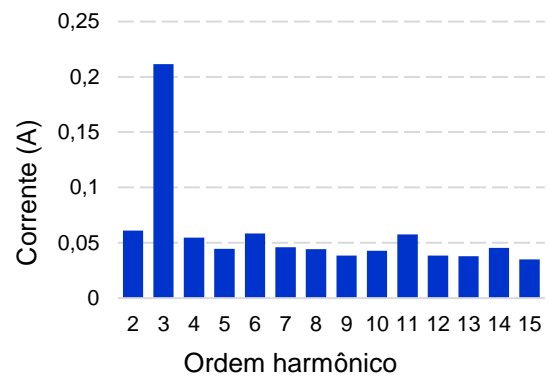
Fonte: Autoria própria.

Figura 93. Conteúdo harmônico teste 24 - Oscilografia 3 - Concreto.



Fonte: Autoria própria.

Figura 94. Conteúdo harmônico teste 24 - Oscilografia 4 - Concreto.



Fonte: Autoria própria.

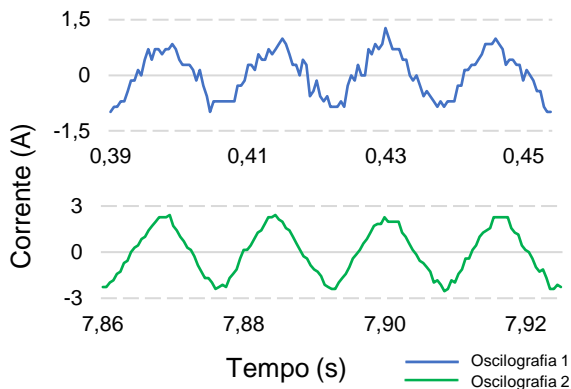
harmônicos ímpares apresentam valores maiores do que os harmônicos pares, mas essa relação se inverte nos últimos 5 ciclos.

No que diz respeito ao ângulo, verificou-se que, nos primeiros 15 ciclos, o ângulo mínimo foi de $150,9^\circ$ e o máximo de 181° e a relação $3^{\text{oh}}/1^{\text{oh}}$ 35,22%. Já nos últimos 5 ciclos, o ângulo máximo foi de $164,6^\circ$ e o mínimo de $83,5^\circ$ e a relação $3^{\text{oh}}/1^{\text{oh}}$ 63,11%.

A Figura 105 apresenta a oscilografia 1 do teste 4, enquanto a Figura 106 mostra a oscilografia 2. Na última, é observado o mesmo perfil de corrente do teste 3, porém com a presença de picos positivos e em valor reduzido. A Figura 107 e Figura 108 apresentam o conteúdo harmônico dos 7 primeiros ciclo e 3 últimos, nesta ordem.

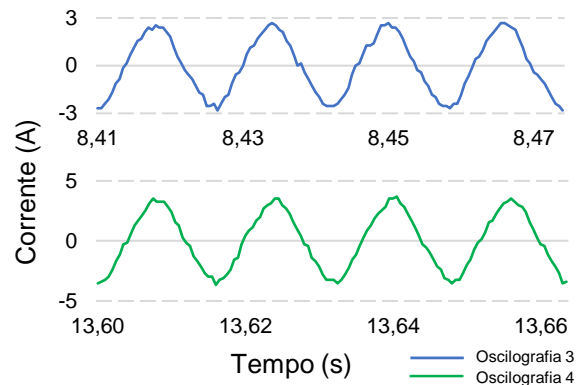
Ao contrário do teste 3, nos ciclos em que é observado um pico elevado de corrente no teste 4, o conteúdo harmônico ainda é predominantemente composto pelo terceiro harmônico, com uma redução na amplitude dos harmônicos à medida que a ordem aumenta. As oscilografias 1 e 2 apresentam uma soma de harmônicos ímpares maior do que os pares, mas somente a oscilografia 1 possui o ângulo do terceiro harmônico dentro da faixa avaliada.

Figura 95. Corrente teste 24 - Oscilografias 1 e 2 - Concreto.



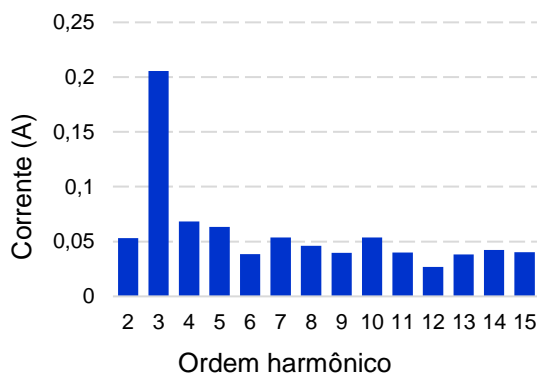
Fonte: Autoria própria.

Figura 96. Corrente teste 24 - Oscilografia 3 e 4 - Concreto.



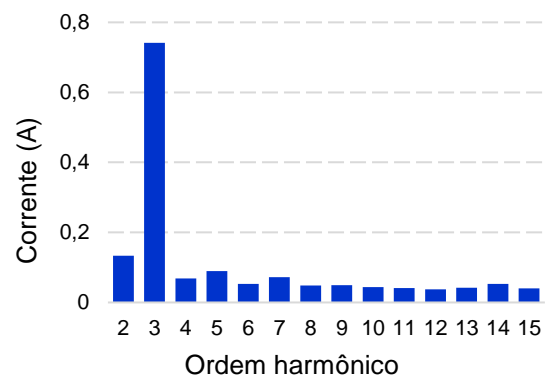
Fonte: Autoria própria.

Figura 97. Conteúdo harmônico teste 1 - Oscilografia 1 - Grama.



Fonte: Autoria própria.

Figura 98. Conteúdo harmônico teste 1 - Oscilografia 2 - Grama.



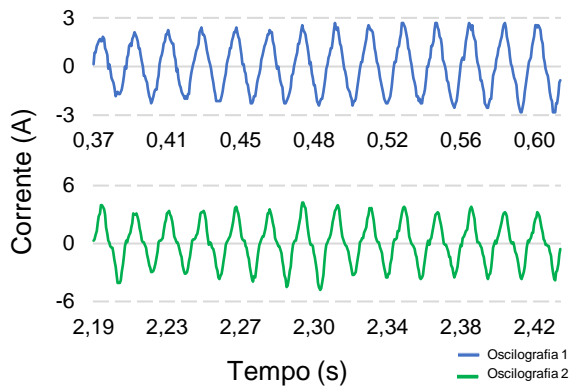
Fonte: Autoria própria.

Ambas possuem o 3ºh/1ºh pouco acima de 30%. A partir do teste 5, adicionou-se mais seis a cada teste, o que resultou em correntes com apenas o ruído da rede elétrica, sem a presença de características de FAI.

O conteúdo harmônico do teste 15, executado com areia, está presente na Figura 109 e Figura 110. É possível notar que a predominância dos harmônicos ímpares só é evidenciada na oscilografia 3, na qual a corrente não possui picos de corrente tão elevados, ilustrado na Figura 111. No início do teste são vistos picos de corrente negativos, que influenciam diretamente no espectro harmônico da corrente, de forma que esse possui perfil decrescente à medida que aumenta a ordem de harmônicos. Um fato bem interessante é o comportamento da tensão na presença de picos elevados de corrente, na qual resulta em deformação também no pico da tensão e produz o perfil harmônico da Figura 115, com predominância do 4ºh.

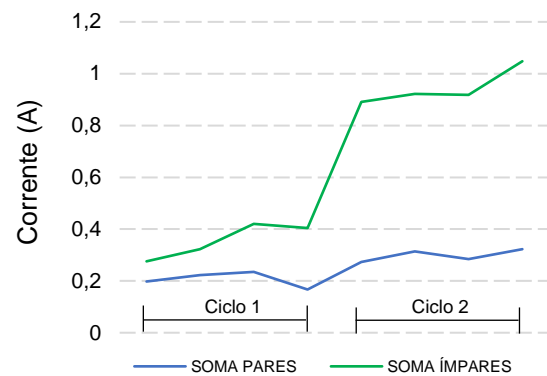
Os outros testes com areia possuem as mesmas características. O único teste que possui ângulo de 3ºh entre 130º e 190º é a oscilografia 2 do teste 10, na qual não possui picos de corrente elevados. Da mesma forma, a soma dos harmônicos ímpares é maior

Figura 99. Corrente teste 1 - Grama.



Fonte: Autoria própria.

Figura 100. Soma dos harmônicos pares e ímpares teste 1 - Grama.



Fonte: Autoria própria.

Quadro 6. Características harmônicas - Testes com grama, seixo, areia e asfalto.

Teste	$5\% \leq 3^{\circ}h/1^{\circ}h \leq 30\%$	$\sum \text{Ímpares} > \sum \text{Pares}$	$130^{\circ} \leq 3^{\circ}h \leq 190^{\circ}$
1	Sim	Sim	Sim
3	Não	Não	Não
4	Não	Sim	Não
5 a 8	Sim	Não	Não
9 a 11	Não	Não	Não
13 e 14	Sim	Não	Não
15	Não	Não	Não
16 e 17	Sim	Não	Não
18 a 21	Sim	Não	Não

Fonte: Autoria própria.

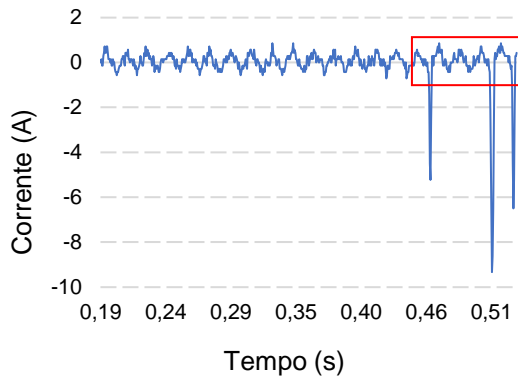
em relação aos pares e a proporção de $3^{\circ}h/1^{\circ}h$ é entre 5% e 30% somente quando não há a presença dos picos de corrente, caso da oscilografia 2 dos testes 9 e 11. O teste 12 apresentou elevada corrente de teste e o relé atuou por sobrecorrente. A presença de picos negativos na corrente produz $3^{\circ}h/1^{\circ}h$ maior que 30%.

Os testes com asfalto, apesar de molhado, não produziu corrente de falta, contendo o sinal de corrente apenas ruídos da rede.

5.2.3 Considerações finais

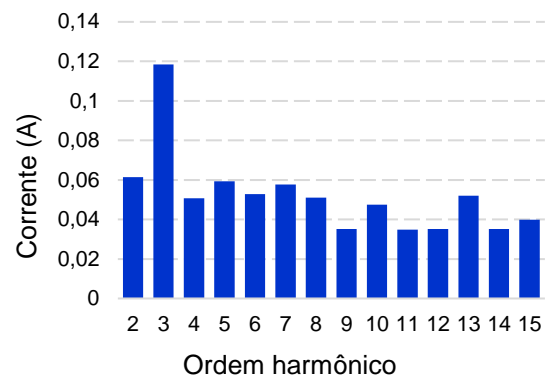
É notável que cada galho apresenta características únicas de FAI, incluindo a amplitude da corrente e o espectro harmônico, que estão intimamente ligados às propriedades físicas do galho, como a umidade. Isso é evidente ao comparar os testes em que o contato é estabelecido por meio do arco elétrico, como no caso do galho de castanhola, em que a relevância dos harmônicos ímpares e a relação $3^{\circ}h/1^{\circ}h$ são mais acentuadas. Contudo, uma característica comum entre esses testes é a ausência do ângulo de $3^{\circ}h$ entre 130° e

Figura 101. Corrente teste 3 - Seixo.



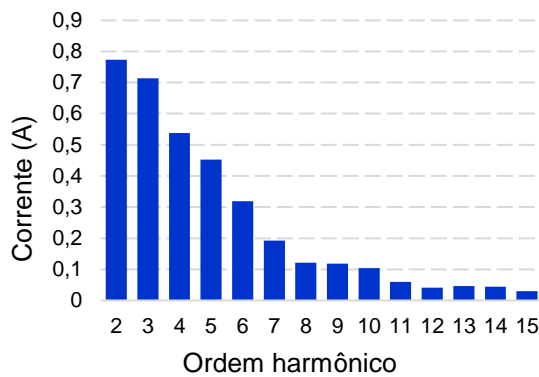
Fonte: Autoria própria.

Figura 102. Conteúdo harmônico teste 3 - 15 primeiros ciclos - Seixo.



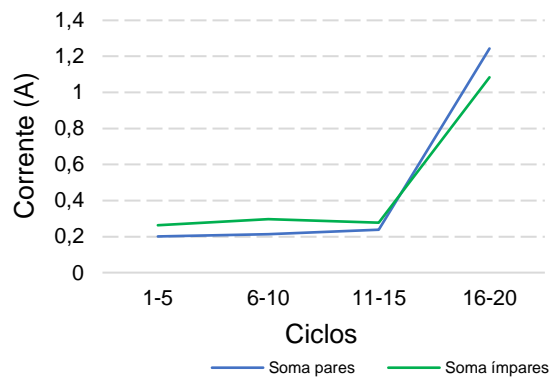
Fonte: Autoria própria.

Figura 103. Conteúdo harmônico teste 3 - 5 últimos ciclos - Seixo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 104. Soma dos harmônicos teste 3 - Seixo.



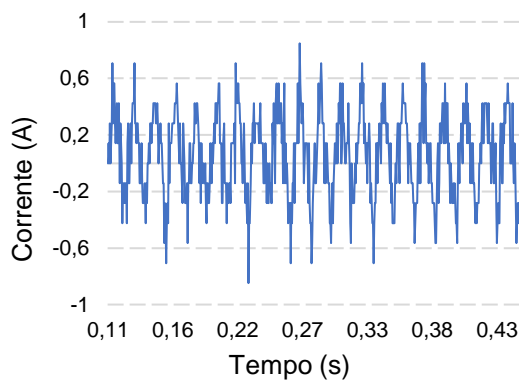
Fonte: Autoria própria.

190°.

O ângulo do terceiro harmônico é o que apresenta menor confiabilidade para a detecção de FAIs quando a corrente é baixa. Como a rede não alimenta cargas, o ideal seria que o ângulo do terceiro harmônico estivesse próximo a 180°, mas não é o que foi observado para aqueles que possuem valores entre 130° e 190°, sempre há uma variação dos valores.

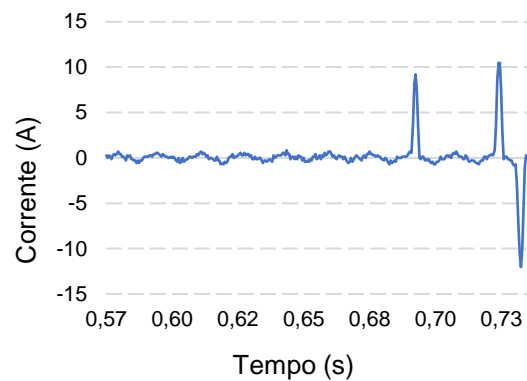
É possível observar um padrão comum no espectro harmônico da tensão quando há baixa corrente e elevado ruído, sendo as ordens de harmônicos predominantes o 7ºh e 5ºh, como mostra a Figura 86. Em situações em que há predominância média de harmônicos ímpares na corrente, os harmônicos da tensão que se destacam são o 5ºh e 3ºh, como apresentado na Figura 87 para o teste 11 com galho de mangueira. Em casos de predominância muito significativa de harmônicos ímpares na corrente, o harmônico da tensão que se sobressai é o 3ºh, Figura 88, como ocorreu no teste 7 com galho de bambu. Este pode ser um bom indicativo para a presença de FAI, mas ainda há a necessidade de

Figura 105. Conteúdo harmônico teste 4 - Oscilografia 1 - Seixo.



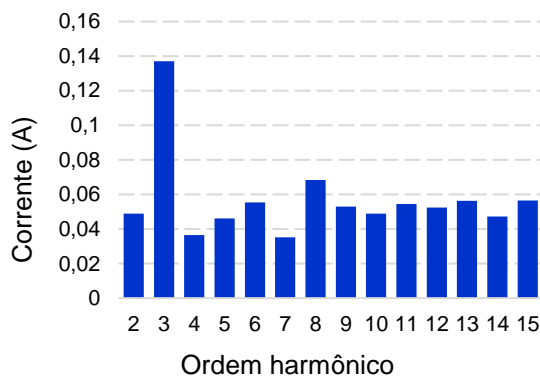
Fonte: Autoria própria.

Figura 106. Conteúdo harmônico teste 4 - Oscilografia 2 - Seixo.



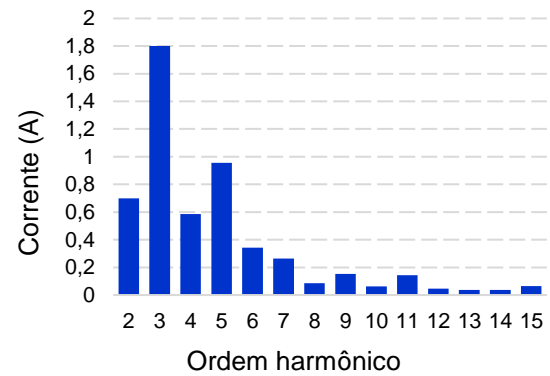
Fonte: Autoria própria.

Figura 107. Conteúdo harmônico teste 4 - 7 primeiros ciclos - Seixo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 108. Conteúdo harmônico teste 4 - 3 últimos ciclos - Seixo.



Fonte: Autoria própria.

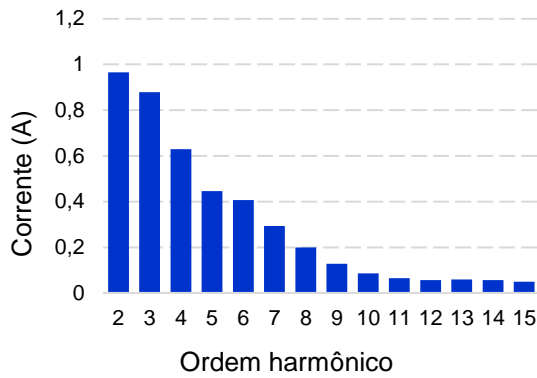
comparar com outros fenômenos que podem ocorrer em uma rede de média tensão.

Um fato observado, semelhante aos testes shunt, é a presença das ordens 7 e 5 de harmônicos na tensão quando há a presença de ruído, como é o caso do teste 2 com concreto na Figura 114. Para os testes com significativa amplitude do 3º harmônico, o conteúdo harmônico se comporta como na Figura 115, na qual o 3ºh é o predominante, mas também foram observadas oscilografias na qual o 5º é o predominante.

Os testes com grama e concreto molhado foram os que melhor responderam ao ângulo do 3ºh, com taxa de confiabilidade de 86%, isto porquê geraram corrente mensurável e sem distorções significativas. Os testes shunt série apresentam peculiaridades adicionais na corrente de falta em comparação aos testes com árvores, de acordo com a prova de teste. Vale ressaltar que só foram mensuráveis as correntes de falta na qual a prova de teste estava molhada.

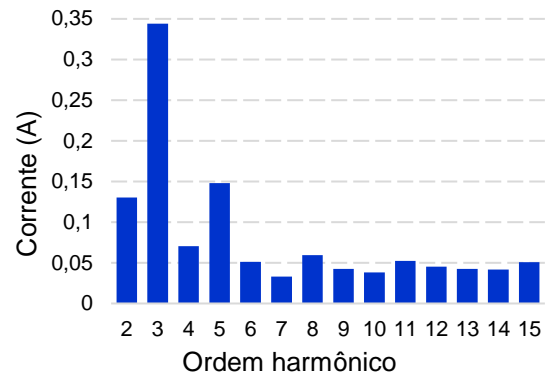
As FAIs com árvore se tornam ainda mais difíceis de detecção com os algoritmos convencionais, visto que o ângulo do 3ºh só foi verificado em 6 testes e não há o rompimento

Figura 109. Conteúdo harmônico teste 15 - Oscilografia 2 - Areia.



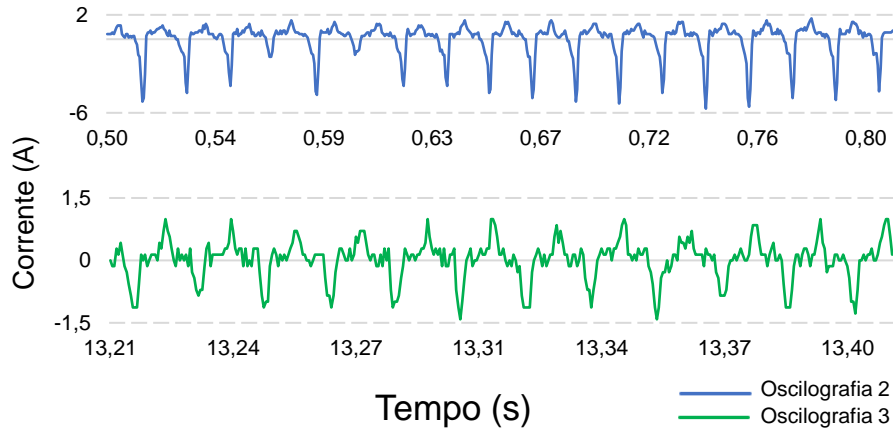
Fonte: Autoria própria.

Figura 110. Conteúdo harmônico teste 15 - Oscilografia 3 - Areia.



Fonte: Autoria própria.

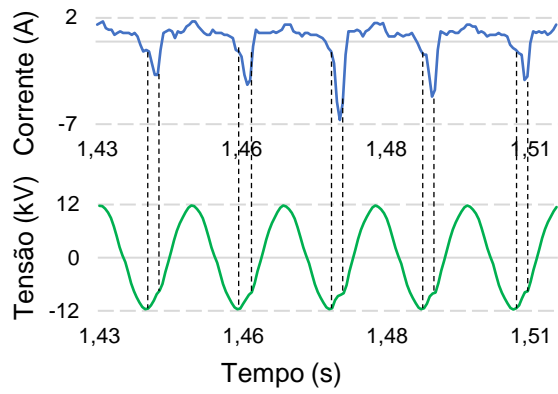
Figura 111. Corrente teste 15 - Areia.



Fonte: Autoria própria.

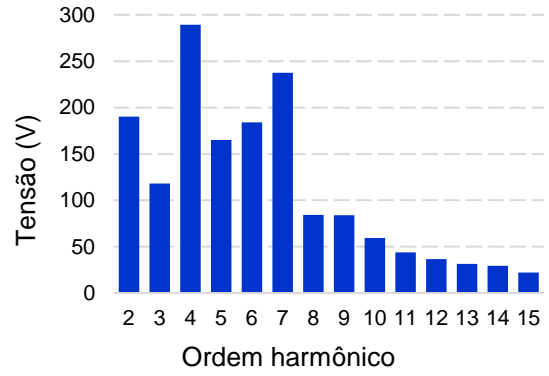
do cabo, logo, é apenas um pequeno incremento de corrente. Em geral, os resultados dos testes mostram diferenças significativas, dependendo da situação em que ocorre a FAI. Adotar valores de referência únicos para todas as situações pode limitar a detecção a um determinado tipo de falha. Para desenvolver um detector de FAI confiável, é necessário criar um algoritmo que leve em consideração todas as possíveis combinações de harmônicos da corrente e tensão. Por fim, ambos os tipos de FAI são podem ser tratados como um mesmo, é necessário que possuam diferentes metodologias de detecção.

Figura 112. Corrente e tensão teste 15 - Oscilografia 2 - Areia.



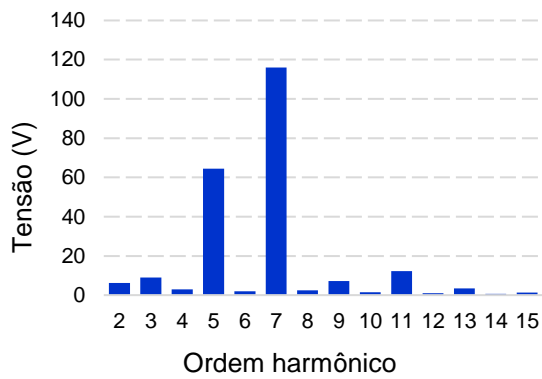
Fonte: Autoria própria.

Figura 113. Conteúdo harmônico tensão teste 15 - Oscilografia 2 - Areia.



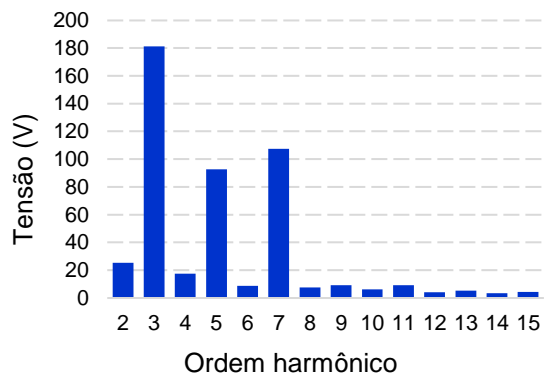
Fonte: Autoria própria.

Figura 114. Conteúdo harmônico tensão teste 2 - Concreto.



Fonte: Autoria própria.

Figura 115. Conteúdo harmônico tensão teste 1 - Grama.



Fonte: Autoria própria.

6 Conclusões e sugestões

6.1 Conclusões

A detecção de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição de energia elétrica é um desafio complexo e desafiador. O estudo realizado nesta dissertação permitiu uma compreensão aprofundada dos diferentes tipos de faltas e seu comportamento, bem como possibilitou verificar a importância de testes experimentais para avaliar métodos de detecção. Foram realizados testes em uma ampla variedade de superfícies, o que proporciona um resultado abrangente e completo.

É essencial ressaltar que este trabalho adotou uma abordagem distinta em relação aos trabalhos tradicionais de detecção de FAI, que se baseiam na criação ou reprodução de métodos utilizando limiares definidos na literatura. A abordagem inovadora deste trabalho consiste em utilizar testes experimentais em laboratório para obter análises minuciosas do espectro harmônico, que possibilitam o aprimoramento dos métodos de detecção já existentes. Essa perspectiva é especialmente relevante devido à dificuldade de obter oscilografias reais de FAI, tornando os resultados obtidos nesses testes uma fonte valiosa para o avanço da detecção de faltas de alta impedância.

O laboratório desenvolvido para testes de FAI demonstrou sua eficácia e permitiu concluir que é necessária uma abordagem específica para cada tipo de falta, uma vez que os testes produzem correntes de FAI com características diferentes. Nos testes shunt, por exemplo, foi observado que, embora a corrente de falta possa ser mais elevada em comparação aos testes shunt série, o conteúdo harmônico de ordem ímpar é menos relevante. Isso pode ser atribuído à menor presença de arco elétrico nos testes shunt em relação aos testes shunt série. É importante ressaltar que a presença de arco elétrico nos testes shunt série está condicionada à presença de água nas superfícies de contato.

A análise revelou que boa parte dos testes realizados não se encontram dentro dos limiares estabelecidos pela literatura, devido às baixas amplitudes de corrente, logo, não seriam possível de serem detectados pelos métodos apresentados. Além disso, observou-se que o ângulo do terceiro harmônico, amplamente utilizado em algoritmos baseados em harmônicos, não se mostrou um parâmetro adequado para a detecção de FAIs do tipo shunt. Em contrapartida, a soma dos harmônicos ímpares maior que a soma dos pares se mostrou como o critério com maior potencial para detecção, pois independe da porcentagem em relação à fundamental ou corrente total.

Uma alternativa para detectar os testes nas quais não possuem elevado nível de ruído é o valor do 3ºh em relação aos demais harmônicos, não à fundamental, dado que

esse valor pode ser inferior a 3%, mas o 3ºh ainda ser significativamente maior que as demais ordens, como é o caso da oscilografia 3 do teste 6 com castanhola.

Destaca-se ainda a importância da avaliação do espectro harmônico da tensão, parâmetro que geralmente não é considerado em algoritmos de detecção de FAI, mas que apresenta padrão de harmônicos específicos e pode ser utilizado em algoritmos de detecção de FAI.

Em síntese, o trabalho apresenta contribuições importantes para a validação de algoritmos de detecção de FAI e para o avanço do conhecimento na área de distribuição de energia elétrica. As conclusões obtidas são úteis para o desenvolvimento e aprimoramento de metodologias de detecção de faltas de alta impedância e para a melhoria da qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia elétrica.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Uso de outras metodologias de análises de sinais de FAI, tais como WT e STFT;
- Modificar a quantidade de amostras por ciclo para identificar o impacto na detecção;
- Ensaiar mais superfícies de contato, tais como terra seca, grama seca, seixo seco etc;
- Realizar testes com o cabo rompido pelo lado da carga e com a presença de cargas;
- Aprofundar no estudo de harmônicos no sinal da tensão e como outros fenômenos também interferem;
- Reproduzir as FAIs concomitantemente com eventos comuns na rede, tais como chaveamento de carga e energização de banco de capacitores;
- Desenvolver método de detecção de FAI fundamentado nos resultados obtidos.

Referências

- ADAMIAK, M. et al. High impedance fault detection on distribution feeders. *Protection & Control Journal*, p. 25–31, April 2006.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (prodist) - Módulos 1 ao 8. In: . [S.l.: s.n.], 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA (ABRADEE). X semana nacional da segurança da população com energia elétrica abradee. 2015. Disponível em: <<http://www.abredee.com.br/>>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA (ABRADEE). XI semana nacional da segurança da população com energia elétrica abradee. 2019. Disponível em: <<http://www.abredee.com.br/>>.
- AUCOIN, B.; JONES, R. High impedance fault implementation issues. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 1, p. 139–148, January 1996.
- BALSER, J.; CLEMENTS, K.; LAWRENCE, D. A microcomputer-based technique for detection of high impedance faults. *IEEE Transactions Power Delivery*, v. 1, n. 2, p. 252–258, 1986.
- BENNER, C. L.; RUSSELL, B. D. Practical high-impedance fault detection on distribution feeders. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 3, p. 635–640, 1997.
- BRASIL, H. *Caracterização da arborização urbana: o caso de Belém*. Belém: FCAP, 1995. 195 p.
- BUTLER, K. et al. Characterization of electrical incipient fault signature resulting from tree contact with electric distribution feeders. In: IEEE. *Power engineering society summer meeting*. Edmonton, 1999. p. 408–413.
- CORDEIRO, M. et al. Validation of a high impedance fault model for overhead distribution networks using real oscillography data. In: *Latin-American Congress on Electricity Generation And Transmission – CLAGTEE*. Santiago: [s.n.], 2019.
- COSTA, D. *Viabilidade técnica-econômica para a utilização de condutor neutro em redes elétricas de distribuição rural*. Dissertação (Monografia) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Especialização em Engenharia Elétrica.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B.; BRITO, N.; SILVA, J.; SANTOS, W. Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 51, n. 6, p. 5312–5323, 2015.
- CPFL ENERGIA. *Proteção de redes aéreas de distribuição - Sobrecorrente*. [S.l.], 2016. 98 p.

DAILY, W. K. Engineering justification for tree trimming: power system maintenance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 14, n. 4, p. 1511–1518, Oct 1999.

DJURIC, M. B.; TERZIJA, V. V. A new approach to the arcing faults detection for fast autoreclosure in transmission systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 10, n. 4, p. 1793–1798, Oct 1995.

ELKALASHY, N.; LEHTONEN, M.; DARWISH, H.; MOHAMED, I. Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, Piscataway, v. 14, n. 2, p. 375–383, Apr 2007.

ELKALASHY, N.; LEHTONEN, M.; DARWISH, H.; MOHAMED, I. Dwt-based detection and transient power direction-based location of high-impedance faults due to leaning trees in unearthed mv networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 23, n. 1, p. 94–101, Jan 2008.

EMANUEL, A. High impedance fault arcing on sandy soil in 15kv distribution feeders: Contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 676–686, Apr 1990.

EQUATORIAL. *Critérios de projetos de redes de distribuição*. [S.l.], 2017. 218 p.

FANUCCHI, R. *A detecção e a localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição utilizando transformadas wavelets e redes neurais artificiais*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

FARIAS, P. *Rede neural continuamente treinada para localização de faltas de alta impedância em redes de distribuição de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

FARIAS, P. E. *Detecção e Classificação de Transitorios em Redes de Distribuição para Identificação de Faltas de Alta Impedância*. 2013.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. *Proteção dos sistemas elétricos de potência*. 1. ed. [S.l.]: LTC, 2013. 620 p.

FUNDAÇÃO Parques e Áreas Verde de Belém - FUNVERDE, Prefeitura Municipal de Belém. [S.l.], 1995.

GARCIA, e. a. Detection of high impedance faults in overhead multi grounded networks. In: *11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. Juiz de Fora - MG: [s.n.], 2014.

GENERAL ELETRIC (GE). *High impedance fault detection on the Multilin F60 feeder protection system*. 2022. Disponível em: <<https://www.gegridsolutions.com/multilin/products/hiz/index.htm>>.

GHADERI, A.; III, H. L. G.; MOHAMMADPOUR, H. A. High impedance fault detection: A review. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 143, p. 376–388, 2017.

- GIGUER, S. *Proteção de Sistemas de Distribuição*. 1. ed. Porto Alegre: Sagra, 1988. 344 p.
- HOU, D. Detection of high-impedance faults in power distribution systems. In: *6th Annual Clemson University Power Systems Conference*. Clemson: [s.n.], 2007.
- IURINIC, L. *Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: Uma abordagem baseada na estimação de parâmetros associados a modelos no domínio do tempo*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- JEERINGS, D.; LINDERS, J. Ground resistance-revisited. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 949–956, April 1989.
- KAUFMANN, R. H.; PAGE, J. C. Arcing fault protection for low-voltage power distribution systems - nature of the problem. *AIEE Transactions on Power Apparatus System*, v. 79, p. 160–167, December 1960.
- KERSCHBAUMER, F. *Potencial energético de bambus plantados no Brasil - phyllostachys bambusoides (madake), phyllostachys nigra cv henonis (hatiku) e phyllostachys pubescens (mossô)*. 58 p. *Dissertação (Mestrado)* — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- KOTLINSKI, E. Detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição radial utilizando redes neurais artificiais. 159 p. *Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática)* — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.
- LANDINI, L. A. R. *A teoria objetiva, administrativa ou do risco integral nos serviços públicos de energia elétrica*. In: *II CONGRESSO BRASILEIRO DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS CONCEDIDOS*. São Paulo, 2001.
- LEÃO, A.; TOSTES, M.; VIEIRA, J.; BEZERRA, U.; SANTOS, M.; SOUSA, Á.; CORDEIRO, M.; HERINGER, W.; PAYE, J.; PINHEIRO, L. *Projeto e montagem de laboratório para testes experimentais de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição*. In: *XXIII Congresso Brasileiro De Automática (CBA)*. [S.l.: s.n.], 2020.
- LEITE, M. Identificação e localização de faltas de alta impedância utilizando medidores inteligentes. *Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica))* — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.
- LIMA, É. Proposição de um método de detecção de FAI baseado nos componentes harmônicos de baixa frequência. *Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica))* — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- LIMA, É. M. et al. High impedance fault detection method based on the short-time fourier transform. *IET Generation, Transmission & Distribution, IET*, v. 12, n. 11, p. 2577–2584, 2018.
- LIU, J.; DONG, X.; CHEN, X.; TONG, X.; ZHANG, X.; XU, S. *Fault Location and Service Restoration for Electrical Distribution Systems*. [S.l.]: China Electric Power Press, 2016.
- MARXSEN, T. *Vegetation conduction ignition test report—Final. 2015. Dept. Econ. Develop. Jobs Transport Resour., Marxsen Consulting Pty Ltd. Sydney.*

NAKA, H. K.; SIQUEIRA, M. J. V. *Faltas de alta impedância de distribuição: diagnóstico/soluções*. In: Seminário Nacional De Distribuição De Energia Elétrica. Blumenau: [s.n.], 1992.

NAKAGOMI, R. Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição. 90 p. *Dissertação (Mestrado)* — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NAM, S.; PARK, J.; KANG, Y.; KIM, T. *A modeling method of a high impedance fault a distribution system using two series time-varying resistances in emtp*. In: IEEE PES Summer Meeting. Vancouver: [s.n.], 2001. v. 2, p. 1175–1180.

OLIVEIRA, D. Faltas de alta impedância: Detecção e localização de rompimentos de condutores em circuito primário de redes aéreas de distribuição baseado em desequilíbrio de tensão. 176 p. *Dissertação (Mestrado)* — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. *Fundamentals of power system protection*. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2010.

ROBERTS, J.; ALTUVE, H.; HOU, D. *Análise dos métodos de proteção contra faltas à terra nos sistemas da distribuição aterrados, não aterrados e compensados*. Publicação técnica da Schweizer Engineering Laboratories – SEL, Pullman, v. 39, 2001.

ROSSINI, J.; CARDOSO, G.; MORAIS, A.; SANTOS, M.; VIEIRA, J.; FARIAS, P.; GALLAS, M.; WONTROBA, A. *Avaliação da seleção de fases para faltas de alta impedância em redes de distribuição a partir da comparação angulas de componentes simétricas*. In: XXV Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica. Belo Horizonte: [s.n.], 2019.

RUSSELL, B. *Detection of Arcing Faults on Distribution Feeders*. Palo Alto, 1982.

RUSSELL, B. D. *Ieee tutorial course: Detection of downed conductors on utility distribution systems*. In: IEEE Winter Power Meeting. [S.l.: s.n.], 1989. v. 5, p. 48.

SANTOS, W. *High impedance faults: From field tests to modeling*. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 24, n. 6, p. 885–896, dez 2013.

SANTOS, W. Identificação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. 117 p. *Tese (Doutorado)* — Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SANTOS, W.; COSTA, F.; BRITO, N.; SOUZA, B. *Considerações sobre diferentes maneiras de modelagem de faltas de alta impedância*. In: IV Simpósio brasileiro de sistemas elétricos. Goiânia: [s.n.], 2012.

SANTOS, W.; LOPES, F.; BRITO, N.; SOUZA, B. *High impedance fault identification on distribution networks*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 32, n. 1, p. 23–32, fev 2016.

SARDETO, E. Avaliação técnica, econômica e de impacto ambiental da implantação das redes compactas protegidas em Maringá. 71 p. *Dissertação (Mestrado)* — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

SATO, F.; FREITAS, W. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica. 1st. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 456 p.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES (SEL). Arc Sense™ Technology (AST). 2022. Disponível em: <https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Product%20Literature/Flyers/Arc-Sense_PF00160.pdf>.

SILVA, D. Integração entre as atividades de planejamento e operação em uma empresa de distribuição de energia elétrica. 93 p. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2013.

SILVA, P. Técnica alternativa para a detecção de falta de alta impedância. 106 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1992.

SOUSA, Á. L. d. Projeto, montagem e validação de laboratório para testes experimentais de falta de alta impedância em redes aéreas de distribuição. 107 p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2020. Faculdades de Engenharias Elétrica e Biomédica.

SOUZA, F. Identificação de faltas de alta impedância por análise de características cicloestacionárias. 94 p. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Mestrado em Ciências.

STEWART, J. Detecting high impedance faults. p. 48–51, December 1979. Fotocópia de periódico desconhecido.

SUBRAMANIAN, S.; VENKATARAMAN, K. Detection of high impedance fault in MV distribution system. 2012.

TENGDIN, J.; WESTFALL, R.; STEPHAN, K. High impedance fault detection technology. [S.l.], 1996.

TORRES, V. et al. Modeling and detection of high impedance faults. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 61, p. 163–172, 2014.

WESTER, C. High impedance fault detection on distribution systems. [S.l.], 1998.

WONTROBA, A. Metodologia de detecção e classificação de faltas de alta impedância em redes de distribuição: Implementação em Hardware e Validação por meio de Simulação Digital em Tempo Real. 127 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

YEH, H. G.; TRAN, D. H.; YINGER, R. High impedance fault detection using orthogonal transforms. In: IEEE GREEN ENERGY AND SYSTEMS CONFERENCE (IGESC). Long Beach: [s.n.], 2014.

ZANJANI, e. a. High impedance fault detection of distribution network by phasor measurements units. In: SGRE. [S.l.: s.n.], 2013.