

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Análise de uma nova proposta para
identificação de faltas de alta impedância em
redes aéreas de distribuição

Hélio Rubens Jacob da Silva

Uberlândia

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Análise de uma nova proposta para
identificação de faltas de alta impedância em
redes aéreas de distribuição

Dissertação apresentada por Hélio Rubens Jacob da Silva à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

José Rubens Macedo Junior, Dr. (Orientador) – UFU

Isaque Nogueira Gondin, Dr. – UFU

Jacques Miranda Filho, Dr. – IFES/ES

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 2020	<p>Silva, Hélio Rubens Jacob da, 1978- Análise de uma nova proposta para identificação de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição [recurso eletrônico] / Hélio Rubens Jacob da Silva. - 2020.</p> <p>Orientador: José Rubens Macedo Junior. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.122 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Macedo Junior, José Rubens ,1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 726, PPGEELT				
Data:	Vinte e sete de janeiro de dois mil e vinte	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	15:40
Matrícula do Discente:	11812EEL008				
Nome do Discente:	Hélio Rubens Jacob da Silva				
Título do Trabalho:	Análise de uma nova proposta para identificação de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição.				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Distribuição de energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Desenvolvimento de religadores automáticos para identificação de faltas de alta impedância (Cabeça-de-série) Agência Financiadora: CEMIG-D Início: 30/11/2018 Término: 29/11/2020 No. do Projeto na Agência: D-0617 Professor Coordenador: José Rubens Macedo Junior				

Reuniu-se no Anfiteatro 1E, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Isaque Nogueira Gondim - FEEL/UFU; Jacques Miranda Filho - IFES-ES; José Rubens Macedo Junior - FEEL/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). José Rubens Macedo Junior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Mestre**.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Rubens Macedo Junior, Presidente**, em 27/01/2020, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Isaque Nogueira Gondim, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/01/2020, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jacques Miranda Filho, Usuário Externo**, em 27/01/2020, às 15:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1752316** e o código CRC **B01ED683**.

*Dedico este trabalho a todas as pessoas que
conheci neste período de pós-graduação e que
de alguma forma contribuíram para sua
realização*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter colocado pessoas tão boas no meu caminho que me ajudaram a conseguir concluir meu objetivo.

Agradeço à Gisele e ao Gerson Flávio que sempre me incentivaram a prestar o processo seletivo para o mestrado.

Ao meu orientador, Prof. José Rubens Macedo Junior, deixo expresso meus sinceros agradecimentos por toda a confiança, liderança, paciência, oportunidades, amizade e conselhos dados durante todo meu trajeto nesta pós-graduação e até mesmo em momentos anteriores a ela.

Agradeço aos meus colegas de laboratório Gabriel Miyasaka, Guilherme Leal Xavier, Rodrigo Nobis, Eduardo Tavares, Isaque Gondin, Lara e Lucas que em nenhum momento me negaram auxílio durante as dúvidas e desafios encontrados nessa jornada.

Também agradeço à concessionária CEMIG pela oportunidade e apoio financeiro e por fim, agradeço a todos os companheiros da Faculdade de Engenharia Elétrica, instituição que levarei para sempre e com muito orgulho dentro do coração.

RESUMO

A detecção de faltas de alta impedância (FAIs) tem sido um formidável desafio para os engenheiros que trabalham diretamente com a distribuição da energia elétrica. Em geral, as FAIs estão associadas com os condutores primários da rede de distribuição, quando estes entram em contato com objetos como árvores, construções ou até o solo, no caso da ruptura de um condutor. Esse tipo de falta, de fato, não produz correntes suficientemente altas para a correta atuação dos equipamentos convencionais de proteção contra sobrecorrente, como chaves fusíveis, religadores automáticos e chaves seccionadoras. Nestas situações, em particular quando da ocorrência de FAIs associadas com a ruptura de condutores energizados, a corrente da falta de alta impedância não é suficientemente alta e o equipamento de proteção contra sobrecorrente, situado à montante desta, não irá detectá-la. Consequentemente, o condutor irá permanecer energizado no solo com tensões a partir de poucas centenas a várias dezenas de milhares de volts, colocando em risco as vidas de pessoas e animais.

Desde a década de 70, vários estudos foram conduzidos no intuito de se encontrar uma tecnologia adequada para a detecção de FAIs. Nestes estudos, cada qual com uma abordagem diferente para o problema, foram utilizadas as mais variadas técnicas, entretanto, tais técnicas não apresentaram alta confiabilidade e segurança em termos de detecção e diferenciamento entre a ocorrência de uma FAI e eventos comuns às redes de distribuição, como chaveamentos de cargas ou de banco de capacitores.

Dessa forma, o presente trabalho faz a análise de uma nova proposta utilizando a característica da assinatura inter-harmônica presente no sinal de corrente deste tipo de falta.

Para se verificar a eficiência da proposta, o protótipo de um religador com uma inteligência desenvolvida para detectar essas assinaturas foi construído e vários testes, em diferentes tipos de solos, foram realizados dentro de um campo de testes construído especificamente para este fim. Os resultados obtidos mostraram que a nova técnica desenvolvida é bastante promissora.

Palavras-chave: religadores automáticos, filtros FIR, faltas de alta impedância, inter-harmônicos, sistemas de proteção.

ABSTRACT

High impedance fault detection (FAIs) has been a formidable challenge for power distribution systems. In general, FAIs are associated with the primary conductors of the distribution network when exposed to objects such as trees, buildings or even the ground in the event of a conductor rupture. This type of fault does not, in fact, produce sufficiently high currents for the correct detection of overcurrent in protective equipment, such as fuse breakage, automatic closing of reclosers and disconnectors. In these situations, where the occurrences of FAIs are directly associated with the breakdown of live conductors, the resulting high fault impedance current is not high enough and the overcurrent equipment upstream will not detect over there. Consequently, the conductor will remain energized on the ground with voltages from a few hundred to several tens of thousands of volts, endangering the lives of people and animals.

Since the 1970s, several studies have been conducted to find a suitable technology for detecting FAIs. In these studies, each with a different approach to the problem, the most varied of techniques were used, however, these techniques did not present high reliability and safety in terms of detection and differentiation between an occurrence of an FAI and events common to distribution lines as load shifting or capacitor bank switching.

Thus, the present work brings a new proposal using the characteristic of the interharmonic signature present in the current signal of this type of fault.

To verify the efficiency of the proposal, a prototype of a recloser with an intelligence developed to detect these signatures was built and several tests on different types of soils were carried out within a field test built specifically for this purpose. The results showed that the proposed technique is very promising.

Keywords: automatic reclosers, FIR filters, high impedance faults, interharmonics, protection systems.

SUMÁRIO

1) INTRODUÇÃO	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2 A IMPORTÂNCIA DA PROTEÇÃO CONTRA FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	15
1.3 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	16
1.4 ESTRUTURA DO TEXTO	18
2) O ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS PARA DETECÇÃO DE FAIS	20
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O ESTADO DA ARTE PARA DETECÇÃO DE FAIS	20
2.2 HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DA METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE FAIS	21
3) CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO BRASILEIRAS E SUA INEFICIÊNCIA QUANTO À DETECÇÃO DE FAIS	32
3.1 CARACTERÍSTICAS DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	32
3.2 A INEFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO PERANTE AS FAIS	34
3.3 CONDUTORES ROMPIDOS EM CIRCUITOS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIOS	36
3.3.1 TIPOS DE ROMPIMENTO DE CONDUTORES	36
3.3.2 PRINCIPAIS CAUSAS DE ROMPIMENTO DOS CONDUTORES	39
4) O FENÔMENO DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA	42
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	42
4.2 DEFINIÇÃO E TIPOS DE FAI	42
4.2.1 FAIS ATIVAS	43
4.2.2 FAIS PASSIVAS	43
4.3 NATUREZAS DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	44
4.3.1 FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA ATIVA SÉRIE COM CONDUTOR CAÍDO AO SOLO	44
4.3.2. FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA ATIVA SÉRIE COM CONDUTOR TOCANDO OBJETOS EXTERNOS	50
4.3.3. FAIS ATIVAS SHUNT	50
4.3.4. FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA PASSIVA	51
4.4 CARACTERÍSTICAS DE UMA FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE UMA FAI	51
4.4.1 CONTEÚDO HARMÔNICO	51
4.4.2 SHOULDER	52
4.4.3 BUILDUP	52
4.4.3 INTERMITÊNCIA	52
4.4.4 NÃO LINEARIDADE	52
4.4.5 ASSIMETRIA	52
4.5 SIMULAÇÃO DE UMA FAI EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO COM NEUTRO MULTI-ATERRADO	53
4.5.1 CARACTERÍSTICAS DO CIRCUITO DE MÉDIA TENSÃO MODELADO	53
4.5.2 MODELO DA FAI A SER UTILIZADO	54
4.5.3 SIMULAÇÕES DA FAI MODELADA	56
4.5.4 ANÁLISE DAS COMPONENTES HARMÔNICAS E INTER-HARMÔNICAS DA CORRENTE DAS FAIS	58
5) A METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE FAIS POR MEIO DO COMPORTAMENTO INTER-HARMÔNICO DA CORRENTE DE FALTA	80
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	80
5.2 CONTEÚDO INTER-HARMÔNICO DAS CORRENTES DE ARCOS ELÉTRICOS	80
5.3 A METODOLOGIA PROPOSTA	81
5.4 O PROTÓTIPO DESENVOLVIDO	87
5.5 TESTE DE CAMPO CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE SOLOS	88
5.6 RESULTADOS	91
6) CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE NOVOS TRABALHOS	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 - Número de mortes e número total de acidentes envolvendo FAIs.
- Figura 1.2 - Percentual de mortes do total de acidentes envolvendo FAIs.
- Figura 3.1 – Ajustes de proteção de um alimentador hipotético.
- Figura 3.2 – Esquema para exemplificação das possibilidades de acidentes com condutores rompidos.
- Figura 4.1 – Características presentes na forma de onda de uma FAI.
- Figura 4.2 – Modelagem da representação da subestação supridora da rede de distribuição de MT.
- Figura 4.3 – Modelagem de um trecho da linha de distribuição de MT onde foi aplicada a FAI.
- Figura 4.4 – Construção do modelo de FAI proposto por Emanuel [10].
- Figura 4.5 – Construção do modelo de FAI utilizado na simulação do trabalho.
- Figura 4.6 – Forma de onda obtida durante a simulação da FAI aplicada em um ponto da rede MT.
- Figura 4.7 – Trecho ampliado da forma de onda da FAI aplicada em um ponto da rede MT.
- Figura 4.9 – Trecho ampliado da forma de onda da FAI aplicada na subestação.
- Figura 4.10 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental.
- Figura 4.11 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica.
- Figura 4.12 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica.
- Figura 4.13 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica.
- Figura 4.14 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica.
- Figura 4.15 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental.
- Figura 4.16 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica.
- Figura 4.17 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica.
- Figura 4.18 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica.
- Figura 4.19 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica.
- Figura 4.20 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Areia).
- Figura 4.21 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica (Areia).
- Figura 4.22 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica (Areia).
- Figura 4.23 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica (Areia).
- Figura 4.24 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica (Areia).
- Figura 4.25 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Asfalto).
- Figura 4.26 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica (Asfalto).
- Figura 4.27 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica (Asfalto).
- Figura 4.28 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica (Asfalto).
- Figura 4.29 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica (Asfalto).

Figura 4.30 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Brita).
Figura 4.31 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica (Brita).
Figura 4.32 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica (Brita).
Figura 4.33 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica (Brita).
Figura 4.34 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica (Brita).
Figura 4.35 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Capim).
Figura 4.36 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica (Capim).
Figura 4.37 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica (Capim).
Figura 4.38 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica (Capim).
Figura 4.40 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Concreto).
Figura 4.45 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Terra).

TABELAS

Tabela 4.1 – Valores da magnitude das correntes de FAIs testadas no estudo da TAMU.

Tabela 4.2 – Valores típicos para FAIs obtidas nos testes de campo dos estudos da UFU.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- Δf – Resolução do espectro de frequências do sinal amostrado;
- A – *Amperes*;
- ANFIS – *Adaptative Neuro-fuzzy Inference System*;
- AWG – *American Wire Gauge*;
- CA – *Alternate Current*;
- CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais;
- COD – Centro de Operação da Distribuição;
- CODO – *Closing Opening Difference Operation*;
- DC – *Direct Current*;
- DFM – *Digital Fender Monitor*;
- DFT – *Discrete Fourier Transform*;
- DIC – Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora;
- DT – *Decision trees*;
- DWT – *Discrete Wavelet Transform*;
- EA – Energia do sinal filtrado das faixas de frequência A;
- EB – Energia do sinal filtrado das faixas de frequência B;
- EKR – *Extended Kalman Filter*;
- EMTP – *Eletromagnetic Transients Program*;
- EPRI – *Electric Power Research Institute*;
- EUA – Estados Unidos da América;
- f_1 – Frequência fundamental (60 Hz);
- FAI – Falta de Alta Impedância;
- FFT – *Fast Fourier Transform*;
- FIC – Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora;
- FIR – *Finite Impulse Response*;
- FIS – *Fuzzy Inference System*;
- GRIDIS – Grupo de Intercâmbio e Difusão de Informação sobre Engenharia e Medicina do Trabalho;
- GRNN – *Generalized Regression Neural Networks*;
- HIFAS – *High Impedance Fault Alarm System*;
- Hz – *Hertz*;
- IEEE – *Institute of Electrical and Eletronic Engineers*;

IH – Magnitude do índice inter-harmônico, expresso em amperes ou em percentual da corrente fundamental nas faixas de frequências consideradas;

ih_j – Amplitude das frequência inter-harmônicas de frequência j ;

ih_k – Amplitude das frequência inter-harmônicas de frequência k ;

IH_{REF} – Índice inter-harmônico de referência;

kV – *Kilovolts*;

MLPNN – *Multi-layer Perceptron Neural Networks*;

MM – *Mathematical Morphology*;

MMG – *Multi-resolution Morphological Gradient*;

MSD – *Multi-Resolution Signal Decomposition*;

MT – Média Tensão;

MVA – *Megavolt-ampere*;

N – tamanho da amostra;

NBI – Nível Básico de Isolação;

p – Número de ciclos para a janela amostral;

PLC – *Power Line Communication*;

PLL – *Phase Locked Loop*;

PP&L – *Pennsylvania Power and Light*;

PSRC – *Power Systems Relaying Comittee*;

SE – Subestação de Energia elétrica;

SVM – *Support Vector Machine*;

SVM – *Support Vector Machine*;

SVM – *Support Vector Machine*;

T – Período do sinal amostrado;

TAMU – *Texas A&M University*;

TC – Transformador de Corrente;

TFA – *Time Frequency Distribution*;

UFU – Universidade Federal de Uberlândia;

WAFB – *Wavelet Analyses Filter Bank*;

Z_{in} – Impedância de entrada da rede;

β – Constante de parametrização de IH_{REF}

Capítulo I

Introdução

1.1 Considerações iniciais

A detecção de curtos-circuitos em sistemas de distribuição de energia elétrica é normalmente realizada por equipamentos que detectam um elevado nível de corrente, se comparado com os níveis normais para o sistema em questão, baseado em suas respectivas curvas de ajuste de tempo e magnitude de corrente.

Curtos-circuitos possuindo como característica principal a alta impedância no ponto de falta, e que frequentemente não podem ser detectados com confiabilidade pelo sistema de proteção, são comumente chamados, na literatura, como “faltas de alta impedância” ou simplesmente FAIs.

Inúmeros tipos de FAIs geram níveis de corrente insuficientes para sensibilizar a operação de equipamentos de proteção contra sobrecorrentes. Devido a esse fato, no caso das redes de distribuição de energia elétrica, podem causar acidentes graves com pessoas, animais e ainda provocar incêndios em propriedades, principalmente quando na ocorrência da queda de condutores energizados de circuitos de rede primária, sendo que estes apresentam um maior nível de tensão dentro do sistema de distribuição de energia elétrica.

Com isso posto, entende-se que este distúrbio tenha surgido desde a criação dos sistemas de distribuição de energia elétrica, tornando-se uma grande preocupação devido ao adensamento populacional, em conjunto com o crescimento das linhas de distribuição dentro destes adensamentos.

Devido suas características e consequências, este problema está mais associado à proteção da população do que com a própria proteção da rede de distribuição, fato este que em muitos casos coloca em dúvida, por parte de algumas distribuidoras, até que ponto o investimento em pesquisas e equipamentos de detecção, para este tipo de falta, são interessantes dentro do plano de negócios de cada empresa. Entretanto, este assunto diz respeito à preservação das vidas de filhos, pais de família e entes queridos da população que estejam sujeitos aos acidentes associados a este tipo de evento.

Diante deste fato, concessionárias, órgãos governamentais, universidades e fabricantes de equipamentos elétricos vêm tentando encontrar formas confiáveis e seguras para detecção de FAIs por meio de pesquisas, desenvolvimento de equipamentos, testes computacionais e de campo.

Contudo, apesar dos inúmeros esforços, principalmente nas últimas quatro décadas, até hoje não foi desenvolvida uma metodologia que tenha atingido um grau de excelência na detecção deste tipo de falta. E é justamente por este motivo que tais estudos e desenvolvimentos de pesquisas devam continuar no intuito de um dia se conseguir um método totalmente confiável, que seja capaz de distinguir uma FAI, no menor tempo possível, e que diferencie este tipo de falta de eventos comuns às redes de distribuição, que possuem características idênticas, porém, com uma duração bem inferior às FAIs, como o rompimento de elos fusíveis, abertura de chaves e chaveamento de bancos de capacitores.

1.2 A importância da proteção contra faltas de alta impedância

Mesmo havendo uma baixa frequência de ocorrências de FAIs envolvendo a queda de condutores primários, quando comparada à de faltas de alta corrente, a necessidade de uma solução é grande frente à gravidade e ao número de acidentes ocorridos com pessoas nas situações em que o circuito não é desenergizado quando o condutor rompido cai e permanece ao solo.

Por meio dos poucos dados obtidos sobre os acidentes e mortes ocorridos no Brasil, uma vez que estes são de difícil obtenção por não ser de domínio público, foram construídos dois gráficos ilustrados nas figuras 1.1 e 1.2, conforme demonstrado a seguir:

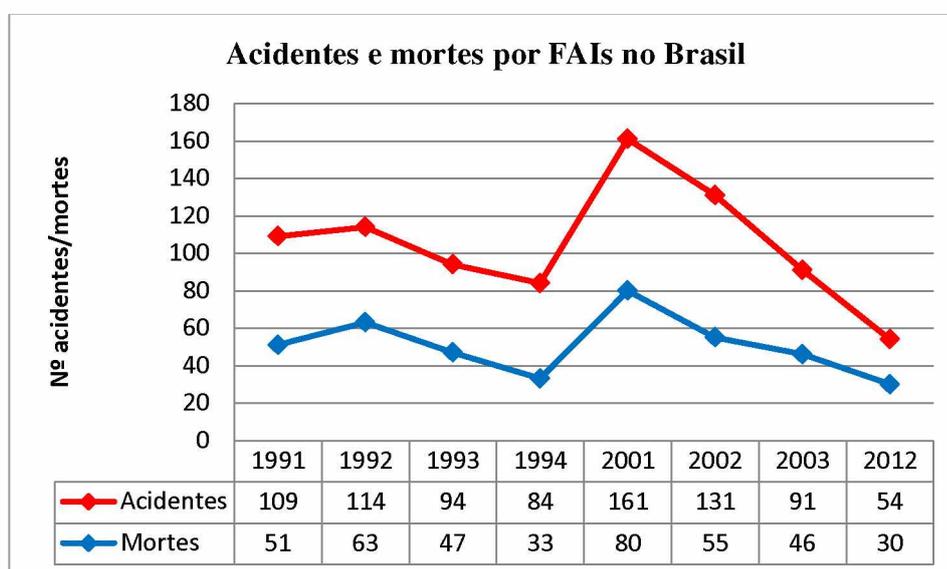


Figura 1.1 - Número de mortes e número total de acidentes envolvendo FAIs (1991 – 2012).

A Figura 1.1 apresenta a evolução dos acidentes devido às FAIs no Brasil, assim como o número de casos de mortes dentro desse número total de acidentes. Tais dados

foram levantados pelo GRIDIS - Grupo de Intercâmbio e Difusão de Informação sobre Engenharia de Segurança e Medicina do Trabalho.

Por sua vez, a Figura 1.2 demonstra o percentual do número de mortes dentro do universo total do número de acidentes ocorridos em cada ano.

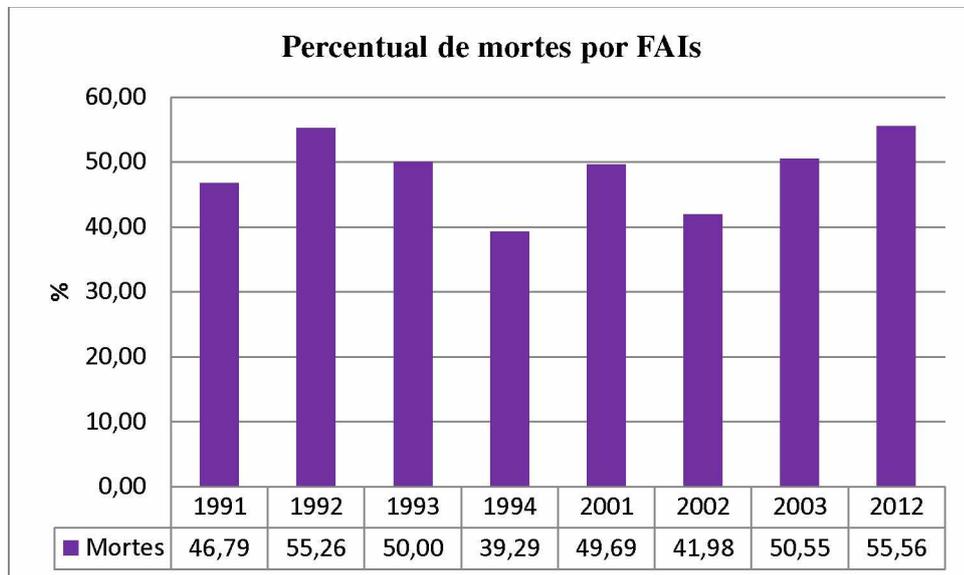


Figura 1.2 - Percentual de mortes do total de acidentes envolvendo FAIs.

Verifica-se por meio da análise das Figuras 1.1 e 1.2, que praticamente existe uma letalidade de 50% dentro do universo de acidentes causados por FAIs.

Somada à perda de vidas e casos de lesões irreversíveis, ainda existem as responsabilidades jurídicas impostas às concessionárias em vários casos de acidentes, que geralmente resultam em indenizações de vultosas somas financeiras às partes lesadas, ou até mesmo processos civis contra engenheiros, técnicos e eletricitistas destas empresas.

1.3 Objetivos e contribuições do trabalho

Acidentes envolvendo FAIs, sobretudo casos envolvendo a queda de cabos energizados ao solo, continuam a ocorrer nas concessionárias de distribuição de energia elétrica, mesmo em tempos de avanços tecnológicos e após vários anos de estudos, testes e construções de protótipos utilizando os mais variados tipos de métodos para a detecção deste tipo de falta. Tais métodos ainda apresentam uma grande limitação quanto à segurança e confiabilidade da detecção de FAIs, uma vez que, até o momento, não foi desenvolvido um equipamento de proteção que detecte 100 % destes eventos, e que ao

mesmo tempo não classifique como FAI, eventos comuns à rede de distribuição, que possuem as mesmas características deste tipo de falta.

Por este motivo, a evolução da eficiência destas metodologias, ou até mesmo a criação de novas, se faz necessária para a redução, ou se possível e preferível, a extinção deste problema. Dessa forma, tal necessidade é o que motiva engenheiros, pesquisadores, concessionárias, fabricantes de equipamentos de proteção de sistemas elétricos de potência, órgãos governamentais e a sociedade como um todo, buscando a segurança física, psicológica e financeira da população em geral.

Com isto posto, o presente trabalho faz a análise de uma nova metodologia para a detecção de FAIs, baseada no comportamento inter-harmônico das correntes presentes nas redes de distribuição de energia elétrica.

Tal metodologia se baseia nas consideráveis mudanças do conteúdo das frequências inter-harmônicas e adjacentes à frequência fundamental do sinal de corrente analisado. O monitoramento desta característica permite que este método de detecção seja mais assertivo do que outros métodos indicados na literatura, como por exemplo, os que utilizam a magnitude do conteúdo harmônico de corrente, a relação percentual das componentes simétricas de sequência negativa, zero e o ângulo entre elas. Tal afirmação se baseia no fato de que, nos dias atuais, com o advento da eletrônica de potência e com o aumento do uso de equipamentos com características não lineares, tais métodos podem estar mais propensos a indicar falsos positivos durante o processo de detecção de FAIs.

Por fim, uma vez que o comportamento do conteúdo inter-harmônico das FAIs foi explorado em poucos trabalhos, e sendo que estes levaram em conta o comportamento inter-harmônico de alta frequência, a metodologia analisada neste trabalho se demonstra original e muito promissora.

O desenvolvimento do presente trabalho tem como principais etapas:

- Revisão bibliográfica abordando o estado da arte em relação aos métodos para detecção de FAIs até o ano de 2018;
- Abordagem das características das redes de distribuição de energia elétrica no Brasil e seu comportamento frente ao evento de falta de alta impedância;

- Descrição do fenômeno FAI, enumerando seus principais tipos e características;
- Modelagem, simulação e apresentação dos efeitos de uma falta de alta impedância em um sistema de distribuição em média tensão, aplicando-se o modelo da falta tanto do lado da carga como no lado da fonte do sistema simulado;
- Análise da nova metodologia proposta que utiliza as características intrínsecas da assinatura inter-harmônica da corrente instantânea de uma falta de alta impedância e exposição dos resultados obtidos durante os testes do protótipo de um religador automático, construído com uma inteligência baseada nesta metodologia de detecção de FAIs;
- Proposição de uma melhoria desta metodologia, no intuito de se extinguir o risco de “falsos positivos” durante o monitoramento de um circuito, devido a eventos comuns dentro de uma rede de distribuição, como por exemplo, chaveamento de bancos de capacitores, rompimento de elos fusíveis e abertura e fechamento de chaves seccionadoras.

1.4 Estrutura do texto

No intuito de cumprir com o propósito apresentado na introdução deste trabalho, o mesmo segue estruturado da seguinte forma:

CAPITULO I – O capítulo introdutório, além de apresentar os objetivos e contribuições esperados na execução deste trabalho, oferece uma visão geral da importância do desenvolvimento de uma metodologia segura e confiável para a detecção de faltas de alta impedância, principalmente quanto à segurança da população que reside nas cidades e vilas rurais, que por sua vez, são supridas pelas redes de distribuição de energia elétrica que estão sujeitas a apresentarem problemas estruturais, levando à possibilidade da ocorrência de acidentes que, por muitas vezes, são fatais.

CAPITULO II – Este capítulo discorre sobre o estado da arte quanto à detecção das FAIs, descrevendo resumidamente, em ordem cronológica, todos os métodos publicados no IEEE até o ano de 2018.

CAPITULO III – Este capítulo apresenta as principais características das redes de distribuição de energia elétrica brasileiras, assim como discorre sobre os problemas físicos destas instalações que podem levar à ocorrência de um evento de FAI e ainda demonstra o motivo da ineficiência das proteções de rede usuais frente a este tipo de evento.

CAPITULO IV – Este capítulo é dedicado a descrever o evento FAI, procurando demonstrar a definição do fenômeno, assim como seus tipos, natureza e características do arco elétrico presentes neste tipo de falta. Ainda neste capítulo, serão apresentadas as características inter-harmônicas da corrente de um modelo de FAI, retirado da literatura, em um sistema de distribuição de média tensão modelado no software Matlab. Em seguida, são apresentadas as formas de onda de FAIs reais, obtidas em um campo de testes, assim como a apresentação do espectro de frequências das inter-harmônicas das correntes destas faltas.

CAPITULO V – Neste capítulo é feita a análise da nova metodologia proposta, da construção do protótipo, dos resultados de sua aplicação durante os testes de campo e a proposição de uma melhoria a ser aplicada na programação do software do protótipo, no intuito de reduzir o risco de falsos positivos durante a ocorrência de distúrbios transitórios e corriqueiros nos sistemas de distribuição de energia elétrica, como por exemplo, o fechamento de bancos de capacitores e aberturas de chaves seccionadoras.

CAPITULO VI – Este capítulo traz um apanhado geral do que foi extraído durante a execução do trabalho, assim como são feitas algumas considerações em relação às melhorias e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo II

O estado da arte dos métodos para detecção de FAIs

2.1 Considerações iniciais sobre o estado da arte para detecção de FAIs

Atualmente, a identificação das FAIs vem sendo um desafio para as concessionárias, onde suas proteções convencionais, em muitos casos, não são capazes de identificá-las. Diante disso, soluções para a identificação deste tipo de falta tem sido objeto de estudo ao longo dos anos. De acordo com [1], já em 1949, muitos estudos já vinham sendo conduzidos, entretanto, sem resultados promissores, conforme afirmação da AIEE Power Systems Relaying Committee Working Group, PSRC.

De acordo com [2], as técnicas propostas até o ano de 2011 poderiam ser divididas em 4 grupos, conforme a seguir:

- a) *Técnicas no domínio do tempo*: metodologias utilizando métodos de detecção baseados na forma de onda da corrente de falta, incluindo tipos específicos de relés eletromecânicos e redes neurais baseadas na retransmissão de sinais em uma rede de distribuição;
- b) *Técnicas no domínio da frequência*: os algoritmos de detecção se baseiam em aplicações utilizando a Transformada Discreta de Fourier (DFT) para extrair características das componentes harmônicas das formas de ondas das correntes das FAIs, tendo como abordagens principais o comportamento da 3ª harmônica do sinal de corrente, padrões de reconhecimento estatístico, técnicas de detecção do quantitativo de energia envolvido, técnicas de reconhecimento randômico, detecção de assimetrias de meio ciclo e técnicas de razão entre amplitudes de sinais de correntes;
- c) *Técnicas envolvendo a Transformada Discreta de Wavelet (DWT)*: tal técnica pode ser empregada para examinar a transição dos sinais de FAIs, com uma maior aproximação tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência;

- d) *Técnicas envolvendo sistemas de Redes Neurais Adaptativas Fuzzy (ANFIS)*: tal técnica utiliza combinações das técnicas anteriores, de forma a promover um aprendizado progressivo do algoritmo.

Para um entendimento do estado da arte quanto a este tema, a seguir será feita uma breve abordagem cronológica envolvendo as principais técnicas propostas para a detecção de FAIs.

2.2 Histórico da evolução das metodologias para detecção de FAIs

Na literatura são propostos vários métodos para identificação das FAIs, baseados em processamento de sinais, matemática morfológica e filtro de Kalman, inteligência artificial, lógica difusa, como também, métodos baseados no monitoramento de determinadas grandezas do sistema de distribuição de energia elétrica.

Em 1981, foi proposto por [3] uma técnica de detecção de FAIs por meio do cálculo do valor de impedância de uma falta a partir da combinação das correntes de fase e de neutro dos circuitos de distribuição. Segundo o autor, tal combinação poderia ser implementada por meio de um transformador de corrente de janela dupla, entretanto, tal técnica não foi testada em campo, impedindo a verificação do correto funcionamento da técnica quando na alteração dos parâmetros elétricos do circuito monitorado. Ainda neste trabalho, como uma forma adicional de detecção, foi defendido o uso da medição das frequências harmônicas de corrente, motivado pelo fato de tal técnica apresentar respostas promissoras, conforme estudos ocorridos nos 15 anos anteriores.

Em 1982, de acordo com [4], foram desenvolvidos 4 esquemas de relés mecânicos para que fossem testados de forma a verificar a eficiência de cada um deles na detecção de seis tipos de FAIs, com suas características simuladas por meio do software ANACOM III Feeder Simulations.

Tendo sido o esquema de melhor eficiência escolhido, foi construído um protótipo e este implementado de forma a controlar um religador automático. De acordo com os autores, o protótipo teve um sucesso na faixa de 80 a 85% durante a detecção de FAIs.

Dentre os problemas encontrados na execução dos testes de campo, foram citados os falsos positivos durante os rompimentos de elos fusíveis existentes no circuito testado, a presença de faltas desbalanceadas e a necessidade da existência de circuitos compostos por quatro fios para um correto funcionamento do equipamento de proteção testado.

Ainda em 1982, os autores de [5] propuseram um método de detecção de FAIs baseado na medição das componentes harmônicas de alta frequência das correntes. Contudo, essa técnica apresentou maior eficiência para correntes de arcos constantes, ou seja, bem diferentes das condições dos arcos presentes em um evento de FAI. Além desse fato, na presença de arcos contínuos, somente correntes de magnitudes maiores a 10 A foram detectadas. E ainda, a presença de bancos de capacitores no circuito aumentava a incidência de falsos positivos nos testes de detecção.

Em 1986, os autores de [6] propuseram uma técnica de detecção de FAIs por meio da verificação do desbalanço das componentes harmônicas de corrente, partindo da premissa de que faltas por meio de contatos em superfícies apresentavam desbalanços significativos nas componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordens, enquanto que em faltas originadas do rompimento de condutores provocam desbalanços mais significativos na componente fundamental da corrente. Sabendo que a componente fundamental possui característica de componente simétrica unicamente positiva, que a 3ª harmônica possui características de componentes simétricas de sequência unicamente zero e que a 5ª harmônica possui componente simétrica positiva e negativa, foram realizados testes para se mensurar as características de componentes simétricas de cada tipo de falta, de acordo com a superfície de contato. Esses testes deram origem a uma curva normalizada para servir de comparação com as componentes de sequência positiva, negativa e zero do sinal de corrente a ser analisado.

Após a coleta do sinal de corrente, era aplicada a Transformada de Fourier para a decomposição do sinal em suas frequências harmônicas. Após esse processo, era executada a comparação da magnitude das componentes simétricas apresentadas no circuito monitorado com as curvas normalizadas oriundas dos testes anteriormente realizados de acordo com cada tipo de superfície.

Em 1987, os autores de [7] aprimoraram seu método de detecção anteriormente apresentado em [5]. Neste novo método, passou-se a monitorar o comportamento das inter-harmônicas da corrente de falta próximas da fundamental, uma vez que estas mostravam uma maior sensibilidade na presença de FAIs quando comparado com as ordens harmônicas que podiam apresentar mudanças durante eventos normais presentes nos circuitos monitorados.

No final do trabalho os autores se mostraram otimistas com a sensibilidade da nova técnica, entretanto, deixaram registrado que eram necessários mais estudos e testes de

forma a se obter uma forma de diferenciar verdadeiros eventos de FAIs dos chaveamentos de banco de capacitores.

Vale ressaltar o grande mérito dos autores em perceber essa oportunidade de detecção por meio de inter-harmônicas, uma vez que nesta época, os métodos de medição de sinais de corrente apresentavam poucos recursos e precisão quando comparados com os recursos existentes nos dias atuais.

Já no ano de 1990, os autores de [8] começaram a usar uma forma de detecção de FAIs utilizando a aplicação dos filtros de Kalman.

Tal técnica produz estimativas dos valores reais de grandezas medidas e valores associados predizendo um valor, estimando a incerteza do valor predito e calculando uma média ponderada entre o valor predito e o valor medido. O peso maior é dado ao valor de menor incerteza. As estimativas geradas pelo método tendem a estarem mais próximas dos valores reais do que as medidas originais, pois a média ponderada apresenta uma melhor estimativa de incerteza.

Esse método foi utilizado para se melhorar a aquisição dos níveis dos valores das componentes harmônicas da corrente que são variáveis no tempo na presença de FAIs. Segundo os autores, essa técnica permitiria uma maior aproximação do valor real do evento, possibilitando uma maior certeza quando na detecção de um evento de FAI. Contudo, apesar de terem sido realizados testes de campo, somente foi apresentada uma análise das variações dos sinais das ordens harmônicas e fundamentais. Nenhuma menção foi feita quanto ao fato do percentual de sucesso de detecção de FAIs ou o percentual de falsos positivos.

Ainda em 1990 os autores de [9] testaram um novo relé em campo, denominado HIFAS - High Impedance Fault Alarm System, para determinar sua eficácia na detecção de FAIs por meio das características das correntes de 3ª ordem harmônica, assim como a mudança da impedância aparente do sistema monitorado. De acordo com os autores, faltas até com 1% do valor de corrente do TC foram detectadas com eficiência, contudo nada foi mencionado em relação a testes de falsos positivos.

Neste mesmo ano, foi apresentado por [10] o resultado de estudos baseados nos valores medidos dos harmônicos de uma FAI em solo arenoso. O espectro de baixa frequência medido foi comparado com as correntes harmônicas gravadas continuamente por uma semana em uma subestação. Essa comparação foi realizada para determinar em que medida os componentes de 120 Hz e 180 Hz poderiam ser usados para ajudar a detectar uma FAI.

As medições de campo foram suportadas por um modelo teórico simples e medições laboratoriais. Após o estudo concluiu-se que o monitoramento de harmônicas de segunda ordem poderia ser eficiente na detecção de FAIs.

Em 1991, estudos descritos em [11] demonstraram a aplicação de um novo relé baseando seu poder de detecção de FAIs no cálculo da impedância da falta por meio do monitoramento dos valores de tensão e corrente de 3ª harmônica. Entretanto, de acordo com os autores, mais estudos seriam necessários para ajustes, uma vez que a técnica somente apresentava bons resultados em sistemas muito específicos e com faltas que apresentassem mudanças consideráveis no sinal de tensão.

Por sua vez, de acordo com [12], neste mesmo ano foi desenvolvida uma solução computacional para utilizar várias técnicas de detecção de FAIs, de acordo com as modificações do ambiente. Esta solução utilizava características pré-inseridas e indicadas por meios de testes para detectar uma FAI. Além disso, tal solução podia assimilar as características de novos tipos de FAIs, com características diferentes das anteriores, depois de ocorrido o primeiro evento desse novo tipo de falta.

Em 1992 os autores de [13] publicaram uma técnica de detecção de FAIs partindo de um algoritmo computacional baseado na diferença entre os ângulos da tensão e corrente no momento da possível falta. Quando a tangente da diferença dos ângulos fosse positiva por vários ciclos, provavelmente estaria ocorrendo uma FAI. Os testes desse algoritmo foram testados em simulações computacionais de redes de distribuição tendo várias ordens harmônicas e características de FAI aplicadas a elas. Os resultados se mostraram inconsistentes dependendo do tipo de sistema de distribuição simulado.

Ainda em 1992, de acordo com [14], os autores trabalharam na construção de um sistema artificial de reconhecimento de padrões de FAIs para tomada de decisão no reconhecimento deste tipo de falta. Para o carregamento desses padrões foram utilizadas cargas normais e simuladas situações de faltas reais.

O algoritmo mostrou um bom desempenho em FAIs simuladas, bem como boa discriminação entre FAIs e eventos semelhantes a estas. Contudo, os autores mencionam a necessidade de testes em redes reais e o desenvolvimento de novos modelos de redes neurais mais aprimoradas.

Por sua vez, no ano de 1993, duas técnicas foram apresentadas respectivamente por [15] e [16]. A primeira consistia na detecção de FAIs com base na comparação da energia medida com padrões gravados de medidas de energias de cargas variadas. Contudo, os autores mencionaram a necessidade do desenvolvimento de mais testes para carregar os

modelos de energia utilizados como padrão de comparação para os mais variados tipos de falta. Além desse fato, as simulações assumiam carregamentos ideais das redes, muito diferentes com os carregamentos reais de campo.

Simulações contendo muitos sinais ruidosos poderiam gerar falsos positivos durante a detecção de FAIs devido ao padrão aleatório do sinal de corrente.

Por sua vez, a segunda técnica tinha como princípio a detecção de FAIs baseado em um novo sistema de rede neural testado por meio do software ATP. Basicamente, a técnica utilizava um ciclo de uma Transformada de Fourier da terceira harmônica de corrente e tensão para a entrada de dados e atuação do reconhecimento das características a serem verificadas pela rede neural implementada em um relé. Entretanto, o relé apresentava atuação por chaveamento de capacitores na rede.

Em 1994 mais duas técnicas para detecção de FAIs foram apresentadas por [17] e [18].

A primeira tratava-se de um sistema de detecção de FAIs baseado em portas lógicas, testada em ambiente de simulação em EMTP. Para tal simulação foram usadas características apresentadas durante eventos de FAIs, como sua magnitude de terceira e quinta harmônica e a diferença entre o ângulo da terceira harmônica e a fundamental de corrente e de tensão. Ainda foi utilizada a sequência negativa da corrente de falta. Sinais como incremento e decremento na faixa de 20% na corrente de carga e de sequência negativa eram sinais de uma possível FAI.

A segunda técnica apresentada foi um método baseado na injeção de um sinal na rede a partir da subestação. Para tanto foram realizados testes com o alimentador desenergizado. Sinais eram aplicados constantemente e operações eram realizadas como: abertura de chaves, entrada de capacitores e rompimento de cabos. Os autores recomendaram no trabalho a necessidade de testes com alimentadores energizados para aperfeiçoamento da técnica.

Em 1995 foi apresentada por [19] uma nova técnica de detecção de FAIs baseado em um algoritmo que utilizava a teoria de fractais motivado pelas propriedades caóticas presentes nas FAIs. Segundo os autores, o algoritmo conseguiu distinguir transientes comuns às redes de distribuição de FAIs, entretanto a técnica precisaria ser aperfeiçoada para detecção de outros tipos de faltas de alta impedância.

Em 1996, de acordo com [20], foi desenvolvido pela Texas A&M University um algoritmo que utilizava da combinação de várias técnicas para detecção de FAI. Tal algoritmo foi incorporado em um relé e este patenteado pela General Electric Company, entretanto, nem todos os tipos de falta podiam ser detectados pelo equipamento.

Por sua vez, os autores de [21] usaram distintos algoritmos baseados em energia de harmônicos e comportamento randômico para processar os parâmetros presentes nas correntes analisadas. Por meio de um gerador de nível de confiança, identificava-se o comportamento do distúrbio presente caracterizando-o ou não como uma FAI. Para melhor confiabilidade, o método usava uma análise de padrões para confirmar a persistência dessas características.

Esse método foi implementado em um relé comercial da General Electric Company, conhecido como DFM (Digital Fender Monitor). A validação do método foi realizada a partir de dados reais. No entanto, não apresentou-se uma avaliação do método com outros eventos que possuíssem as mesmas características de uma FAI que pudessem ser confundidos com estas, como por exemplo, o chaveamento de banco de capacitores, causando um desligamento do trecho.

Em 1998 foi proposto por [22] um método que utilizava um banco de filtros para análise *Wavelet* conhecido como Wavelet Analysis Filter Banks (WAFB). Tal método extraia os coeficientes escala do sinal analisado. O método foi validado analisando-se dois tipos de distúrbios: FAI e chaveamento de banco de capacitores, visto que estes distúrbios produzem transitórios que possuem as características de correntes semelhantes. Contudo, a saída de escala dos sinais analisados apresentava-se de forma distinta para esses dois distúrbios. O sinal escala proveniente do chaveamento de banco de capacitores apresentava três bursts enquanto uma FAI apresentava mais bursts com uma distância padrão. Dessa forma, o método apresenta um limite para a quantidade de bursts no sinal analisado, assim como avaliava a distância padrão distinguindo uma FAI de um chaveamento de banco de capacitores. Tal método não avaliou outros tipos de distúrbio que também poderiam ser confundidos com FAIs tais como corrente de inrush e entrada e saída de cargas. Além disso, o método não foi avaliado com dados reais, sendo somente simulado utilizando um modelo de FAI proposto.

Os autores de [23], em 2004, sugeriram detectar as FAIs por meio da metodologia baseada na árvore de decisão (DT – Decision Trees), que se baseava em uma ferramenta de reconhecimento de padrões, sendo capaz de classificar vetores de entrada em categorias discretas sendo adotado o valor 1 para a presença de uma FAI e o valor 0 para a ausência desta. Para a implementação deste método foram utilizadas correntes filtradas e então decompostas em harmônicas por meio da transformada rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform). A DT detectava uma FAI de acordo com o treinamento realizado com características harmônicas carregadas por meio de outras FAIs. A validação do método foi realizada com dados simulados e com um modelo de FAI com dois ramos antiparalelos,

constituídos por meio de uma fonte de tensão DC (Direct Current) em série com um diodo e uma resistência não linear que mudavam as amplitudes aleatoriamente a cada meio ciclo. Esse método apresentava limitações para a identificação de FAIs, uma vez que eram poucas as características para detectar uma FAI. Além disso, métodos baseados simplesmente em FFT não são sensíveis o suficiente para detectar perturbações envolvendo um evento FAI de forma transitória.

De acordo com [24], em 2008, foi utilizada a decomposição do sinal em multi-resolução Wavelet (MSD – Multi-Resolution Signal Decomposition) para detectar distúrbios e realizar a extração das características do sinal de corrente. O sinal foi decomposto em dois níveis, usando a Wavelet mãe que apresentou menor erro em relação às outras Wavelets que foram testadas. Para a identificação e classificação da FAI foi usado o sistema de inferência neuro-fuzzy adaptado (ANFIS – Adaptive Neural Fuzzy Inference System). A rede neuro-fuzzy foi treinada e testada para discriminar formas de onda dos distúrbios e realizar a tomada de decisão, diagnosticando qual tipo de distúrbio ocorria no sistema. Sendo uma FAI, o algoritmo utilizava um contador para registrar o número de períodos que a FAI perdurava. Em casos de persistências de 5 períodos consecutivos, o sistema acusava uma FAI. Tal quantidade de períodos foi baseada em estudos que demonstravam que geralmente FAIs poderiam ter entre 3 e 7 períodos consecutivos com tais características.

Em 2009, os autores de [25] empregaram a combinação do filtro estendido de Kalman (EFK – Extended Kalman Filter) e a máquina de vetor de suporte (SVM – Support Vector Machine) para identificação de FAIs. O EFK extrai a componente fundamental e as harmônicas ímpares do sinal de corrente, sendo utilizadas como entrada na SVM que realiza a etapa de identificação das FAIs. O método foi validado apenas com dados simulados de corrente utilizando o modelo usado por [23], em 2004, cujo qual não apresenta uma boa modelagem para as FAIs. Outro inconveniente encontrado nesse método refere-se às componentes harmônicas relacionadas às FAIs, podendo ser confundidas com as componentes harmônicas de outros distúrbios, provocando a atuação indevida da proteção devido a uma falsa presença de uma FAI.

Os autores de [26], descreveram em 2011 um método para detecção de FAI usando gradiente morfológico de multi-resolução MMG – Multi-resolution Morphological Gradient em conjunto com redes neurais perceptron de múltiplas camadas (MLPNNs – Multi-Layer Perceptron Neural Networks). O MMG fornece uma descrição quantitativa das estruturas geométricas, sendo uma boa ferramenta para detectar e extrair as muitas irregularidades nas formas de ondas presentes nas FAIs. O algoritmo é composto de três

etapas constituídas por geração de recursos; detecção da perturbação e tomada de decisão. Na geração de recursos foi utilizada a MMG para a extração das características, já para a detecção da perturbação foi utilizado um limiar para condição com distúrbio e condição normal e finalmente para a tomada de decisão utilizou-se as MLPNNs. O método foi validado com dados reais e simulados, além de ser comparado com outras técnicas de identificação. O qual apresentou 96,3% de segurança e 98,3% de confiabilidade, entretanto nada foi mencionado quanto seu comportamento quando na influência de ruídos causados por eventos comuns às redes de distribuição.

Em 2012, os autores de [27] citaram como solução para as tradicionais redes elétricas, as redes elétricas inteligentes, nas quais novas tecnologias podem ser introduzidas. Um novo método de identificação de FAI foi proposto usando PLC Power Line Communications. O método foi investigado por meio de simulações, baseando-se no monitoramento da impedância de entrada de rede, (Z_{in}), que em determinadas faixas de frequências, visto que ao ocorrer uma FAI, essa impõe mudanças na Z_{in} , prometia a identificação de FAIs. Entretanto, considerou-se tal impedância como sendo uma constante, o que não é realidade, uma vez que é sabido que a impedância de uma FAI é não-linear. Somado a este fato, o método apresentou falhas na diferenciação entre FAIs e eventos transitórios normais à rede.

No ano de 2013, foi descrita em [28] uma nova metodologia de detecção de FAIs baseada em morfologia matemática (MM – Mathematical Morphology). Essa ferramenta partia do princípio de extrair informações referentes à geometria e topologia do sinal por meio de transformações, podendo detectar e distinguir mudanças muito pequenas em uma forma de onda. Utilizou-se a forma de onda da tensão, pois essa apresentava ligeira distorção ao ocorrer uma FAI. Na MM a transformação era realizada pelos elementos estruturantes que eram usados como sondas para extrair as características dos sinais pré-definidos. Abertura e fechamento são transformações comumente usadas para sinais unidimensionais. Assim os pesquisadores usaram a operação de diferença de abertura e fechamento CODO – Closing Opening Difference Operation para identificar FAIs. O algoritmo baseado em MM normaliza o sinal de tensão pelo sinal de pico do seu valor nominal e, em seguida, faz o tratamento com a operação CODO. Há uma distinção entre FAI e outros distúrbios, no perfil apresentado pelo CODO. A análise do método foi toda baseada em dados de FAI simulados, utilizando o mesmo modelo utilizado por [23]. Na literatura, os trabalhos apresentados baseiam-se, quase na sua totalidade nas características presentes no sinal de corrente das FAIs. Dessa forma, a utilização apenas das formas de onda da tensão pode comprometer o método proposto quando em aplicações práticas, além

disso, os transformadores de aquisição dos sinais de tensão distorcem mais facilmente os sinais de tensão se comparados com os efeitos causados pelos transformadores de corrente.

Neste mesmo ano, os autores de [29] propuseram um algoritmo utilizando a transformada de Wavelet discreta (TWD). O algoritmo extraía as características do sinal de corrente com a realização de cinco decomposições para determinar um limiar e identificar a FAI. Para implementar essa técnica, um modelo de FAI com duas resistências em série foi utilizado, uma representando o arco elétrico que aparece ao surgir uma FAI implementada pelo modelo de Kizilcay, e a outra representando a superfície de contato modelada de forma linear. Esse modelo não se apresenta como uma boa caracterização de uma FAI, uma vez que não abrange características relevantes deste tipo de distúrbio, tais como não linearidade, assimetria, buildup, shoulder e intermitência. Por fim, tal algoritmo não foi validado com sinais de FAIs reais, utilizando apenas os sinais modelados a partir do modelo proposto.

Ainda em 2013, o autor de [30] propôs uma metodologia para detectar o início dos transitórios presentes em FAIs por meio de um PLL (Phase-Locked Loop) para calcular o sinal de erro entre o sinal de entrada e um sinal de referência. Caso ocorresse um desvio de fase ou frequência, o sinal de erro do PLL se tornava diferente de zero. Dessa forma, as assinaturas dos transitórios eram extraídas pelo PLL que por sua vez eram analisadas com a TWD que realizava a extração dos coeficientes de Wavelet do sinal, que eram usados como entrada para uma rede neural de regressão generalizada (GRNN – Generalized Regression Neural Networks). A GRNN identificava o distúrbio conforme as assinaturas pré-definidas. O modelo proposto utilizou resistências fixas para gerar as assinaturas de FAI. O referido trabalho não evidenciou a influência de ruídos no método.

Em 2015, o autor de [31] propôs detectar o início dos transitórios produzidos pelas FAIs por meio da transformada Wavelet discreta com efeito de bordas. As principais características das FAIs foram usadas no modelo de detecção e comparadas com outros fenômenos que ocorrem no sistema de distribuição. O efeito da Wavelet mãe foi avaliado, usando sinais de FAIs reais e simuladas para distintas superfícies de contato. O método proposto apresentou bons resultados para a detecção do início dos distúrbios em tempo real, com alta velocidade de detecção, quando comparado com outros métodos que utilizam a transformada de Wavelet convencional, como também apresentou um baixo esforço computacional para o emprego do algoritmo proposto.

A influência do ruído apresentado nos sinais analisados foi investigada, pois os limiares estabelecidos para a detecção do início das perturbações foram obtidos com os coeficientes

Wavelet relacionados ao ruído, entretanto, esse método não conseguiu diferenciar uma FAI de outros fenômenos corriqueiros na rede de distribuição como, por exemplo, chaveamentos de bancos de capacitores.

Ainda em 2015, foi proposto em [32] um algoritmo baseado na análise tempo-frequência (TFA – Time – Frequency Distribution) para se identificar as características das FAIs dos sistemas de distribuição. A TFA mostrou eficiência na identificação de padrões de repetição e aspectos não estacionários dos sinais. As características das FAIs foram extraídas pela distribuição de Choi e Williams, pois seguiam algumas propriedades e restrições da distribuição tempo-frequência. Para a seleção das características usou-se a análise da perda de informação que dependia da quantidade de componentes principais do sinal. Também foi analisada a presença de outros eventos como corrente de inrush, chaveamento de banco de capacitores e presença de cargas não lineares, tendo o método apresentado um grande número de falsos positivos motivados por uma grande quantidade de informação perdida durante o processamento do sinal.

Em 2017, os autores de [33] propuseram um algoritmo para identificar as faltas de alta impedância por meio da TWD, sendo as energias dos coeficientes wavelet utilizadas para detectar o início dos transitórios presentes no sistema. Em alguns casos, a presença do ruído influenciava na detecção incorreta dos transitórios induzidos pelas FAIs. Dessa forma foi aplicado um limiar às energias dos coeficientes escala. Caso esse limiar fosse atingido, verificava-se por quanto tempo o distúrbio perdurava e se este durasse mais de 150 ms e não fosse constatado um afundamento ou elevação de tensão, através da energia dos coeficientes de aproximação, então concluíam-se que o distúrbio era uma FAI. Foram analisados outros distúrbios com o algoritmo proposto e constatou-se que este método conseguia identificá-los e distingui-los das FAIs.

Ainda em 2017, o autor de [34] realizou a comparação de duas técnicas para detecção e classificação de FAIs. Sendo a primeira uma técnica usando o sistema de inferência fuzzy (FIS – Fuzzy Inference System) e a outra usando rede neural ARTMAP fuzzy (FANN – Fuzzy – ARTMAP Neural Network). O método aplicava a TDW para extrair características do sinal e o conceito de energia para minimizar o número de coeficientes e melhorar a eficiência e em seguida os valores de energia pelo FIS e FANN que forneciam os estados de operação do sistema. O método foi implementado em tempo real e as duas técnicas apresentaram taxa de acerto de 97%. No entanto, novamente como nos outros métodos, a técnica não era capaz de diferenciar FAIs de outros eventos transitórios, comuns em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Mais uma vez em 2017, os autores de [35] propuseram um método não invasivo para a detecção de FAIs por meio da análise de densidade do fluxo magnético dos condutores da rede de distribuição gerados pela presença de inter-harmônicas adjacentes à frequência fundamental.

Finalmente, em 2018, em [36] foi proposto um método de detecção de FAI baseado na junção de vários outros métodos, partindo da obtenção de valores significativos das harmônicas de tensão e corrente, obtenção das componentes simétricas de sequência negativa e zero e a diferença de ângulo entre elas. Para a detecção de características próprias de uma FAI, os autores utilizaram as técnicas de decomposição de Fourier e o filtro de Kalman e finalmente foi construído um circuito integrado, com uma lógica de análise destas características para se detectar com segurança e confiabilidade uma FAI, contudo, somente foram realizadas simulações computacionais para se testar a eficiência da referida proposta.

Capítulo III

Características das redes de distribuição brasileiras e sua ineficiência quanto à detecção de FAIs

3.1 Características de uma rede de distribuição

As redes de distribuição de energia elétrica partem de subestações (SE) de subtransmissão ou transmissão, podendo ser radiais ou em anel, apresentando níveis de tensão de linha de 4 a 34,5 kV, em seus circuitos primários.

No Brasil, há uma predominância de redes de distribuição radiais com classe de tensão de 15 kV (13,8 kV entre fases), com três fases, possuindo o neutro multi-aterrado e interligado à subestação. Apesar de atualmente existir uma grande quantidade de redes de distribuição construídas com cabos isolados, a predominância de linhas com cabos nus ainda é grande, e devido a este fato, estas serão as redes consideradas neste trabalho.

Em grandes centros de carga, com elevado adensamento populacional, como centros de metrópoles, há a necessidade de uma grande confiabilidade do fornecimento de energia elétrica e, em muitos casos, são construídas redes de distribuição subterrâneas, as quais são menos susceptíveis a falhas quando comparadas às redes aéreas.

Contudo, a grande maioria das redes de distribuição ainda é do tipo aérea, apresentando grandes extensões, uma vez que possuem a finalidade de atender áreas urbanas e rurais. Além disso, são compostas por uma grande quantidade de estruturas, de equipamentos de proteção, manobra, transformação, compensação reativa e regulação de tensão. Além dos circuitos primários, também apresentam circuitos secundários para a distribuição de energia em baixa tensão.

As redes de distribuição aéreas podem ainda apresentar três tipos de circuitos primários, a depender do tipo de condutor:

- Condutores nus (rede convencional);
- Cobertos (rede protegida) e;
- Condutores isolados (rede isolada).

As redes convencionais predominam no sistema de distribuição brasileiro devido suas características e custo atrativo quando comparadas com as redes protegidas, sendo que estas são mais utilizadas em áreas urbanas com grande presença de árvores.

Sendo assim, devido às suas características, como a grande extensão e elevado número de equipamentos, as redes de distribuição aéreas apresentam uma taxa de falhas de fornecimento de energia superior, quando comparadas com as redes dos sistemas de transmissão e geração, causando grande influência nos indicadores de continuidade de fornecimento de energia elétrica das concessionárias, que representam basicamente a frequência (FIC) e a duração (DIC) das interrupções em cada unidade consumidora.

Além disso, por se situarem próximas às unidades consumidoras, principalmente em áreas urbanas, tem-se a grande preocupação quanto à segurança da população na ocorrência de uma falta que tenha a característica de alta impedância, uma vez que esta, na maioria das vezes, não pode ser detectada devido à baixa magnitude de sua corrente, colocando em risco a população das áreas urbanas, ou até mesmo, a população e animais localizados nas zonas rurais dos municípios atendidos.

As FAIs podem ser causadas por fatores internos, como por exemplo, falhas de equipamentos, estruturas, acessórios e condutores, ou fatores externos, como árvores, pipas, ventos, descarga atmosférica, abalroamentos, catástrofes naturais, acidentes, falha humana, vandalismo, etc.

Procurando atenuar tais fatores, as distribuidoras lançam mão de ações preventivas com o objetivo de se identificar possíveis defeitos e eliminá-los por meio de manutenções preventivas, antes que venham a provocar alguma FAI no sistema. Tais ações são realizadas por meio de inspeções que podem ser “a olho nu” ou com auxílio de equipamentos termográficos.

Somadas às ações anteriormente descritas, outros exemplos de formas de se reduzir os riscos de FAIs são a construção de redes protegidas e isoladas, a instalação de para-raios, a poda de árvores, a limpeza das redes e da vegetação, a elevação do nível básico de isolamento (NBI) das estruturas e a vinculação de programas educacionais à população.

Contudo, uma rede de distribuição que apresente total confiabilidade é economicamente inviável, devido ao elevado investimento exigido em componentes, inspeções e manutenções preventivas. Dessa forma, nas atuais redes de distribuição, sempre haverá ocorrência de FAIs e o sistema de proteção deverá, ou deveria estar apto para operar adequadamente nessas situações. Porém, como dito anteriormente, a maioria das FAIs não

é detectada pelos equipamentos de proteção convencionais, por não apresentar uma magnitude de corrente suficiente para sensibilização desse tipo de proteção.

Tal deficiência foi demonstrada em alguns estudos, dentre eles, a pesquisa realizada pelo Electric Power Research Institute (EPRI), relatada em 1983, onde constatou-se que nas redes de distribuição pesquisadas, em torno de um terço das FAIs causadas por condutores rompidos, não foram eliminadas pela proteção instalada, o que representou aproximadamente 6% de todas as faltas observadas [37].

Dessa forma, analisando as informações descritas até o momento, fica fácil concluir que a população corre grande perigo, uma vez que as redes de distribuição aéreas convencionais são as mais susceptíveis às ocorrências de FAIs e não possuem um sistema de proteção confiável para a detecção deste tipo de falta.

3.2 A ineficiência dos sistemas de proteção das redes de distribuição perante as FAIs

A ocorrência de curtos-circuitos traz efeitos mecânicos e térmicos em equipamentos da rede, e por isso, a proteção deve atuar rápido, de acordo com as características da carga, de modo a proteger a integridade da rede e fazer com que a interrupção de fornecimento de energia atinja o menor número possível de unidades consumidoras, com baixa frequência e curto tempo de duração.

Por outro lado, FAIs que apresentam baixo valor de corrente, podem causar graves acidentes à população, se essas faltas não forem interrompidas em um intervalo de tempo adequado, ou seja, dentro de um tempo que evite a possibilidade da aproximação de uma pessoa ou um animal que possam vir a tocar em um condutor caído, ou que as faíscas do arco elétrico provoquem o princípio de um incêndio em florestas, matas ou pastagens.

Com isso posto, verifica-se que os objetivos da proteção contra curtos-circuitos são distintos dos objetivos de proteção voltadas para as FAIs, sendo que a primeira tem a grande preocupação com a integridade do sistema e o fornecimento de energia, e a segunda, com a segurança de vidas e propriedades.

A proteção contra curto-circuito é baseada em parâmetros de determinadas curvas de tempo e corrente, cujos ajustes devem ser maiores que a carga máxima prevista para o circuito ou equipamento a ser protegido e não devem permitir atuações para operações normais do sistema, como chaveamentos, que geram correntes de inrush de curta duração. Tal proteção se dá por meio de relés de disjuntores e religadores instalados na SE, assim como equipamentos instalados ao longo do alimentador (religadores, seccionadores e fusíveis).

Por outro lado, FAIs geram baixos valores de corrente para os quais os equipamentos de proteção convencionais não apresentam sensibilidade adequada para uma detecção confiável. Em muitos casos, os condutores permanecem energizados até que algum equipamento de manobra ou de proteção seja aberto por decisão do Centro de Operação da Distribuição (COD).

Já a proteção de terra tem a finalidade de detectar correntes de falta para terra e correntes de desequilíbrio que ultrapassam os limites pré-determinados. As faltas para a terra podem provocar correntes de menor intensidade do que as faltas entre fases, o que pode não sensibilizar a proteção de fase, que tem seus ajustes maiores que a corrente máxima do sistema.

Sendo assim, a proteção de terra funciona através do somatório vetorial das três correntes de fase, resultando em $3I_0$, sendo I_0 a corrente de sequência zero do sistema. Além disso, essa proteção deve estar coordenada com os equipamentos de proteção a jusante do seu ponto de instalação e não operar para eventos de chaveamento normais do sistema que provocam corrente de inrush, devendo dessa forma ser temporizada, de modo a evitar operações indevidas.

Geralmente, o ajuste de pick-up para a proteção de terra deve ser menor que a corrente mínima de curto-circuito fase-terra na sua zona de proteção e maior que a corrente máxima de desequilíbrio de fase permitida em sua área de atuação. Os critérios de desequilíbrio de fase podem variar de concessionária para concessionária e dependem muito da configuração da rede e características das cargas. Valores típicos de ajustes estão na faixa de 30% a 50% do ajuste do relé de fase.

Assim, apesar de mitigar o problema em alguns casos, a utilização de proteção de terra é limitada ao máximo desequilíbrio de carga do sistema, o que a torna uma proteção não confiável para a detecção de FAIs.

A Figura 3.1 apresenta um esquema que ilustra o problema da proteção contra FAIs, mostrando que existe uma grande faixa onde essas faltas estão localizadas e que não possuem proteção, uma vez que o trecho é somente monitorado por meio de uma proteção convencional de curto-circuito por sobrecorrente.

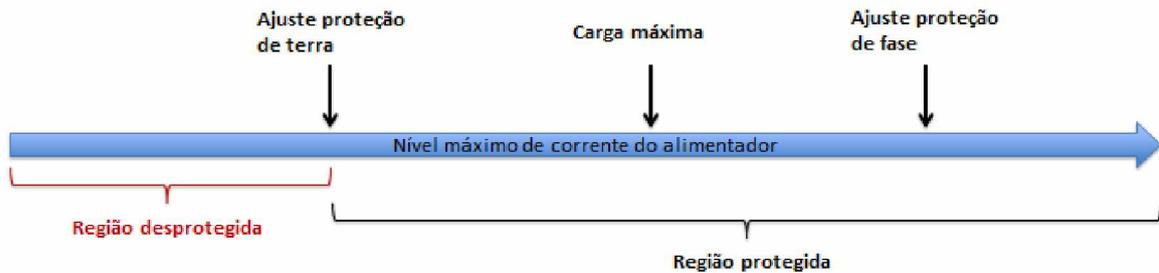


Figura 3.1 – Ajustes de proteção de um alimentador hipotético.

3.3 Condutores rompidos em circuitos de distribuição primários

O conhecimento das causas do rompimento e queda de condutores de circuitos primários é primordial para se atacar o problema de detecção de faltas de alta impedância em redes de distribuição, pois, a partir deste conhecimento, podem-se promover ações para reduzir sua frequência. Devido a essa importância, a seguir serão descritos os principais tipos de rompimento de condutores.

3.3.1 Tipos de rompimento de condutores

Várias são as situações de rompimento de condutores de circuitos primários de redes de distribuição, podendo citar:

- a) Rompimento do jumper numa estrutura seja numa situação de encabeçamento de condutor, ou numa estrutura de derivação;
- b) Rompimento de condutor acompanhado por queda de postes;
- c) Rompimento de condutor em um vão (distância entre dois postes).

Nas situações do item (a), o risco de acidentes com a população e propriedades é bastante reduzido, uma vez que o jumper não tem comprimento suficiente para chegar ao alcance dos mesmos. Entretanto, podem ocorrer acidentes no caso em que o rompimento do jumper foi provocado por aproximação de objetos externos, como o exemplo de vergalhões de construção civil e linhas de pipas.

Nas situações do item (b), geralmente os condutores caem no solo ao alcance de pessoas. Porém, como o condutor neutro também sofrerá a queda, há uma grande

probabilidade do toque de condutores das fases com o mesmo, podendo acarretar valores altos de corrente de falta, com consequente atuação de equipamentos de proteção, desenergizando os cabos das fases.

Todavia, poderão existir situações onde serão gerados baixos valores de corrente de falta, como por exemplo, em situações onde nenhum condutor das fases tocar o condutor neutro ou materiais solidamente aterrados, ou mesmo a geração de altos valores de corrente de falta, porém de curta duração, em que poderão provocar apenas religamentos automáticos podendo deixar os condutores energizados caso o curto-circuito não seja permanente. Nessas duas últimas situações, o risco de acidentes à população e propriedades permanecerá até que o circuito seja definitivamente desenergizado para manutenção. As causas da queda de postes podem ser variadas, podendo-se citar como exemplo as quedas de árvores, abalroamento de veículos ou até mesmo queda natural de poste, quando este se encontra em avançado processo de degradação.

Nas situações do item (c), se o condutor se rompe em certo ponto entre os dois postes, separando-se em duas porções, cada porção cairá, sob o efeito da aceleração da gravidade, com uma extremidade restrita pelo isolador.

Caso os condutores rompidos não fiquem suspensos por qualquer obstáculo eventualmente presente no local e não toquem num ponto solidamente aterrado, algumas situações poderão ocorrer. Admitindo-se que uma pessoa naturalmente não alcance a extremidade do condutor a 3,0 metros acima do solo, que o condutor continue energizado e considerando como C , o comprimento de um lado do condutor rompido no vão, e como h a altura do poste, conforme ilustrado na Figura 3.2, sendo os valores dados em metros, temos que:

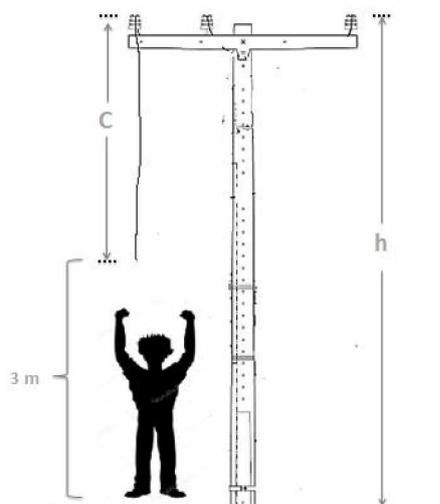


Figura 3.2 – Esquema para exemplificação das possibilidades de acidentes com condutores rompidos.

$$\text{I) } C \leq (h - 3,0)$$

Se o poste for de madeira, o risco é praticamente nulo para uma pessoa sofrer uma descarga no local tocando o poste, desde que o cabo não esteja tocando em algum condutor de aterramento eventualmente presente na parte externa do poste e que esteja ao alcance de pessoas. Porém, caso o poste seja de concreto o risco aumenta, uma vez que o mesmo é composto de ferragens em sua parte interna.

$$\text{II) } (h - 3,0) < C < h$$

Nesse caso o risco de uma pessoa sofrer uma descarga aumenta, uma vez que o condutor pode estar ao seu alcance.

III) $C > h$ e o cabo toca o solo, podendo ocorrer duas situações:

- O solo é adequadamente condutor gerando uma falta de tal magnitude que poderá acionar o sistema de proteção do alimentador desligando o trecho onde ocorreu a falta;
- O solo apresenta condutividade insuficiente gerando uma falta de alta impedância que não será capaz de acionar algum equipamento de proteção do alimentador e poderá causar acidentes no momento do toque de pessoas.

Como o vão entre postes normalmente é maior que a altura de um poste, em qualquer situação de ruptura de condutor no item (c) uma extremidade, pelo menos, tocará o solo, caso essa extremidade não venha a ficar dependurada em qualquer obstáculo eventualmente presente no local como, por exemplo, a rede secundária, árvores, cabos de telefonia ou TV a cabos situados abaixo do neutro. Além disso, num alimentador radial, a extremidade que toca o solo pode estar localizada no lado fonte ou lado carga do alimentador. No caso de rompimento de condutor tocando o solo do lado da carga, duas possibilidades podem ainda ocorrer:

- A falha do condutor ocorreu após o último transformador de distribuição da linha (final de rede), de forma que a extremidade do condutor do lado da carga do vão onde houve a ruptura está desenergizada (caso mais raro);

- A falha do condutor ocorreu antes do último transformador de distribuição da linha, de forma que a extremidade do condutor do lado da carga do vão onde houve a ruptura está energizada por uma tensão residual provinda do transformador (caso mais frequente), reduzindo ainda mais as chances de operação de um equipamento de proteção, uma vez que a tensão no condutor é bastante inferior à tensão nominal do alimentador.

Portanto, pode-se dizer que os maiores riscos do cabo rompido ficar energizado, gerando perigo à população, são quando o mesmo se encontra em um alimentador radial, caído ao solo no lado carga, numa superfície que apresenta um alto valor de resistência de contato com o cabo e que o mesmo não tenha tido contato com algum material solidamente aterrado, antes de chegar ao solo.

3.3.2 Principais causas de rompimento dos condutores

Vários fatores contribuem para o rompimento de condutores de circuitos primários de redes de distribuição. Desta forma, na intenção de descrever tais fatores, primeiramente é feita uma abordagem sobre os aspectos que influenciam na redução da rigidez mecânica do condutor, assim como as consequências dessa redução com relação à fadiga do material. Posteriormente, são apresentados fatores gerais presentes nas redes de distribuição que também contribuem para o rompimento de condutores.

a) *Redução da rigidez mecânica do condutor*

Uma das principais causas de rompimentos de condutores de circuitos primários de redes de distribuição é a redução de sua rigidez mecânica causada por:

- Redução de seção transversal;
- Defeitos gerados por ciclos de altas temperaturas.

Alguns defeitos geométricos que reduzem a seção transversal do condutor podem ser gerados pela ação de galhos de árvores, que além da ação mecânica sobre os fios do condutor, provocam a ignição do arco elétrico, ainda que de pequena intensidade, em função da impedância do conjunto árvore/solo; pela ação abrasiva de linhas revestidas com cerol que contém pequenos fragmentos de vidro colados na superfície de cordões usados para controlar pipas em voo; pela ação corrosiva do meio sobre o condutor, ou

por uma descarga atmosférica que atingiu o condutor de forma a danificá-lo somente superficialmente, sem rompê-lo.

Somando todas as causas descritas anteriormente à presença das tensões mecânicas oriundas dos carregamentos aplicados sobre o condutor, da geometria e do seu material, a redução da seção transversal ocasiona uma concentração de tensões mecânicas na região, reduzindo a vida útil do condutor de alumínio naquele ponto.

A exposição do alumínio a altas temperaturas por determinados períodos, durante uma descarga atmosférica, ou ainda sob a influência de uma conexão defeituosa, promove mudanças na rigidez do material do condutor, fazendo com que este se deforme até seu limite e finalmente sofra o rompimento.

Em [38] é mostrado que as tensões num condutor podem ser até quatro vezes e meia maiores do que seriam se não houvessem defeitos geométricos. Conseqüentemente, as tensões de fadiga também são amplificadas, podendo ocorrer uma falha por ruptura do condutor, algum tempo depois da origem do defeito geométrico. Em outras palavras, uma árvore pode, em certo momento, reduzir a seção transversal num ponto do condutor e ser podada algum tempo depois, entretanto, o defeito causado no condutor ainda estará presente e o rompimento acontecerá cedo ou tarde no ponto defeituoso.

b) Outros fatores que contribuem para rompimento de condutores

Em redes convencionais, a ocorrência de rompimento de condutores é mais frequente, uma vez que estão sujeitas a toques diretos devido a objetos externos à rede, como galhos de árvores, pássaros, antenas de TV, entre outros. Outra causa que contribui para a degradação desse tipo de rede é o cerol de pipas, principalmente nos meses de férias escolares, o qual pode provocar rompimento de fios do condutor, fragilizando-o ou até mesmo cortando-o integralmente.

A idade do circuito também afeta a frequência de ocorrências de rompimento de condutores da rede primária, pois estes podem se encontrar em condições precárias devido aos desgastes naturais, como a degradação de cruzetas e isoladores, degradação de postes de concreto ou madeira e esforços mecânicos dos condutores ao longo dos anos.

Outro fator de grande influência é a seção do condutor, pois, quanto maior a seção, mais difícil seu rompimento por esforço mecânico, uma vez que este é composto por um número maior de fios do que aquele de menor seção. Sendo assim, derivações

compostas de condutores com menores seções, uma vez que transmitem menores quantidades de energia, tendem a sofrer um maior número de rompimentos.

Más conexões série e shunt em condutores do circuito primário também contribuem para o rompimento de condutores, uma vez que alteram sua rigidez mecânica devido ao aquecimento excessivo.

Outros fatores não controláveis também podem provocar rompimento de condutores, como abalroamentos de veículos em postes, descargas atmosféricas diretas e contatos de objetos externos.

É importante ainda destacar que numa pesquisa realizada pela CEMIG [39], através da análise de 276 rompimentos de condutores da rede primária, num período de 20 meses de observação, foi verificado que o condutor 6 AWG de cobre, utilizado naquela época em sistemas de distribuição e até hoje existente em muitas redes, apresentava um alto índice de rompimento quando comparado a cabos de alumínio, seja com ou sem alma de aço. Também foi verificada alta incidência de rompimento de condutores da rede primária causado por certos tipos de conexões. Além disso, de 276 rompimentos de condutores na rede primária, em 68 nenhum equipamento de proteção atuou, sendo que 99% delas ocorreram em ramais protegidos por elos fusíveis. Dessas 68 ocorrências, 65 ficaram com a ponta dos condutores em contato com o solo, com 57 energizadas. Ou seja, de 276 ocorrências de rompimentos de condutores da rede primária, em 20,6%, os condutores ficaram energizados tocando o solo, uma vez que a proteção não operou. Apesar do estudo ter sido realizado em 1977, e por meio de uma amostragem, as redes existentes atualmente em várias regiões de Minas Gerais, ainda apresentam muitas características desta época e seus resultados ainda são significativos, comprovando de certa forma a teoria de rompimentos de cabos descrita anteriormente.

Com relação às redes de distribuição protegidas, podem-se citar testes realizados na concessionária Pennsylvania Power and Light (PP&L) [37], sendo que mais de 50% dos casos de condutores protegidos se rompiam devido a descargas atmosféricas, tendo em 2º lugar o contato com árvores, chegando-se a um total de 75% devido às duas causas. Ressalta-se ainda que nenhuma outra causa ultrapassou 5%, quando considerada individualmente.

Capítulo IV

O fenômeno da falta de alta impedância

4.1 Considerações iniciais

Os equipamentos utilizados atualmente para a proteção das redes de distribuição atuam por sobrecorrente de acordo com seus respectivos ajustes pré-definidos, que compõem suas curvas de tempo e corrente. Por esse motivo, não atuam para faltas cujas correntes estão abaixo de tais ajustes, como é o caso das FAIs. Além disso, essas faltas podem ser originadas pelo rompimento de condutores primários da rede de distribuição, ficando estes energizados no solo, ao alcance de pessoas e animais, gerando um grande risco de acidentes.

Portanto, primeiramente, é interessante estudar as características das FAIs, dos sistemas de proteção associados e das características construtivas da própria rede de distribuição, de modo a compreender melhor o problema e seus atuais limites de detecção.

4.2 Definição e tipos de FAI

Várias são as definições encontradas na literatura para se definir o que é uma FAI, dentre elas têm-se:

- “Pode-se definir uma falta de alta impedância como uma falta na rede primária de distribuição a qual não pode ser detectada ou interrompida pela proteção de sobrecorrente convencional” [10];

- “Falta de alta impedância é um tipo de falta que ocorre em sistemas de distribuição de até 15 kV, onde uma ou mais fases da rede primária entram em contato com algum elemento de alta impedância, limitando assim a corrente de falta a valores bem abaixo dos limites da proteção convencional” [39].

Em [38], ainda é descrito que “As faltas de alta impedância podem ser conceituadas como aquelas faltas que ocorrem em uma das fases sem a existência de um contato direto com as outras fases ou com o condutor neutro, impossibilitando uma detecção confiável pelas proteções convencionais”.

Contudo, neste trabalho, optou-se por definir uma FAI como a ocorrência do rompimento de condutor em uma das fases de um circuito de distribuição, onde a queda e posterior contato deste com o solo gere uma corrente de magnitude tal, impossível de ser detectada pelos equipamentos de proteção convencionais, devido ao alto valor de impedância entre o condutor caído e o solo.

De acordo com [39], pode-se classificar as FAIs em dois tipos: FAIs ativas e FAIs passivas.

4.2.1 FAIs ativas

FAIs ativas são aquelas nas quais um condutor energizado se aproxima de outro objeto, sendo que o campo elétrico entre eles é suficiente para romper o isolamento do meio que os separa para formar um arco elétrico. Este meio pode ser o ar, ou mesmo o solo, que separa o condutor do aterramento mais próximo. Este tipo de falta pode ainda ser subdividido em série (interrompendo a corrente de carga na fase onde houve o rompimento do condutor) ou shunt (quando o condutor entra em contato com algum objeto aterrado com alto valor de impedância, sem, no entanto, se romper).

4.2.2 FAIs passivas

As faltas passivas são aquelas onde o condutor se rompe, porém este não entra em contato com nenhum tipo de material, não existindo à jusante da falta a circulação de corrente nem arco elétrico após alguns segundos do rompimento. Geralmente este tipo de falta acontece quando, por algum motivo, o condutor se rompe e fica suspenso no poste em uma altura tal que não toca nenhuma superfície, contudo, este permanece energizado oferecendo perigo para as pessoas, animais e veículos que estejam ao seu redor e possam vir a tocá-lo.

A partir das definições acima, pode-se concluir que o baixo nível de corrente ocasionado por uma FAI pode ser causado pelos seguintes fatores:

- Alta impedância do caminho de retorno da corrente de falta;
- Ocorrência da falta em localização eletricamente remota em relação à fonte, reduzindo assim a corrente de curto-circuito;
- Uma combinação dos dois fatores anteriores;
- Ocorrência de faltas passivas, ou seja, rompimento do condutor sem que este tenha contato com alguma superfície.

4.3 Naturezas das faltas de alta impedância

O conhecimento da natureza das FAIs é um fator primordial para a pesquisa do assunto no que se refere aos métodos de detecção, distinção e localização.

Devido à importância de tal conhecimento, a seguir são descritas suas principais características, dando-se ênfase para eventos presentes em redes de distribuição convencionais, ou seja, aquelas que apresentam condutores primários nus. Tal escolha se justifica pelo fato de que o comportamento dessas faltas em redes de distribuição protegidas, teoricamente, se reduz quando observada a atividade do arco elétrico, uma vez que existe uma cobertura protetora no condutor sob falta, contudo, esta pode sofrer deformações no momento de ocorrência do problema.

4.3.1 Falta de alta impedância ativa série com condutor caído ao solo

A principal dificuldade do estudo das FAIs é que poucos dados de oscilografias destas são registrados nos Centro de Operação de Distribuição - CODs, uma vez que os equipamentos de proteção de sobrecorrente operam com um nível de corrente acima das condições normais do sistema, momento no qual as oscilografias são disparadas.

Diante disso, as principais contribuições para o estudo da natureza dessas faltas provêm de pesquisas direcionadas ao estudo do problema, onde testes propositais e controlados são realizados com equipamentos de medição especiais, com um maior nível de precisão e recursos gráficos.

Pesquisadores da Texas A&M University (TAMU) fizeram substanciais investigações sobre a natureza das FAIs através de testes de campo provocando faltas por meio de condutores caídos no solo, conduzidas no final da década de 70 [3]. Nessa pesquisa, segundo [37], 200 faltas propositais foram realizadas em 5 diferentes concessionárias, num

total de 17 alimentadores com tensão de linha de 12,5 kV, em diferentes localizações. Dos testes realizados, foram obtidos os seguintes resultados e conclusões, quanto a:

a) *Magnitude da corrente*

- A magnitude da corrente de falta é altamente influenciada pelas condições do local, podendo-se citar: tipo, umidade do solo e a presença de materiais na terra que estabelecem caminhos para a corrente, tais como canos metálicos de condução de água, cercas metálicas e raízes de árvores extensas. Valores típicos de corrente de acordo com a superfície da falta são apresentados na Tabela 4.1.
- Há pouca relação entre a corrente de curto-circuito do local com a corrente de falta real quando o condutor fase não entra em contato com um caminho elétrico sólido como o neutro.

Tabela 4.1 – Valores da magnitude das correntes de FAIs testadas no estudo da TAMU.

<i>Tipo de solo</i>	<i>Máxima corrente rms (A)</i>
Asfalto seco	0.00
Concreto (não reforçado)	0.00
Areia seca	0.00
Areia molhada	15.00
Gramma seca	20.00
Pasto seco	25.00
Gramma molhada	40.00
Pasto molhado	50.00
Concreto (reforçado)	75.00

Pode-se verificar por meio da Tabela 4.1 que em três tipos de superfícies (asfalto seco, concreto não reforçado e areia seca) a corrente medida foi zero. Tal fato pode ser explicado pela tecnologia de medição disponível na época, contudo, conforme os estudos realizados no ano de 2013, pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU [40] foram obtidos novos valores de corrente de FAIs, de acordo com a superfície de contato do condutor, conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores típicos para FAIs obtidas nos testes de campo dos estudos da UFU.

<i>Tipo de solo</i>	<i>Máxima corrente rms (A)</i>
Cimento	25.28
Asfalto	12.54
Cascalho	10.51
Areia seca	4.67
Areia molhada	7.83
Argila seca	16.78
Argila molhada	25.24
Gramma seca	26.13
Gramma molhada	34.07

Numa comparação rápida entre as duas tabelas, verifica-se que os valores das correntes diferenciam-se bastante. Tal fato prova que cada caso é muito particular, dependendo muito da composição química, umidade e granulidade da superfície em contato com o condutor caído.

b) *Características do arco presente nas FAIs*

O conhecimento da formação de arco elétrico, seu comportamento e sua influência na corrente de uma FAI em um evento caracterizado pelo contato com o solo de um condutor energizado, após o momento de sua queda, é interessante frente ao assunto em questão, uma vez que vários métodos propostos para detecção destes eventos, inclusive o que embasa este trabalho, são baseados na existência do arco elétrico nesses tipos de faltas.

De acordo com [3], William L. Beasley resume o comportamento do arco como se segue: se dois condutores separados por um pequeno espaço (gap) de ar têm uma pequena diferença de potencial entre eles, o ar age como um excelente isolador. Quando o campo elétrico entre os dois pontos é aumentado até o rompimento do isolamento do ar, ocorre a ruptura (breakdown) e uma corrente flui entre os condutores. A ruptura começa com um ou mais elétrons livres no espaço entre os condutores. Eles são acelerados no espaço pelo campo elétrico. À medida que aceleram, sua energia cinética aumenta, e quando eles adquirem energia suficiente, esses elétrons livres podem colidir ou ionizar moléculas de gases. Esses novos elétrons livres aceleram e ionizam outras moléculas e, então, o processo é repetido rapidamente em um curto espaço de tempo. Essa ionização rápida, denominada “avalanche”, gera a habilidade súbita do ar de conduzir corrente. Uma vez que a avalanche ocorre, a condução pode continuar em uma descarga contínua, denominada “arco”. Tipicamente, um arco estável não é imediatamente formado quando a avalanche ocorre,

mas várias ignições e reignições ocorrem num curto período de tempo até que o arco estável seja estabelecido. Essas disrupções momentâneas são chamadas de centelhas (sparks). Geralmente, em sistemas de corrente alternada (CA), arcos estáveis formarão e extinguirão em todos meios ciclos. Antes da formação e depois da extinção de um arco estável, vários “sparks” de curta duração se formam e se extinguem.

As FAIs geralmente não oferecem condições para a formação de um arco estável, uma vez que o condutor caído pode ficar saltando no solo, ou a configuração geométrica da superfície pode não oferecer pontos de contato suficientes com o condutor caído a ponto de permitir um arco estável, ou ainda, o condutor pode somente fazer um contato ocasional com um galho de árvore, gerando pequenos arcos conforme esse toque acontece ao longo do tempo. Dessa forma, conclui-se que o arco associado a uma FAI é aleatório e transitório por natureza, e condições típicas associadas a este tipo de evento estão presentes onde o arco não é sustentado, mas sim intermitente.

Em particular, para faltas envolvendo contato com a terra, o ponto de contato pode incluir gaps entre o condutor e a terra sendo estes preenchidos pelo ar. O alto campo elétrico sobre uma curta distância causa a disrupção dos gaps de ar entre condutor e terra. Quando um arco se forma, ele cria uma grande porção de calor no ponto da falta. Esse aquecimento age para converter rapidamente qualquer umidade em vapor. Como o vapor rapidamente se expande, ele desloca o solo o qual rearranja as características de gaps de ar circunvizinhos ao condutor energizado. Como resultado, a magnitude da corrente do próximo poderá ser substancialmente diferente daquele anterior.

Outro fato interessante é que geralmente o calor do arco é capaz de fundir areia e sílica no solo, tornando a superfície em questão vitrificada. Como resultado, o material vitrificado ao redor do condutor irá isolar o condutor da terra, criando uma impedância ainda maior reduzindo a magnitude da corrente com o tempo. Entretanto, o material fundido é impuro e ainda poderá conduzir corrente.

Agora, olhando o problema por outro ângulo, esse mesmo processo de vitrificação pode causar o aumento da magnitude da corrente com o tempo, pois a fusão de materiais sólidos dentro de um objeto sólido promove um caminho para o fluxo de corrente na superfície do material fundido, quando comparado com o caminho através do solo que tem numerosos gaps de ar.

Segundo [3], as características do arco das FAIs foram estudadas em laboratório, com um centelhador, promovendo significativos entendimentos da natureza desse tipo de falta.

R. H. Kaufmann, J. C. Page e J. R. Dunki-Jacobs descreveram as relações tensão-corrente para as características do arco para um centelhador CA 60 Hz.

O centelhador conduz aproximadamente quando a tensão aplicada atinge a tensão de disrupção ou de reignição. O arco se forma em um determinado instante quando a tensão aplicada é igual à tensão de reignição. Imediatamente, a tensão através do arco cai para um valor que se mantém constante à medida que a corrente flui. A corrente atinge o valor máximo quando a tensão aplicada é igual à tensão do arco. Depois desse tempo, a corrente se reduz, mas a tensão através do arco se mantém constante.

Dependendo das condições do gap de ar, o arco pode se restabelecer no próximo ciclo. Quando se observa a corrente associada ao arco, a forma de onda resultante consiste de picos distorcidos e não-senoidais em cada meio ciclo.

Portanto, a natureza da falta de alta impedância com condutor rompido caído ao solo apresenta um comportamento aleatório com relação à sua magnitude e forma, o qual é ditado basicamente pelas características do solo e a dinâmica do condutor na própria falta.

c) Efeito da classe de tensão na corrente de falta com arco

É relatado em [37] que experiências mostraram que a maioria das FAIs ocorrem em tensões de distribuição de classe de 15 kV. A dificuldade de detecção torna-se maior em tensões mais baixas, particularmente de 2 a 4 kV. Em tensões secundárias, a dificuldade se potencializa, porém, com provável redução do nível das lesões devido à faixa de tensão.

Estudos indicam que a dificuldade de detecção é menor em tensões de distribuição mais altas como 25 ou 34 kV, do ponto de vista do número de ocorrências deste tipo de evento. Contudo, apesar da probabilidade das ocorrências de FAIs serem reduzidas neste nível de tensão, o mínimo percentual de possibilidade é real e potencialmente fatal. Ainda de acordo com [37], em algumas circunstâncias, podem ocorrer FAIs em tensões de transmissão, tal como 115 kV.

Acredita-se que a relação entre os níveis de tensão para a ocorrência de FAIs tem a ver com o mecanismo da formação do arco. Em uma classe de tensão mais baixa, a corrente poderá fluir somente num pequeno percentual de meio ciclo, então restringindo a amplitude da corrente. Em um valor de tensão mais alta, o arco pode persistir por um longo período de meio ciclo, permitindo uma corrente total mais alta.

Apesar da constatação desse efeito não levar em conta todos os casos, ela descreve um padrão geral da relação entre o nível da corrente de falta, da classe de tensão e a ocorrência de FAIs.

d) *Características no domínio do tempo e da frequência*

As características no domínio do tempo das FAIs com a presença de arcos são muito influenciadas pelas características físicas da falta em questão. Em geral, pode-se observar um comportamento altamente aleatório na corrente associada à falta caracterizada pelo contato de um condutor caído com o solo. Falhas podem durar indefinidamente, com a magnitude da corrente crescendo ou decrescendo, devido ao comportamento da impedância criada entre a superfície e o condutor, até que o valor dessa corrente atinja uma magnitude tal capaz de sensibilizar a proteção de sobrecorrente do circuito, ou então, o COD da distribuidora de energia realize o desligamento do circuito após tomar ciência do condutor caído.

Durante uma FAI a corrente exibe variações aleatórias de sua magnitude, podendo haver longos períodos em que nenhuma corrente de falta flui, mesmo estando o condutor caído no solo.

FAIs com a presença de arcos apresentam componentes harmônicas de ordem ímpares significativas e tal característica levou os pesquisadores a tentarem encontrar estes “sinais” dentro do comportamento da 3ª harmônica do sinal de corrente da rede analisada, na intenção de se identificar padrões de comportamento que pudessem indicar a presença de uma FAI no circuito monitorado. Entretanto, alguns tipos de cargas conectadas aos circuitos de distribuição também injetam harmônicos ímpares, com comportamento altamente variável nas correntes de fase, conforme indicado em [37] e por causa disso, estudos envolvendo a detecção de FAIs por meio do monitoramento do comportamento da 3ª harmônica caíram em desuso.

Em testes realizados pela TAMU, em 1978 e 1979 [3], em vários alimentadores de concessionárias dos EUA, com condutores energizados caídos ao solo, verificou-se significativa atividade de alta frequência na corrente de falta com relação à condição normal do sistema, com aumentos em pontos onde o arco começa a se formar (geralmente no pico de tensão do sistema onde se formam os sparks) e em sua extinção (geralmente quando a tensão do sistema passa por zero). Além disso, verificou-se a natureza intermitente do arco, sendo que a corrente fluía por alguns semiciclos, interrompia-se por

vários segundos e reiniciava por poucos semiciclos. Verificou-se ainda que a magnitude da componente de alta frequência está diretamente relacionada com a magnitude instantânea da corrente do arco ou no spark.

Tipicamente, pouco efeito na forma de onda da tensão foi observado nos testes citados acima, exceto para maiores magnitudes de corrente de falta.

4.3.2. Falta de alta impedância ativa série com condutor tocando objetos externos

Um exemplo típico desse tipo de FAI é o toque do condutor rompido em árvores ou até mesmo na própria estrutura da rede de distribuição.

Nesse tipo de falta também pode haver a geração de arco elétrico e a magnitude da corrente dependerá basicamente da impedância do objeto próximo ao condutor energizado.

O risco à população também está presente, uma vez que alguma pessoa pode ser eletrocutada devido à tensão de toque, principalmente em postes de concreto com ferragens expostas e saídas de pessoas de veículos onde o cabo condutor esteja tocando o mesmo (situação típica de abalroamentos de veículos).

4.3.3. FAIs ativas shunt

Esse tipo de falta é caracterizado pelo não rompimento do condutor energizado, mas pelo toque intermitente, ou simplesmente a proximidade deste em algum objeto de alta impedância, como é o caso de isoladores com defeito e quebra parcial de postes. Dessa forma, nesse tipo de falta não há interrupção da corrente de carga na fase onde esteja ocorrendo a falta.

A magnitude da corrente destes eventos também dependerá da impedância do objeto próximo ao condutor energizado. Poderá ainda haver geração de arco elétrico, mas não haverá desequilíbrio significativo de tensão entre as fases.

Apesar desse tipo de falta não apresentar impacto significativo no sistema local, pode significar grande risco em áreas com alto adensamento populacional. Uma ocorrência muito frequente até os dias de hoje é o toque acidental de antenas de TV, vergalhões de construção durante obras e de linha de pipas com cerol em condutores nus energizados, sendo que em muitos casos tais contatos levam a acidentes, sendo alguns de natureza fatal.

4.3.4. Falta de alta impedância passiva

A ocorrência deste tipo de falta é mais frequente em redes de distribuição protegidas, onde os cabos das fases ficam suspensos por um cabo mensageiro de aço isolado entre si por acessórios com propriedades isolantes e quando há um rompimento de condutor, o mesmo pode ficar suspenso sem tocar em qualquer objeto ou solo.

Nessa condição, haverá a interrupção da corrente de carga, assim como um desequilíbrio de tensão significativo entre fases à jusante do ponto de rompimento do condutor. Porém, não existirá corrente de falta e conseqüentemente também não haverá arco elétrico.

4.4 Características de uma forma de onda da corrente de uma FAI

Conforme apresentado no tópico anterior, as correntes das FAIs apresentam características que dependem do tipo e forma de contato do condutor rompido com a superfície e essas características podem ser notadas na forma de onda de corrente. Conforme a Figura 4.1, a forma de onda de uma FAI basicamente contém 5 características que são:

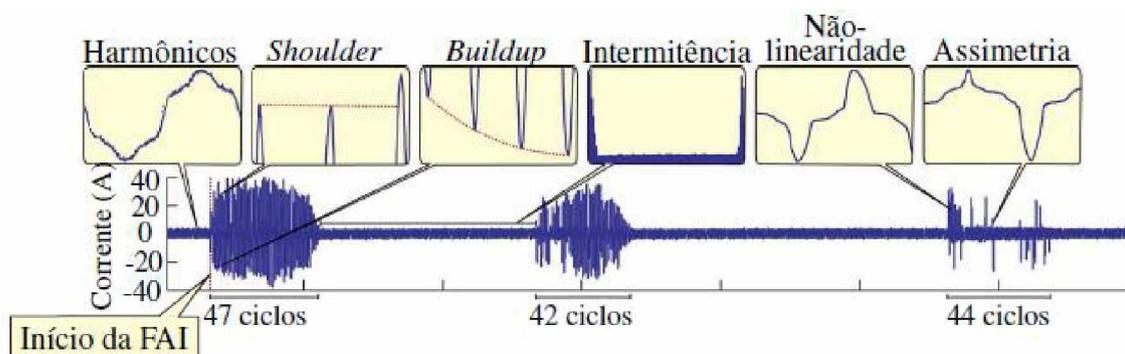


Figura 4.1 – Características presentes na forma de onda de uma FAI.

4.4.1 Conteúdo harmônico

A distorção na forma de onda contribui para o surgimento de conteúdo harmônico. Por exemplo, a não linearidade é responsável pelo aparecimento de componentes harmônicas, assim como a assimetria dos semiciclos é o principal fator pelos surgimentos das harmônicas pares. Por sua vez, as harmônicas de alta ordem são caracterizadas pela extinção e reigitação do arco, ou seja, provocado pela intermitência. De acordo com [41], os

harmônicos produzidos pelas FAIs dependem da tensão no ponto em que ocorre a falta, o que diferencia dos harmônicos de outros eventos que são em função da corrente da carga.

4.4.2 Shoulder

Tal fenômeno é caracterizado pelo período em que a corrente de uma FAI permanece constante antes de voltar a crescer.

4.4.3 Buildup

As FAIs apresentam tal característica que é baseada no crescimento da envoltória da corrente de falta devido à acomodação física do cabo.

4.4.3 Intermitência

Na maioria das FAIs a corrente é intermitente devido ao comportamento do arco. O condutor energizado ao cair em uma superfície de alta impedância faz surgir o arco elétrico e a sua constância depende do tipo de superfície. A atuação do arco com a superfície fará com que a área ao seu redor perca umidade, devido ao calor gerado por este, promovendo a extinção do arco. No entanto, em um segundo momento, o condutor pode entrar em contato com outra região, ocasionando a reignição do arco. Tal processo faz com que surjam componentes de corrente de alta frequência.

4.4.4 Não linearidade

Uma FAI se comporta como uma resistência não linear, ou seja, a queda de tensão durante o evento não é diretamente proporcional à corrente que passa por ela. A não linearidade fica evidente na curva característica $V \times I$, que causa a distorção da forma de onda.

4.4.5 Assimetria

Experimentos realizados por [10] evidenciaram que a corrente produzida por uma FAI não é simétrica possuindo o semiciclo positivo maior em amplitude se comparado com o semiciclo negativo.

4.5 Simulação de uma FAI em uma rede de distribuição de média tensão com neutro multi-aterrado

Na intenção de se apresentar, de uma forma mais prática, toda a teoria sobre o comportamento e características das FAIs citadas no presente trabalho, foram realizadas duas simulações, aplicando uma FAI próxima ao final do circuito de MT multi-aterrado e outra dentro da subestação modelada, utilizando o software Matlab®. O modelo de FAI utilizado é uma variação do modelo apresentado por Emanuel [10], em 1990. Além da apresentação da forma de onda da FAI aplicada, tanto em um ponto extremo da rede, como na fonte do sistema, serão demonstrados os conteúdos inter-harmônicos desta falta nos dois casos simulados.

Por fim, também serão apresentados os conteúdos inter-harmônicos de FAIs reais obtidas em uma bateria de testes realizadas em diferentes tipos de superfícies por [40]. Estas faltas foram realizadas em um campo de testes construído especialmente para este fim, em parceria com a distribuidora de energia elétrica CEMIG.

4.5.1 Características do circuito de média tensão modelado

Basicamente, o modelo do circuito de distribuição de média tensão é composto por duas partes, sendo a primeira a representação de uma subestação abaixadora, contendo um gerador trifásico de 100 MVA e um transformador trifásico de 25 MVA, com relação de tensão de 138 kV / 13,8 kV com fechamento de seus enrolamentos em triângulo-estrela. À jusante do transformador foi modelada uma linha de distribuição em média tensão de 13,8 kV e ao longo desta foram inseridas cargas trifásicas representando os transformadores que suprem os consumidores. A carga total desse conjunto de transformadores é de 7 MVA, com um fator de potência indutivo de 0,97. As figuras 4.2 e 4.3 ilustram a subestação e um trecho da rede de distribuição de média tensão, respectivamente. Ressalta-se ainda que nas duas figuras também estão representados os blocos contendo o modelo de FAI desenvolvido para a simulação.

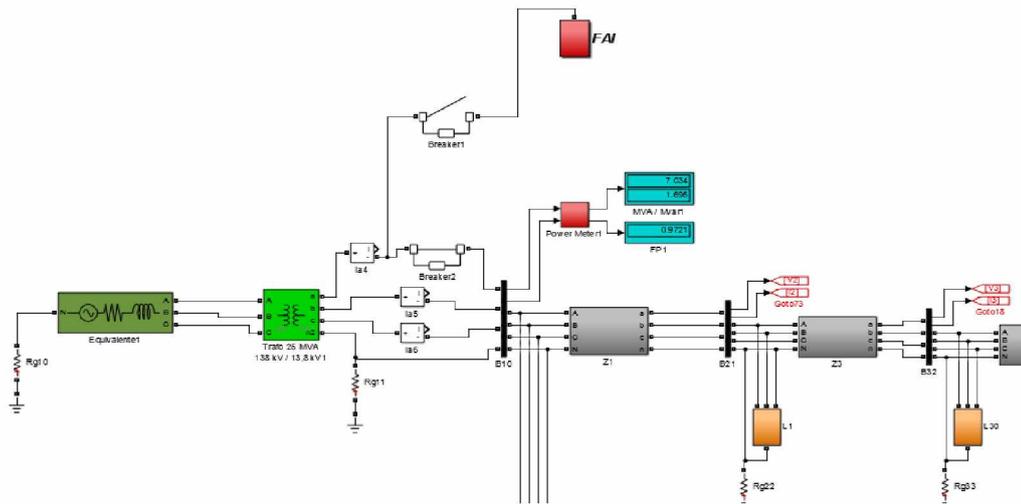


Figura 4.2 – Modelagem da representação da subestação supridora da rede de distribuição de MT.

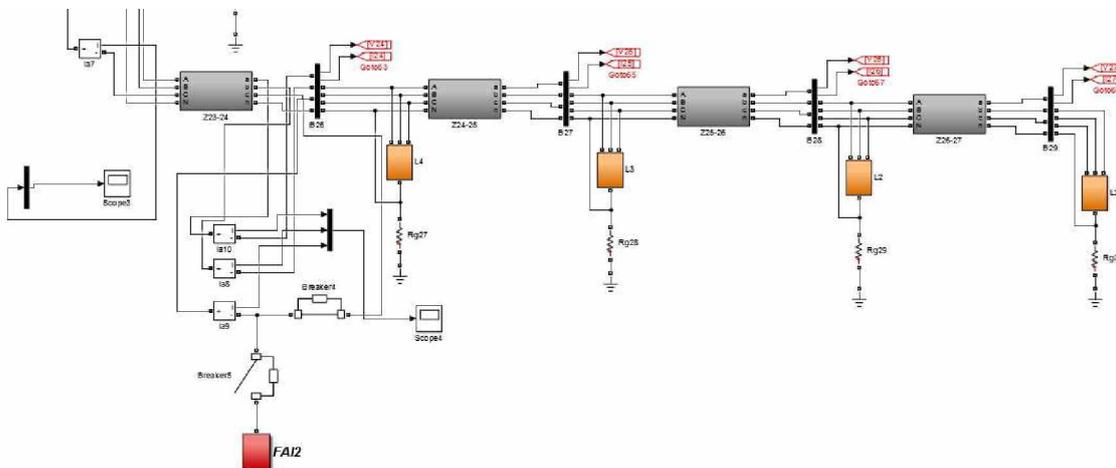


Figura 4.3 – Modelagem de um trecho da linha de distribuição de MT onde foi aplicada a FAI.

4.5.2 Modelo da FAI a ser utilizado

Conforme mencionado no item anterior, o modelo da FAI utilizada na simulação é uma adaptação de um modelo apresentado em [10]. A Figura 4.4 ilustra tal modelo, enquanto a Figura 4.5 ilustra a configuração final da falta aplicada na simulação deste trabalho.

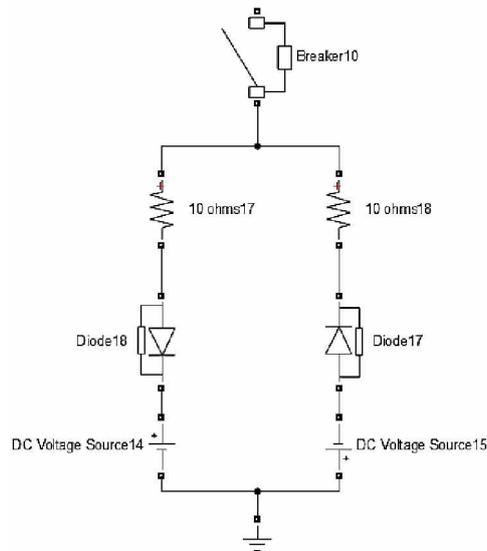


Figura 4.4 – Construção do modelo de FAI proposto por Emanuel [10].

O modelo proposto por Emanuel é composto pela conexão de um diodo invertido em paralelo com outro diodo, sendo que cada um destes é conectado em série com uma fonte de tensão contínua. Nesta configuração, a corrente da falta circula pelo ramo da esquerda durante o semiciclo positivo e no da direita no semiciclo negativo.

Na intenção de simular a característica de assimetria presente nas FAIs, utiliza-se na fonte do semiciclo negativo uma tensão maior que a fonte do semiciclo positivo. A ocorrência do aparecimento de conteúdos harmônicos é controlada pela diferença entre as duas fontes de tensão contínua.

A utilização desse modelo se justifica pela fácil implementação das características de não linearidade e assimetrias do arco elétrico presente nas FAIs.

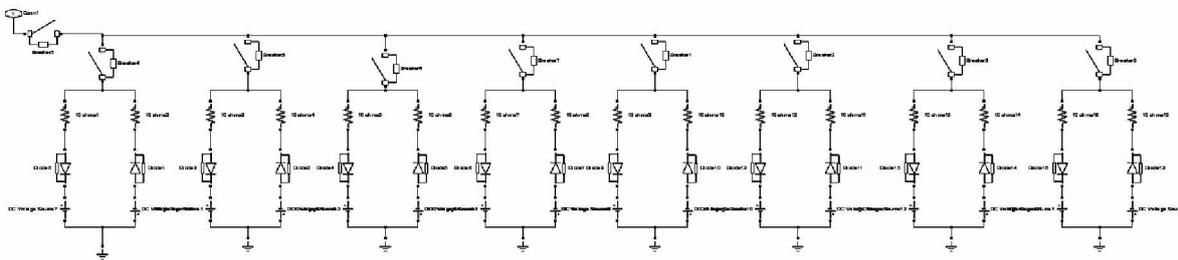


Figura 4.5 – Construção do modelo de FAI utilizado na simulação do trabalho.

Para se conseguir o efeito dos Shoulders e os Buildups, também presentes na forma de onda de uma corrente de FAI, é feita uma composição de várias células do modelo proposto

por Emanuel. Dessa forma, por meio do controle de abertura das chaves é possível aumentar e diminuir o valor da corrente da falta, permitindo com que todas as características de uma FAI sejam simuladas.

4.5.3 Simulações da FAI modelada

Neste item serão apresentados os resultados da aplicação da FAI em um ponto próximo do final da linha de distribuição em média tensão (MT) e dentro da subestação, logo após do lado de baixa do transformador.

➤ **FAI aplicada próxima ao extremo da linha de distribuição em média tensão**

Na Figura 4.6 é possível verificar que a magnitude da corrente da FAI aplicada está em torno de 60 A, ou seja, bem abaixo da corrente de carga do circuito que possui como magnitude um pouco mais de 200 A. Este fato demonstra o principal motivo da dificuldade de detecção das FAIs por meio das proteções convencionais de sobrecorrente. No exemplo em questão, o valor de 60 A nunca será “visto” pela proteção de sobrecorrente do circuito como sendo um evento fora da normalidade.

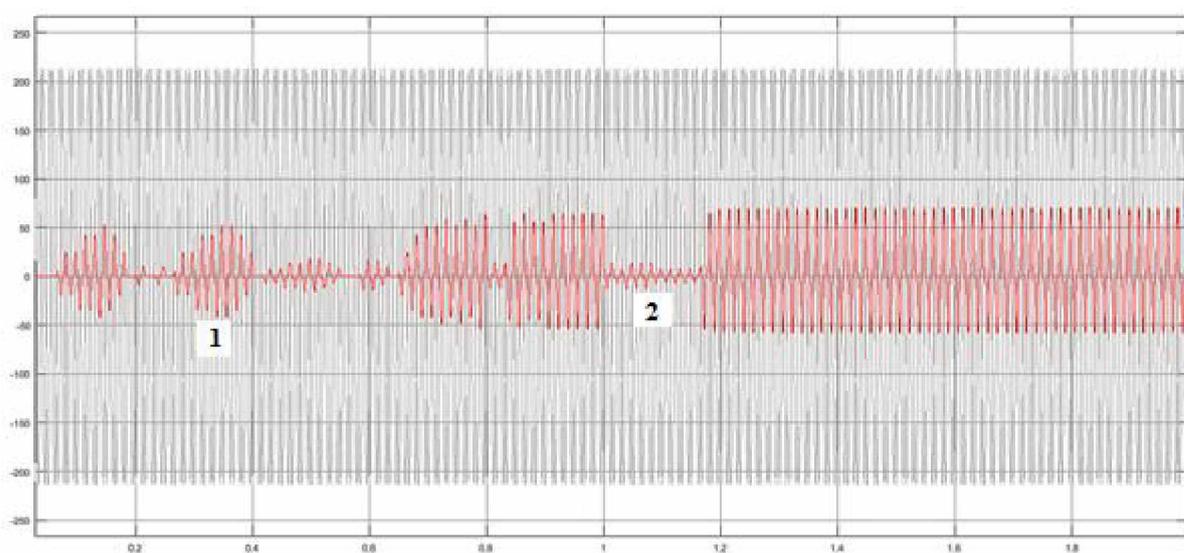


Figura 4.6 – Forma de onda obtida durante a simulação da FAI aplicada em um ponto da rede MT.

Além desse fato, o modelo conseguiu reproduzir uma FAI com todas as suas características, sendo possível verificar, na Figura 4.6, as características de Buildup (1)

e Intermittência (2), assim como as características de Assimetria (3), Harmônicas (4), Shoulder (5) e não-linearidade (6) na Figura 4.7.

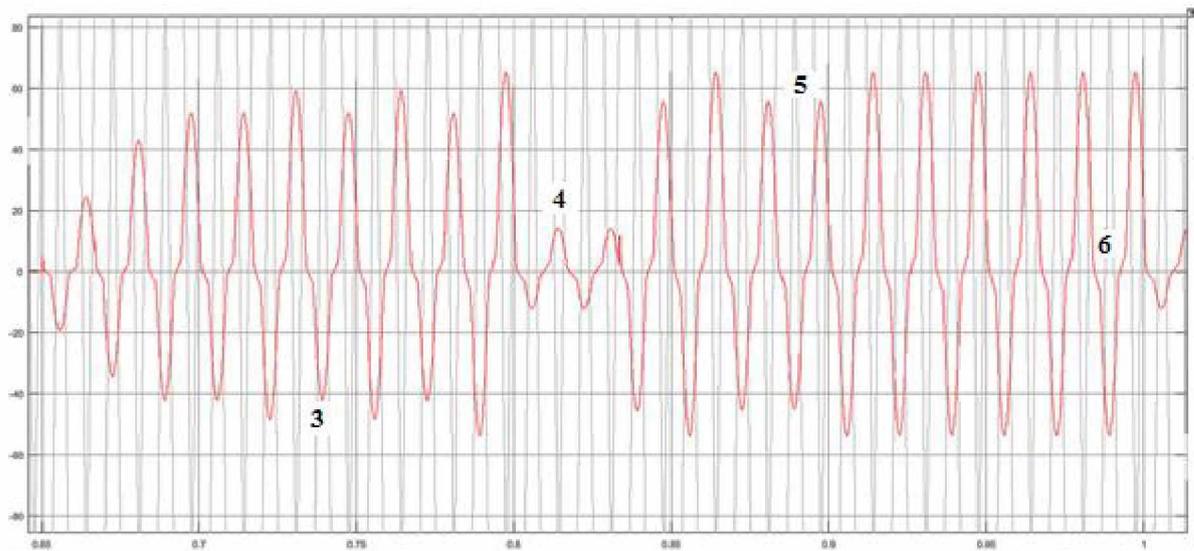


Figura 4.7 – Trecho ampliado da forma de onda da FAI aplicada em um ponto da rede MT.

➤ **FAI aplicada na subestação**

Da mesma forma que simulação anterior, a magnitude da forma de onda da corrente é reduzida, tendo tal redução amplificada quando comparada com diferença de magnitude da FAI (aproximadamente 80 A) e a magnitude da carga (próxima dos 420 A). Essa situação demonstra que a dificuldade de detecção de uma FAI aumenta em pontos próximos da fonte do sistema.

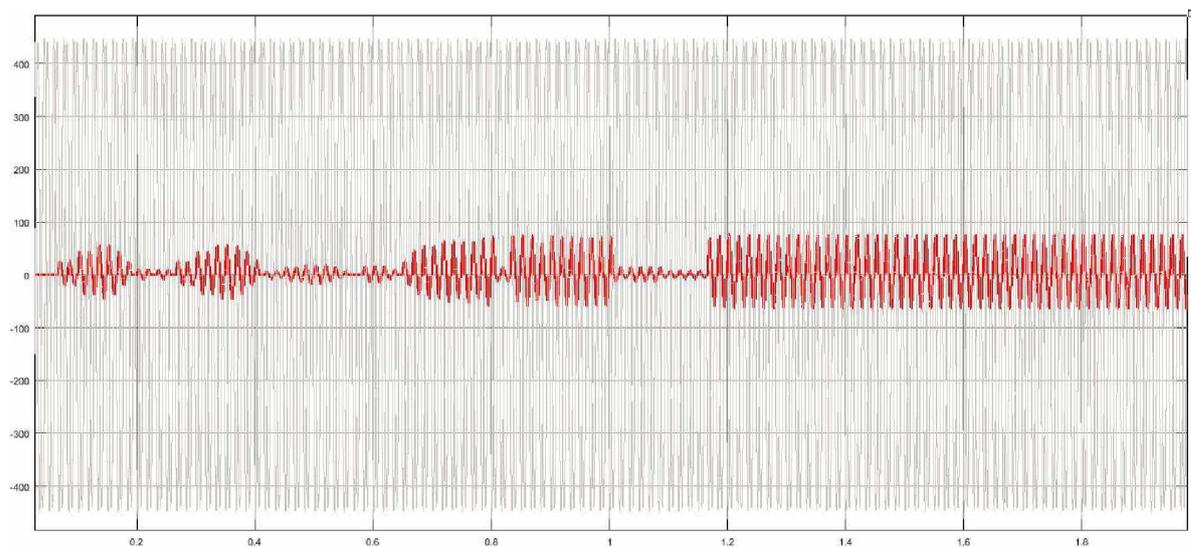


Figura 4.8 – Forma de onda obtida durante a simulação da FAI aplicada na subestação.

Quanto à forma da onda da FAI aplicada nesta segunda simulação, é possível verificar, por meio das figuras 4.8 e 4.9, que as características intrínsecas de uma FAI,

ou seja, Buildup, Intermitência, Assimetria, Harmônicas, Shoulder e não-linearidade, novamente se fizeram presentes.

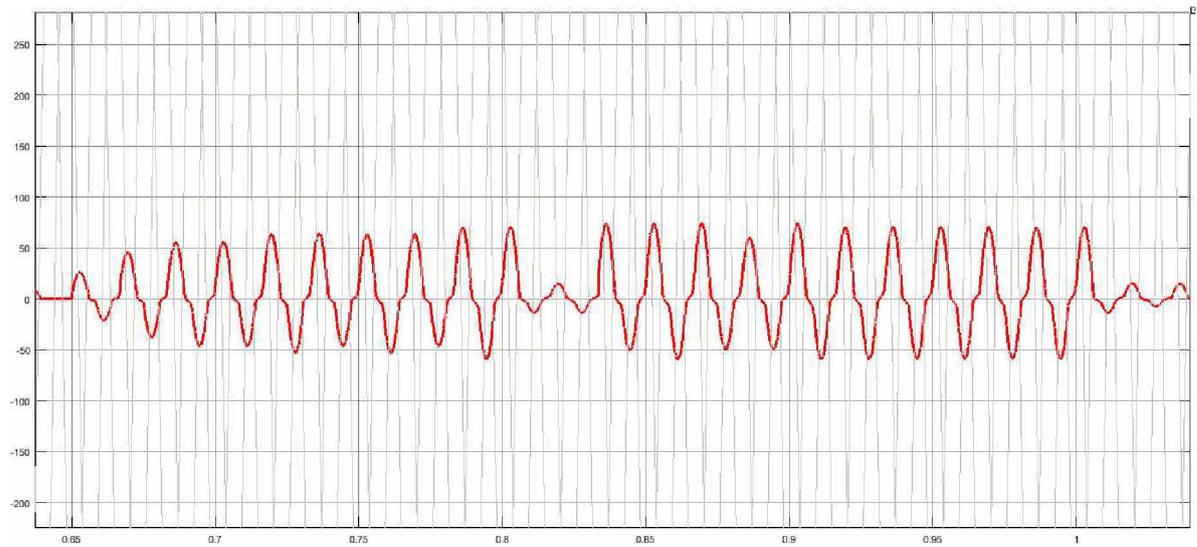


Figura 4.9 – Trecho ampliado da forma de onda da FAI aplicada na subestação.

4.5.4 Análise das componentes harmônicas e inter-harmônicas da corrente das FAIs

O objetivo desta parte do trabalho é demonstrar o comportamento das frequências inter-harmônicas próximas da ordem fundamental e das múltiplas desta. Para tal demonstração, foi aplicado um filtro baseado no método de Fourier, com uma resolução espectral de 60 Hz, na intenção de se decompor as formas de ondas das FAIs em suas componentes harmônicas e inter-harmônicas em frequências intervaladas de 1 Hz.

Para a demonstração do comportamento citado acima, são usadas as ondas das correntes das FAIs simuladas e as formas de onda das FAIs intencionalmente provocadas nos ensaios realizados por [40].

O comportamento de interesse para o trabalho está nas faixas entre 40 – 56 Hz e 64 – 80 Hz do espectro de frequências das formas de onda analisadas. Para uma melhor visualização, os intervalos de interesse estão demarcados por um retângulo tracejado.

A seguir serão apresentados os gráficos contendo os espectros inter-harmônicos em torno da frequência fundamental e de suas harmônicas até sua quinta ordem, tanto para as formas de ondas provenientes das duas simulações realizadas, assim como as formas de onda das faltas provocadas nas diferentes superfícies testadas, conforme o trabalho desenvolvido em [40].

➤ **Espectro de frequências da FAI aplicada na linha de distribuição de MT**

Na Figura 4.10 é possível verificar que as magnitudes dos conteúdos inter-harmônicos da forma de onda simulada de uma FAI, aplicada em determinado ponto do sistema de distribuição em MT, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada, se encontram entre 35 e 13 por cento da magnitude da corrente na frequência fundamental.

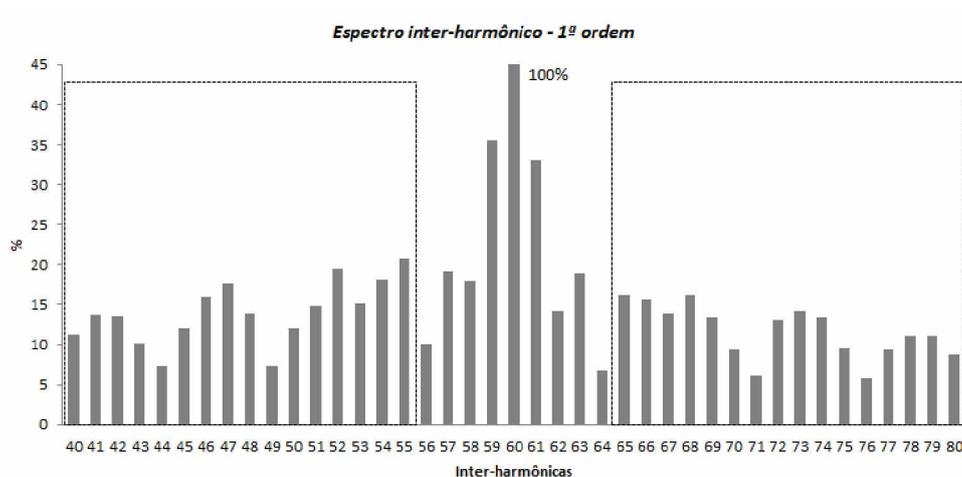


Figura 4.10 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental.

A Figura 4.11 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 2ª ordem da forma de onda simulada, de uma FAI aplicada em determinado ponto do sistema de distribuição em MT, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

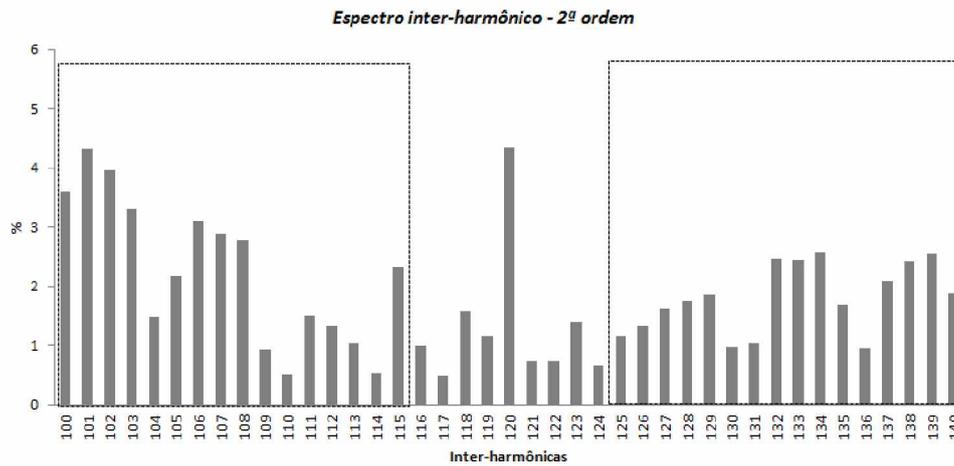


Figura 4.11 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica.

A Figura 4.12 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 3ª ordem da forma de onda simulada de uma FAI, aplicada em determinado ponto do sistema de distribuição em MT, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

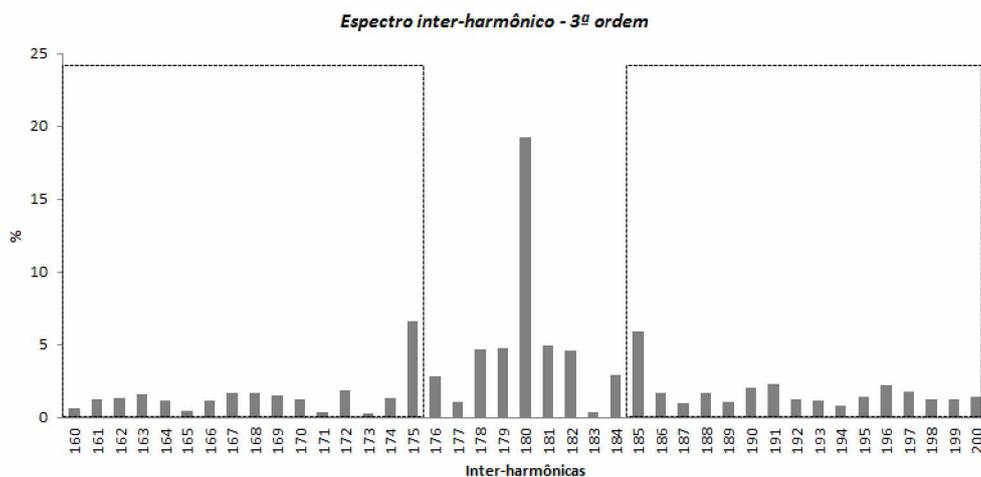


Figura 4.12 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica.

A Figura 4.13 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 4ª ordem da forma de onda simulada de uma FAI, aplicada em determinado ponto do sistema de distribuição em MT, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

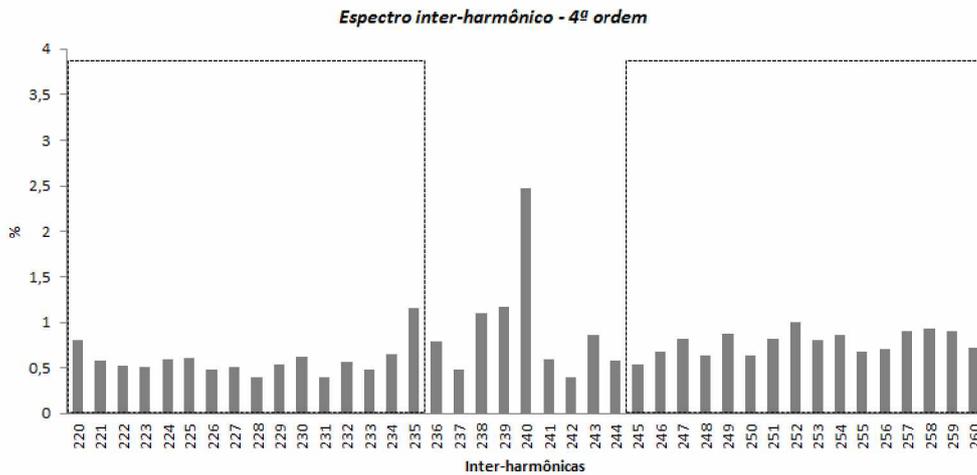


Figura 4.13 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica.

A Figura 4.14 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 5ª ordem da forma de onda simulada de uma FAI, aplicada em determinado ponto do sistema de distribuição em MT, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

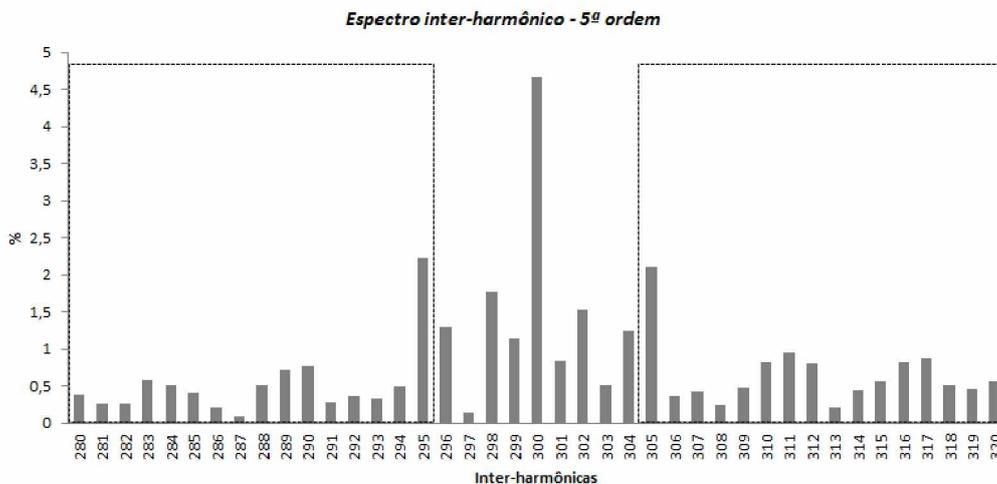


Figura 4.14 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica.

Espectro de frequências da FAI aplicada na subestação

Na Figura 4.15 é possível verificar que as magnitudes dos conteúdos inter-harmônicos da forma de onda simulada para uma FAI, aplicada na subestação do sistema de distribuição em MT, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada, se encontram entre 25 e 5 por cento da magnitude da corrente na frequência fundamental.

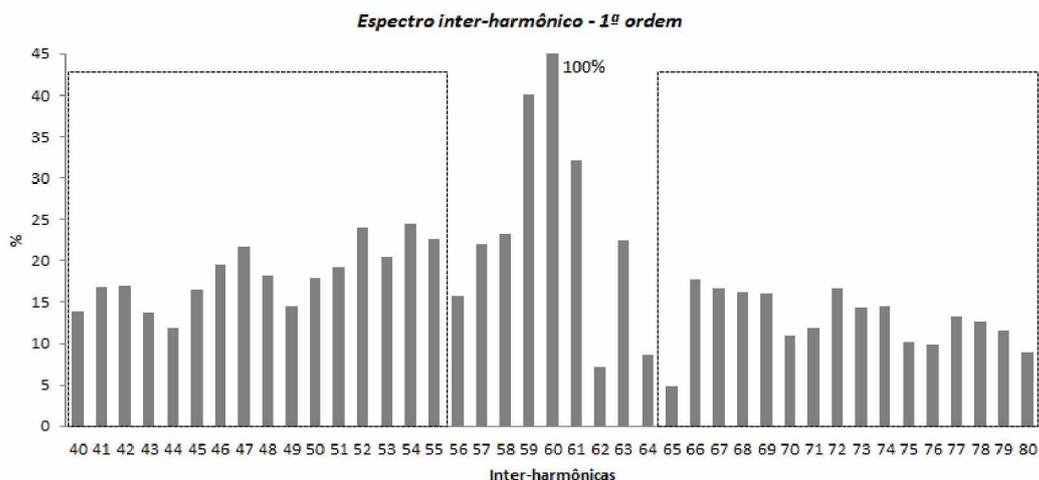


Figura 4.15 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental.

A Figura 4.16 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 2ª ordem da forma de onda simulada de uma FAI, aplicada na subestação do sistema de distribuição em MT, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

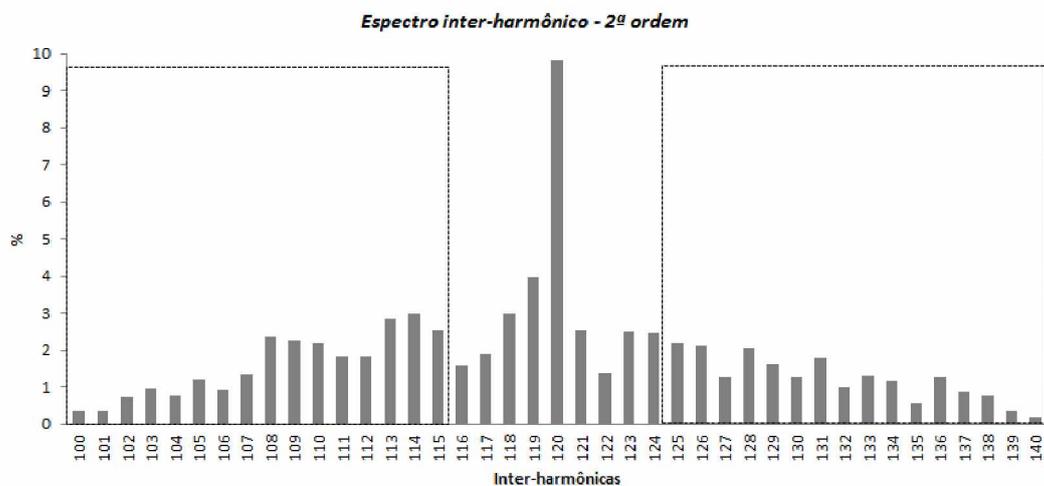


Figura 4.16 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica.

A Figura 4.17 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 3ª ordem da forma de onda simulada de uma FAI, aplicada na subestação do sistema de distribuição em MT, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

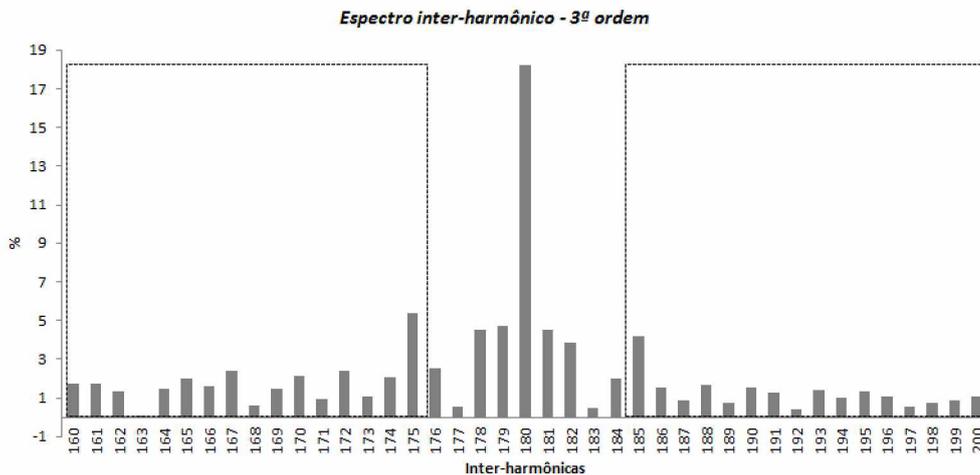


Figura 4.17 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica.

A Figura 4.18 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 4ª ordem da forma de onda simulada de uma FAI, aplicada na subestação do sistema de distribuição em MT, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

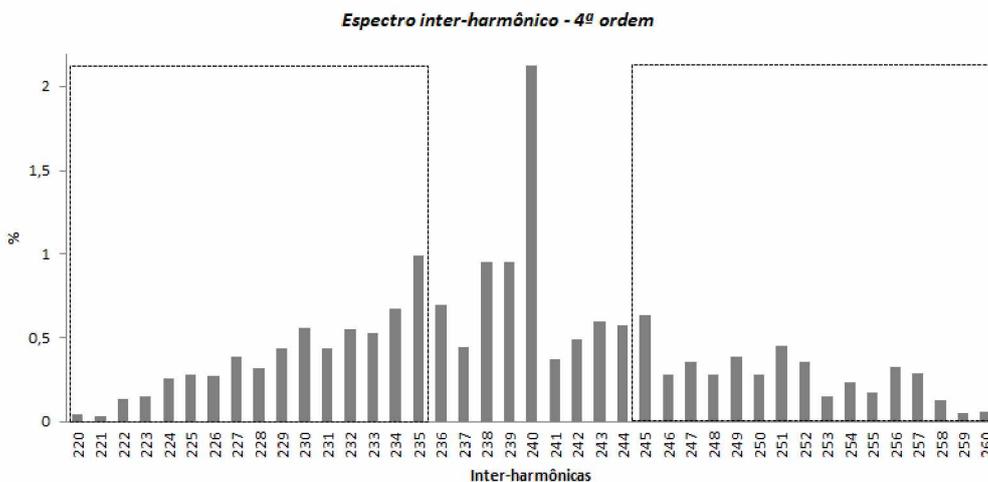


Figura 4.18 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica.

A Figura 4.19 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 5ª ordem da forma de onda simulada de uma FAI, aplicada na subestação do sistema de distribuição em MT, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

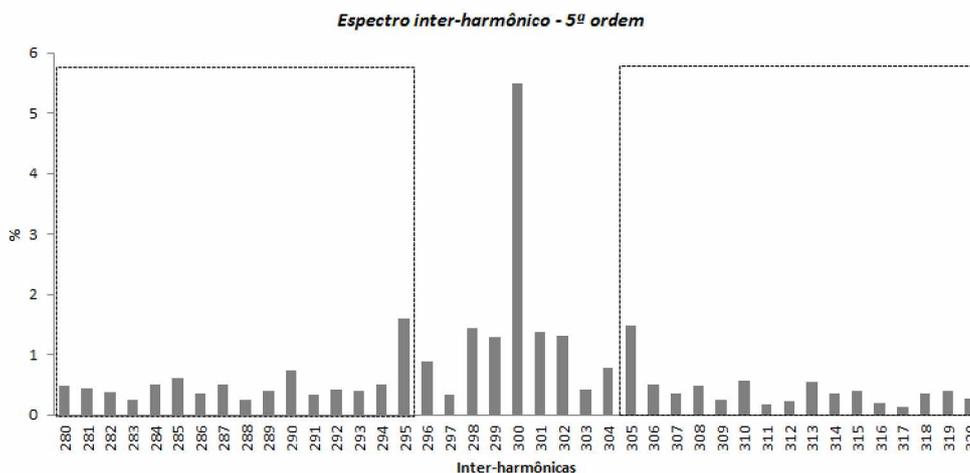


Figura 4.19 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica.

➤ **Espectro de frequências da FAI aplicada na superfície Areia**

Na Figura 4.20 é possível verificar que as magnitudes dos conteúdos inter-harmônicos da forma de onda simulada para a FAI produzida em [40], em uma superfície de areia, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada, se encontram entre 2,5 e 0,5 por cento da magnitude da corrente na frequência fundamental.

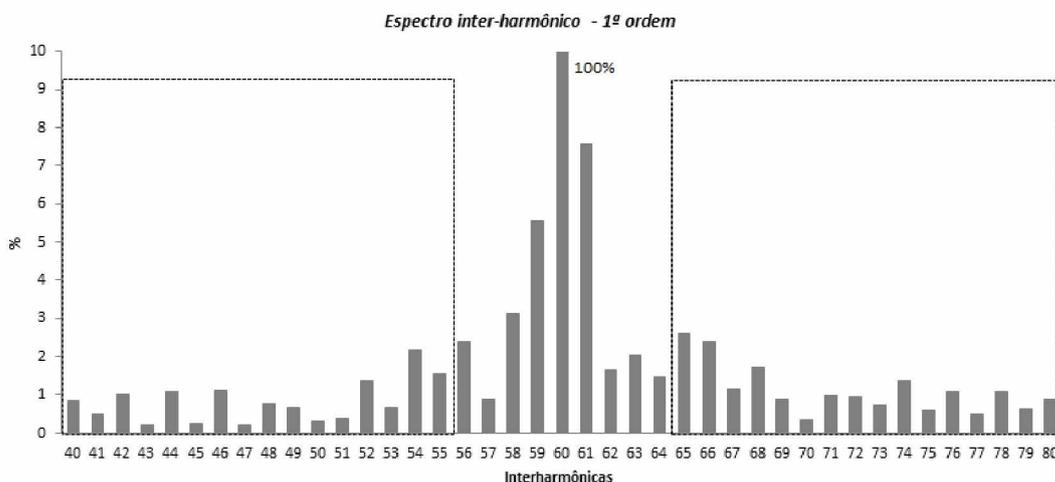


Figura 4.20 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Areia).

A Figura 4.21 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 2ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de areia, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

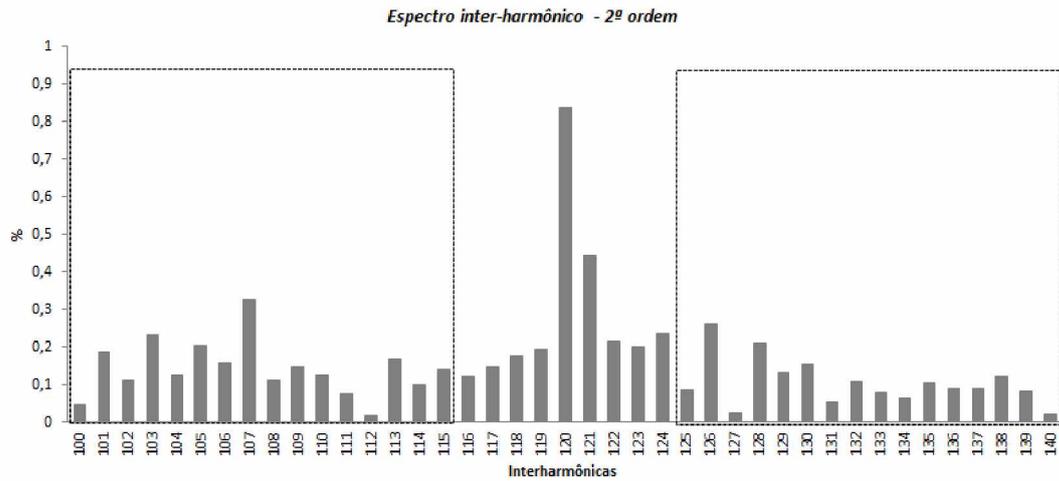


Figura 4.21 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica (Areia).

A Figura 4.22 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 3ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de areia, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

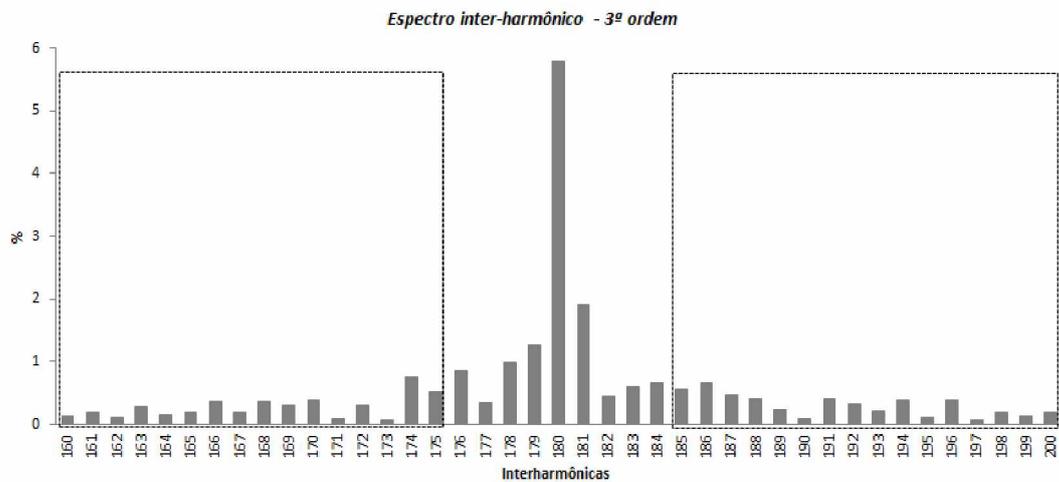


Figura 4.22 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica (Areia).

A Figura 4.23 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 4ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de areia, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

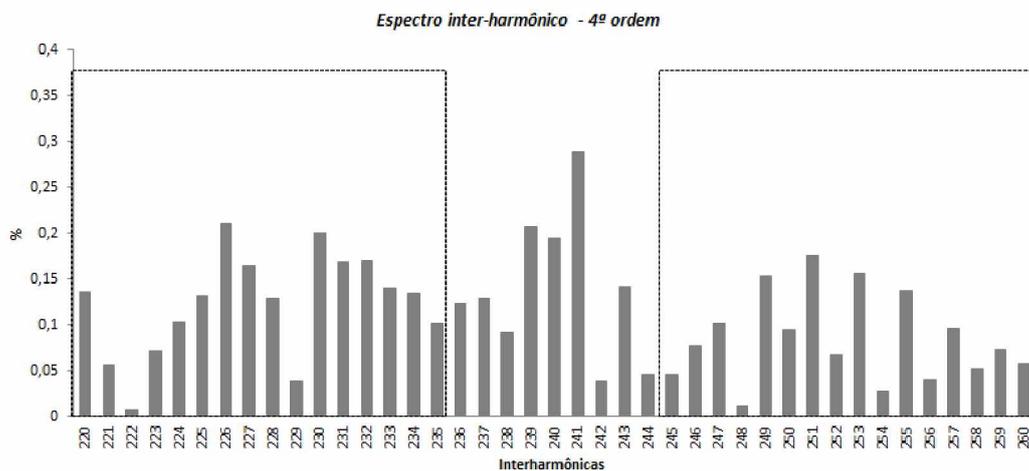


Figura 4.23 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica (Areia).

A Figura 4.24 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 5ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de areia, dentro da faixas especificadas pela metodologia analisada.

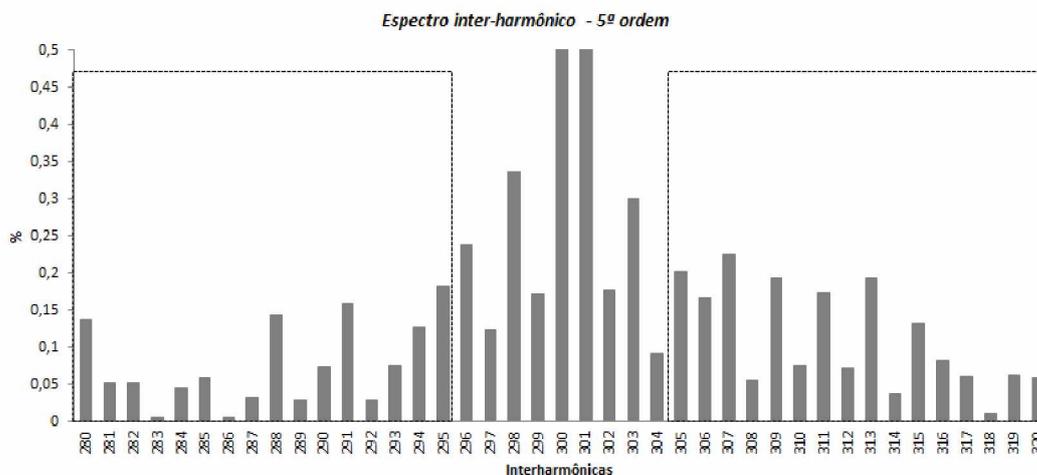


Figura 4.24 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica (Areia).

➤ **Espectro de frequências da FAI aplicada na superfície Asfalto**

Na Figura 4.25 é possível verificar que as magnitudes dos conteúdos inter-harmônicos da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de asfalto, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada, se encontram entre 19 e 0,5 por cento da magnitude da corrente na frequência fundamental.

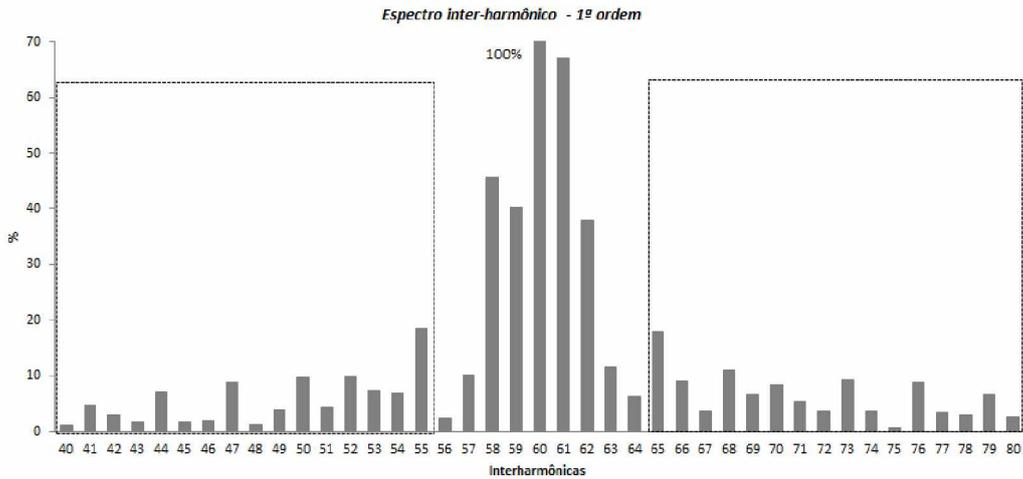


Figura 4.25 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Asfalto).

A Figura 4.26 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 2ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de asfalto, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

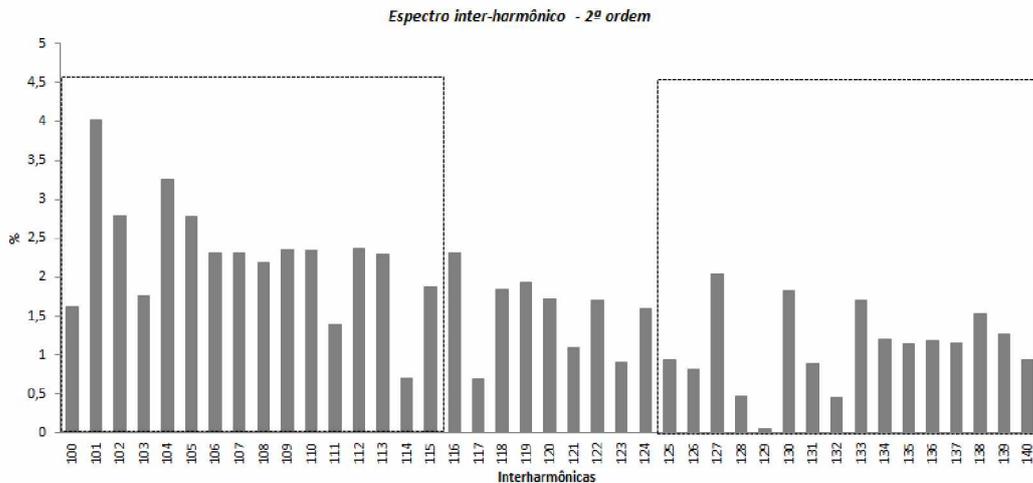


Figura 4.26 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica (Asfalto).

A Figura 4.27 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 3ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de asfalto, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

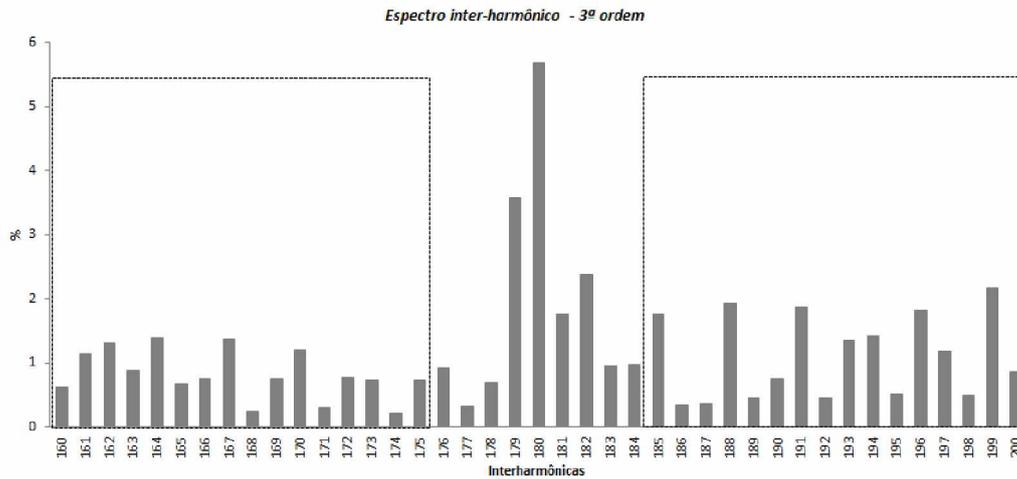


Figura 4.27 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica (Asfalto).

A Figura 4.28 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 4ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de asfalto, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

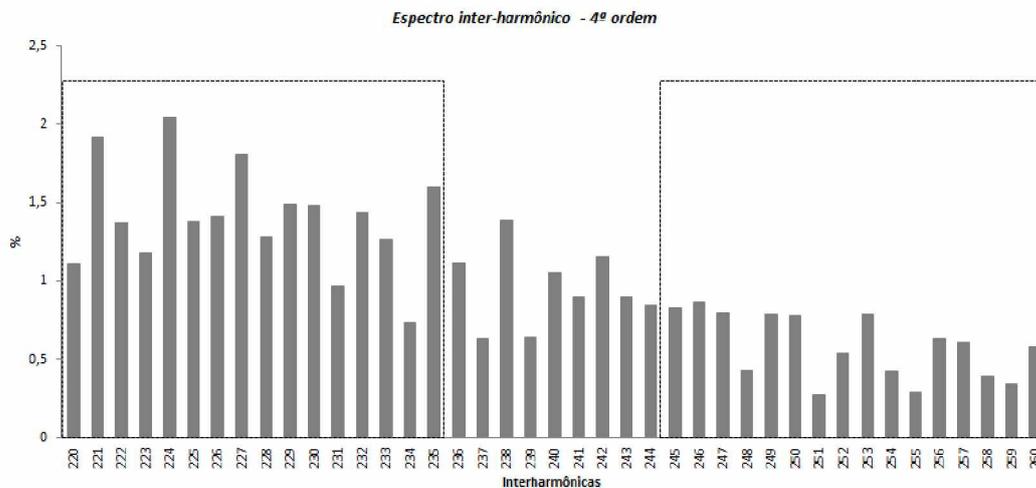


Figura 4.28 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica (Asfalto).

A Figura 4.29 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 5ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de asfalto, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

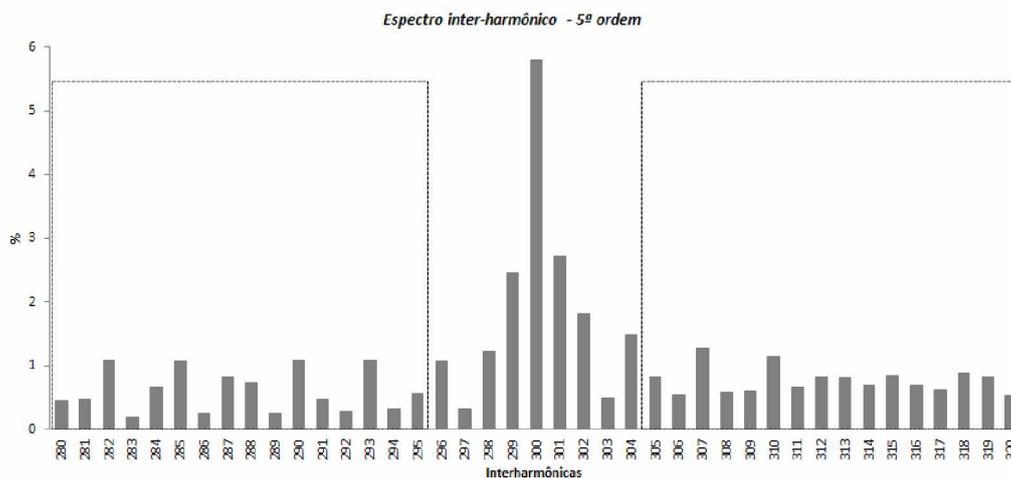


Figura 4.29 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica (Asfalto).

➤ **Espectro de frequências da FAI aplicada na superfície Brita**

Na Figura 4.30 é possível verificar que as magnitudes dos conteúdos inter-harmônicos da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de brita, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada, se encontram entre 7 e 0,5 por cento da magnitude da corrente na frequência fundamental.

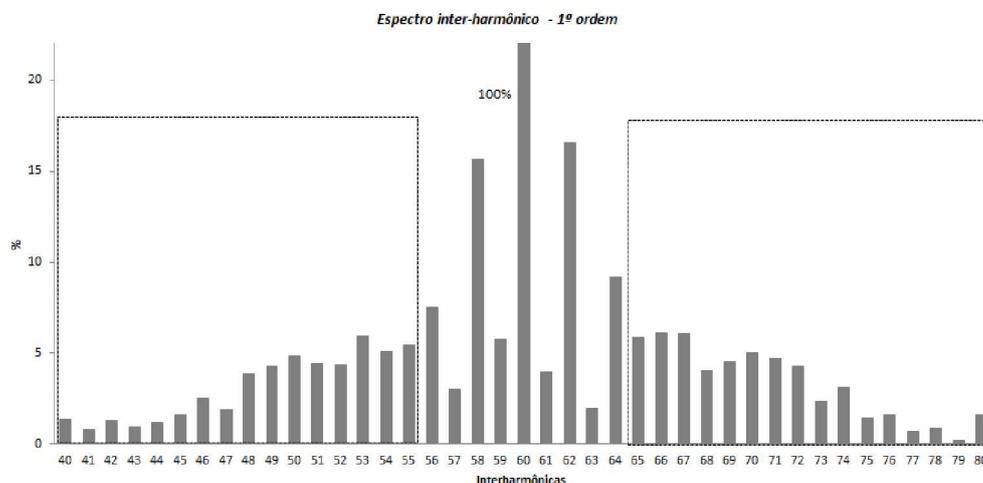


Figura 4.30 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Brita).

A Figura 4.31 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 2ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de brita, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

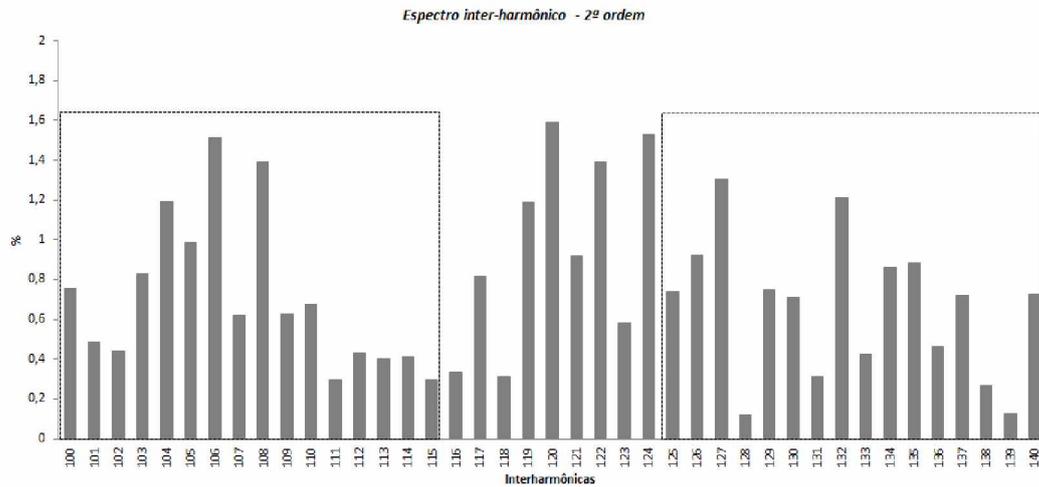


Figura 4.31 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica (Brita).

A Figura 4.32 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 3ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de brita, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

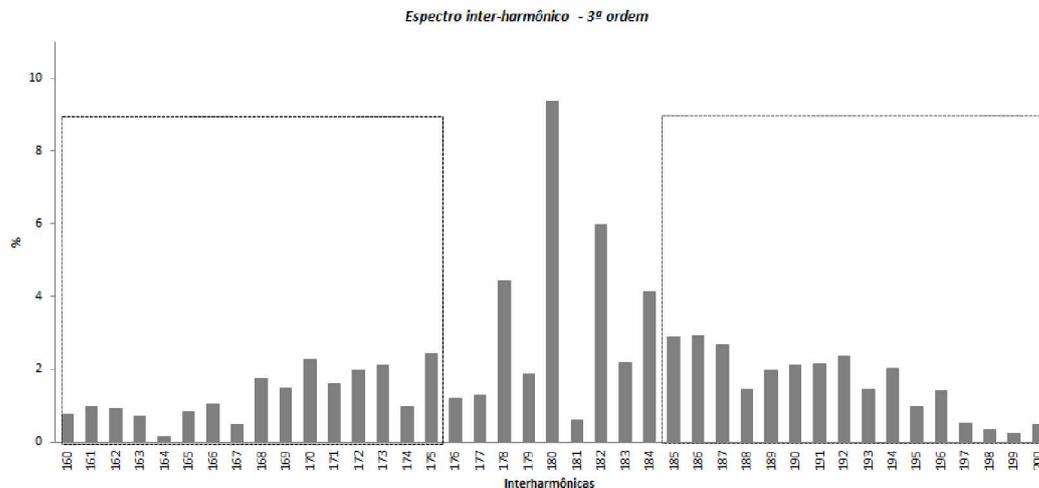


Figura 4.32 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica (Brita).

A Figura 4.33 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 4ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de brita, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

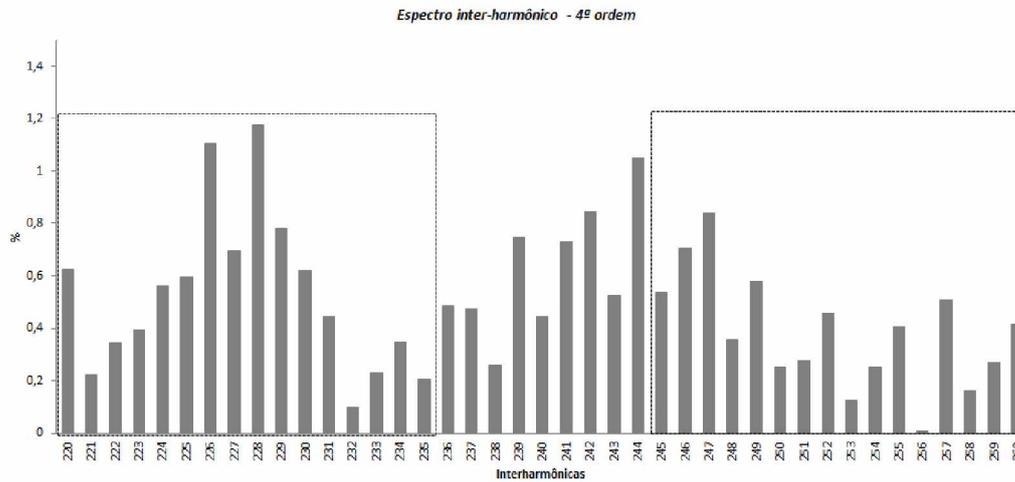


Figura 4.33 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica (Brita).

A Figura 4.34 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 5ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de brita, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

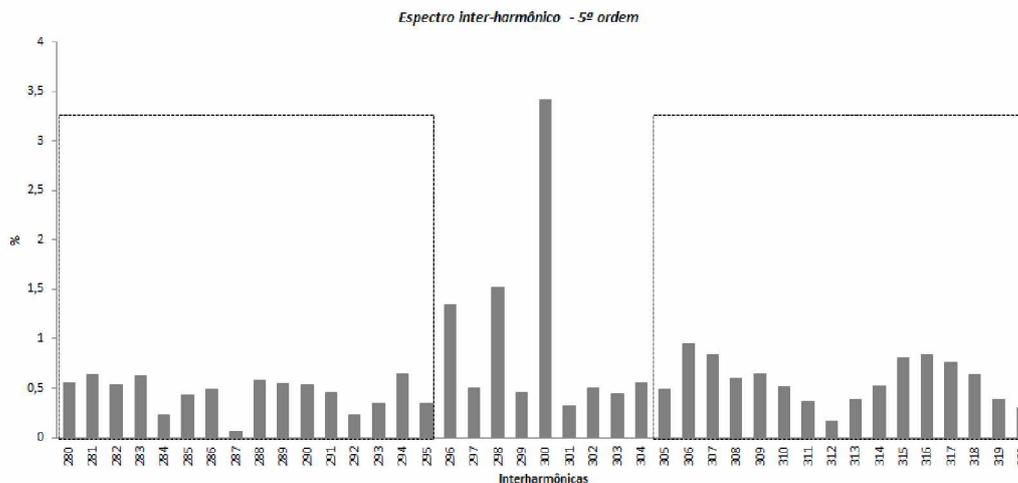


Figura 4.34 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica (Brita).

➤ **Espectro de frequências da FAI aplicada na superfície Capim**

Na Figura 4.35 é possível verificar que as magnitudes dos conteúdos inter-harmônicos da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de capim, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada, se encontram entre 6 e 0,3 por cento da magnitude da corrente na frequência fundamental.

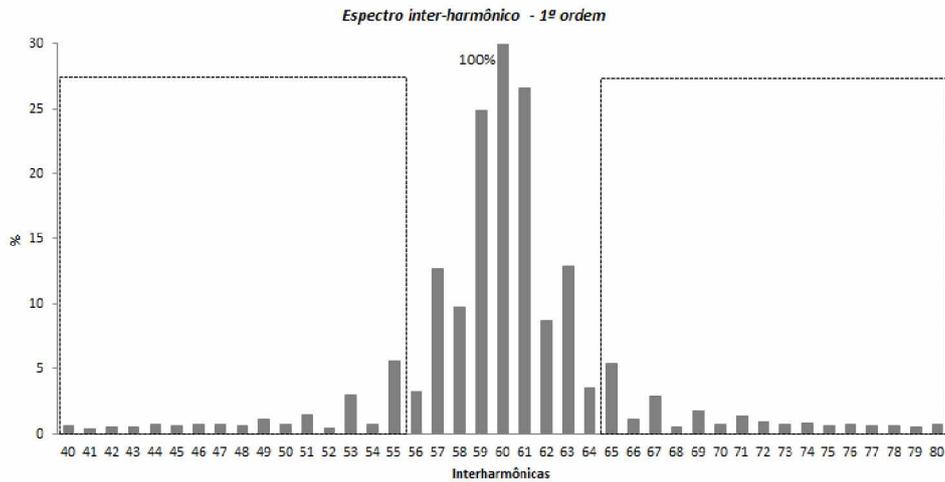


Figura 4.35 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Capim).

A Figura 4.36 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 2ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de capim, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

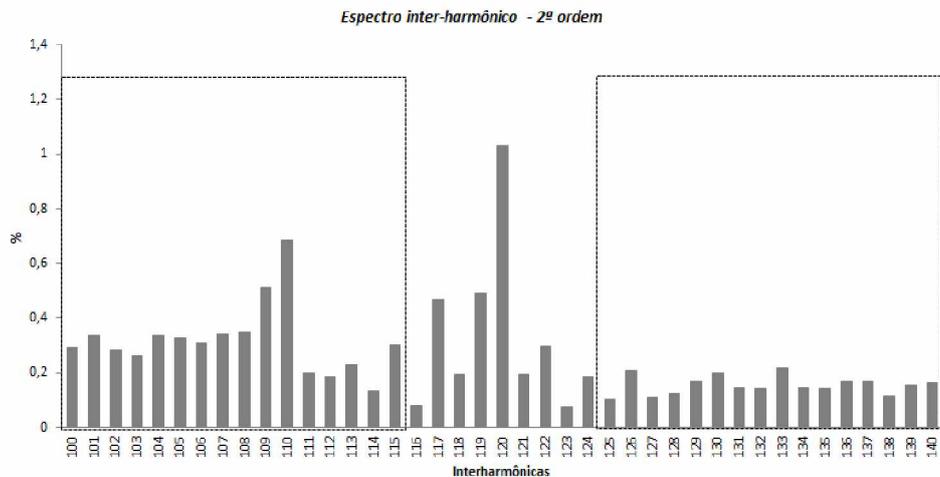


Figura 4.36 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica (Capim).

A Figura 4.37 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 3ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de capim, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

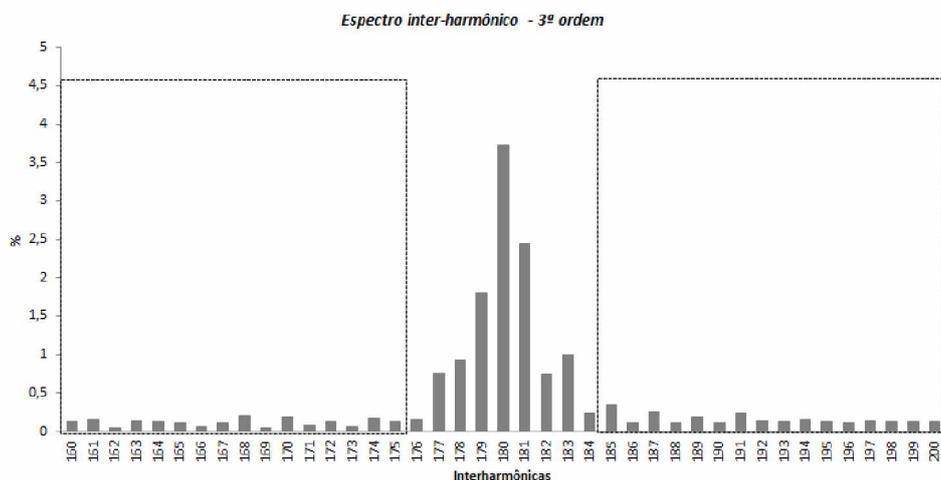


Figura 4.37 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica (Capim).

A Figura 4.38 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 4ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de capim, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

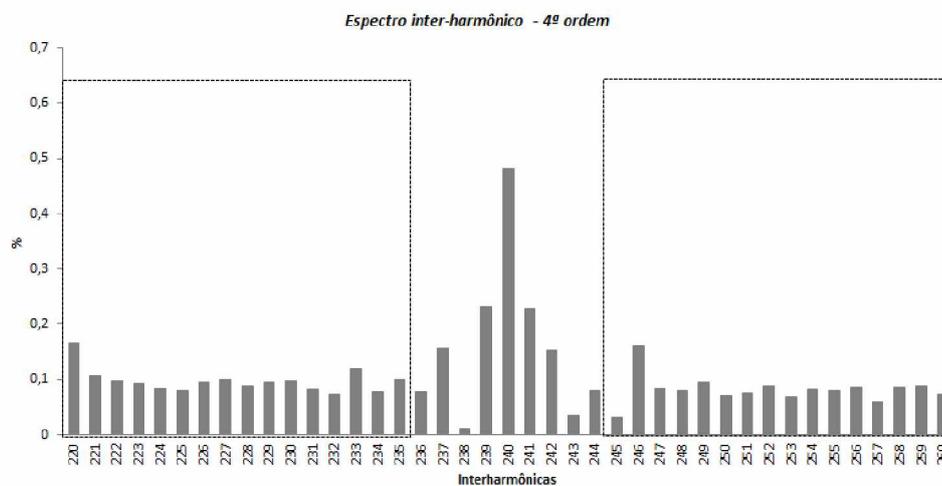


Figura 4.38 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica (Capim).

A Figura 4.39 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 5ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de capim, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

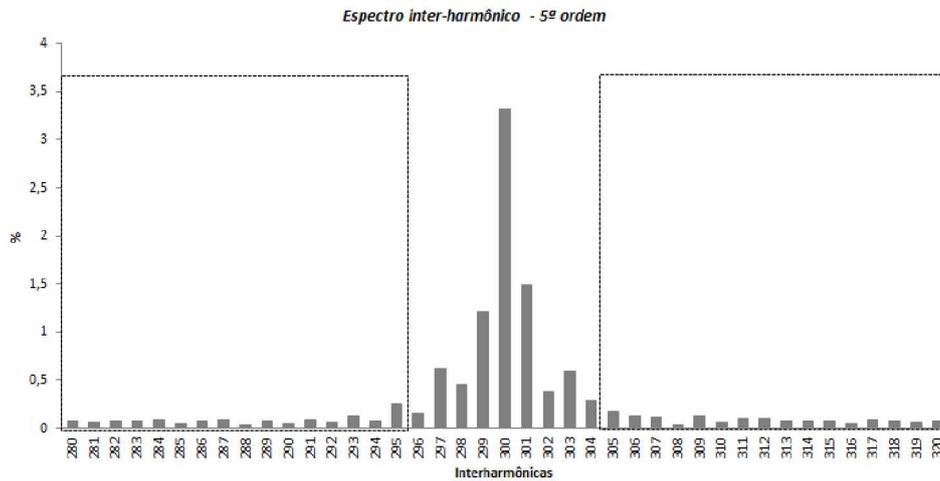


Figura 4.39 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica (Capim).

➤ **Espectro de frequências da FAI aplicada na superfície Concreto**

Na Figura 4.40 é possível verificar que as magnitudes dos conteúdos inter-harmônicos da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de concreto, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada, se encontram entre 6 e 0,3 por cento da magnitude da corrente na frequência fundamental.

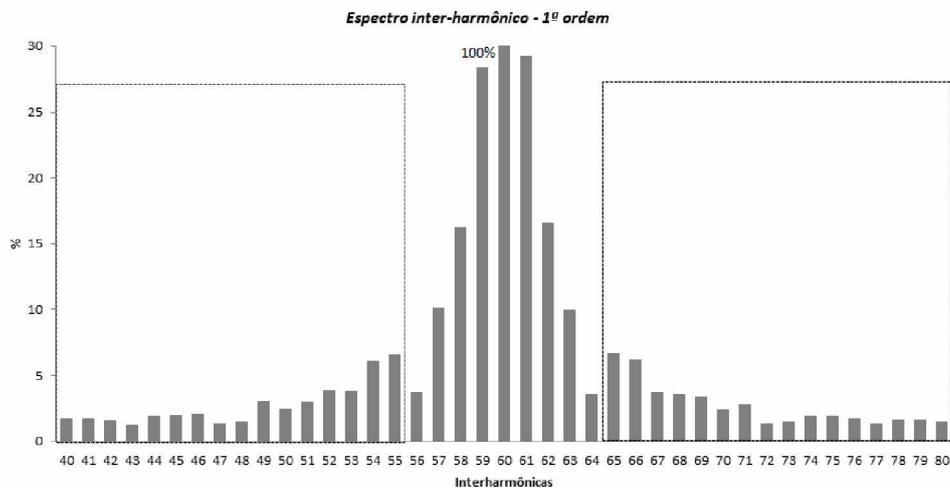


Figura 4.40 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Concreto).

A Figura 4.41 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 2ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de concreto, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

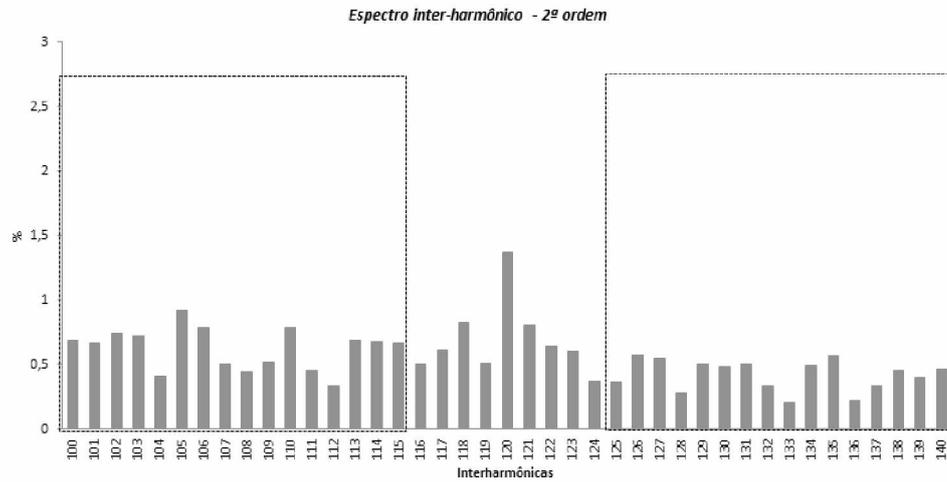


Figura 4.41 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica (Concreto).

A Figura 4.42 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 3ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de concreto, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

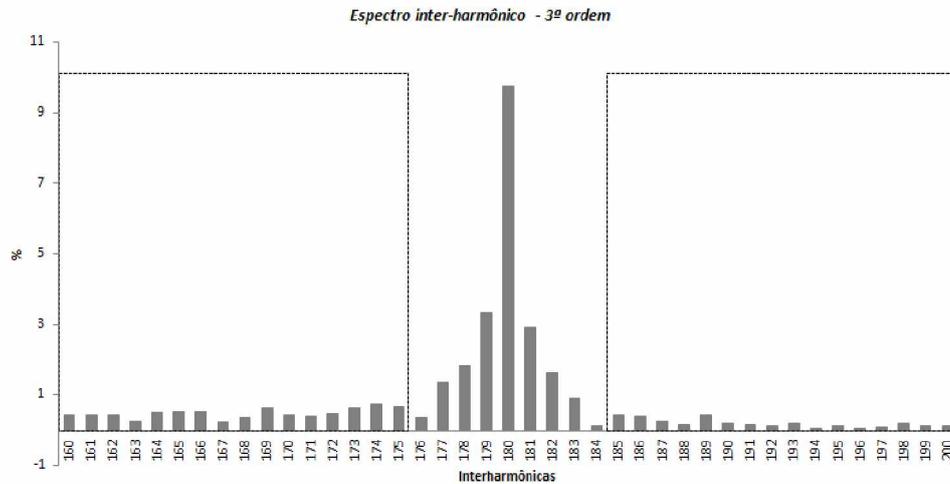


Figura 4.42 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica (Concreto).

A Figura 4.43 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 4ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de concreto, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

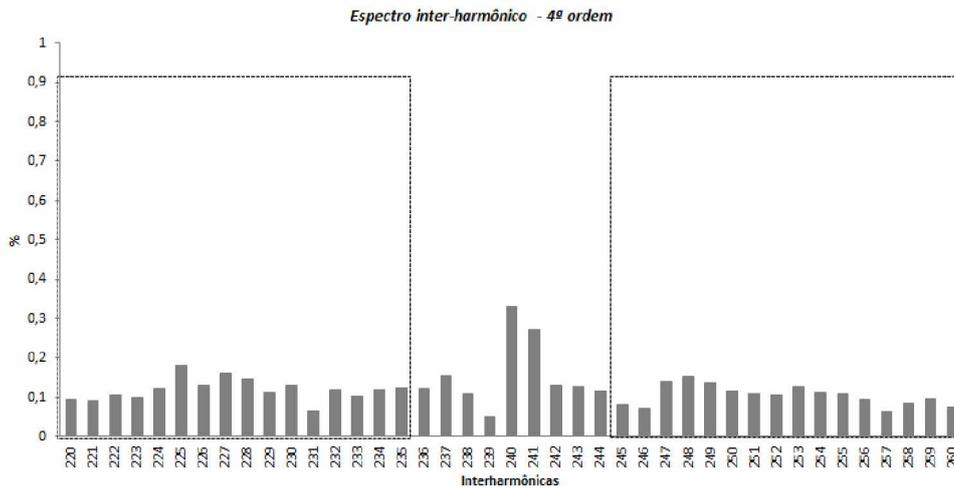


Figura 4.43 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica (Concreto).

A Figura 4.44 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 5ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de concreto, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

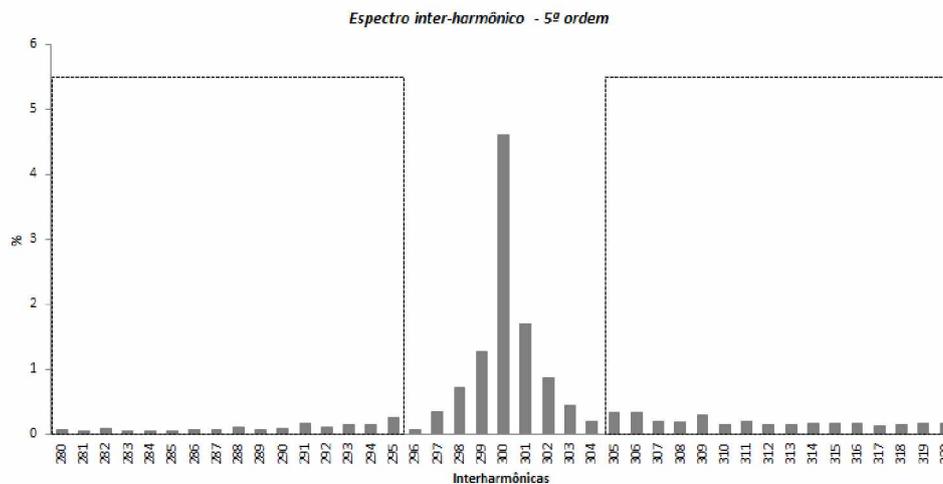


Figura 4.44 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica (Concreto).

➤ **Espectro de frequências da FAI aplicada na superfície Terra**

Na Figura 4.45 é possível verificar que as magnitudes dos conteúdos inter-harmônicos da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de terra, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada, se encontram entre 1 e 0,4 por cento da magnitude da corrente na frequência fundamental.

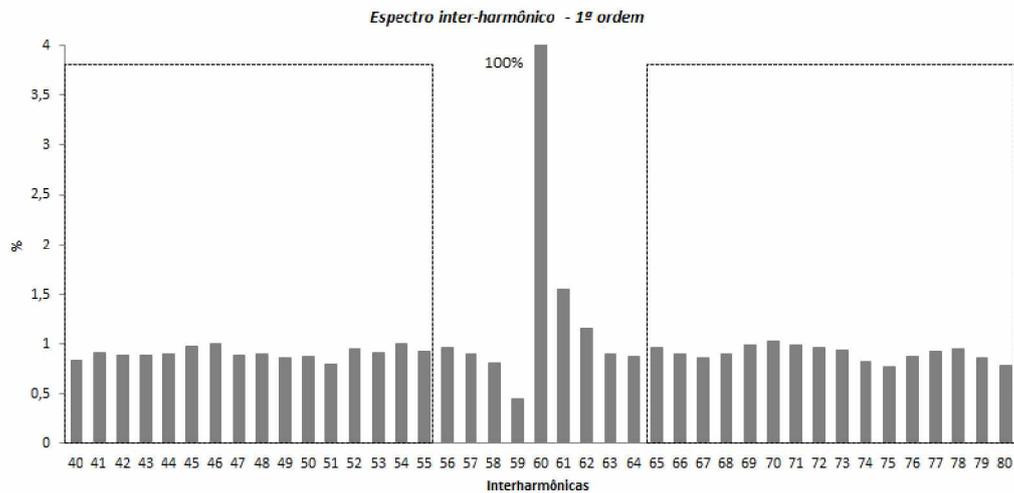


Figura 4.45 – Espectro de frequências nas adjacências da frequência fundamental (Terra).

A Figura 4.46 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 2ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de terra, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

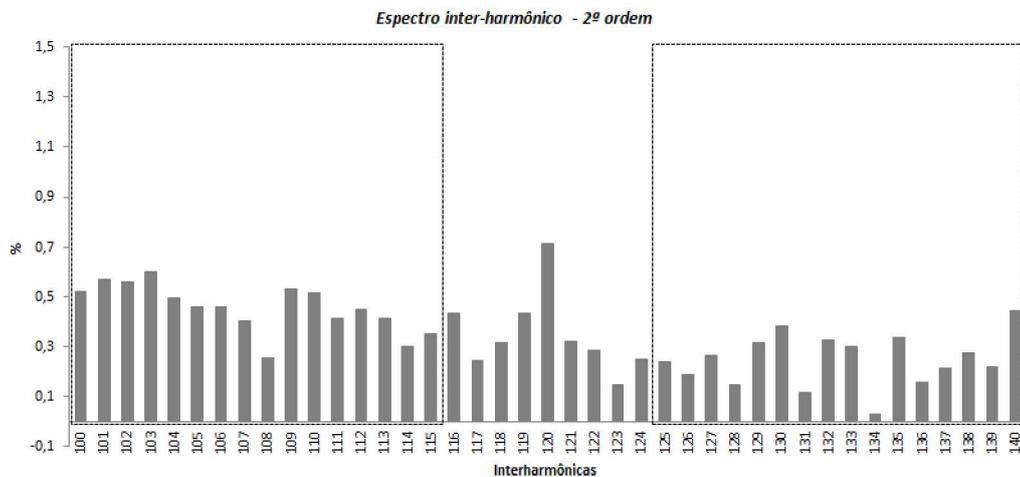


Figura 4.46 – Espectro de frequências nas adjacências da 2ª ordem harmônica (Terra).

A Figura 4.47 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 3ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de terra, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

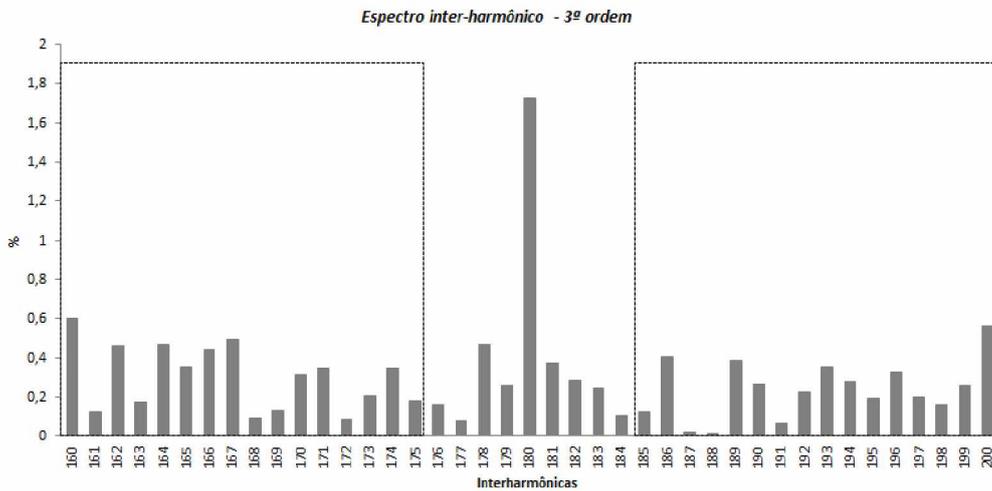


Figura 4.47 – Espectro de frequências nas adjacências da 3ª ordem harmônica (Terra).

A Figura 4.48 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 4ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de terra, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

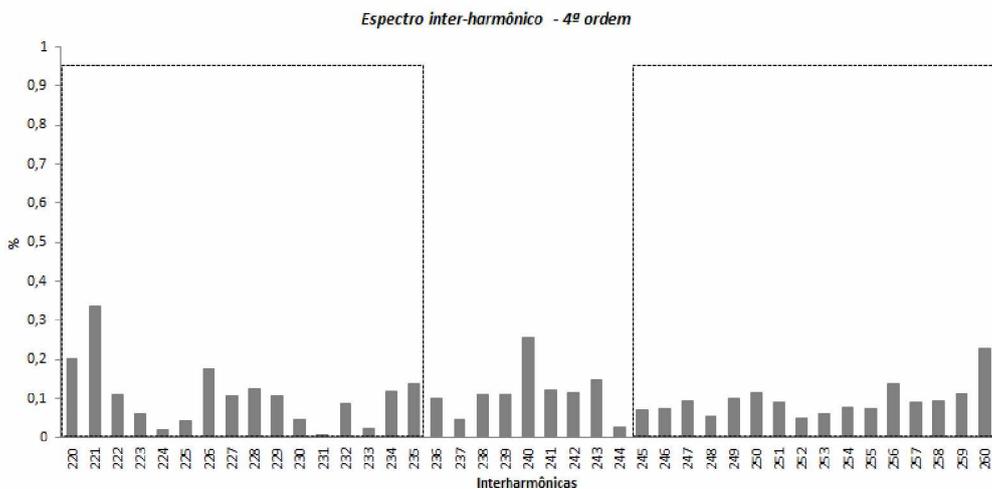


Figura 4.48 – Espectro de frequências nas adjacências da 4ª ordem harmônica (Terra).

A Figura 4.49 apresenta as magnitudes, em percentual da fundamental, dos conteúdos inter-harmônicos de 5ª ordem da forma de onda simulada, para a FAI produzida em [40], em uma superfície de terra, dentro das faixas especificadas pela metodologia analisada.

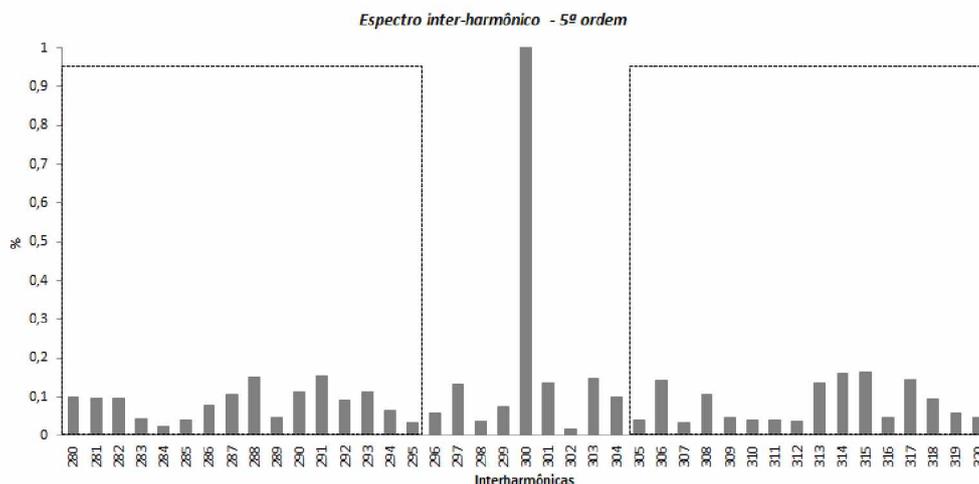


Figura 4.49 – Espectro de frequências nas adjacências da 5ª ordem harmônica (Terra).

Após observar todas as figuras que representam os espectros harmônicos e inter-harmônicos das FAIs simuladas e ensaiadas no campo de testes, é possível verificar que as inter-harmônicas adjacentes à frequência fundamental são mais expressivas, isto é, possuem maior magnitude quando comparadas com as demais frequências inter-harmônicas nas adjacências das demais harmônicas múltiplas da fundamental.

Outra observação importante é que o conteúdo inter-harmônico mais relevante acontece nos momentos iniciais da FAI, quando o arco elétrico entre o condutor e a superfície está em um estado intermitente, porém, com certa frequência de reignições, gerando os chamados “*sparks*”. À medida que o arco vai se tornando mais estável e os “*sparks*” diminuem, o conteúdo harmônico também se reduz, fazendo com que a característica inter-harmônica da FAI praticamente desapareça. Para ilustrar esse fato, é possível verificar na Figura 4.50, onde é feita a comparação de dois estágios da FAI simulada na subestação, que na 1ª janela o conteúdo inter-harmônico é considerável devido existir uma maior aleatoriedade na forma de onda da FAI, por sua vez, na 2ª janela, o conteúdo inter-harmônico é drasticamente reduzido, devido ao fato da forma de onda da FAI estar mais estabilizada.

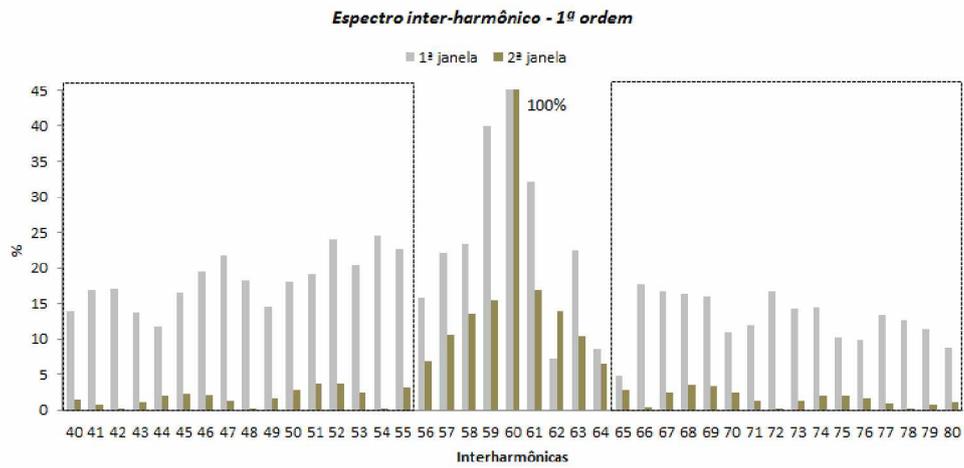


Figura 4.50 – Comparação da magnitude das frequências inter-harmônicas da FAI em momentos distintos.

Dessa forma, conclui-se que as FAIs apresentam uma característica muito peculiar quando observadas as frequências inter-harmônicas nas adjacências da frequência fundamental, durante o período de tempo em que o arco elétrico da falta está em um processo instável, devido às sucessivas reignições deste.

Tal característica é a base da nova metodologia de detecção de FAIs que será explicada no capítulo seguinte.

Capítulo V

A metodologia para detecção de FAIs por meio do comportamento inter-harmônico da corrente de falta

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será realizada uma análise do estudo desenvolvido para se chegar a um novo método de detecção de FAIs, conforme proposto em [40]. Tal método é baseado no comportamento inter-harmônico da corrente deste tipo de falta, no momento em que o condutor energizado toca a superfície e se inicia o processo de formação do arco elétrico.

Adicionalmente, será demonstrada toda a parte do processo de obtenção do sinal analógico de corrente e o tratamento deste. Além disso, será explicada a lógica inserida no protótipo do religador desenvolvido, assim como os resultados do desempenho deste equipamento na detecção das FAIs provocadas no campo de testes, construído especificamente para este estudo. Por fim, será proposto um “*upgrade*” na citada lógica, na intenção de se evitar que o equipamento acuse “falsos positivos”, devido à ocorrência de eventos corriqueiros das redes elétricas, como o chaveamento de banco de capacitores, fechamento de seccionadoras e rompimento de elos fusíveis.

5.2 Conteúdo inter-harmônico das correntes de arcos elétricos

A metodologia proposta em [40] para detecção de FAIs é baseada exclusivamente na análise do comportamento das correntes inter-harmônicas associadas aos arcos elétricos. Em termos práticos, a origem das correntes inter-harmônicas está associada às variações aleatórias do arco elétrico durante o momento de ocorrência de uma FAI. Assim, quanto maior a amplitude dessas variações, maior será o conteúdo inter-harmônico associado à corrente que flui através do arco elétrico. Com o objetivo de demonstrar o impacto da variação do comprimento do arco elétrico no espectro de frequências da corrente de uma FAI, a Figura 5.1 ilustra a característica V-I, que foi obtida por meio de um teste de campo, onde no qual, uma FAI foi provocada, sob uma tensão de 13,8 kV, em uma superfície de

areia, tendo seus sinais de corrente e tensão sido adquiridos por transformadores de corrente e tensão conectados em estrela aterrado. Na mesma figura, têm-se o espectro de frequência da corrente da FAI nas vizinhanças da frequência fundamental, em três períodos distintos, cada um com duração de 1 segundo.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.1, notou-se que, apesar do efeito do espalhamento espectral, quanto maior a variação do comprimento do arco elétrico, maior o conteúdo inter-harmônico da corrente da FAI associada. No caso de FAIs, o arco elétrico de comprimento variável sempre ocorre, seja na ruptura do condutor sob carga (quando aplicável), ou no ponto de contato do condutor com qualquer superfície ou objeto. Assim, equipamentos de proteção que puderem identificar a assinatura do conteúdo inter-harmônico de uma falta real associada a uma FAI, poderão comprovar a abordagem promissora da metodologia proposta para a detecção deste distúrbio em sistemas de distribuição de energia elétrica.

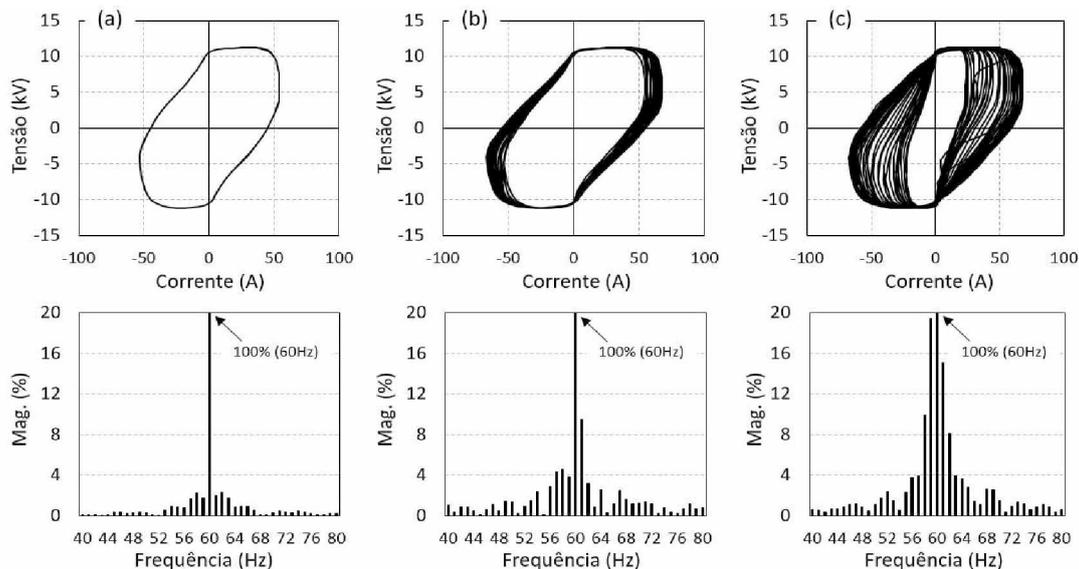


Figura 5.1 - A característica V-I e espectro de frequência da FAI (expresso em % da corrente fundamental), levando em consideração janelas de duração de 1 segundo, com: a) arco com comprimento estável, b) arco com comprimento ligeiramente variável, (c) arco com comprimento extremamente variável.

5.3 A metodologia proposta

A proposta de metodologia apresentada em [40] considera um sistema discreto de aquisição da corrente instantânea dos alimentadores de distribuição, prontamente implementado e incorporado como uma nova unidade de controle para aplicações em religadores automáticos. Para este propósito, a primeira tentativa foi a implementação da

Transformada Discreta de Fourier (TDF) para quantificar o valor eficaz do conjunto de correntes inter-harmônicas situadas em duas faixas de frequências muito específicas: 40-56 Hz e 64-80 Hz, como mostrado na Figura 5.2.

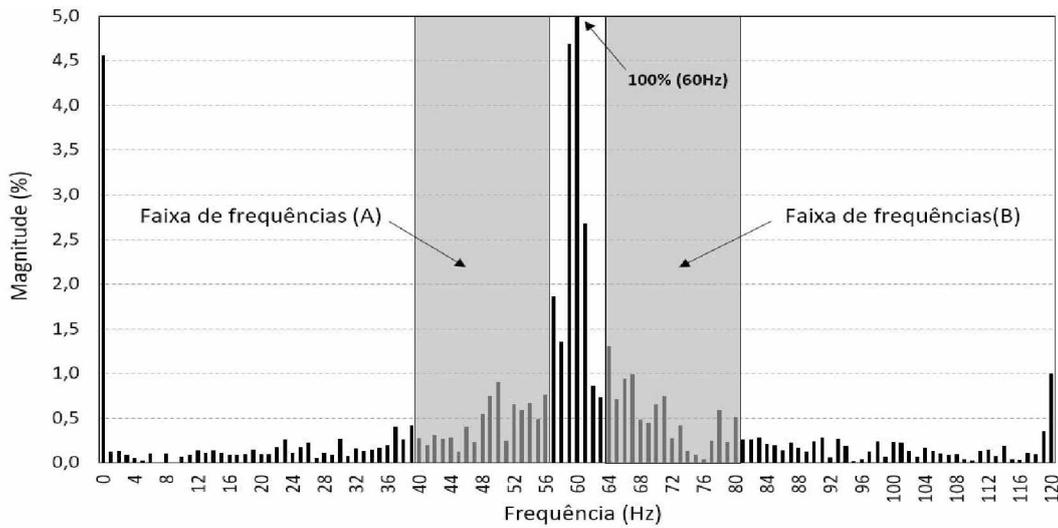


Figura 5.2 - Faixas de avaliação das frequências inter-harmônicas de corrente expressas em termos da amplitude da frequência fundamental.

A escolha das faixas de frequências baseou-se nas amplitudes das principais inter-harmônicas presentes na corrente quando da ocorrência de uma FAI. Em termos práticos, mesmo que frequências mais altas possam ser notadas, as frequências próximas à fundamental serão muito maiores em magnitude durante este tipo de fenômeno. Uma vez identificadas tais faixas de frequências para análise, o cálculo do valor eficaz para as correntes com as frequências inter-harmônicas de interesse foi realizado conforme (1) e seu resultado denominado índice inter-harmônico ou simplesmente índice *IH*.

$$IH = \sqrt{\sum_{k=40}^{56} i_{hk}^2 + \sum_{j=64}^{80} i_{hj}^2} \quad (1)$$

Onde:

IH = magnitude da raiz quadrada média das correntes inter-harmônicas nas faixas de frequência consideradas, expressa em termos da porcentagem da corrente fundamental;
i_{hk} e *i_{hj}* = amplitude das componentes inter-harmônicas de corrente nas frequências *k* e *j*.

Para o propósito do trabalho aqui desenvolvido, a TDF foi aplicada considerando-se janelas de amostras para correntes instantâneas com duração de 60 ciclos, o que resultou em uma resolução de espectro de frequência de 1,0 Hz, conforme indicado em (2).

$$\Delta f = \frac{2\pi}{pT} = \frac{2\pi f}{p} = \frac{f_1}{p} = \frac{60}{60} = 1,0 \text{ Hz} \quad (2)$$

Onde:

Δf = resolução do espectro de frequências do sinal amostrado;

T = período do sinal amostrado;

p = número de ciclos para a janela amostral (60 amostras);

f_1 = frequência fundamental do sinal (60 Hz).

Apesar da simplicidade do processo de cálculo para quantificar o índice *IH*, verificou-se que o efeito do espalhamento espectral, intrínseco à TDF, compromete significativamente a detecção das componentes inter-harmônicas. Isso acontece quando a presença de componentes inter-harmônicas distintas está associada a esse efeito e não à assinatura característica da FAI. O uso de janelas de ponderação para minimizar o efeito do espalhamento espectral também não se mostrou uma solução adequada, uma vez que essas janelas, por exemplo, a janela do tipo Hanning, que realiza um condicionamento do sinal analógico amostrado, antes de se aplicar a TDF, atenuam consideravelmente os componentes do espectro de frequências, dificultando sua correta medição.

Vários tipos de janelas de ponderação foram testados, mas nenhum deles apresentou resultados satisfatórios, notadamente quando se lidou com as componentes inter-harmônicas de baixa amplitude. Devido a esse problema, a abordagem do projeto foi redirecionada para a aplicação de técnicas de filtragem de sinais digitais. Dentre estes, os filtros de resposta ao impulso finito (FIR) foram escolhidos para quantificar a energia do sinal filtrado para as faixas de frequência indicadas na Figura 5.3. A quantidade de energia assim obtida levou a um novo índice *IH*, que quantificou o conjunto inter-harmônico de frequências que compunham o sinal da amostra atual. A Figura 5.3 mostra o processo de filtragem de sinal da corrente instantânea.

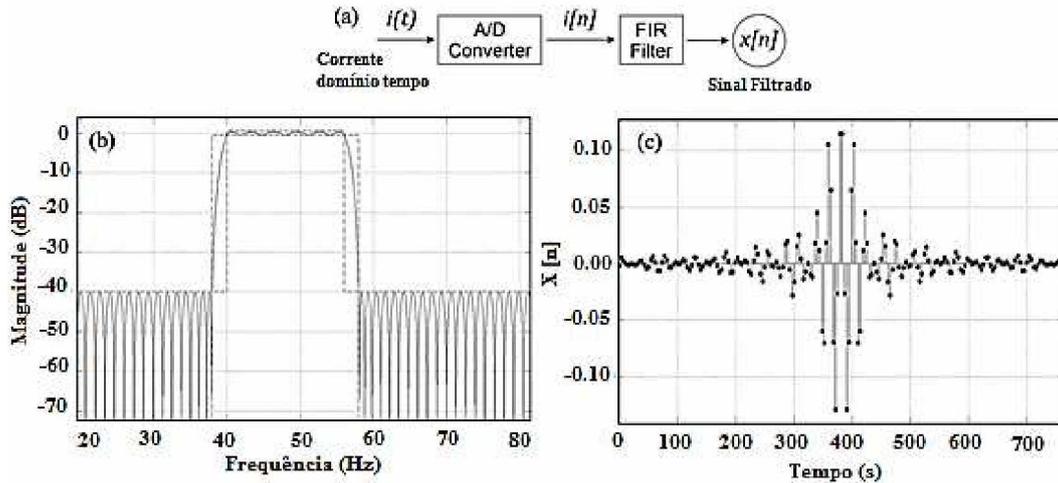


Figura 5.3 - Processo de filtragem do sinal amostrado: (a) Diagrama básico do processo de filtragem digital implementado, (b) Resposta de frequência do filtro FIR implementado para a primeira faixa de frequência, (c) Resposta da amostra unitária do filtro FIR implementado.

Com base na Figura 5.3 (a), o novo índice IH passou a ser considerado conforme indicado em (3) e (4):

$$E_{(A)} = \sum_{n=0}^{N-1} |x_A[n]|^2 \quad \text{e} \quad E_{(B)} = \sum_{n=0}^{N-1} |x_B[n]|^2 \quad (3)$$

Resultando em,

$$IH = E_{(A)} + E_{(B)} \quad (4)$$

Onde:

$E(A)$ e $E(B)$ = energia do sinal filtrado nas faixas de frequências A e B, respectivamente, expressas em amperes;

$x_A[n]$ e $x_B[n]$ = componentes de sinal filtrados;

N = tamanho da amostra;

IH = magnitude do índice inter-harmônico, expresso em amperes ou em termos da porcentagem da corrente fundamental.

A Figura 5.3 (b) ilustra a resposta em frequência do filtro FIR, implementado para a primeira faixa de frequências considerada (40 - 56 Hz) e a Figura 5.3 (c) mostra a resposta da amostra unitária do filtro FIR implementado.

Os mesmos resultados, como os ilustrados nas figuras 5.3 (b) e 5.3 (c), são obtidos quando o filtro FIR é aplicado na segunda faixa de frequências considerada (64-80 Hz).

A utilização da técnica de filtragem digital mostrou-se mais adequada para a quantificação de componentes inter-harmônicos nas faixas de frequências consideradas, quando comparada ao processo de cálculo convencional utilizando a TDF. A Figura 5.4 mostra uma comparação entre as metodologias testadas com alguns componentes inter-harmônicos introduzidos nas frequências de interesse em $t = 5,0$ s. As grandezas TDF, como também a energia do sinal filtrado, são expressas em termos da porcentagem da corrente fundamental.

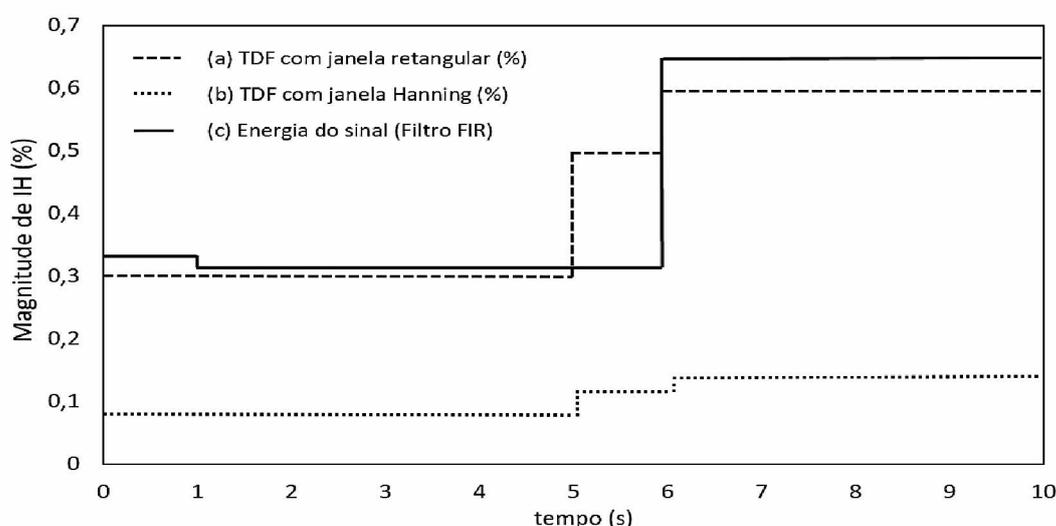


Figura 5.4 - Índice inter-harmônico (IH) considerado: (a) a aplicação da TDF com janela retangular, (b) a aplicação da TDF com janela de Hanning, (c) cálculo da energia do sinal obtido com o filtro FIR.

Explicada a forma do condicionamento do sinal e como este será trabalhado dentro da metodologia, passa-se para a explicação da forma que estes sinais condicionados serão armazenados e comparados no intuito de se detectar uma FAI. Sendo assim, como a metodologia proposta baseia-se no comportamento inter-harmônico da corrente de arco elétrico fluindo para o solo no momento de ocorrência de uma FAI, quanto maior o número de pontos de contato, maiores as amplitudes das correntes inter-harmônicas que fluem para o solo (e “vistas” pelo protótipo desenvolvido). No entanto, em termos práticos, apenas alguns pontos do arco elétrico podem ser notados durante a ocorrência de uma FAI, qualquer que seja o tipo de solo existente. Dessa forma, o maior desafio da metodologia foi medir essas baixas amplitudes de corrente com uma precisão razoável. Tal desafio foi alcançado pelo uso de transformadores de corrente (TCs) com uma relação de transformação apropriada (120:1), onde as características construtivas destes equipamentos

permitiram a obtenção da precisão requerida para o correto funcionamento do protótipo e também pela nova técnica de medição, que considera a energia de um “pacote de inter-harmônicas”, em vez das correntes individuais (em Amperes), como apresentado nas equações (3) e (4).

Finalmente, com base na técnica de utilização de filtros FIR, as equações (3) e (4) foram aplicadas em janelas de amostras fixas com 1,0 segundo de duração, como ilustrado na Figura 5.5. A cada segundo, um novo índice IH foi obtido, conforme demonstrado na Figura 5.5 (a). Enquanto a Figura 5.5 (b) ilustra a forma de se obter os valores dos índices deslizantes de IH de referência (IH_{REF}), que servirão de base para a comparação de cada índice IH calculado a cada novo segundo. Para que o sistema de identificação de FAIs esteja operante, é necessário aguardar 1 minuto, após a inicialização do sistema, para se obter o primeiro valor de IH_{REF} .

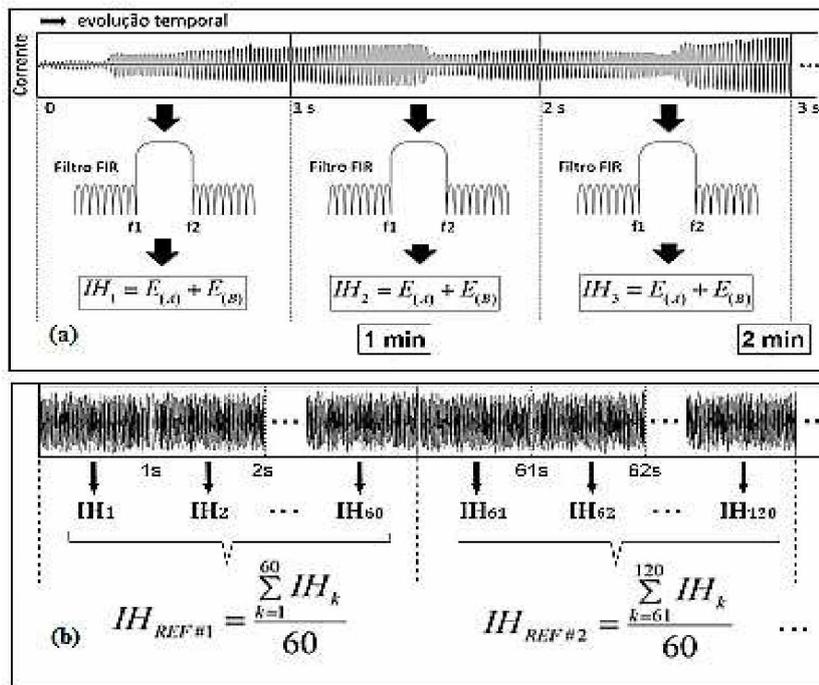


Figura 5.5 - Processo de implementação do filtro FIR: (a) Processo de cálculo do índice IH , (b) Processo de cálculo do índice deslizante IH_{REF} .

O uso de uma referência deslizante para o índice IH permite que eventuais suaves mudanças nos componentes inter-harmônicos da corrente de carga do circuito monitorado, em condições normais, minimize o risco da ocorrência de falsos positivos durante o processo de detecção de uma FAI. Tal controle pode ser parametrizado através de uma constante ® aplicada ao índice IH_{REF} , conforme (5):

$$IH_k > \beta \times IH_{REF(k-1)} \quad (5)$$

Por meio de (5) é possível verificar que um aumento ou redução de β interferirá na sensibilidade da detecção da FAI, uma vez que para se satisfazer a condição de (5), o valor de IH_k deverá ser respectivamente maior ou menor se comparado com a condição de β unitário. Por outro lado, um atraso de tempo (Δt) também pode ser considerado após o disparo do sistema de monitoramento, de forma a retardar a atuação do sistema de proteção. Todos os resultados práticos mostrados neste estudo consideraram um valor unitário para a constante β e 1,0 segundo para Δt .

Após a definição e implementação da metodologia de identificação de FAIs, baseada na quantificação das correntes inter-harmônicas, foi implementado um protótipo do dispositivo de controle e este incorporado a um religador automático. Diversos ensaios foram realizados em um campo de testes de 13,8 kV, com diferentes tipos de solo, unicamente construídos para este fim.

5.4 O protótipo desenvolvido

A Figura 5.6 apresenta a unidade de controle desenvolvida para a identificação de FAIs, que foi utilizada em conjunto com o religador automático convencional.

O equipamento mostrado na Figura 5.6 (a) e Figura 5.6 (b) foi desenvolvido usando o microcontrolador STM32F407, da família ARM Cortex-M4. Este microcontrolador possui três conversores AD de 12 bits, integrados com até 24 canais multiplex. A taxa de amostragem utilizada foi de apenas 12 amostras por ciclo, uma vez que as frequências alvo variavam quase com a frequência fundamental. A corrente de cada fase foi amostrada por um conversor AD diferente, permitindo que as três fases fossem amostradas simultaneamente. O sensor adotado foi o sensor de efeito Hall ACS712, que foi escolhido devido ao seu baixo custo e, o mais importante, por não causar desalinhamento do sinal de entrada. A Figura 5.6 (c) ilustra o diagrama de blocos do protótipo. Finalmente, devido às pequenas magnitudes das correntes inter-harmônicas em sistemas elétricos, os TCs originais do religador automático utilizado, cujas classes de proteção possuíam uma relação de 1000:1, foram substituídos por TCs com relação de medição de 120:1.

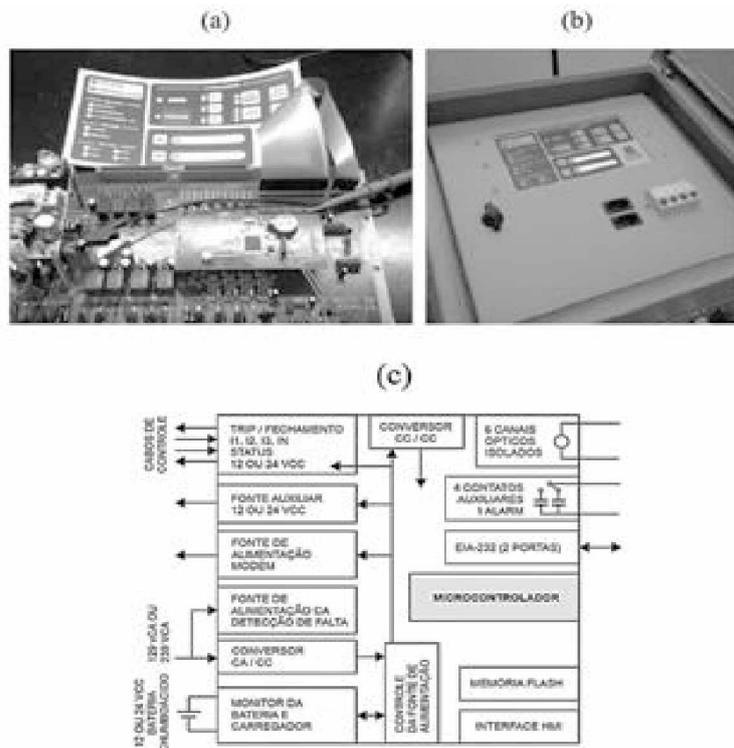


Figura 5.6 - Protótipo da unidade de controle desenvolvida: (a) Circuitos eletrônicos, (b) Frente do painel do protótipo desenvolvido, (c) Diagrama de blocos do protótipo desenvolvido.

5.5 Teste de campo considerando diferentes tipos de solos

Para validar o protótipo desenvolvido, foi construído um campo de testes em média tensão (13,8 kV), utilizando diferentes tipos de solo. A Fig. 7 mostra o diagrama unifilar do campo de testes.

Como pode ser visto na Figura 5.7, a rede a 13,8 kV cobre seis tipos de solo: areia, grama, argila, cascalho, asfalto e cimento. Além disso, dois dispositivos de medição, com sincronização GPS, foram conectados à rede, um no local dos testes de campo e outro na subestação de origem do alimentador que atende o campo de testes. Esses dois medidores são capazes de registrar as formas de onda atuais por longos períodos de tempo. A carga de aproximadamente 500 kVA refere-se a alguns edifícios administrativos pertencentes a serviços públicos.

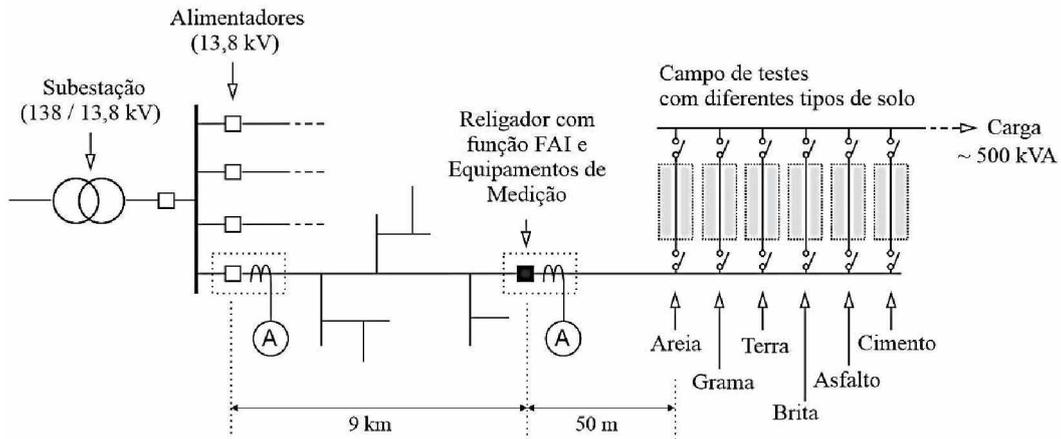


Figura 5.7 - Diagrama unifilar simplificado do sistema de distribuição e o campo de testes com diferentes tipos de solo.

É importante esclarecer que as grandezas de carga não afetam o comportamento inter-harmônico do arco elétrico fluído para o solo durante uma FAI, uma vez que, conforme [37], tal comportamento não é influenciado pelo nível de curto-circuito do local. Assim, o desempenho da metodologia proposta não é comprometido, mesmo considerando-se as pequenas magnitudes das correntes de carga durante os testes de campo.

A Figura 5.8 (a) mostra uma fotografia do local dos testes de campo, destacando os detalhes das derivações da rede para cada tipo de solo, por sua vez, a Figura 5.8 (b), mostra uma fotografia ilustrando o teste de campo em solo de cascalho, com ênfase nos arcos elétricos.

Durante os testes, duas possibilidades foram consideradas: FAI tipo I [ver figuras 5.9 (a) e 5.9 (b)] que não considera a ruptura do condutor e a interrupção da corrente de carga. Este tipo de FAI é muito comum em certas situações, por exemplo, onde há contato de uma árvore com a rede de energia. Assim, como pode ser visto na Figura 5.9 (b), a FAI começa a aumentar no momento em que o elemento de curto-circuito entra em contato com o condutor. Contudo, a FAI aqui classificada como FAI tipo II, como mostrado na Figura 5.9 (c) e Figura 5.9 (d), é o tipo que possui a maior incidência dentro do sistema de distribuição de energia elétrica. Neste tipo de FAI, um dos condutores de linha se rompe e entra em contato com o solo. Além disso, conforme mostrado nas figuras 5.9 (c) e 5.9 (d), a FAI do tipo II é caracterizada por uma sequência muito específica de eventos. Assim, no instante t_0 , um dos condutores de alimentação de média tensão se rompe fisicamente. No entanto, devido ao arco elétrico resultante, a corrente de linha será mantida até a extinção total do arco elétrico, que ocorreu no instante t_1 . Em seguida, o condutor toca o solo no instante t_2 e, a partir deste instante, surge a corrente da FAI e esta começa a aumentar. Resumindo, o

período de tempo entre os instantes t_0 e t_2 é considerado como representativo do tempo total de queda do condutor, sendo este composto pelo período de tempo ($t_0 \rightarrow t_1$) com arco elétrico, e o período ($t_1 \rightarrow t_2$) sem arco elétrico.

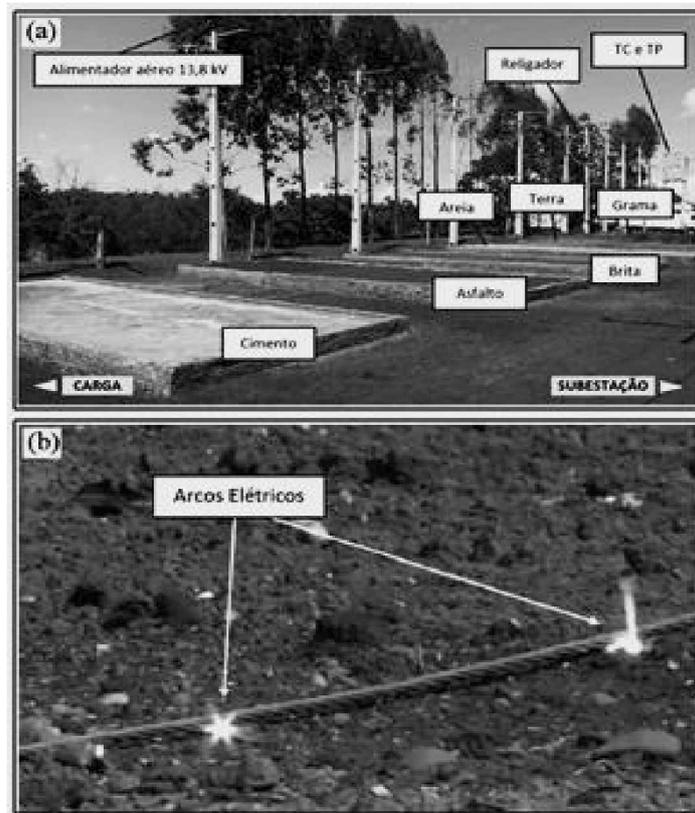


Figura 5.8 - Fotos ilustrando o campo de testes: (a) Vista geral do campo de testes, (b) Testes em solo de cascalho.

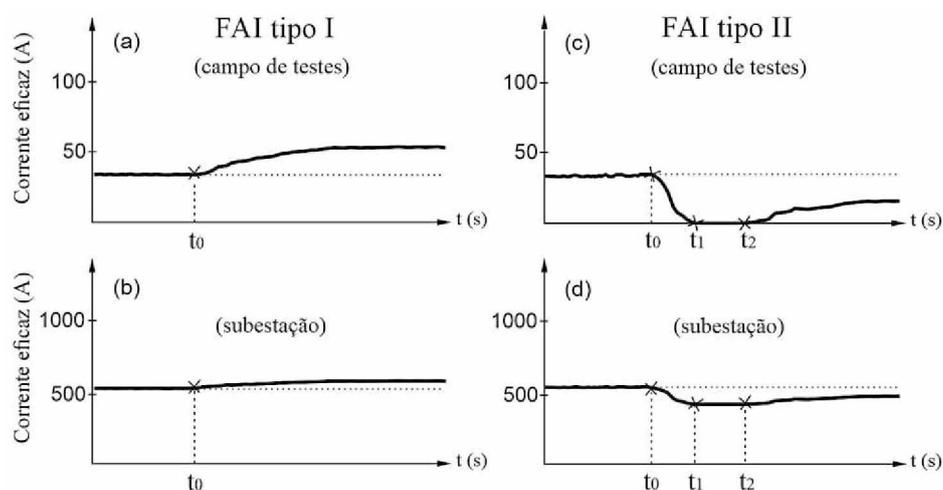


Figura 5.9 - Tipos de FAI: (a) FAI tipo I no ponto da falta, (b) FAI tipo I na subestação, (c) FAI tipo II no ponto de falta, (d) FAI tipo II na subestação.

5.6 Resultados

A Figura 5.10 é uma ilustração prática dos procedimentos para os testes desenvolvidos. Mostra a evolução da corrente eficaz e instantânea de uma FAI tipo II, em solo argiloso [ver figuras 5.10 (a) e 5.10 (b)], bem como o índice IH (expresso em % da corrente fundamental). Como pode ser visto na Figura 5.10 (c), a amplitude do índice IH começa a aumentar assim que o condutor rompido atinge o solo. Destaca-se na mesma figura que as magnitudes de IH são calculadas considerando as janelas fixas em 1,0 segundo e depois estas são comparadas com o último valor de referência disponível (IH_{REF}). Como pode ser observada, a evolução do índice IH apresenta um atraso de 1,0 segundo em relação à corrente instantânea.

Apesar da baixa magnitude do índice IH na subestação, conforme visto na Figura 5.10 (c), é importante ressaltar que a metodologia proposta foi desenvolvida para uso em um novo dispositivo de proteção, a ser utilizado ao longo do alimentador, a fim de minimizar o número de clientes afetados por uma indisponibilidade individual. Este fato evidencia que distância do sistema de proteção influencia na sensibilidade na detecção de uma FAI. Dessa forma, no intuito de se proteger toda a instalação de distribuição, devem-se levar em conta as distâncias máximas dos extremos dos circuitos a serem protegidos, em relação à localização do equipamento de proteção a ser instalado.

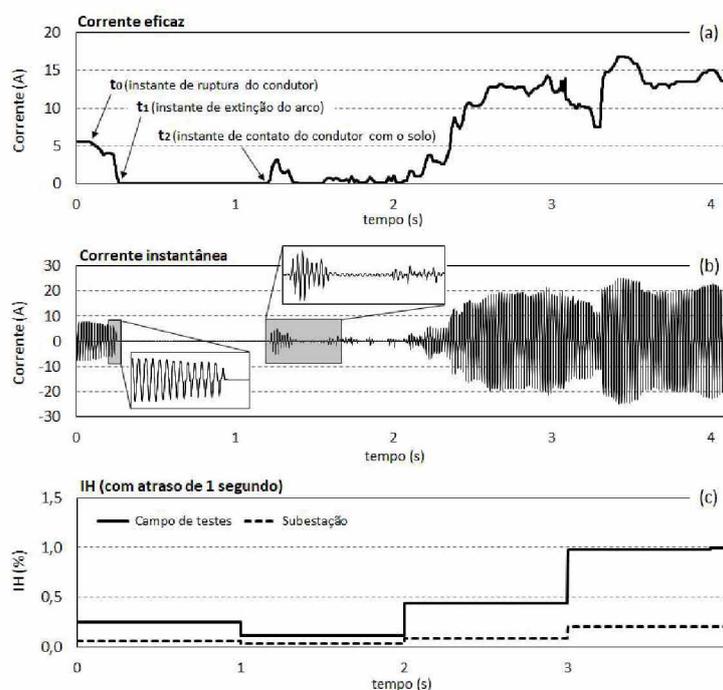


Figura 5.10 - Resultados para uma FAI tipo II em solo argiloso: (a) Corrente eficaz no teste de campo, (b) Corrente instantânea no teste de campo, (c) Índice IH no teste de campo e na subestação.

Por sua vez, a Figura 5.11 apresenta os resultados obtidos em vários testes, considerando as FAIs para diferentes tipos de solo, onde o índice *IH* é expresso em % da corrente fundamental.

Esta mesma figura mostra que o instante de tempo para a abertura do religador varia de teste para teste. No caso da FAI em solo asfáltico, por exemplo, o tempo necessário para o acionamento do religador de acordo com a evolução do *IH* foi de aproximadamente 17,0 segundos. Comportamento semelhante foi observado no caso da FAI em solo arenoso, para o qual o tempo necessário para o acionamento do religador foi de aproximadamente 15,0 segundos. Isso ocorreu devido ao fato dos solos de areia e asfalto serem bons isolantes. No presente caso, para estes dois tipos específicos de solo, pequenos arcos elétricos formados entre o condutor e o solo aumentaram a intensidade da corrente mais lentamente.

Em todos os casos estudados, o religador foi acionado com base na evolução do índice *IH*. Ressalta-se aqui que nenhum dos dispositivos de proteção convencionais, a montante do campo de testes, foram acionados durante os testes realizados, nem mesmo aqueles situados imediatamente antes do local dos testes e que para todos os ensaios realizados foram consideradas FAIs do tipo II.

Finalmente, é importante destacar que a evolução física do arco elétrico durante uma FAI (e suas correntes inter-harmônicas relacionadas) é bastante diferente das correntes geradas por outras fontes elétricas como, por exemplo, as máquinas de solda.

No caso das FAIs, a evolução dos arcos elétricos fornece um crescimento contínuo das amplitudes das correntes inter-harmônicas relacionadas, conforme observado na Figura 5.12, que compara a evolução do índice *IH* durante três situações diferentes durante os testes de campo: condição normal, operação da máquina de solda e ocorrência de uma FAI.

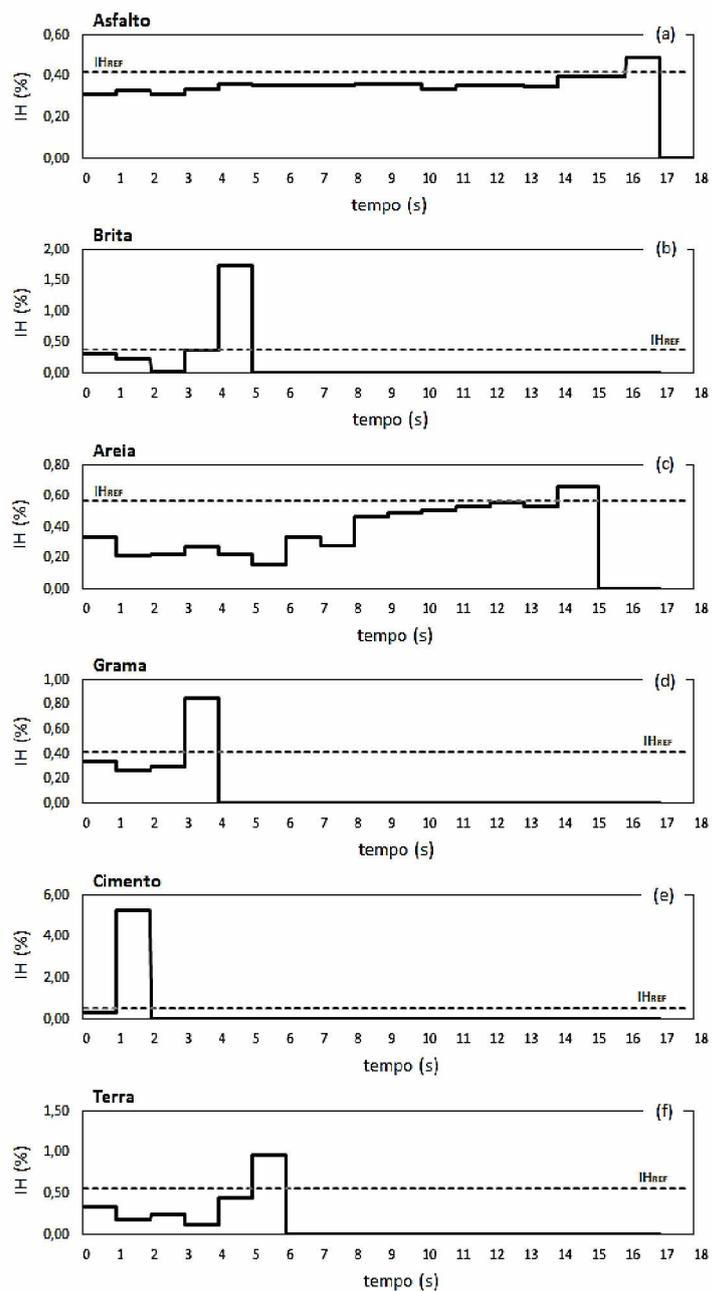


Figura 5.11 - Evolução do índice IH até a abertura do religador FAIs em seis diferentes tipos de solo ($t = 0s$ indica o tempo em que o condutor foi rompido e o I_{HREF} é o último valor de referência disponível para o índice IH).

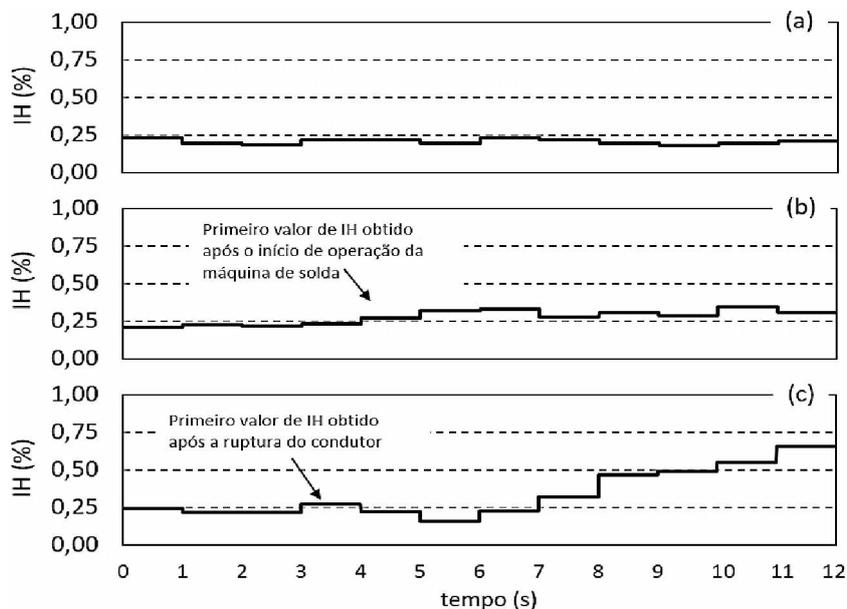


Figura 5.12 - Resultados obtidos no campo de testes para diferentes condições de operação: (a) Evolução do índice IH no teste de campo em condições normais, (b) Evolução do índice IH no teste de campo durante a operação da máquina de solda (conectada no lado de baixa tensão), (c) Evolução do índice IH no teste de campo durante uma FAI em solo arenoso.

Para finalizar este capítulo, de forma a se evitar falsas detecções de FAIs devido a eventos corriqueiros nas instalações de distribuição, mas que possuem características semelhantes às características presentes neste tipo de falta, é proposto neste trabalho a inserção de mais uma condição dentro do código que controla o acionamento da abertura do religador, quando na provável detecção de uma FAI. Tal condição se baseará na duração do evento monitorado, ou seja, para que seja dado o comando para abertura do religador, deverão ser detectados 5 índices IH sucessivos e crescentes. Dessa forma, uma vez que cada índice IH é calculado a cada segundo, o religador aguardará 5 segundos a partir da detecção da falta em potencial, para que então ele abra o circuito. Tal tempo é razoável, quando por um lado, a ocorrência de chaveamentos de banco de capacitores, rompimento de elos fusíveis e fechamento de seccionadoras não duram mais do que dois segundos e por outro lado, um condutor energizado tocando o solo por apenas cinco segundos, promove um percentual baixíssimo de risco de acidentes.

Essa nova adaptação será implementada e colocada em teste em um próximo trabalho em conjunto com a concessionária CEMIG, onde serão construídos religadores já com a unidade de controle incorporada a eles e estes serão testados em partes da rede da concessionária

Capítulo VI

Conclusões e sugestões de novos trabalhos

O presente trabalho discorreu a respeito de um problema típico em sistemas de distribuição de energia elétrica e potencialmente letal às vidas de pessoas e animais quando não detectado a tempo: as faltas de alta impedância, mais conhecidas como FAIs. Desde a década de 70, diferentes técnicas têm sido estudadas com o intuito de tornar a detecção deste tipo de evento mais eficaz. Entretanto, estima-se que, em média, apenas 80% delas são detectadas através dos dispositivos de proteção disponíveis atualmente, o que é considerado insatisfatório em vista da gravidade e letalidade de um evento desta natureza. De forma a ilustrar tal gravidade, foram apresentados dados estatísticos referentes aos acidentes ocorridos no Brasil envolvendo a ocorrência de FAIs. Tais dados demonstraram que a letalidade de acidentes desta natureza chega próximo de 50 % do total de acidentes registrados.

Para finalizar o primeiro capítulo, foram elencados os objetivos do trabalho, destacando-se a análise da aplicação de uma nova metodologia de detecção de FAI proposta em [40], por meio do monitoramento das componentes inter-harmônicas de corrente com frequências adjacentes à fundamental, uma vez que estas sofrem sensível aumento de amplitude devido ao arco elétrico presente durante o evento. Tal metodologia foi implementada por meio de um protótipo de um religador automático munido de uma inteligência baseada na metodologia proposta. Após a conclusão da construção do protótipo, este foi testado em um campo de testes construído especificamente para este estudo.

Por sua vez, no Capítulo 2 foi apresentado o estado da arte quanto às metodologias de detecção de FAIs, discorrendo, em ordem cronológica, sobre todos os métodos publicados no IEEE até o ano de 2018.

Já no Capítulo 3 foram apresentadas as características construtivas das redes brasileiras de distribuição de energia elétrica, assim como as deficiências físicas de tais redes que propiciam a ocorrência de eventos de FAI, além de demonstrar o motivo pelo qual os sistemas de proteção de redes convencionais são pouco eficientes frente à detecção de FAIs.

O Capítulo 4 teve como propósito descrever o evento FAI destacando suas principais características, procurando demonstrar a definição deste tipo de falta, assim como seus tipos, natureza e características do arco elétrico presente nesta. Ainda neste capítulo, foram apresentadas as características inter-harmônicas da corrente de um modelo de FAI, retirado da literatura, e aplicado em um sistema de distribuição de média tensão modelado no software Matlab. De forma a demonstrar que a característica a ser explorada na nova metodologia possui efeitos práticos, foi feita uma análise do comportamento das frequências inter-harmônicas, nas adjacências da frequência fundamental da corrente de FAIs obtidas em testes reais em diferentes tipos de solos.

Finalmente, no Capítulo 5 discorreu-se sobre temas como a descrição da nova metodologia, baseada no monitoramento das frequências inter-harmônicas nas adjacências da frequência fundamental de corrente, a técnica utilizada para a aquisição e condicionamento dos sinais de corrente para que estes pudessem ser processados pela inteligência embarcada no protótipo do religador automático, o layout do campo de testes construído pela concessionária CEMIG e os resultados dos testes desenvolvidos.

Ainda, com o objetivo de tornar o sistema eficaz na detecção de FAI, sem que o mesmo se torne ultra-sensível e acuse faltas inexistentes, foi implementado um método de referência para comparação entre um valor de energia inter-harmônica atualizado a cada segundo (através da utilização dos valores mais recentes de energia inter-harmônica ou do emprego de uma média móvel deslizante com maior número de amostras) e uma média móvel de referência (referente a valores de energia obtidos durante condições normais de operação). A sensibilidade do sistema é ajustável também através de uma constante β que multiplica o valor de referência, resultando no aumento da zona normal de operação permitindo-se que este possa ser ajustado baseado no tipo de solo que se apresenta no local de instalação do equipamento de detecção.

Por fim, ainda neste capítulo, foi proposto um *upgrade* a ser inserido no sistema de detecção, com a finalidade de se reduzir a indicação de falsas detecções motivadas por eventos corriqueiros na rede como o chaveamento de banco de capacitores, rompimento de elos fusíveis e aberturas de chaves seccionadoras. Tal melhoria se baseia na espera de 5 índices de energia crescentes e consecutivos para que o evento monitorado seja classificado como uma FAI e faça com que o religador se abra e interrompa a falta.

Com estas considerações colocadas, deixa-se como sugestões para trabalhos futuros:

- Promover um estudo utilizando mais religadores com a nova metodologia aplicada, entretanto, instalados em circuitos reais de consumidores da concessionária CEMIG, de forma a se verificar a eficácia do “*upgrade*” em relação distinção de eventos corriqueiros e FAIs reais;
- Realizar maiores estudos em relação à influência das características das superfícies em que o condutor energizado toca após seu rompimento, de forma a oferecer melhores condições para a realização dos ajustes da sensibilidade do equipamento do sistema de detecção de FAIs;
- Promover novas baterias de testes para se criar um banco de dados no intuito de se obter o um maior número de características do comportamento de correntes das faltas de alta impedância;
- Realização de estudos de forma a se indicar o ponto ótimo para instalação dos equipamentos de proteção, buscando a melhor sensibilidade do equipamento e a retirada do menor número de consumidores possível, quando no desligamento do circuito;
- Promover estudos na intenção de ser criar um sistema de simulação onde possam ser modelados vários tipos de FAIs, sistemas de detecção e circuitos de distribuição de forma a facilitar o aprimoramento e ajuste da técnica de detecção em religadores a serem instalados na rede de distribuição elétrica.

Para fechar esse capítulo, ressalta-se mais uma vez a importância de investimentos em estudos e instalações de equipamentos de proteção capazes na detecção de faltas de alta impedância. A princípio, muitos podem questionar se tanto investimento, ou até mesmo o tempo que um circuito ficaria desenergizado, até a correção do problema, se justificaria frente ao percentual de ocorrências destes eventos.

E para responder tal questionamento, poderia ser feita outra pergunta: quanto vale uma vida?

Esta resposta pode ser facilmente obtida após a realização de alguns cálculos levando em conta expectativa de vida dos indivíduos, custo médio de vida contemplando alimentação, estudo, moradia, despesas médicas, entretanto, tal valor é imensurável quando falamos da perda sofrida por um pai, uma mãe ou um filho. A perda de entes queridos não tem preço.

Referências Bibliográficas

- [1] LI, L, REDFERN, M. A. “*Applications of ANFIS in High Impedance Faults Detection and Classification in Distribution Networks*”, 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives. Bologna, Italy. September, 2011, pp: 612-619.
- [2] A.AZIZ, M. S, M. HASSAN, M. A, ZAHAB, E. A. “Detection of arcing faults on distribution feeders”, IEEE Transactions, June, 2011, pp: 612 - 619.
- [3] CARR, J. “Detection of High Impedance Faults on Multi-Grounded Primary Distribution Systems”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-1100, Issue 4, April, 1981, pp: 2008 - 2016.
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1981.316556>
- [4] CALHOUN, H., BISHOP, M. T, EICHLER, C. H; LEE, R. E. “Development and Testing an Electro-Mechanical Relay to Detect Fallen Distribution Conductors”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, Issue 6, June, 1982, pp: 1643 - 1650.
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1982.317214>
- [5] AUCOIN, M, RUSSEL, B. D. “*Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, Issue 6, June, 1982, pp: 1596 - 1606.
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1982.317209>
- [6] BALSER, S. J, CLEMENTS, K. A, LAWRENCE, D. J. “*A Microprocessor-Based for Detection of High Impedance Faults*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, Issue 3, July, 1986, pp: 252 - 258.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.1986.4308000>
- [7] AUCOIN, M, RUSSEL, B. D. “*Analysis of high-impedance fault generated signals using a Kalman filtering approach*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, Issue 4, november, 1990, pp: 1714 - 1724.
<https://doi.org/10.1109/61.103666>
- [8] GIRGIS, A. A, CHANG, W, MAKRAN, E. B. “*Detection of Distribution High Impedance Faults Using Burst Noise Signals Near 60 Hz*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, Issue 2, April, 1987, pp: 342 - 348.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.1987.4308114>
- [9] ATWELL, E. A, SHAFFER, A. W, JERRINGS, D. I, LINDERS, J. R. “*Performance testing of the Nordon high impedance ground fault detector on a distribution feeder*”. 34th

Annual Conference on Rural Electric Power. Orlando, FL, USA. April, 1990, pp: C6-1 - C6-7.

[10] EMANUEL, A. E, CYGANSKI, D, ORR, J. A. “*High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, Issue 2, April, 1990, pp: 676 - 686.

<https://doi.org/10.1109/61.53070>

[11] JEERINGS, D. I, LINDERS, D, ORR, J. R. “A practical protective relay for down-conductor faults”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, Issue 2, April, 1991, pp: 565 - 574.

<https://doi.org/10.1109/61.131113>

[12] KIM, C. J, RUSSEL, B. D. “A learning method for use in intelligent computer relays for high impedance faults”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, Issue 1, January, 1991, pp: 109 - 115.

<https://doi.org/10.1109/61.103728>

[13] MOMOH, J. A, CHUKU, A. U, DIAS, L. G, ZHANG, Z. Z. “*Integrated detection and protection schemes for high-impedance faults on distribution systems*”. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Chicago, IL, USA. October, 1992, pp: 1102 – 1109.

[14] SULTAN, A. F, SWIFT, G. W, FEDIRCHUK, D. J. “Detection of high impedance arcing faults using a multi-layer perceptron”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, Issue 4, October, 1992, pp. 1871 - 1877.

<https://doi.org/10.1109/61.156989>

[15] CHRISTIE, R. D, ZADEHGOL, H, HABIB, M. M. “High impedance fault detection in low voltage networks”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, Issue 4, October, 1993, pp: 1829 - 1836.

<https://doi.org/10.1109/61.248291>

[16] SHARAF, A. M, SNIDER, L. A, DEBNATH, K. “*A third harmonic sequence ANN based detection scheme for high impedance faults*”. Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, September, 1993, pp: 802-806.

[17] YU, D. C, KHAN, S. H. “An adaptive and low impedance fault detection method”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, Issue 4, October, 1994, pp: 1812 - 1821.

<https://doi.org/10.1109/61.329514>

[18] SILVA, P. R, SANTOS, A. Jr., BOAVENTURA, W. C, MIRANDA, G. C. “*Impulse response analysis of a real feeder for high impedance fault detection*”. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference. Chicago, IL, USA. April, 1994, pp: 276-283.

[19] PATTERSON, R. “*Signatures and software find high impedance faults*”. IEEE Computer Applications in Power, Vol. 8, Issue 3, July, 1995, pp: 12-15

<https://doi.org/10.1109/67.392019>

[20] BENNER, C. L, RUSSEL, B. D. “*Practical high impedance fault detection for distribution feeders*”. IEEE, 1996.

[21] BENNER, C. L, RUSSEL, B. D. “*Practical high-impedance fault detection on distribution feeders*”. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, Issue 3, May, 1997, pp: 635 - 640.

<https://doi.org/10.1109/28.585852>

[22] WAY, D. C. T, YIBIN, X. “*A novel technique for high impedance fault identification*”. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 13, Issue 3, 1998, pp. 738 - 744.

<https://doi.org/10.1109/61.686968>

[23] SHENG, Y, ROVNYAK, S. M. “*Decision tree-based methodology for high impedance fault detection*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, Issue 2, 2004, pp: 533 - 536.

<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.820418>

[24] ETEMADI, A. H, SANAYE-PASAND, M. “*High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system*”. IET Generation, Transmission, Distribution, Vol. 2, Issue 1, 2008, pp: 110 - 118.

<https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20070120>

[25] SAMANTARAY, S, DASH, P. “*High-impedance fault detection using extended kalman filter and support vector machine*”. International Transactions on Electrical Energy Systems. Vol. 20, Issue 3. January, 2009.

<https://doi.org/10.1002/etep.321>

[26] SARLAK, M, SHARTASH, S. M “*High-impedance fault detection using combination of multi-layer perceptron neural networks based on multi-resolution morphological gradient features of current waveform*”. IET Generation, Transmission, Distribution, Vol. 5, Issue 5, 2011, pp: 588 - 595.

<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0702>

[27] MILIOUDIS, A. N, ANDREOU, G. T; LABRIDIS, D. P “*Enhanced protection scheme for smart grids using power line communications techniques, part i: Detection of high impedance fault occurrence*”. IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, Issue 4, 2012, pp: 1621 - 1630.

<https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2208987>

[28] GAUTAM, S, BRHAMA, S. M “*Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology*”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, Issue 2, 2013, pp: 1226 - 1234.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2215630>

[29] ELDIN, A. H, ABDALLAH, E, MOHAMED, N “*Detection of high impedance faults in medium voltage distribution networks using discrete wavelet transform*”. IET, 2013.

<https://doi.org/10.1049/cp.2013.0608>

[30] FARIAS, P. E “*Detecção e Classificação de Transitórios em Redes de Distribuição para Identificação de Falhas de Alta Impedância. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2013*”

[31] 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 Industry Applications, Vol. 51, Issue 6, 2015, pp: 5312 - 5323.

<https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2434993>

[32] GHADERI, A, MOHAMMADPOUR, H. A, GINN, H. L, SHIN, Y. J “*High-impedance fault detection in the distribution network using time-frequency-based algorithm*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, Issue 3, 2015, pp: 1260 - 1268.

<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2361207>

[33] SANTOS, W. C, LOPES, F. V, BRITO, N. S. D, SOUZA, B. A “*High-impedance fault identification on distribution networks*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, Issue 1, 2017, pp: 23 - 32.

<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2548942>

[34] TONELLI-NETO, M. S, DECANINI, J. G. M, LOTUFO, A. D. P, MINUSSI, C. R “*Fuzzy based methodologies comparison for high-impedance fault diagnosis in radial distribution feeders*”. IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, Issue 6, 2017, pp: 1557 - 1565.

<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1409>

[35] DE PAULA, V. C, MACEDO Jr., J. R. “*Detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica através da análise do campo magnético nas adjacências dos condutores*”. XV CEEL – Universidade Federal de Uberlândia, novembro, 2017.

[36] CUI, Q, EL-ARROUDI, K, WENG, Y “*High impedance fault detection in distributed energy resource penetrated networks*”. IEEE, Transactions on Smart Grid, 2018.

[37] IEEE. “*Detection of Downed Conductors on Utility Distribution Systems*”, IEEE Tutorial Course, Course Text 90EH0310.3.PWR, 1989.

[38] FILIPPIN, C. G, NETO, R. A. P, STENZEL, J. N., FILHO, E. M., GAMBOA, L. R. A., SCARASSATI, P.C. “*Sistemas de Segurança Contra Rompimento de Cabos Condutores em Linhas de Distribuição*”, Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Salvador, 13-14 novembro, 2003. Vol.1, pp: 173-178.

[39] CEMIG, “*Pesquisa sobre Rompimento de Condutores na Região Metropolitana de Belo Horizonte*”, Relatório DM/AE-AO/006/79.

[40] MACEDO, J. R., RESENDE, J. W., BISSOCHI, C. A. “*Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems*”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, Issue 16, November, 2015, pp: 2593 - 2601.

<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0407>

[41] SOUZA, F. P. “*Identificação de faltas de alta impedância por análise de características ciclo estacionárias*”, UFRN, Dissertação de Mestrado, Dezembro, 2017.