

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Luiz Henrique Pessoa da Costa Trondoli**

**Detecção de Falhas de Alta Impedância do Tipo  
Fase-Terra em Sistemas de Distribuição: Uma  
Abordagem Baseada em sua Progressão no Domínio do  
Tempo e da Frequência**

São Carlos – SP  
2023



**Luiz Henrique Pessôa da Costa Trondoli**

**Detecção de Falhas de Alta Impedância do Tipo  
Fase-Terra em Sistemas de Distribuição: Uma  
Abordagem Baseada em sua Progressão no Domínio do  
Tempo e da Frequência**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos – SP

2023

**Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

T852d Trondoli, Luiz Henrique Pessoa da Costa  
Detecção de Faltas de Alta Impedância do Tipo  
Fase-Terra em Sistemas de Distribuição: Uma Abordagem  
Baseada em sua Progressão no Domínio do Tempo e da  
Frequência. / Luiz Henrique Pessoa da Costa Trondoli;  
orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior. São  
Carlos, 2023.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas  
Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Detecção de Faltas de Alta Impedância. 2.  
Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 3.  
Transformada Discreta de Fourier. 4. Modelo  
Computacional de Faltas de Alta Impedância. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUIZ HENRIQUE PESSÔA DA COSTA TRONDOLI**.

Título da tese: "Detecção de faltas de alta impedância do tipo fase-terra em sistemas de distribuição: uma abordagem baseada em sua progressão no domínio do tempo e da frequência".

Data da defesa: 23/01/2023.

### Comissão Julgadora

### Resultado

Prof. Associado **José Carlos de Melo Vieira Junior**  
**(Orientador)**

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADO

Prof. Dr. **José Rubens Macedo Junior**

(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

APROVADO

Prof. Dr. **Oureste Elias Batista**

(Universidade Federal do Espírito Santo/UFES)

APROVADO

Prof. Associado **Kleber de Melo e Silva**

(Universidade de Brasília/UnB)

APROVADO

Prof. Associado **Ricardo Augusto Souza Fernandes**

(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:

Prof. Dr. **João Bosco Augusto London Junior**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**



# AGRADECIMENTOS

---

---

Em primeiro lugar, agradeço ao professor José Carlos de Melo Vieira Júnior, que enriqueceu meu vocabulário com novos significados para a palavra orientar. Obrigado pela confiança, liderança, discussões relevantes e empatia durante todo o processo.

Agradeço a todos os integrantes do grupo de estudos de faltas de alta impedância, em especial à Gabriela Nunes Lopes, por participar ativamente nas simulações, discussões e revisão do texto desta tese.

Ao Thiago Souza Menezes o meu agradecimento por ter contribuído nas simulações dos eventos que me possibilitaram aperfeiçoar o algoritmo proposto nesta tese. Ainda, por aprimorar o modelo em LaTeX e disponibilizá-lo para a comunidade acadêmica.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), que de algum modo colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho e com a minha formação.

Aos meus amigos, obrigado pelo apoio e por entenderem a escassez de tempo durante o período de desenvolvimento da tese.

À minha família, em especial à minha mãe, Leila Pessôa da Costa, cujo apoio, exemplo e amor incondicional, tornam minha caminhada mais leve.





*“Love is strong...never wrong, constantly dreaming of another way.”  
Tankian, Serj. The Charade.*



# RESUMO

TRONDOLI, L. H. P. C.. **Detecção de Falhas de Alta Impedância do Tipo Fase-Terra em Sistemas de Distribuição: Uma Abordagem Baseada em sua Progressão no Domínio do Tempo e da Frequência**. 91 p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

A ruptura de um condutor da rede primária com consequente queda e toque ao solo são uma das causas de Falta de Alta Impedância (FAI) em Sistema de Distribuição (SD). Esse tipo de falta gera arcos elétricos e pode trazer risco à vida e ao patrimônio. A detecção deste defeito se faz, portanto, necessária. A literatura não apresenta uma solução definitiva para este problema e os métodos existentes não são testados em condições suficientes para comprovar sua eficácia. Ainda, quando não baseados em sinais reais, os estudos utilizam, por vezes, modelos determinísticos ou que não representam por completo as características geradas pelas FAIs. Por este motivo, este trabalho propõe um método de detecção para este tipo de falta, o qual busca por características do evento já conceituadas na literatura, com o propósito de analisar o sinal da corrente de falta, observando sua progressão temporal desde o rompimento do condutor até a formação dos arcos elétricos e como se comportam. Do sinal de falta, em síntese, foram observadas características como: *buildup*, variação de assimetria e relação dos componentes harmônicos e inter-harmônicos. Para as simulações de FAIs são utilizados, além de sinais reais, um modelo de faltas de alta impedância, modificado da dissertação do autor desta tese, que visa representar, com elevado detalhamento, a natureza do evento, além de ser capaz de reproduzir as características estudadas simultaneamente ou isoladamente. O método implementado foi testado frente a diversos eventos, tais como: chaveamentos, energizações, cargas não lineares e com potência e perfil harmônico variáveis ao longo do tempo. Ainda, os testes incluíram modificação no carregamento do sistema e presença de Geração Distribuída (GD). O método se mostrou capaz de detectar 100% de FAIs em que houvesse carga à jusante do ponto de ruptura do condutor. Nenhum dos eventos não-FAI sensibilizou o algoritmo.

**Palavras-chave:** Detecção de Falhas de Alta Impedância, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Transformada Discreta de Fourier, Modelo Computacional de Falhas de Alta Impedância.



# ABSTRACT

TRONDOLI, L. H. P. C.. **Phase-to-Ground High Impedance Fault Detection in Electrical Distribution Systems: A Time-Frequency Approach.** 91 p. Ph.D. Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2023.

The rupture of a conductor of the primary network with consequent fall and touch to the ground is one of the causes of High Impedance Faults (HIFs) in Distribution Systems (DSs). This type of fault produces arc flash and can pose risks to life and properties. Detection of this event is, therefore, required. No proposed method in the literature establishes a decisive solution to this problem and the existing methods are not tested in enough conditions to prove their efficiency. Studies, when not based on real signals, sometimes use deterministic models or models that do not entirely represent HIFs characteristics. For this reason, this research proposes a high-impedance fault detection method that searches for literature-based characteristics of the current signal, with the purpose of observing its temporal progression, from cable rupture to arc ignition and how it behaves. Of the current signal, in short, it was observed: buildup, asymmetry variation and relation between harmonic and inter-harmonic components. For HIFs simulations, besides real signals, it was used a HIF model, modified from the author's thesis, which aims to represent, with high level of detail, the nature of the event, besides being capable to reproduce HIF characteristics at the same time, or in an isolated manner. The developed method was tested with a variety of events, such as: load switching, energizations, and non-linear loads with varying power and harmonic content. In addition, tests included different system load values and Distributed Generation (DG) was also included. The method was able to detect 100% of HIF cases in which there was a load connected after the conductor breakage point. None of the other events triggered the algorithm.

**Keywords:** High Impedance Fault Detection, Electrical distribution Systems, Discrete Fourier Transform, Computational Model for High Impedance Faults.



# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

---

---

Figura 1 – Exemplo de avalanche na corrente de FAI. . . . .	7
Figura 2 – Exemplo de <i>buildup</i> na corrente de FAI. . . . .	8
Figura 3 – Exemplo de <i>shoulder</i> na corrente de FAI. . . . .	8
Figura 4 – Exemplo de assimetria na corrente de FAI. . . . .	9
Figura 5 – Exemplo de intermitência na corrente de FAI. . . . .	10
Figura 6 – Exemplo de avalanche na corrente de FAI. . . . .	10
Figura 7 – Modelo de Emanuel (EMANUEL <i>et al.</i> , 1990). . . . .	12
Figura 8 – Modelo de FAI: controle. . . . .	14
Figura 9 – Modelo de FAI: componentes. . . . .	14
Figura 10 – Demonstração de <i>Buildup</i> . . . . .	17
Figura 11 – Simulação de falta utilizando o modelo de Trondoli, Lopes e Vieira (2022). . . . .	20
Figura 12 – Aproximação do sinal gerado com o modelo de Trondoli, Lopes e Vieira (2022). . . . .	20
Figura 13 – Janelas de 1 e 12 Ciclos. . . . .	31
Figura 14 – Valor eficaz para janela de 1 ciclo. . . . .	32
Figura 15 – Valor da assimetria porcentual. . . . .	33
Figura 16 – Transformada discreta de Fourier para janela de 1 ciclo. . . . .	34
Figura 17 – Transformada discreta de Fourier para janela de 12 ciclos. . . . .	35
Figura 18 – Índice de existência dos componentes inter-harmônicos. . . . .	36
Figura 19 – Valor da componente fundamental da janela de 12 ciclos. . . . .	37
Figura 20 – Fluxograma da camada 1. . . . .	38
Figura 21 – Fluxograma da camada 2. . . . .	46
Figura 22 – Fluxograma da camada 2. Variação de 2° e 4° harmônicos (2h e 4h). . . . .	47
Figura 23 – Fluxograma da camada 2. Relação entre 3° e 5° e 2° e 4° harmônicos (2h, 3h, 4h e 5h). . . . .	48
Figura 24 – Fluxograma da camada 2. Relação entre 3° e 5° harmônicos (3h e 5h). . . . .	49
Figura 25 – Fluxograma do detector de rompimento de condutor e <i>reset</i> . . . . .	50
Figura 26 – Fluxograma do detector de início de arco. . . . .	51
Figura 27 – Fluxograma do detector de arco. . . . .	52
Figura 28 – Fluxograma do detector de falta. . . . .	53
Figura 29 – Sistema IEEE de 34 barras. . . . .	56
Figura 30 – Modelo de FAI por fonte de corrente. . . . .	57
Figura 31 – Exemplo de sinal real. . . . .	58
Figura 32 – Exemplo de energização do forno a arco. . . . .	62

Figura 33 – Exemplo de energização do retificador. . . . .	63
Figura 34 – Fluxograma da automatização dos testes. . . . .	64
Figura 35 – FAI real na barra 802. Valor do IEIH. . . . .	66
Figura 36 – FAI real na barra 854. Variação da assimetria porcentual. . . . .	67
Figura 37 – FAI real na barra 848. Harmônicos normalizados lidos na subestação. . . . .	68
Figura 38 – FAI real na barra 848. Harmônicos utilizados normalizados. . . . .	68
Figura 39 – FAI real na barra 848. Harmônicos utilizados normalizados. Valor do IEIH. . . . .	69
Figura 40 – FAI com modelo na barra 822. . . . .	70
Figura 41 – FAI com modelo na barra 864. . . . .	70
Figura 42 – Chaveamento trifásico do banco de capacitores 1 (barra 844). Variação do valor eficaz. . . . .	71
Figura 43 – Chaveamento trifásico do banco de capacitores 1. Harmônicos pares e ímpares. . . . .	72
Figura 44 – Chaveamento monofásico do banco de capacitores 1. Harmônicos pares e ímpares. . . . .	72
Figura 45 – Desconexão do ramal conectado à barra 816. Variação de assimetria porcentual. . . . .	73
Figura 46 – Conexão do transformador à barra 832. . . . .	74
Figura 47 – Desconexão do transformador à barra 832. . . . .	74
Figura 48 – Conexão do forno a arco na barra 802. Componentes harmônicos. . . . .	75
Figura 49 – Conexão do forno a arco na barra 802. Soma dos harmônicos pares e ímpares. . . . .	76
Figura 50 – Conexão do retificador na barra 802. Componentes harmônicos subestação. . . . .	77



# LISTA DE TABELAS

---

---

Tabela 1 – Corrente em diferentes tipos de solo. . . . .	6
Tabela 2 – Corrente de FAIs típicas. . . . .	7
Tabela 3 – Comparação entre os modelos de FAIs. . . . .	21
Tabela 4 – Comparação entre métodos de detecção da literatura. . . . .	30
Tabela 5 – Número de simulações de FAIs com sinais reais. . . . .	57
Tabela 6 – Parâmetros extraídos dos sinais de FAIs cedidos por <a href="#">Macedo et al. (2015)</a> . . . . .	59
Tabela 7 – Número de simulações de FAIs com modelo de FAI. . . . .	60
Tabela 8 – Número de simulações de chaveamento de banco de capacitores. . . . .	60
Tabela 9 – Número de simulações de chaveamento de cargas. . . . .	61
Tabela 10 – Número de simulações de chaveamento de ramais. . . . .	61
Tabela 11 – Número de simulações de chaveamento do transformador. . . . .	62
Tabela 12 – Número de simulações de chaveamento do forno a arco. . . . .	62
Tabela 13 – Número de simulações de chaveamento do retificador. . . . .	63
Tabela 14 – Desempenho do algoritmo de detecção. . . . .	77
Tabela 15 – Comparação entre métodos de detecção da literatura e método proposto. . . . .	78



# LISTA DE SIGLAS

---

---

<b>CPFL</b>	<i>Companhia Paulista de Força e Luz</i>
<b>EAF</b>	<i>Espectro de Alta Frequência</i>
<b>EBF</b>	<i>Espectro de Baixa Frequência</i>
<b>FAI</b>	<i>Falta de Alta Impedância</i>
<b>FGM</b>	<i>Filtro de Gradiente Morfológico</i>
<b>GD</b>	<i>Geração Distribuída</i>
<b>IEIH</b>	<i>Índice de Existência de Componentes Inter-Harmônicos</i>
<b>MM</b>	<i>Morfologia Matemática</i>
<b>MVS</b>	<i>Máquina de Vetores de Suporte</i>
<b>RNA</b>	<i>Rede Neural Artificial</i>
<b>SD</b>	<i>Sistema de Distribuição</i>
<b>TF</b>	<i>Transformada de Fourier</i>
<b>TFTC</b>	<i>Transformada de Fourier de Tempo Curto</i>
<b>TS</b>	<i>Transformada de Stockwell</i>
<b>TW</b>	<i>Transformada Wavelet</i>



# SUMÁRIO

---

---

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos	2
1.2	Contribuições da tese	2
1.3	Organização do documento	3
1.4	Publicações	4
<b>2</b>	<b>FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA: CARACTERÍSTICAS E MODELOS</b>	<b>5</b>
2.1	Características das faltas de alta impedância	5
2.1.1	Rompimento e queda do condutor	5
2.1.2	Corrente drenada e tipos de solo	5
2.1.3	O arco elétrico	6
2.1.3.1	<i>Avalanche</i>	7
2.1.3.2	<i>Buildup</i>	7
2.1.3.3	<i>Shoulder</i>	8
2.1.3.4	Assimetria	8
2.1.3.5	Intermitência	9
2.1.3.6	Modulação	9
2.1.4	Espectro de frequências	10
2.1.4.1	Espectro de baixa frequência	11
2.1.4.2	Espectro de alta frequência	11
2.2	Modelos de falta de alta impedância	11
2.2.1	Modelo de falta de alta impedância utilizado	13
2.3	Considerações sobre o capítulo	20
<b>3</b>	<b>PROPOSIÇÃO DE UM ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA</b>	<b>23</b>
3.1	Métodos de detecção de falta de alta impedância	23
3.2	Algoritmo de detecção proposto	30
3.2.1	Estrutura do algoritmo	30
3.2.2	Primeira camada	31
3.2.3	Segunda camada	37
3.2.3.1	<i>Flags</i> de aumento e redução do valor eficaz da corrente	39
3.2.3.2	<i>Flag</i> de <i>buildup</i>	39

3.2.3.3	<i>Flag</i> de variação de assimetria porcentual . . . . .	40
3.2.3.4	<i>Flags</i> acionados pelas frequências harmônicas da janela de 1 ciclo . . . . .	40
3.2.3.5	<i>Flag</i> acionado pelas frequências harmônicas da janela de 12 ciclos . . . . .	42
3.2.3.6	Considerações sobre o algoritmo da segunda camada . . . . .	42
3.2.4	Terceira camada . . . . .	42
3.2.4.1	Detector de rompimento do condutor e <i>reset</i> . . . . .	43
3.2.4.2	Detector de início de arco . . . . .	43
3.2.4.3	Detector de arco . . . . .	44
3.2.4.4	Detector de falta . . . . .	44
3.2.5	Considerações sobre o algoritmo proposto . . . . .	45

#### **4 ELABORAÇÃO DE UMA BASE DE DADOS PARA O TESTE DO ALGORITMO DE DETECÇÃO . . . . . 55**

4.1	Modelagem do sistema de distribuição . . . . .	55
4.2	Banco de dados de FAIs . . . . .	56
4.2.1	Simulação de FAIs por meio de dados coletados em campo . . . . .	56
4.2.2	Simulação de FAIs por meio do modelo proposto . . . . .	57
4.3	Banco de dados de eventos comuns aos sistemas de distribuição . . . . .	59
4.3.1	Chaveamento de bancos de capacitores . . . . .	60
4.3.2	Chaveamento de cargas . . . . .	60
4.3.3	Chaveamento de ramais . . . . .	61
4.3.4	Energização de transformador . . . . .	61
4.3.5	Forno a arco . . . . .	61
4.3.6	Retificador . . . . .	63
4.4	Automatização dos testes e número de simulações . . . . .	63

#### **5 RESULTADOS . . . . . 65**

5.1	Análise dos sinais de FAIs . . . . .	65
5.2	Chaveamento de bancos de capacitores . . . . .	70
5.3	Chaveamento de cargas e ramais . . . . .	72
5.4	Energização de transformador . . . . .	73
5.5	Forno a arco . . . . .	75
5.6	Retificador . . . . .	75
5.7	Considerações sobre o capítulo . . . . .	76
5.8	Discussões . . . . .	78
5.8.1	Quantidade de parâmetros . . . . .	78
5.8.2	Possibilidades de análises . . . . .	79
5.8.2.1	Escolha pela TFTC . . . . .	79

5.8.3	Determinação de limiares . . . . .	79
5.8.4	Distinção de outros eventos . . . . .	80
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>83</b>
6.1	Trabalhos futuros . . . . .	84
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>85</b>





---

# INTRODUÇÃO

---

Os SDs de energia elétrica com topologia aérea estão sujeitos a intempéries e outros eventos que podem vir a causar o interrompimento do fornecimento de energia. A proteção destes sistemas é importante tanto para assegurar a integridade de seus equipamentos, quanto por razões de segurança de pessoas e patrimônios. Entre os defeitos aos quais os SDs estão sujeitos, estão as faltas de baixa e alta impedância. Diferente das faltas de baixa impedância, que primariamente apresentam risco aos equipamentos do sistema, as FAIs, por drenarem correntes baixas e gerarem arcos elétricos, apresentam risco à vida e à propriedade.

É estimado que entre 5% a 20% do total de faltas que ocorrem em SDs são FAIs (HOSSAIN; ZHU; OVERBYE, 2014), porém, a literatura aponta que ainda faltam dados que apresentem estatísticas suficientes relacionadas à ocorrência de FAIs, uma vez que apenas as faltas detectadas são reportadas (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017).

As FAIs são definidas pela elevada resistência de contato entre o condutor do sistema elétrico e uma superfície. Para além desta definição, entende-se como FAIs as faltas que não drenam corrente suficiente para sensibilizar os relés de sobrecorrente. A literatura categoriza as FAIs em dois grupos: as que ocorrem devido ao rompimento de um condutor e tocam o solo, chamadas de falta com contato direto e os eventos nos quais o condutor permanece íntegro e ocorre o contato do mesmo com objetos próximos, a exemplo de galhos de árvores, denominadas faltas por contato indireto (CHEN *et al.*, 2016).

As FAIs são mais estudadas em sistemas de distribuição com tensão ente 11 e 25 kV (LIEN *et al.*, 1999; AUCOIN; RUSSELL, 1982; AUCOIN; RUSSELL, 1989; JEERINGS; LINDERS, 1989; LAI *et al.*, 2005; NAM *et al.*, 2001; LAI; SNIDER; LO, 2006), mas também existem técnicas de detecção propostas para esse tipo de falta em sistemas de transmissão (SHAH; DESAI; SHAIK, 2018).

Em Depew *et al.* (2006), pesquisadores analisaram relés para detecção FAI em 280 alimentadores durante um período de dois anos. Este estudo calculou que de todos os casos

de FAI reportados, 95% apresentavam presença de arco e que apenas 58% dos casos foram detectados, concordando com os autores de [Nam et al. \(2001\)](#), que afirmam que os relés convencionais são capazes de detectar apenas entre 50% e 60% das FAIs.

De acordo com [Bhandia et al. \(2020\)](#), um relatório do *Power System Relaying Committee* (PSRC) analisou 200 eventos de FAI ocorridos em diferentes sistemas de distribuição. Destes, apenas 35 (17,5%) foram detectadas por dispositivos de proteção convencionais.

Conhecido como *Black Saturday*, uma série de incêndios ocorreu na Austrália no ano de 2009, o que resultou em 173 mortes e bilhões de dólares em perdas financeiras. Destes incêndios, 5 foram causados por FAIs ([GOMES; OZANSOY; ULHAQ, 2018](#)).

Ainda que amplamente pesquisadas, as FAIs são um problema persistente nos sistemas elétricos ([COSTA et al., 2015](#)) e possuem lacunas a serem estudadas ([GOMES; OZANSOY; ULHAQ, 2018](#)).

Como será visto na revisão bibliográfica sobre os métodos de detecção de FAI (Seção 3.1), já existem métodos com taxas de detecção acima dos 90%, porém, um dos grandes desafios atuais não está na detecção das FAIs, mas em como distingui-las de outros eventos, em especial, a inserção de cargas com perfil harmônico variável.

Dos trabalhos existentes na literatura, nenhum método é capaz de identificar FAIs com 100% de certeza e que tenha sido testado em condições suficientes para tal. Ainda, devido ao perigo e ao custo associado em se realizar experimentos reais para obter dados desse tipo de falta ([GOMES; OZANSOY; ULHAQ, 2018](#)), muitos trabalhos se baseiam em modelos computacionais que não representam as características de uma FAI, em especial, a aleatoriedade.

Diante do exposto, entende-se que ainda existe espaço para o desenvolvimento de algoritmos de detecção de FAIs que estejam pautados nas reais características deste evento e que sejam testados em condições adversas.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos:

- Elaborar um método de detecção de FAIs do tipo fase-terra em SDs com contato do condutor pelo lado da fonte.
- Aperfeiçoar o modelo de FAI proposto por [Trondoli \(2017\)](#), para simplificar sua utilização e gerar sinais de FAI mais próximos aos reais.

## 1.2 Contribuições da tese

- **Proposição de um método de detecção de FAIs:**

- Foi desenvolvido um algoritmo de detecção de FAIs causadas por contato direto do condutor ao solo, baseado na progressão temporal<sup>1</sup> deste defeito e nas características da forma de onda da corrente por ele gerada. Diferentemente dos métodos apresentados na literatura, o algoritmo proposto considera o tempo de queda do condutor. Ainda, como diferencial, o método foi testado para diversos eventos, cargas e cenários. Também foi considerada a presença de GD. Como resultado, o algoritmo foi capaz de identificar todas as FAIs com carga à jusante do ponto de falta e não identificou erroneamente nenhum dos eventos não-FAI.
- **Melhoria do modelo de FAIs proposto na dissertação do autor (TRONDOLI, 2017):**
  - O modelo proposto por Trondoli (2017) foi reprogramado para reduzir o número de blocos de programação de 8 para 1, facilitando sua utilização e otimizando sua programação.
  - O modelo também foi reprogramado para que seus parâmetros fossem dados como porcentagem da corrente de falta parametrizada e não mais como porcentagem das resistências utilizadas para emular as características. Essa nova abordagem permite ao usuário relacionar diretamente os valores parametrizados à forma de onda da corrente gerada pelo modelo. Outra vantagem é a facilidade de parametrização do modelo por meio de formas de onda reais.

## 1.3 Organização do documento

Este documento está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** revisa as características das FAIs e os modelos de FAI propostos pela literatura. Justifica a escolha do modelo adotado para as simulações desta tese e apresenta as melhorias feitas no mesmo.
- **Capítulo 3:** revisa os métodos de detecção de FAIs, apresenta o algoritmo de detecção proposto e explica seu funcionamento.
- **Capítulo 4:** descreve a elaboração da base de dados utilizada para os testes do algoritmo proposto.
- **Capítulo 5:** apresenta os testes e resultados obtidos com a análise dos sinais criados no Capítulo 4 pelo algoritmo de FAI, apresentado no Capítulo 3.

---

<sup>1</sup> Por progressão temporal entende-se que o algoritmo observa comportamentos no domínio do tempo, como exemplo: tempo de queda do condutor e progressão dos valores de frequências harmônicas em ciclos sucessivos da corrente de falta.

- **Capítulo 6:** apresenta as conclusões e discussões sobre o trabalho.

## 1.4 Publicações

São fruto desta tese e de trabalhos a ela relacionados, as seguintes publicações:

(TRONDOLI; LOPES; VIEIRA, 2022). TRONDOLI, L.; LOPES, G.; VIEIRA, J. Configurable stochastic model for high impedance faults simulations in electrical distribution systems. *Electric Power Systems Research*, v. 205, p. 107686, 2022. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779621006672>>.

(LOPES *et al.*, 2022). LOPES, G.; MENEZES, T.; SANTOS, G.; TRONDOLI, L.; VIEIRA, J. High impedance fault detection based on harmonic energy variation via s-transform. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 136, p. 107681, 2022. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521009091>>.

(NOZELA *et al.*, 2021a). NOZELA, M. A. S.; LOPES, G. N.; TRONDOLI, L. H. P. C.; VIEIRA, J. C. M. Analysis of source and load-side high impedance faults using stockwell transform. *Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. p. 1–6., 2021.

(NOZELA *et al.*, 2021b). NOZELA, M. A. S.; LOPES, G. N.; TRONDOLI, L. H. P. C.; VIEIRA, J. C. M. Modelo Simplificado para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição. ANAIS DA XIV CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, Campinas, Galoá, 2021. Disponível em: <<https://proceedings.science/cbqee-2021/papers/modelo-simplificado-para-simulacao-de-faltas-de-alta-impedancia-em-sistemas-de-distribuicao>>.

(SILVA *et al.*, 2021). SILVA, J. C. da; LOPES, G. N.; TRONDOLI, L. H. P. C.; VIEIRA, J. C. M. Analysis of the negative sequence voltage to detect conductor break in distribution systems. *IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*. p. 01–05, 2021.

(LOPES; TRONDOLI; VIEIRA, *EasyChair*, 2022). Lopes, G. ; Trondoli, L.; Vieira, J. Configuration and Analysis of a High Impedance Fault Simulation Model. *SBSE*, 2022.

(LOPES; TRONDOLI; VIEIRA, 2020). LOPES, G. N.; TRONDOLI, L. H. P. C.; VIEIRA, J. C. M. Analysis of high impedance faults current using fourier, wavelet and stockwell transforms. *Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2290>>.

(LOPES *et al.*, 2019). NUNES LOPES, GABRIELA; TRONDOLI, L. H. P. C. ; VIEIRA JUNIOR, J. C. M. ; MACEDO JUNIOR, J. R. . High Impedance Fault Location Characterized by Fourier, Stockwell and Wavelet Transforms. *XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica - CBQEE2019*, 2019, São Caetano do Sul - São Paulo.

---

# FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA: CARACTERÍSTICAS E MODELOS

---

## 2.1 Características das faltas de alta impedância

Este capítulo descreve as características das FAIs, as quais servirão de base para o desenvolvimento do algoritmo de detecção, que será apresentado no Capítulo 3. Também discorre sobre os modelos de FAIs presentes na literatura, os quais têm o objetivo de reproduzir as características deste tipo de falta.

Por fim, são apresentadas as melhorias feitas no modelo de [Trondoli \(2017\)](#), publicadas em [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#), o qual é utilizado para gerar os sinais que compõem o banco de dados (Capítulo 4) utilizados para testar o algoritmo de detecção, apresentado no Capítulo 3.

### 2.1.1 *Rompimento e queda do condutor*

Devido a fatores ambientais, à dilatação causada pela passagem de corrente elétrica e conexões executadas de forma inadequada, os condutores da rede primária aérea podem, ocasionalmente, se romper.

Após o rompimento, tem início a queda do condutor ao solo. O tempo entre o rompimento e o toque no solo pode ser calculado por meio da equação de queda livre, conhecendo-se a altura do cabo ao solo. O condutor rompido pode tocar o solo do lado da fonte, da carga, ou de ambos. Este estudo investigará as faltas com toque do condutor do lado da fonte.

### 2.1.2 *Corrente drenada e tipos de solo*

O toque do cabo ao solo permite a passagem de corrente elétrica, cuja amplitude é função da resistência de cada tipo de solo, somada à resistência do arco elétrico gerado em consequência

da falta e à tensão da fase rompida. A literatura traz, em sua maioria, estudos de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição com tensões de linha na faixa de 11 a 25 kV (LIEN *et al.*, 1999; AUCOIN; RUSSELL, 1982; AUCOIN; RUSSELL, 1989; JEERINGS; LINDERS, 1989; LAI *et al.*, 2005; NAM *et al.*, 2001; LAI; SNIDER; LO, 2006).

Os trabalhos que caracterizam as FAIs, o fazem pela corrente drenada pela falha, em detrimento à resistência do solo, uma vez que aquela é mais simples de ser medida. Além disso, não existem meios práticos para se obter o valor da resistência do arco elétrico no local de falta. A literatura mostra que a amplitude da corrente de uma falta de alta impedância está compreendida entre 0 e 75 A (WESTER, 1998; CHEN *et al.*, 2013; CALHOUN *et al.*, 1982).

Como exemplo, um experimento conduzido em um sistema de 13,8 kV mediu a máxima corrente eficaz de falta em diversos tipos de solo (MACEDO *et al.*, 2015). A Tabela 1 apresenta os valores encontrados.

Tabela 1 – Corrente em diferentes tipos de solo.

Tipo de Solo	Máxima Corrente Eficaz (A)
Cimento	25,28
Asfalto	12,54
Cascalho	10,51
Areia seca	4,67
Areia molhada	7,83
Argila seca	16,78
Argila molhada	25,24
Gramma seca	26,13
Gramma molhada	34,07

Fonte: Adaptada de Macedo *et al.* (2015).

É tido como referência, quando citamos a amplitude da corrente de falta de alta impedância, o trabalho de Aucoin e Russell (1989), o qual estabeleceu faixas típicas para a corrente de falta em diferentes tipos de solo, tomando como base 200 experimentos feitos em um sistema de 13,8 kV. O resultado é exibido na Tabela 2.

### 2.1.3 O arco elétrico

O arco elétrico está presente nas faltas de alta impedância. Ele é uma descarga elétrica entre dois eletrodos, através de gás ou vapor e ocorre como resultado do mau contato entre o condutor e uma superfície de baixa condutância (SEDIGHIZADEH; REZAZADEH; ELKALASHY, 2010). Como resultado, a corrente de falta apresenta características particulares, as quais serão explicadas nas seções de 2.1.3.1 a 2.1.3.6.

Tabela 2 – Corrente de FAIs típicas.

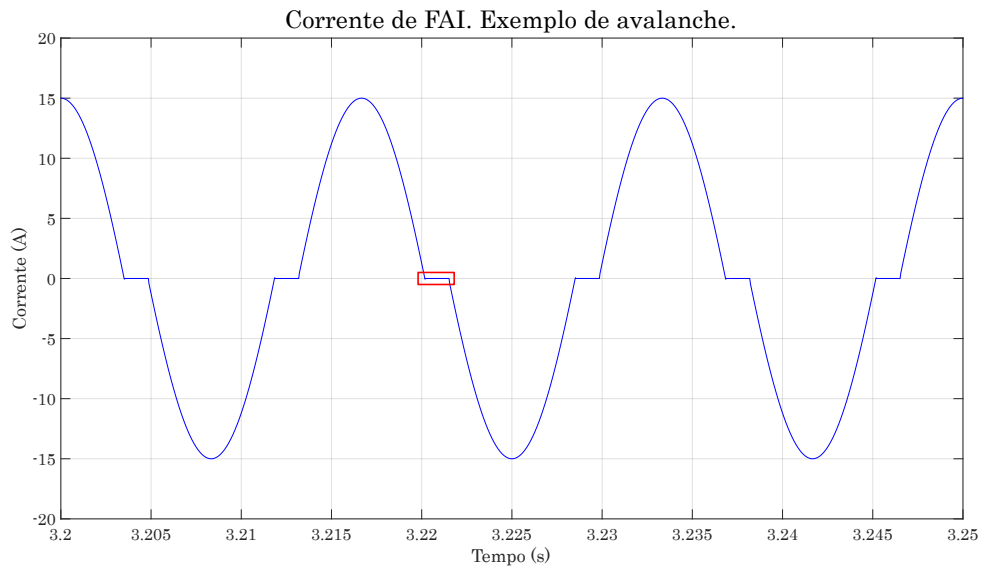
Solo	Corrente (A)
Asfalto seco	0
Concreto (não reforçado)	0
Areia seca	0
Areia molhada	15
Gramma seca	20
Capim seco	25
Gramma molhada	40
Capim molhado	50
Concreto (reforçado)	75

Fonte: Adaptada de [Aucoin e Russell \(1989\)](#).

### 2.1.3.1 Avalanche

Segundo [Emanuel et al. \(1990\)](#), o surgimento de harmônicos ímpares no sistema é devido a um evento conhecido como avalanche, no qual a rápida ionização do meio reduz a impedância de contato entre o condutor e o solo, dando início à passagem de corrente elétrica e, conseqüentemente, a formação do arco elétrico. Essa característica é mostrada na Figura 1.

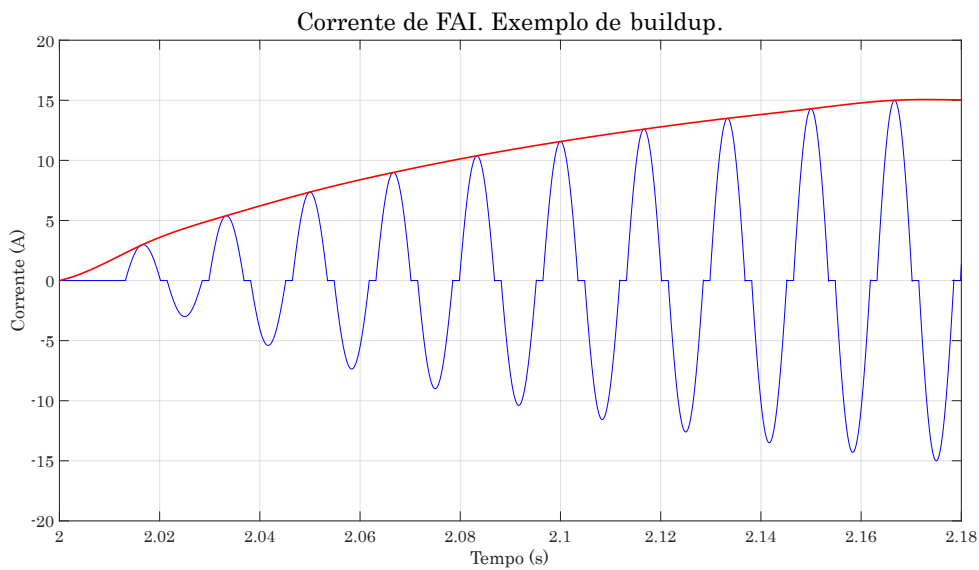
Figura 1 – Exemplo de avalanche na corrente de FAI.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 2.1.3.2 Buildup

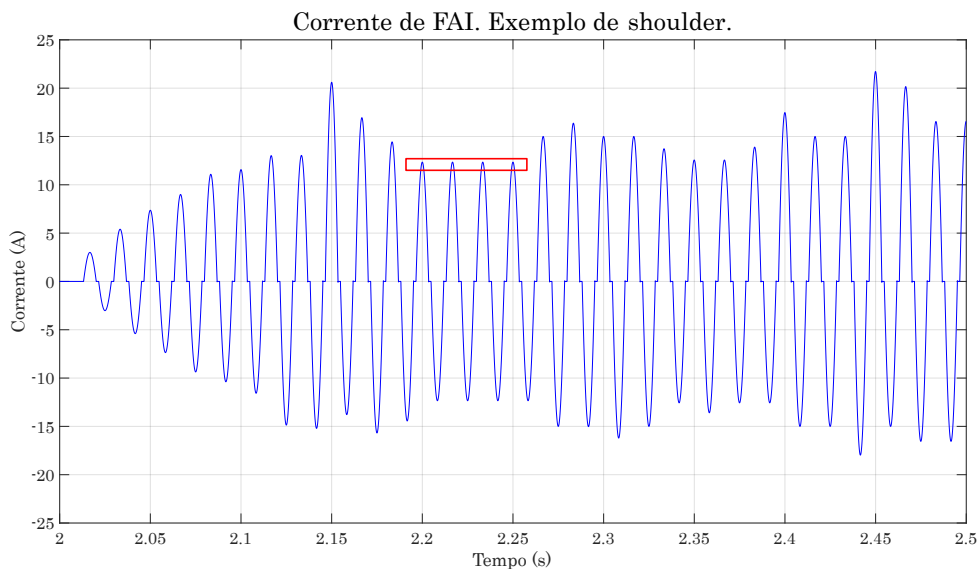
O aumento gradual da amplitude da corrente até seu máximo é denominada *buildup* ([NAM et al., 2001](#)). Essa característica ocorre na maior parte das faltas de alta impedância ([JEERINGS; LINDERS, 1989](#)) e está exemplificada na Figura 2.

Figura 2 – Exemplo de *buildup* na corrente de FAI.

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 2.1.3.3 *Shoulder*

Dá-se o nome de *shoulder* aos períodos durante os quais a amplitude da corrente permanece constante (JEERINGS; LINDERS, 1989; IURINIC *et al.*, 2016). Esta característica está ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Exemplo de *shoulder* na corrente de FAI.

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 2.1.3.4 *Assimetria*

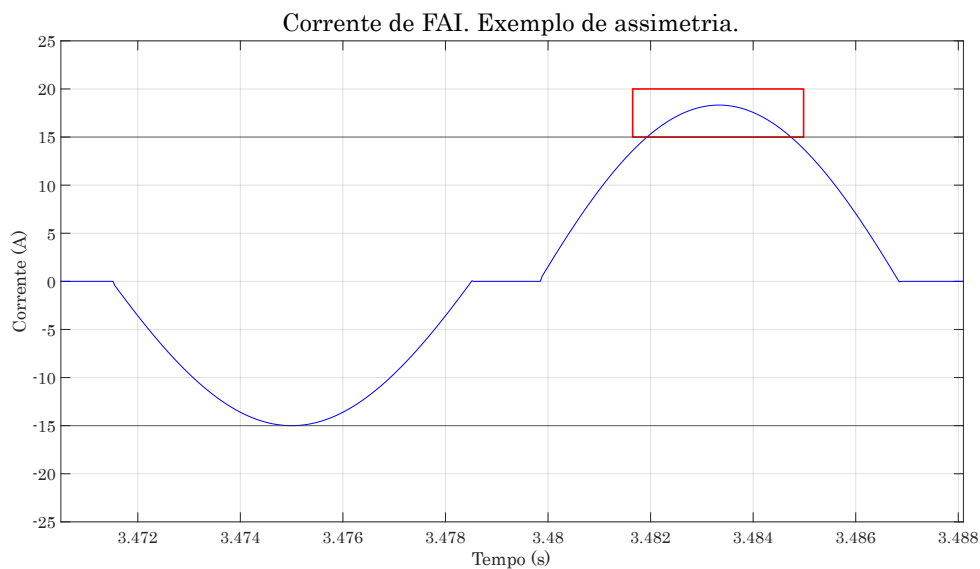
Nas FAIs, o semiciclo positivo pode ser maior que o negativo e vice-versa, causando assimetria na forma de onda da corrente (Figura 4), a qual varia ao longo do tempo de forma



aleatória (SULTAN; SWIFT; FEDIRCHUK, 1994). Essa característica ocorre, no caso de solos arenosos, devido à presença da sílica, que age como um cátodo, emitindo elétrons quando a tensão do arco é positiva. A umidade também é um fator causador de assimetria em qualquer tipo de solo por modificar a tensão do arco a cada semiciclo (SULTAN; SWIFT; FEDIRCHUK, 1994).

A assimetria causa o surgimento do harmônico de segunda ordem no espectro e tem pouca influência na geração do terceiro harmônico (EMANUEL *et al.*, 1990).

Figura 4 – Exemplo de assimetria na corrente de FAI.



Fonte: Elaborada pelo autor.

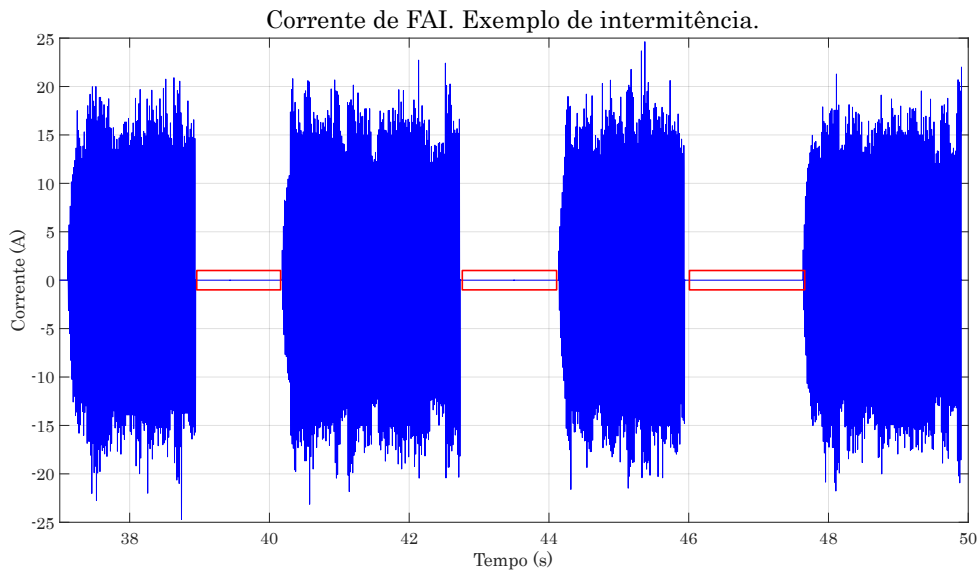
### 2.1.3.5 Intermitência

Como mostrado em (RUSSELL; CHINCHALI; KIM, 1988), os períodos de existência e extinção dos arcos elétricos são aleatórios, o que faz com que a corrente de falta seja intermitente (CHEN *et al.*, 2013). Essa característica está ilustrada na Figura 5. Não existe uma técnica para se prever quando um arco irá ocorrer ou se extinguir. Apesar dessa imprevisibilidade e de não haver padrão para a repetitividade deste fenômeno (AUCOIN; RUSSELL, 1987), a probabilidade de ocorrência desses períodos é dependente do tipo de solo e pode ser estudada. Em (RUSSELL; CHINCHALI; KIM, 1988) foi estudada a probabilidade que um arco tem de existir e inexistir durante determinados períodos de tempo. Essa probabilidade foi relacionada ao tipo de solo no qual a falta ocorre: úmido, seco e arenoso.

### 2.1.3.6 Modulação

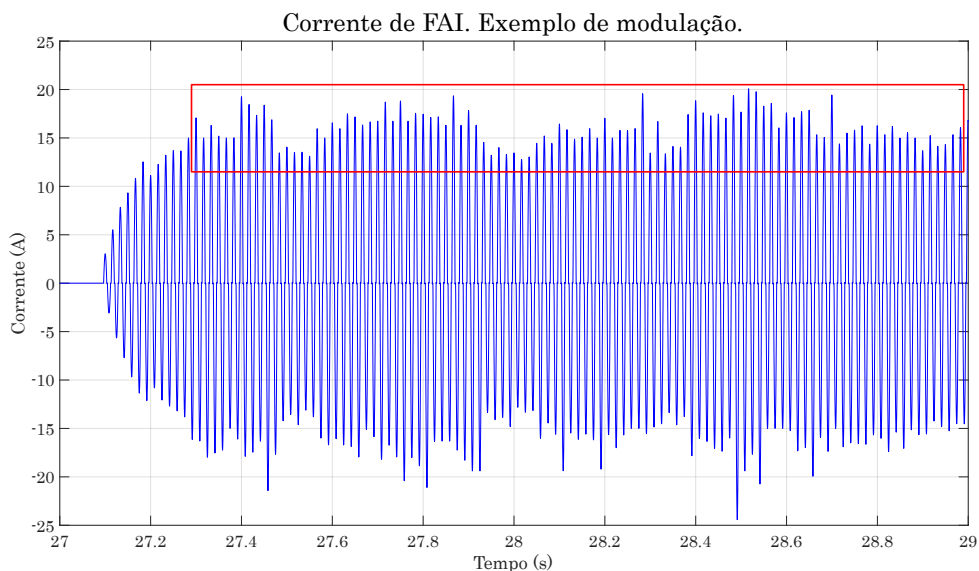
Devido ao tipo de solo, à sua umidade, às reações químicas e ao calor gerado, o arco elétrico varia o seu comprimento ao longo do tempo (SULTAN; SWIFT; FEDIRCHUK, 1994; CHEN *et al.*, 2013). Como resultado, a amplitude da corrente de falta varia, apresentando

Figura 5 – Exemplo de intermitência na corrente de FAI.



modulações (AUCOIN; RUSSELL, 1987; ETEMADI; SANAYE-PASAND, 2008), ilustradas na Figura 6. Uma vez que a modulação depende de condições do meio, as quais são extremamente difíceis de se prever e calcular, considera-se a mesma como sendo aleatória.

Figura 6 – Exemplo de avalanche na corrente de FAI.



### 2.1.4 Espectro de frequências

A natureza do arco elétrico faz com que a corrente de falta apresente características particulares, como foi explicado até então neste capítulo. Um dos modos de se detectar uma falta

de alta impedância é observar estas características. Para tanto, a análise do conteúdo espectral do sinal é uma das ferramentas às quais se pode recorrer.

A literatura divide o espectro de frequências de uma FAI em duas faixas: o Espectro de Baixa Frequência (EBF) e o Espectro de Alta Frequência (EAF). Este está compreendido entre 2 kHz e 10 kHz (WESTER, 1998; GIRGIS; CHANG; MAKRAM, 1990; AUCOIN; RUSSELL, 1982), aquele, encerra as frequências menores que 2 kHz (AUCOIN; RUSSELL, 1989).

#### 2.1.4.1 Espectro de baixa frequência

O EBF é resultado da avalanche, *buildup*, *shoulder*, assimetria e modulação. Dos estudos destes componentes (NAM *et al.*, 2001; KIM; RUSSELL, 1988; EMANUEL *et al.*, 1990; RUSSELL; CHINCHALI; KIM, 1988; RUSSELL; CHINCHALI, 1989; MACEDO *et al.*, 2015) estabelece-se que as frequências ímpares dominam o tempo todo e as frequências pares podem persistir. Das ímpares, o terceiro e o quinto harmônicos possuem maior amplitude durante a falta e, das pares, o segundo e quarto. Ainda, tanto os componentes pares quanto os ímpares variam durante a ocorrência do arco. O estudo das frequências inter-harmônicas sugere que os componentes próximos à frequência fundamental são mais expressivos durante a falta (MACEDO *et al.*, 2015).

#### 2.1.4.2 Espectro de alta frequência

O início do processo da formação do arco elétrico pode ser cessado por fatores do meio, impedindo o início da avalanche. Este fenômeno, denominado centelhamento, causa o surgimento do EAF. Em (RUSSELL; CHINCHALI; KIM, 1988) é descrito que, acima do 16º harmônico todas as frequências apresentam baixa amplitude e que seus valores são similares, apresentando característica de ruído branco.

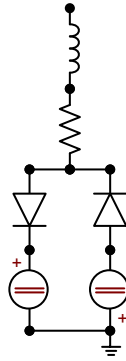
## 2.2 Modelos de falta de alta impedância

Para que o resultado de um algoritmo de detecção de FAIs seja confiável, o mesmo deve ser desenvolvido e testado com sinais obtidos de medidas reais ou de um modelo elétrico que represente o evento do melhor modo possível, ou seja, que reproduza as características apresentadas na Seção 2.1. A presente seção revisa os modelos trazidos pela literatura e justifica a escolha do modelo a ser utilizado no desenvolvimento desta tese.

O primeiro e mais conhecido modelo de falta de alta impedância, baseado nas características do arco elétrico, foi proposto por Emanuel *et al.* (1990). Conhecido como modelo de Emanuel, ilustrado na Figura 7, é resultado do estudo de medidas de FAIs feitas em campo e de um experimento laboratorial com FAIs em solo arenoso. A partir deste modelo, outros, utilizando a configuração de diodos em anti-paralelo, foram propostos. Em (SHARAF; SNIDER; DEBNATH, 1993), a impedância em série foi substituída por resistências não-lineares, dispostas

uma em cada ramo do modelo de Emanuel. Em (LAI *et al.*, 2005), a impedância em série foi substituída por duas resistências lineares, uma em cada ramo. Por gerarem correntes de falta que se repetem a cada ciclo, estes modelos são determinísticos e, portanto, não representam a aleatoriedade das faltas de alta impedância.

Figura 7 – Modelo de Emanuel (EMANUEL *et al.*, 1990).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma modificação do modelo de (EMANUEL *et al.*, 1990) foi proposta em (WAI; YIBIN, 1998), em que as duas fontes de tensão contínua, utilizadas para representar o efeito avalanche, foram substituídas por fontes de tensão com forma de onda do tipo dente de serra, com a intenção de representar a dinâmica de ignição do arco de forma mais realista que as fontes de tensão contínua. Por fim, o modelo continua determinístico e não representa, assim como os anteriores, *buildup* e *shoulder*.

Em (NAM *et al.*, 2001) duas resistências conectadas em série, cujos valores variam em função tempo, foram utilizadas para representar as FAIs. Uma delas é responsável por reproduzir o *buildup* e o *shoulder*, a outra reproduz a assimetria. Como desvantagem, o modelo utiliza valores de medição de faltas reais para que, por meio da relação de tensão e corrente, seja calculado o valor das resistências. Com isso, o modelo reproduz a mesma forma de onda em todas as simulações. Para modificar o comportamento da falta, é necessário recalcular os valores das resistências em cada instante de tempo, baseando-se nos novos valores de corrente e tensão de falta e, para tanto, são necessárias novas medições.

Proposto em (MICHALIK *et al.*, 2005), por meio de chaves estatísticas, foram conectados, em paralelo diversas cópias do modelo proposto em (LAI *et al.*, 2005), com o intuito de reproduzir a aleatoriedade das FAIs. Uma vez que cada um dos modelos é conectado individualmente e de modo aleatório, é pouco provável que a combinação gere as características de uma FAI, como *buildup*.

Para suprir a demanda de um modelo que represente as FAIs, desde o rompimento do condutor até as características geradas pelos arcos elétricos: avalanche, *buildup*, *shoulder*, assimetria, intermitência e modulação, foi proposto em Trondoli (2017) um modelo de falta que, além de reproduzir estas características, o faz de modo a inserir aleatoriedade às mesmas,

reproduzindo o comportamento de uma FAI real. O modelo ainda permite ao usuário o controle dos seus parâmetros. Este modelo passou por melhorias e foi publicado por [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#).

### 2.2.1 Modelo de falta de alta impedância utilizado

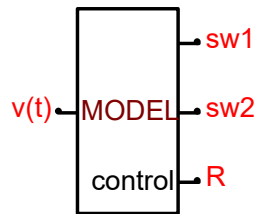
Como resultado da revisão bibliográfica dos modelos de falta, optou-se pela utilização do proposto por [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#), uma vez que representa de modo mais completo o comportamento do arco em comparação aos outros. Com ele é possível reproduzir as características de falta, tanto de forma isolada quanto em conjunto, facilitando o estudo, desenvolvimento e teste do algoritmo de detecção. Outra vantagem do modelo é que, por reproduzir a aleatoriedade das FAIs, impõe dificuldades ao algoritmo de detecção, obrigando-o a não buscar por uma solução baseada em uma só forma de onda, o que viria a particularizar o algoritmo a casos específicos de arco.

Como dito anteriormente, este modelo foi proposto pelo autor do presente documento em sua dissertação ([TRONDOLI, 2017](#)) e passou por melhorias ao longo do desenvolvimento desta tese, vindo a ser publicado em [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#). O funcionamento deste modelo será explicado de forma resumida e as melhorias serão descritas nesta seção. Mais detalhes sobre o modelo podem ser encontrados na referida publicação.

O modelo de FAIs foi desenvolvido no *software* ATPDraw, uma interface gráfica do programa *Alternative Transients Program (ATP)*. Ele é composto por componentes passivos em conjunto com componentes do tipo *Transient Analysis of Control Systems (TACS)*, os quais permitem ser controlados por meio de variáveis, programadas em linguagem MODELS.

O modelo funciona da seguinte maneira: o bloco de controle, denominado *control* (Figura 8) possui 3 saídas:  $sw1$ ,  $sw2$  e  $R$ . As duas primeiras são utilizadas para o controle das chaves  $sw1$  e  $sw2$ , mostradas na Figura 9. A chave  $sw1$  é responsável por simular o rompimento do condutor, abrindo no momento estipulado em *control*. A chave  $sw2$  é responsável por conectar o modelo à fase do lado da carga. Ela insere o modelo no tempo estipulado para o toque no solo. Além disso,  $sw2$  conecta e desconecta o modelo à fase, simulando a intermitência do arco. A saída  $R$  do bloco *control* fornece o valor da resistência do modelo, também denominada  $R$ . O valor de  $R$  é a soma de 3 valores individuais, que simulam a conexão de 3 resistências em série:  $r1$ ,  $r2$  e  $r3$ . Esta soma é feita internamente no bloco *control* de modo que apenas uma resistência ( $R$ ) seja vista no modelo. A resistência  $r1$  inicia em um valor alto (o qual será deduzido à frente, na Equação 2.9), o qual é reduzido ao longo do tempo, chegando a ser nula no instante final do *buildup*, estipulado em *control*. A resistência  $r2$  varia a cada semiciclo, de modo aleatório, reproduzindo o comportamento de assimetria do arco. Para a simulação da modulação, a resistência  $r3$  também assume valores aleatórios, que varia a cada ciclo e que pode ter seu valor mantido por alguns ciclos, reproduzindo o *shoulder*. Os cálculos dos valores das resistências é dependente da tensão no ponto de falta, a qual é fornecida como entrada do bloco *control*, denominada de  $v(t)$ .

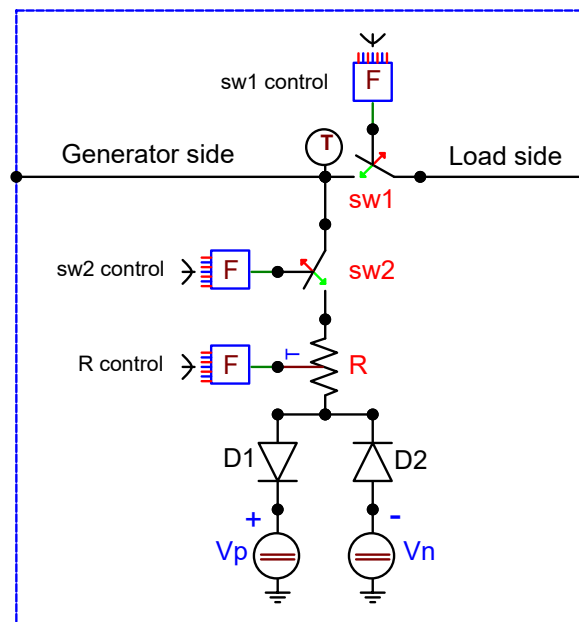
Figura 8 – Modelo de FAI: controle.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A primeira modificação feita no modelo de [Trondoli \(2017\)](#) foi a simplificação da estrutura, tanto do controle das chaves, quanto da resistência que o compõem. Para este fim, eram utilizados oito blocos programados em linguagem MODELS. Esses blocos foram reprogramados em apenas um bloco, como mostra a Figura 8.

Figura 9 – Modelo de FAI: componentes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dentro deste bloco o usuário tem acesso às variáveis de controle, as quais são brevemente explicadas a seguir:

- $v_l$ : Tensão de linha do sistema [V].
- $freq$ : Frequência do sistema em [Hz].
- $vp$ : Valor da fonte de tensão contínua [V].
- $ruptt$ : Instante de tempo no qual o cabo se se rompe [s].
- $toucht$ : Instante de tempo no qual o cabo toca o solo [s].

- *iFault*: Valor de pico da corrente de falta em regime permanente, em torno da qual a modulação e assimetria ocorrerão [A].
- *iPerc*: Valor de pico da corrente inicial do arco, como porcentagem da corrente de falta *iFault*.
- *cBup*: Número de ciclos de *buildup*.
- *soil*: Tipo de solo: 0: molhado 1: seco e 2: arenoso.
- *iAsy*: Máximo valor de pico da corrente de assimetria, como porcentagem de *iFault*.
- *iSpike*: Máximo valor de pico da corrente de *spike*, como porcentagem de *iFault*.
- *pAsy*: Probabilidade de ocorrer assimetria.
- *pSpike*: Probabilidade de ocorrer *spike*.
- *iNegMod*: Menor valor de pico da modulação, como porcentagem de *iFault*.
- *iPosMod*: Maior valor de pico da modulação, como porcentagem de *iFault*.
- *pNegMod*: Probabilidade que o valor de corrente seja menor que *iFault*.
- *pPosMod*: Probabilidade que o valor de corrente seja maior que *iFault*.
- *minCy*: Número mínimo de ciclos que um *shoulder* poderá assumir.
- *maxCy*: Número máximo de ciclos que um *shoulder* poderá assumir.

A segunda modificação diz respeito à modelagem matemática do *buildup*. No modelo proposto em [Trondoli \(2017\)](#), a resistência que controla o *buildup* é modelada por uma exponencial decrescente com coeficiente de decrescimento variável. Com isso, o valor da resistência não pode ser nula no tempo determinado pelo número de ciclos de *buildup*, já que o valor da exponencial decrescente só atinge o valor nulo para o tempo infinito. Para contornar isso, o valor final da exponencial era dado por uma constante de erro, no valor de 1% do valor inicial da resistência. Outro ponto é que, uma vez que o valor da constante de decrescimento é calculada com base no número de ciclos de *buildup*, para tempos curtos e correntes de grande amplitude, o elevado valor da constante fazia o *buildup* apresentar envoltórias que não representavam satisfatoriamente a característica modelada.

Para aprimorar o *buildup*, um novo equacionamento é proposto neste trabalho. Após a análise de sinais de falta reais, cedidos pelos autores de [Macedo et al. \(2015\)](#), notou-se que a forma da envoltória do *buildup* nos sinais reais cresce de modo mais parecido com um logaritmo a uma exponencial. Deste modo, a resistência foi recalculada com a finalidade de conferir à corrente de falta, em sua fase de *buildup*, uma envoltória com característica logarítmica crescente,

cujo valor ao fim dos ciclos de *buildup* fosse o valor da corrente de falta parametrizada e não uma aproximação.

Para que o *buildup* possua crescimento logarítmico, uma vez que a corrente é resultado da razão entre a tensão e a resistência no ponto de falta, o sinal de tensão deve ser multiplicado por uma função logarítmica, portanto, a resistência *rI*, que controla o *buildup*, deve ser o inverso de um logaritmo:

$$rI = \frac{1}{\log(t)} [\Omega] \quad (2.1)$$

Para que *rI* não assuma valores negativos, a Equação 2.1 foi corrigida conforme (2.2):

$$rI = \frac{1}{\log(t+1)} [\Omega] \quad (2.2)$$

Para que *rI* possua valor nulo quando acabarem os ciclos de *buildup*, a Equação 2.2, foi corrigida conforme (2.3), na qual *cbup* é o número de ciclos de *buildup* do arco:

$$rI = \frac{1}{\log(cbup/60+1)} - L = 0 [\Omega] \quad (2.3)$$

$$L = \frac{1}{\log(cbup/60+1)} [\Omega] \quad (2.4)$$

Portanto:

$$rI = \frac{1}{\log(t+1)} - \frac{1}{\log(cbup/60+1)} [\Omega] \quad (2.5)$$

Como o primeiro valor de *rI* é calculado para  $t = 1/60$ , deve-se dividir *rI* pelo seu valor neste instante de tempo. Com isso *rI* é unitário em  $t = 1/60$ .

$$rI = \frac{\frac{1}{\log(t+1)} - \frac{1}{\log(cbup/(60+1))}}{\frac{1}{\log(1/60+1)} - \frac{1}{\log(cbup/(60+1))}} [\Omega] \quad (2.6)$$

A normalização da curva foi feita para que a terceira modificação do modelo fosse possível. Essa melhoria inclui a possibilidade do usuário escolher o valor inicial da corrente de falta como uma porcentagem do valor final da mesma, por meio da variável *iperc* na interface de controle. Essa alteração foi pensada para que o usuário possa modificar a característica inicial do arco e assim estudar algoritmos de detecção que visem acusar a falta logo nos primeiros ciclos do arco. Além disso, essa parametrização permite controlar a inclinação do *buildup* que, para um mesmo número de ciclos, apresenta taxa de crescimento mais elevada para correntes de falta iniciais de menor valor.



A corrente de falta inicial é a razão entre o valor da tensão no ponto de falta e a soma das três resistências do modelo:  $r1$ ,  $r2$  e  $r3$ . Essa corrente deve corresponder a uma porcentagem ( $iper$ ) da corrente de falta ( $iFault$ ), que é o valor de corrente ao fim do *buildup*, momento no qual a resistência  $r1$  deve ser nula. Portanto:

$$\frac{1}{r1+r2+r3} = \frac{iper}{100(r2+r3)} \quad (2.7)$$

Deste modo, o valor inicial de  $r1$  é dado por:

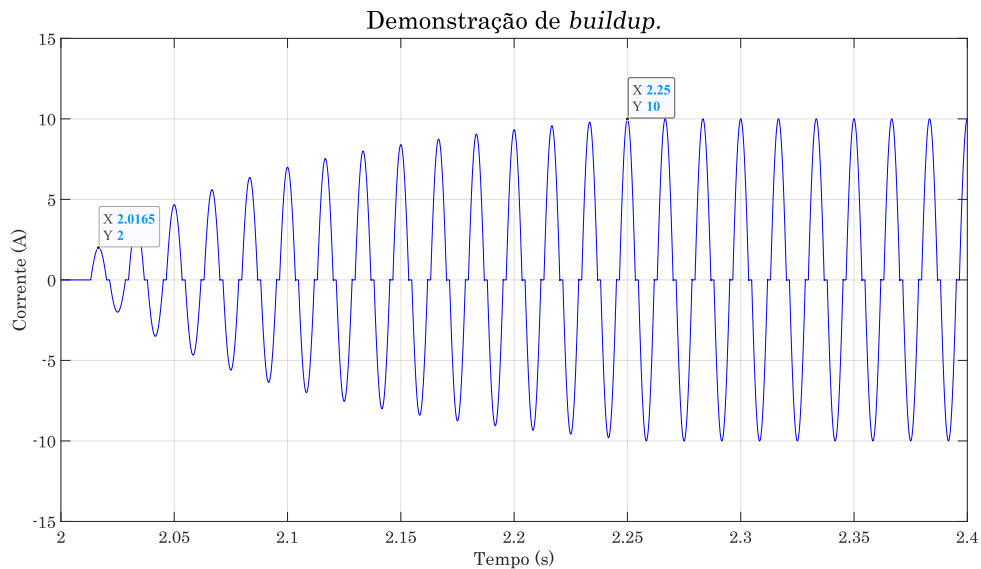
$$r1 = \frac{100(r2+r3)}{iper} - (r2+r3) \text{ } [\Omega] \quad (2.8)$$

Como  $r1$  foi calculado na Equação 2.6 com amplitude inicial unitária, o valor de  $r1$  escalado é de:

$$r1 = \left( \frac{100(r2+r3)}{iper} - (r2+r3) \right) \left( \frac{\frac{1}{\log(t+1)} - \frac{1}{\log(cbup/(60+1))}}{\frac{1}{\log(1/60+1)} - \frac{1}{\log(cbup/(60+1))}} \right) [\Omega] \quad (2.9)$$

Como resultado, a Figura 10 mostra um exemplo da aplicação da Equação 2.9. Nesta simulação foi parametrizada uma corrente de falta de 10 A (pico) com *buildup* de 15 ciclos e valor inicial ( $iper$ ) de 20% do valor final, resultando em uma corrente de pico de 2 A.

Figura 10 – Demonstração de *Buildup*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A última alteração do modelo foi a substituição dos parâmetros de controle da assimetria, *spike* e modulação. No modelo de [Trondoli \(2017\)](#) essas características eram controladas pela

alteração do valor das resistências  $r_2$  e  $r_3$  diretamente. Cada uma dessas resistências possuía dois valores a serem parametrizados. Para  $r_2$ , os valores determinavam a máxima corrente de pico e de assimetria, para  $r_3$  os valores máximos e mínimos de modulação. Isso obrigava o usuário a calcular manualmente os valores desses parâmetros para os desejados comportamentos da corrente. No modelo aprimorado esses parâmetros passaram a ser calculados internamente pelo controle do modelo e os novos parâmetros são determinados diretamente como valores de corrente. Como listados no início desta seção, os novos parâmetros são:

- $iAsy$ : Máximo valor de pico da corrente de assimetria, como porcentagem de  $iFault$ .
- $iSpike$ : Máximo valor de pico da corrente de *spike*, como porcentagem de  $iFault$ .
- $iNegMod$ : Menor valor de pico da modulação, como porcentagem de  $iFault$ .
- $iPosMod$ : Maior valor de pico da modulação, como porcentagem de  $iFault$ .

Note que agora os parâmetros são intuitivos e guardam relação direta com os valores visualizados na forma de onda de corrente de falta, assim sendo, a parametrização é feita por meio de valores calculados como porcentagem da corrente de falta e suas probabilidades devem ser parametrizadas de acordo com a relação de vezes que a característica aparece em relação ao período total do arco.

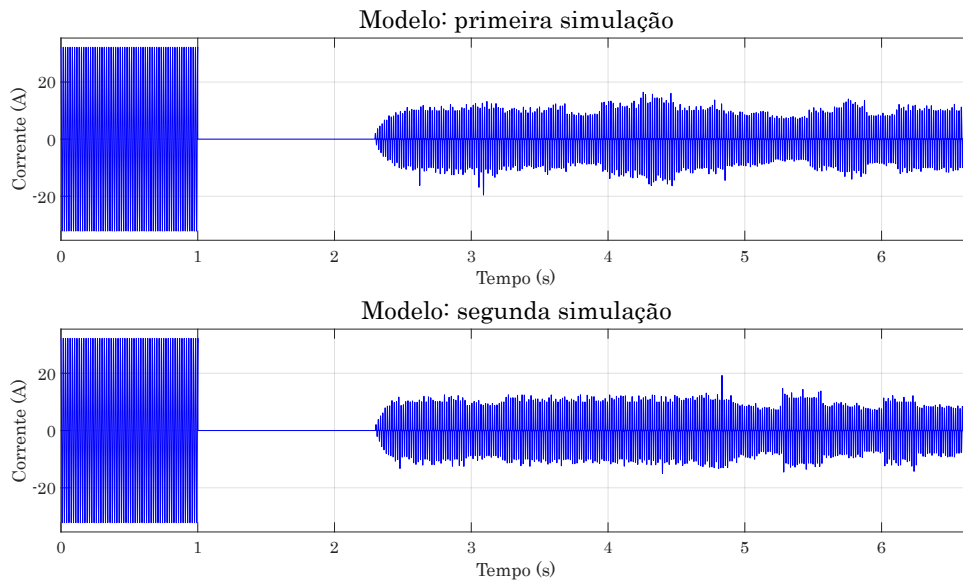
Como exemplo, se o usuário deseja simular o seguinte caso:

- Sistema com tensão de linha de 13,8 kV e frequência de 60 Hz, com falta ocorrendo em solo arenoso.
- Ruptura do condutor ocorrendo em 1 s, com toque no solo em 2,28 s.
- Sinal com 20 ciclos de *buildup* como corrente inicial sendo equivalente a 20% da corrente de falta.
- Corrente de falta (pico) de 10 A.
- Assimetria máxima de 2,5 A ocorrendo em 80 % do sinal.
- Picos de assimetria (*spike*), de no máximo 8 A, ocorrendo em 1 % dos ciclos.
- Modulação máxima de 3 A, tanto positiva como negativa, ocorrendo, cada uma delas em 30 % do sinal, com número mínimo de 10 ciclos e máximo de 20.
- $v_l = 13,8$ .
- $freq = 60$ .

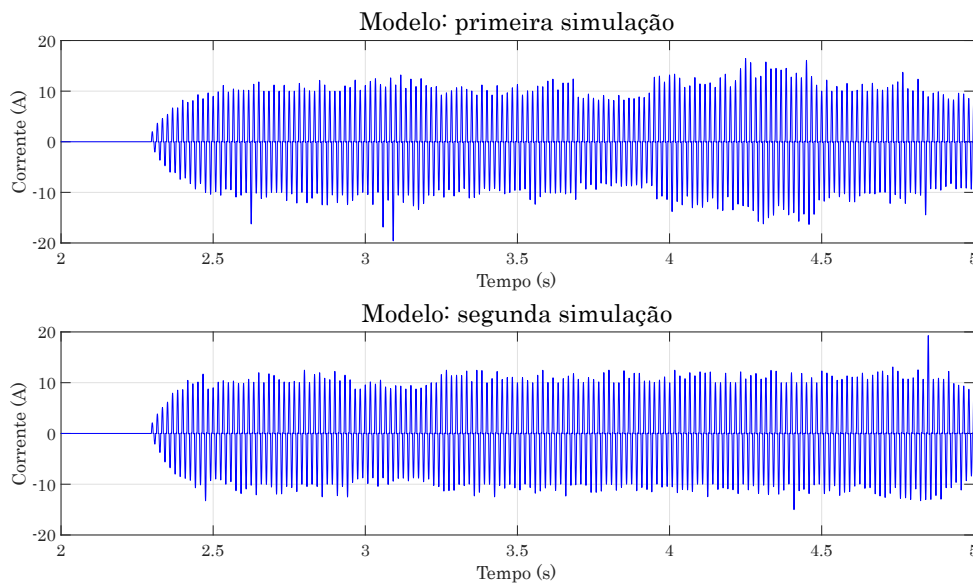
- $vp = 5000$ .
- $ruptt = 1$ .
- $toucht = 2,28$ .
- $iFault = 10$ .
- $iPerc = 20$ .
- $cBup = 20$ .
- $soil = 2$ .
- $iAsy = 25$ .
- $iSpike = 80$ .
- $pAsy = 80$ .
- $pSpike = 1$ .
- $iNegMod = 30$ .
- $iPosMod = 30$ .
- $pNegMod = 30$ .
- $pPosMod = 30$ .
- $minCy = 10$ .
- $maxCy = 20$ .

A Figura 11 mostra o resultado de duas simulações utilizando a configuração exemplificada. Como pode ser visto, o modelo, devido à sua característica randômica, mantém as características parametrizadas gerando dois sinais diferentes. A Figura 12 mostra uma aproximação destes sinais.

A Tabela 3 mostra um comparativo entre os modelos propostos na literatura e o modelo proposto. Os modelos estão apresentados em ordem (M1 a M6) e correspondem aos modelos apresentados em: Emanuel *et al.* (1990), Sharaf, Snider e Debnath (1993), Wai e Yibin (1998), Nam *et al.* (2001), Michalik *et al.* (2005) e (LAI *et al.*, 2005).

Figura 11 – Simulação de falta utilizando o modelo de [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 – Aproximação do sinal gerado com o modelo de [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#).

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.3 Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as características e o comportamento de uma FAI, desde o rompimento do condutor até a formação do arco elétrico. Foram descritos os modelos de FAIs mais utilizados na literatura e, dentre eles, foi justificada a escolha do modelo de [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#) para ser utilizado nas simulações do presente documento. Este modelo é uma melhoria do modelo de [Trondoli \(2017\)](#), o qual passou por modificações com a finalidade de facilitar o uso, incluir novas parametrizações e adequar a assinatura da forma de onda da corrente.

Tabela 3 – Comparação entre os modelos de FAIs.

Característica	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Proposto
Avalanche	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Assimetria	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Buildup</i>				✓			✓
<i>Shoulder</i>							✓
Intermitência							✓
Modulação							✓
Aleatório							✓
Independência de sinais reais	✓	✓	✓		✓	✓	✓

M1: Emanuel *et al.* (1990); M2: Sharaf, Snider e Debnath (1993); M3: Wai e Yibin (1998); M4: Nam *et al.* (2001); M5: Michalik *et al.* (2005); M6: (LAI *et al.*, 2005).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma das características de FAI não mencionadas é a possível existência de um arco elétrico no momento do rompimento do condutor. As características deste arco dependem da amplitude da corrente interrompida e do instante da senoide no qual o rompimento ocorre. Ainda, seu comportamento ao longo do tempo, uma vez que as FAIs dependem do comprimento do arco, é função da velocidade que as pontas do condutor se separam, o que, por sua vez, depende da tração à qual o cabo está submetida. Por não possuir dados sobre essas características, elas não são reproduzidas pelo modelo.

No Capítulo 3 serão apresentados os métodos de detecção de FAIs presentes na literatura. A partir destes, será descrita uma proposta de um novo método.



---

# PROPOSIÇÃO DE UM ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

---

---

Como elencado no Capítulo 1, um dos objetivos desta tese é a proposição de um método de detecção de FAIs causadas pelo contato direto do condutor ao solo quando este ocorre do lado da fonte. Para isso, neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica dos métodos de detecção de FAIs descritos na literatura e então será apresentada a proposta do algoritmo de detecção.

## 3.1 Métodos de detecção de falta de alta impedância

Os primeiros métodos de detecção de FAIs datam de 1949 (CALHOUN *et al.*, 1982). Esses métodos eram mecânicos e tinham como objetivo forçar o contato do condutor rompido com um objeto solidamente aterrado com o objetivo de fazer atuar a proteção convencional por sobrecorrente. Devido ao alto custo de instalação, esta se tornou uma solução inviável

Foi proposto por Calhoun *et al.* (1982), um relé cujo acionamento era feito pela amplitude da corrente de sequência zero. O limiar de *trip* era variável, acompanhando o aumento da corrente de carga. Essa relação tinha que ser preestabelecida e torna o método ineficiente para os SDs atuais.

Os autores de Huang, Chu e Chen (1988) descrevem o uso de dois relés, acionados pela amplitude dos componentes de segundo e terceiro harmônicos. Considerando as cargas atuais e as correntes de FAI, não é possível prever um valor limiar para estes componentes, o que inviabiliza a utilização destes algoritmos.

Uma revisão do estudo de FAIs, feita pelos autores de Gomes e Ozansoy (2021), mostra que das técnicas utilizadas para a detecção de FAIs, a Transformada Wavelet (TW) representa 37%

das publicações, enquanto técnicas baseadas na Transformada de Fourier (TF) são responsáveis por 20% dos estudos, seguidos por outras técnicas, as quais possuem valores menores que 7% cada. Este estudo ainda mostra que a cada década, o número de trabalhos sobre o tema tem dobrado, aproximadamente.

A finalidade da utilização destas transformadas, assim como da Transformada de Stockwell (TS), é extrair características dos sinais de falta, sejam eles de corrente ou tensão, com o objetivo de detectar a ocorrência de uma FAI. A observação das frequências harmônicas dos sinais já é bem consolidada e utilizada desde o início dos estudos de FAI.

Os autores de [Kim e Russell \(1988\)](#) investigaram os componentes harmônicos nos períodos de pré e pós falta de sinais reais. Em conclusão, eles descrevem que os harmônicos ímpares predominam, tanto em solo seco quanto molhado. Desses, o 3º e 5º apresentaram maior amplitude absoluta. Das frequências pares, as com maior presença foram os 2º e 4º harmônicos, em ambos os solos. O autor ainda estudou o aumento relativo de amplitude das frequências, concluindo que este parâmetro foi maior para os componentes pares, em especial para o 8º e 10º harmônicos, e que o aumento relativo destas frequências seria um bom indicador de FAIs.

Os autores de [Chakraborty e Das \(2019\)](#) defendem que as FAIs podem ser detectadas pela energia média de seus harmônicos pares, uma vez que, em sistemas de distribuição, cargas lineares geram pouca quantidade de harmônicos destas ordens. Os autores propõem fazer a leitura da corrente de falta por meio de medidores inteligentes espalhados pela rede. O algoritmo foi testado no sistema IEEE de 13 barras, com a presença de GD e frente à simulação de chaveamento de banco de capacitores e cargas não lineares. Em contrapartida, o método é desenvolvido com um modelo de FAI que não representa o evento com todas suas características e se baseia em um limiar inferido dos sinais e do sistema analisado, o que pode particularizar o estudo.

Em [Lima \*et al.\* \(2018\)](#), a amplitude do 2º, 3º e 5º harmônicos e a fase do 3º harmônico são calculadas por meio da Transformada de Fourier de Tempo Curto (TFTC) e, da comparação com um limiar determinístico, apontam ou não a ocorrência de uma FAI. Nos testes, os autores identificaram todos os sinais de FAI reais e provenientes de um modelo. O algoritmo foi testado contra chaveamento de banco de capacitores e energização de cargas, mas não foi estudado o comportamento frente a cargas não lineares ou presença de GD.

Em um estudo com sinais reais, os autores de [Aucoin e Russell \(1987\)](#) propõem que se utilizem as frequências sub-harmônicas (30 Hz) e inter-harmônicas de baixa frequência (150 Hz e 270 Hz) na detecção de FAIs, já que elas perduram durante a falta e não se mantêm em regime permanente. Outro estudo, desenvolvido por [Macedo \*et al.\* \(2015\)](#), aponta as sub-harmônicas entre 40 Hz e 56 Hz e as inter-harmônicas entre 64 Hz e 80 Hz como parâmetros relevantes na detecção de FAIs.

Os autores de [Gadanayak e Mallick \(2019\)](#) propõem observar o conteúdo inter-harmônico do sinal de falta por meio da decomposição com a TW para a detecção das FAIs, porém, os sinais



utilizados são provenientes de um modelo de falta que não representa *buildup* nem a modulação corretamente, o que pode comprometer o resultado. Ainda, este algoritmo não foi testado com sinais reais ou cargas não lineares.

Ainda sobre a utilização de transformadas, em [Torres e Ruiz \(2011\)](#) é proposto, como índice de detecção, a utilização da soma de todos os valores do terceiro nível de decomposição da wavelet-mãe db14. Foi encontrado um aumento de 60% deste valor nas fases faltosas, em relação às sãs. O trabalho aponta este índice como um indicador relevante, mas não estabelece valores de limiar. O artigo não analisa o método frente a perturbações, tais como chaveamento de bancos de capacitores ou energização de transformadores.

Em [Eldin, Abdallah e Mohamed \(2013\)](#), o valor do quinto nível de detalhe da corrente, extraído por meio da wavelet mãe Daubechies 3 (db3) é utilizado como índice de detecção. O limiar de 0,1 (adimensional) durante mais de 2 ciclos, é estabelecido para a detecção da falta. Segundo o autor, o método testado com dados reais de falta produziu resultados relevantes, porém, não especifica a porcentagem de acerto. A técnica não foi testada com outros eventos.

Os autores de [Costa et al. \(2015\)](#) propõe que a detecção de FAI seja feita com base na energia dos coeficientes wavelet com distorção de borda. Em comparação com os métodos que utilizam apenas a a energia dos coeficientes, os autores afirmam um ganho em velocidade. Segundo os autores, o método é eficiente para correntes com amplitude não próximas a zero. O algoritmo não foi testado contra cargas não lineares ou com a presença de GD.

A TW é utilizada pelos autores de [Yeh, Sim e Bravo \(2019\)](#) para a decomposição de sinais de falta reais, lidos de um teste em laboratório com tensão de linha de 12 kV. O sinal é lido no ponto de falta e sua análise é feita por meio da wavelet db2. A falta é detectada quando um limiar, baseado em diversos níveis de decomposição, é ultrapassado. O método não foi testado em nenhum sistema e contra nenhum tipo de evento.

Uma série de trabalhos baseados na TW está relacionada a métodos híbridos, os quais utilizam a TW para extrair valores baseados na decomposição do sinal e então fazem uso de ferramentas inteligentes, estatísticas e outras complementares para estudar estes valores.

A TW e a TFTC também podem ser utilizadas por métodos híbridos, os quais as utilizam para decompor o sinal e apresentar seus valores a métodos inteligentes e estatísticos. O uso da TW pode ser encontrada em trabalhos como ([LAI et al., 2005](#); [SEDIGHI et al., 2005](#); [LAI; SNIDER; LO, 2006](#); [MICHALIK et al., 2005](#)) ou, mais atualmente em [Gu et al. \(2021\)](#), no qual os autores utilizam a TW do tipo db4 para extrair características dos sinais de FAIs e fornecer como entrada de uma rede neural. Os testes foram feitos com o sinais medidos no ponto de falta em um sistema real de teste. Apesar de todas as faltas terem sido detectadas, o algoritmo não foi testado com a influência de carga ou contra qualquer outro tipo de evento.

Recentemente, destaque tem sido dado à importância do terceiro harmônico nos sinais de FAI. Um índice baseado no ângulo de fase da terceira harmônica, calculado por meio da TS, é

proposto pelos autores de [Lima et al. \(2021\)](#). A falta é identificada quando este valor ultrapassa um limiar adaptativo. O algoritmo foi testado com diversos tipos de eventos e foi capaz de detectar 99% dos casos de FAI, sem falsos positivos. O método não foi testado na presença de GD ou com cargas não lineares cujo conteúdo harmônico varia ao longo do tempo.

Com uma taxa de acerto de 90%, os autores de [Wontroba et al. \(2022\)](#) utilizam, além de outros indicadores, a relação de que o terceiro harmônico deve ser maior que 3% do valor da fundamental. Além do limiar ser determinístico, o algoritmo não foi testado com sinais de falta reais, com cargas não lineares ou na presença de GD.

Os autores de [Lopes et al. \(2022\)](#) utilizam a TS para observar a variação da energia dos harmônicos pares e ímpares, de ordens 2, 3, 4, 5, 6 e 7. A energia do terceiro harmônico é observada nas 3 fases e tem como finalidade diferenciar as FAIs de eventos de longa duração e presença de distorção, como é o caso do forno a arco, que apresenta elevação deste componente em mais de uma fase, o que não ocorre durante uma FAI. Dentre todos os testes, os autores apresentam uma taxa de acerto de 90,73% na detecção de FAI e 100% de falsos positivos, para outros eventos. Como contrapartida, o algoritmo foi testado apenas para 33 sinais reais, já que não houve testes com nenhum modelo de FAI. O algoritmo não foi testado com variação de carregamento do sistema ou com presença de GD.

Ainda, são presentes na literatura estudos que utilizam ferramentas inteligentes e classificadores na tentativa de identificar as FAIs. Nessa linha, os autores de [Mishra, Routray e Rout \(2016\)](#) utilizaram a TS para extrair características dos sinais de FAI e alimentar dois classificadores, um sendo uma Rede Neural Artificial (RNA), outro uma Máquina de Vetores de Suporte (MVS). Apesar de apresentar taxas de detecção acima dos 90%, é utilizado um modelo determinístico, sem nenhum tipo de aleatoriedade.

O mesmo problema é encontrado em [Baqui et al. \(2011\)](#), no qual os autores utilizam 7 níveis de detalhe e 1 de aproximação da wavelet-mãe db4 para treinar uma RNA, porém, uma vez que as análises são baseadas em um modelo determinístico, não é possível afirmar que o método funcionaria em cenários reais.

Em [Lai et al. \(2003\)](#) os autores utilizam um banco de filtros para extrair os componentes de ordem 2, 3, 5, 7 e 9 da corrente de falta, os quais são utilizados para treinar uma RNA. Além de não ser testado contra nenhum tipo de evento diferente de FAIs, o trabalho utiliza um modelo não estocástico nas simulações de FAI.

Em [Sekar e Mohanty \(2020\)](#) um Filtro de Gradiente Morfológico (FGM) é utilizado para extrair características estatísticas dos sinais de falta e definir os parâmetros de um classificador baseado em lógica *fuzzy*. Apesar de apresentar taxa de detecção acima dos 90%, o trabalho utiliza um modelo determinístico.

Técnicas baseadas no domínio do tempo também são utilizadas na tentativa de identificação de FAIs. Em [Sultan, Swift e Fedirchuk \(1994\)](#), valendo-se do comportamento errático da

amplitude da corrente de falta e de sua assimetria, são utilizadas duas características na detecção:

- Assimetria: diferença entre os valores absolutos de pico dos semiciclos dentro de uma janela de um ciclo.
- *Flicker*: diferença entre os valores de pico dos semiciclos de mesmo sinal em dois ciclos consecutivos.

Os autores de [Sultan, Swift e Fedirchuk \(1994\)](#) não descreveram valores para a taxa de acerto do uso do algoritmo, mas estudaram o comportamento dos arcos para cada um dos parâmetros utilizados no mesmo. Em seu estudo, os autores pontuam que a distorção da corrente é menor em solos molhados e que, devido ao calor gerado pelo arco elétrico, essa condição pode se alterar, secando o solo e fazendo com que a distorção aumente. O algoritmo não foi testado em um SD com a presença de GD ou cargas variáveis, além da detecção depende de um limiar determinístico, baseado em um número de testes limitado.

Outro parâmetro possível de ser utilizado na detecção de FAI é o espectro de altas frequências. Segundo [Aucoin e Russell \(1987\)](#), a maior parte dos arcos elétricos são ricos em frequências maiores que 2 kHz. Os autores de [Aucoin e Russell \(1989\)](#) estudaram a utilização das frequências acima dos 2 kHz para identificar a avalanche. Um ponto a ser destacado é que essa faixa de frequências possui baixa amplitude.

Em [Chen et al. \(2013\)](#) é estudado o intervalo de duração da avalanche em diversos tipos de solo. Os valores médios encontrados para o semiciclo positivo variam de 2,2 ms até 4,1 ms e para o negativo de 2,4 ms a 4,3 ms. Cabe pontuar que estes valores podem ser mascarados pela corrente de carga quando a corrente de falta é medida na subestação.

Os autores de [Batista et al. \(2016\)](#) utilizam a decomposição em componentes ortogonais dos sinais de tensão e corrente para detectar e localizar FAIs. Com essa técnica não são necessários conhecimentos prévios do sistema ou dos sinais de falta. Os autores apontam uma taxa de acerto de 80% na identificação de FAIs. O método não foi testado frente a outros eventos.

Em [Paula e Macedo \(2018\)](#), foi desenvolvido um método de medição não invasivo, baseado na medição dos campos magnéticos gerados pelos condutores do sistema de distribuição. Para a detecção, o autor utiliza uma ideia similar à proposta em [Macedo et al. \(2015\)](#), no qual é calculado um índice de detecção baseado na energia das frequências inter-harmônicas adjacentes à fundamental. Em [Paula e Macedo \(2018\)](#), porém, as frequências utilizadas para o cálculo da energia estão compreendidas entre 50 e 70 Hz, ao passo que em [Macedo et al. \(2015\)](#) o espectro utilizado variava de 40 a 80 Hz. Testes do método com sinais reais detectaram a maior parte das faltas logo após o rompimento do cabo, uma vez que os componentes inter-harmônicos são elevados após a ruptura. O método não foi testado com outros evento ou na presença de GD.

Além das transformadas, outras ferramentas matemáticas vêm sendo utilizadas na detecção de FAIs. Em [Sekar e Mohanty \(2018\)](#), os autores utilizam uma árvore de decisão para

classificar eventos como sendo FAI, a qual é alimentada por parâmetros extraídos pela técnica de Morfologia Matemática (MM). Os testes são feitos com um modelo de falta que não representa *buildup*, uma vez que chaveia aleatoriamente modelos determinísticos ligados em paralelo. Apesar de apontar taxa de detecção de 99,34%, o algoritmo não é testado com sinais reais de falta, tampouco contra qualquer outro evento ou presença de GD.

Em [Kavaskar e Mohanty \(2019\)](#), a MM foi utilizada para extrair características da corrente de FAI no domínio do tempo. Os autores apontam 100% de detecção de casos de falta, porém, os dados são provenientes de um modelo falta determinístico, que não representa nenhum tipo de aleatoriedade ao longo do tempo. Ainda, o método não foi testado com cargas não-lineares com potência variável e nem com a presença de GD.

Os autores de [Wang, Geng e Dong \(2018\)](#) propõem a detecção de FAIs no domínio do tempo, analisando a inclinação do sinal de corrente de falta no cruzamento por zero, com a medição sendo feita no ponto de falta. Caso o autor tivesse lido a corrente na subestação, é provável que a corrente de carga influenciasse no método. Ainda, o mesmo não foi testado frente a eventos comuns aos sistemas de distribuição e nem com a presença de geração distribuída.

Uma técnica capaz de medir a distorção da forma de onda de corrente das FAIs foi utilizada em [Bhandia et al. \(2020\)](#). Esta ferramenta, chamada de *Advanced Distortion Detection Technique (ADDT)*, é capaz de dizer o quão semelhante a uma senoide pura é do sinal de falta. O método não foi testado com sinais reais e requer múltiplos medidores ao longo do alimentador.

O cálculo do produto interno entre as correntes de sequência zero e as correntes de linha de um alimentador é proposta pelos autores de [Wang et al. \(2022\)](#) para a detecção de FAIs. O trabalho utiliza um modelo de falta determinístico e não testa o método contra outros eventos ou sob a presença de GD.

Com uma taxa de acerto de 80% e utilizando sinais reais, os autores de [Grimaldi et al. \(2021\)](#) utilizam um preditor linear, que é um método matemático que visa prever o valor de uma nova amostra como sendo uma combinação linear de amostras passadas. Os autores afirmam que o método apresenta resultados melhores que os métodos que utilizam a TW. O método proposto é capaz de identificar faltas em até 100 ms. O método foi testado contra chaveamento de capacitores e energização de carga, mas não foi testado contra perturbação harmônica ou presença de GD.

Em acordo com a revisão bibliográfica apresentada nesta seção, um estudo de revisão literária ([MISHRA; PANIGRAHI, 2019](#)) que analisou mais de 200 artigos da área de FAIs, enfatiza que não há solução definitiva para detecção de faltas de alta impedância.

A revisão da Seção 3.1 mostra que existem trabalhos com taxa de detecção acima de 90%, porém, deve ser pontuado que, a detecção de uma FAI pode ser dada por qualquer parâmetro presente na mesma, quando observada em um sistema sem a presença de cargas não lineares ou outros eventos. A real dificuldade em se desenvolver um algoritmo de detecção de FAI está no

grau de imunidade que este apresentará frente a diversos eventos e configurações do sistema, tais como:

- Chaveamento de bancos de capacitores.
- Chaveamento de cargas.
- Energização e desenergização de transformadores.
- Presença de harmônicos na rede.
- Presença de cargas com potência e perfil harmônico variáveis.
- Condições diversas de carregamento do sistema.
- Presença de geração distribuída.

Neste aspecto, nenhum dos trabalhos apresentados analisa a proposta de detecção frente a todos estes eventos, principalmente eventos com perfil de carga variável, que é o mais provável de ser confundido com uma FAI, já que sua natureza é aleatória.

Ainda, enquanto alguns dos métodos não estudaram ou não garantem distinção da falta de outros eventos comuns aos sistemas elétricos, outros se valem de sinais extraídos de simulações com modelos que não representam por completo as características das FAIs.

Os autores de [Gomes e Ozansoy \(2021\)](#) apontam que faltas causadas com contato direto do condutor ao solo possuem características diferentes das faltas causadas por contato com vegetação, e que, portanto, devem ser estudadas separadamente.

Todos os artigos apresentados nesta revisão se baseiam em técnicas apoiadas no estudo das características de sinais de FAI causadas pelo contato do condutor com o solo, porém, com exceção das análises feitas por [Lopes et al. \(2022\)](#), nenhum dos autores considera a ruptura do condutor, levando em conta seu tempo de queda.

Em decorrência das ponderações feitas nesta seção, fica claro que ainda existe espaço para a proposição de um algoritmo de detecção cuja imunidade seja testada contra eventos comuns aos sistemas elétricos e que possam ser confundidos com uma FAI, considerando a presença de GD, em diversas condições de carregamento e que utilize sinais reais ou de um modelo realístico na investigação desse tipo de falta, levando em conta o evento completo: rompimento, queda e formação do arco elétrico.

A Tabela 4 mostra a comparação entre os métodos mais relevantes para a detecção de FAIs encontrados na literatura. Nela são mostrados, além da ferramenta matemática principal (método), se os testes incluem:

- Carga não linear (CNL).

- Carga de perfil harmônico variável (CVH).
- Presença de GD.
- Sinais reais (SR).
- Modelo realístico ou entrada de sinais reais por meio de modelo (SR).
- Rompimento de condutor (RC).

Tabela 4 – Comparação entre métodos de detecção da literatura.

Artigo	Método	CNL	CVH	GD	SR	MR	RC
Lopes et al. (2022a)	TS	✓	✓		✓	✓	✓
Wontroba et al. (2022)	TF					✓	✓
Lima et al. (2021)	TS	✓			✓	✓	
Yeh, Sim e Bravo (2019)	TW				✓	✓	
Torres e Ruiz (2011)	TW				✓	✓	
Chakraborty e Das (2019)	Filtro	✓	✓	✓			
Lima et al. (2018)	TF				✓	✓	
Macedo et al. (2015)	Filtro				✓		
Gadanayak e Mallick (2019)	TW						

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 3.2 Algoritmo de detecção proposto

Com a finalidade de suprir as lacunas apresentadas na revisão bibliográfica da Seção 3.1, esta seção descreve o método de detecção de FAI proposto, o qual tem por objetivo identificar faltas de alta impedância do tipo fase-terra em sistemas de distribuição de energia elétrica, com o toque do condutor ao solo do lado da fonte. Para o desenvolvimento, foi definido o uso de ferramentas de análise no domínio do tempo e frequência, combinando índices de detecção já propostos na literatura, de um modo que seja possível identificar a falta por meio da análise da corrente sendo medida apenas na subestação.

### 3.2.1 Estrutura do algoritmo

O algoritmo retorna à lógica utilizada para a elaboração do modelo proposto por [Trondoli \(2017\)](#), no qual a união das características da corrente de FAI, controlada por elementos distintos, resulta na corrente de falta do modelo. Seguindo o mesmo raciocínio, o algoritmo aplica técnicas para a decomposição e estudo do sinal medido na subestação, com o objetivo de identificar no mesmo os atributos de uma FAI. Para tanto, é necessário que as ferramentas matemáticas e técnicas de processamento de sinais calculem valores pelos quais seja possível identificar estas

características. Uma vez reconhecidas uma ou mais delas, deve-se decidir se estas configuram uma FAI.

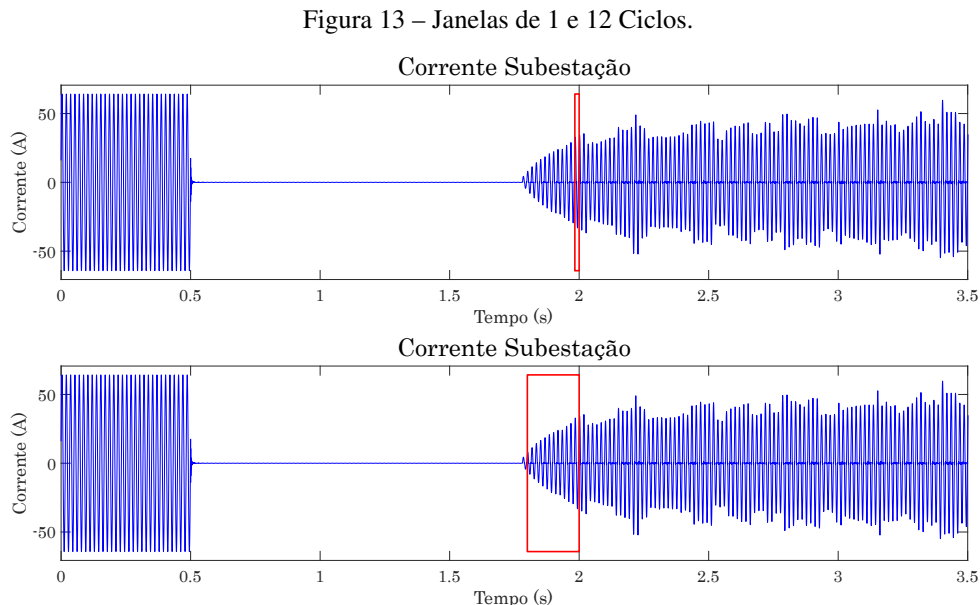
Com a finalidade de organizar o desenvolvimento do algoritmo, assim como facilitar mudanças e melhorias, as etapas do processo de detecção de falta estão divididas em três camadas. Uma camada é definida como sendo um conjunto de códigos, desenvolvidos no programa MATLAB, que se assemelham pela função que desempenham. Com isto, forma-se uma base de desenvolvimento sobre a qual novas ferramentas e métodos podem ser incluídos.

A primeira camada reúne os códigos que utilizam ferramentas matemáticas e técnicas de processamento de sinais para calcular quantidades a serem interpretadas pelas outras camadas. Em seguida, utilizando os valores previamente calculados, a segunda camada interpreta qualitativamente o comportamento das quantidades. Por fim, a terceira camada utiliza as qualidades interpretadas pela camada 2 para procurar características de FAIs e decidir se estas são suficientes para afirmar que uma falta deste tipo está ocorrendo no sistema.

As seções seguintes discorrem sobre cada uma das camadas, explica como elas se relacionam e como foram implementadas.

### 3.2.2 Primeira camada

A primeira camada do algoritmo de detecção utiliza ferramentas matemáticas e técnicas de processamento de sinais para extrair valores de interesse do sinal de corrente lido na subestação. Os dados utilizados nesta camada são provenientes de duas janelas de dados: uma de 1 ciclo, outra de 12 ciclos. As duas janelas percorrem o sinal, em passos de 1 ciclo, de modo que a menor delas contém a informação mais recente da maior. A Figura 13 exemplifica as janelas, representadas por retângulos em vermelho, percorrendo um sinal lido da subestação.



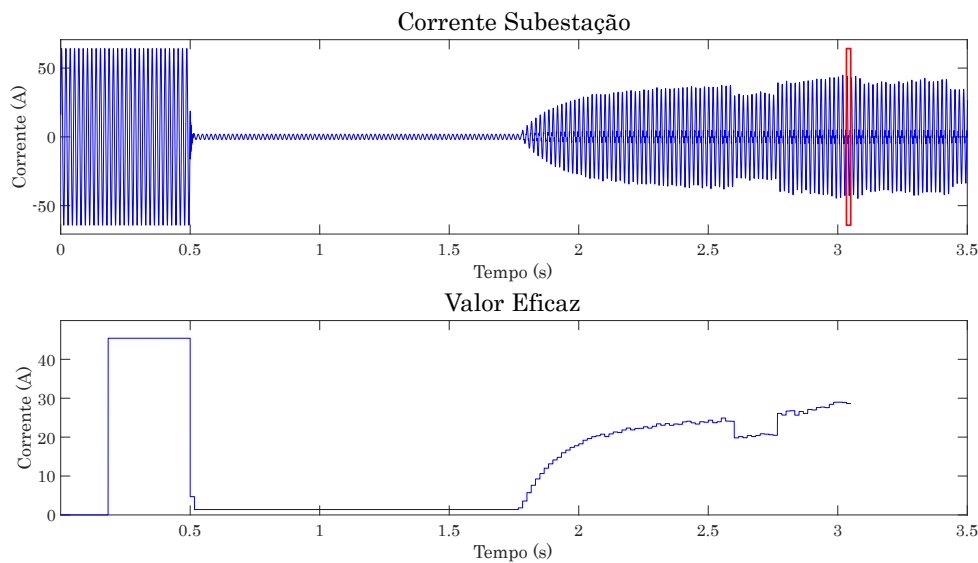
Fonte: Elaborada pelo autor.



Os dados da janela de 1 ciclo são utilizados para calcular o valor eficaz, a assimetria percentual e a TFTC do sinal (utilizada em sua versão rápida). O valor eficaz do sinal discretizado é dado pela Equação (3.1), onde  $N$  é o número de pontos da janela e  $x_i$  são os valores de amplitude cada ponto. Como exemplo, a Figura 14 mostra o resultado gráfico do cálculo do valor eficaz ao longo de um sinal de FAI.

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad (3.1)$$

Figura 14 – Valor eficaz para janela de 1 ciclo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

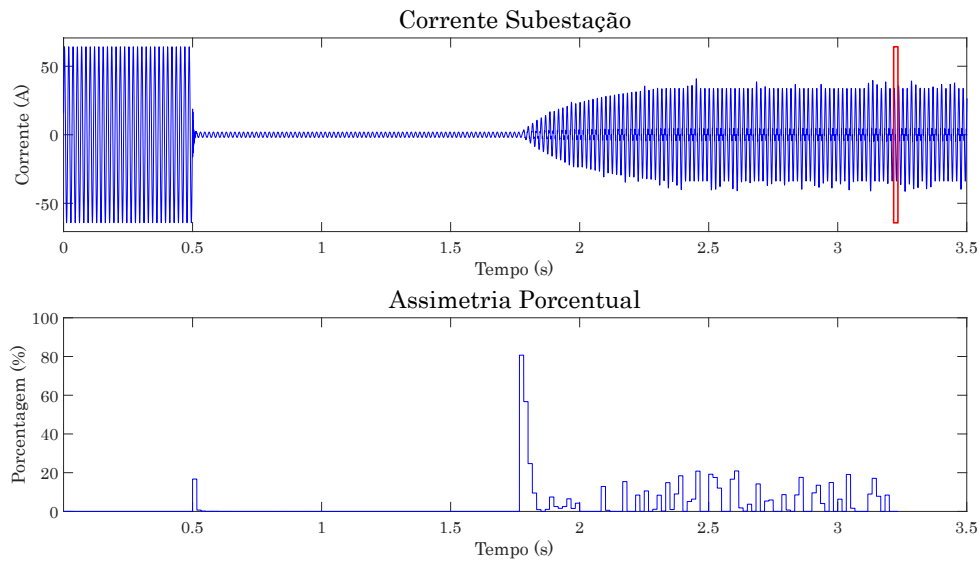
A assimetria, dada pela Equação (3.2), é a diferença absoluta do valor dos picos de corrente do semiciclo positivo ( $A_p$ ) e do negativo ( $A_n$ ) na janela de 1 ciclo. A assimetria também pode ser calculada como a diferença percentual entre os semiciclos, como mostra a Equação (3.3), onde o denominador  $A_x$  pode ser tanto  $A_p$  quanto  $A_n$ . Para compor o algoritmo de detecção, foi utilizada a assimetria percentual, pois o valor em porcentagem normaliza a assimetria, desatrelando seu valor da amplitude da corrente de falta. O denominador será dado pelo menor valor entre  $A_p$  e  $A_n$ , uma vez que a assimetria nas FAIs é entendida como o aumento de corrente em um dos semiciclos (TRONDOLI, 2017), assim, o menor valor de pico é utilizado como base de comparação. A Figura 15 ilustra a janela de 1 ciclo percorrendo um sinal de FAI e os respectivos valores de assimetria percentual calculados.

$$assimetria = ||A_p| - |A_n|| [A] \quad (3.2)$$

$$assimetriaporcentual = \frac{100||A_p| - |A_n||}{|A_x|} [\%] \quad (3.3)$$



Figura 15 – Valor da assimetria porcentual.



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com o descrito em Li, Xu e Tayjasant (2003), a análise de Fourier tem como propósito reconstruir um sinal periódico não senoidal por meio de uma série de sinais senoidais. Considerando  $x(t)$  um sinal periódico contínuo de período  $T$ , que satisfaça as condições de Dirichlet,  $x(t)$  pode ser representado pela série de Fourier, exibida na Equação (3.4).

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(k\Omega_0) e^{jk\Omega_0 t} \quad (3.4)$$

Na qual  $\Omega_0 = 2\pi/T$  é chamado de frequência fundamental e  $X(k\Omega_0)$  é o coeficiente de Fourier do harmônico de ordem  $k$ .

Para que se possa calcular a série de Fourier em um computador, utiliza-se a TFTC, a qual trabalha com domínios discretos e finitos, tanto do tempo quanto da frequência. Para um sinal  $x(t)$  amostrado a uma taxa de  $N$  pontos por ciclo, com período de amostragem  $T_s = T/N$ , sua TFTC é dada pela Equação (3.5). Na qual  $\omega_k = (2\pi/(T_s N))k = (2\pi/T)k$ ,  $X(\omega_k)$  é o espectro de  $x(n)$ .

$$X(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j(2\pi/N)nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.5)$$

Na TFTC assume-se que o sinal  $x(n)$  seja um ciclo de um sinal periódico, ou seja, pressupõe-se que o sinal se repita a cada  $N$  pontos. A frequência de resolução do espectro  $X(\omega_k)$  é determinado pelo comprimento do sinal, segundo a Equação (3.6).

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.6)$$

Caso o sinal seja considerado periódico com período  $T$ , o espectro possuirá apenas componentes cujas frequências sejam múltiplas da frequência fundamental. Caso o comprimento seja selecionado como  $p$  ciclos do período fundamental, a resolução em frequência será calculada de acordo com a Equação (3.7).

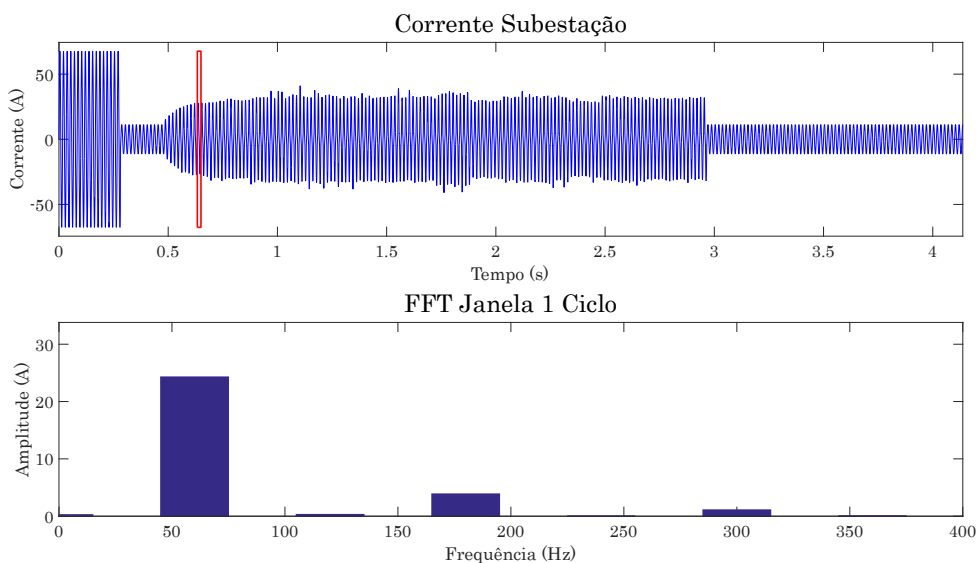
$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{pT} \quad (3.7)$$

Isso implica que, se for utilizado mais de um ciclo fundamental para o cálculo da TFTC, é possível identificar componentes que não sejam múltiplos inteiros da frequência fundamental, os chamados sub-harmônicos e inter-harmônicos. Com a aplicação da TFTC consegue-se, portanto, extrair o conteúdo de frequências do sinal analisado.

Como dito anteriormente, o algoritmo utiliza duas janelas: 1 e 12 ciclos. No caso da janela de 1 ciclo, a resolução em frequência de 60 Hz é capaz de extrair o valor dos componentes harmônicos do sinal, enquanto a janela 12 ciclos, por possuir resolução em frequência de 5 Hz (IEEE, 2014), é utilizada para extrair os componentes sub-harmônicos e inter-harmônicos do sinal. Segundo Li, Xu e Tayjasanant (2003), o grupo de pesquisa IEEE *Interharmonic Task Force* adota a norma IEC6100-4-7 como guia, a qual padroniza a janela de 12 ciclos para a medição de componentes harmônicos e inter-harmônicos. Ainda que a TFTC de janelas de maior comprimento forneça menor resolução em frequência, devido ao seu tamanho poderia incluir dados de outros eventos quando o algoritmo fosse testado em cenários reais.

Como exemplo, as Figuras 16 e 17 mostram os resultados da TFTC calculada para as janelas de 1 e 12 ciclos, respectivamente, em um sinal de FAI.

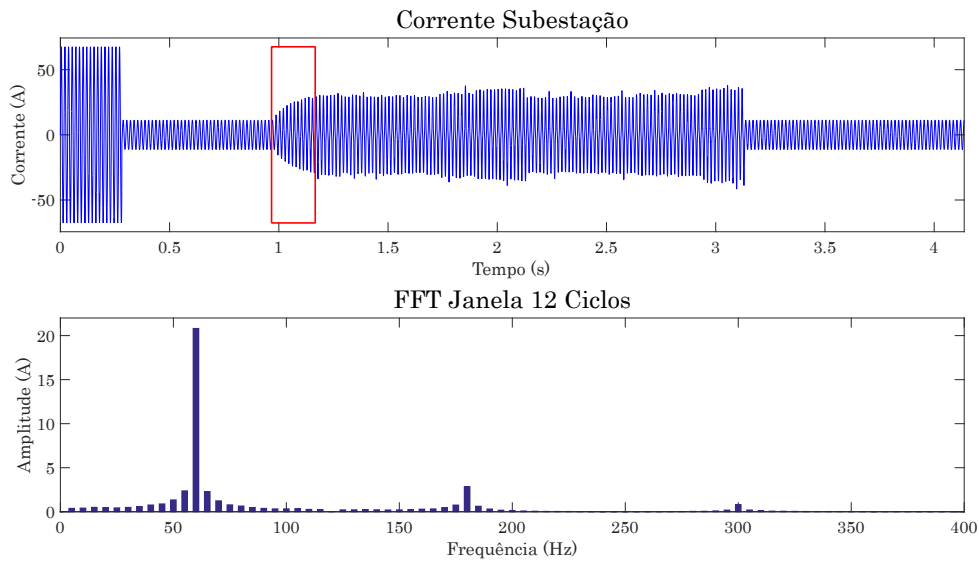
Figura 16 – Transformada discreta de Fourier para janela de 1 ciclo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado da TFTC da segunda janela é utilizado para calcular um índice que evidencia a presença dos componentes não harmônicos próximos a 60 Hz. Para este cálculo, baseou-se no

Figura 17 – Transformada discreta de Fourier para janela de 12 ciclos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

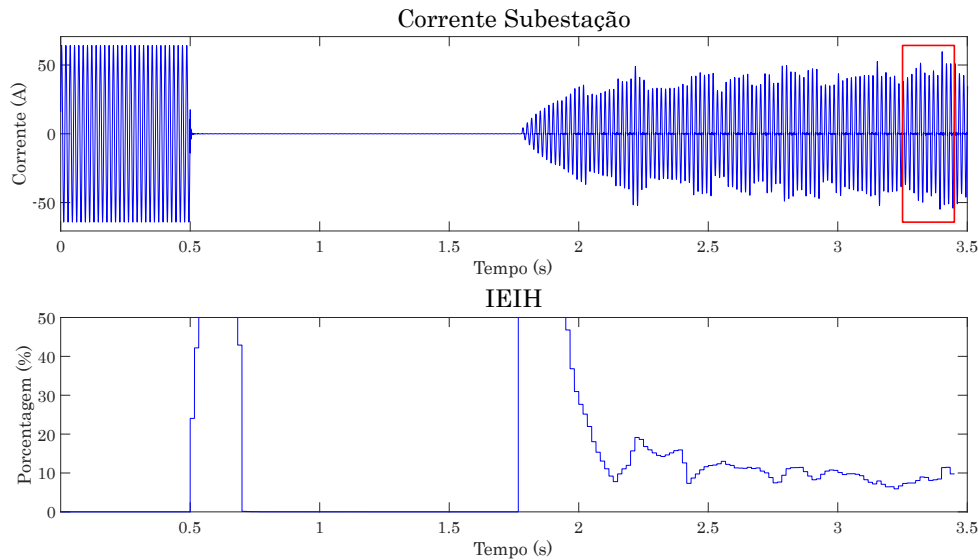
proposto por [Macedo et al. \(2015\)](#), no qual os autores utilizaram uma janela de 60 ciclos para obter os componentes sub-harmônicos entre 40 e 56 Hz e os inter-harmônicos entre 64 e 80 Hz, todos normalizados pela amplitude do componente fundamental. Para adequar o proposto em [Macedo et al. \(2015\)](#) ao presente trabalho, que utiliza uma janela de 12 ciclos, com resolução em frequência de 5 Hz, foram utilizadas as faixas: 40 a 55 Hz e 65 a 80 Hz. O índice proposto é chamado de Índice de Existência de Componentes Inter-Harmônicos (IEIH) e seu cálculo é feito de acordo com a Equação (3.8), na qual  $i_{hk}$  e  $i_{hj}$  são as amplitudes dos componentes sub-harmônicos e inter-harmônicos de corrente das frequências  $k$  e  $j$ , expressas como porcentagem da fundamental. A Figura 18 mostra o valor do IEIH calculado ao longo do tempo. Nessa figura é possível notar que a presença dos componentes inter-harmônicos é mais elevada no início do arco, durante o *buildup*. Isso se deve ao fato de que, além dos componentes verdadeiros, há também a influência do espalhamento espectral causado pela curva de crescimento. Nesta tese, essa característica é usada em favor da detecção das frequências intercaladas.

$$\text{IEIH} = \sqrt{\sum_{k=40}^{55} i_{hk}^2 + \sum_{j=65}^{80} i_{hj}^2} [\%] \quad (3.8)$$

Para que o algoritmo seja capaz de identificar as FAIs, é de interesse que ele seja o menos dependente possível de valores relacionados ao sistema no qual a falta ocorre, como corrente de carga e poluição harmônica. Nesse sentido, foi desenvolvido um algoritmo para reconhecer o espectro harmônico da corrente de carga, diferenciando-o da corrente de falta.

A extração do espectro da corrente de carga é feita durante a queda do condutor, momento após o rompimento e antes do toque no solo. O valor do tempo de queda do condutor pode ser calculado pela Equação (3.9), conhecida como equação de queda livre.

Figura 18 – Índice de existência dos componentes inter-harmônicos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$T_q = \sqrt{\frac{2h}{g}} [s] \quad (3.9)$$

Com referência no documento GED 11836, da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), que estabelece os valores mínimos de afastamento dos condutores de redes de distribuição. O valor da distância mínima entre condutores em classe de tensão de 15 kV, 25 kV 36,2 kV em relação a ruas, avenidas e ferrovias, varia de 5,5 a 9 metros. De acordo com a Equação (3.9), o tempo de queda está compreendido entre 1,06 s a 1,35 s, adotando a aceleração da gravidade  $g = 9,8m/s^2$ . Em um sistema de distribuição com frequência de 60 Hz, esse período vai de 64 a 81 ciclos, aproximadamente. Sendo assim, durante 64 ciclos, no mínimo, não existe arco e, portanto, a fase rompida alimenta apenas as cargas do lado da fonte em relação ao ponto de ruptura.

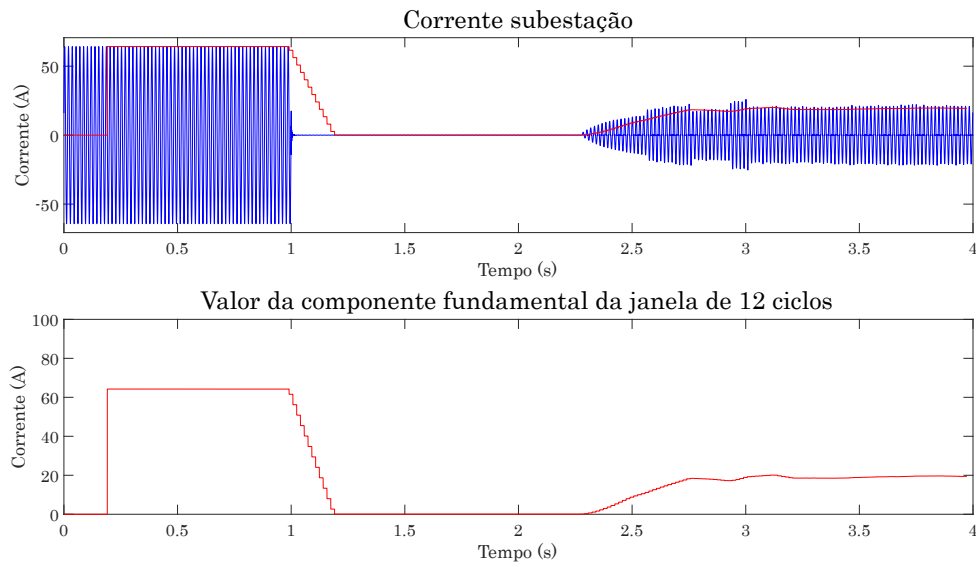
A identificação do instante de rompimento é feito pelo algoritmo de rompimento do condutor, que será explicado na Seção 3.2.4.1. Entre outras tarefas, este detector também conta o número de ciclos após o rompimento. Este valor é utilizado pela camada 1 pelo extrator de corrente de carga do seguinte modo: após a ruptura, o algoritmo extrator de corrente de carga aguarda 40 ciclos e calcula o espectro de frequências do sinal das janelas de 1 e 12 ciclos, assumindo esses espectros como sendo os da carga. Os 40 ciclos de atraso têm como objetivo obter um sinal livre de transitórios, os quais ocorrem após o rompimento, restando apenas o conteúdo da corrente de carga.

Deste momento em diante o cálculo da TFTC e, conseqüentemente, do IEIH, passam a utilizar o valor do espectro da corrente de falta, em detrimento do espectro da corrente da subestação. O espectro da corrente de falta é o resultado da diferença entre o espectro da corrente

na subestação e do espectro da corrente de carga. Essa diferença é calculada de modo vetorial, ou seja, considerando a amplitude e a fase de cada uma das ordens harmônicas da corrente.

O último valor calculado na camada 1 é o da componente fundamental da janela de 12 ciclos, lido da subestação. Como mostra a Figura 19, este valor é capaz de filtrar rápidas oscilações do sinal, indicando a tendência de crescimento ou decrescimento, que será utilizado na camada 2 para a detecção do *buildup*.

Figura 19 – Valor da componente fundamental da janela de 12 ciclos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

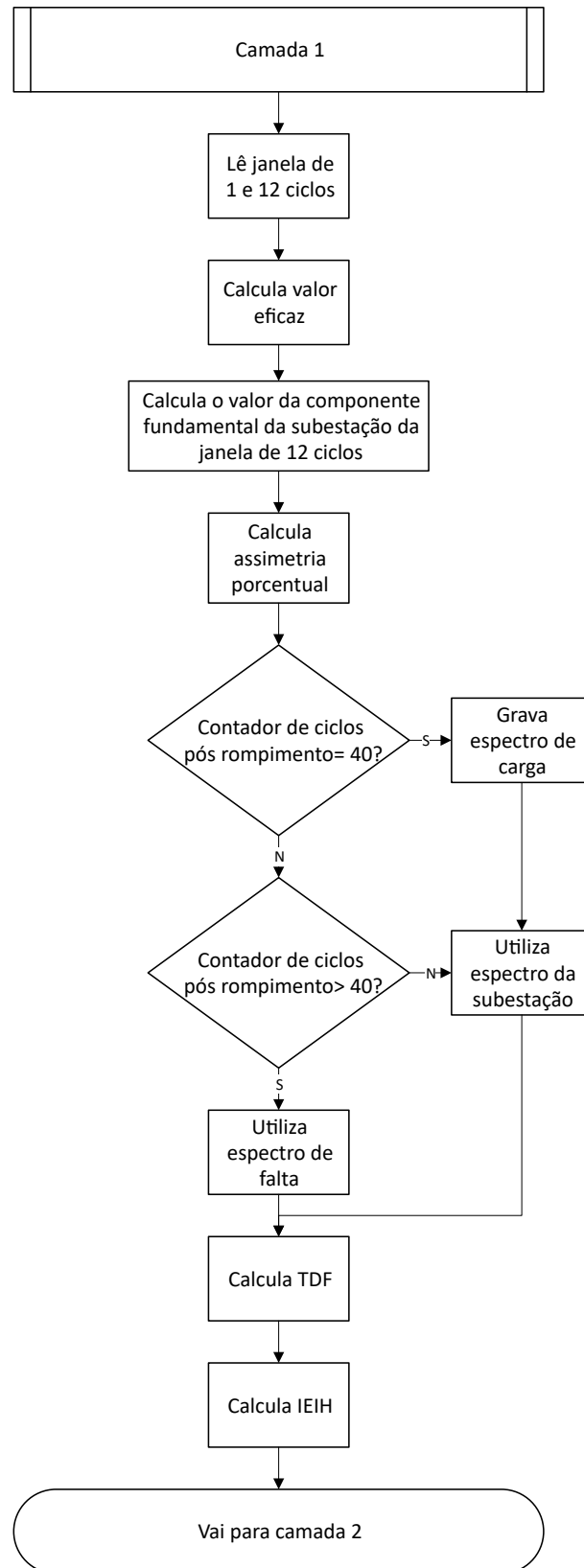
Por fim, a Figura 20 resume o processo adotado pela camada 1 em um fluxograma.

### 3.2.3 Segunda camada

A segunda camada utiliza os valores calculados na camada 1 para indicar características que serão utilizadas pela lógica de detecção (camada 3) no momento da decisão de ocorrência da falta. Essa indicação de características é feita por meio de *flags*, que são variáveis binárias que indicam presença ou ausência do comportamento ou valor analisado, assumindo valor 1 ou 0, respectivamente. O acionamento destes *flags* é baseado em limiares, acima dos quais é dada a indicação da característica procurada. Esses valores são acessíveis no início do algoritmo de detecção, para que o usuário possa parametrizá-los.

A mesma motivação utilizada para desenvolver o extrator de corrente de carga, que foi reduzir a dependência do algoritmo em relação a características do sistema continua valendo na segunda camada. O ideal seria que não houvesse limiares ou valores a serem parametrizados, de modo a tornar o algoritmo o menos dependente do sistema possível. Em busca desse objetivo, no decorrer do desenvolvimento desta teste, diversos testes foram feitos, variando-se valores de limiares e combinações de características. Durante esses testes procurou-se uma configuração que satisfizesse os seguintes critérios:

Figura 20 – Fluxograma da camada 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- Reduzir o número de limiares dependentes do sistema, das FAIs e dos eventos não FAI.

- Reduzir o número de falsos positivos (detecções de eventos não FAI como sendo FAI).
- Detectar o maior número possível de FAIs.

Nas próximas seções serão descritos cada um dos *flags* e, em cada um deles, será discutido o motivo pelo qual são acionados ou não, baseado nos critérios supracitados. Exceto os *flags* de redução e aumento do valor eficaz, que serão utilizados para identificar a ruptura do condutor, as outras lógicas só são habilitadas no 41º ciclo, após a extração da corrente de carga, visando eliminar possíveis transitórios.

### 3.2.3.1 *Flags de aumento e redução do valor eficaz da corrente*

Com base na janela de 1 ciclo, o aumento e a redução do valor eficaz são analisados para a janela atual em relação à anterior. Essa variação é dada em porcentagem e aciona o respectivo *flag* (redução ou aumento), que assume nível lógico 1 caso o valor calculado na janela atual atinja um valor percentualmente menor ou maior à janela anterior. Tanto o *flag* de redução como o de aumento serão utilizados para identificar um possível rompimento do condutor.

No caso do rompimento, durante os testes, foi observado que o estabelecimento de limiares de valores mais elevados resultava em falha na detecção do rompimento para barras distantes da subestação, nas quais a variação do valor eficaz era menor que o limiar estabelecido. Por este motivo foi definido o que se chamou de limiar nulo, cujo valor é de 1%, o suficiente para mitigar erros de precisão, arredondamento e lidar com valores muito próximos a zero.

Em uma primeira análise este valor torna o algoritmo sensível, podendo incorrer em falsos positivos, porém, como será visto, o algoritmo proposto se baseia em um conjunto de características para definir o que é uma FAI, com isso, a indicação de uma delas não significa que a FAI esteja ocorrendo.

### 3.2.3.2 *Flag de buildup*

O valor da componente fundamental da janela de 12 ciclos é utilizado para a detecção do *buildup*, uma vez que este valor é capaz de filtrar variações rápidas do sinal e indicar a tendência de crescimento do mesmo.

Durante a ocorrência da falta, o sinal de FAI se sobrepõe ao sinal de carga. O aumento da corrente pode ser detectado com a análise da corrente da subestação, sem a necessidade de passar pelo algoritmo extrator de corrente de carga.

A detecção de *buildup* aciona dois *flags*, os quais serão utilizados na terceira camada. O primeiro auxilia na detecção de início de arco, visando observar características incipientes. Ele é liberado após no 40º ciclo pós rompimento. O segundo *flag* tem o intuito de confirmar a tendência de crescimento e é liberado após ser confirmado o início do arco.

Ambos utilizam o mesmo contador, que é incrementado quando há aumento no valor calculado pela janela de 12 ciclos e é decrementado na situação contrária.

O acionamento destes indicadores ocorre quando um contador ultrapassa os valores de 3 e 2 ciclos de crescimento (decididos com base na análise dos sinais de [Macedo et al. \(2015\)](#)), sendo o primeiro valor para a detecção incipiente e o segundo para a confirmação. Portanto, é entendido como início de arco a presença do crescimento durante 3 ciclos e do arco durante 5 ciclos (3 ciclos + 2 ciclos).

### 3.2.3.3 *Flag de variação de assimetria porcentual*

O valor da assimetria porcentual, calculado na primeira camada, pode acionar dois *flags*: o primeiro indicando a presença de assimetria, o segundo indicando a variação de assimetria entre dois ciclos consecutivos.

A indicação da existência de assimetria é dependente do conhecimento prévio dos valores encontrados tanto nas FAIs e nos eventos não FAI. Valores pré-estabelecidos podem particularizar a solução e levar à não detecção das FAIs que, por possuírem característica aleatória, podem não estar dentro dos valores estabelecidos. Por este motivo, foi decidido utilizar a diferença da assimetria porcentual entre dois ciclos consecutivos, considerando o acionamento do *flag* para diferenças maiores que 1%.

Mesmo que outros eventos apresentem variação de assimetria, como já explicado na Seção 3.2.3.1, a detecção da FAI depende de mais de um *flag*, como será discorrido no algoritmo da terceira camada.

### 3.2.3.4 *Flags acionados pelas frequências harmônicas da janela de 1 ciclo*

Na primeira camada foi calculada a TFTC para a janela de 1 e de 12 ciclos. Agora, na segunda camada, as amplitudes dos componentes de frequência são normalizados pela amplitude do componente fundamental e convertidos em porcentagem, com o objetivo de observar o comportamento do espectro das FAIs, independente de sua amplitude. Cabe lembrar que, graças ao extrator de corrente de carga, 40 ciclos após o rompimento, o algoritmo trabalha com o espectro da corrente de falta. Nesta seção serão discorridos os *flags* acionados pelo espectro da janela de 1 ciclo.

Tendo o espectro da corrente de falta como porcentagem do fundamental, os valores limiares poderiam ser baseados em valores de ensaios reais, apresentados na literatura. Como exemplo de [Kim e Russell \(1988\)](#), que calcularam o espectro de falta em solos úmidos e secos, normalizados com referência à componente fundamental, e obtiveram os seguintes resultados:

- 2º harmônico: entre 0,14 e 0,85% da fundamental.
- 3º harmônico: entre 0,83 e 2,9% da fundamental.



- 4º harmônico: entre 0,16 e 0,87% da fundamental.
- 5º harmônico: entre 0,35 e 4,5% da fundamental.

Porém, estes valores não são consenso e podem levar a erros de detecção. Na busca por indicadores confiáveis de FAIs, foram estudados sinais de FAIs reais, cedidos por [Macedo et al. \(2015\)](#) e sinais gerados pelo modelo de [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#). Como resultado, foram observadas as seguintes características:

- O 2º e 4º harmônicos variam durante quase todo período de falta e essa variação é mais evidente do que a variação dos harmônicos de ordem ímpar (3º e 5º).
- A soma da amplitude do 3º e 5º harmônicos possui maior amplitude do que a soma do 2º e 4º, durante quase todo o período de existência do arco.
- A amplitude do 3º harmônico é maior que a amplitude do 5º harmônicos durante quase todo o período de existência do arco.

Como será descrito na camada 3, o arco elétrico será identificado em duas etapas: a primeira indicará um possível início de arco, a segunda etapa confirmará a existência deste arco, com base em características persistentes. A partir deste raciocínio e das observações sobre os harmônicos, foram desenvolvidas três lógicas, que atuarão na segunda etapa.

A primeira lógica tem por objetivo a identificação da variação do 2º e 4º harmônicos e sua persistência no sinal de corrente de falta. Para tanto, dois contadores independentes, um para cada frequência, são incrementados a cada variação destes componentes, acima do limiar de 1%. Caso essa variação não ocorra, os contadores são decrementados. Um *flag* indicando a variação de frequência de segundo e quarto harmônicos é acionado quando os dois contadores ultrapassarem um limiar estabelecido. Como este valor é diretamente ligado ao grau de certeza que se deseja ter da ocorrência de um arco, ele pode ser escolhido pelo usuário. Nos testes foi definido que um valor de 3 repetições é o suficiente.

Os contadores não precisam atingir o valor de 3 unidades simultaneamente. Como exemplo: se o contador de 2º harmônico for igual a 5 e o contador de 4º harmônico igual a 2, o *flag* não será acionado. Caso, no próximo ciclo, o contador de 4º harmônico atingir o valor de 3 unidades, aí sim o *flag* será acionado, já que, mesmo que o contador de 2º harmônico seja decrementado, terá valor de 4 unidades, que é maior que o limiar de 3 unidades.

A segunda lógica é resultado da observação de que a soma das amplitudes do 3º e 5º harmônicos possui maior amplitude que a soma do 2º e 4º harmônicos. Assim como na lógica anterior, um contador é incrementado ou decrementado na presença ou ausência desta relação (a comparação é direta, sem limiar). Como este também é um *flag* de persistência, pode ser alterado pelo usuário, porém, o mesmo limite, de 3 repetições foi considerado suficiente.

A mesma lógica anterior é utilizada para acionar o *flag* da relação da amplitude do terceiro harmônico maior que a amplitude do quinto.

### 3.2.3.5 *Flag acionado pelas frequências harmônicas da janela de 12 ciclos*

Por fim, a presença dos componentes inter-harmônicos, revelada pelo índice IEIH, também aciona um *flag* indicando sua presença acima do limiar nulo (1%).

### 3.2.3.6 *Considerações sobre o algoritmo da segunda camada*

A lista a seguir enumera os *flags* apresentados na segunda camada:

1. Aumento e redução do valor eficaz da corrente.
2. Presença de *Buildup* inicial.
3. Variação de assimetria porcentual.
4. Presença de componentes inter-harmônicos (IEIH).
5. Presença de *Buildup* permanente.
6. Variação de 2° e 4° harmônicos.
7. Relação da soma: 3° + 5° > 2° + 4° harmônicos.
8. Valor do 3° harmônico maior que do 5° harmônico.

Destes *flags*, os do item 1 são analisados durante todo o sinal. Os *flags* do segundo, terceiro e quarto itens serão utilizados pelo detector de início de arco, explicado na terceira camada. Sua análise é liberada após o quadragésimo ciclo, instante escolhido para extrair o espectro de carga e ter certeza de que o transitório do rompimento haverá se extinguido.

Do quinto ao oitavo item, são *flags* de persistência, que serão utilizados na terceira camada pelo detector de arco, portanto, são liberados após haver a confirmação da detecção de início de arco, pelo detector supracitado.

Todos estes detectores serão detalhados na Seção 3.2.4. Os fluxogramas das figuras 21, 22, 23 e 24 mostram os *flags* acionados pela segunda camada.

## 3.2.4 *Terceira camada*

A última camada foi desenvolvida com detectores que se baseiam no estado lógico dos *flags* da camada anterior para decidir se as características avaliadas configuram uma FAI. Os detectores, listados a seguir, serão explicados nas seções de 3.2.4.1 a 3.2.4.4.

- Detector de rompimento do condutor e *reset*.
- Detector de início de arco.
- Detector de arco.
- Detector de falta.

#### 3.2.4.1 *Detector de rompimento do condutor e reset*

No momento do rompimento do condutor, as cargas alimentadas à jusante do ponto de falta param de consumir potência do sistema, o que causa a redução do valor da corrente na fase analisada. Ainda, em sistemas com a presença de GD, pode ocorrer o aumento da corrente, já que a carga alimentada pela GD passa a ser suprida pela subestação.

Com base nestes comportamentos, o detector de rompimento de condutor utiliza a seguinte lógica: se o *flag* de redução ou aumento do valor eficaz tiverem sido acionados, outro *flag* indicando um possível rompimento é colocado em nível alto. Neste momento não é dada a certeza de rompimento, pois como a análise é baseada em redução ou aumento do valor eficaz da corrente, pode ter ocorrido outro evento que venha a alterar a amplitude do sinal de corrente. No instante do possível rompimento, um contador é iniciado. Este contador é incrementado a cada passo da janela de 1 ciclo com o valor de 1/60 s. Caso este contador ultrapasse o valor de 2 s, que equivale ao tempo máximo de queda do cabo (1,35 s), como explicado na Seção 3.2.2, acrescido de uma margem de 39 ciclos para a detecção do arco, o algoritmo é reiniciado (*reset*), pois entende-se que não está ocorrendo uma falta. Vale lembrar, como explicado na Seção 2.3, que o algoritmo proposto nesta tese não trata do arco que pode ser formado no instante do rompimento do condutor, mas do arco formado em decorrência do toque do cabo no solo.

Além do tempo máximo de detecção, foi considerado um tempo mínimo de 1 s, abaixo do qual, um aviso de detecção de falta é ignorado. Este parâmetro visa garantir a separação temporal entre o rompimento do cabo e o toque no solo. Este valor foi escolhido por ser a menor unidade perto de 1,06 s, que é o mínimo tempo de queda, como explicado na Seção 3.2.2.

A certeza do rompimento é dada quando, tendo sido indicado o possível rompimento do condutor, a possível existência de um arco é detectada. Essa possibilidade será indicada pelo detector de início arco, que será descrito na seção 3.2.4.2. O fluxograma da Figura 25 mostra a lógica do detector de rompimento de condutor e *reset*.

#### 3.2.4.2 *Detector de início de arco*

O detector de início de arco tem a finalidade de indicar a possível ocorrência de um arco. Essa análise possibilita supor que o cabo tocou o solo e calcular com maior precisão o tempo de queda do condutor. Com isso, é dada a certeza que o rompimento do cabo significou de fato

um rompimento e não uma perda de carga ou outro evento. Esta análise é feita pelo detector de rompimento, explicado na Seção 3.2.4.1.

O detector de início de arco faz uma análise prévia, observando três características: *buildup* inicial, presença de componentes inter-harmônicos e variação de assimetria. Para tanto, foram utilizados três *flags* da segunda camada:

- *Flag* de *buildup* inicial.
- *Flag* de IEIH.
- *Flag* de variação de assimetria porcentual.

A análise dos *flags* obedece a ordem apresentada, ou seja, o IEIH é analisado quando o *flag* de *buildup* inicial estiver em 1. A variação de assimetria é analisada quando o *flag* de IEIH estiver em 1. Quando esta última condição for satisfeita, um *flag* indicando o início de arco é acionado. O fluxograma da Figura 26 mostra essa lógica.

A certeza de que o arco está ocorrendo será feita pelo detector de arco, apresentado na Seção 3.2.4.3.

#### 3.2.4.3 Detector de arco

O detector de arco tem por finalidade confirmar que o possível início de arco é, de fato, um arco. Essa lógica só é iniciada quando o *flag* do detector de início de arco é acionado. Deste instante em diante, o algoritmo desta presente seção passa a analisar características persistentes nos sinais de FAIs. Para tanto, são utilizados quatro *flags* da segunda camada:

- *Flag* de variação de 2° e 4° harmônicos.
- *Flag* de indicação de soma de 3° e 5° harmônicos maior que soma de 2° e 4°.
- *flag* da amplitude do 3° harmônico maior que do 5°.
- *Flag* de *buildup* permanente.

Estando estes quatro indicadores em nível lógico alto, um *flag* indicando a existência de arco é acionado. Este processo é apresentado no fluxograma da Figura 27.

#### 3.2.4.4 Detector de falta

O detector de falta é o último dos detectores. É ele que confirma se todos os cálculos, *flags* e características procuradas condizem com uma FAI. Como discorrido, este trabalho tem como objetivo a identificação de FAIs com toque direto, portanto, o que se espera é que tenha

ocorrido a ruptura do condutor, que haja a presença de arco e que estes dois eventos estejam separados no tempo, respeitando o tempo de queda. Para que essa lógica seja satisfeita, a detecção da falta é indicada quando os seguintes detectores são acionados:

- *Flag* de confirmação de rompimento do cabo acionado.
- *Flag* de arco acionado.

O fluxograma deste detector é mostrado na Figura 28.

Com essa lógica é esperado que o algoritmo de detecção entenda o evento, desde o rompimento do condutor, levando em conta seu período de queda, até a identificação do arco e de todas suas características.

### **3.2.5 Considerações sobre o algoritmo proposto**

Neste capítulo a lógica do algoritmo de detecção foi apresentada. Foram descritas cada uma das camadas, suas funcionalidades e como elas se relacionam. A camada 3 decide se existe uma falta ocorrendo no sistema com base nos *flags* da segunda camada que, por sua vez, utilizam os cálculos feitos na primeira camada. Toda a programação e lógica do algoritmo foi pensada de modo a dividir a detecção no reconhecimento de cada uma das características do arco para então decidir se estas configuram uma FAI. Ainda, o algoritmo foi desenvolvido de modo a aceitar novas técnicas de análise de sinal que possam aperfeiçoar a detecção.

No próximo capítulo (Capítulo 4) será descrita a elaboração da base de dados, que será utilizada no capítulo 5 para o teste do algoritmo de detecção proposto.

Figura 21 – Fluxograma da camada 2.

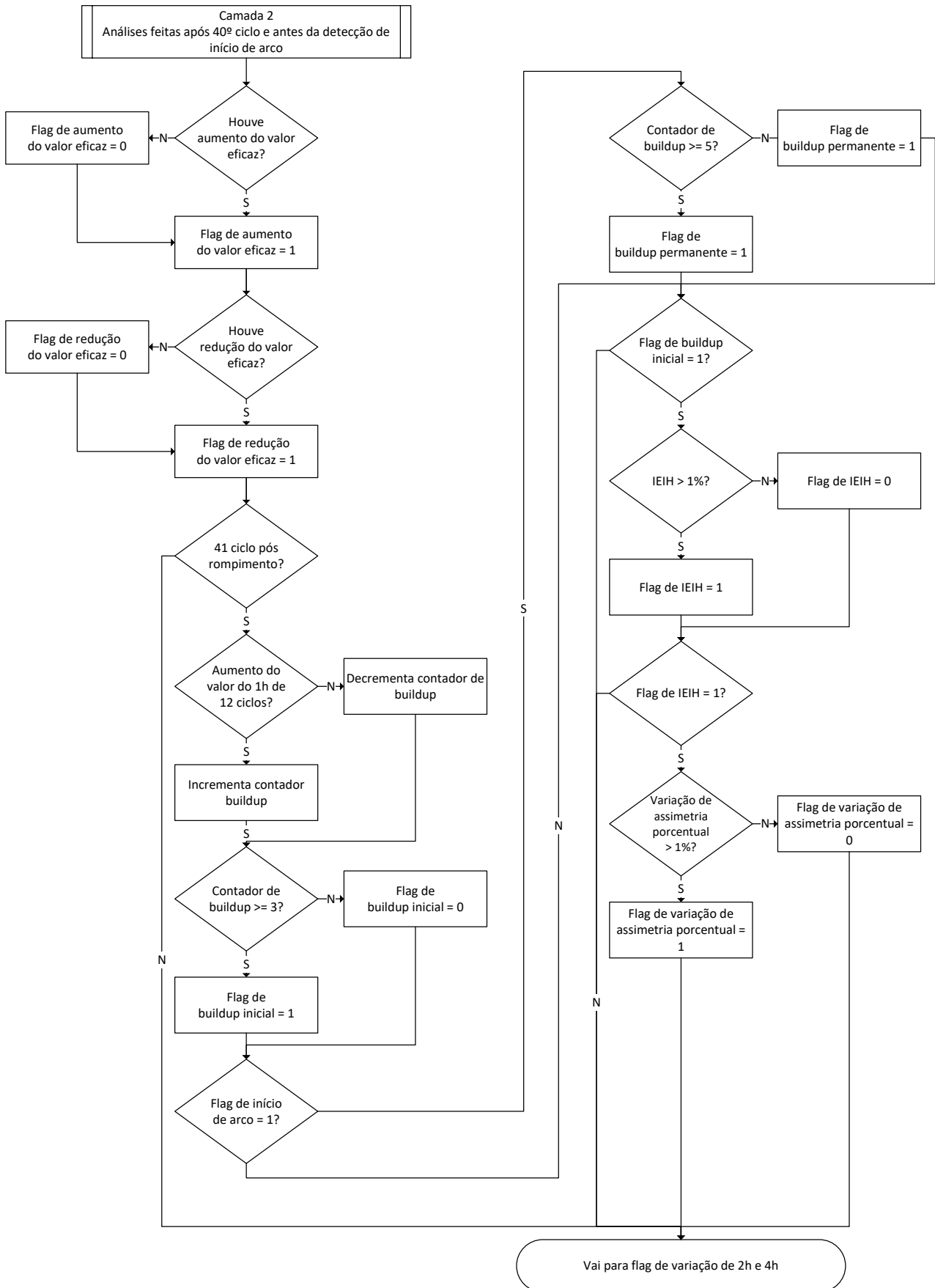
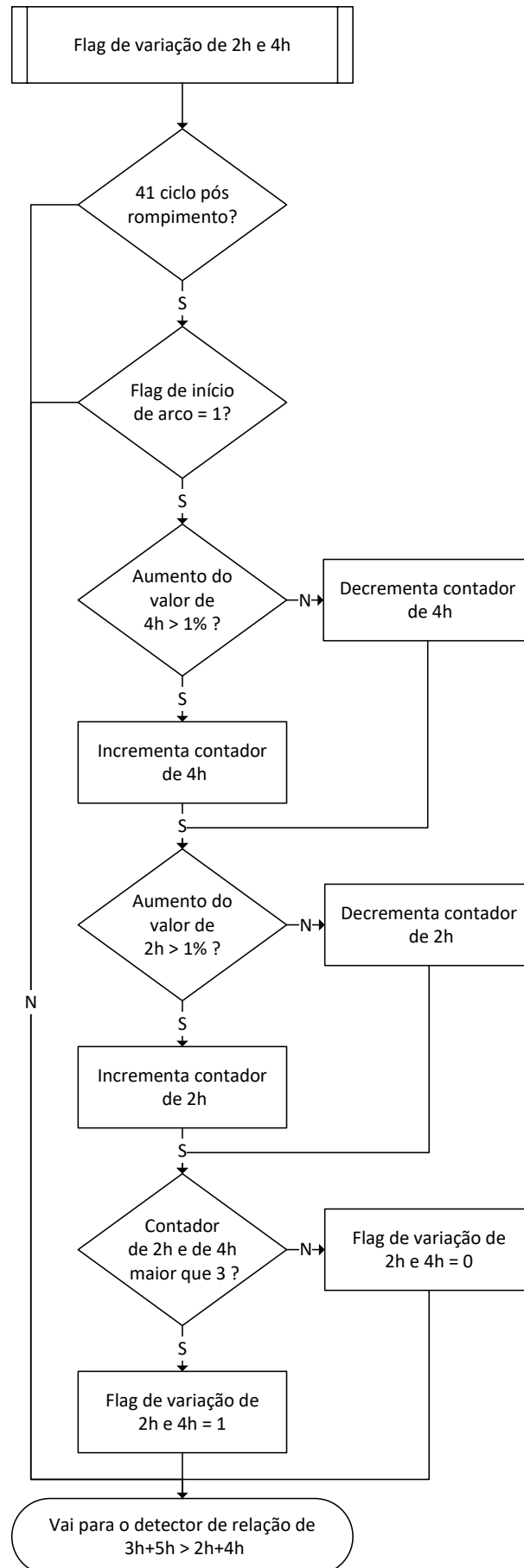
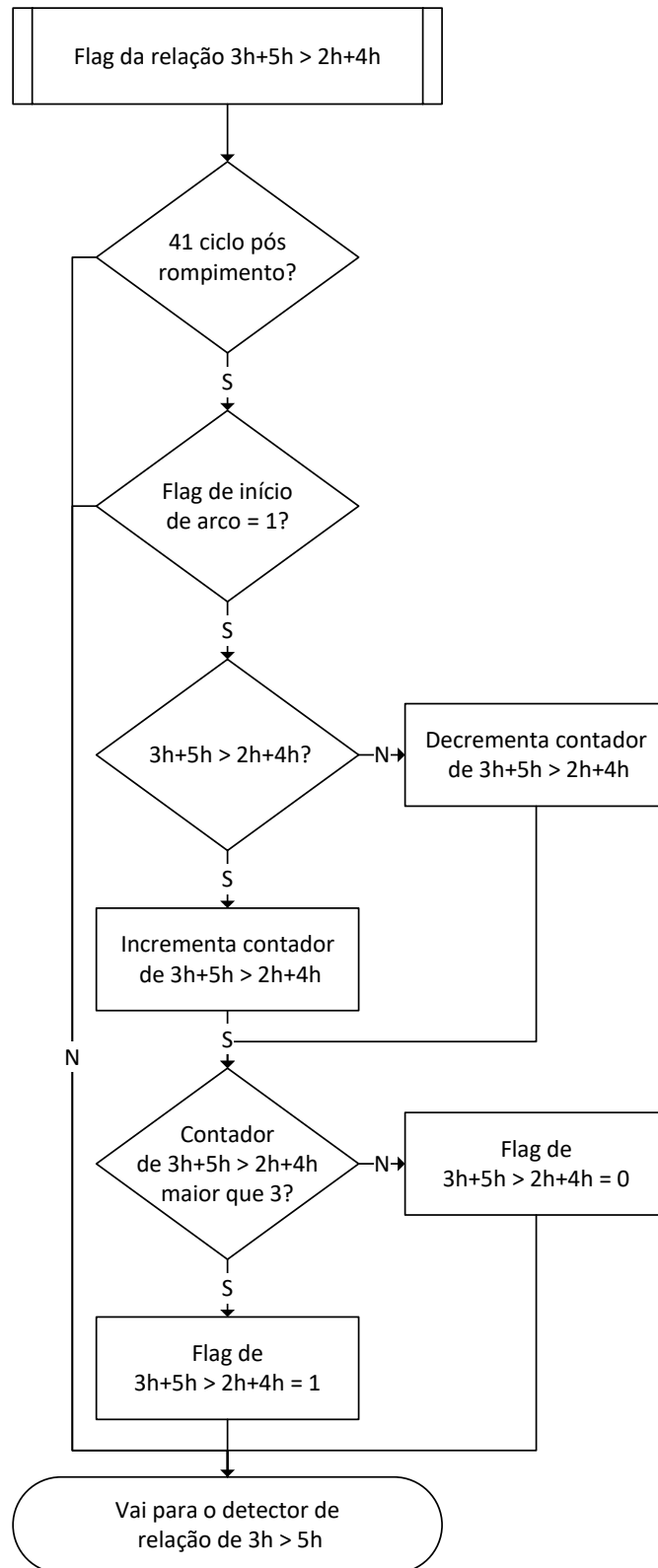


Figura 22 – Fluxograma da camada 2. Variação de 2º e 4º harmônicos (2h e 4h).



Fonte: Elaborada pelo autor.

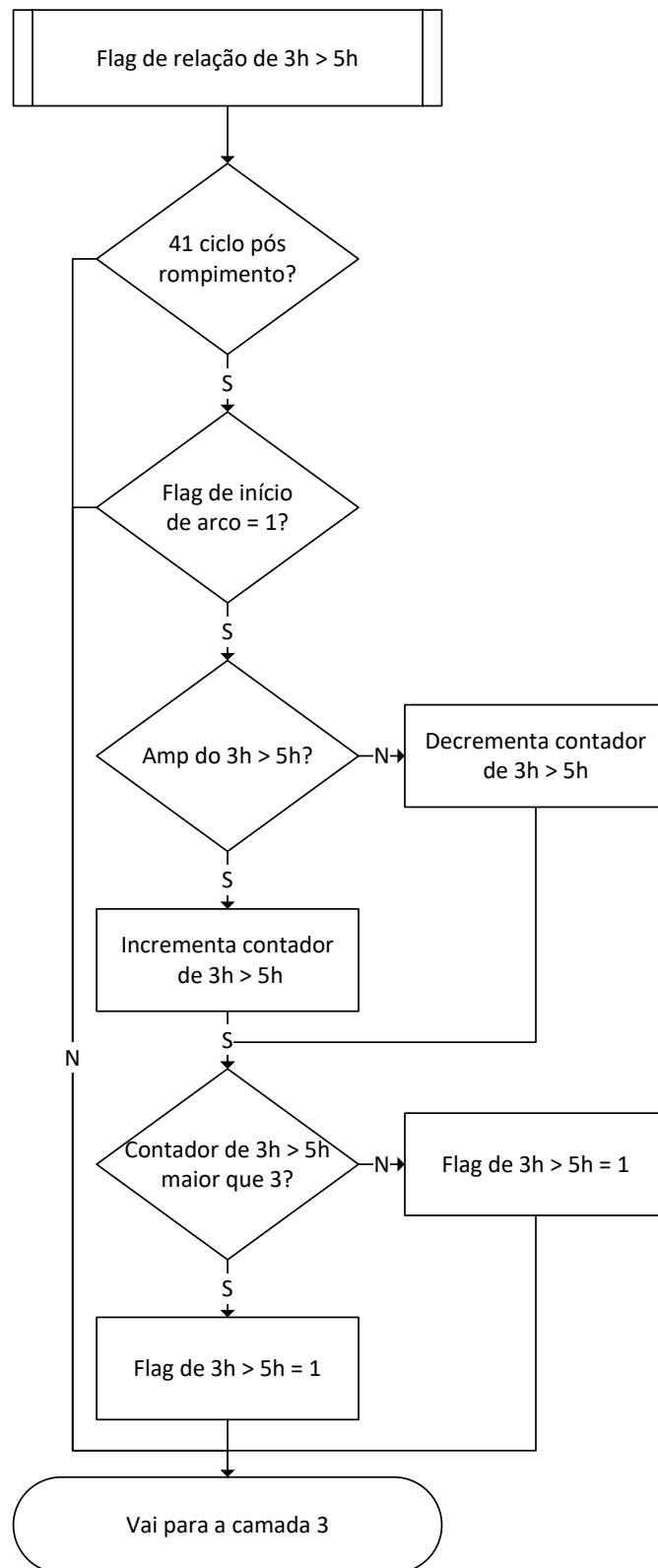
Figura 23 – Fluxograma da camada 2. Relação entre 3º e 5º e 2º e 4º harmônicos (2h, 3h, 4h e 5h).



Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 24 – Fluxograma da camada 2. Relação entre 3º e 5º harmônicos (3h e 5h).



Fonte: Elaborada pelo autor.

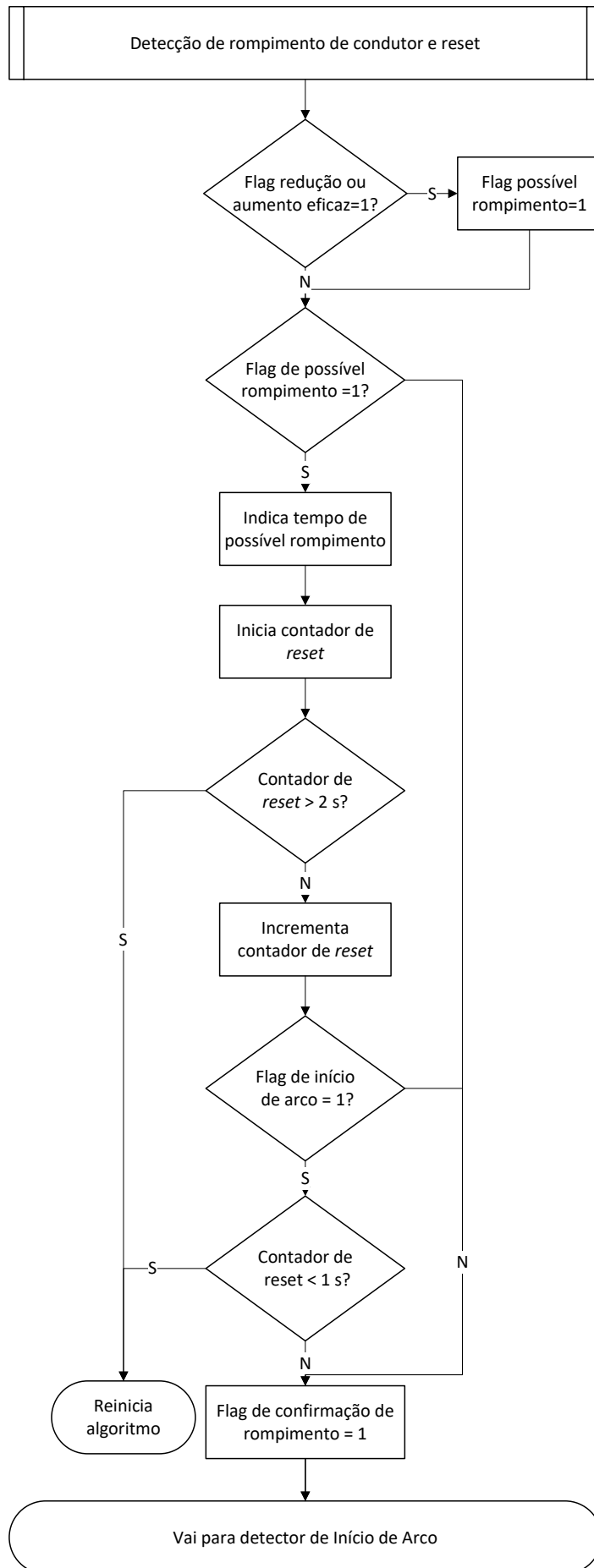
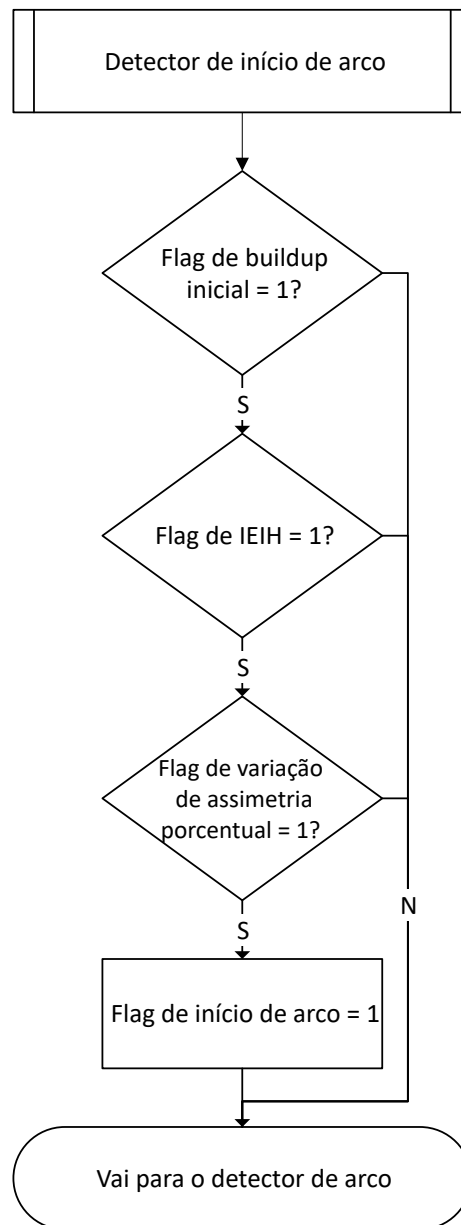
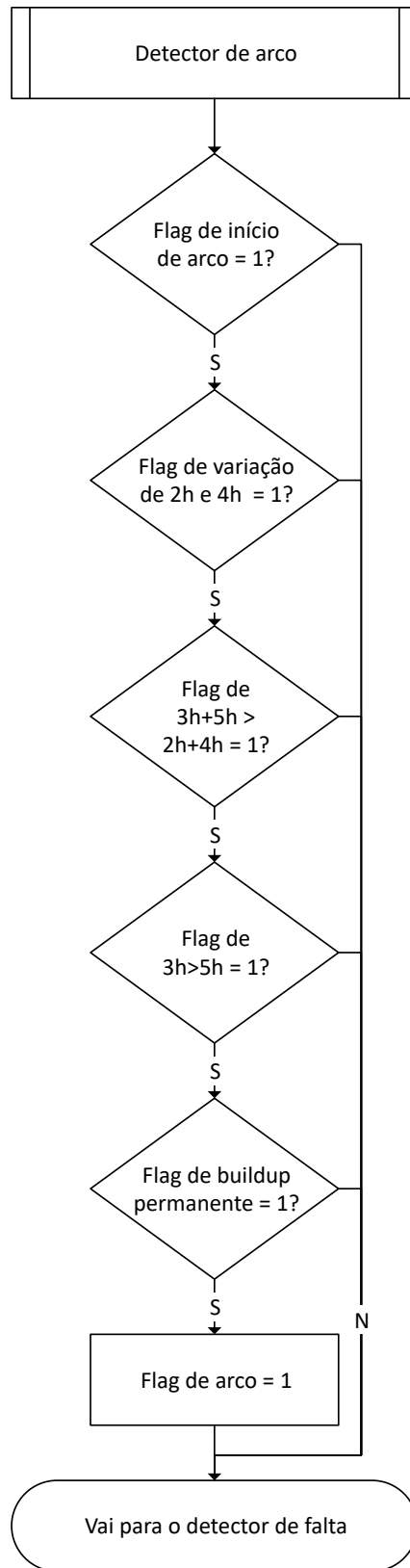
Figura 25 – Fluxograma do detector de rompimento de condutor e *reset*.

Figura 26 – Fluxograma do detector de início de arco.



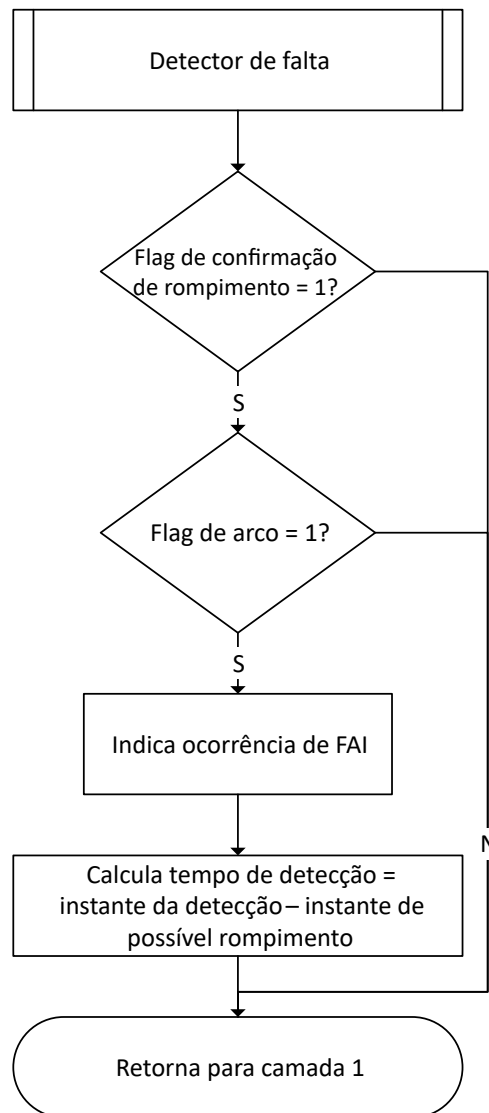
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 – Fluxograma do detector de arco.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Fluxograma do detector de falta.



Fonte: Elaborada pelo autor.



---

# ELABORAÇÃO DE UMA BASE DE DADOS PARA O TESTE DO ALGORITMO DE DETECÇÃO

---

---

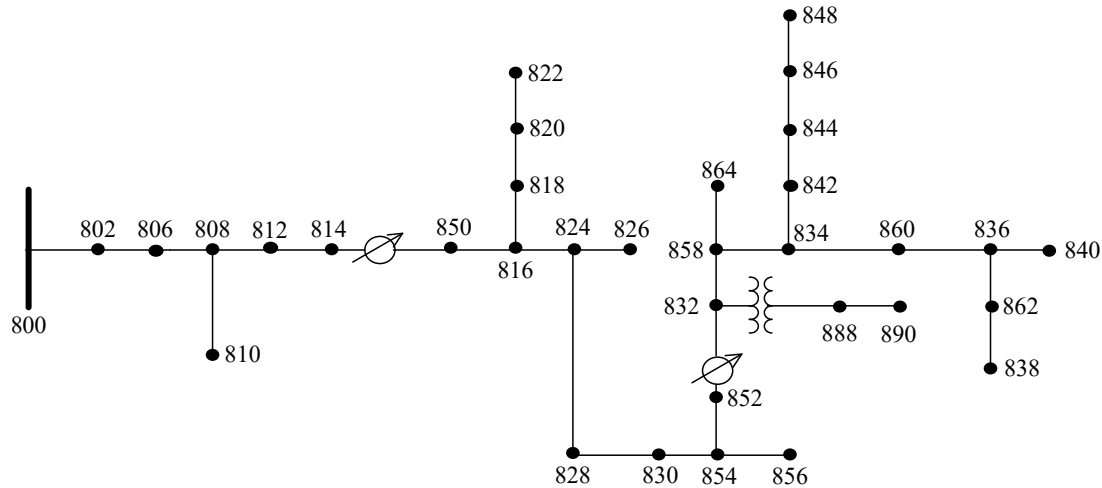
O algoritmo de detecção deve ser testado tanto em sua capacidade de identificar FAIs, como também em sua habilidade de distingui-las de eventos comuns aos sistemas de distribuição. Para que isso seja possível, foi criada uma base de dados, a qual será descrita neste capítulo, contendo a modelagem das FAIs, eventos e do sistema de distribuição no qual as simulações ocorrem. Para todas as simulações foi utilizado o software ATPDraw, o mesmo utilizado para o desenvolvimento do modelo de FAI.

## 4.1 Modelagem do sistema de distribuição

Para o teste do algoritmo de detecção foi escolhido o sistema de distribuição IEEE de 34 barras (IEEE, 2010), cuja topologia pode ser vista da Figura 29. Sua escolha se deve ao fato de ser um sistema com cargas e trechos de linha diversificados, além de ser um sistema consolidado e amplamente utilizado nos mais variados estudos sobre sistemas de distribuição. O alimentador possui tensão de linha de 24,9 kV e carga total de 2063,4 kVA (fator de potência de 0,99), divididas nas fases A, B e C do seguinte modo: 778,3 kVA, 672,7 kVA e 617,7 kVA, respectivamente. À barra 848 foi conectado um gerador síncrono, reproduzido de Motter e Vieira (2018), com a finalidade de testar o algoritmo na presença de GD em todas as simulações de falta e eventos. Por não ser o foco deste trabalho, os detalhes da modelagem da GD não serão descritos, mas podem ser encontrados no referido artigo. Uma vez que o algoritmo de detecção foi desenvolvido com base na análise das correntes de linha da subestação, para todos os eventos simulados no sistema de 34 barras, os sinais de corrente foram medidos na subestação (barra 800) e não no ponto de falta ou no ponto dos eventos, dificultando ainda mais a detecção e distinção

das FAIs.

Figura 29 – Sistema IEEE de 34 barras.



Fonte: (IEEE, 2010)

## 4.2 Banco de dados de FAIs

Nesta seção são apresentados dois tipos de simulações de FAIs: a primeira (Seção 4.2.1) com dados reais, coletados em campo, e a segunda (Seção 4.2.2), com dados obtidos do modelo de FAI proposto nesta tese. Com os dados reais tem-se a certeza de estar reproduzindo fielmente as características de FAI, com o modelo é possível gerar uma quantidade de testes maior que os anteriores e com características mais variadas, já que, a cada simulação, por ser aleatório, o modelo modifica a assinatura da forma de onda de corrente.

Nos dois casos as FAIs foram simuladas na fase A B e C, com e sem a presença de GD, tendo essa três níveis de penetração: 100%, 66% e 33% de sua potência nominal. Ainda, todas as simulações foram feitas para o sistema sob duas condições de carregamento: 100% e 30%.

De todas as barras, foram desconsideradas as barras 888 e 890, localizadas após o transformador conectado à barra 832, uma vez que a tensão de linha do seu secundário é de 4,16 kV, estando fora da faixa de 11 a 25 kV, especificada na Seção 2.1.2.

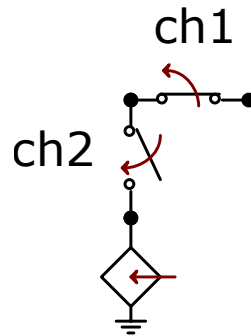
### 4.2.1 Simulação de FAIs por meio de dados coletados em campo

Cedidos pelos autores de [Macedo et al. \(2015\)](#), os sinais de corrente de FAIs utilizados nas simulações apresentadas nesta seção foram coletados em um ensaio de queda de condutores em média tensão sobre solos do tipo: areia, grama, argila, cascalho e asfalto, totalizando 33 medições.



Para injetar estes sinais no sistema, foi utilizado um modelo (exibido na Figura 30), composto por uma fonte de corrente dependente e um bloco Models, programado em linguagem Fortran, responsável por seu controle. O rompimento do condutor foi simulado pela abertura da chave 1 (ch1) em 1 s e o toque do condutor ao solo pelo fechamento da chave 2 (ch2) em 2,28 s, resultando em um tempo de queda de 1,28 s, que corresponde a uma altura de 8 m. Este modelo foi testado e publicado pelos autores de [Lopes \*et al.\* \(2021\)](#).

Figura 30 – Modelo de FAI por fonte de corrente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 5 mostra o total de simulações, separadas em dois subtópicos: com e sem GD. A Figura 31 mostra um exemplo de um dos sinais de falta utilizados, dando destaque à corrente gerada no momento do arco.

Tabela 5 – Número de simulações de FAIs com sinais reais.

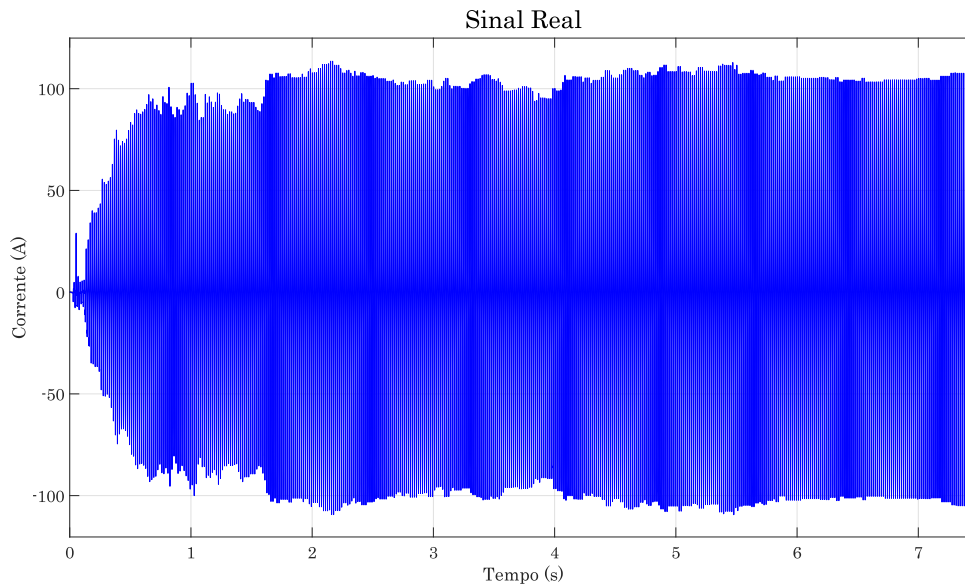
	Fase	Nº barras	Nº Sinais	Carregamento	Potência da GD	Nº Simulações
Com GD	A	27	33	2	3	5346
	B	27				5346
	C	23				4554
Sem GD	A	27	33	2	0	1782
	B	27				1782
	C	23				1518
Total						20328

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.2 Simulação de FAIs por meio do modelo proposto

Além das simulações de FAIs com sinais reais, foi utilizado o modelo de FAI proposto nesta tese e publicado por [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#). Para a parametrização do modelo, foram utilizados 10 dos sinais reais cedidos por [Macedo \*et al.\* \(2015\)](#), dos quais os valores dos parâmetros foram determinados segundo a metodologia apresentada por [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#):

Figura 31 – Exemplo de sinal real.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- ***iFault***: Primeiramente, o envelope do sinal é calculado como a corrente de pico a cada meio ciclo do sinal. O valor de *iFault* é calculado como sendo a mediana desses valores.
- ***cBup***: Número de ciclos contados do início da falta até que a corrente de pico seja maior que *iFault* por dois ciclos consecutivos.
- ***iPerc***: A razão, em porcentagem, entre as correntes de pico do último e o primeiro ciclo de *buildup*.
- ***iAsy/iSpike***: Primeiro é calculada a assimetria, como sendo a diferença absoluta entre a corrente de pico de cada meio ciclo do sinal. Esses valores são separados entre aqueles acima (*spikes*) e abaixo (assimetria) de duas vezes a assimetria média. Assim, *iAsy* e *iSpike* são os valores máximos de assimetria e *spikes*, respectivamente. Ambos são calculados como porcentagem de *iFault*.
- ***pAsy/pSpike***: Probabilidade que *iAsy* e *iSpike* ocorram no sinal.
- **Modulação**: Primeiro é obtido o sinal sem assimetria, calculando a diferença entre o envelope e a assimetria. A modulação é calculada como sendo a média da corrente de pico de 4 ciclos consecutivos deste novo sinal.
- ***iPosMod/iNegMod***: Os valores de modulação foram divididos entre aqueles maiores (positivos) e menores (negativos) que *iFault*. *iPosMod* e *iNegMod* são, respectivamente, a diferença entre os valores positivos e negativos e *iFault*, ambos como porcentagem de *iFault*.

- ***pPosMod/pNegMod***: Probabilidade que os valores de modulação sejam maiores ou menores que *iFault*, respectivamente.
- ***minCy/maxCy***: O número mínimo e máximo de ciclos consecutivos que a modulação tem valores iguais (tolerância de 1%), que representa o efeito dos patamares.

A Tabela 6 mostra os valores dos parâmetros extraídos de cada um dos 10 sinais analisados. E a Tabela 7 mostra o total de simulações, separadas em dois subtotais: com e sem GD.

Tabela 6 – Parâmetros extraídos dos sinais de FAIs cedidos por [Macedo et al. \(2015\)](#).

Parâmetros	Sinais de Corrente									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>vl(kV)</i>	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9
<i>freq(Hz)</i>	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
<i>vp(V)</i>	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
<i>ruptt(s)</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>toucht(s)</i>	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
<i>iFault(A)</i>	10	12	24	40	129	35	31	49	17	20
<i>iPerc(%)</i>	1	1	1	1	53	8	20	11	1	1
<i>cBup</i>	26	179	181	144	52	34	57	113	208	91
<i>soil</i>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<i>iAsy(%)</i>	14	12	7	8	3	21	9	4	6	7
<i>iPeak(%)</i>	60	107	9	13	10	29	20	26	61	0
<i>pIasy(%)</i>	85	66	72	76	59	36	54	63	49	76
<i>pIpeak(%)</i>	9	3	1	2	6	3	8	8	1	1
<i>modMeg(%)</i>	50	50	50	29	16	16	50	24	50	10
<i>modPos(%)</i>	50	39	20	28	16	50	50	50	50	32
<i>pModNeg(%)</i>	30	58	54	56	45	17	32	51	50	52
<i>pModPos(%)</i>	65	12	19	22	19	17	32	20	2	24
<i>minCy</i>	10	10	10	10	10	0	10	10	0	10
<i>maxCy</i>	10	10	80	10	10	0	10	10	10	20

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3 Banco de dados de eventos comuns aos sistemas de distribuição

Para os testes de falsos positivos foram adicionadas ao banco de dados simulações de chaveamentos, que são eventos comuns aos sistemas de distribuição. Para isso, foram conectadas chaves em série com os elementos que compõem o sistema IEEE 34 barras: bancos de capacitores, cargas, ramais e transformador, com a finalidade de fazer sua conexão e desconexão, simulando inserção e retirada destes elementos.

Tabela 7 – Número de simulações de FAIs com modelo de FAI.

	Fase	Nº barras	Nº Sinais	Carregamento	Potência da GD	Nº Simulações
Com GD	A	27				1620
	B	27	10	2	3	1620
	C	23				1380
Sem GD	A	27				540
	B	27	10	2	0	540
	C	23				460
Total						6160

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ainda, com o propósito de testar o algoritmo para cargas geradoras de conteúdo harmônico e inter-harmônico, foram modelados um forno a arco e um retificador, os quais serão detalhados nas seções 4.3.5 e 4.3.6, respectivamente.

#### 4.3.1 Chaveamento de bancos de capacitores

O sistema IEEE de 34 barras possui dois capacitores, um conectado à barra 844, outro à barra 848. As simulações aqui apresentadas são feitas por meio da conexão e desconexão destes elementos, tanto de forma trifásica, ou seja, com as 3 fases sendo chaveadas no mesmo instante de tempo, quanto de forma monofásica, com uma fase sendo chaveada após a outra, com um intervalo de tempo de 0,5 s, na sequência A, B e C. Nos casos com GD, o banco de capacitores conectados à barra 848 é retirado para que sejam respeitados os limites de tensão estabelecidos pelo PRODIST (MOTTER; VIEIRA, 2018). A Tabela 8 mostra o número de chaveamentos, considerando as situações supracitadas.

Tabela 8 – Número de simulações de chaveamento de banco de capacitores.

	Nº Cap	1F/3F	Inserção/Retirada	Carregamento	Potência da GD	Nº Simulações
Com GD	1	2	2	2	3	24
Sem GD	2	2	2	2	0	16
Total						40

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.3.2 Chaveamento de cargas

O sistema IEEE de 34 barras possui 19 cargas distribuídas entre barras do sistema e 6 cargas pontuais. As cargas distribuídas foram modeladas como cargas concentradas e alocadas na metade da distância ao longo da linha a qual pertencia. A Tabela 9 mostra o número de simulações e as situações nas quais elas ocorrem.

Tabela 9 – Número de simulações de chaveamento de cargas.

	Nº Cargas	Inserção/Retirada	Carregamento	Potência da GD	Nº Simulações
Com GD	25	2	2	3	300
Sem GD	25	2	2	0	100
Total					400

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3.3 Chaveamento de ramais

Por conter conjuntos de cargas, o chaveamento de um ramal do sistema pode vir a causar transitórios mais significativos que os ocasionados pela inserção ou retirada de uma carga. O sistema escolhido possui 8 ramais, dos quais 6, monofásicos, foram chaveados: 808 (fase B), 816 (fase A), 824 (fase B), 854 (fase B), 858 (fase A), e 836 (fase B). Os ramais 832 e 834 são trifásicos e não foram chaveados pois o primeiro será chaveado junto à energização do transformador, descrito na Seção 4.3.4, e o ramal que deriva da barra 834 é o ramo no qual está conectada a GD e os dois capacitores. A Tabela 10 elenca as simulações de chaveamento dos ramais.

Tabela 10 – Número de simulações de chaveamento de ramais.

	Nº Ramais	Inserção/Retirada	Carregamento	Potência da GD	Nº Simulações
Com GD	6	2	2	3	72
Sem GD	6	2	2	0	24
Total					96

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3.4 Energização de transformador

O sistema IEEE de 34 barras possui um transformador estrela-estrela com neutro aterrado, de potencia nominal igual a 500 kVA, conectado à barra 832, o qual reduz a tensão de linha de 24,9 kV para 4,16 kV. À modelagem deste elemento foi adicionada a curva de magnetização de um transformador real, de características similares às do mesmo (LOPES *et al.*, 2022). As situações e número de simulações estão exibidos na Tabela 11.

### 4.3.5 Forno a arco

Devido à presença do arco elétrico, a corrente medida em um forno a arco apresenta semelhanças com as geradas pelas FAIs. Para fazer o teste do algoritmo foi utilizado um modelo desenvolvido por LOPES (2020), conectado à barra 802. As potências médias, ativas e reativas do forno são de 955 kW e 1220 kvar. O modelo foi utilizado em potência máxima, simulando a

Tabela 11 – Número de simulações de chaveamento do transformador.

	Inserção/Retirada	Carregamento	Potência da GD	Nº Simulações
Com GD	2	2	3	12
Sem GD	2	2	0	4
Total				16

Fonte: Elaborada pelo autor.

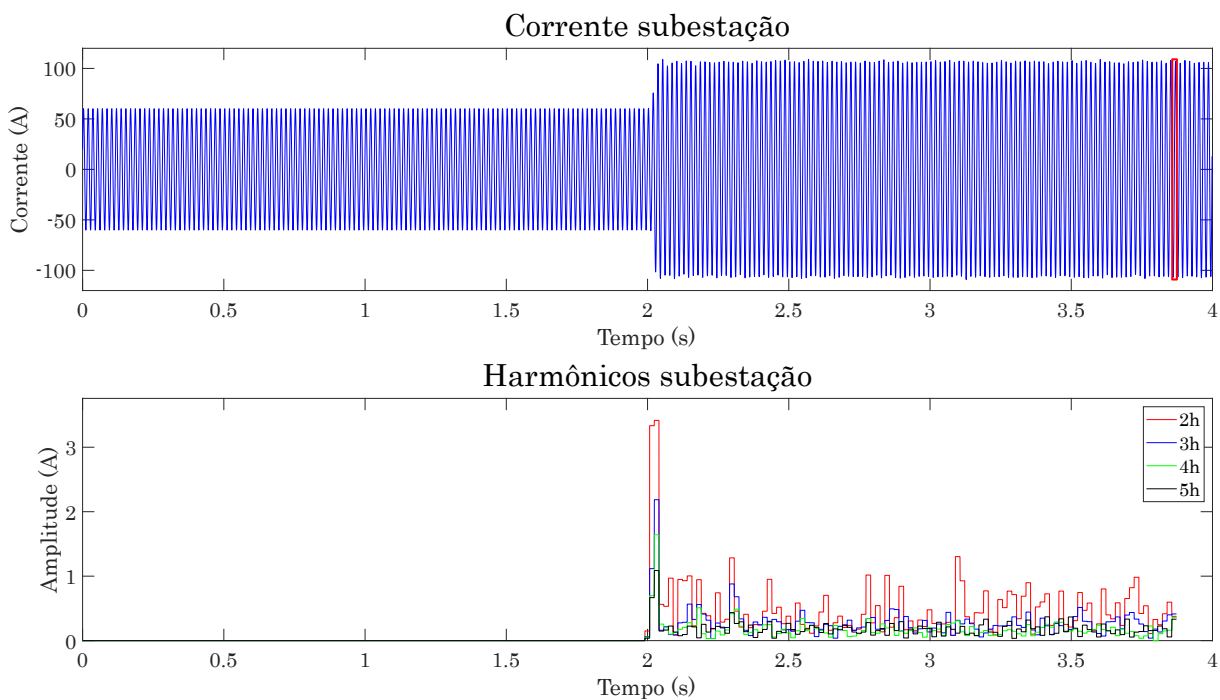
condição de pleno funcionamento. A Tabela 12 mostra o número de simulações deste evento e a Figura 32 traz um exemplo de energização do forno a arco com a amplitude dos componentes harmônicos lidos da subestação.

Tabela 12 – Número de simulações de chaveamento do forno a arco.

	Inserção/Retirada	Carregamento	Potência da GD	Nº Simulações
Com GD	2	2	3	12
Sem GD	2	2	0	4
Total				16

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Exemplo de energização do forno a arco.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3.6 Retificador

Desenvolvido em Lopes *et al.* (2022), um retificador variável conectado à barra 802 foi utilizado para testar o algoritmo contra distorção harmônica que varia ao longo do tempo. Este retificador foi conectado à barra 802 e teve sua potência modificada a cada meio ciclo, variando entre 400 kW e 500 kW, esta última sendo equivalente à potência da maior carga do sistema.

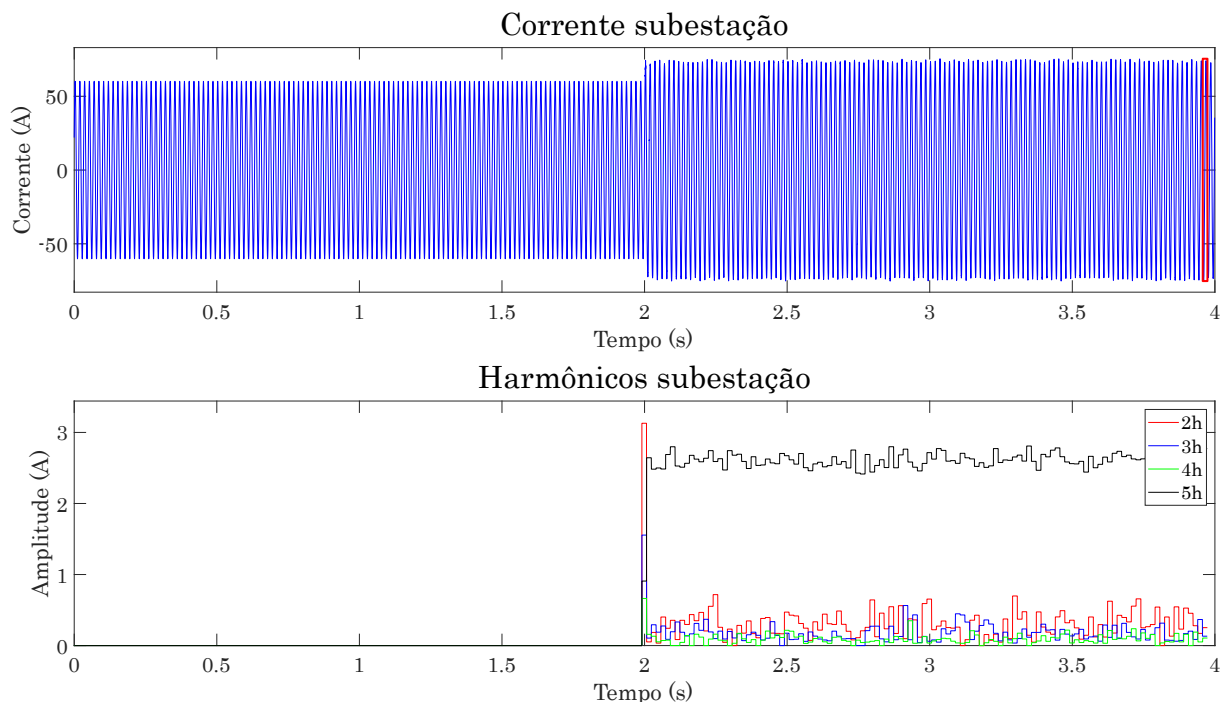
Os casos são exibidos na Tabela 13 e um exemplo de energização do retificador e os harmônicos lidos da subestação são ilustrados na Figura 33.

Tabela 13 – Número de simulações de chaveamento do retificador.

	Inserção/Retirada	Carregamento	Potência da GD	Nº Simulações
Com GD	2	2	3	12
Sem GD	2	2	0	4
Total				16

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33 – Exemplo de energização do retificador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

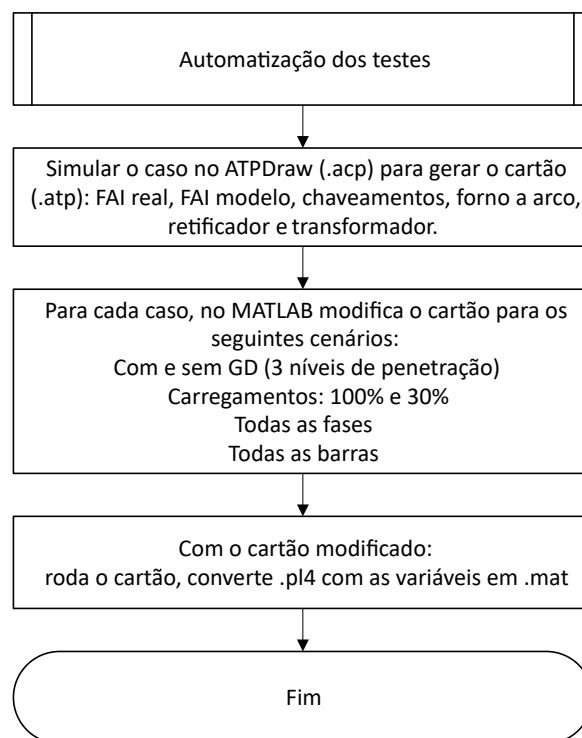
## 4.4 Automatização dos testes e número de simulações

A tarefa de gerar todas as simulações e em todas as condições propostas seria praticamente inviável de ser feita manualmente dentro do prazo disponível para a conclusão da tese.

Para otimizar este trabalho, foi elaborado um esquema de simulação, capaz de gerar, de modo automático, os arquivos do tipo MATLAB data (.mat), utilizados como entrada do algoritmo de detecção.

A sequência de passos é a mesma para todos os eventos simulados e foi feita do seguinte modo: primeiro é montado o esquema elétrico do circuito no ATPDraw, o qual é simulado, gerando um arquivo do tipo (.atp), chamado de cartão, contendo todos os parâmetros do sistema desta simulação. Este arquivo é lido por um código em MATLAB, que modifica as linhas necessárias a cada simulação, como: barra na qual o evento ocorre, tempo de abertura e fechamento das chaves, penetração da GD, nível de carregamento, parâmetros do modelo de FAI e assim por diante. O MATLAB então utiliza o ATP para simular este novo cartão, gerando um arquivo do tipo (.pl4), que é convertido em um arquivo do tipo (.mat), o qual, como dito anteriormente, será utilizado como entrada do algoritmo de detecção. O fluxograma da Figura 34 resume estes passos.

Figura 34 – Fluxograma da automatização dos testes.



Fonte: Elaborada pelo autor.



---

## RESULTADOS

---

Este capítulo apresenta o desempenho do algoritmo proposto, como resultado da leitura dos sinais gerados pela base de dados. Cada um dos eventos será discutido em uma seção própria, pois, para cada um dos sinais e condições do sistema, existem motivos pelos quais o evento tenha ou não sido detectado. Pela impossibilidade de discorrer sobre cada detalhe de cada sinal no extenso universo de simulações, será escolhido um cenário base e, sobre ele, para cada categoria, será escolhido um grupo de sinais, por meio dos quais serão discutidos pontos considerados relevantes durante a simulação.

Por ser o caso mais complexo, todos os exemplos incluem a presença de GD. O nível de penetração escolhido foi de 66%. Por simplicidade, a fase A foi escolhida em todos os casos. O nível de carregamento selecionado foi o de 100%, uma vez que, no momento do rompimento do condutor, há maior rejeição de carga e, conseqüentemente, transitório mais acentuado. Além disso, quanto maior a corrente de carga, mais difícil de haver distinção da corrente de FAI.

Nestas condições, foram selecionadas as barras: 802, 848, 854. A primeira por ser a barra mais próxima da subestação, a segunda por ser a mais distante eletricamente da subestação e a terceira, por ser uma barra intermediária.

### 5.1 Análise dos sinais de FAIs

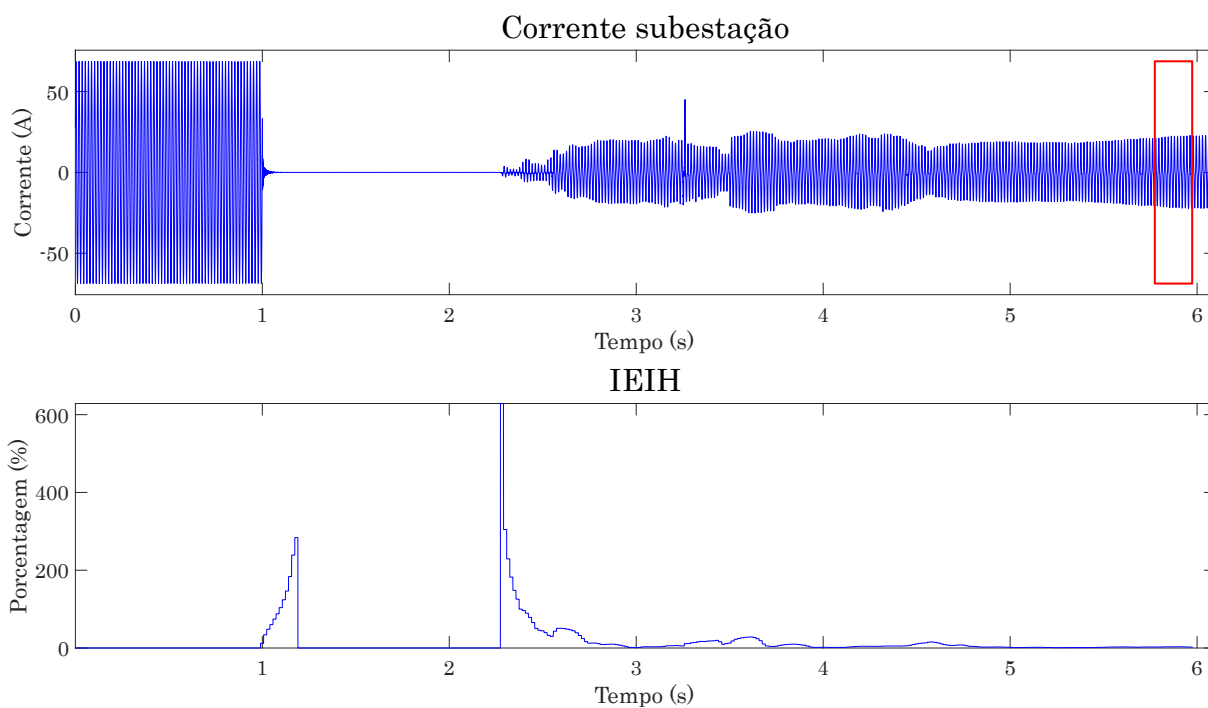
A detecção de uma FAI implica que todas as premissas necessárias ao seu reconhecimento foram observadas. Nesta seção, por meio de exemplos de simulação de FAIs, serão mostradas algumas das características observadas pelo algoritmo proposto.

O primeiro exemplo é de um sinal de FAI real, ocorrendo na barra 802. Neste caso, exibido na Figura 35, o rompimento do condutor é evidente, ocorrendo em 1 s, e o sinal de FAI não possui influência significativa da corrente de carga. Por este motivo, todas as características do sinal de falta são facilmente reconhecidas, algumas, até mesmo visualmente. Em contrapartida,

este exemplo demonstra umas das dificuldades encontradas durante a elaboração do algoritmo, que é a existência de componentes inter-harmônicos acentuados durante uma rejeição alta de carga (momento após o rompimento do condutor). Vê-se que esta perturbação perdura por 12 ciclos, aproximadamente, que é o tempo necessário para que a janela de 12 ciclos não receba mais informações deste transitório.

Esse problema é contornado pelo detector de rompimento do condutor e *reset*, na terceira camada. É ele que sinaliza um possível rompimento, e só após 40 ciclos libera os outros detectores da camada 3. Este tempo é suficiente para que o transitório tenha se extinguido.

Figura 35 – FAI real na barra 802. Valor do IEIH.

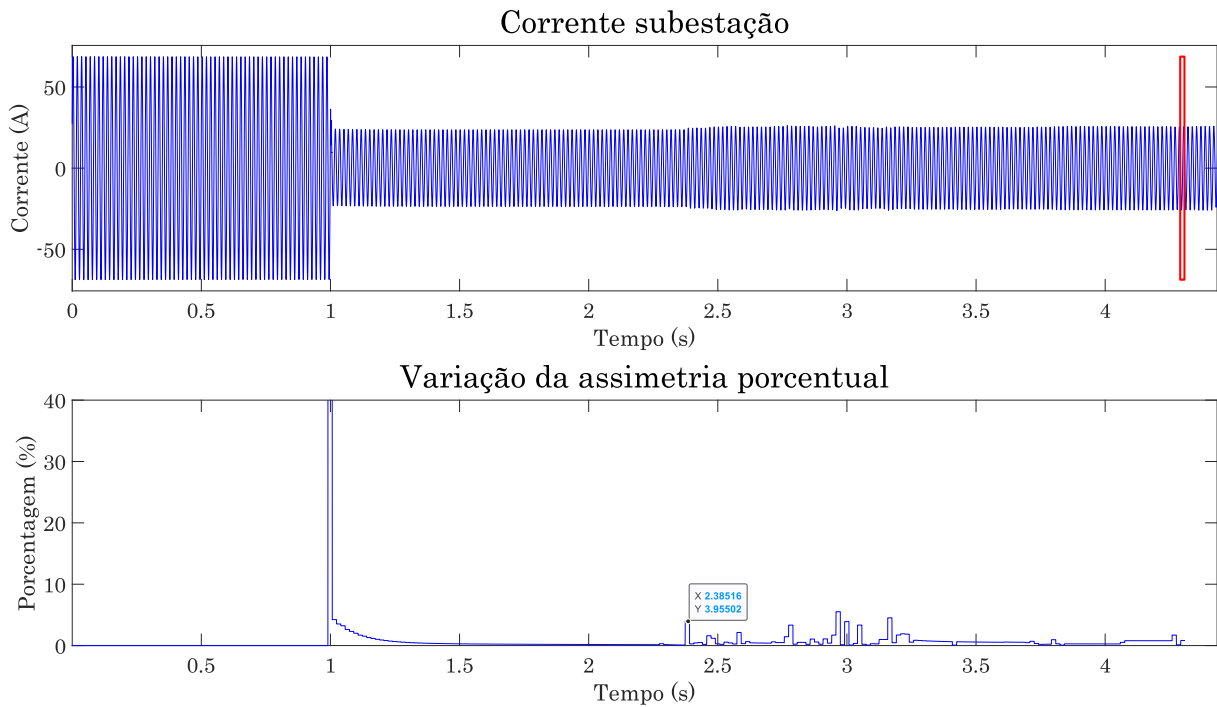


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 36 mostra o resultado de uma FAI real ocorrendo na barra 854. Este caso foi escolhido pela baixa amplitude da corrente de falta, que não altera significativamente a amplitude da corrente de carga. Ainda, neste sinal, a assimetria é quase imperceptível, de modo que o sinal parece acompanhar a corrente de carga do sistema.

Este caso ilustra o motivo da escolha da variação da assimetria percentual no algoritmo de detecção. O primeiro motivo é que a assimetria percentual independe da amplitude da corrente de falta, sendo calculada como uma relação entre a assimetria e o valor de pico do semiciclo de menor valor. Caso a corrente de carga possua assimetria, as FAIs, como pode ser percebido no gráfico, apresentam variação deste valor, o que torna a variação percentual ideal nessa distinção. Apenas como exemplo, lembrando que este é um caso crítico, o valor da variação da assimetria percentual no início da falta é de aproximadamente 4%, acima do limiar estabelecido para sua detecção (1%).

Figura 36 – FAI real na barra 854. Variação da assimetria percentual.



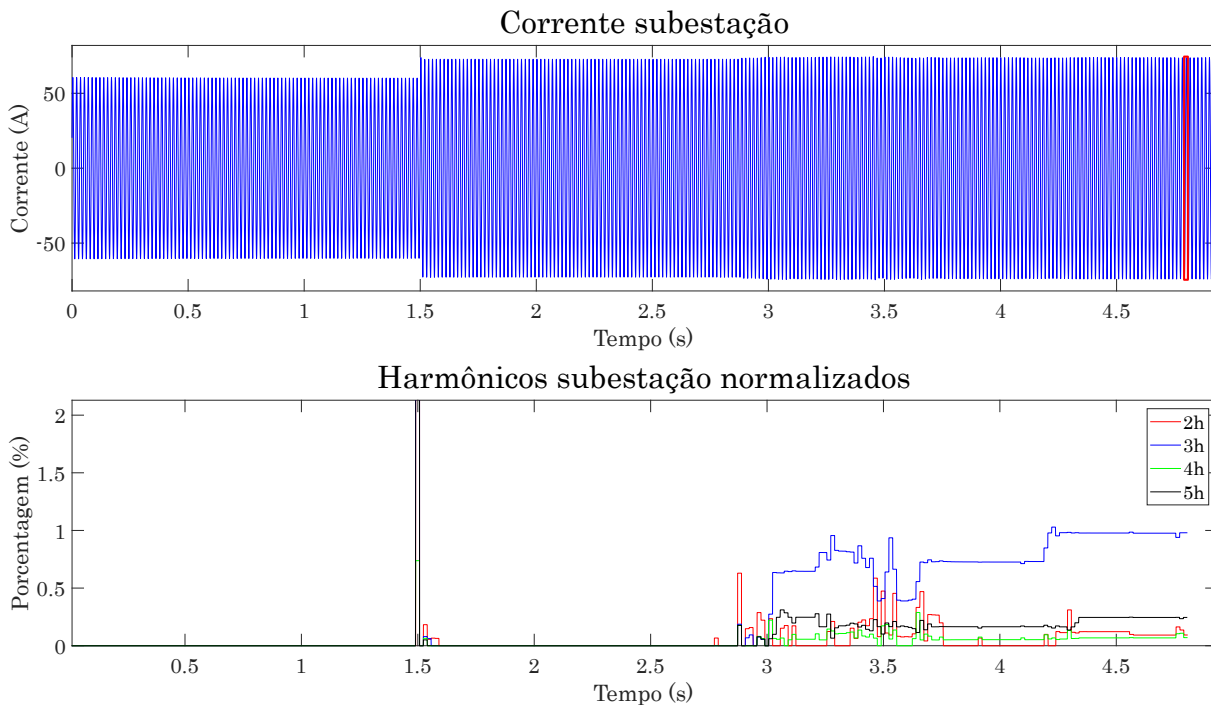
Fonte: Elaborada pelo autor.

O terceiro exemplo é de uma FAI, também extraída de dados reais, aplicada na barra 848. Esta falta está apresentada na Figura 37. Este caso foi escolhido por dois motivos. O primeiro é para demonstrar a razão pela qual o detector de rompimento procura não apenas pela redução do valor eficaz, como seria mais intuitivo, já que há uma perda de carga, mas também pelo aumento. Como é possível notar na Figura 37, a corrente da subestação aumenta no instante do rompimento do condutor (1 s). Isso se deve ao fato de que a GD parou de alimentar as cargas pela fase rompida, já que está à jusante do ponto de rompimento, o que faz com que essa potência tenha que ser suprida pela subestação. O segundo motivo é demonstrar a importância e a eficácia do algoritmo extrator de corrente de carga.

Na Figura 37 é mostrado o espectro dos componentes harmônicos normalizados, vistos da subestação, sem terem passado pelo extrator de corrente de carga. A Figura 38 mostra o mesmo sinal e os componentes harmônicos também normalizados, desta vez, com o algoritmo de extração de carga habilitado. Observa-se que o algoritmo é capaz de evidenciar o espectro da corrente de falta, mesmo neste caso de difícil detecção, no qual a amplitude da corrente de falta é quase imperceptível. Sem o extrator de carga, os valores ficam abaixo de 1,5 %, ao passo que, com o extrator, esses valores são amplificados em mais de 40 vezes, neste caso.

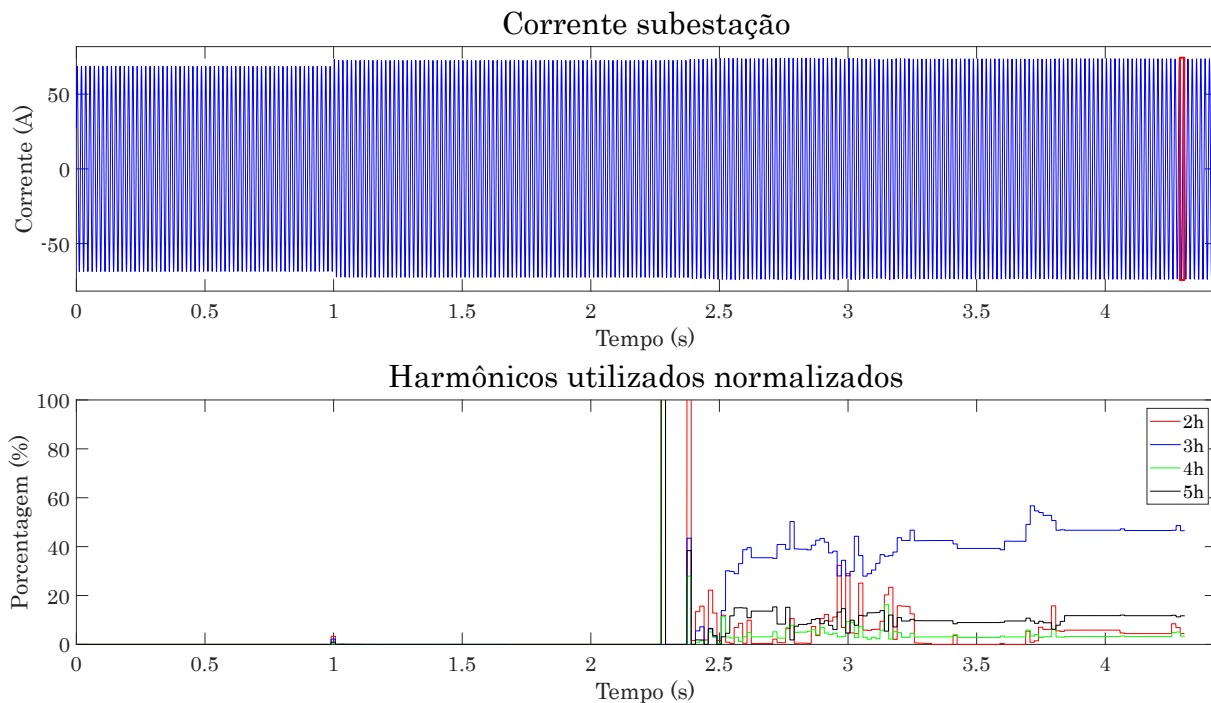
Nestes dois casos, foi possível observar uma ampliação dos valores harmônicos, os quais mantiveram sua assinatura. Isso se deve ao fato da corrente de carga ser linear. Caso, pós rompimento, a corrente de carga apresentasse conteúdo harmônico, o algoritmo calcularia a diferença após o 40º ciclo, removendo esse conteúdo do sinal de falta.

Figura 37 – FAI real na barra 848. Harmônicos normalizados lidos na subestação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 – FAI real na barra 848. Harmônicos utilizados normalizados.

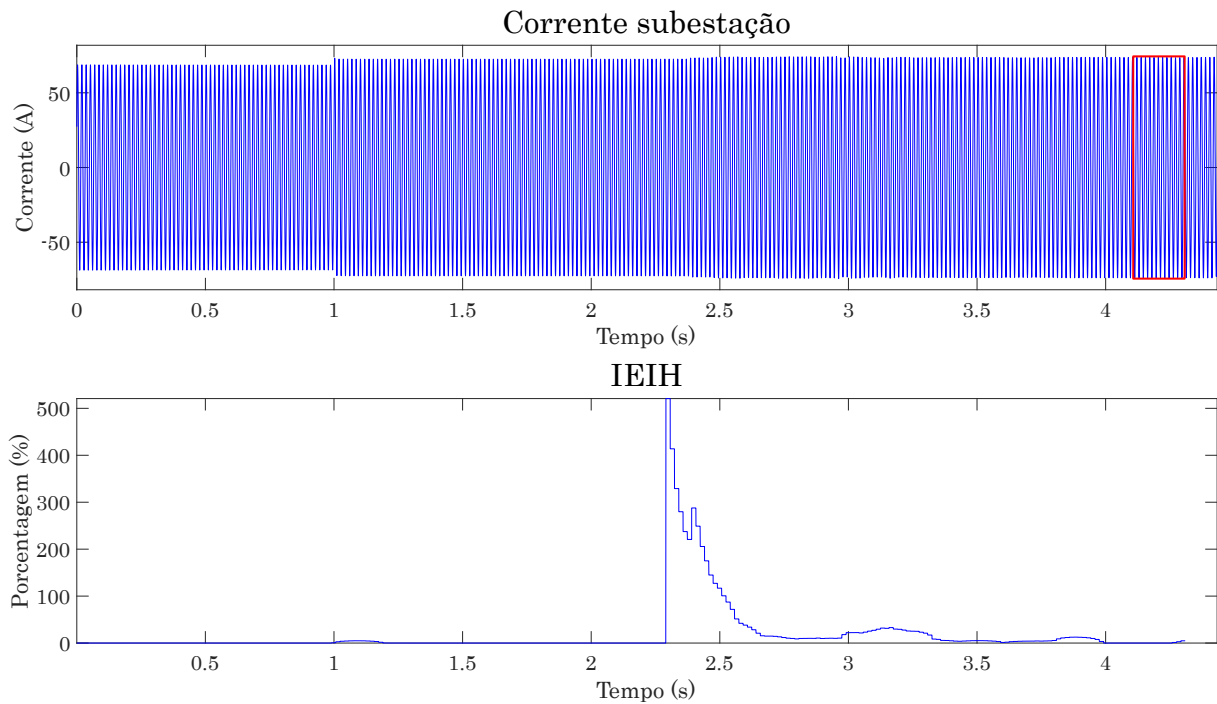


Fonte: Elaborada pelo autor.

Ainda utilizando este exemplo, a Figura 39 mostra o cálculo do IEIH, o qual também se beneficia deste algoritmo.

A não identificação de uma FAI ocorre quando o algoritmo de detecção falha em reco-

Figura 39 – FAI real na barra 848. Harmônicos utilizados normalizados. Valor do IEIH.



Fonte: Elaborada pelo autor.

nhecer uma de suas características. De todas as simulações de falta de alta impedância, tanto com sinais reais quanto com sinais gerados pelo modelo, só existiu um tipo de caso em que a falta não foi detectada, que foram os casos no qual a mesma ocorria em final de linha.

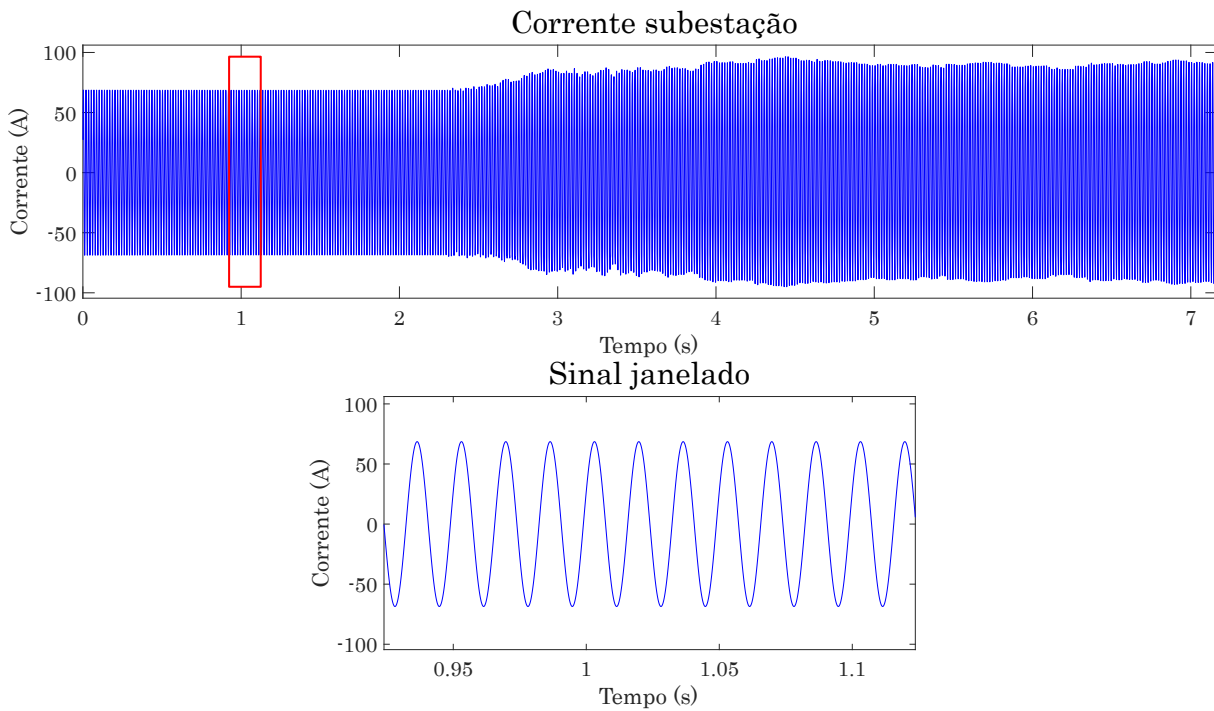
Neste tipo de simulação, o rompimento do condutor não deixa de alimentar nenhuma carga. Não ocorre mudança na topologia do sistema e, portanto, não há identificação de um possível rompimento do condutor. Como o algoritmo depende desta identificação, a falta não é detectada.

No sistema IEEE de 34 barras, existem as seguintes barras nesta condição:

- Fase A: 822 e 864.
- Fase B: 810, 826, 856 e 838.

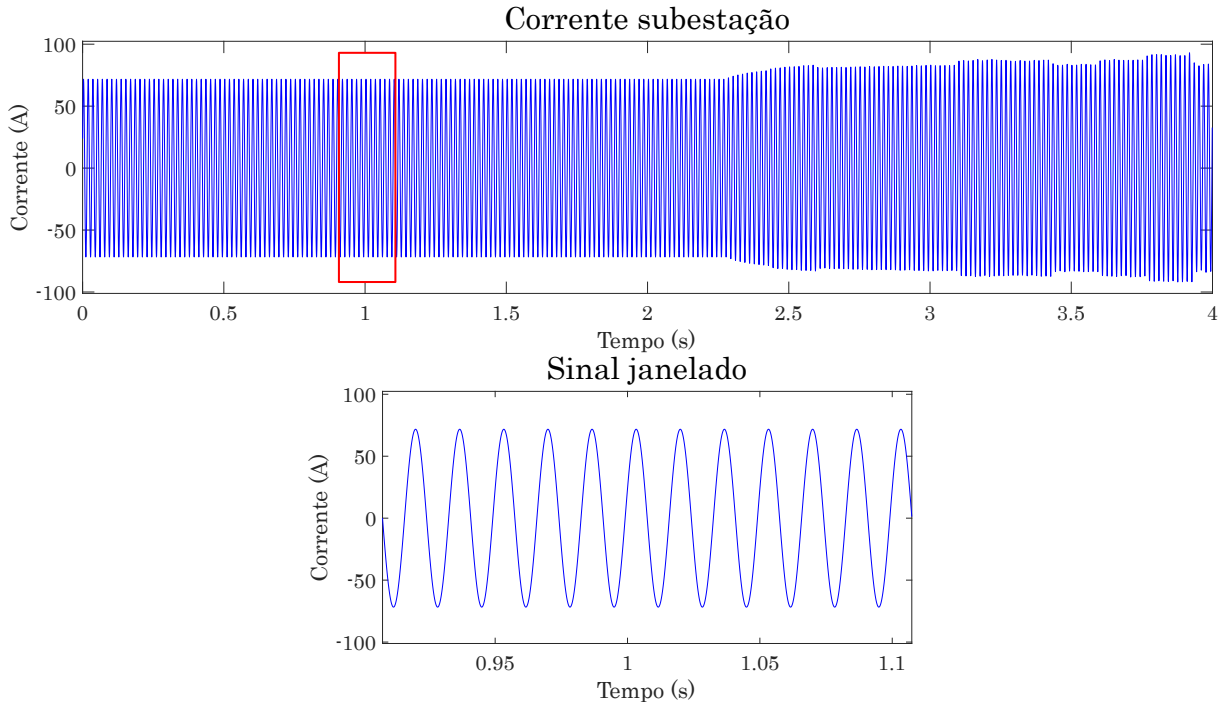
Como exemplo, as Figuras 40 e 41 mostram as simulações de duas FAIs geradas com o modelo, aplicadas nas barras 822 e 864, respectivamente. Nos dois casos é possível notar que, apesar da corrente de falta ser facilmente identificável, não há alteração na amplitude da corrente no momento do rompimento do condutor (1 s).

Figura 40 – FAI com modelo na barra 822.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 – FAI com modelo na barra 864.



Fonte: Elaborada pelo autor.

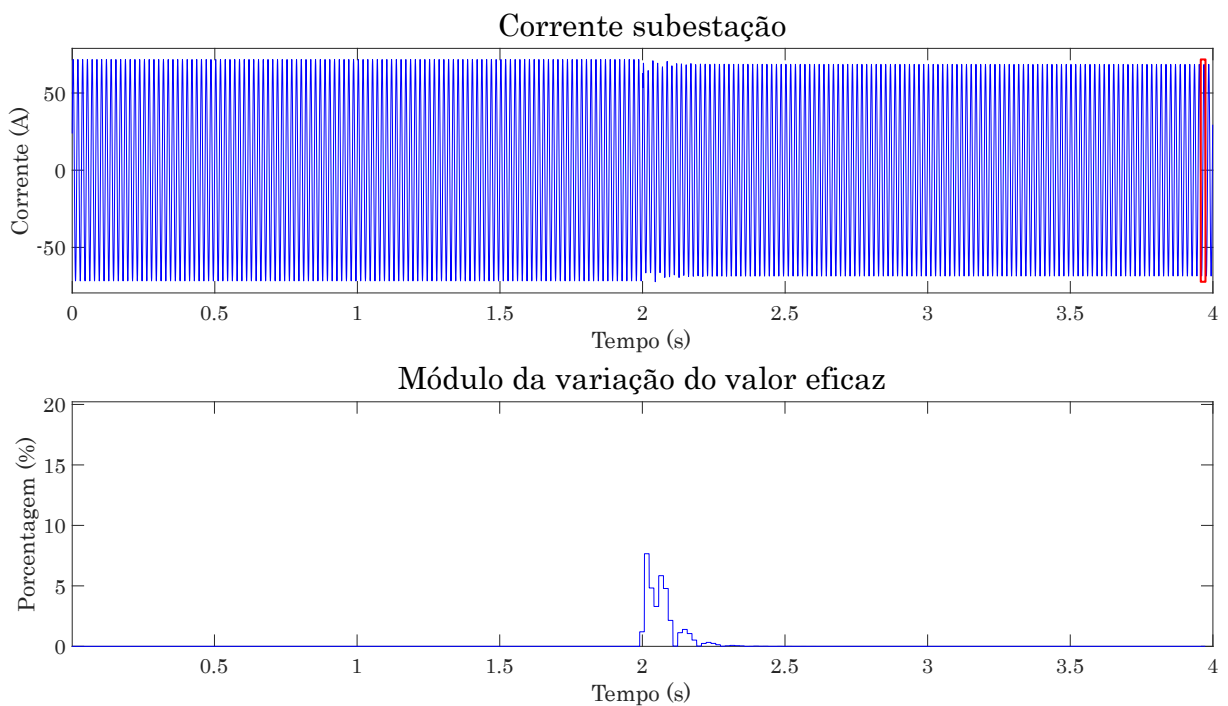
## 5.2 Chaveamento de bancos de capacitores

O chaveamento dos bancos de capacitores, tanto inserção quanto retirada, gera um transitório, que pode ser confundido com a ruptura de um condutor, porém, devido à sua duração,

o algoritmo de detecção de rompimento e *reset*, reiniciará o algoritmo em 2 s após o rompimento, pois não serão encontradas características iniciais do arco após o rompimento.

Como exemplo, a Figura 42, mostra a inserção trifásica (três fases sendo chaveadas no mesmo instante) do banco de capacitores 1, conectado à barra 844, aos 2 s de simulação. Vê-se que existe variação percentual do valor eficaz maior que 1%, o suficiente para ser confundido com o rompimento de condutor, porém, após alguns ciclos, o sinal entra em regime permanente e não há, por exemplo, variação indicando o crescimento da corrente, necessária à identificação do *buildup*.

Figura 42 – Chaveamento trifásico do banco de capacitores 1 (barra 844). Variação do valor eficaz.

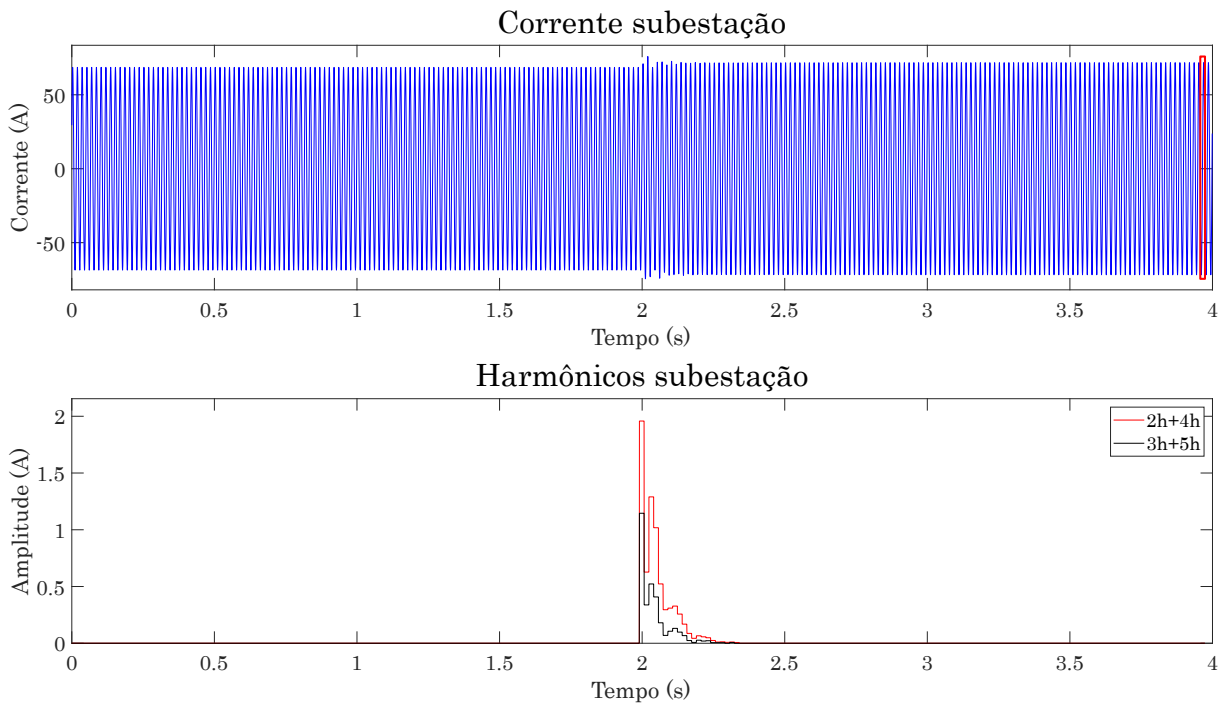


Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro motivo pelo qual esse tipo de evento não seria identificado é devido à relação da soma entre os harmônicos pares (2° e 4°) e ímpares (3° e 5°), necessária à identificação do arco pelo detector de arco. Nos instantes de chaveamento, tanto inserção quanto retirada, a relação se inverte, ou seja, a amplitude da soma dos pares é maior que a amplitude dos ímpares, como mostra a Figura 43.

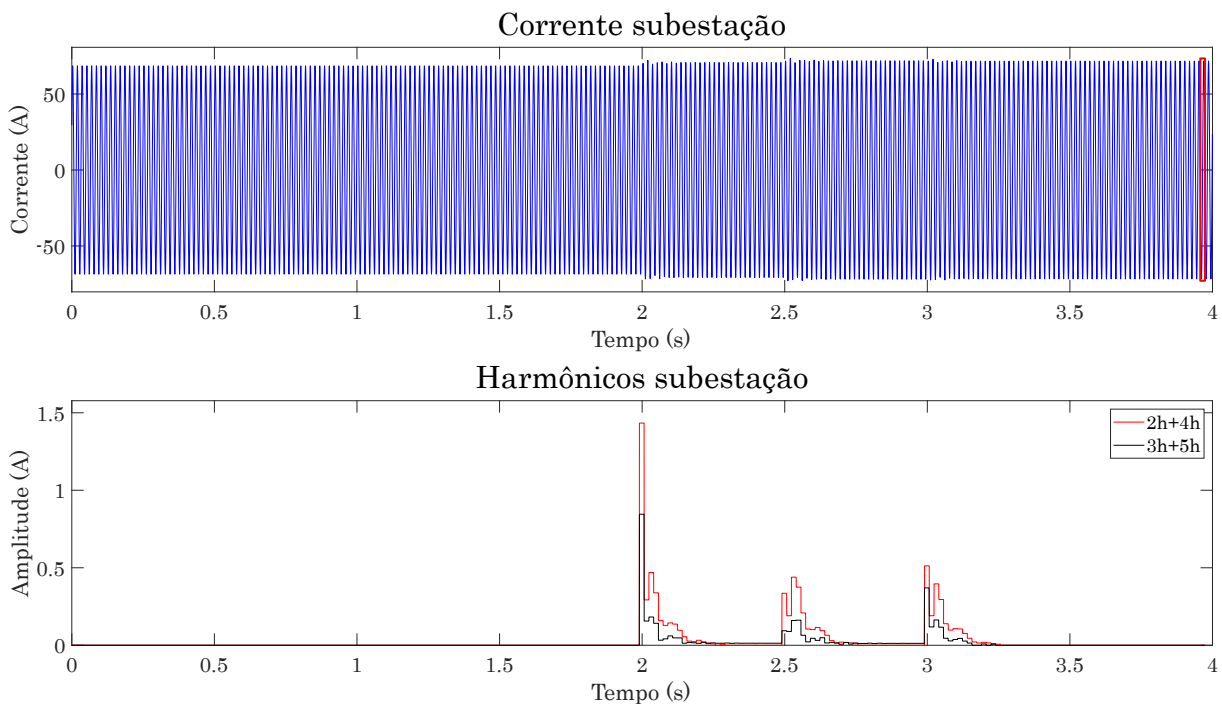
Isso também ocorre nos casos em que os bancos foram chaveados de modo monopolar, ou seja, uma fase após a outra. A Figura 44 ilustra a retirada do banco de capacitores 1, com cada uma das fases sendo chaveadas a cada 0,5 s, com início em 2 s.

Figura 43 – Chaveamento trifásico do banco de capacitores 1. Harmônicos pares e ímpares.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44 – Chaveamento monofásico do banco de capacitores 1. Harmônicos pares e ímpares.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.3 Chaveamento de cargas e ramais

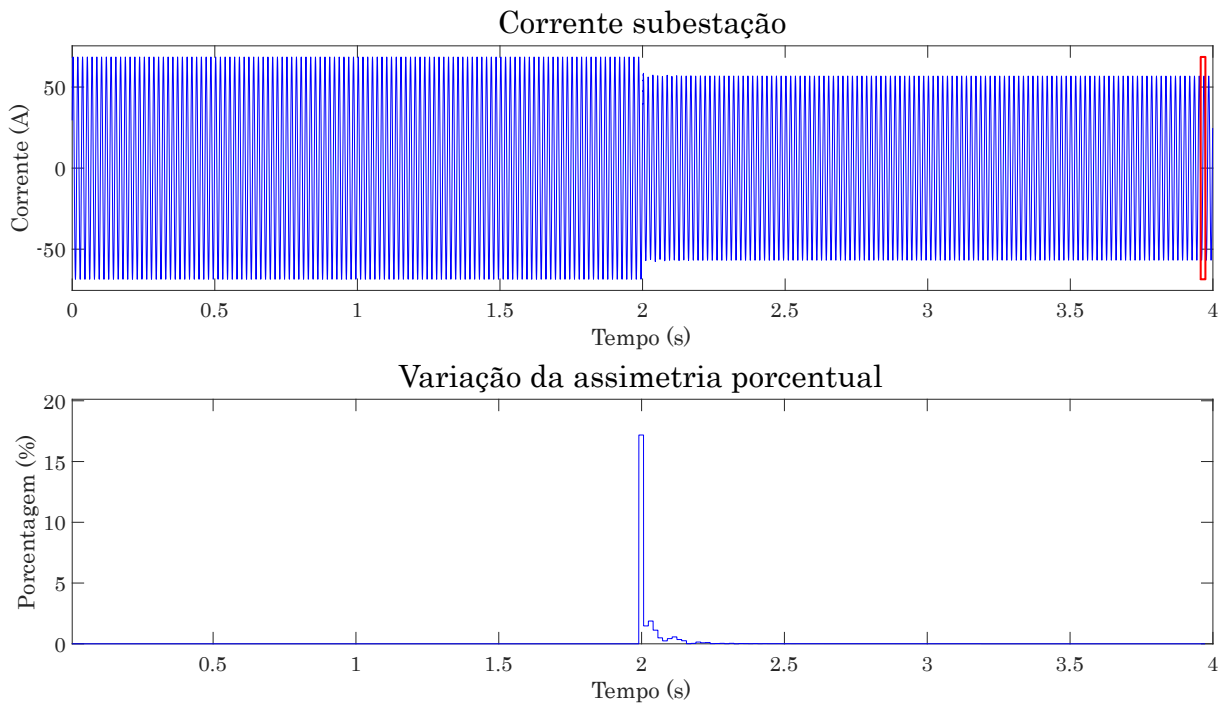
O chaveamento de cargas e ramais pode ser representado em uma só categoria, uma vez que o comportamento é o mesmo, a menos da potência introduzida ou retirada do sistema. Assim



como o chaveamento de bancos de capacitores, estes são eventos de curta duração, que não apresentam características de FAI, tanto no domínio da frequência, quanto no domínio do tempo. A fraca intersecção entre as características desses eventos e as FAIs não é capaz de confundir o algoritmo, não só por sua curta duração, mas pela relação temporal que o algoritmo preserva na observação das FAIs.

Como exemplo, a Figura 45 mostra a desconexão do ramal monofásico (fase A), que deriva da barra 816. Este caso ilustra a análise feita acima: apesar de ser observada uma importante variação da assimetria porcentual, ela reduz seu valor ao longo do tempo. Além disso, e mais importante, essa característica só seria analisada após a identificação do rompimento do condutor e, para configurar o início de arco, deveria ser identificada junto com a presença de *buildup* e IEIH. Caso essas características estivessem presentes, o detector de arco ainda procuraria pelas características persistentes.

Figura 45 – Desconexão do ramal conectado à barra 816. Variação de assimetria porcentual.

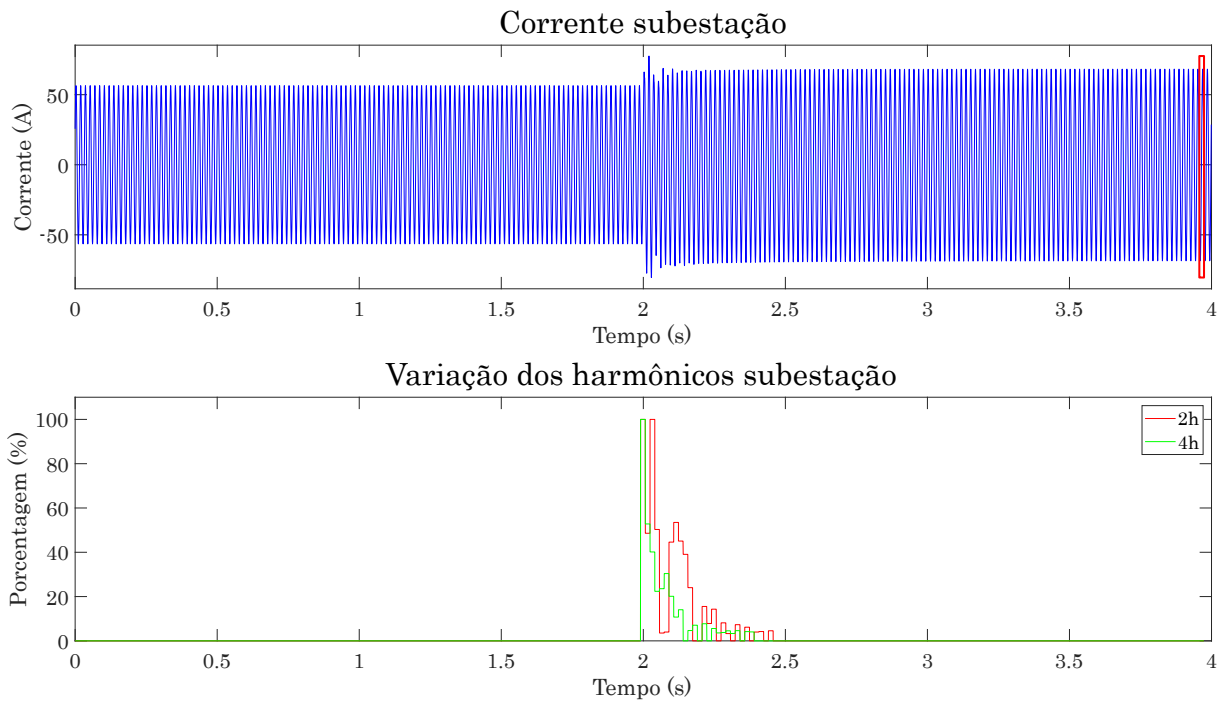


Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5.4 Energização de transformador

Nas presentes simulações foi chaveado o transformador conectado à barra 832. A Figura 46 mostra a conexão do transformador e a respectiva variação dos componentes de ordem 2 e 4, utilizados pelo detector de arco. Como pode ser notado, assim como para os casos de chaveamento de banco de capacitores, cargas e ramais, a perturbação no sistema não dura tempo suficiente para sensibilizar os detectores.

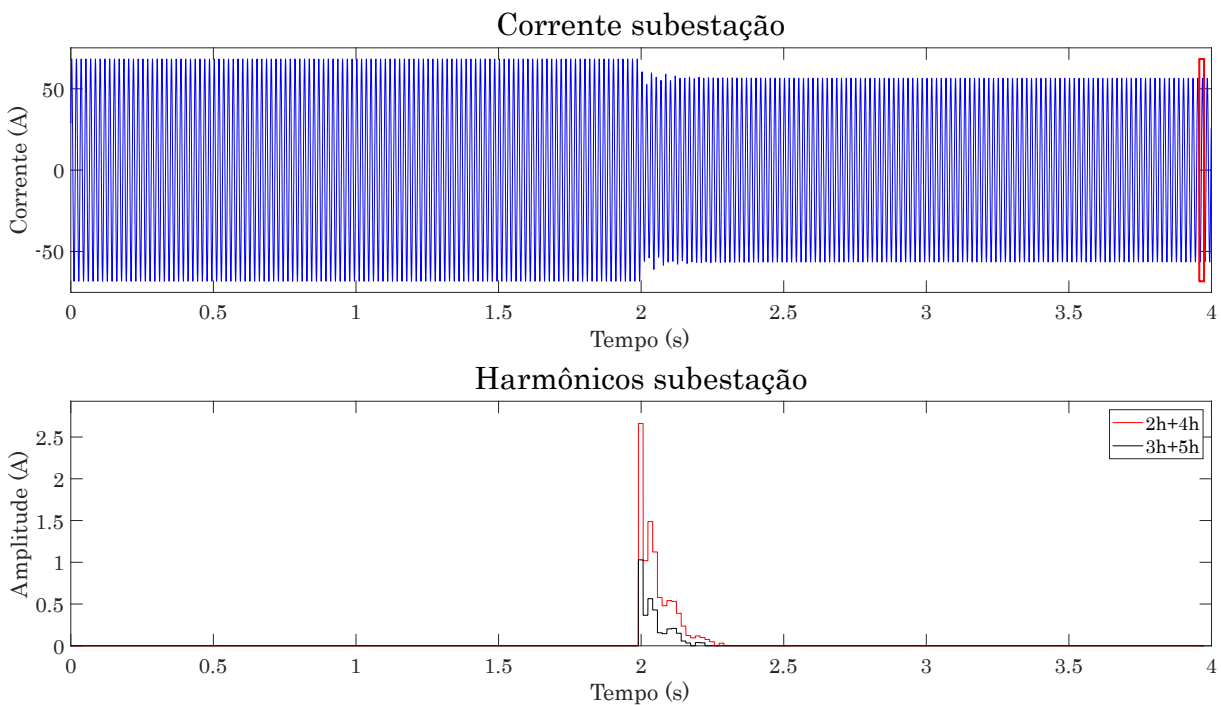
Figura 46 – Conexão do transformador à barra 832.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O mesmo ocorre para a desconexão do transformador, como mostrado na Figura 47. Neste exemplo, além de sua duração limitada, a relação entre harmônicos pares e ímpares não é a esperada pelo algoritmo de detecção.

Figura 47 – Desconexão do transformador à barra 832.

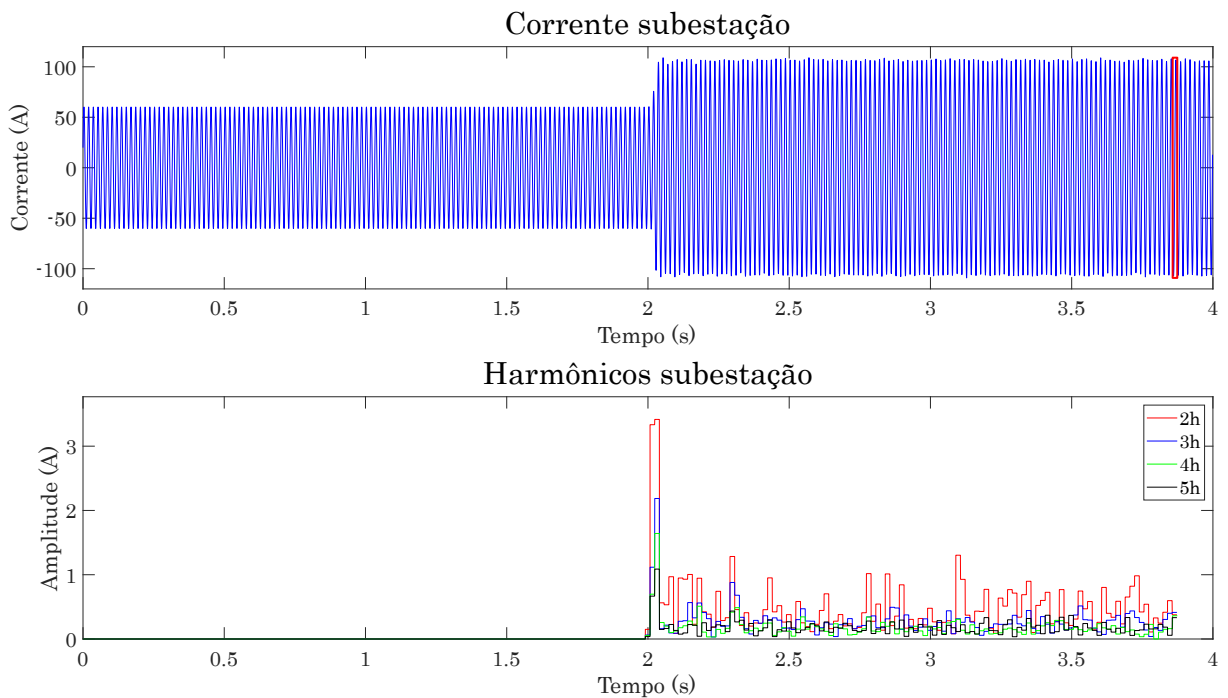


Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5.5 Forno a arco

A Figura 48 mostra o valor dos componentes harmônicos inseridos no sistema quando o forno a arco é conectado. Aos 2 s o algoritmo entende que pode ter havido rompimento do condutor. Devido ao alto grau de distorção e variação das formas de onda de corrente, o detector de início de arco é acionado poucos ciclos após a extração de corrente de carga (40º ciclo). Isso faz com que o algoritmo entenda que entre o momento de ruptura e detecção do arco, o tempo mínimo estipulado não é respeitado, causando seu *reset*.

Figura 48 – Conexão do forno a arco na barra 802. Componentes harmônicos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

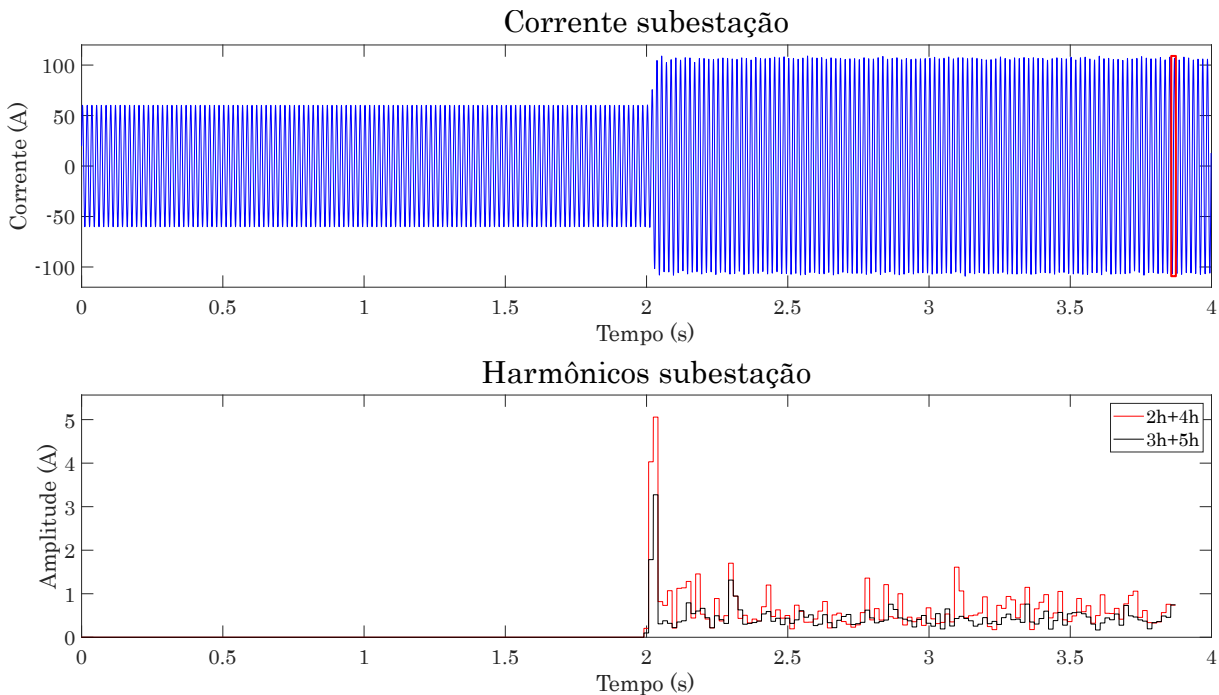
Outro ponto pelo qual o forno a arco não se confundiria com uma FAI, mesmo que o início de arco fosse detetado após 1 s é pelo fato de que, na maior parte do tempo, a soma de seus harmônicos pares é maior que a dos ímpares, como pode ser visto na Figura 49.

## 5.6 Retificador

A Figura 50 mostra o conteúdo harmônico visto da subestação, quando ocorre a energização do retificador aos 2 s. Este caso exemplifica que, assim como no forno a arco, a amplitude dos harmônicos varia ao longo do tempo.

Como o detector de início de arco se baseia na variação da assimetria porcentual, presença de componentes inter-harmônicos e 3 ciclos de *buildup*, o início de arco é detectado poucos ciclos após a extração da corrente de carga, que ocorre em 2,67 s. Por entender que não há

Figura 49 – Conexão do forno a arco na barra 802. Soma dos harmônicos pares e ímpares.



Fonte: Elaborada pelo autor.

separação temporal entre o rompimento do condutor e o início do arco, a forma de onda de corrente não é classificada como sendo de uma FAI.

Ainda, mesmo que o início de arco fosse detectado após o tempo mínimo estipulado pelo algoritmo, que é de 1 s, não haveria a confirmação de arco, pois, como mostra a Figura 50, o valor do 5º harmônico é sempre maior que o 3º, o que não acionaria o *flag* da relação entre estas frequências.

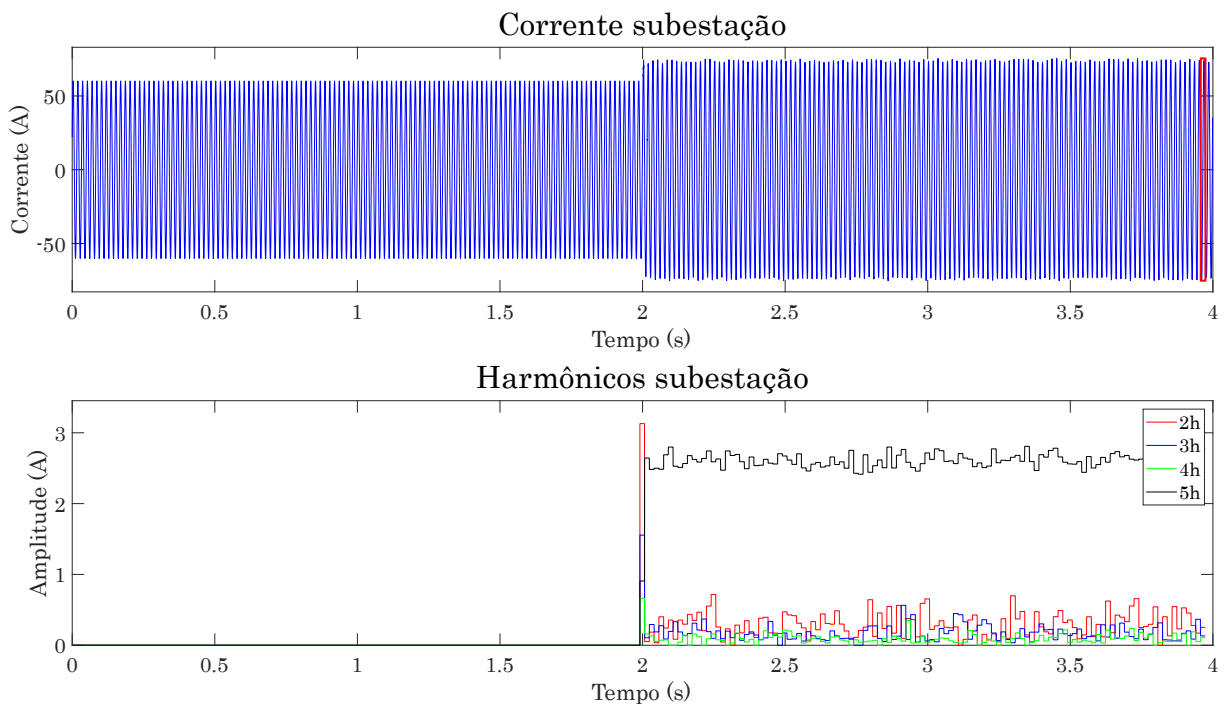
## 5.7 Considerações sobre o capítulo

A análise da base de dados pelo algoritmo de detecção evidencia que, com a configuração atual, ele é capaz de detectar FAIs que apresentem carga à jusante do ponto de rompimento. Ainda, o algoritmo não identifica como FAI outros eventos que não esta, por mais que sensibilizem alguns dos *flags* das características procuradas em um arco.

A Tabela 14 descreve o número de casos simulados, acertos e erros do algoritmo. Como resultado global, o algoritmo foi capaz de acertar em 92,4% dos casos, com tempo médio de detecção de 8 ciclos, sendo que seus erros ocorreram sempre em FAIs em final de linha, em barras que não possuíam carga. Essas barras e suas fases são: 822(A), 864(A), 810(B), 826(B), 856(B) e 838(B).

Por fim, o método não foi afetado pela presença da GD, já que, para os casos não FAI não houve detecção errônea com ou sem sua presença e, para os casos de FAI, a presença ou

Figura 50 – Conexão do retificador na barra 802. Componentes harmônicos subestação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 14 – Desempenho do algoritmo de detecção.

Caso	Número de simulações	Acertos	Erros	Porcentagem de acerto
FAIs Reais	20.328	18.744	1584	92,2%
FAIs Modelo	6.160	5.680	480	92,2%
Banco de capacitores	40	40	0	100%
Cargas	400	400	0	100%
Ramais	96	96	0	100%
Transformador	16	16	0	100%
Forno a arco	16	16	0	100%
Retificador	16	16	0	100%
Total	27.072	25.008	2064	92,4%

Fonte: Elaborada pelo autor.

ausência da GD não foi o motivo pelo qual a falta tenha ou não tenha sido detectada.

A Tabela 15 revisita a Tabela 4, inserindo o método de detecção proposto para comparação. Além da ferramenta matemática principal (método), os testes incluem:

- Carga não linear (CNL).
- Carga de perfil harmônico variável (CVH).
- Presença de GD.

- Sinais reais (SR).
- Modelo realístico ou entrada de sinais reais por meio de modelo (SR).

Tabela 15 – Comparação entre métodos de detecção da literatura e método proposto.

Artigo	Método	CNL	CVH	GD	SR	MR	RC
Lopes et al. (2022a)	TS	✓	✓		✓	✓	✓
Wontroba et al. (2022)	TF					✓	✓
Lima et al. (2021)	TS	✓			✓	✓	
Yeh, Sim e Bravo (2019)	TW				✓	✓	
Torres e Ruiz (2011)	TW				✓	✓	
Chakraborty e Das (2019)	Filtro	✓	✓	✓			
Lima et al. (2018)	TF				✓	✓	
Macedo et al. (2015)	Filtro				✓		
Gadanayak e Mallick (2019)	TW						
<b>Método proposto</b>	TF	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pontuado na Seção 3.1, a detecção de uma FAI pode ser dada por qualquer parâmetro presente na mesma, quando observada em um sistema sem a presença de cargas não lineares ou outros eventos. A real dificuldade em se desenvolver um algoritmo de detecção de FAIs está no grau de imunidade que este apresenta frente a outros eventos. Posto isso, a comparação com os métodos mostrados na Tabela 15 evidencia que o método proposto é o mais bem testado da literatura e um dos únicos que leva em conta o rompimento do condutor.

## 5.8 Discussões

Durante o desenvolvimento do algoritmo de detecção diversos foram os desafios, alguns dos quais serão descritos nesta seção como forma de fomentar discussões para futuras pesquisas.

### 5.8.1 Quantidade de parâmetros

A caracterização das FAIs pode ser baseada em um ou mais parâmetros. Quanto maior o número de características observadas, mais assertiva tende a ser a identificação do evento. Por outro lado, um número excessivo de parâmetros pode particularizar o estudo e fazer com que novos sinais não sejam reconhecidos.

A utilização de poucos parâmetros, por sua vez, facilitará a identificação das FAIs, uma vez que não será necessário cumprir muito critérios, mas pode fazer com que outros eventos sejam confundidos com esse tipo de falta por apresentarem as mesmas características.

A tarefa de escolher o conjunto de atributos é, portanto, um desafio. Como exemplo, para cada harmônico, sub-harmônico e inter-harmônico, podem ser observadas sua amplitude, fase, energia, relações, variações e assim por diante. A assimetria pode ser estudada pelos seus valores, variação absoluta e percentual, no mesmo ciclo ou em ciclos distintos.

Para compor o algoritmo de detecção foram escolhidos parâmetros considerados ao mesmo tempo evidentes nas FAIs e pouco evidentes na maioria dos eventos, sejam eles isolados ou em conjunto.

## 5.8.2 Possibilidades de análises

Para a extração de cada parâmetro podem ser utilizadas mais de uma ferramenta matemática, por exemplo, para a observação do espectro harmônico poderia ter sido utilizada outra transformada que não a TFTC, ou até mesmo filtros. O *buildup* poderia ter sido analisado por aproximação de uma função, observando sua inclinação positiva, por exemplo. São infindáveis as combinações possíveis para cada um dos atributos de uma FAI e como estes podem ser analisados.

### 5.8.2.1 Escolha pela TFTC

Para o cálculo do espectro de frequências optou-se pelo uso da TFTC, uma vez que esta apresentou resultados satisfatórios durante os estudos. A TW é dependente da wavelet-mãe, o que acrescentaria mais variáveis a serem analisadas e necessitaria de um banco de dados de FAIs reais maior para um estudo mais detalhado. A aplicação de filtros também deve ser estudada com cautela, uma vez que existem diversos tipos de filtros, cada um com mais de um parâmetro a ser analisado. Além disso, para extrair diversas frequências, um banco de filtros teria que ser utilizado, o que pode tornar o algoritmo computacionalmente custoso, dependendo das especificações adotadas. A TS é uma ferramenta promissora e que pode ser estudada em trabalhos futuros.

Em (LOPES; TRONDOLI; VIEIRA, 2020), os autores mostraram que as três transformadas são capazes de evidenciar a energia dos componentes harmônicos do sinal de falta e que a transformada de Fourier foi capaz de evidenciar os componentes inter-harmônicos durante todo o período de falta.

## 5.8.3 Determinação de limiares

Outra dificuldade enfrentada concerne ao fato de que, para que seja possível afirmar a existência de uma característica, é necessário que haja algum tipo de comparação, seja entre atributos ou por meio de limiares. O ajuste destes valores é dificultado, uma vez que as FAIs apresentam comportamento de natureza estocástica.

Neste sentido, a escolha de valores fixos tende a particularizar a solução com base nos testes e condições escolhidas nas simulações. Uma solução a ser estudada para deixar o algoritmo ainda mais robusto é o emprego de limiares adaptativos. Porém, deve ser observado que o ajuste do limiar deve ser feito em condição não faltosa e, portanto, é necessário saber quando não está ocorrendo uma falta. Posto isso, na tentativa de deixar o algoritmo o mais robusto possível, as seguintes técnicas foram adotadas:

1. Utilização do que foi chamado de limiar nulo, ao qual foi estipulado o valor de 1%, assumido como sendo satisfatório para mitigar erros em comparações com números de valores muito próximos. Este valor foi utilizado nos seguintes casos:
  - *Flag* de aumento e redução do valor eficaz, utilizado para identificar o rompimento do condutor.
  - *Flag* de variação de assimetria porcentual.
  - *Flag* de variação de 2° e 4° harmônicos.
  - *Flag* de presença de componentes inter-harmônicos.
2. Utilização de valores da amplitude de harmônicos, sub-harmônicos e inter-harmônicos como porcentagem do valor da componente fundamental, para desassociá-los dos valores da amplitude da corrente de falta.
3. Comparações sem limiar:
  - Aumento do valor eficaz da componente fundamental da janela de 12 ciclos para caracterizar o *buildup*.
4. Comparações diretas entre valores de parâmetros:
  - Amplitude do 3° harmônico maior que a amplitude do 5° harmônico.
  - Soma das amplitudes do 3° e 5° harmônicos maior que a soma das amplitudes do 2° e 4° harmônicos.

#### **5.8.4 Distinção de outros eventos**

Para que o algoritmo seja imune a outros eventos que não sejam FAIs se faz necessário que este seja capaz de fazer a distinção entre os eventos, mesmo em casos que os mesmo partilhem características semelhantes. Essa questão se apresenta como um desafio, uma vez que nos sistemas elétricos podem ocorrer os mais diferentes tipos de eventos, com diferentes graus de distorção harmônica, duração e variação de características ao longo do tempo.



A estratégia adotada para solucionar este problema, além da escolha dos parâmetros como descrito na Seção 5.8.1, foi a observação do evento no domínio do tempo, entendendo que a progressão das FAIs tem assinatura única: rompimento, queda e formação do arco elétrico.

Para tanto, foi adotado como primeiro recurso a separação temporal entre o rompimento do condutor e a formação do primeiro arco, devido ao período de queda, ao qual foi atribuído o valor de 1 s como o menor tempo permitido entre o rompimento do condutor e a formação do primeiro arco. Este tempo, como explicado na Seção 3.2.2, é equivalente à menor altura de queda do condutor ao solo, estipulada por norma.

Para se ter uma identificação rápida do início do arco e consequente cálculo do tempo de queda, foram adotadas características evidentes em um início de arco: presença elevada de componentes inter-harmônicos, variação de assimetria porcentual e *buildup*. Para os dois primeiros, a presença por um ciclo, visando agilidade, para o *buildup*, o crescimento durante 3 ciclos, por observação dos sinais reais.

A segunda técnica no domínio do tempo decorre do fato de que o arco elétrico é um evento que perdura por diversos ciclos, portanto, é de se esperar que as características do mesmo sejam observadas por tempos maiores que 1 ciclo. Com isso, contadores foram criados para servirem como o limiar que irá indicar a existência de determinado comportamento. São eles:

1. Contador de confirmação de *buildup* (5 ciclos).
2. Contador de variação de 2° e 4° harmônicos (3 ciclos)
3. Contador de 3° + 5 harmônicos maior que 2° + 4° harmônicos (3 ciclos).
4. Contador de 3° harmônico maior que 5° harmônico (3 ciclos).

A determinação do valor destes contadores está relacionado à certeza de que se deseja ter sobre a existência de cada característica. O número de ciclos foi determinado pelo estudo dos sinais reais. Eles podem ter seus valores alterados caso, em pesquisas futuras, algum evento não simulado nesta tese venha a sensibilizar o algoritmo.

A análise no domínio do tempo ainda faz uso de 2 contadores:

1. Contador de ciclos pós rompimento.
2. Contador de *reset*.

O primeiro contador, serve para dizer ao algoritmo que o sistema se encontra em regime permanente pós rompimento. O número de ciclos pós rompimento foi decidido com base no tempo mínimo de queda. Em 1 s de queda, para um sistema de 60 Hz, existem 60 ciclos. O espectro de carga é extraído 10 ciclos após o meio tempo de queda mínima, para que ficasse

perto do centro temporal do evento, mas um pouco mais distante do transitório causado pelo rompimento.

Por fim, o contador de *reset* determina o tempo máximo, pós rompimento, no qual a falta pode ser detectada. Neste ponto cabem algumas ressalvas importantes: a primeira é que, nas simulações, o início do arco foi determinado a coincidir com o tempo de toque do condutor no solo. Durante um evento real, o arco pode demorar mais tempo para ocorrer, o que acarretaria na não identificação da falta (a lógica de tempo mínimo de detecção não é prejudicada, já que ela só reinicia o algoritmo se um arco for detectado antes de 1 s).

No decorrer da elaboração desta tese não foi encontrado na literatura nenhum dado que indicasse estatísticas para o tempo de início de um arco após o toque no solo. Os dados reais obtidos são apenas dos sinais de FAI. Com isso, esse parâmetro pode e deve ser estudado em futuros trabalhos.

---

## CONCLUSÃO

---

Esta tese abordou a detecção de faltas de alta impedância causadas pelo rompimento de condutores da rede primária com toque do condutor pelo lado da fonte. Para a identificação deste tipo de falta foi proposto um algoritmo que faz a análise das características dos sinais de FAIs geradas pelo arco elétrico e que leva em conta sua progressão temporal: rompimento do condutor, queda e toque no solo.

Para o teste do algoritmo foi desenvolvida uma base de dados com sinais de falta e de eventos comuns aos SDs. Para compor os dados de FAI, além de dados coletados em campo, foi utilizado o modelo publicado por [Trondoli, Lopes e Vieira \(2022\)](#), cujas melhorias são fruto desta tese. Além da adequação do *buildup* e da simplificação da estrutura de controle, o modelo foi reequacionado para que seus parâmetros sejam inseridos como porcentagem do valor da corrente de falta. Com isso o usuário precisa saber apenas o valor máximo da característica parametrizada e escolher uma porcentagem de ocorrência. O modelo se encarrega de sobrepor as características e gerar o sinal aleatório, tornando-se assim o único modelo estocástico da literatura capaz de reproduzir todas as características de FAIs.

Os testes do algoritmo de detecção foram realizados em um alimentador longo (IEEE 34 barras), no qual as faltas foram aplicadas em todas as barras. Quando submetido à base de dados, excluindo os casos em que não há carga à jusante do ponto de rompimento, o algoritmo conseguiu identificar todas as FAIs, em todas as fases de todas as barras do sistema, para todas as condições de carregamento e penetração da GD. Considerando todos os casos de FAI (20.328 reais e 6.160 gerados pelo modelo), o algoritmo detectou 18.744 e 5.680, respectivamente, o que resulta em uma taxa de acerto de 92,2 % em ambos os casos, com tempo médio de detecção de 8 ciclos. Das simulações de eventos a taxa de acerto foi de 100%, uma vez que nenhum dos 584 casos foi confundido com uma FAI.

Para além da taxa de detecção e dos rigorosos testes, é produto desta tese o conceito de um algoritmo de detecção que analisa as FAIs no domínio do tempo e da frequência, levando em

conta o evento, desde o rompimento até o surgimento do arco elétrico e cuja estrutura modular permite seu aprimoramento de modo facilitado.

As melhorias incorporadas ao modelo proposto por [Trondoli \(2017\)](#) entregam à comunidade acadêmica uma ferramenta de estudo de faltas de alta impedância que, por conseguir representar as características de FAI de forma isolada ou conjunta e incorporar ao sinal a aleatoriedade, permite o estudo detalhado deste tipo de evento e, conseqüentemente, o desenvolvimento de algoritmos de detecção e localização de FAIs mais robustos.

## 6.1 Trabalhos futuros

São propostas para trabalhos futuros:

1. A investigação de diferentes técnicas para a extração dos mesmos parâmetros adotados no método de detecção desenvolvido.
2. O estudo mais aprofundado sobre a identificação do rompimento do condutor, que pode conferir mais robustez à técnica de detecção proposta, uma vez que, do modo como se apresenta, a ruptura pode ser confundida um evento que altere o valor eficaz da forma de onda de corrente.
3. A obtenção de um banco de dados de sinais de FAIs por meio de experimentos práticos, contendo, além dos sinais de falta, o tempo de queda e tempo para a formação do primeiro arco.
4. Estudo das FAIs com toque do condutor pelo lado da carga.
5. Testar o método em diferentes sistemas de distribuição.

## REFERÊNCIAS

---

AUCOIN, B. M.; RUSSELL, B. D. Distribution high impedance fault detection utilizing high frequency current components. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-101, n. 6, p. 1596–1606, June 1982. ISSN 0018-9510. Citado 3 vezes nas páginas 1, 6 e 11.

\_\_\_\_\_. Detection of incipient and low current faults in electric distribution systems [of spacecraft]. In: **Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference**. [S.l.: s.n.], 1989. p. 153–158 vol.1. Citado 5 vezes nas páginas 1, 6, 7, 11 e 27.

AUCOIN, M.; RUSSELL, B. D. Detection of distribution high impedance faults using burst noise signals near 60 hz. **IEEE Power Engineering Review**, PER-7, n. 4, p. 40–41, April 1987. ISSN 0272-1724. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 24 e 27.

BAQUI, I.; ZAMORA, I.; MAZÓN, J.; BUIGUES, G. High impedance fault detection methodology using wavelet transform and artificial neural networks. **Electric Power Systems Research**, v. 81, n. 7, p. 1325–1333, 2011. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779611000344>>. Citado na página 26.

BATISTA, O. E.; FLAUZINO, R. A.; de Araujo, M. A.; de Moraes, L. A.; da Silva, I. N. Methodology for information extraction from oscillograms and its application for high-impedance faults analysis. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 76, p. 23–34, 2016. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515004019>>. Citado na página 27.

BHANDIA, R.; CHAVEZ, J. d. J.; CVETKOVIĆ, M.; PALENSKY, P. High impedance fault detection using advanced distortion detection technique. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 35, n. 6, p. 2598–2611, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 28.

CALHOUN, H.; BISHOP, M. T.; EICHLER, C. H.; LEE, R. E. Development and testing of an electro-mechanical relay to detect fallen distribution conductors. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-101, n. 6, p. 1643–1650, June 1982. ISSN 0018-9510. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 23.

CHAKRABORTY, S.; DAS, S. Application of smart meters in high impedance fault detection on distribution systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 10, n. 3, p. 3465–3473, 2019. Citado na página 24.

CHEN, J.; AMBIKAI RAJAH, E.; ZHANG, D.; PHUNG, T.; BLACKBURN, T. Detection of high impedance faults using current transformers for sensing and identification based on features extracted using wavelet transform. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 10, n. 12, p. 2990–2998, sep 2016. Citado na página 1.

CHEN, J. C.; PHUNG, B. T.; ZHANG, D. M.; BLACKBURN, T.; AMBIKAI RAJAH, E. Study on high impedance fault arcing current characteristics. In: **2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 6, 9 e 27.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; SILVA, J. A. C. B.; SANTOS, W. C. Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 51, n. 6, p. 5312–5323, Nov 2015. ISSN 0093-9994. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 25.

DEPEW, A.; PARSICK, J.; DEMPSEY, R.; BENNER, C.; RUSSELL, B.; ADAMIAC, M. Field experience with high-impedance fault detection relays. In: **59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2006**. [S.l.]: IEEE, 2006. Citado na página 1.

Eldin, A. H.; Abdallah, E.; Mohamed, N. Detection of high impedance faults in medium voltage distribution networks using discrete wavelet transform. In: **22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–4. Citado na página 25.

EMANUEL, A.; CYGANSKI, D.; ORR, J.; SHILLER, S.; GULACHENSKI, E. 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**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 5, n. 2, p. 676–686, apr 1990. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/61.53070>>. Citado 7 vezes nas páginas 13, 7, 9, 11, 12, 19 e 21.

ETEMADI, A. H.; SANAYE-PASAND, M. High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system. **IET Generation, Transmission Distribution**, v. 2, n. 1, p. 110–118, January 2008. ISSN 1751-8687. Citado na página 10.

GADANAYAK, D. A.; MALLICK, R. K. Interharmonics based high impedance fault detection in distribution systems using maximum overlap wavelet packet transform and a modified empirical mode decomposition. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 112, p. 282–293, 2019. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061518331910>>. Citado na página 24.

GHADERI, A.; GINN, H. L.; MOHAMMADPOUR, H. A. High impedance fault detection: A review. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 143, p. 376–388, feb 2017. Citado na página 1.

GIRGIS, A.; CHANG, W.; MAKRAM, E. Analysis of high-impedance fault generated signals using a kalman filtering approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 5, n. 4, p. 1714–1724, 1990. Citado na página 11.

GOMES, D.; OZANSOY, C. High-impedance faults in power distribution systems: A narrative of the field's developments. **ISA Transactions**, v. 118, p. 15–34, 2021. ISSN 0019-0578. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057821001014>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 29.

GOMES, D. P. S.; OZANSOY, C.; ULHAQ, A. High-sensitivity vegetation high-impedance fault detection based on signal's high-frequency contents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 33, n. 3, p. 1398–1407, jun 2018. Citado na página 2.

GRIMALDI, R. B.; CHAGAS, T. S.; MONTALVÃO, J.; BRITO, N. S.; dos Santos, W. C.; FERREIRA, T. V. High impedance fault detection based on linear prediction. **Electric Power**

**Systems Research**, v. 190, p. 106846, 2021. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620306453>>. Citado na página 28.

GU, J.-C.; HUANG, Z.-J.; WANG, J.-M.; HSU, L.-C.; YANG, M.-T. High impedance fault detection in overhead distribution feeders using a dsp-based feeder terminal unit. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 57, n. 1, p. 179–186, 2021. Citado na página 25.

HOSSAIN, S.; ZHU, H.; OVERBYE, T. Distribution high impedance fault location using localized voltage magnitude measurements. In: **2014 North American Power Symposium (NAPS)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. Citado na página 1.

HUANG, C.-L.; CHU, H.-Y.; CHEN, M.-T. Algorithm comparison for high impedance fault detection based on staged fault test. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 3, n. 4, p. 1427–1435, Oct 1988. ISSN 0885-8977. Citado na página 23.

IEEE. Ieee recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. **IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)**, p. 1–29, June 2014. Citado na página 34.

IEEE, D. S. A. S. **IEEE 34 Node Test Feeder**. IEEE, 2010. Disponível em: <<https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.

IURINIC, L. U.; HERRERA-OROZCO, A. R.; FERRAZ, R. G.; BRETAS, A. S. Distribution systems high-impedance fault location: A parameter estimation approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 4, p. 1806–1814, Aug 2016. ISSN 0885-8977. Citado na página 8.

JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. Ground resistance-revisited. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p. 949–956, Apr 1989. ISSN 0885-8977. Citado 4 vezes nas páginas 1, 6, 7 e 8.

KAVASKAR, S.; MOHANTY, N. K. Detection of high impedance fault in distribution networks. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 10, n. 1, p. 5–13, 2019. ISSN 2090-4479. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209044791830087X>>. Citado na página 28.

KIM, C.; RUSSELL, B. D. Harmonic behavior during arcing faults on power distribution feeders. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 14, n. 3, p. 219–225, jun 1988. Citado 3 vezes nas páginas 11, 24 e 40.

LAI, T.; SNIDER, L.; LO, E. Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults. **Electric Power Systems Research**, v. 76, n. 8, p. 626–633, 2006. ISSN 0378-7796. Selected Topics in Power System Transients. Citado 3 vezes nas páginas 1, 6 e 25.

LAI, T.; SNIDER, L.; LO, E.; CHEUNG, C.; CHAN, K. High impedance faults detection using artificial neural network. In: **2003 Sixth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management ASDCOM 2003 (Conf. Publ. No. 497)**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 821–826. Citado na página 26.

LAI, T. M.; SNIDER, L. A.; LO, E.; SUTANTO, D. 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, Jan 2005. ISSN 0885-8977. Citado 6 vezes nas páginas 1, 6, 12, 19, 21 e 25.



- LI, C.; XU, W.; TAYJASANANT, T. Interharmonics: basic concepts and techniques for their detection and measurement. **Electric Power Systems Research**, v. 66, n. 1, p. 39–48, 2003. ISSN 0378-7796. Power Quality. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779603000701>>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- LIEN, K.-Y.; CHEN, S.-L.; LIAO, C.-J.; GUO, T.-Y.; LIN, T.-M.; SHEN, J.-S. Energy variance criterion and threshold tuning scheme for high impedance fault detection. In: **IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233)**. [S.l.]: IEEE, 1999. v. 2, p. 957 vol.2–. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 6.
- LIMA, M.; JUNQUEIRA, C. M. dos S.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. de; COELHO, R. de A.; MEDEIROS, H. Gayoso Meira Suassuna de. High impedance fault detection method based on the short-time fourier transform. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 12, n. 11, p. 2577–2584, 2018. Disponível em: <<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-gtd.2018.0093>>. Citado na página 24.
- LIMA Érica M.; COELHO, R. de A.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. de. High impedance fault detection method for distribution networks under non-linear conditions. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 131, p. 107041, 2021. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521002805>>. Citado na página 26.
- LOPES, G.; MENEZES, T.; SANTOS, G.; TRONDOLI, L.; VIEIRA, J. High impedance fault detection based on harmonic energy variation via s-transform. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 136, p. 107681, 2022. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521009091>>. Citado 5 vezes nas páginas 4, 26, 29, 61 e 63.
- LOPES, G. N. **Diagnóstico de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica empregando técnicas de processamento de sinais**. 2020. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi:10.11606/D.18.2020.tde-21082020-134131. Acesso em: 2022-09-28. Citado na página 61.
- LOPES, G. N.; LACERDA, V. A.; VIEIRA, J. C. M.; COURY, D. V. Analysis of signal processing techniques for high impedance fault detection in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 36, n. 6, p. 3438–3447, 2021. Citado na página 57.
- LOPES, G. N.; TRONDOLI, L. H.; VIEIRA, J. C. Configuration and analysis of a high impedance fault simulation model. In: . [S.l.: s.n.], EasyChair, 2022. Citado na página 4.
- LOPES, G. N.; TRONDOLI, L. H. P. C.; VIEIRA, J. C. M. Analysis of high impedance faults current using fourier, wavelet and stockwell transforms. In: **Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020**. sbabra, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2290>>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 79.
- LOPES, G. N.; TRONDOLI, L. H. P. C.; VIEIRA, J. C. M.; MACEDO, J. R. In: . [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 4.
- MACEDO, J. R.; RESENDE, J. W.; BISSOCHI, C. A.; CARVALHO, D.; CASTRO, F. C. Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems. **IET Generation, Transmission Distribution**, v. 9, n. 16, p. 2593–2601, 2015. ISSN 1751-8687. Citado 11 vezes nas páginas 15, 6, 11, 24, 27, 35, 40, 41, 56, 57 e 59.



- MICHALIK, M.; REBIZANT, W.; LUKOWICZ, M.; LEE, S.-J.; KANG, S.-H. Wavelet transform approach to high impedance fault detection in mv networks. In: **2005 IEEE Russia Power Tech**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–7. Citado 4 vezes nas páginas 12, 19, 21 e 25.
- MISHRA, M.; PANIGRAHI, R. R. Taxonomy of high impedance fault detection algorithm. **Measurement**, v. 148, p. 106955, 2019. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119308218>>. Citado na página 28.
- MISHRA, M.; ROUTHAY, P.; ROUTH, k. A universal high impedance fault detection technique for distribution system using s-transform and pattern recognition. **Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy**, v. 9, 2016. Citado na página 26.
- MOTTER, D.; VIEIRA, J. C. de M. The setting map methodology for adjusting the dg anti-islanding protection considering multiple events. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 33, n. 6, p. 2755–2764, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 60.
- NAM, S. R.; PARK, J. K.; KANG, Y. C.; KIM, T. H. A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in emtp. In: **2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 2, p. 1175–1180 vol.2. Citado 8 vezes nas páginas 1, 2, 6, 7, 11, 12, 19 e 21.
- NOZELA, M. A. S.; LOPES, G. N.; TRONDOLI, L. H. P. C.; VIEIRA, J. C. M. Analysis of source and load-side high impedance faults using stockwell transform. In: **2021 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6. Citado na página 4.
- NOZELA, M. A. S.; LOPES, G. N.; TRONDOLI, L. H. P. C.; JÚNIOR, J. C. de M. V. Modelo simplificado para simulação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. In: **Anais da XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica**. Galoa, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.17648/cbqee-2021-130548>>. Citado na página 4.
- PAULA, V. C. de; MACEDO, J. R. High-impedance fault detection in power distribution systems through the analysis of the magnetic fields in the surroundings of the conductors. In: **2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 1–6. Citado na página 27.
- RUSSELL, B.; CHINCHALI, R. A digital signal processing algorithm for detecting arcing faults on power distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 4, n. 1, p. 132–140, Jan 1989. ISSN 0885-8977. Citado na página 11.
- RUSSELL, B. D.; CHINCHALI, R. P.; KIM, C. J. Behaviour of low frequency spectra during arcing fault and switching events. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 4, p. 1485–1492, Oct 1988. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 11.
- SEDIGHI, A.; HAGHIFAM, M.; MALIK, O.; GHASSEMIAN, M. High impedance fault detection based on wavelet transform and statistical pattern recognition. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 4, p. 2414–2421, 2005. Citado na página 25.
- SEDIGHIZADEH, M.; REZAZADEH, A.; ELKALASHY, N. I. Approaches in high impedance fault detection - a chronological review. **Advances in Electrical and Computer Engineering**, Stefan cel Mare University of Suceava, v. 10, n. 3, p. 114–128, 2010. Citado na página 6.

SEKAR, K.; MOHANTY, N. K. Data mining-based high impedance fault detection using mathematical morphology. **Computers Electrical Engineering**, v. 69, p. 129–141, 2018. ISSN 0045-7906. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790617309291>>. Citado na página 27.

\_\_\_\_\_. A fuzzy rule base approach for high impedance fault detection in distribution system using morphology gradient filter. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 32, n. 3, p. 177–185, 2020. ISSN 1018-3639. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363918303660>>. Citado na página 26.

SHAH, J.; DESAI, S.; SHAIK, A. G. Detection and classification of high impedance faults in transmission line using alienation-based analysis on voltage signals. In: **2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)**. [S.l.]: IEEE, 2018. Citado na página 1.

SHARAF, A. M.; SNIDER, L. A.; DEBNATH, K. A neural network based relaying scheme for distribution system high impedance fault detection. In: **Proceedings 1993 The First New Zealand International Two-Stream Conference on Artificial Neural Networks and Expert Systems**. [S.l.: s.n.], 1993. p. 321–324. Citado 3 vezes nas páginas 11, 19 e 21.

SILVA, J. C. da; LOPES, G. N.; TRONDOLI, L. H. P. C.; VIEIRA, J. C. M. Analysis of the negative sequence voltage to detect conductor break in distribution systems. In: **2021 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 01–05. Citado na página 4.

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, Jan 1994. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas páginas 9, 26 e 27.

TORRES, V.; RUIZ, H. F. High impedance fault detection using discrete wavelet transform. In: **2011 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 325–329. Citado na página 25.

TRONDOLI, L.; LOPES, G.; VIEIRA, J. Configurable stochastic model for high impedance faults simulations in electrical distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 205, p. 107686, 2022. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779621006672>>. Citado 7 vezes nas páginas 13, 4, 5, 20, 41, 57 e 83.

TRONDOLI, L. H. P. d. C. **Modelo estocástico parametrizável para o estudo de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2017. Citado 12 vezes nas páginas 2, 3, 5, 12, 13, 14, 15, 17, 20, 30, 32 e 84.

WAI, D. C. T.; YIBIN, X. A novel technique for high impedance fault identification. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 3, p. 738–744, Jul 1998. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas páginas 12, 19 e 21.

WANG, B.; GENG, J.; DONG, X. High-impedance fault detection based on nonlinear voltage–current characteristic profile identification. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 4, p. 3783–3791, 2018. Citado na página 28.

WANG, X.; LIU, W.; LIANG, Z.; GUO, L.; DU, H.; GAO, J.; LI, C. Faulty feeder detection based on the integrated inner product under high impedance fault for small resistance to ground systems. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 140, p. 108078,

2022. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206152200120X>>. Citado na página 28.

WESTER, C. High impedance fault detection on distribution systems. In: **1998 Rural Electric Power Conference Presented at 42nd Annual Conference**. [S.l.]: IEEE, 1998. p. c5–1. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 11.

WONTROBA, A.; MORAIS, A. P.; CARDOSO, G. J.; VIEIRA, J. P. A.; FARIAS, P. E.; GALLAS, M.; ROSSINI, J. P. High-impedance fault detection on downed conductor in overhead distribution networks. **Electric Power Systems Research**, v. 211, p. 108216, 2022. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622004254>>. Citado na página 26.

YEH, H.-G.; SIM, S.; BRAVO, R. J. Wavelet and denoising techniques for real-time hif detection in 12-kv distribution circuits. **IEEE Systems Journal**, v. 13, n. 4, p. 4365–4373, 2019. Citado na página 25.