

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Eduardo Davila Kilian

**Uma Nova Proposta Para Detecção de Falhas de Alta Impedância Usando
Características no Domínio do Tempo e da Frequência**

Alegrete

2022

Eduardo Davila Kilian

Uma Nova Proposta Para Detecção de Falhas de Alta Impedância Usando Características no Domínio do Tempo e da Frequência

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos.

Alegrete

2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

K48n Kilian, Eduardo Davila

Uma nova proposta para detecção de faltas de alta impedância usando características no domínio do tempo e da frequência / Eduardo Davila Kilian.

79 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2022.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Falta de alta impedância. 2. Proteção de sistemas elétricos de potência. 3. Sistema de distribuição. 4. Arco elétrico. 5. Processamento de sinais. I. Título.

EDUARDO DAVILA KILIAN

UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA USANDO CARACTERÍSTICAS NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 28 de julho de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva

UNIPAMPA

Eng.^a Luana Barcelos Severo

UNIPAMPA

Assinado eletronicamente por **CHRYSYTIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/08/2022, às 08:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as



normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/08/2022, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUANA BARCELOS SEVERO, Usuário Externo**, em 17/08/2022, às 17:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0877846** e o código CRC **5D8912F9**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550

Telefone: (55) 3422-8400

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter sempre estado comigo em todos os momentos, por ter me guiado e por ter me dado o dom da vida.

Aos meus pais, Leomar e Jussara, os quais sempre me apoiaram e que, através de seus esforços, permitiram que eu chegasse até aqui. Essa conquista não é apenas minha, mas deles também.

Aos meus amigos, Abner Arthur, Cláudio e Fabiano, com os quais passei por muitos momentos desafiadores, mas, também, por momentos de profunda alegria. Agradeço a vocês por estarem ao meu lado e serem não só grandes amigos, mas também irmãos.

Ao meu orientador Eduardo Machado dos Santos, o qual contribuiu imensuravelmente para a minha formação profissional e acadêmica, além de ter um papel fundamental na construção da pessoa que eu sou hoje.

E ao Professor Chrystian e demais colegas do grupo de pesquisa, Fábio, Felipe e Luana, com os quais compartilhei muitos momentos felizes e de aprendizado. Sou grato pela companhia de vocês.

“E aqueles que foram vistos dançando foram julgados insanos por aqueles que não podiam escutar a música”

Friedrich Nietzsche.

RESUMO

Faltas de alta impedância (FAIs) apresentam grande risco às pessoas e animais que estiverem nas proximidades de sua ocorrência, além de serem capazes de causar grandes incêndios, resultando tanto em danos materiais como ambientais. Tudo isso se deve ao fato de esse tipo de falta não ser detectado pelos dispositivos convencionais de proteção, permitindo assim que esse problema persista até que alguém denuncie sua ocorrência, o que nem sempre pode acontecer a tempo de evitar grandes perdas. Esse trabalho busca, através de uma nova metodologia, apresentar uma solução para esse tipo de problema. Isso é feito a partir do uso de um método para detectar transitórios, juntamente com um método responsável por classificar se o evento detectado é de fato uma falta de alta impedância ou não. Para isso, após detectado o transitório, o método usa características tanto no domínio do tempo quanto no da frequência para distinguir uma FAI dos demais eventos comuns ao sistema elétrico de distribuição. No caso do domínio do tempo, o método busca pelas etapas de *buildup* e *shoulder* e, uma vez que essas etapas são detectadas, o método analisa o comportamento da magnitude da terceira harmônica, a qual resulta das distorções provenientes do arco elétrico presente na FAI. Para que fosse possível validar a efetividade da técnica, foi montado um sistema teste em ATPdraw[®], no qual, além dos transitórios que normalmente ocorrem nos sistemas de distribuição, também foram simulados três modelos diferentes de arco elétrico, os quais foram utilizados para a simulação das FAIs. Para esse sistema, a metodologia apresentou resultados promissores, tendo atuado corretamente para todos os casos analisados.

Palavras-chave: Falta de Alta Impedância, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Sistema de Distribuição, Arco Elétrico, Processamento de sinais.

ABSTRACT

High impedance faults (HIFs) present a great risk to people and animals that are in the vicinity of its occurrence. This occurs due to the fact that this type of fault is not detected by conventional protection devices, thus allowing this problem to persist until someone reports its occurrence, which cannot always happen in time to avoid major losses. This work aims, through a new methodology, to present a solution to this type of problem, using a method to detect transients together with a method responsible for classifying if the detected event is in fact a high impedance fault or not. After detecting the transient, the method uses characteristics both in time and frequency domains to distinguish a HIF among another events common to the electrical distribution system. In case of the time domain, the method searches for the buildup and shoulder stages and, once these characteristics are detected, the method then analyzes the behavior of the third harmonic magnitude, which results from the distortions caused by the electric arc present in the HIF. In order to validate the effectiveness of the technique, it was assembled a test system in ATPdraw[®], in which, in addition to the transients that normally occur in the distribution systems, three different electric arc models were also implemented and used to simulate HIFs. For this system, the methodology presented promising results acting correctly for all analyzed cases.

Key-words: High Impedance Fault, Power Systems Protection, Distribution System, Electric Arcing, Signal processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Influência das tensões no comportamento da corrente.	24
Figura 2 – Etapas do desenvolvimento do arco no solo.	26
Figura 3 – Assimetria, intermitência, buildup e shoulder.	27
Figura 4 – Não linearidade da relação v-i de uma FAI.	27
Figura 5 – Modelo de Arco Emanuel.	28
Figura 6 – Comportamento da segunda e terceira harmônica em relação a (ΔV) e $\tan \theta$	28
Figura 7 – Modelo de arco usando duas resistências variantes no tempo.	29
Figura 8 – Curva característica tensão-corrente para uma FAI em regime permanente.	30
Figura 9 – Curva característica tensão-corrente linearizada.	30
Figura 10 – Resistências variantes no tempo nos instantes de máxima tensão e Corrente	31
Figura 11 – Etapas consideradas para a FAI.	32
Figura 12 – Ocorrência de vários arcos em uma superfície de cimento.	33
Figura 13 – Modelo Emanuel em Paralelo.	33
Figura 14 – Plano <i>del x i</i> durante o regime permanente.	37
Figura 15 – Plano <i>del x i</i> durante o transitório.	38
Figura 16 – Atuação do detector de transitórios. (a) Sinal de <i>dist(k)</i> . (b) Estado lógico do detector de transitórios.	39
Figura 17 – Detecção de pico usando uma janela com 3 elementos.	40
Figura 18 – Detecção de pico usando uma janela de $n/2+1$ elementos.	41
Figura 19 – Método classificando picos do sinal como sendo pertencentes as etapas de <i>buildup</i> ou de <i>shoulder</i>	42
Figura 20 – (a) Sinal de corrente de uma falta com arco elétrico. (b) Comportamento da terceira harmônica do sinal de corrente.	42
Figura 21 – Sistema teste utilizado.	45
Figura 22 – Transformador 300 kVA.	47
Figura 23 – Parâmetros de cada transformador monofásico.	47
Figura 24 – Parâmetros de cada carga do transformador monofásico.	48
Figura 25 – Esquemas construídos para a simulação dos curtos-circuitos.	48
Figura 26 – Código para a escolha da fase onde ocorrerá a falta.	49
Figura 27 – Modelo de FAI 1.	50
Figura 28 – Código para o controle de queda do condutor.	51
Figura 29 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 1 sem considerar o rompimento do condutor.	52
Figura 30 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 1 considerando o rompimento.	52

Figura 31 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 1 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor.	52
Figura 32 – Modelo de FAI 2.	53
Figura 33 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 2 sem considerar o rompimento.	53
Figura 34 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 2 considerando o rompimento.	54
Figura 35 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 2 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor.	54
Figura 36 – Modelo de FAI 3.	55
Figura 37 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 3 sem considerar o rompimento.	55
Figura 38 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 3 considerando o rompimento.	56
Figura 39 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 3 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor.	56
Figura 40 – FAI 1 sem considerar o rompimento: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	58
Figura 41 – FAI 1 sem considerar o rompimento do condutor: Detecção da FAI. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	58
Figura 42 – FAI 1 considerando apenas o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	59
Figura 43 – FAI 1 considerando apenas o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	60
Figura 44 – FAI 1 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	60
Figura 45 – FAI 1 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	61
Figura 46 – FAI 2 sem considerar o rompimento do condutor: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	61

Figura 47 – FAI 2 sem considerar o rompimento do condutor: Detecção da FAI. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	62
Figura 48 – FAI 2 considerando o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	62
Figura 49 – FAI 2 considerando o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	63
Figura 50 – FAI 2 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	63
Figura 51 – FAI 2 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	64
Figura 52 – FAI 3 sem considerar o rompimento do condutor: detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	65
Figura 53 – FAI 3 sem considerar o rompimento do condutor: Detecção da FAI. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	65
Figura 54 – FAI 3 considerando o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	66
Figura 55 – FAI 3 considerando o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	66
Figura 56 – FAI 3 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	67
Figura 57 – FAI 3 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	67
Figura 58 – Método de detecção de transitórios: Energização de transformadores. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	68

Figura 59 – Método para a detecção de FAIs: Energização de transformadores. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica, (c) Detecção da FAI.	68
Figura 60 – Método para a detecção de transitórios: Chaveamento de banco de capacitores. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector. . .	69
Figura 61 – Método para a detecção de FAIs: Chaveamento de banco de capacitores. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	69
Figura 62 – Método para a detecção de transitórios: Curto-circuito monofásico. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.	70
Figura 63 – Método para a detecção de FAIs: Curto-circuito monofásico. (a) Sinal de corrente, <i>buildup</i> (amarelo) e <i>shoulder</i> (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geometria do Alimentador de Distribuição	46
Tabela 2 – Características do condutor 3/0 AWG.	46
Tabela 3 – Tabela com a consideração de falta relativa a cada valor de entrada. . .	49
Tabela 4 – Geometria do Alimentador de Distribuição.	54
Tabela 5 – Valores de tempos médios de fechamento usados para as simulações. . .	55
Tabela 6 – Valores de resistência e reatância para cada porcentagem de desconexão de carga.	57
Tabela 7 – Resultados para as FAIs.	71
Tabela 8 – Resultados para os demais eventos do sistema.	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Considerações Gerais	14
1.2	Motivação	14
1.3	Objetivos	15
1.4	Revisão Bibliográfica	15
1.5	Estrutura do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Considerações Gerais	18
2.2	Curto-Circuito em Sistemas de Distribuição	18
2.2.1	Definição de falta elétrica	18
2.2.2	Curto-Circuito	18
2.3	Arco Elétrico	19
2.3.1	Definição de Arco Elétrico	19
2.3.2	A História do Arco Elétrico no Contexto de Proteção	19
2.3.3	O modelo de arco elétrico Cassie-Mayr	21
2.3.4	Modelos de arco elétrico usando o conceito de <i>Restrike Voltage</i>	23
2.4	Falta de Alta Impedância	25
2.4.1	Influência do Arco Elétrico da FAI no Solo	25
2.4.2	Modelos de Falta de Alta Impedância	27
2.4.2.1	Modelo Emanuel	27
2.4.2.2	Resistências em Série e Variantes no Tempo	29
2.4.2.3	Modelo Sedighi	32
2.4.2.4	Modelo de FAI derivado dos modelos de arco Cassie-Mayr	33
2.5	Considerações Finais	35
3	METODOLOGIA	36
3.1	Considerações Gerais	36
3.2	Detecção do Transitório	36
3.3	Detecção da FAI	39
3.4	Considerações Finais	44
4	SISTEMA TESTE E SIMULAÇÕES	45
4.1	Considerações Gerais	45
4.2	Sistema Teste	45

4.3	Modelos Computacionais de Arcos Elétricos Utilizados para a Simulação da FAI	48
4.3.1	Modelo de NAM (FAI 1)	49
4.3.2	Modelo de Torres (FAI 2)	51
4.3.3	Modelo de Sedighi (FAI 3)	51
4.4	Considerações Finais	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1	Considerações Gerais	57
5.2	Resultados da metodologia para a FAI 1	57
5.3	Resultados da metodologia para a FAI 2	59
5.4	Resultados da metodologia para a FAI 3	64
5.5	Aplicação da metodologia para outras ocorrências do sistema	65
5.6	Considerações Finais	69
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
6.1	Considerações Finais	72
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	72
	ANEXO A – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA	74
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Uma falta de alta impedância (FAI) ocorre quando um condutor energizado da rede elétrica entra em contato com alguma superfície de alta resistência. Esse contato gera uma corrente resultante de valores muito baixos, o que torna difícil diferenciá-la de uma entrada de carga ou qualquer outro evento cotidiano do sistema, fazendo que a mesma passe despercebida pelos dispositivos de proteção (NAKAGOMI, 2006).

Além disso, em grande parte das ocorrências da FAI, existe a presença do arco elétrico, que é responsável por gerar distorções harmônicas no sinal de corrente e as características notáveis no domínio do tempo, como, por exemplo, o crescimento gradual da corrente nos primeiros instantes de falta. Dessa forma, o arco elétrico é um importante objeto de estudo, uma vez que sua presença e, principalmente, a forma singular como ele se comporta, dão indicativos relevantes para a detecção da FAI (EMANUEL *et al.*, 1990).

Embora normalmente os casos mais estudados de falta de alta impedância envolvam o rompimento do condutor e o seu contato com o solo ou qualquer outro tipo de superfície, não necessariamente precisa haver o rompimento de uma das fases para uma falta ser considerada de alta impedância. Por exemplo, pode ocorrer o contato entre o condutor e uma árvore, levando a uma fuga de corrente e a um eventual incêndio (Sedighi, 2014). Nesse sentido, vários estudos foram desenvolvidos de modo a modelar e detectar a ocorrência dessas faltas, buscando, assim, evitar eventuais tragédias, além de danos ambientais e materiais.

1.2 Motivação

O estudo das faltas de alta impedância e sua detecção se justificam pelo alto risco que esse tipo de problema pode apresentar em relação a integridade física de pessoas e animais e o seu potencial de causar danos materiais, o que resulta em altos custos para as pessoas atingidas e para as concessionárias de energia responsáveis.

Além disso, muito de sua urgência se encontra no fato de a FAI não ser facilmente identificada, o que leva as distribuidoras a saber de sua ocorrência após denúncias feitas por terceiros. Também muitos dos métodos existentes para a sua detecção são significativamente caros, o que impossibilita a sua aplicação em uma escala mais global, sem contar que estes nem sempre garantem uma boa taxa de acertos.

1.3 Objetivos

O objetivo desse trabalho é desenvolver uma metodologia para a detecção de FAIs em sistemas de distribuição. Para isso, essa metodologia foi elaborada usando o ambiente MATLAB[®]. Os objetivos específicos são:

- Estudar as diferentes características de uma falta de alta impedância e os métodos utilizados para a sua modelagem;
- Desenvolver um sistema teste modelando um alimentador de distribuição para a simulação dos casos em ATPDraw[®];
- Implementar modelos de arco elétrico, de modo a simular FAIs no sistema teste e extrair os sinais de corrente resultantes;
- Simular, além de FAIs, eventos de curto-circuito, entrada e saída de carga, entrada de banco de capacitores e energização de transformadores, extraindo os sinais de corrente resultantes; e
- Desenvolver um método que seja capaz de detectar a ocorrência de uma FAI e diferenciá-las dos demais eventos simulados.

1.4 Revisão Bibliográfica

Ao longo dos anos, vários métodos foram sendo desenvolvidos na tentativa de detectar a ocorrência de FAIs. Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2016), separam a detecção de FAIs em três passos: medição, domínio onde ocorre a análise e classificador. Desse modo, os métodos foram categorizados de acordo com a forma que eles realizam cada uma dessas etapas.

A ocorrência de uma falta de alta impedância pode causar mudanças, tanto permanentes, como temporárias em diferentes parâmetros do sistema elétrico. Nesse sentido, a escolha de qual parâmetro deve ser medido (seja ele corrente, tensão, corrente-tensão ou intensidade de campo magnético) é essencial para o desenvolvimento do método. Além disso, a escolha do domínio também é uma tarefa importante, uma vez que diferentes domínios revelam distintas características da FAI. Assim, informações a respeito da falta, que anteriormente não eram tão nítidas ou que dificilmente poderiam ser mensuradas em um domínio, passam a ser perceptíveis e capazes de serem quantizadas em outro. Já, a etapa do classificador se refere à forma como serão definidos os limites entre o que é um sistema em uma operação saudável, ou, diante de qualquer outro tipo de evento, de um sistema onde está ocorrendo uma FAI.

Tendo em vista essas diferentes formas de categorizar os métodos de detecção de FAI, pode-se então analisar as soluções desenvolvidas ao longo das décadas e suas diferentes abordagens em relação a esse problema. Por exemplo, em Russel, Mehta e Chinchali (1988), o método de detecção consiste no cálculo da energia das componentes de 180 Hz e de 210 Hz, as quais foram escolhidas devido a sua forte variação durante faltas com arco elétrico. Além disso, como os valores de carga do sistema sempre estão mudando devido a entrada e a saída das mesmas, são dois valores limítrofes, sendo um dinâmico e um estático, de modo que o algoritmo pudesse se ajustar aos diferentes valores de carga a partir de uma base contínua. Ainda, o algoritmo utiliza de níveis hierárquicos para a realização da detecção, iniciando pela identificação de um distúrbio no sistema e, assim, voltando sua atenção para a identificação se distúrbio é ou não um evento e, se sim, passa então analisar se esse evento pode ser classificado como uma falta ou como uma ocorrência normal do sistema.

Em Sultan, Swift e Fedirchuk (1994), um método para detecção de FAI onde ocorre o rompimento do cabo é apresentado. Nesse método, é utilizado tanto o comportamento aleatório da FAI, quanto sua assimetria para realizar a detecção. Para isso, os picos positivos e negativos de um ciclo são comparados com os picos do ciclo seguinte, de modo a verificar se existe variação entre eles, enquanto usa o pico negativo e positivo para calcular a assimetria do sinal, comparando os resultados obtidos com um valor limítrofe.

Uma vez que a corrente e a tensão variam com um certo grau de caos durante a ocorrência de uma FAI, Mamishev, Russel e Benner (1995) apresentaram um método baseado em geometria fractal para analisar as propriedades caóticas presentes nas faltas de alta impedância, para então detectá-las.

Outro método é proposto em Lien *et al.* (1999), o qual monitora as variâncias de energia da segunda, quarta e sexta harmônicas da corrente de sequência zero, requerendo um aumento nos níveis de aleatoriedade nas mesmas para realizar a detecção. Esse método apresenta um valor limítrofe adaptável, o qual é calculado a partir de ferramentas estatísticas e funciona, tanto para arcos elétricos permanentes, quanto intermitentes.

Sheng e Rovnyak (2004) apresentaram uma proposta baseada em Árvore de Decisão. Nesse método, é usada a magnitude da corrente fundamental, sua segunda, terceira e quinta harmônicas, além da fase da terceira harmônica, para o treinamento de uma árvore de decisão, a qual, a partir dos padrões apresentados em cada um desses valores de entrada, realiza a detecção da FAI.

Também, foram desenvolvidos métodos que se utilizavam da transformada *wavelet* para realizar a detecção. Um exemplo disso, está apresentado no trabalho de Snider e Sutanto (2005), onde é usada a transformada *wavelet*, juntamente com um método de reconhecimento de padrões conhecido como NNR (do inglês, *Nearest Neighborhood Rule*) para realizar a detecção da falta de alta impedância.

Já em Gautam e Brahma (2013), um método que usa morfologia matemática como um módulo integrado ao relé de sobrecorrente é apresentado. Esse método aplica a operação CODO (do inglês, *Closing Opening Difference Operation*) no sinal de tensão do sistema, de modo a evidenciar possíveis distúrbios causados pela FAI.

Por fim, Thomas, Bhaskar e Prakash (2016) usam as componentes de sequência negativa e positiva do sinal de tensão, de modo a monitorar qualquer distúrbio que possa ser causado por uma FAI no sistema e, assim, realizar a sua detecção.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma metodologia fundamentada nas características tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência, a qual foi capaz de atuar corretamente para todos os casos analisados.

1.5 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica do trabalho, contendo tópicos como a definição da FAI, os modelos de arco elétrico descritos na literatura, entre outros conceitos essenciais para a elaboração desse trabalho.

No Capítulo 3, é apresentada a metodologia desenvolvida para a detecção das FAIs, a qual é subdividida em uma etapa de detecção do transitório e uma de classificação do evento, sendo ambas descritas detalhadamente.

No Capítulo 4, é apresentado o sistema teste, com base no qual foram extraídos os sinais de corrente que compuseram o banco de dados analisado.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia em diferentes casos simulados, além da discussão acerca desses resultados.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Gerais

Nesse Capítulo, é apresentada a fundamentação teórica acerca das faltas de alta impedância e os temas que servem como base para o seu entendimento. Começando pela definição do que são faltas, grupo do qual as FAIs fazem parte, mas que também engloba uma série de outros eventos transitórios como, por exemplo, os mais diferentes tipos de curtos-circuitos. Dessa forma, tendo o conhecimento a respeito desses outros tipos de eventos, é possível diferenciá-los das FAIs.

Na sequência, o tema dos arcos elétricos é apresentado, tanto a sua história no contexto da proteção, quanto o desenvolvimento de sua modelagem ao longo do tempo são abordados. O estudo acerca dos arcos elétricos é importante, uma vez que a sua presença nas faltas de alta impedância resulta em muitas das características que irão distinguir a FAI de outras ocorrências do sistema elétrico de potência.

Por fim, é realizada uma discussão sobre as faltas de alta impedância, discorrendo a respeito de sua definição, características e modelagem. Onde, no caso da modelagem, é realizada uma discussão mais aprofundada a respeito de cada um dos modelos de arco para FAI apresentados.

2.2 Curto-Circuito em Sistemas de Distribuição

2.2.1 Definição de falta elétrica

A falta elétrica é uma condição anormal de operação do sistema, de modo a prejudicar o seu correto funcionamento. Sua causa está associada a problemas em equipamentos, como máquinas giratórias e transformadores, condições ambientais ou erro humano como, por exemplo, problemas de projeto, manutenção, vandalismo ou qualquer outro tipo de interferência humana. Pode-se definir dois tipos de faltas que comumente aparecem no sistema: o curto-circuito, o qual é o contato entre superfícies com potenciais elétricos distintos, e o circuito aberto, o que nada mais é do que interrupção de fluxo de corrente (SATO, 2015). Para os fins desse trabalho, será dado enfoque apenas para o primeiro tipo.

2.2.2 Curto-Circuito

Segundo Sato (2015), o curto-circuito é uma perturbação que ocorre na rede elétrica em decorrência da ruptura do isolamento de um condutor, ocasionando assim um contato

entre fases ou entre fase e terra. Pode-se definir um curto-circuito como:

- Trifásico – Envolve as três fases do sistema e por isso também são ditos equilibrados;
- Bifásico – Envolve duas fases do sistema (desequilibrado);
- Bifásico-terra – Envolve duas fases do sistema e a terra (desequilibrado); e
- Fase-terra (monofásico) – Envolve uma fase e a terra (desequilibrado).

Como descrito por Kindermann (2018), a maior parte dos curtos-circuitos são desequilibrados, sendo a maioria monofásicos, os quais ocupam por volta de 70% das ocorrências. Porém, o curto trifásico é o mais analisado, embora tenha uma ocorrência de apenas 5%, uma vez que geralmente são os mais severos. Além disso, um curto-circuito pode ser tanto permanente como temporário (fortuito). No caso onde é permanente, o curto não é reversível espontaneamente, ou seja, será necessário o deslocamento de uma equipe de manutenção até o local do problema para consertá-lo e, só então, o sistema poderá ser reestabelecido. Já no caso de um curto temporário, não existe um defeito na rede o qual exija alguma manutenção, permitindo assim que o sistema possa se reestabelecer sem problemas após a atuação da proteção. As causas mais comuns de curtos-circuitos fortuitos são sobretensão na rede, contaminação do isolador, chuva, salinidade, galho de árvores, entre outros. Nesses casos, sempre há o aparecimento de um arco elétrico temporário no local da falta, o qual é conhecido como *flashover*.

2.3 Arco Elétrico

2.3.1 Definição de Arco Elétrico

O arco elétrico se caracteriza por uma corrente elétrica que flui de um condutor para o outro através de um vapor ou um gás, o que ocorre após um processo de ionização dessas substâncias. Nesse processo, um material isolante (dielétrico) que apresenta uma baixa mobilidade de elétrons, tem suas características alteradas e passa a se comportar como se fosse um material condutor. Esse processo é chamado de ruptura do dielétrico. Para que isso aconteça, é necessário que seja estabelecido um campo elétrico forte o bastante para dar início a ionização, o que, no caso de um curto-circuito, acontece devido aos altos níveis de energia envolvidos nesse tipo de falta.

2.3.2 A História do Arco Elétrico no Contexto de Proteção

A preocupação com os riscos oferecidos pelos arcos elétricos já datam desde as primeiras décadas do século vinte. Em seu artigo, Gammon *et al.* (1999) argumentam que, desde meados de 1930, já haviam patentes para minimizar os danos de arcos elétricos e

extingui-los e que, desde 1920, já havia uma preocupação com a chamada *restrike voltage* (tensão de reestabelecimento, em tradução livre), fator crítico para o surgimento de arcos capazes de se auto sustentar.

Ainda segundo Gammon *et al.* (1999), embora o potencial do arco elétrico de representar perigo e causar danos já fosse conhecido desde 1920 nos sistemas de baixa tensão, foi apenas a partir de 1960 que suas ocorrências começaram a ter um crescimento significativo. Os fatores que levaram a isso estavam relacionados com necessidade de satisfazer uma maior demanda, levando a mudanças no sistema como a passagem de 208Y/120 V para 480Y/277 V e a classificação de corrente de 600 A para 4000 A. Essas mudanças favoreceram o aparecimento de arcos elétricos com um considerável poder destrutivo, resultando em regulamentações mais específicas sobre o assunto como, por exemplo, a exigência de uma proteção de neutro para todos os equipamentos de corrente acima de 1000 A operando acima de 150 V em relação ao terra. Além disso, durante muito tempo, os projetos de proteção apenas se preocupavam com os curtos-circuitos francos. Dessa forma, os dispositivos eram dimensionados desconsiderando qualquer influência do arco elétrico na corrente de falta.

Somado a isso, como escrito por Dunki-Jacobs (1972), por mais que já houvesse o entendimento de que o curtos-circuitos monofásicos pudessem alcançar magnitudes de corrente tão elevadas quanto as do trifásico, esse entendimento não era aplicado, já que os cálculos eram feitos apenas tomando como base os curtos-circuitos trifásicos e os bifásicos, mesmo que a magnitude de corrente deste último não fosse de tamanha relevância comparado com os outros dois. Por um lado, dimensionar os dispositivos de proteção para os valores máximos de curtos-circuitos evitava com que a proteção atuasse de forma indevida, ajudando na continuidade do serviço. Porém, tal consideração, embora lógica, demonstrou-se pouco efetiva quando o assunto era a eliminação de arcos elétricos e prejuízos ocasionados por eles. Como consequência, a desconsideração do efeito do arco elétrico no sistema começou a causar alguns problemas, com relatos de equipamentos seriamente danificados por algum tipo desconhecido de falta.

Gammon *et al.* (1999) ainda acrescenta que, após estudos acerca do problema, foi revelado que as faltas com arco elétrico apresentavam uma magnitude consideravelmente menor do que os curtos-circuitos francos. Dessa forma, o módulo instantâneo do relé de sobrecorrente ficava ajustado em valores altos demais para ser sensibilizado para esses casos, resultando em uma atuação lenta demais para prevenir a queima dos equipamentos. Com isso, modelos para descrever o comportamento desses arcos elétricos começaram a ser criados, visando incluir a influência desse fenômeno nos cálculos de proteção.

2.3.3 O modelo de arco elétrico Cassie-Mayr

Diante da necessidade de modelar o comportamento do arco elétrico, pesquisadores começaram a desenvolver equações que pudessem expressar as características desse fenômeno. Por volta dos anos de 1940, Cassie e Mayr publicaram vários estudos abordando a modelagem do arco elétrico, onde cada um deu a sua contribuição a partir de suas próprias considerações a respeito do fenômeno. Seus estudos forneceram ferramentas que foram usadas e aperfeiçoadas posteriormente por outros pesquisadores, desenvolvendo assim diversas abordagens e soluções.

Segundo Mayr (1943), a potência do arco elétrico pode ser descrita pela Equação 2.1:

$$\frac{dQ}{dt} = u(t) \cdot i(t) - P_{loss} \quad (2.1)$$

Onde Q , u , i e P_{loss} são, respectivamente, a energia, a tensão, a corrente e as perdas de energia do arco.

Considerando que a condutância (G) é uma função da energia, então, tem-se (2.2).

$$G(Q) = G\left(\int u(t) \cdot i(t) - P_{loss} dt\right) \quad (2.2)$$

Derivando a expressão acima e dividindo ambos os lados por $G(Q)$, chega-se a (2.3):

$$\frac{1}{G(Q)} \cdot \frac{dG(Q)}{dt} = \frac{1}{G(Q)} \cdot \frac{dG(Q)}{dQ} (u(t) \cdot i(t) - P_{loss}) \quad (2.3)$$

Para resolver essa equação, $G(Q)$ e P_{loss} devem ser conhecidos. Assim, tanto Cassie, quanto Mayr apresentaram suas respectivas soluções para essa equação. Vale a pena ressaltar que, para isso, cada um fez considerações a respeito da forma como ocorria a transferência de energia do arco e como isso afetaria as grandezas envolvidas nele.

Por exemplo, Cassie (1939) considerou que a perda de energia se dava pela convecção. Dessa forma, a temperatura do arco era constante e sua área de seção transversal era proporcional à corrente. Além disso, essas considerações implicariam em uma tensão constante de arco (U_c) e, uma vez que a temperatura era constante, pode-se considerar que a relação da condutância com o a energia também é linear, de tal forma que $G = constante \cdot Q$, o que leva a seguinte relação exposta em (2.4):

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dQ} = \frac{1}{constante \cdot Q} \cdot \frac{d(constante \cdot Q)}{dQ} = \frac{1}{Q} \quad (2.4)$$

Substituindo (2.4) em (2.3), tem-se (2.5):

$$\frac{1}{G_c} \cdot \frac{dG_c}{dt} = \frac{U_c^2 \cdot G_c}{Q} \cdot \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right) = \frac{1}{\tau_c} \cdot \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Em (2.5), o índice c está relacionado a Cassie e τ_c é a constante de tempo relacionada a energia do arco.

Multiplicando ambos os lados por G_c , chega-se a forma final da equação de Cassie para arcos elétricos, a qual é dada por (2.6).

$$\frac{dG_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \cdot \left(\frac{u \cdot i}{U_c^2} - G_c \right) \quad (2.6)$$

Já Mayr (1943) considerou que as perdas de energia eram, em sua maior parte, provenientes da condução térmica a valores pequenos de corrente. Assim, ele concluiu que a condutância tinha uma alta dependência com a temperatura, porém, pouco dependia da área da seção transversal do arco. Mayr também considerou a área da seção transversal do arco como sendo constante, assim como as suas perdas $P_{loss} = P_0$ e a condutância como sendo dada pela Equação 2.7:

$$G(Q) = e^{-\frac{Q}{Q_0}} \quad (2.7)$$

Onde Q_0 é a energia inicial do arco, o que implica em:

$$\begin{aligned} \frac{dG(Q)}{G(Q)} &= \frac{d(\ln|G(Q)|)}{dQ} \\ &= \frac{d(\ln|e^{-\frac{Q}{Q_0}}|)}{dQ} \\ &= \frac{1}{Q_0} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Substituindo (2.8) em (2.3) e colocando P_0 em evidência, obtém-se a Equação 2.9:

$$\frac{1}{G(Q)} \cdot \frac{dG(Q)}{dt} = \frac{P_0}{Q_0} \cdot \left(\frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right) \quad (2.9)$$

Por fim, considerando $P_0/Q_0 = \tau$, ou seja, afirmando que a constante de tempo está associada a mudança de energia do arco, tem-se (2.10).

$$\frac{1}{G_m} \cdot \frac{dG_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \cdot \left(\frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right) \quad (2.10)$$

Multiplicando ambos os lados de (2.10) por G_m , obtém-se a solução de Mayr para arcos elétricos, conforme (2.11).

$$\frac{dG_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \cdot \left(\frac{i^2}{P_0} - G_m \right) \quad (2.11)$$

Cada um desses dois modelos apresenta vantagem em relação às situações que mais se aproximam das considerações feitas para desenvolvê-los. Por exemplo, o modelo de Cassie funciona bem para altas correntes, já o de Mayr funciona melhor para correntes perto de zero. Por isso, é normal que ambos os modelos sejam combinados de modo a conseguir melhores resultados em situações onde a corrente apresenta valores intermediários.

Um bom exemplo de como usar os dois modelos simultaneamente aparece na abordagem apresentada por Gustavsson (2014), onde o mesmo usa as condutâncias em série para melhorar seus resultados, o que leva a (2.12).

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_c} + \frac{1}{G_m} \quad (2.12)$$

Uma vez montada a equação, é usada uma aproximação a partir do método de Euler para torná-la discreta, permitindo assim a sua solução numericamente, conforme (2.13) e (2.14)

$$\frac{G_{c,n+1} - G_{c,n}}{t_{n+1} - t_n} = \frac{1}{\tau_c} \cdot \left(\frac{u_n \cdot i_n}{U_c^2} - G_{c,n} \right) \Leftrightarrow G_{c,n+1} = \frac{\Delta t}{\tau_c} \cdot \frac{u_n \cdot i_n}{U_c^2} + G_{c,n} \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_c} \right) \quad (2.13)$$

$$\frac{G_{m,n+1} - G_{m,n}}{t_{n+1} - t_n} = \frac{1}{\tau_m} \cdot \left(\frac{i_n^2}{P_0} - G_{m,n} \right) \Leftrightarrow G_{m,n+1} = \frac{\Delta t}{\tau_m} \cdot \frac{i_n^2}{P_0} + G_{m,n} \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_m} \right) \quad (2.14)$$

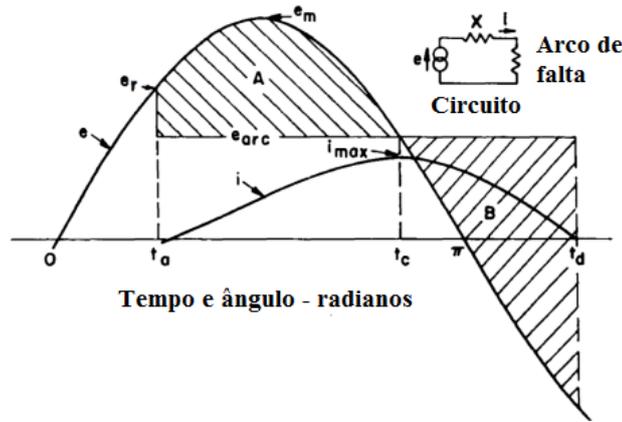
2.3.4 Modelos de arco elétrico usando o conceito de *Restrike Voltage*

Em seu artigo, Kaufmann e Page (1960) apresentaram um modelo de arco elétrico para sistemas puramente indutivos, baseando-se no conceito de *restrike voltage* que é a tensão necessária para romper o dielétrico do ar e dar início ao arco. Uma vez estabelecido, o arco elétrico passaria a oferecer uma queda de tensão que, por sua vez, seria menor que o valor de tensão necessário para dar início a ele. Além disso, o fluxo de corrente encontraria o seu valor máximo quando a tensão do sistema alcançasse o mesmo valor da queda de tensão do arco, diminuindo gradativamente após esse momento. A Figura 1 apresenta o comportamento da corrente de arco elétrico, tanto em relação à tensão do sistema, quanto ao valor de queda de tensão oferecido pelo arco.

Logo, a partir da resolução de uma equação diferencial simples, tem-se (2.15) para o comportamento da corrente do arco elétrico.

$$i = \frac{1}{L} \int_{t_a}^{t_c} (e_m \sin t - e_{arc}) dt \quad (2.15)$$

Figura 1 – Influência das tensões no comportamento da corrente.



Fonte: Adaptado de Kaufmann e Page (1960).

Na Equação 2.15, e_m é a tensão máxima do sistema e e_{arc} , t_a e t_c são, respectivamente, a queda de tensão, o instante do início e o instante de valor máximo de corrente do arco.

Após isso, vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para o comportamento da corrente de arco a partir da solução da Equação 2.16 de um sistema resistivo-indutivo:

$$e_m \cos \omega t = i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} + e_{arc} \quad (2.16)$$

Isso levou a trabalhos como os de Conrad e Dalasta (1967), os quais partiram de condições como, por exemplo, o início do arco ocorrer no valor máximo de tensão (e_m) e sua extinção ocorrer antes do pico do semiciclo negativo ($-e_m$), conseguindo também apresentar a solução em rms para a corrente. Isso levou à solução expressa nas Equações 2.17 e 2.18.

$$i = \cos(\theta - \phi) - \frac{1}{\cos \phi} [0.373 - (0.373 - \cos^2 \phi) \varepsilon^{-(\cos \phi)}] \quad (2.17)$$

$$I_{rms}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta_1} i^2 dt \quad (2.18)$$

Além disso, Matthews (1993) apresentou o seu modelo de arco baseado em um método de determinação do ângulo de condução da potência eletrônica, onde, a partir da equação diferencial de um sistema resistivo-indutivo, chegou-se na solução expressa em (2.19):

$$i(t) = \frac{e_{max}}{|Z|} \cdot \left[\sin(\omega t_a - \phi) - \frac{m}{\cos \phi} + \left(\frac{m}{\cos \phi} - \sin(\omega t_a - \phi) \right) \varepsilon^{\frac{\omega(t_a - t)}{\tan \phi}} \right] \quad (2.19)$$

E o ângulo de condução, γ , pode ser determinado após a solução numérica da Equação 2.20:

$$\varepsilon^{-\frac{\gamma}{\tan \phi}} = \frac{\frac{m}{\cos \phi} - \sin(\omega t_a + \gamma - \phi)}{\frac{m}{\cos \phi} - \sin(\omega t_a - \phi)} \quad (2.20)$$

Essa solução numérica é importante, pois o ângulo de condução está relacionado com o comportamento da corrente de arco. Mais precisamente, quando o ângulo de condução é alcançado, a corrente tem seu fluxo interrompido, indicando também o momento em que toda a energia magnética é dissipada.

2.4 Falta de Alta Impedância

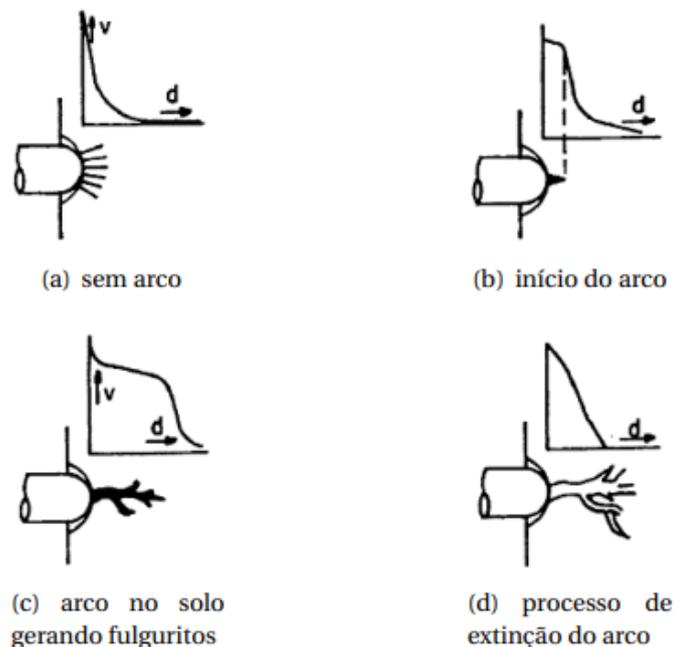
2.4.1 Influência do Arco Elétrico da FAI no Solo

Os modelos de arco explorados até então não consideravam a influência do arco nas características do solo e nem, conseqüentemente, a forma como isso afetaria a resistência resultante a ser modelada. Entretanto, se tratando de uma falta de alta impedância, a qual muitas vezes ocorre após o rompimento do condutor e seu contato com o solo, essa influência tem que ser considerada, principalmente porque será essa interação com o solo que irá criar muitas das características que diferenciam a FAI das demais ocorrências na rede (NAKAGOMI, 2006).

Inicialmente, o arco apresentará um valor reduzido de corrente, pois a sua área de contato consistirá basicamente do ponto envolvendo o condutor rompido e a superfície do solo, onde haverá um alto gradiente de tensão. Conforme o solo for sendo ionizado pelo campo elétrico, o arco começará a adentrá-lo, aumentando assim a sua região de contato e, conseqüentemente, a corrente envolvida no processo. Uma vez que o caminho de corrente se dá de forma completamente estocástica, a resistência resultante do processo apresentará um comportamento completamente aleatório, o que se intensifica com o surgimento de estruturas conhecidas como fulguritos (do latim *fulgur*, "raio"), as quais são o resultado da sílica derretida pelo calor gerado pelo arco elétrico. Essas estruturas apresentarão uma resistividade diferente do restante do solo, influenciando assim no valor final da resistência. Além disso, a sílica quando aquecida se comporta como um cátodo emitindo elétrons, o que causa uma menor queda de tensão quando o eletrodo está submetido a uma tensão positiva (NAKAGOMI, 2006).

Conforme o arco for adentrando o solo, a região envolvida perderá sua umidade, perturbando assim a razão entre calor gerado pelo arco e o calor transmitido ao ambiente, causando a extinção do arco. Entretanto, conforme a umidade se difundir novamente no solo, o arco terá uma re-ignição, porém, seguindo agora um caminho diferente (EMANUEL *et al.*, 1990). A Figura 2 representa as etapas desse fenômeno.

Figura 2 – Etapas do desenvolvimento do arco no solo.



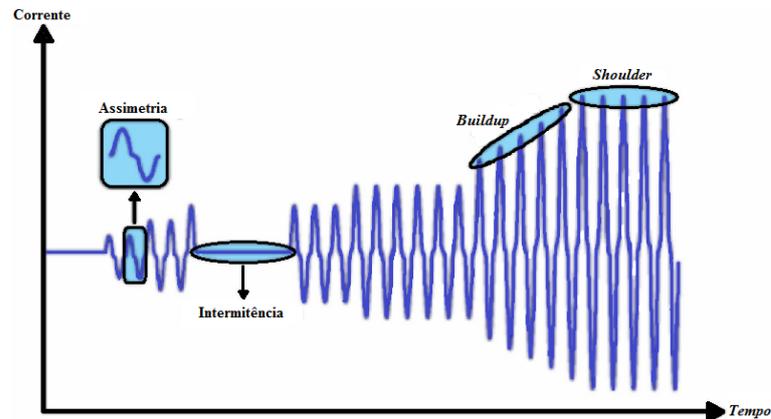
Fonte: Nakagomi (2006)

Tendo em vista todos esses fenômenos que ocorrem durante a interação do arco elétrico com o solo, podem-se destacar cinco características principais resultantes no sinal de corrente de uma FAI, conforme citado por Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2016):

- Intermitência: de tempos em tempos o arco se extingue e depois se reestabelece, gerando componentes harmônicas de baixa ordem e ruídos no sinal;
- Assimetria: a corrente da FAI tem o semiciclo positivo maior que o semiciclo negativo;
- Não linearidade: não existe uma linearidade na relação entre corrente e tensão em uma FAI;
- *Buildup*: crescimento gradual da magnitude da envoltória de corrente; e
- *Shoulder*: o valor da envoltória de corrente se estabiliza em regime permanente.

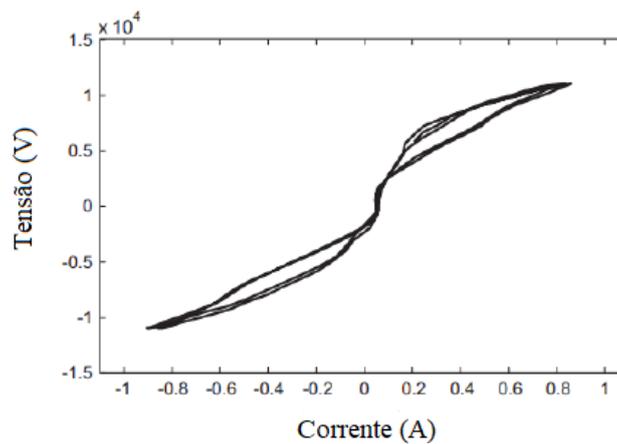
Essas características são mostradas graficamente nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 – Assimetria, intermitência, buildup e shoulder.



Fonte: Adaptado de Aljohani (2020).

Figura 4 – Não linearidade da relação v-i de uma FAI.



Fonte: Adaptado de Torres *et al.* (2014).

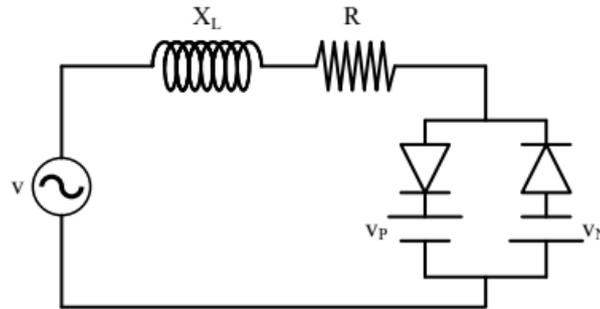
2.4.2 Modelos de Falta de Alta Impedância

2.4.2.1 Modelo Emanuel

Emanuel *et al.* (1990) apresentaram os resultados a partir de ensaios realizados em campo e em laboratório, de modo a estudar o conteúdo harmônico da corrente durante uma FAI e, assim, provar a confiabilidade de usar as componentes de baixa frequência para a detecção desse tipo de falta. Os resultados encontrados foram juntamente apresentados com um modelo de arco, o qual gerava respostas semelhantes às encontradas em campo.

Esse modelo usa duas fontes CC, uma para o semiciclo positivo (v_P) e outra para o negativo (v_N), conectadas em antiparalelo com dois diodos, em série com uma resistência R e uma reatância X_L como apresentado na Figura 5.

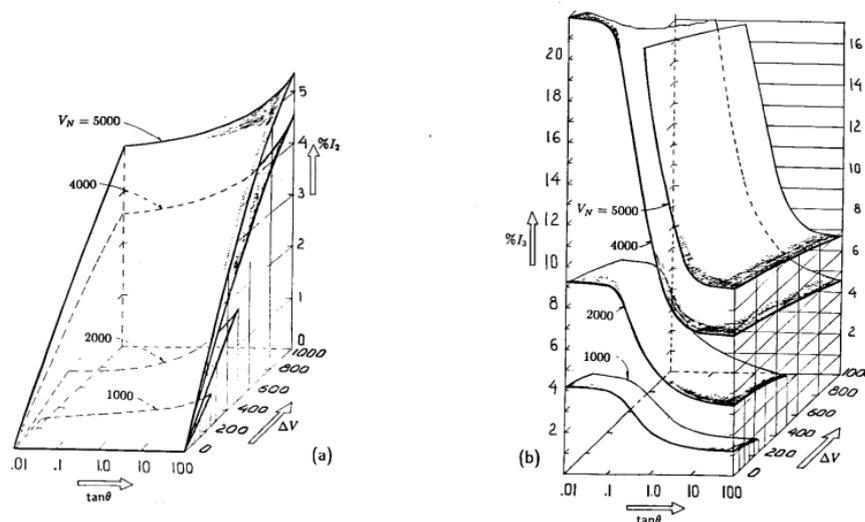
Figura 5 – Modelo de Arco Emanuel.



Fonte: Adaptado de Emanuel *et al* (1990).

Como os estudos foram realizados em cima da segunda e da terceira harmônica, os elementos apresentados no circuito do modelo estão relacionadas com essas componentes também. A tensão de assimetria (ΔV) que nada mais é do que uma subtração de v_N com v_P , influência na segunda harmônica, enquanto $\tan \theta$, a qual é a razão de X_L por R , tem uma forte influencia na terceira harmônica. A Figura 6 apresenta o comportamento da segunda e da terceira harmônica, conforme a variação de ΔV e $\tan \theta$.

Figura 6 – Comportamento da segunda e terceira harmônica em relação a (ΔV) e $\tan \theta$.



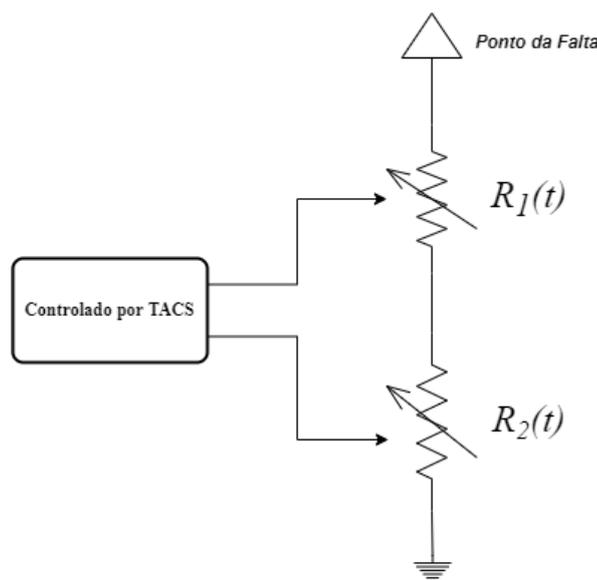
Fonte: Emanuel *et al.*(1990).

Porém, embora esse modelo represente bem o comportamento das harmônicas de baixa frequência, ele falha em representar características no domínio do tempo como, por exemplo, o *buildup* e *shoulder*. Dessa forma, dependendo do método empregado para a detecção de falta, esse modelo pode não ser satisfatório.

2.4.2.2 Resistências em Série e Variantes no Tempo

Buscando representar características como como *buildup*, *shoulder*, não linearidade e assimetria, Nam *et al.* (2001) usaram dados coletados pela *Korea Electric Power Corporation* (KEPCO) para criar um novo modelo de arco. A solução encontrada para representar os traços da FAI foi usar duas resistências em série e variantes no tempo, controladas por TACS (do inglês *Transient Analysis of Control Systems*), onde a primeira resistência (R_1) seria responsável pela assimetria e não linearidade e a segunda (R_2), pelo *buildup* e *shoulder*. Essa separação foi feita, pois houve o entendimento de que existiam duas etapas no desenvolvimento da falta. Na primeira etapa, a corrente passaria por um transitório, onde ela cresceria até alcançar um determinado valor. Já na segunda, a corrente entraria em regime permanente, apresentando a mesma característica a cada novo ciclo. A Figura 7 traz uma representação desse modelo.

Figura 7 – Modelo de arco usando duas resistências variantes no tempo.



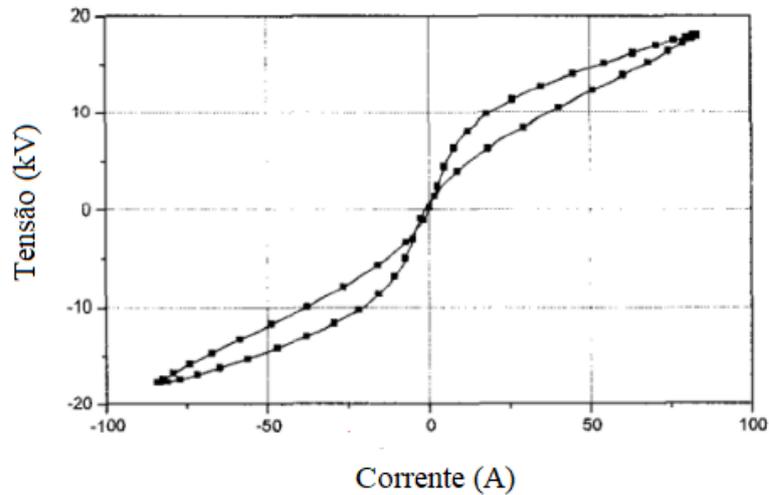
Fonte: Nam *et al.* (2001).

Para a modelagem da resistência $R_1(t)$, foi realizada a linearização da curva de tensão-corrente de uma falta de alta impedância obtida pela KEPCO. A curva de tensão-corrente para um ciclo em regime permanente aparece na Figura 8. Já a curva linearizada está representada na Figura 9.

Considerando que a tensão do ramo em falta seja $v_n \leq v(t) \leq v_{n+1}$, o resultado da linearização é representado na Equação 2.21 e a resistência resultante, em (2.22).

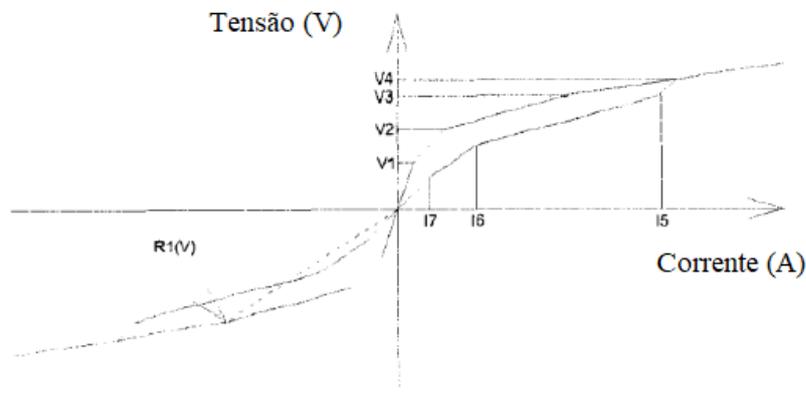
$$i(t) = i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} v(t) \quad (2.21)$$

Figura 8 – Curva característica tensão-corrente para uma FAI em regime permanente.



Fonte: Adaptado de Nam *et al.* (2001).

Figura 9 – Curva característica tensão-corrente linearizada.



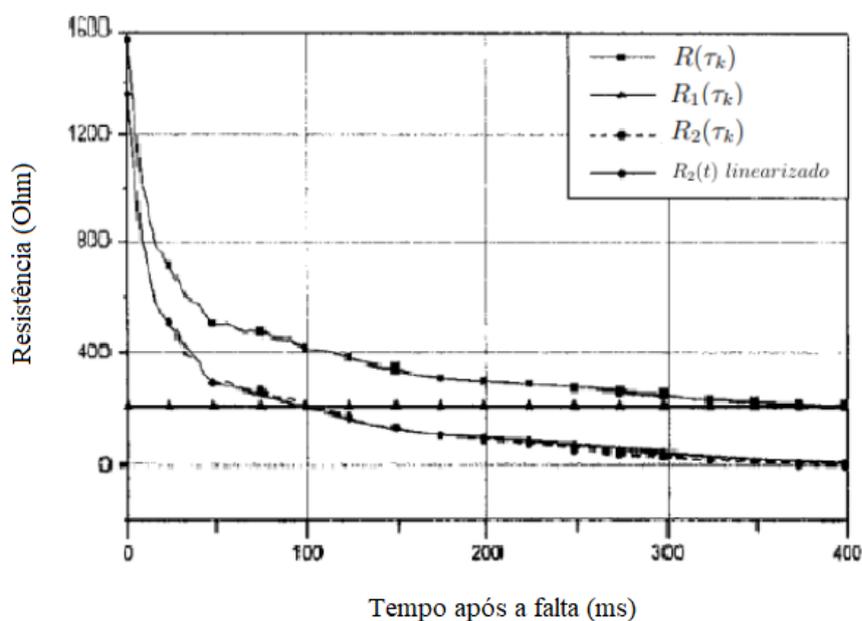
Fonte: Adaptado Nam *et al.* (2001).

$$R_1(t) = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{v(t)}{i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n}} \quad (2.22)$$

Se a resistência total $R(t)$, a qual é a soma das duas resistências, já é conhecida, então basta subtrair $R_1(t)$ para que $R_2(t)$ seja encontrado. Entretanto, seria muito cansativo pegar todos os pontos de $R(t)$. Dessa forma, é feita uma interpolação com os valores máximos de corrente e tensão a cada meio ciclo. Seja τ_k o instante de tempo onde a corrente e a tensão alcançam o seu valor máximo, então, $R_2(\tau_k)$ é dada por (2.23). A Figura 10 apresenta as curvas interpoladas de cada uma das resistências.

$$R_2(\tau_k) = R(\tau_k) - R_1(\tau_k) \quad (2.23)$$

Figura 10 – Resistências variantes no tempo nos instantes de máxima tensão e Corrente



Fonte: Adaptado de Nam *et al.* (2001).

Nakagomi (2006) fez uma importante contribuição para o modelo de resistências variáveis ao modelar também a queda do condutor envolvido na FAI. Para isso, foi considerado que a falta poderia ser dividida em quatro etapas diferentes, cada uma relativa ao estado do condutor mediante a falta. As etapas descritas por Nakagomi (2006) estão representadas abaixo e também na Figura 11:

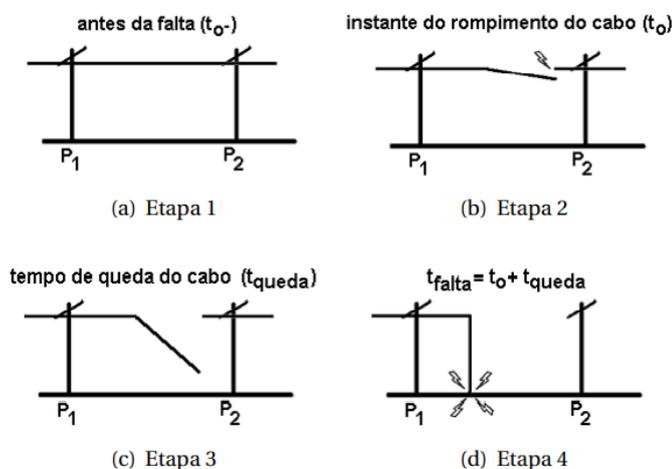
- Pré-falta ($t < t_0$): as correntes que circulam na rede são produzidas apenas pela carga;
- Rompimento do cabo ($t = t_0$): instante em que ocorre a abertura da fase;
- Queda do cabo ($t_0 < t < t_0 + t_{queda}$): tempo de queda do cabo, onde o tempo de queda é dado pela Equação 2.24:

$$t_{queda} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (2.24)$$

Sendo h a altura da rede primária e g a aceleração da gravidade; e

- Arco Elétrico ($t > t_0 + t_{queda}$): tempo em que o cabo entra em contato com o solo e dá início ao arco elétrico.

Figura 11 – Etapas consideradas para a FAI.



Fonte: Nakagomi (2006).

2.4.2.3 Modelo Sedighi

Sedighi (2014) usou dados de um sistema de radial com um alimentador de 20 kV, localizado em Qeshm Island, Iran. A extensão da linha era de 19,5 km e o local onde as faltas foram realizadas estavam por volta de 8,5 km de comprimento do alimentador. Seu alimentador era energizado por outro de 20 kV conectados através de dois transformadores de distribuição (20/0.4 kV, 100 kVA) conectados em *back-to-back*. Os lados de alta tensão estavam conectados em delta e os de baixa, em Y. Além disso, os testes foram realizados em sete tipos diferentes de solos.

Coletados os dados, foi usado o método de Bonferroni e vários modelos de arco Emanuel em paralelo para realizar comparações. O uso desses modelos em paralelo é justificado pelo fato de geralmente haver mais de um ponto de contato do cabo rompido com o solo, gerando vários arcos elétricos que se iniciam e se extinguem aleatoriamente como mostrado na Figura 12.

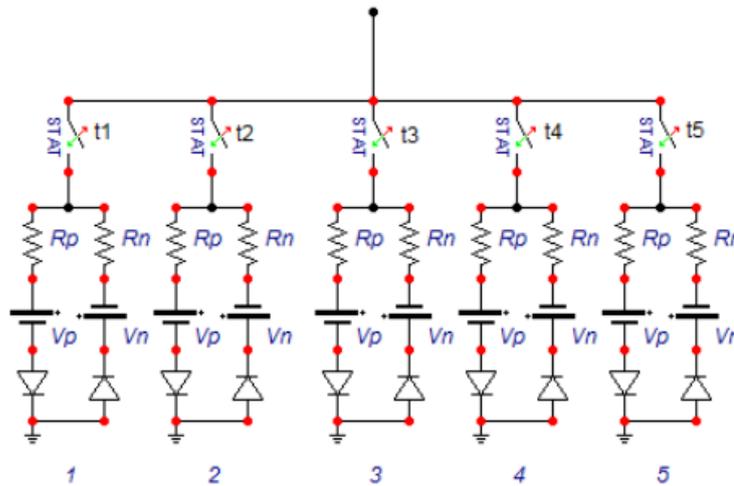
Uma das constatações realizadas através dos dados coletados foi que a corrente inicial tinha por volta de 60% do valor final e que demorava cerca de 50 a 60 ms para que a corrente chegasse a sua magnitude máxima. Com isso, fazendo o uso do controle de comutação de chaves, os valores da corrente do modelo simulado foram modificados de modo a se encaixarem nessas constatações. Além disso, os valores de tensão V_n e V_p foram extraídos através da curva $v-i$ e os demais parâmetros usados foram os dados recolhidos nos ensaios de falta. Por fim, usando a transformada rápida de Fourier, extraíram-se todas as componentes de frequência do modelo e, após isso, foi usado o método de Bonferroni para validar ou não os resultados. Caso a simulação alcançasse as determinações impostas, ela era validada, senão, desconsiderada.

Figura 12 – Ocorrência de vários arcos em uma superfície de cimento.



Fonte: Sedighi(2014).

Figura 13 – Modelo Emanuel em Paralelo.



Fonte: Sedighi(2014)

2.4.2.4 Modelo de FAI derivado dos modelos de arco Cassie-Mayr

A partir da Equação 2.25, a qual é uma variação dos modelos apresentados por Cassie e Mayr, Torres *et al.* (2014) desenvolveram um modelo de arco que simulava as características apresentadas por um arco elétrico ao entrar em contato com o solo.

$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau(u, i)} \cdot \left(\frac{ui}{P(u, i)} - 1 \right) \quad (2.25)$$

Em (2.25), u , i e τ são, respectivamente, a tensão a corrente e a constante de tempo do arco, $g = u/i$ é a condutância instantânea e a energia dissipada é dada por (2.26).

$$P = P_0 + u_0 \cdot |i| \quad (2.26)$$

Sendo G_{ss} a condutância em regime permanente e seu comportamento dado pela Equação 2.27.

$$G_{ss}(i) = \frac{i^2}{P_0 + u_o \cdot |i|} \quad (2.27)$$

Tem-se que a Equação 2.25 pode ser reescrita como (2.28).

$$\frac{dg}{dt} = \frac{G_{ss}(i) - g}{\tau} \quad (2.28)$$

Para que fosse possível calcular $G_{ss}(i)$, foi considerado que a corrente do arco elétrico tem um comportamento senoidal, de modo que a corrente de regime permanente tivesse uma frequência de 2ω . Assim, (2.28) pode ser expandida usando séries de Fourier com as harmônicas pares, conforme (2.29):

$$G_{ss}(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} G_n e^{j2n\omega t} \quad (2.29)$$

Sendo o período da corrente bem menor do que a constante de tempo do arco, então, pode-se considerar que a condutância de regime permanente é a superposição entre uma constante G_0 e uma componente de rápida oscilação $\delta \cdot G_{ss}(t)$, conforme (2.30).

$$G_{ss}(t) = G_0 + \delta \cdot G_{ss}(t) \quad (2.30)$$

A componente rapidamente oscilatória pode ser filtrada a partir da operação de média realizada em (2.31):

$$G_m(t) = \frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt = G_0 \quad (2.31)$$

Considerando que a condutância $g(t)$ pode ser representada a partir da soma de uma componente que não varia significativamente com o período, $g_{lenta}(t)$, e também uma componente de rápida oscilação, $\delta G(t)$, tem-se (2.32).

$$g(t) = g_{lenta}(t) + \delta G(t) \quad (2.32)$$

Aplicando a operação da Equação 2.31 em ambos os lados da Equação 2.28, tem-se (2.33).

$$\frac{dg_{lenta}}{dt} = \frac{G_0 - g_{lenta}}{\tau} \quad (2.33)$$

Resolvendo a equação diferencial em (2.33), tem-se (2.34).

$$g_{lenta} = G_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.34)$$

Para obter a resistência média do arco elétrico, basta fazer o inverso de (2.34).

2.5 Considerações Finais

Simular um arco elétrico em uma situação real, além de exigir a disponibilidade de um trecho de uma linha de distribuição, também demanda uma série de equipamentos de proteção, de modo a garantir que a segurança de todos os envolvidos seja mantida. Nesse contexto, que os modelos computacionais representam uma alternativa para contornar a indisponibilidade de um sistema teste ou um gasto muito alto em laboratórios capazes de simular tais condições com toda a proteção necessária. Por esse motivo, ao longo das décadas, vários modelos elétricos como os apresentados nesse Capítulo, foram desenvolvidos.

Ao longo desse Capítulo, foi apresentada a história dos arcos elétricos no contexto de proteção e como o seu estudo foi importante para entender vários dos problemas que foram surgindo ao longo das décadas, possibilitando assim sua modelagem computacional. Na sequência, foram apresentados os modelos de arco elétrico voltados para o estudo de faltas de alta impedância e a singularidade de cada um deles, juntamente como a metodologia empregada para o seu desenvolvimento. O Capítulo seguinte apresenta a técnica proposta para a detecção das FAIs.

3 METODOLOGIA

3.1 Considerações Gerais

Nesse Capítulo, é apresentada uma nova técnica para a detecção de FAIs, usando tanto características no domínio do tempo, quanto no da frequência, além do método utilizado para detectar a ocorrência de transitórios. Diferentemente das demais técnicas que fazem uso de características harmônicas do sinal de corrente para realizar a detecção, este método utiliza também as características de *buildup* e *shoulder*, as quais são singulares o suficiente para diferenciarem as faltas de alta impedância de vários outros transitórios do sistema. Tais características, por muitas vezes, são melhor aproveitadas se avaliadas juntamente com uma análise do comportamento harmônico do sinal, uma vez que certos eventos podem apresentar um comportamento análogo ao *buildup* e *shoulder* em contextos mais específicos.

O método proposto inicia analisando se há ou não um transitório no sistema e, uma vez que esse transitório é identificado, começa uma busca pelos picos do sinal de corrente, comparando-os de modo a identificar se uma etapa de *buildup* está ocorrendo ou não. Após detectada a fase de *buildup*, o método passa a buscar pela fase de *shoulder*. Por fim, o método analisa a terceira harmônica do sinal e, caso a condição estabelecida seja satisfeita, é detectado que uma falta de alta impedância está acontecendo.

3.2 Detecção do Transitório

A detecção de transitório é realizada usando uma modificação do método proposto por Santos (2011). Nesse novo método, ao invés de realizar a função-diferença entre a amostra atual e a anterior de corrente, os valores de corrente são armazenados em uma janela móvel de n amostras, conforme (3.1).

$$W(k) = \left[i(k-n) \quad i(k-n+1) \quad i(k-n+2) \quad \cdots \quad i(k) \right] \quad (3.1)$$

Após isso, é aplicado um filtro de máximo à janela, de acordo com (3.2).

$$i_{max} = \max(W(k)) \quad (3.2)$$

O resultado desse filtro é então armazenado em uma nova janela, a qual será responsável por guardar os valores de máximo obtidos:

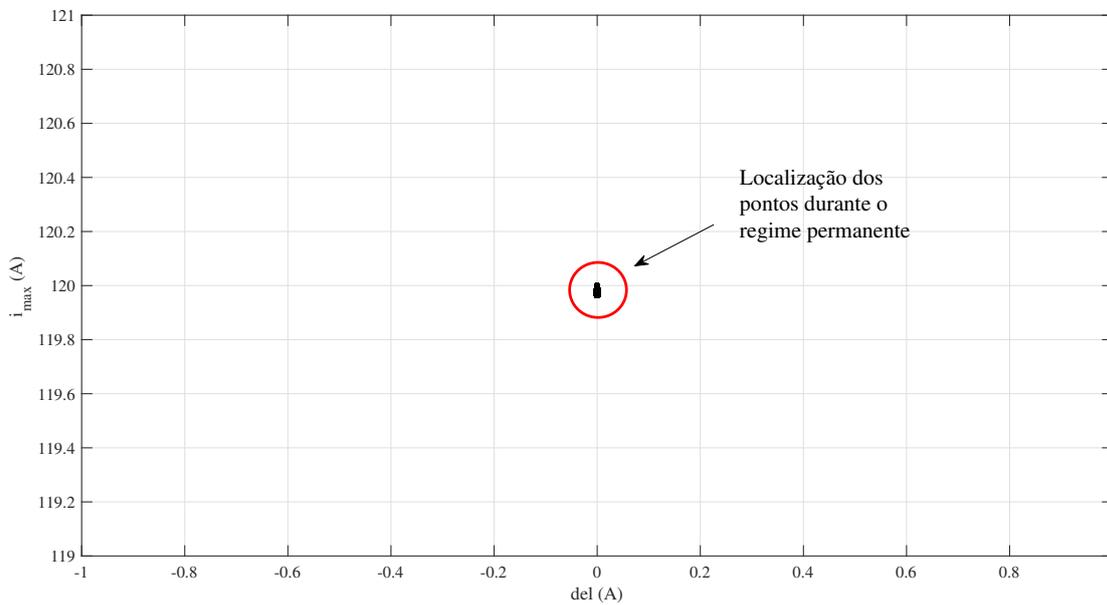
$$J(k) = \left[i_{max}(k-n) \quad i_{max}(k-n+1) \quad i_{max}(k-n+2) \quad \cdots \quad i_{max}(k) \right] \quad (3.3)$$

Com a janela de máximos devidamente completa, é realizada uma subtração entre o seu primeiro e último valor, conforme (3.4).

$$del(k) = i_{max}(k) - i_{max}(k-n) \quad (3.4)$$

Os valores obtidos por essa subtração são usados juntamente com os valores resultantes do filtro de máximo para construir o plano del x i_{max} . Nesse plano, em uma situação onde o sistema está funcionando em regime permanente, os pontos ficarão estáveis em uma mesma posição. Quando ocorrer um transitório, os pontos se deslocarão dessa posição comum e irão se movimentar até uma nova posição, onde se estabilizarão novamente após a passagem do transitório. Uma situação onde os pontos se encontram estáveis em uma mesma posição e outra onde ocorre um transitório e, conseqüentemente, ocorre o deslocamento dos pontos, pode ser encontrada nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

Figura 14 – Plano del x i durante o regime permanente.

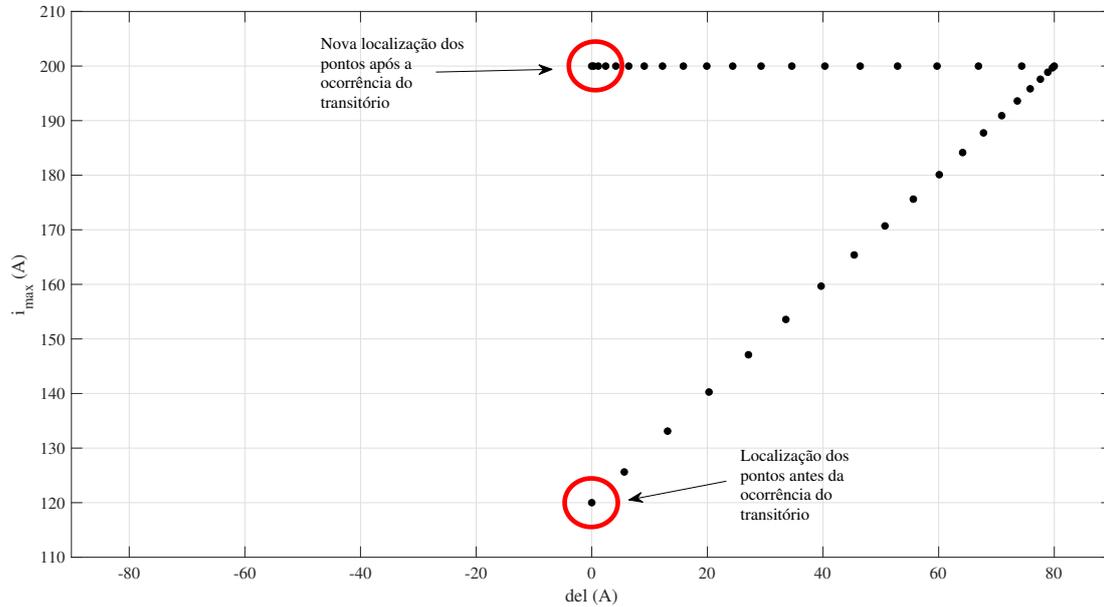


Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, é calculada a distância entre esses pontos usando a Equação 3.5.

$$dist(k) = \sqrt{(del(k) - del(k-1))^2 + (i_{max}(k) - i_{max}(k-1))^2} \quad (3.5)$$

Essa distância é uma informação importante, pois, toda a vez que o sistema passar por um transitório, haverá uma mudança inesperada nesses valores de distância.

Figura 15 – Plano del x i durante o transitório.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que seja possível analisar se uma distância está condizente com o esperado, primeiramente, armazenam-se os valores de distância em uma janela como a descrita em (3.6).

$$F(k) = \left[dist(k-n) \quad dist(k-n+1) \quad dist(k-n+2) \quad \dots \quad dist(k) \right] \quad (3.6)$$

Onde, n é o número de amostras por ciclo e k , a amostra atual. Então, usa-se a janela obtida em (3.6) para calcular $Th(k)$, conforme (3.7).

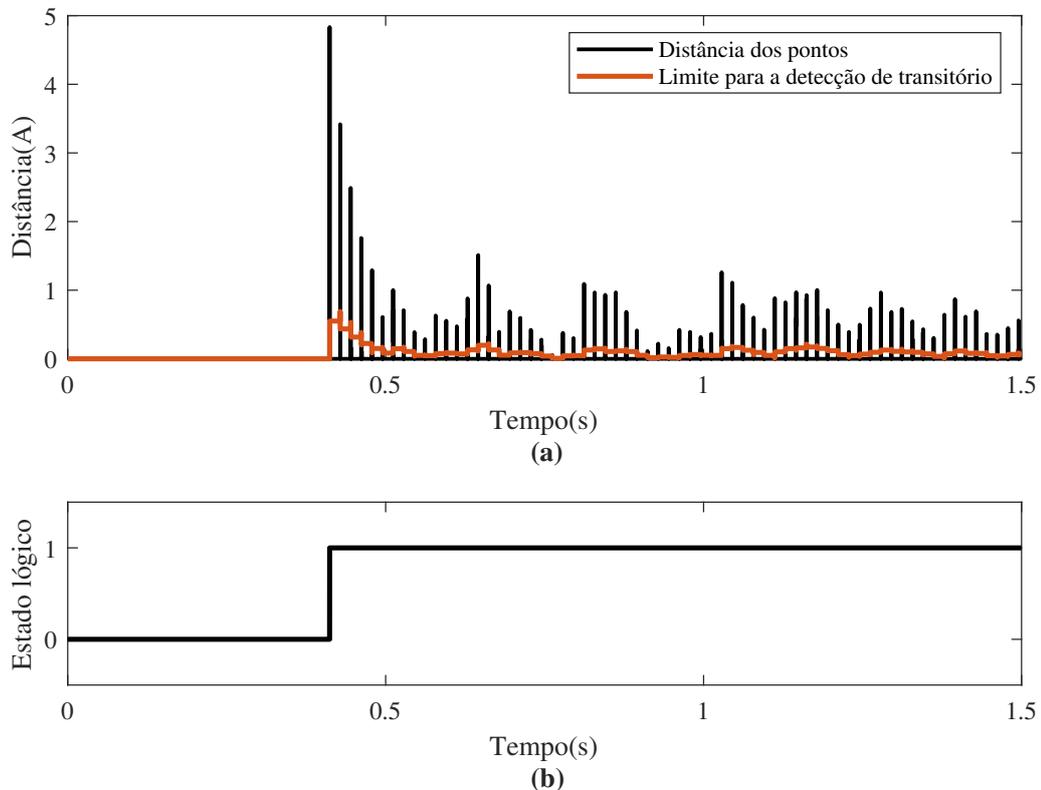
$$Th(k) = \mu(F(k)) + 1,2 \cdot \sigma(F(k)) \quad (3.7)$$

Em (3.7), μ representa um filtro de média e σ representa um filtro de desvio padrão.

Se a distância $dist(k)$ for maior que $Th(k)$, então considera-se que houve um transitório.

A comparação entre $dist(k)$ e $Th(k)$ é representada na Figura 16, onde pode-se perceber o instante onde ocorre o transitório e que o mesmo acaba sendo detectado pelo método.

Figura 16 – Atuação do detector de transitórios. (a) Sinal de $dist(k)$. (b) Estado lógico do detector de transitórios.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Detecção da FAI

Após detectado o transitório, o algoritmo começa a analisar o comportamento dos picos positivos do sinal de corrente, buscando as características de *buildup* e *shoulder*, simultaneamente com a análise da harmônica de terceira ordem, a qual é um resultado da distorção no sinal de corrente causada pela presença do arco elétrico.

Para que seja possível buscar as características de *buildup* e *shoulder* na forma de onda da corrente, cria-se uma janela de tamanho ímpar u , conforme (3.8).

$$C(k) = [i(k-u) \quad i(k-u+1) \quad i(k-u+2) \quad \cdots \quad i(k)] \quad (3.8)$$

Seja a posição central p_c , de $C(k)$, dada por (3.9).

$$p_c = k - \frac{u-1}{2} \quad (3.9)$$

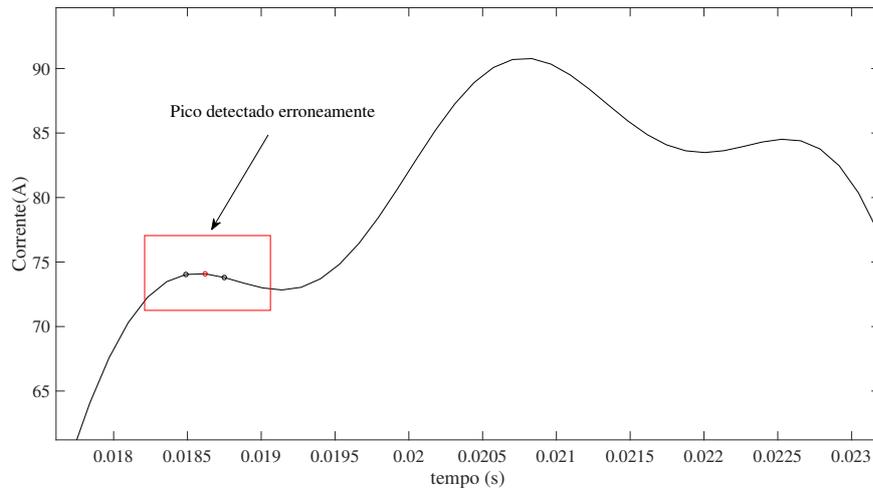
Será considerado um pico positivo sempre que o valor central da janela $C(k)$ for maior que todos os valores a sua esquerda e a sua direita, de acordo com (3.10) e (3.11).

$$i(p_c) > \max \left(\left[i(k-u) \quad i(k-u+1) \quad i(k-u+2) \quad \cdots \quad i(p_c-1) \right] \right) \quad (3.10)$$

$$i(p_c) > \max \left(\left[i(p_c+1) \quad i(p_c+2) \quad i(p_c+3) \quad \cdots \quad i(k) \right] \right) \quad (3.11)$$

Esse tipo de abordagem é importante, pois o sinal pode apresentar ruídos que confundam os localizadores de picos mais básicos, os quais normalmente são feitos usando apenas uma janela móvel de três elementos. Por esse motivo, usar todo um semiciclo para de fato poder concluir que um determinado ponto realmente é o máximo, acaba sendo a melhor solução. A Figura 17 apresenta uma situação onde foi usada uma janela móvel de três elementos em um pico que apresenta algumas distorções, classificando de forma errada a posição máxima do pico. Já na Figura 18, foi usada uma janela móvel com tamanho $n/2+1$, classificando corretamente a posição do pico.

Figura 17 – Detecção de pico usando uma janela com 3 elementos.



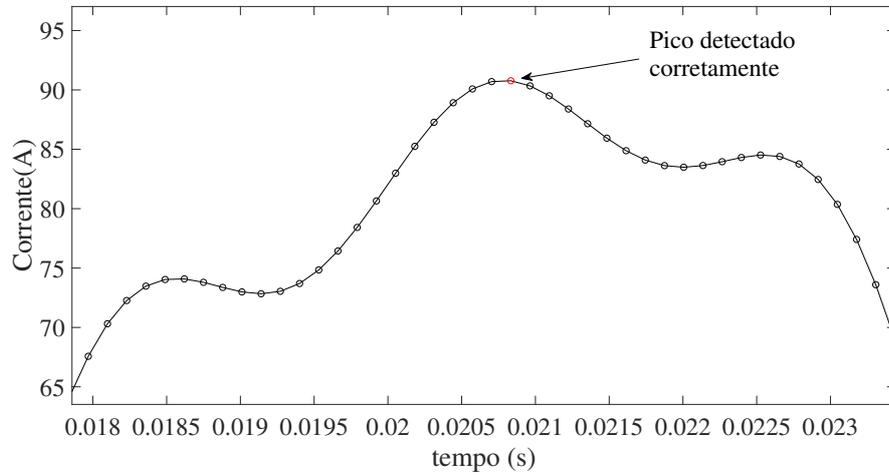
Fonte: Elaborado pelo autor.

Detectado um pico, começa o processo de detecção de *buildup*. Para isso, o valor da corrente de pico atual é comparada com a corrente de pico anterior, e as seguintes condições devem ser satisfeitas:

$$i_{pico}(atual) > i_{pico}(anterior) \quad (3.12)$$

$$\Gamma(i_{pico}(atual)) \neq \Gamma(i_{pico}(anterior)) \quad (3.13)$$

Em (3.13), o símbolo Γ é usado para representar uma função de arredondamento, de tal modo que, por exemplo, $\Gamma(3,6) = 4$. Essa função é usada para delimitar a partir

Figura 18 – Detecção de pico usando uma janela de $n/2+1$ elementos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

de qual intervalo de valores é possível considerar um crescimento significativo para um *buildup* e qual valor representa uma estabilização dos valores de corrente, característica pertencente a fase de *shoulder* da FAI.

Toda a vez que essas condições forem satisfeitas, o contador de *buildup* é incrementado. Porém, caso não seja detectado um crescimento entre os valores de corrente de um pico para o outro, o contador é zerado.

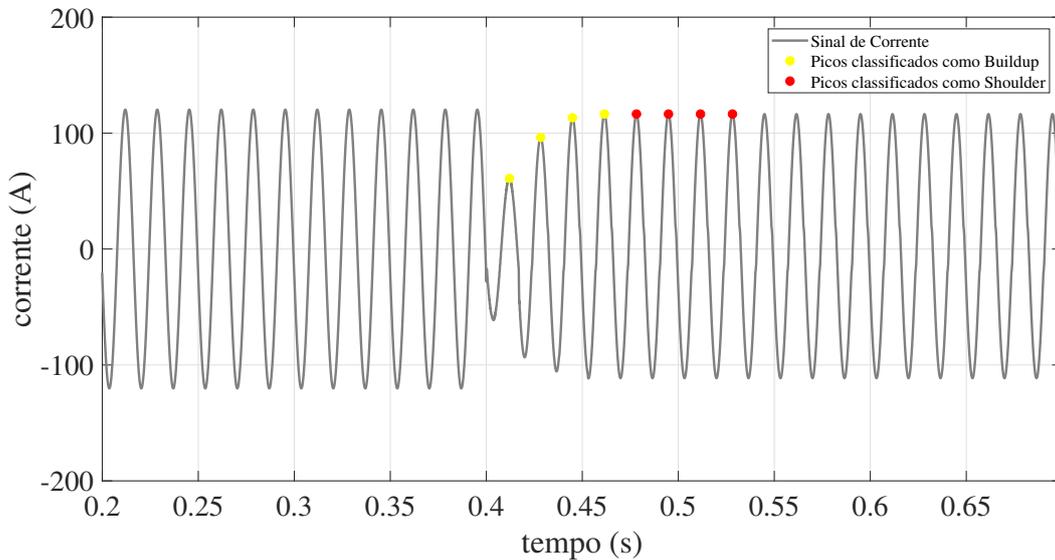
Quando o valor da contagem de *buildup* chega a três, então o contador de *shoulder* também é liberado, devendo satisfazer a condição, descrita em (3.14).

$$\Gamma(i_{pico}(atual)) = \Gamma(i_{pico}(anterior)) \quad (3.14)$$

Essa etapa segue a mesma lógica usada no passo anterior, tendo um acréscimo de 1 toda a vez que um pico é detectado como *shoulder* e zerando caso essa condição não seja satisfeita. Nesse caso, é preciso que o contador chegue ao valor 4 para que essa fase também seja concluída. Essas duas etapas são representadas na Figura 19.

Concluída a etapa de detecção do *buildup* e do *shoulder*, começa a fase de detecção do conteúdo harmônico de terceira ordem. Para isso, é usado um filtro de Fourier, no qual, para esse método, será importante apenas o valor do módulo da terceira harmônica, desconsiderando assim a fase. Esse é um bom parâmetro para ser analisado, pois, uma vez que a FAI normalmente envolve o aparecimento de um ou mais arcos elétricos, uma quantia considerável de terceira harmônica é introduzida no sinal de corrente. Isso ocorre, pois o arco só começa a conduzir corrente quando o sistema alcança o nível de tensão necessária para que haja o rompimento do dielétrico do ar e, então, a condução de corrente se estabeleça. Logo, até que tensão do sistema chegue a esse valor, a corrente é nula,

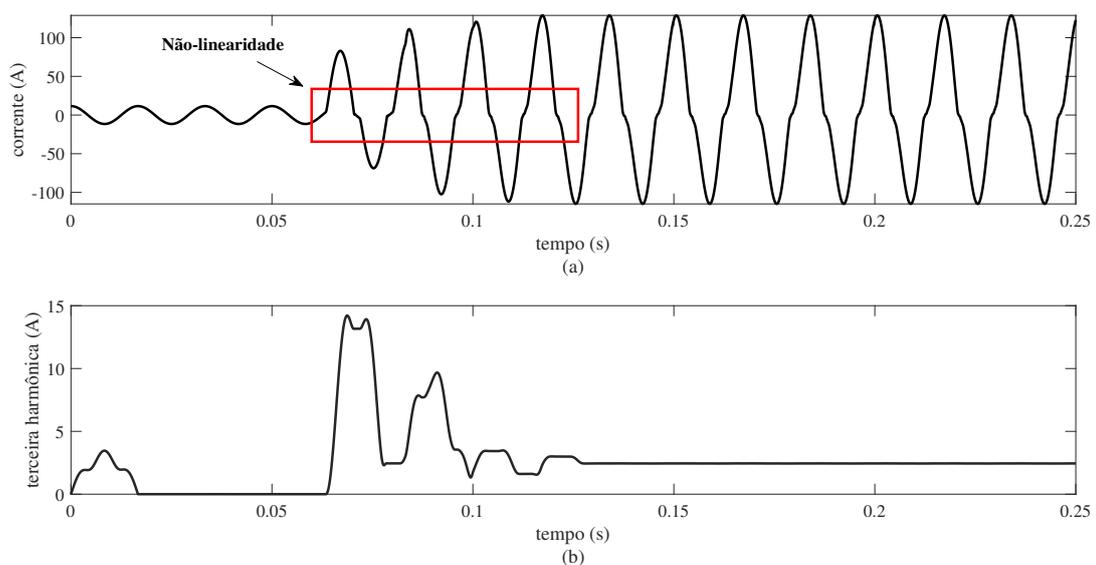
Figura 19 – Método classificando picos do sinal como sendo pertencentes as etapas de *buildup* ou de *shoulder*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

dando uma formato achatado a todo início e final de meio ciclo, causando assim esse comportamento não-linear na forma de onda. A Figura 20 apresenta a situação descrita acima e os valores de terceira harmônica presentes no sinal utilizado para a exemplificação do funcionamento da técnica.

Figura 20 – (a) Sinal de corrente de uma falta com arco elétrico. (b) Comportamento da terceira harmônica do sinal de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro passo é calcular os coeficientes do filtro de Fourier sintonizado na terceira harmônica, conforme (3.15) e (3.16).

$$Cf_c(a) = \frac{\sqrt{2}}{n} \cos\left(\frac{(a-1) \cdot 2o\pi}{n}\right) \quad (3.15)$$

$$Cf_s(a) = -\frac{\sqrt{2}}{n} \text{sen}\left(\frac{(a-1) \cdot 2o\pi}{n}\right) \quad (3.16)$$

Onde o é referente à ordem da harmônica e $a = 1 : n$.

Tendo os coeficientes, o próximo passo é colocar os valores de corrente em uma janela de n amostras, como mostrado em (3.17).

$$M(k) = \left[i(k-n) \quad i(k-n+1) \quad i(k-n+2) \quad \cdots \quad i(k) \right] \quad (3.17)$$

Com a janela definida, pode-se calcular os valores instantâneos dos coeficientes cosseno e seno para o sinal de corrente amostrado, de acordo com (3.18) e (3.19), respectivamente.

$$G_c(k) = Cf_c \cdot M(k)^T \quad (3.18)$$

$$G_s(k) = Cf_s \cdot M(k)^T \quad (3.19)$$

Uma vez obtidos os sinais instantâneos, o próximo passo é calcular o sinal complexo, dado por (3.20).

$$G(k) = G_c(k) + j \cdot G_s(k) \quad (3.20)$$

Como deseja-se saber apenas o comportamento do módulo da componente harmônica de terceira ordem, não se faz necessário o cálculo do ângulo do fasor ou a sua correção. Dessa forma, a saída do filtro será apenas:

$$G_m(k) = |G(k)| = \sqrt{(G_c(k))^2 + (G_s(k))^2} \quad (3.21)$$

Obtido o módulo da harmônica, esse resultado acaba sendo colocado em um outra janela móvel, conforme (3.22).

$$B(k) = \left[G_m(k-n) \quad G_m(k-n+1) \quad G_m(k-n+2) \quad \cdots \quad G_m(k) \right] \quad (3.22)$$

Por fim, os valores contidos nessa janela são arredondados e, se todos forem maiores ou iguais a um, então uma falta de alta impedância é detectada. Ainda, um fluxograma apresentando cada uma das etapas desse detector de FAI, é mostrado no Anexo A.

3.4 Considerações Finais

A detecção de FAIs foi objeto de estudo de muitos trabalhos, os quais buscavam, através do desenvolvimento de métodos para a classificação destas faltas, assegurar a integridade física de pessoas e animais, além da continuidade do serviço de energia. Nesse sentido, o presente Capítulo foi usado para a apresentação de um novo método, o qual consiste na análise das etapas de *buildup* e *shoulder*, bem como na análise da magnitude da harmônica de terceira ordem, que surgem nas formas de onda dos sinais de corrente em decorrência do arco elétrico.

No Capítulo seguinte, com o objetivo de validar o método proposto, é descrito o sistema teste onde, além da implementação de modelos de FAIs, também foram simulados outros transitórios que são comuns aos sistemas elétricos de distribuição. Os resultados obtidos da aplicação do método proposto aos sinais de corrente resultantes dessas simulações, também são apresentados e discutidos.

4 SISTEMA TESTE E SIMULAÇÕES

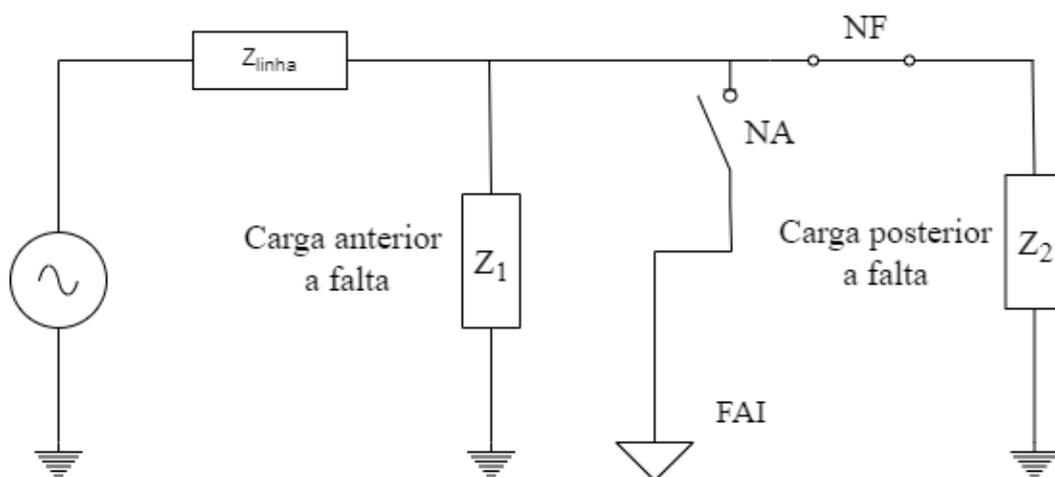
4.1 Considerações Gerais

Nesse Capítulo, é apresentado o sistema teste utilizado para realizar as simulações em ATPDraw, além dos esquemas desenvolvidos para a simulação de diferentes transitórios como: entrada e saída de carga, energização de transformador, chaveamento de banco de capacitores e diferentes tipos de curto-circuito. Ainda, é apresentada a forma como foram implementados os modelos de arco elétrico para FAI e os sinais resultantes da simulações desses modelos vistos da subestação.

4.2 Sistema Teste

O sistema teste utilizado, foi desenvolvido de modo que pudesse simular um sistema radial de distribuição, bem como o comportamento resultante da desconexão de carga em função do rompimento do cabo durante a ocorrência de uma FAI. Para isso, foram utilizadas duas cargas nas quais, entre elas, foram colocados os modelos de falta de alta impedância. Dessa forma, uma das cargas simula aquela parcela que não é afetada pela falta e a outra, simula a parcela para a qual houve perda da continuidade. Além disso, existe também a possibilidade de simular situações onde a falta ocorre no final do alimentador e, portanto, não havendo cargas a serem desconectadas ou existindo parcelas de carga tão pequenas que podem ser desprezadas. Uma representação dos sistema teste usado é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Sistema teste utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema teste é um alimentador de 13,8 kV com estruturas de sustentação meio beco, cujos dados de sua geometria aparecem representados na Tabela 1, onde H é a altura do ponto de fixação do condutor na estrutura e H_{mid} é a altura média de implantação da linha. A corrente nominal drenada pelas cargas é de 120 A por fase, com um fator de potência em atraso de 0,95.

Para a simulação da impedância da linha, foi utilizado o modelo LCC, o qual tem como entrada os parâmetros do alimentador e do condutor. O condutor escolhido para a simulação foi o 3/0 AWG e os seus dados utilizados estão representados na Tabela 2, onde R_{CC} é valor da resistência para uma corrente contínua, ρ é a resistividade do material que compõe o condutor, r_{int} é o raio interno e r_{total} é o raio total do condutor.

Tabela 1 – Geometria do Alimentador de Distribuição

Geometria do Alimentador de Distribuição				
Fase	Distância Horizontal (m)	H (m)	Hmid (m)	
A	-1,28	10,05	8,6	
B	0	10,05	8,6	
C	0,64	10,05	8,6	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Características do condutor 3/0 AWG.

Características do condutor 3/0 AWG			
R_{CC} (ohm/km)	ρ(ohm.m)	r_{int}(cm)	r_{total}(cm)
0,4741	2,92E-8	0,2125	0,4247

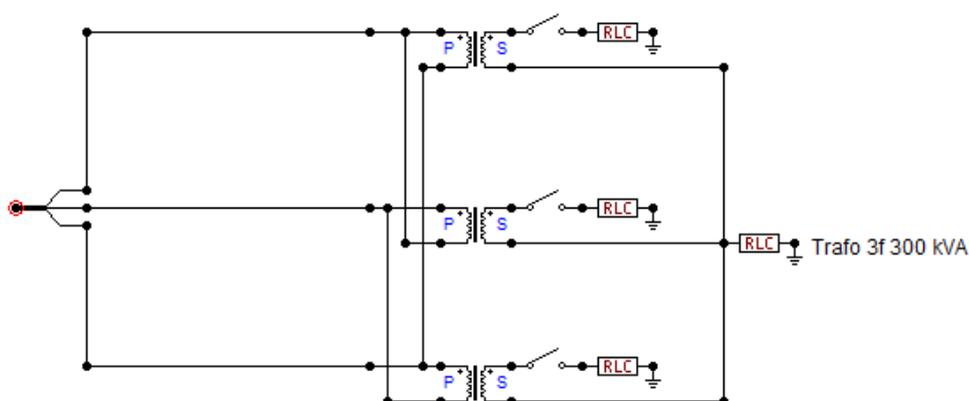
Fonte: Elaborado pelo autor.

Além de simular as FAIs, outros transitórios como entrada do banco de capacitores, energização de transformadores, entrada e saída de carga e curtos-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos, também foram simulados.

Para a simulação do transformador trifásico, foram utilizados três transformadores monofásicos de 100 kVA conectados em Y, de modo a simular um transformador trifásico de 300 kVA. Além disso, foram colocadas algumas cargas no lado de baixa tensão do transformador, para que ele não precisasse funcionar a vazio. O esquema montado para a simulação do trafo segue na Figura 22 e os parâmetros usados tanto para cada um dos transformadores monofásicos, como também para as cargas seguem nas Figuras 23 e 24, respectivamente.

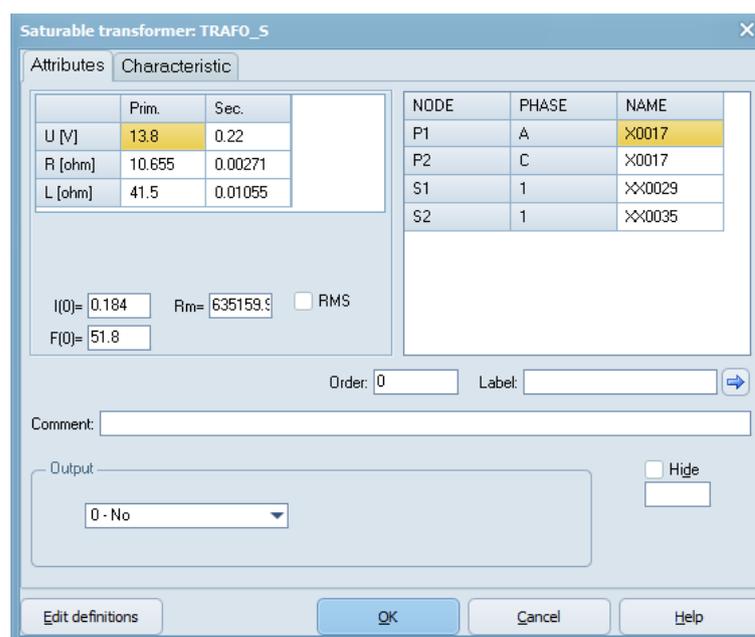
Para a simulação do chaveamento do banco de capacitores, foi utilizado um capacitor trifásico com uma susceptância capacitiva de 1575,3 μS . Já para a simulação de entrada e saída de carga, foram utilizados 100 Ω de resistência e 200 Ω de reatância indutiva.

Figura 22 – Transformador 300 kVA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Parâmetros de cada transformador monofásico.

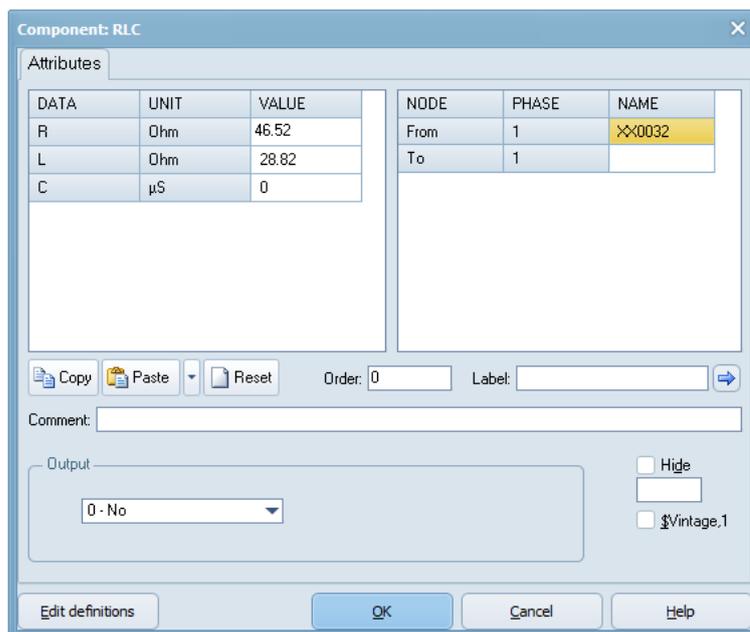


Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da simulação dos curtos-circuitos, todos eles foram modelados de forma que fossem francos e para que fosse possível escolher qual das fases estaria sob falta, principalmente nos casos das faltas monofásicas e bifásicas, para os quais foi criado um esquema de controle, de modo que fosse possível escolher em quais das fases eles ocorreriam.

Na Figura 25, é mostrado esse esquema de controle para os curto-circuito monofásicos e bifásicos. Já na Figura 26, é mostrado o código inserido no bloco *MODELS* para o controle das faltas monofásicas e bifásicas.

Figura 24 – Parâmetros de cada carga do transformador monofásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Esquemas construídos para a simulação dos curtos-circuitos.



(a) Esquema para o curto-circuito monofásico. (b) Esquema para o curto-circuito bifásico.

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Modelos Computacionais de Arcos Elétricos Utilizados para a Simulação da FAI

Para as simulações de FAIs realizadas nesse trabalho, foram utilizados três modelos computacionais de arco elétrico. Uma vez que cada tipo utiliza uma modelagem diferente, a forma como o *buildup* e o *shoulder* ocorrem, bem como o comportamento da sua terceira harmônica irão variar, o que permite testar o método de detecção para um número mais abrangente de casos. Os três modelos apresentados foram modificados, tomando como base as alterações realizadas por Nakagomi (2006) no trabalho de Nam *et al.* (2001), o qual

Figura 26 – Código para a escolha da fase onde ocorrerá a falta.

```

1 | MODEL mono_control
2 |
3 | DATA faseA (DFLT:0)
4 | faseB (DFLT:0)
5 | faseC (DFLT:0)
6 | OUTPUT chave1, chave2, chave3
7 | VAR chave3, chave2, chave1
8 | INIT
9 | chave1:=0
10 | chave2:=0
11 | chave3:=0
12 |
13 | ENDINIT
14 | EXEC
15 |
16 | IF faseA = 1 and faseB = 0 and faseC = 0 then
17 |
18 | chave1:=1
19 | chave2:=0
20 | chave3:=0
21 |
22 | ELSIF faseA = 0 and faseB = 1 and faseC = 0 then
23 | chave1:=0
24 | chave2:=1
25 | chave3:=0
26 |
27 | ELSIF faseA = 0 and faseB = 0 and faseC = 1 then
28 | chave1:=0
29 | chave2:=0
30 | chave3:=1
31 |
32 |
33 | ENDIF
34 |
35 |
36 |
37 |
38 | ENDEXEC
39 | ENDMODEL

```

```

1 | MODEL bifasica_control
2 |
3 | DATA faltaAB (DFLT:0)
4 | faltaBC (DFLT:0)
5 | faltaCA (DFLT:0)
6 | OUTPUT chave1, chave2, chave3
7 | VAR chave3, chave2, chave1
8 | INIT
9 | chave1:=0
10 | chave2:=0
11 | chave3:=0
12 |
13 | ENDINIT
14 | EXEC
15 |
16 | IF faltaAB = 1 and faltaBC = 0 and faltaCA = 0 then
17 |
18 | chave1:=1
19 | chave2:=0
20 | chave3:=0
21 |
22 | ELSIF faltaAB = 0 and faltaBC = 1 and faltaCA = 0 then
23 | chave1:=0
24 | chave2:=1
25 | chave3:=0
26 |
27 | ELSIF faltaAB = 0 and faltaBC = 0 and faltaCA = 1 then
28 | chave1:=0
29 | chave2:=0
30 | chave3:=1
31 |
32 |
33 | ENDIF
34 |
35 |
36 |
37 |
38 | ENDEXEC
39 | ENDMODEL

```

(a) Código para falta monofásica.

(b) Código para falta bifásica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

adaptou o modelo de FAI de modo que fosse possível simular situações onde há desconexão de carga.

4.3.1 Modelo de NAM (FAI 1)

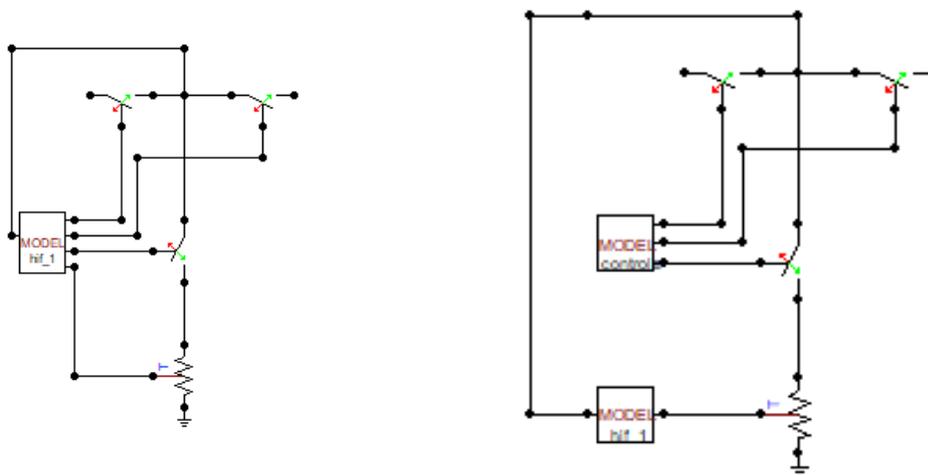
O primeiro modelo implementado é o próprio modelo aperfeiçoado por Nakagomi (2006). Entretanto, para que ficasse condizente com os demais, o controle das chaves que modelam a queda da linha e o controle da resistência variável foram separados em dois blocos *MODELS*. Na Figura 27, observa-se o antes e depois do modelo após a separação dos blocos. Já Figura 28, é apresentado o código usado para a simulação do rompimento da linha, o qual também se repetirá para os demais modelos. No campo *DATA*, os valores de entrada do bloco *MODELS* são definidos como sendo o instante no qual ocorre a falta, a consideração que será feita sobre a queda, as quais estão melhor descritas na Tabela 3, o intervalo de tempo entre cada amostra e a altura do ponto de fixação dos condutores nos postes, no trecho onde a FAI ocorre.

Tabela 3 – Tabela com a consideração de falta relativa a cada valor de entrada.

Entrada	Consideração a respeito da queda
consid_queda = 0	Não há o rompimento do cabo
consid_queda = 1 e h = 0	Rompimento sem considerar o tempo de queda
consid_queda = 1 e h > 0	Rompimento considerando o tempo de queda

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 27 – Modelo de FAI 1.



(a) Antes da modificação.

(b) Depois da modificação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso o valor de entrada para a consideração de queda seja o valor dois, é usada a Equação 4.1 para calcular o tempo de queda usando a altura H dos postes:

$$t_{queda} = \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (4.1)$$

O tempo da simulação onde o cabo entrará em contato com o solo será a soma do instante onde ocorre a falta (t_{insF}) com o tempo de queda do condutor como descrito em (4.2).

$$t_{solo} = t_{insF} + t_{queda} \quad (4.2)$$

Além disso, as chaves S_1 , S_2 e S_3 são, respectivamente, as chaves que simulam a queda do condutor no lado da fonte, a queda do condutor do lado da carga e o contato do condutor com o solo.

O sinal de corrente visto pela subestação é simulado considerando as diferentes condições de queda propostas. A Figura 29 apresenta uma forma de onda gerada para a situação onde se desconsidera tanto a queda do condutor, quanto o seu rompimento. Já a Figura 30, desconsidera apenas o tempo de queda do condutor e, por fim, a Figura 31 considera tanto o tempo de queda, quanto o rompimento do mesmo.

Figura 28 – Código para o controle de queda do condutor.

```

MODEL controle_de_queda

DATA insF, consid_queda, dt, h
OUTPUT s1, s2, s3
VAR s1,s2,s3, timex, t_queda

INIT
  s1:=1, s2:=1, s3:=0, timex:=0
ENDINIT
EXEC

  t_queda := sqrt((2*h)/9.8)

  if consid_queda = 0 and timex>=insF then
    s1:=1
    s2:=1
    s3:=1

    elseif consid_queda=1 and timex>=insF then

  if timex>=insF and timex<=(insF+t_queda) and h>0 then

    s1:=1
    s2:=0
    s3:=0

    elseif timex>=(insF+t_queda) then

      s1:=1
      s2:=0
      s3:=1
    endif
  endif
  timex := timex + dt

ENDEXEC
ENDMODEL

```

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3.2 Modelo de Torres (FAI 2)

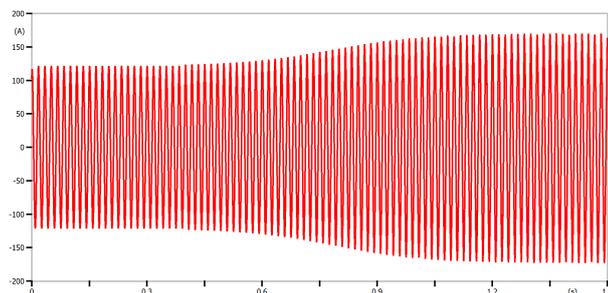
O outro modelo de arco implementado, foi o desenvolvido por Torres *et al.* (2014), o qual se baseou nos modelos de arco elétrico desenvolvidos por Cassie e Mayr. Esse modelo também usa uma resistência variável controlada por TACS e também foi adaptado, de modo a simular situações de rompimento e queda do condutor como apresentado na Figura 32.

Os sinais de corrente gerados para cada uma das considerações possíveis aparecem nas Figuras 33, 34 e 35.

4.3.3 Modelo de Sedighi (FAI 3)

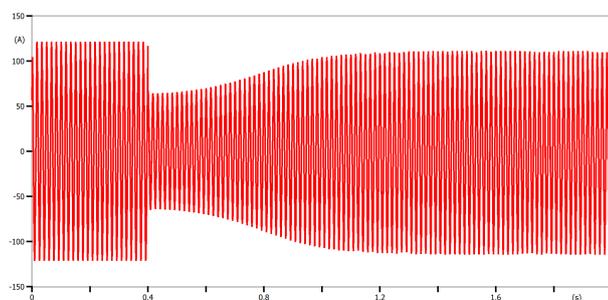
O terceiro modelo de arco implementado foi desenvolvido por Sedighi (2014) e envolve cinco modelos Emanuel conectados em paralelo, os quais vão sendo conectados

Figura 29 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 1 sem considerar o rompimento do condutor.



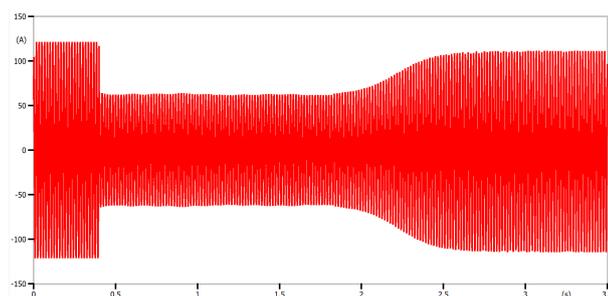
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 30 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 1 considerando o rompimento.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

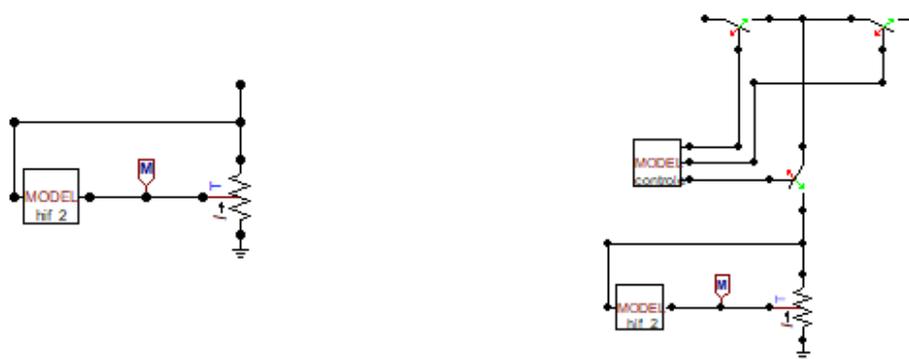
Figura 31 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 1 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

a partir de chaves estatísticas. Conforme cada arco elétrico vai sendo estatisticamente conectado no sistema, a corrente da falta vai gradativamente crescendo, simulando assim um comportamento de *buildup*, até o instante em que todos os arcos estão conectados, simulando assim o estágio de *shoulder*. Esse modelo é apresentado na Figura 36, antes e depois de ser acrescentado o controle de queda do cabo. A Tabela 4 apresenta os valores usados para cada uma das resistências e das fontes de tensão do modelo computacional.

Figura 32 – Modelo de FAI 2.

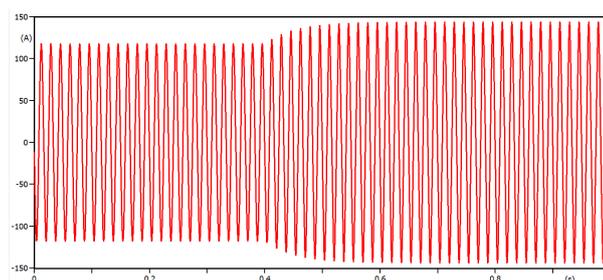


(a) Antes da modificação.

(b) Depois da modificação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 2 sem considerar o rompimento.

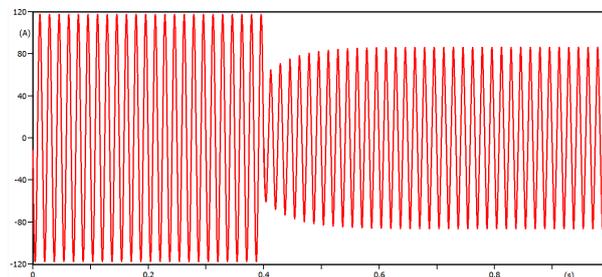


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para cada uma das chaves estatísticas, foi colocado um valor de tempo médio de fechamento, o qual teria um desvio padrão de 0,0033 usando a curva gaussiana. Esses valores foram retirados tendo como base os valores de tempo apresentados no artigo original, somado com o valor no qual começaria a falta, uma vez que o autor original considerou a falta como começando em $t=0$.

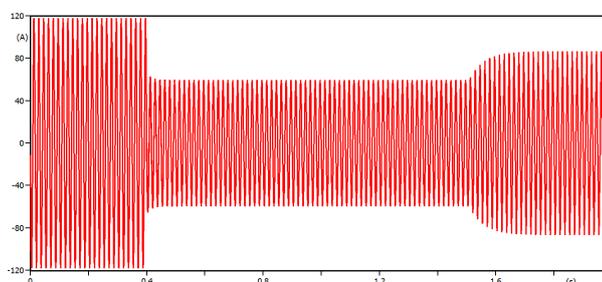
Dessa forma, os valores de tempo médio de fechamento das chaves ficaram definidos como apresentados na Tabela 5. Como esse modelo apresenta variações nos valores das resistências e nas fontes CC para cada um dos cinco terrenos, nas Figuras 37, 38 e 39, são mostrados os sinais de corrente vistos da subestação apenas para o terreno 3.

Figura 34 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 2 considerando o rompimento.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 35 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 2 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 4 – Geometria do Alimentador de Distribuição.

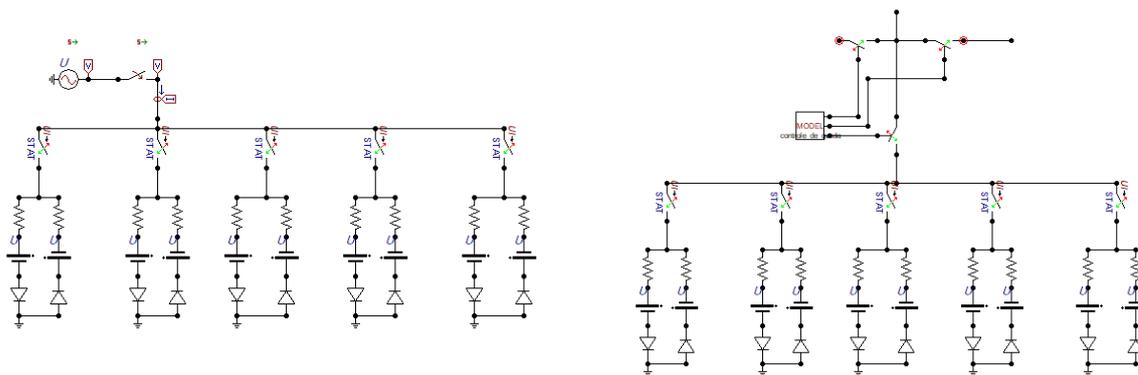
Parâmetro	Arco				
	1	2	3	4	5
R_p	500	2000	2500	1800	1000
R_n	505	2050	2550	1900	1050
V_p	900	2500	3000	11000	1000
V_n	1000	2700	3200	11500	1100

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Considerações Finais

Nesse Capítulo, foi apresentado o sistema teste e os eventos simulados para a validação da metodologia proposta, além dos modelos de arco elétrico e as suas respectivas formas de onda vistas da subestação. Além disso, também foram apresentados cada um dos parâmetros que foram utilizados para a realização dessas simulações, bem como os códigos usados. No Capítulo seguinte, são apresentados os resultados obtidos ao aplicar a

Figura 36 – Modelo de FAI 3.



(a) Antes da modificação.

(b) Depois da modificação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

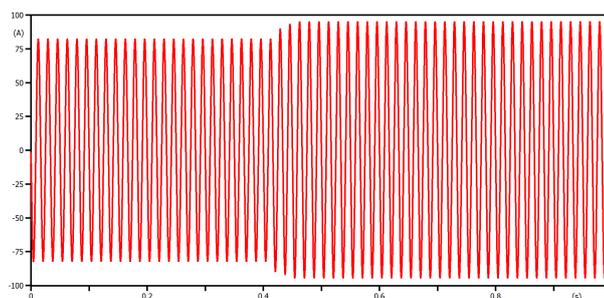
metodologia proposta, tanto para cada um dos modelos de arco elétrico implementados, quanto para os demais eventos como: entrada e saída de carga, chaveamento do banco de capacitores, energização de transformadores e curtos-circuitos monofásico, bifásicos e trifásicos.

Tabela 5 – Valores de tempos médios de fechamento usados para as simulações.

Arco	Tempo médio de abertura e fechamento
1	$t_1 = t_{arc}$
2	$t_2 = t_1 + 0,018$
3	$t_3 = t_2 + 0,015$
4	$t_4 = t_3 + 0,02$
5	$t_5 = t_1 + 0,02$

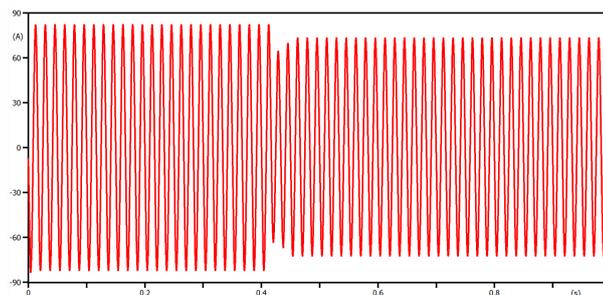
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 3 sem considerar o rompimento.



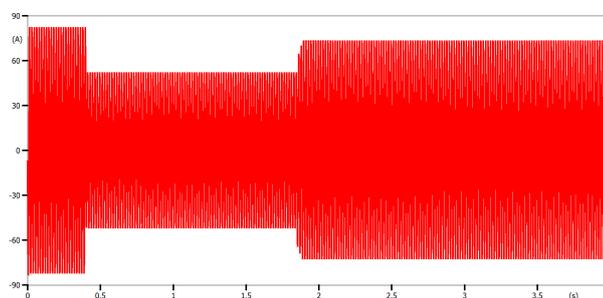
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 38 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 3 considerando o rompimento.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 39 – Forma de onda de um sinal de corrente para a FAI 3 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Considerações Gerais

Para fins de validação do método proposto, os modelos de FAI apresentados nesse trabalho foram simulados para distintos valores de carga Z_1 e Z_2 , os quais são apresentados na Tabela 6. Esses valores de impedância foram variados para testar o comportamento do método para diferentes quantidades de carga desconectadas e foram usados tanto em simulações que não consideram o tempo de queda do condutor, quanto para as que consideram.

Tabela 6 – Valores de resistência e reatância para cada porcentagem de desconexão de carga.

R1	X1	R2	X2	Carga desconectada
97,50777778	32,04888889	877,57000000	288,44000000	10%
109,69625000	36,05500000	438,78500000	144,22000000	20%
125,36714286	41,20571429	292,52333333	96,14666667	30%
146,26166667	48,07333333	219,39250000	72,11000000	40%
175,51400000	57,68800000	175,51400000	57,68800000	50%

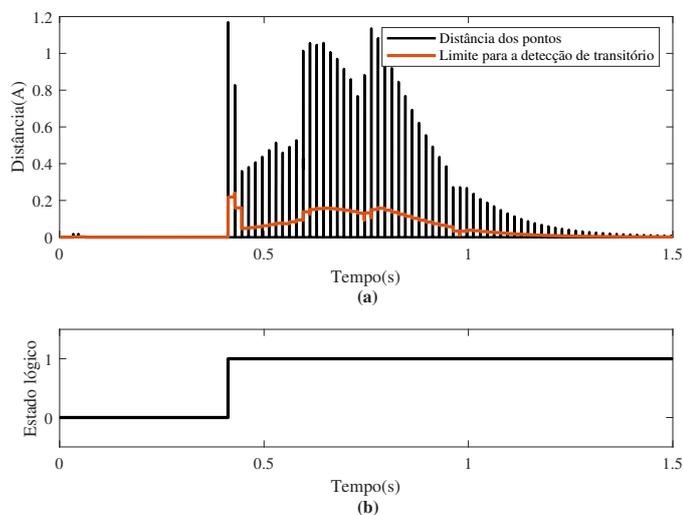
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Resultados da metodologia para a FAI 1

Primeiramente, para testar a metodologia proposta, foi usado o modelo de arco 1 em uma situação de FAI onde não há o rompimento do cabo. A Figura 40 apresenta o instante onde o transitório é detectado. Como pode ser visto, o método rapidamente é capaz de detectar a ocorrência de qualquer alteração no comportamento do sinal quase que instantaneamente. Além disso, mesmo a alteração no sinal sendo mínima e gradual, o método consegue detectá-la, permitindo assim que transitórios causados por FAIs com etapas de *buildup* mais duradouras e que oferecem alterações menos abruptas no sinal também possam ser detectados.

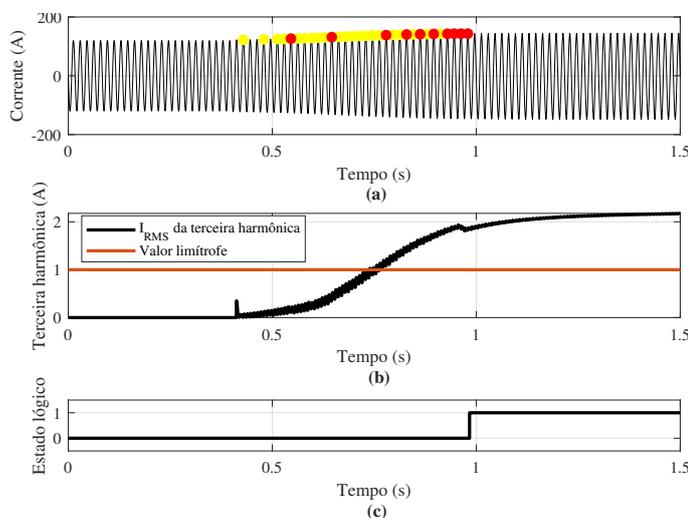
Após detectado o transitório, começa o processo de detecção da FAI. Como pode-se ver na Figura 41, a etapa de *buildup* é suave e gradual, o que leva ao método a detectar vários picos de *buildup* antes de começar a achar os picos que representam a etapa de *shoulder*. Uma vez satisfeitas as condições para o *buildup* e o *shoulder*, o método começa a analisar se a componente harmônica de terceira ordem atende as condições necessárias para a detecção da FAI. Pode-se observar na figura anteriormente mencionada, que a magnitude da terceira harmônica é maior que o valor limítrofe estipulado, levando assim à detecção da FAI em de 0,5882 segundo após o início da falta.

Figura 40 – FAI 1 sem considerar o rompimento: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 41 – FAI 1 sem considerar o rompimento do condutor: Detecção da FAI. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.



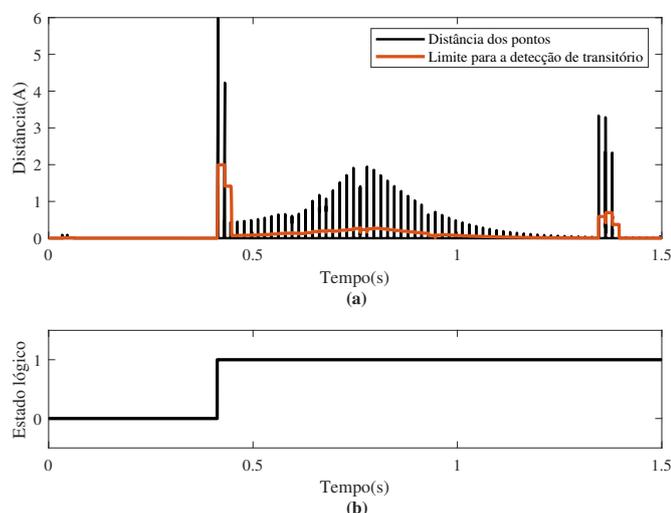
Fonte: Elaborado pelo Autor.

O segundo caso analisando também envolve o modelo de arco 1 em uma situação onde há o rompimento do cabo, mas que o seu tempo de queda é desprezado, ou seja, considera-se que o processo de *buildup* acontece imediatamente após a descontinuidade ocorrida em função da desconexão de 50% da carga.

A detecção de transitório para este caso se dá de forma muito semelhante ao primeiro, o que já era um resultado esperado, uma vez que, além das próprias características do arco elétrico, nesse caso, também há a descontinuidade causada pelo rompimento do condutor,

como pode ser visto na Figura 42.

Figura 42 – FAI 1 considerando apenas o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em relação a detecção da FAI, o comportamento é muito semelhante ao caso anterior. Porém, uma vez que houve uma desconexão de carga, a característica de buildup se torna mais evidente para o código. Isso ocorre porque, no instante em que a corrente drenada é menor, a contribuição de corrente resultante da FAI se torna muito mais significativa, ficando assim muito mais nítida no sinal. Essa situação aparece na Figura 43. O tempo de detecção para esse caso foi de 0,6544 segundo.

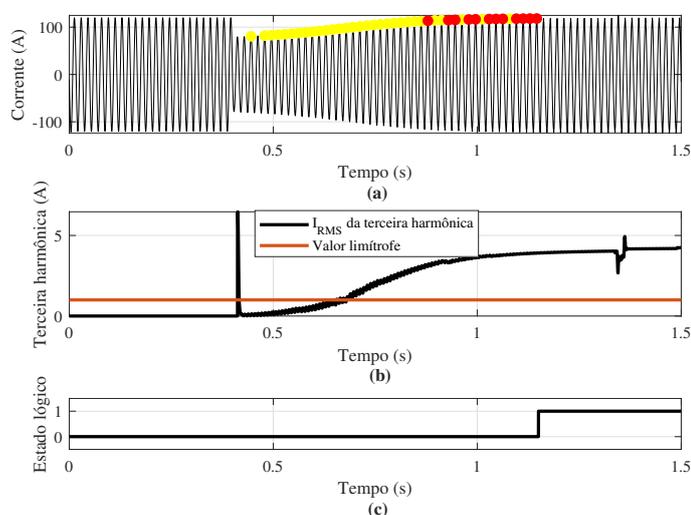
Outro caso analisado para o modelo de arco 1 é o que considera não somente o rompimento do cabo, mas também o seu tempo de queda, o qual está representado na Figura 44 para a desconexão de 50% da carga. Como esse modelo simula o tempo que o condutor leva para alcançar o chão, o transitório é detectado alguns segundos antes de o próprio arco elétrico se iniciar, já que o rompimento do cabo é o suficiente para disparar o detector de transitórios.

No caso do detector de FAI, pode-se ver que o mesmo tem um ótimo desempenho para esse tipo de situação, não somente detectando a FAI, como também classificando perfeitamente quais picos fazem parte das etapas de *buildup* e *shoulder*. Essa detecção é mostrada na Figura 45, a qual aconteceu de 2,0044 segundos após o início do evento.

5.3 Resultados da metodologia para a FAI 2

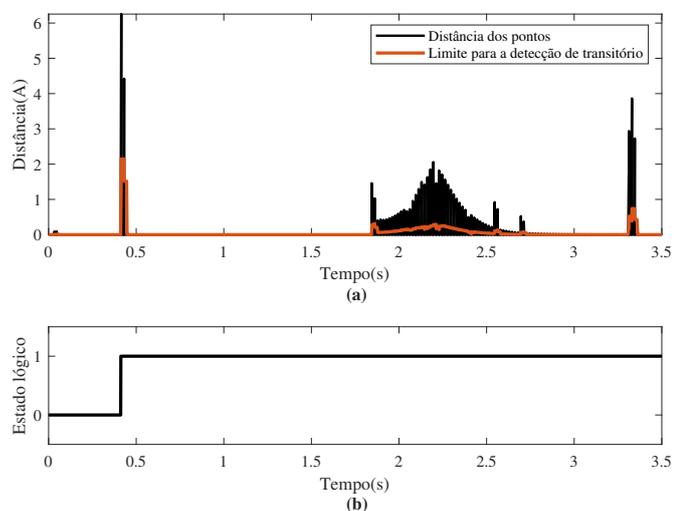
Para o modelo de arco 2, tem-se uma duração de *buildup* consideravelmente menor em relação ao modelo 1, exigindo que o método identifique em poucos picos se esta fase está

Figura 43 – FAI 1 considerando apenas o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 44 – FAI 1 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.

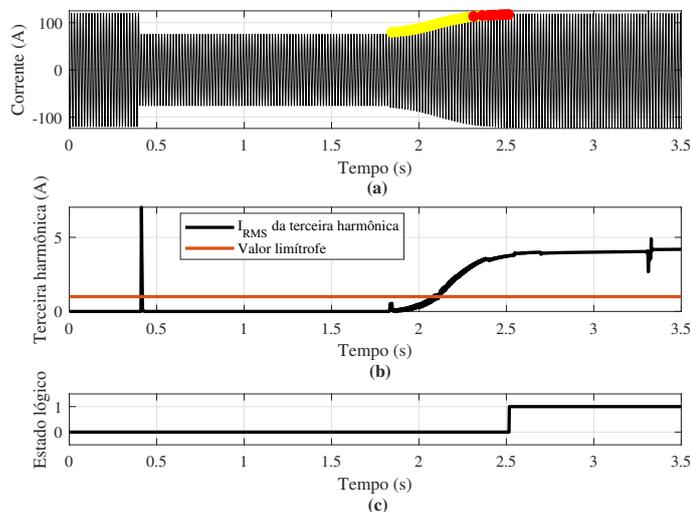


Fonte: Elaborado pelo Autor.

acontecendo. Após o transitório detectado na Figura 46, o método prontamente começa a contar os picos onde ocorre o *buildup* e, após isso, os picos onde ocorre o *shoulder*. Tendo esses elementos sido devidamente identificados, começa a análise do conteúdo harmônico de terceira ordem, resultando na detecção da FAI para esse caso. O tempo de detecção foi de 0,1389 segundo após o início do evento, o quê é apresentado na Figura 47.

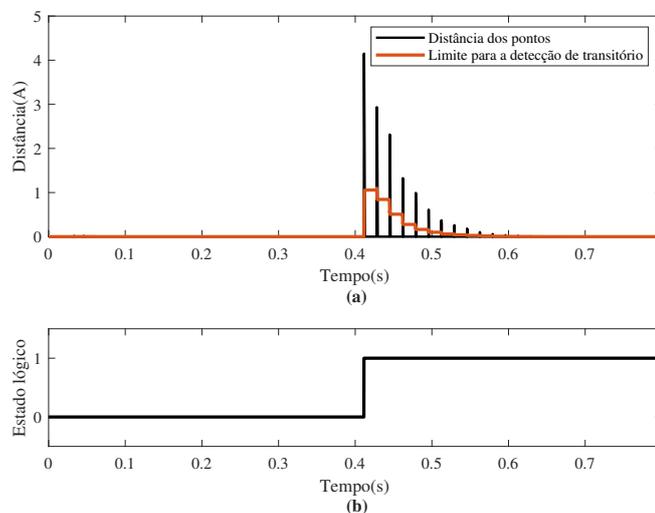
Para o caso do modelo de arco 2, onde se considera apenas o rompimento do cabo,

Figura 45 – FAI 1 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

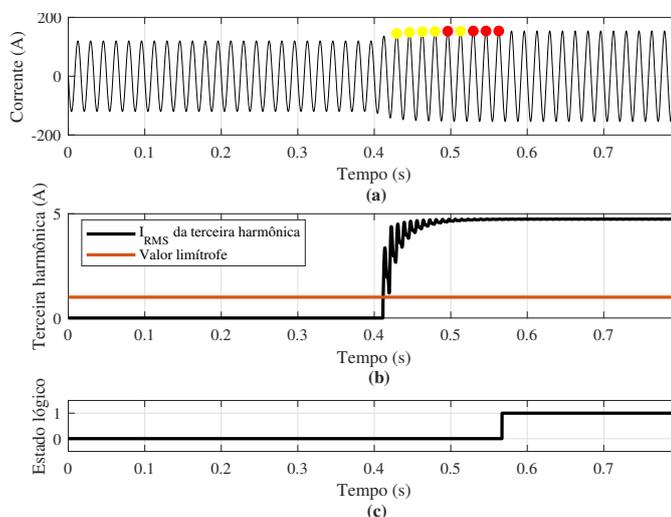
Figura 46 – FAI 2 sem considerar o rompimento do condutor: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

a detecção do transitório é apresentada na Figura 48 e a detecção da FAI, na Figura 49. No caso da detecção da FAI, pode-se notar que, por pouco, ela não é detectada logo após a fase de *buildup*, já que o contador de *shoulder* não chegou a 4 no primeiro bloco de picos classificados como *shoulder*. Entretanto, como a metodologia zera os valores se o contador é interrompido, o que aconteceu nesse caso, por uma detecção de *buildup* inesperada, então a contagem se inicia do zero. Isso não é um problema, uma vez que, após isso, a falta entra

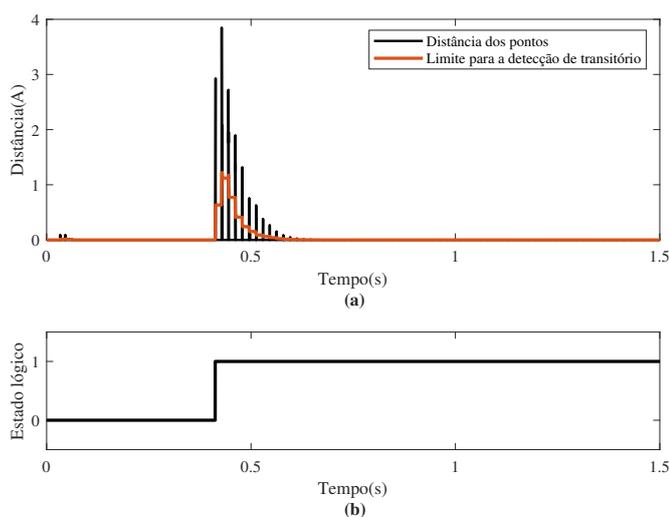
Figura 47 – FAI 2 sem considerar o rompimento do condutor: Detecção da FAI. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

em regime e os picos são detectados mesmo assim. Além disso, estes picos são corretamente classificados como *shoulder*. Logo, na verdade, isso funciona como um uma garantia a mais, evitando detecções erradas devido a um acumulo nos contadores de *buildup* ou *shoulder*. Para esse caso, o tempo de detecção foi de 0,1711 segundo.

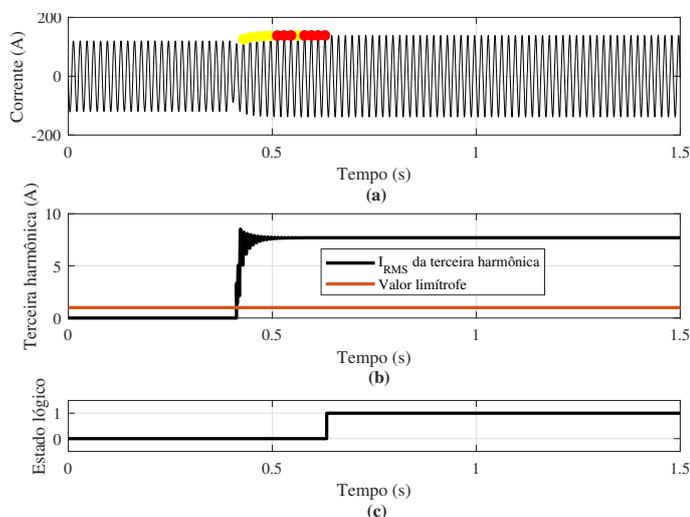
Figura 48 – FAI 2 considerando o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para os casos onde é considerado o rompimento do condutor, pode-se notar que o transitório também é detectado bem antes do cabo entrar em contato com o solo, como

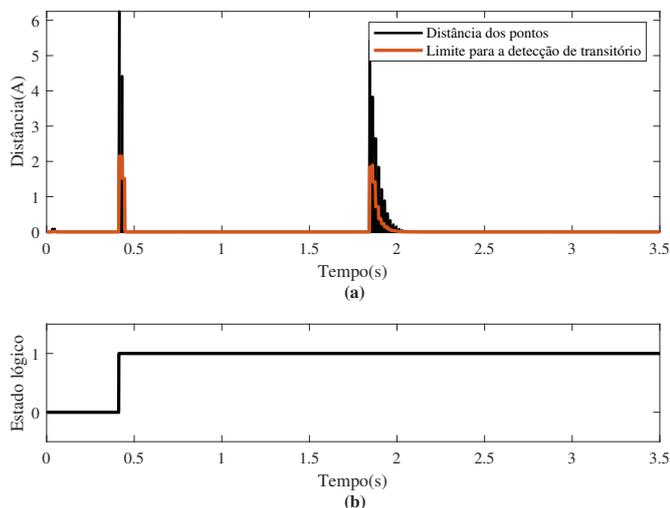
Figura 49 – FAI 2 considerando o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

mostrado na Figura 50.

Figura 50 – FAI 2 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.

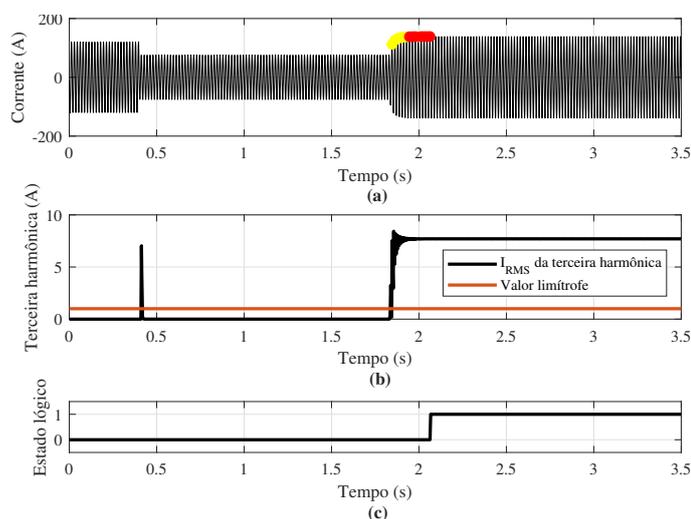


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para a detecção da FAI, o método classifica perfeitamente quais picos estão na fase de *buildup* e quais estão na fase de *shoulder*. Além disso, devido ao considerável conteúdo harmônico resultante do arco elétrico, os valores para a terceira harmônica também ficam acima do valor limítrofe, classificando assim esse transitório como proveniente de uma

falta de alta impedância. Essa constatação é apresentada na Figura 51, a qual demonstra que a FAI foi detectada 1,6045 segundos, após a incidência do evento.

Figura 51 – FAI 2 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.4 Resultados da metodologia para a FAI 3

Para o modelo de arco 3, a etapa de *buildup* também é pouco evidente em duração e em magnitude, se comparada com a do modelo 1, necessitando, assim, que o detector de transitório atue rapidamente, de forma que a fase de *buildup* já não tenha acontecido quando o detector de picos começar a procurar.

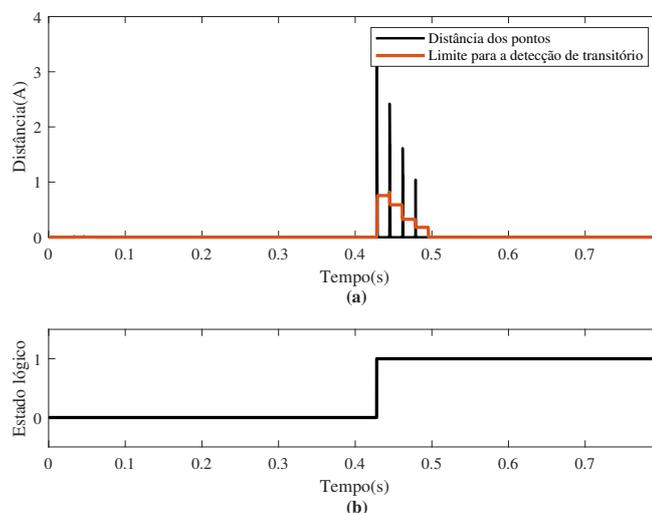
A Figura 52 apresenta a detecção de transitório feita para esse caso, cujo o tempo de detecção foi de apenas alguns milisegundos.

Já para a detecção da FAI, Figura 53, embora o *buildup* fosse pouco significativo, o método conseguiu detectar efetivamente, tanto as etapas de *buildup* quanto de *shoulder* e o tempo de detecção foi de 0,1053 segundo, após o início do evento.

Para a situação onde é considerado apenas o rompimento do cabo, a detecção de transitório é apresentada na Figura 54 e a detecção da FAI na Figura 55. Nesse caso, a classificação ocorre 0,1207 segundo após o início da falta.

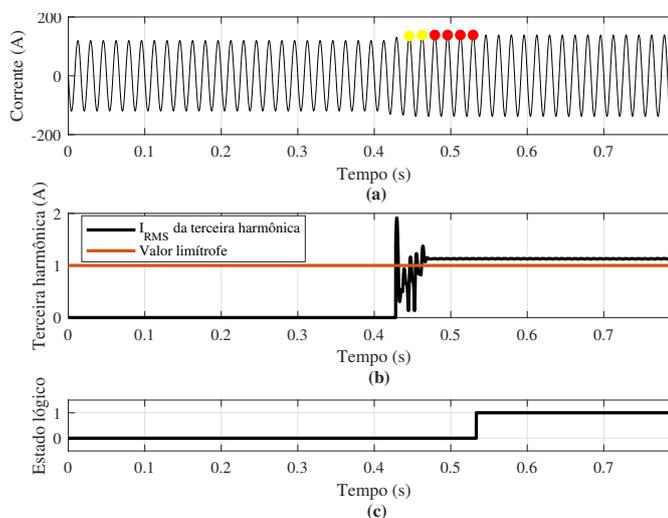
Por fim, foi simulado o modelo de arco 3, considerando tanto o rompimento, quanto o tempo de queda do condutor. Os resultados para a detecção do transitório e para a detecção da FAI são mostrados nas Figuras 56 e 57, com um tempo de detecção de 1,6206 segundo após o início do evento.

Figura 52 – FAI 3 sem considerar o rompimento do condutor: detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 53 – FAI 3 sem considerar o rompimento do condutor: Detecção da FAI. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.



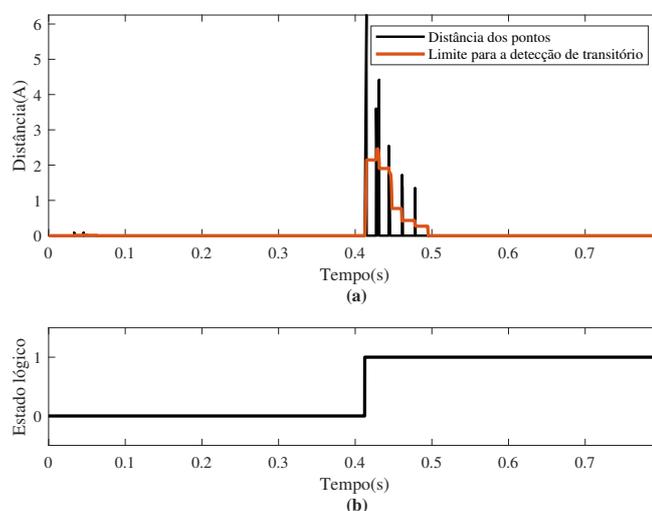
Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.5 Aplicação da metodologia para outras ocorrências do sistema

Além dos casos de falta de alta impedância analisados anteriormente, também foram usados outros transitórios do sistema elétrico de potência para testar a metodologia.

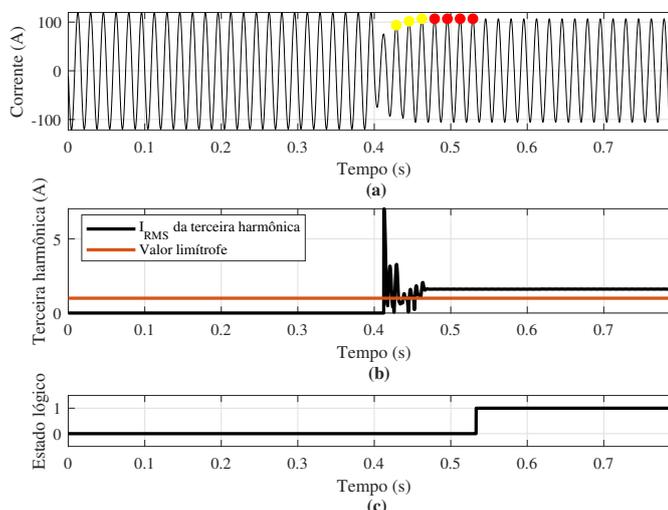
O primeiro transitório analisado, foi o da energização de transformadores. A Figura 58 mostra o instante em que o transitório é identificado. Porém, como pode ser visto na Figura 59, o detector de falta não atua para essa situação. Isso ocorre porque essa

Figura 54 – FAI 3 considerando o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 55 – FAI 3 considerando o rompimento do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.

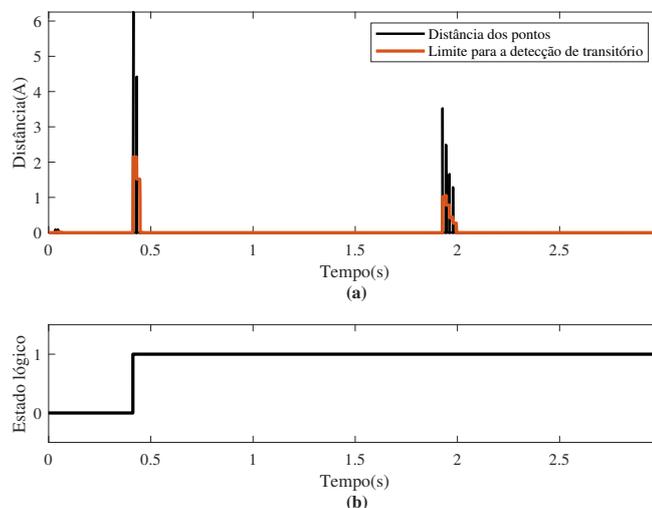


Fonte: Elaborado pelo Autor.

ocorrência não apresenta um crescimento gradual, o que seria a primeira etapa para começar a classificação da falta como FAI. Uma vez que é necessário que um *buildup* seja identificado, para, só assim, o método passar para as próximas etapas, a detecção não ocorre para esse caso.

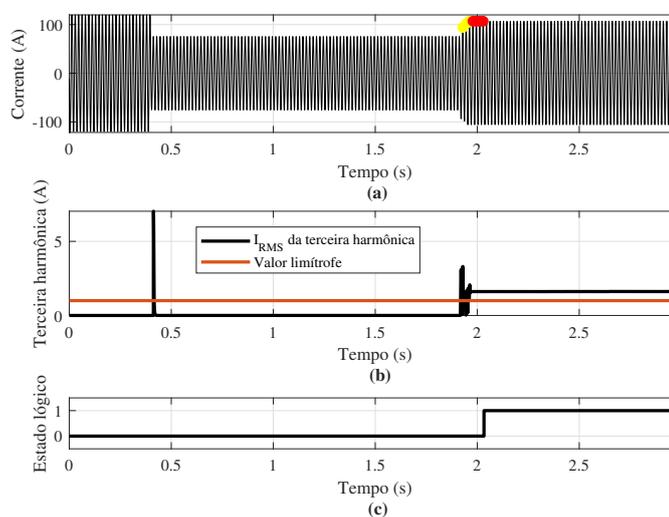
Outro evento para o qual o método foi testado, foi o chaveamento do banco de capacitores. Na Figura 60, pode-se notar que ele é identificado como um transitório, porém,

Figura 56 – FAI 3 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de transitório. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 57 – FAI 3 considerando o rompimento e o tempo de queda do condutor e desconexão de 50% da carga: Detecção de FAI. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.

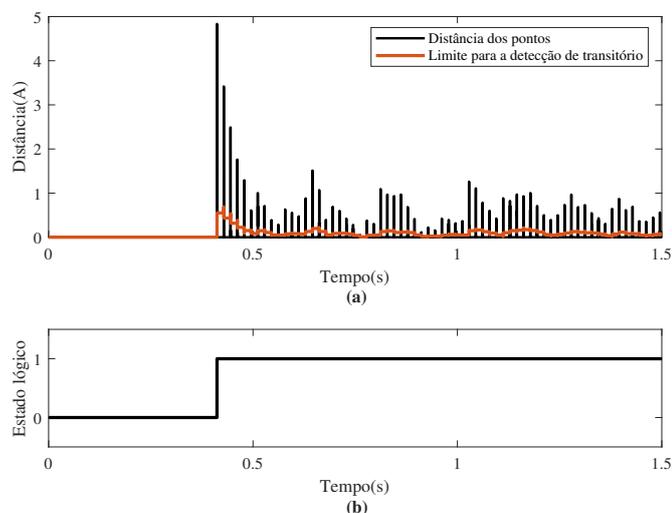


Fonte: Elaborado pelo Autor.

na Figura 61, é possível perceber que ele não é identificado como uma FAI. Essa não identificação ocorre, pois o sinal não apresenta as etapas de *buildup* e *shoulder*. Além disso, destaca-se que esse evento apresenta um conteúdo harmônico de terceira ordem significativo apenas no momento em que ocorre o transitório.

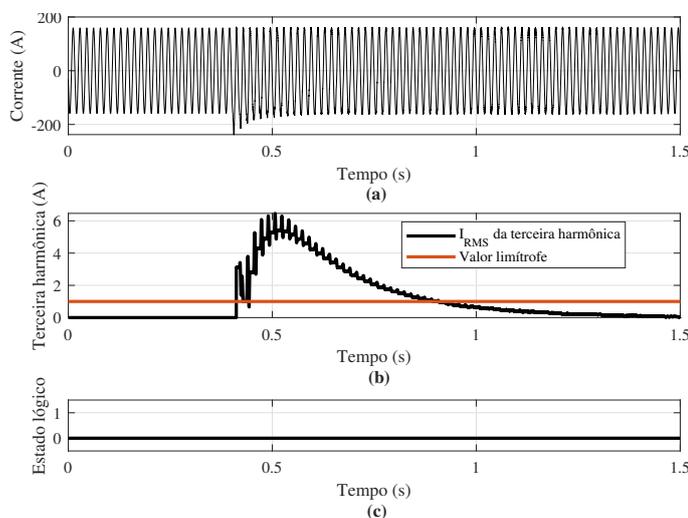
A metodologia proposta também foi testada para um curto-circuito monofásico.

Figura 58 – Método de detecção de transitórios: Energização de transformadores. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

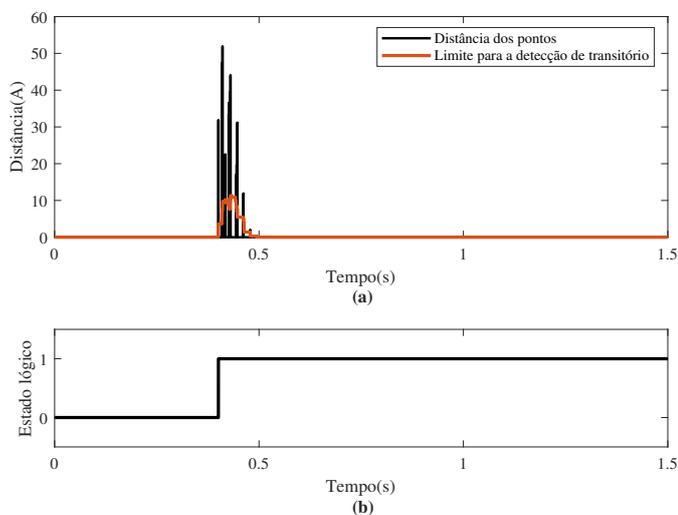
Figura 59 – Método para a detecção de FAIs: Energização de transformadores. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica, (c) Detecção da FAI.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

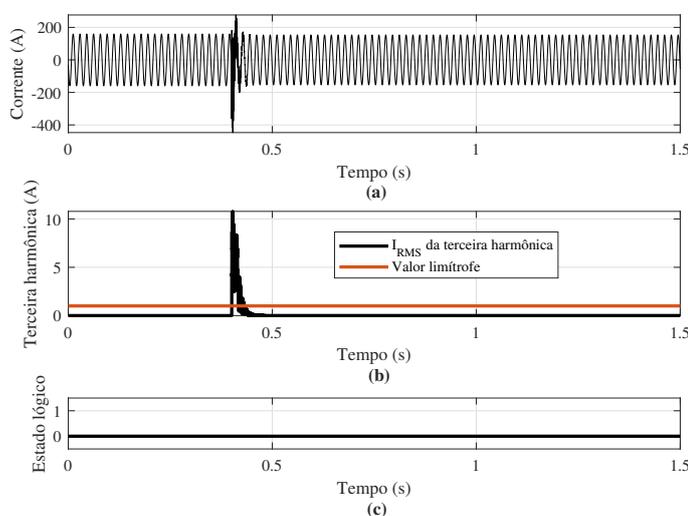
Como todos os demais transitórios, ele também é identificado pelo detector de transitórios, o que é apresentado na Figura 62. Porém, devido a não apresentar nenhum comportamento que se assemelhe a um crescimento gradual e ter apenas um pequeno intervalo de tempo em que a terceira harmônica apresenta um valor significativo, ele também não é identificado como uma FAI, como mostrado na Figura 63.

Figura 60 – Método para a detecção de transitórios: Chaveamento de banco de capacitores. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 61 – Método para a detecção de FAIs: Chaveamento de banco de capacitores. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.

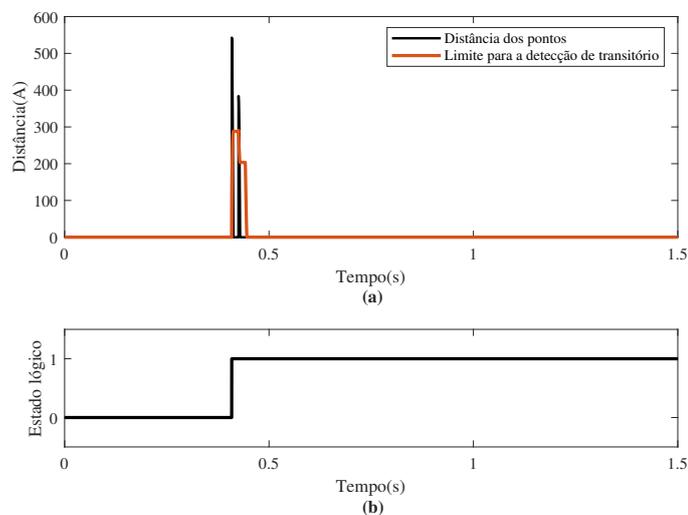


Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.6 Considerações Finais

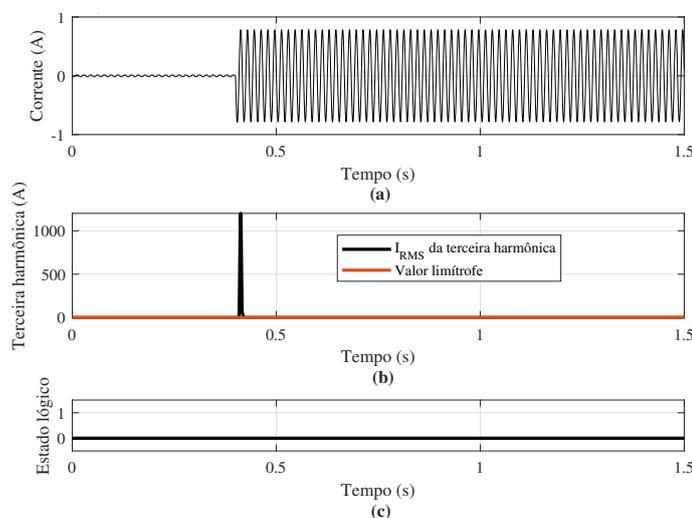
Nesse Capítulo, foram apresentados e discutidos os resultados da metodologia proposta para várias ocorrências comuns ao sistema elétrico de distribuição. Na Tabela 7, encontram-se o tempo de detecção, em segundos, para cada um dos casos simulados de FAI. Já na Tabela 8, são apresentados os resultados do detector de FAIs para os demais eventos no sistema.

Figura 62 – Método para a detecção de transitórios: Curto-circuito monofásico. (a) Sinal das distâncias. (b) Estado lógico do detector.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 63 – Método para a detecção de FAIs: Curto-circuito monofásico. (a) Sinal de corrente, *buildup* (amarelo) e *shoulder* (vermelho). (b) Magnitude da terceira harmônica. (c) Detecção da FAI.



Fonte: Elaborado pelo Autor

A metodologia apresentou ótimos resultados para os casos simulados, detectando corretamente as faltas de alta impedância e não atuando indevidamente para os demais eventos do sistema. O Capítulo seguinte apresenta as considerações finais do Trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

Tabela 7 – Resultados para as FAIs.

Consideração	% desconectada	FAI 1	FAI 2	FAI 3
Sem considerar o rompimento	0	0,5882	0,1389	0,1053
	10%	0,6044	0,1555	0,1210
	20%	0,5544	0,1552	0,1210
Considerando apenas o rompimento	30%	0,5544	0,1549	0,1208
	40%	0,6378	0,1544	0,1207
	50%	0,6544	0,1711	0,1207
	10%	1,9544	1,5713	1,6210
	20%	2,0878	1,5878	1,6209
Considerando o rompimento e o tempo de queda H=10,05 m	30%	2,0543	1,5878	1,6209
	40%	2,0711	1,5878	1,6207
	50%	2,0044	1,6045	1,6206

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Resultados para os demais eventos do sistema.

Evento	Deteção de FAI
Entrada de carga	não detectada
Saída de carga	não detectada
Chaveamento do banco de capacitores	não detectado
Energização de transformadores	não detectado
Curto-circuito monofásico	não detectado
Curto-circuito bifásico	não detectado
Curto-circuito trifásico	não detectado

Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Considerações Finais

As FAIs apresentam risco à integridade física de pessoas e animais, podendo causar incêndios, resultando assim em danos materiais e ambientais. Nesse sentido, é essencial o desenvolvimento de métodos capazes de detectar sua ocorrência e evitar drásticas consequências que um problema como esse pode causar.

Nesse contexto, no presente Trabalho, foi apresentada uma nova metodologia para a detecção de faltas de alta impedância, usando características tanto no domínio do tempo, quanto no da frequência. Para isso, foi utilizado um método para a detecção de transitórios, juntamente com um detector de FAI. Após detectado o transitório, a metodologia começa a buscar por um crescimento gradual na corrente, conhecido como *buildup* e, depois, por uma estabilização, conhecida como *shoulder*. Encontrados esses dois comportamentos no sinal de corrente, o método analisa o conteúdo harmônico de terceira ordem, avaliando se o mesmo está acima de um valor limítrofe e, sendo essa condição verdadeira, o método classifica a ocorrência como uma falta de alta impedância.

Para a validação desse método, foram então simulados vários casos de FAI e de outros transitórios, para os quais a metodologia apresentou ótimos resultados, atuando corretamente em cada um dos casos analisados. Dessa forma, a abordagem apresentada nesse Trabalho demonstrou um grande potencial para a implementação em sistemas elétricos de distribuição reais e apresentou um novo caminho para métodos que venham a usar a característica de *buildup* e *shoulder* para realizar a detecção. Por fim, espera-se que essa metodologia possa contribuir para uma melhoria em relação à confiabilidade e à disponibilidade das redes elétricas de distribuição, uma vez que a rápida classificação de uma FAI permite uma redução nos tempos de restabelecimento dos sistemas para esse tipo de falta.

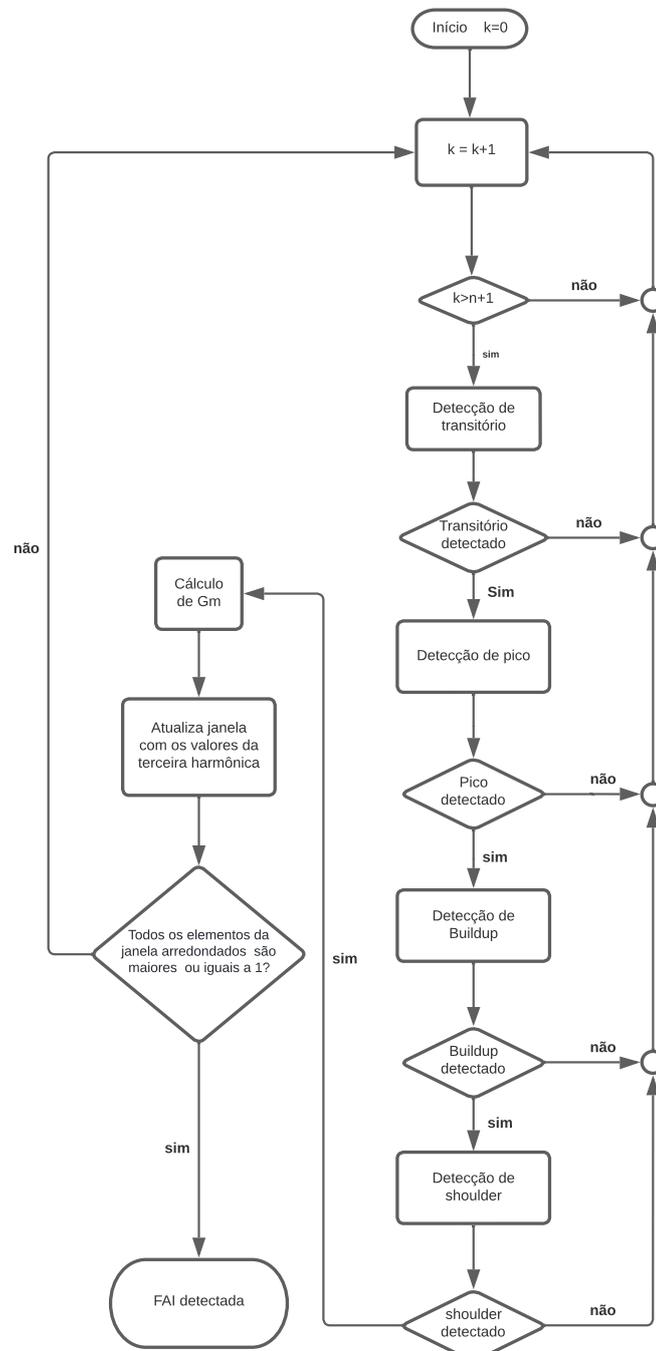
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Implementar os métodos da literatura para fins de comparação com a metodologia desenvolvida;
- Testar a metodologia para um sistema 13 barras IEEE, usando os modelos de arco elétrico implementados;
- Implementar novos modelos de arco elétrico;

- Implementar outros tipos de eventos típicos do sistema elétrico de distribuição; e
- Avaliar o método para outros tipo de condições, como diferentes ângulos de carga, taxa de amostragem e/ou distância da subestação em relação ao ponto de falta.

ANEXO A – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA

Figura A.1. Fluxograma do Método Proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

REFERÊNCIAS

- ALJOHANI, A. HABIBALLAH, I. **High-impedance fault diagnosis: a review**. *Energies*, v. 13, n. 23, p. 6447, 2020.
- DUNKI-JACOBS, J. R. **The effects of arcing ground faults on low-voltage system design**. *IEEE Transactions on Industry Applications*, n. 3, p. 223-230, 1972.
- EMANUEL, A.E. CYGANSKI, D. ORR, J.A. S. SHILLER, S. E.M. GULACHENSKI, E.M. **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*, Volume-5, Issue-02, Page No (676 –686), Apr 1990.
- GHADERI, Amin; GINN III, Herbert L.; MOHAMMADPOUR, Hossein Ali. **High impedance fault detection: A review**. *Electric Power Systems Research*, v. 143, p. 376-388, 2017.
- GAMMON, T.; MATTHEWS, J. **Instantaneous arcing-fault models developed for building system analysis**. *IEEE Transactions on industry applications*, v. 37, n. 1, p. 197-203, 2001.
- GAMMON, T.; MATTHEWS, J. **The historical evolution of arcing-fault models for low-voltage systems**. In:1999 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (Cat. No. 99CH36371). IEEE, 1999. p. 6 pp.
- GAUTAM, Suresh; BRAHMA, Sukumar M. **Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology**. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 2, p. 1226-1234, 2012.
- KAUFMANN, R. H.; PAGE, J. C. **Arcing fault protection for low-voltage power distribution system-nature of the problem**. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, v. 79, n. 3, p. 160-165, 1960.
- KINDERMANN, GERALDO. **Curto Circuito**. editora Sagra-DC Luzzato, 6 edição. Porto Alegre, 2018.
- LAI, T. M. et al. **High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 397-407, 2005.
- LIEN, Keng-Yu et al. **Energy variance criterion and threshold tuning scheme for high impedance fault detection**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, p. 810-817, 1999.

- MAMISHEV, Alexander V.; RUSSELL, B. Don; BENNER, Carl L. **Analysis of high impedance faults using fractal techniques**. In: Proceedings of Power Industry Computer Applications Conference. IEEE, 1995. p. 401-406.
- NAM, SR. PARK, JK. KANG, YC. KIM, TH. **A modeling method of high impedance fault in distribution system using two series time-varying resistances in EMTP**, **IEEE Power Engineering Society summer meeting**, vol. 2. Vancouver, BC; 15-19- July, 2001. p. 1175-80, doi: 10.1109/PESS.2001.970231.
- NAKAGOMI, R. M. **Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- RICHARD, R. DERIO D., **A new ground fault protective system for electrical distribution circuits**, IRE Trans. Ind. Gen. AppZ., vol. IGA-3, May/June 1967, pp. 217-227
- RUSSELL, B. Don; MEHTA, Ketan; CHINCHALI, Ram P. **An arcing fault detection technique using low frequency current components-performance evaluation using recorded field data**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 4, p. 1493-1500, 1988.
- SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- SEDIGHI, A. R. **A new model for high impedance fault in electrical distribution systems**. **International Journal of Scientific Research in Computer Science and Engineering** v. 2, n. 4, p. 6-12, 2014.
- SHENG, Yong; ROVNYAK, Steven M. **Decision tree-based methodology for high impedance fault detection**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 2, p. 533-536, 2004.
- SULTAN, A. F.; SWIFT, G. W.; FEDIRCHUK, D. J. **Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 9, n. 1, p. 461-470, 1994.
- THOMAS, Mini Shaji; BHASKAR, Namrata; PRAKASH, Anupama. **Voltage based detection method for high impedance fault in a distribution system**. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B, v. 97, n. 3, p. 413-423, 2016.