

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Escola de Engenharia de São Carlos

# Detecção de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Baseada na Entropia de Shannon

Maurício Pavani da Silva

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Maurício Pavani da Silva**

**Deteccção de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de  
Distribuição de Energia Elétrica Baseada na Entropia de  
Shannon**

**São Carlos**

**2024**



**Maurício Pavani da Silva**

**Deteccção de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Baseada na Entropia de Shannon**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

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

**São Carlos**

**2024**

Trata-se da versão corrigida da dissertação. 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).

337d Pavani da Silva, Maurício  
Detecção de faltas de alta impedância em  
sistemas de distribuição de energia elétrica baseada na  
entropia de Shannon / Maurício Pavani da Silva;  
orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior. São  
Carlos, 2024.

Dissertação (Mestrado) - 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, 2024.

1. Falta de alta impedância. 2. Sistemas de  
distribuição. 3. Proteção de sistemas elétricos. 4.  
Entropia de Shannon. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **MAURÍCIO PAVANI DA SILVA**.

Título da dissertação: "Detecção de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica baseada na Entropia de Shannon".

Data da defesa: 23/01/2024.

### Comissão Julgadora

### Resultado

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

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

APROVADO

**Prof. Dr. Ghendy Cardoso Junior**

(Universidade Federal de Santa Maria/UFSM)

APROVADO

**Prof. Dr. Flavio Bezerra Costa**

(Michigan Technological University)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:

Prof Associado **Marcelo Andrade da Costa Vieira**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

*Este trabalho é dedicado aos meus pais como forma de expressar minha eterna gratidão por fazerem com que os meus sonhos se tornassem possíveis.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Sidiney e Ana, e à minha irmã, Tamiris, por todo apoio e amor incondicional. Por sempre fazerem o possível e o impossível para me ajudar a conquistar os meus sonhos.

Agradeço à toda minha família, materna e paterna, e em especial aos meus primos Hugo Pavani e Otávio Pelizaro por nossos grandes momentos e suporte que sempre me forneceram.

Agradeço à minha namorada, Maria Gabriela, por todo o carinho, paciência e acolhimento nos momentos difíceis.

Agradeço ao meu grande amigo, Lucas Costa, por seus valiosos conselhos e apoio.

Agradeço ao professor José Carlos de Melo Vieira Júnior pela orientação primorosa, pela grande disponibilidade, pelo apoio e dedicação que permitiram a execução desta dissertação.

Agradeço aos amigos Daniel Lima, Gabriela Nunes, Luiz Trondoli, Matheus do Val, Moisés Davi, Rodrigo Iscuissati, Saulo de Andrade, Thiago Menezes e à todos os demais companheiros do LSEE pelos grandes momentos de descontração e ricos debates que foram fundamentais para conclusão desta dissertação.

Agradeço à todos os meus professores do IFMA - campus São Raimundo das Mangabeiras - por serem fontes de inspiração no início da minha vida acadêmica. Agradeço também aos professores da Universidade Federal do Triângulo Mineiro e aos professores da Escola de Engenharia de São Carlos pelos ensinamentos.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da EESC e ao LSEE por dispor da infraestrutura necessária para execução desta dissertação.

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, 130502/2022-7) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.





## RESUMO

SILVA, M. P. **Detecção de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Baseada na Entropia de Shannon.** 2024. 86p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Faltas de alta impedância são eventos que ocorrem em sistemas elétricos, geralmente em sistemas de distribuição, causadas pelo contato de uma das fases com uma superfície de baixa condutividade. Elas estão frequentemente associadas ao rompimento e queda de condutores energizados, representando um risco para a vida humana, animais e propriedades, devido a incêndios e choques elétricos. Embora amplamente explorada pela literatura, a detecção segura de faltas de alta impedância ainda representa um desafio a ser explorado. Assim, esta dissertação tem como objetivo desenvolver um método de detecção baseado em medições das correntes de fase a partir da subestação e na aplicação da Entropia de Shannon como métrica para a detecção. A pesquisa foi dividida em duas etapas: desenvolvimento de um banco de dados com oscilografias capazes de representar diferentes eventos e condições de operação do sistema de distribuição; e o desenvolvimento do algoritmo de detecção. Também faz parte dos objetivos da dissertação, como orientação para o desenvolvimento do algoritmos, a sua simplicidade e possibilidade de aplicações práticas em trabalhos futuros. Os resultados obtidos com a utilização da Entropia de Shannon mostraram-se promissores como métrica para detecção de eventos de falta de alta impedância, visto que foram obtidas taxas de acerto superiores a 90% em diferentes cenários de teste.

**Palavras-chave:** Falta de alta impedância. Sistemas de distribuição. Proteção de sistemas elétricos. Entropia de Shannon.



## ABSTRACT

SILVA, M. P. **High-impedance Fault Detection in Power Distribution Systems Based on Shannon Entropy**. 2024. 86p. Dissertation (Master) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

High impedance faults are events that occur in electrical systems, generally in distribution systems, caused by the contact of one of the phases with a low conductivity surface. They are often associated with the breakage and fall of energized conductors, posing a risk to human life, animals and property due to fires and electrical shocks. Although widely explored in the literature, the safe detection of high impedance faults still represents a challenge to be explored. Therefore, this dissertation aims to develop a detection method based on measurements of phase currents from the substation and the application of Shannon Entropy as a metric for detection. The research was divided into two stages: development of a database with oscillographs capable of representing different events and operating conditions of the distribution system; and the development of the detection algorithm itself. It is also part of the objectives of the dissertation, as guidance for the development of the algorithms, its simplicity and possibility of practical applications in future work. The results obtained using Shannon Entropy showed promise as a metric for detecting high impedance faults events as hit rates greater than 90% were obtained in different test scenarios.

**Keywords:** High impedance fault. Distribution systems. Electrical protection systems. Shannon Entropy.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características presentes na corrente medida durante a FAI . . . . .	27
Figura 2 – Modelo de Emanuel para FAI . . . . .	29
Figura 3 – Modelo de Gautam para FAI . . . . .	29
Figura 4 – Modelo de Santos para FAI . . . . .	30
Figura 5 – Modelo de Wei para FAI . . . . .	31
Figura 6 – Taxonomia dos métodos de detecção de FAI . . . . .	34
Figura 7 – Fluxograma geral dos métodos baseados em PDS e/ou IA . . . . .	37
Figura 8 – Rede de referência para os testes . . . . .	46
Figura 9 – Exemplos de oscilografias de FAIs reais . . . . .	48
Figura 10 – Topologia para inserir sinais reais na simulação . . . . .	48
Figura 11 – Topologia do modelo de FAI de referência . . . . .	49
Figura 12 – Forma de onda de um sinal de FAI gerada pelo modelo de Trondoli, Lopes e Vieira (2022) . . . . .	50
Figura 13 – Topologia do circuito do retificador . . . . .	51
Figura 14 – Topologia do circuito do forno a arco . . . . .	51
Figura 15 – Diagrama unifilar do gerador distribuído . . . . .	52
Figura 16 – Janela para suavização dos dados . . . . .	56
Figura 17 – Janela para derivação dos dados . . . . .	57
Figura 18 – Fluxograma do método de detecção . . . . .	60
Figura 19 – Ilustração da aplicação dos algoritmos sobre a (a) Forma de onda da corrente residual calculada, com (b) Entropia e limiar a cada amostra do sinal . . . . .	62
Figura 20 – Exemplo de atuação do método para um sinal de FAI . . . . .	64
Figura 21 – Exemplo de atuação do método para um sinal de falta de baixa impedância	65
Figura 22 – Taxas de detecção por fase para diferentes eventos de FAI com o sistema equilibrado . . . . .	66
Figura 23 – Taxas de detecção por fase para diferentes eventos de FAI com o sistema desequilibrado . . . . .	68
Figura 24 – Exemplo de atuação do método com parâmetros antigos para um sinal de falta de baixa impedância com ruído . . . . .	69
Figura 25 – Exemplo de atuação do método com parâmetros novos para um sinal de falta de baixa impedância com ruído . . . . .	70
Figura 26 – Diagrama de blocos do controle do gerador distribuído . . . . .	81



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do filtro LCL. . . . .	53
Tabela 2 – Conjunto de eventos simulados. . . . .	54
Tabela 3 – Parâmetros ajustados no método de detecção. . . . .	64
Tabela 4 – Taxas de acerto com o sistema equilibrado. . . . .	66
Tabela 5 – Taxas de acerto com o sistema desequilibrado. . . . .	67
Tabela 6 – Novos parâmetros ajustados no método de detecção. . . . .	69
Tabela 7 – Taxas de acerto com os novos parâmetros. . . . .	70
Tabela 8 – Dados dos transformadores . . . . .	79
Tabela 9 – Dados das linhas de distribuição . . . . .	79
Tabela 10 – Dados das cargas . . . . .	80





## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo das características geradas por cada modelo . . . . .	32
Quadro 2 – Resumo dos modelos adotados em cada trabalho . . . . .	33
Quadro 3 – Resumo das abordagens dos métodos de detecção em cada trabalho .	39
Quadro 4 – Resumo dos domínios adotados em cada trabalho . . . . .	40
Quadro 5 – Resumo dos limiares adotados em cada trabalho . . . . .	41
Quadro 6 – Resumo das grandezas em cada trabalho . . . . .	41



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CC	Corrente Contínua
FAI	Falta de Alta Impedância
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> ou Transformada Rápida de Fourier
IA	Inteligência Artificial
MC	Matriz de Confusão
PDS	Processamento Digital de Sinais
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i> ou Unidade de Medição Fasorial
SD	Sistema de Distribuição
SNR	<i>Signal Noise Ratio</i> ou Relação Sinal Ruído
TF	Transformada de Fourier
TS	Transformada de Stockwell
TW	Transformada Wavelet



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos do trabalho</b>	<b>23</b>
<b>1.2</b>	<b>Principais contribuições da dissertação</b>	<b>23</b>
<b>1.3</b>	<b>Publicações</b>	<b>24</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização do trabalho</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Características gerais observadas em FAIs</b>	<b>25</b>
2.1.1	Características observadas na forma de onda da corrente medida durante a FAI	26
2.1.2	Espectro harmônico da corrente medida durante a FAI	27
<b>2.2</b>	<b>Modelos de FAIs</b>	<b>28</b>
2.2.1	Modelos adotados em testes dos métodos de detecção	29
2.2.2	Considerações finais sobre a seção	31
<b>2.3</b>	<b>Métodos de detecção de FAI</b>	<b>33</b>
2.3.1	Métodos baseados em princípios elétricos	35
2.3.1.1	Abordagens clássicas	35
2.3.1.2	Abordagens baseadas em PDS e/ou IA	36
2.3.2	Considerações finais sobre a seção	39
<b>2.4</b>	<b>Validação e testes dos métodos de detecção</b>	<b>41</b>
<b>2.5</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia geral do trabalho</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Metodologia da simulação dos eventos</b>	<b>47</b>
3.2.1	Eventos de FAI	47
3.2.1.1	Simulações com oscilografias reais	47
3.2.1.2	Simulações com a aplicação de modelo	48
3.2.2	Chaveamento de cargas, banco de capacitores e transformadores	50
3.2.3	Simulação de cargas não lineares	50
3.2.3.1	Simulação de retificadores	51
3.2.3.2	Simulação de forno a arco	51
3.2.4	Simulação de geração distribuída	52
3.2.5	Faltas monofásicas de baixa impedância	52
3.2.6	Ruído	53
<b>3.3</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>53</b>

<b>4</b>	<b>PROPOSTA DE MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Filtro de Savitzky-Golay</b>	<b>56</b>
4.1.1	Filtro de suavização	56
4.1.2	Filtro de primeira derivada	57
<b>4.2</b>	<b>Entropia de Shannon</b>	<b>57</b>
<b>4.3</b>	<b>Filtro de Fourier</b>	<b>58</b>
<b>4.4</b>	<b>Algoritmo de detecção de FAI</b>	<b>58</b>
4.4.1	Cálculo da Entropia de Shannon	59
4.4.2	Verificação do transitório	60
4.4.3	Limiar auto-adaptativo	61
<b>4.5</b>	<b>Testes e resultados</b>	<b>63</b>
4.5.1	Análise do método de detecção	63
<b>4.6</b>	<b>Avaliação estatística</b>	<b>64</b>
4.6.1	Avaliações com o sistema equilibrado	65
4.6.2	Avaliações com o sistema desequilibrado	67
<b>4.7</b>	<b>Análise de sensibilidade aos ajustes</b>	<b>68</b>
<b>4.8</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>70</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>73</b>
<b>5.1</b>	<b>Proposta para trabalhos futuros</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE A – DADOS REFERENTES DO SISTEMA TESTE</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE B – CÓDIGO UTILIZADO NO CONTROLE DO GERADOR DISTRIBUÍDO</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE C – FUNÇÕES UTILIZADAS NOS PSEUDOCÓDIGOS</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Faltas de alta impedância (FAIs) são eventos que ocorrem em sistemas elétricos, comumente em Sistemas de Distribuição (SD), devido ao contato de uma de suas fases com uma superfície de baixa condutividade (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017; GOMES; OZANSOY, 2021). São caracterizadas por não produzirem correntes de falta com magnitudes suficientes para sensibilizar dispositivos e filosofias de proteção convencionais, como relés de sobrecorrente ou fusíveis e normalmente estão relacionadas ao surgimento de arcos elétricos no ponto de contato entre o condutor e a superfície (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017; GOMES; OZANSOY, 2021). Embora possam ocorrer em diferentes cenários, é comum que as FAIs aconteçam devido ao rompimento de um dos condutores da rede e subsequente contato com superfícies de alta impedância, como concreto, asfalto, cascalho, grama ou galhos de árvore.

As FAIs são diferentes das faltas de baixa impedância, pois possuem baixas correntes de falta, o que torna sua detecção difícil e, em geral, exigem a intervenção humana para serem extintas. Além disso, as FAIs podem atingir de 10 a 20% do total de faltas que ocorrem em SDs, assim como apresentado em Afshar *et al.* (2022b). Embora esses dados não sejam específicos para as redes brasileiras, também é possível considerar as FAIs como eventos comuns no cenário nacional. No entanto, ao contrário de eventos de curto-circuito, as FAIs normalmente não causam prejuízos aos equipamentos da rede, de forma que o maior potencial de danos associados à elas é decorrente da exposição de pessoas, animais e propriedades públicas e privadas a incêndios e choques elétricos, uma vez que estão relacionadas ao rompimento e queda de condutores (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017).

Em outubro de 2021, a concessionária Cemig registrou acidentes de choques elétricos em Uberlândia devido ao rompimento de condutores durante uma tempestade, evidenciando um dos principais riscos associados às FAIs. A empresa atribuiu o rompimento do condutor ao lançamento de objetos em direção à rede, impulsionados pelos ventos da tempestade. A Cemig alertou que esse tipo de ocorrência é comum durante tempestades intensas e apresentou um procedimento que a população deve seguir ao notar o rompimento e queda de condutores de sua rede (MINAS, 2021).

Ainda em janeiro de 2023, a concessionária Equatorial Piauí também registrou acidentes na cidade de Luzilândia provocados por choques elétricos devido ao rompimento e queda de condutores. Na ocasião, um produtor rural perdeu quatro animais devido ao contato com um condutor energizado. A empresa reportou que o rompimento foi provocado pela poda irregular de árvores próximas à linha de distribuição. A população local afirma que o condutor permaneceu rompido durante uma semana antes da concessionária ser



notificada e tomar as ações necessárias para manutenção da linha (HOJE, 2023).

Também em dezembro de 2022, a Neoenergia registrou acidentes de choque elétrico na cidade de Ceilândia envolvendo três vítimas fatais. O acidente ocorreu pelo rompimento de um condutor durante uma tempestade. A empresa informou que o cabo possuía uma emenda, mas que provavelmente o seu rompimento tenha sido decorrência de uma descarga atmosférica. A Neoenergia também informou que normalmente o sistema de proteção detecta eventos na rede, mas na ocasião o rompimento do condutor não gerou um distúrbio capaz de sensibilizar a proteção (METROPOLES, 2023).

Estes três relatos de incidentes envolvendo o rompimento e queda de condutores ilustram um problema que motiva pesquisas ao redor do mundo desde os anos 70. Desde 1978, quando foi apresentado o primeiro método de detecção de FAI, diversas estratégias para identificação do evento foram propostas: baseadas no espectro harmônico do sinal, em dispositivos para varredura da rede, componentes simétricas, algoritmos inteligentes, comportamento estatístico do sinal, dentre outros diversos métodos (GOMES; OZANSOY, 2021). Contudo, ainda não existe um método de detecção de FAI capaz de reconhecer os eventos de forma robusta e confiável, como pode ser observado nos testes realizados em Afshar *et al.* (2022b), em que no melhor dos casos simulados o relé avaliado foi capaz de detectar 80% dos eventos de FAI. Sendo assim, mesmo já tendo sido bastante explorada, a detecção de FAI ainda possui espaços para novas abordagens, especialmente considerando os desafios relacionados à validação dos métodos propostos frente à grande complexidade que os eventos de FAI podem assumir e à carência de testes mais rigorosos e alinhados com cenários reais.

Neste sentido, o desenvolvimento e validação dos métodos de detecção de FAI, por sua vez, dependem da execução de testes capazes de verificar a segurança das estratégias quanto à sua capacidade de identificar a falta e distingui-la de outros eventos que podem ocorrer na rede. Sendo assim, os testes realizados estão intimamente relacionados aos fundamentos da estratégia de detecção desenvolvida e às suas características operacionais, como por exemplo, se o método utiliza componentes harmônicas ou simétricas, se depende da comunicação entre diferentes dispositivos da rede, se monitora tensão ou corrente, se depende de armazenar dados da rede em diferentes condições de operação, entre outros. Entretanto, embora os tipos de testes realizados dependam do método de detecção desenvolvido, o ciclo de vida da etapa de avaliação no desenvolvimento dos métodos, assim como comumente ocorre com outros estudos relacionados ao sistema elétrico, deve contemplar a diversidade de condições de operação do sistema, como variações no nível de carregamento, mudanças de topologia, chaveamento de cargas, chaveamento de bancos de capacitores, energização de transformadores, operação de cargas não lineares e geradores distribuídos. Esses testes são responsáveis por apontar a real estabilidade dos métodos.

Muitos métodos de detecção de FAI foram propostos ao longo dos anos, mas

esse ainda é um problema em aberto atualmente. Ademais, a aplicação desses métodos desenvolvidos em ambientes reais depende da validação da segurança deles por meio de testes robustos e que permitam comprovar a sua real efetividade em cenários práticos, considerando tanto aspectos relacionados ao funcionamento do algoritmo quanto relacionados aos eventos comuns nos sistemas em que esses algoritmos operarão. Também é importante destacar a necessidade de considerar as possíveis limitações técnicas e econômicas quanto à aplicação prática do método. Cabe ainda mencionar que, embora existam diversos métodos de detecção propostos na literatura, poucos trabalhos publicados avaliam as estratégias desenvolvidas de maneira completa, considerando todos os aspectos citados, o que pode justificar a discrepância observada entre as taxas de acerto reportadas na literatura e as observadas na prática.

### **1.1 Objetivos do trabalho**

Neste sentido, a presente dissertação tem como objetivo geral desenvolver um método de detecção baseado na entropia das componentes harmônicas presentes nas correntes de fase monitoradas na subestação do sistema. Assim, são os objetivos específicos:

- Apresentar uma revisão bibliográfica a respeito das FAIs e dos métodos de detecção desenvolvidos;
- Avaliar a Entropia de Shannon aplicada ao espectro harmônico como métrica para detecção da FAI de forma a contornar a sua variação aleatória;
- Desenvolver o método de detecção baseado na Entropia de Shannon do espectro harmônico;
- Avaliar o método de detecção de forma exaustiva com um banco de dados composto por diferentes eventos comuns em sistemas de distribuição de energia elétrica.

### **1.2 Principais contribuições da dissertação**

É possível destacar dentre as principais contribuições desta dissertação para o avanço do atual estado da arte:

- A aplicação da Entropia de Shannon ao espectro de frequência do sinal obtido por meio da transformada de Fourier como métrica para caracterizar a FAI e o desenvolvimento de um método de detecção baseado nessa nova métrica;
- O desenvolvimento de um banco de dados de teste extenso e com a aplicação de eventos simultâneos a ocorrência da FAI, como: operação de retificador, operação de forno a arco e operação de gerador baseado em inversor.

### 1.3 Publicações

Os seguintes trabalhos são frutos dessa dissertação:

(SILVA *et al.*, 2023). SILVA, M. P. da et al. Implementação de um modelo de falta de alta impedância para simulações em tempo real e testes em malha fechada. XIX Encontro Regional Ibero-Americano do Cigre - ERIAC, Cigre, 5 2023.

(SILVA; LOPES; VIEIRA, 2023) SILVA, M. P. da; LOPES, G. N.; VIEIRA, J. C. M. Evaluation of current transformers impact on harmonics caused by high impedance faults. In: 2023 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT-LA). [S.l.: s.n.], 2023. p. 420–424.

Destaca-se que o artigo (SILVA; LOPES; VIEIRA, 2023) foi premiado como o melhor artigo da categoria *Track 3: Innovative Technologies and Processes* do evento.

### 1.4 Organização do trabalho

A dissertação está organizada em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresentou o contexto relacionado à detecção de FAI e a importância de serem desenvolvidos métodos de detecção confiáveis. Os demais capítulos serão elencados a seguir:

- Capítulo 2: abordará o estado da arte sobre FAI e métodos de detecção;
- Capítulo 3: apresentará a metodologia de pesquisa adotada;
- Capítulo 4: apresentará a nova proposta de algoritmo de detecção de FAI;
- Capítulo 5: apresentará as considerações finais e conclusões da dissertação.

## 2 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica a respeito das FAIs e suas características, modelos utilizados para representar o evento em simulações, fundamentos utilizados em métodos de detecção e considerações a respeito dos testes realizados para validação dos métodos. O objetivo é explorar o estado da arte sobre as FAIs e compreender o atual cenário do tema.

### 2.1 Características gerais observadas em FAIs

As FAIs são eventos que ocorrem em sistema elétricos e cujas correntes de falta não possuem magnitudes grandes o suficiente para sensibilizar filosofias de proteção convencionais (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017). São distúrbios que podem ocorrer em diferentes cenários, porém normalmente estão associados ao contato entre condutores de linhas de distribuição e superfícies de baixa condutividade (GOMES; OZANSOY, 2021). Assim, nesse contexto, o contato com a superfície de alta impedância pode ocorrer tanto por meio da ruptura do condutor e toque no solo, quanto por meio do contato direto com a vegetação sem que ocorra a ruptura (MISHRA; PANIGRAHI, 2019). Em eventos com ruptura do condutor, o contato com o solo pode ocorrer no lado da fonte, da carga ou ambos.

Eventos em que a FAI é estabelecida sem a ruptura do condutor não promovem a interrupção da corrente de carga, de maneira que a corrente medida na subestação é a soma da corrente de falta com a corrente de pré-falta. Por outro lado, para sistemas radiais, nos eventos em que a ruptura ocorre e o toque com o solo é estabelecido do lado da fonte, as correntes das cargas a jusante do ponto de falta são interrompidas e a medição de corrente da subestação é composta pela corrente de falta e pela corrente de pré-falta formada apenas pelas cargas a montante. Se não houver carga a montante da falta, os dispositivos de proteção localizados na subestação irão registrar um período após a ruptura do cabo em que a corrente medida é zero. Esse período é equivalente à queda do cabo e início da falta.

Além da baixa corrente de curto-circuito e associado ao comportamento físico da falta, é comum que um arco elétrico surja durante o evento, conforme mencionado em Mishra e Panigrahi (2019). A presença desse arco introduz diferentes características na corrente medida durante a FAI, e essas características podem ser usadas para detectar o evento (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017), como discutido posteriormente.

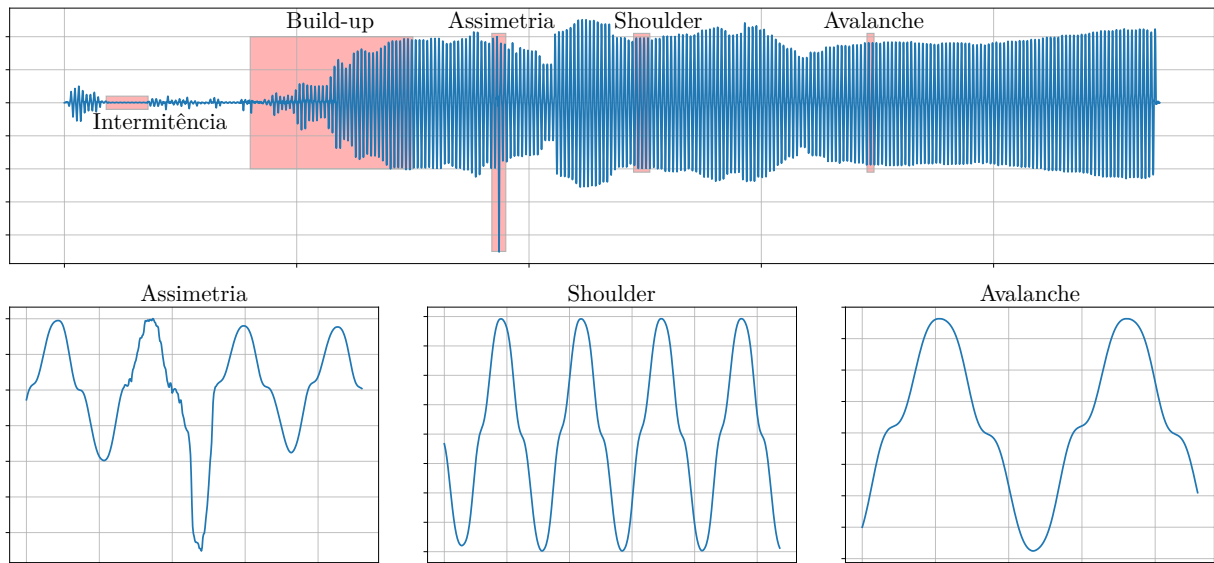
### 2.1.1 Características observadas na forma de onda da corrente medida durante a FAI

As características da corrente medida durante a FAI dependem de múltiplos fatores relacionados ao material que compõe a superfície em contato com a fase afetada, à forma como o contato é estabelecido, à humidade presente no material, às características do alimentador e às condições climáticas (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017). Contudo, de maneira geral, alguns aspectos provocados pela formação do arco elétrico já foram identificados pela literatura e são esperados em correntes de FAI. Dentre eles, é possível citar:

- Não linearidade - a relação entre a tensão e a corrente de falta é não-linear;
- Assimetria entre semiciclos - devido à diferença entre a ruptura da rigidez dielétrica do meio entre semiciclos positivos e negativos da tensão;
- *Build-up* - crescimento da amplitude da corrente de falta até atingir o regime permanente;
- *Shoulder* - período em que a amplitude da corrente de falta não varia durante alguns ciclos;
- Modulação - ocorre pela variação da amplitude da corrente ao longo do tempo;
- Avalanche - período durante o qual a tensão no ponto de falta não é capaz de ionizar o meio, portanto, não havendo condução de corrente;
- Intermitência - instantes intercalados em que a corrente de falta se extingue com posterior re-ignição do arco;
- Aleatoriedade - tanto a magnitude dos picos da corrente de falta quanto a intermitência ocorrem de forma aleatória.

A Figura 1 ilustra estas características em uma oscilografia de corrente de FAI real. Esses aspectos, com destaque para a não linearidade e avalanche, fazem com que surjam componentes harmônicas de diferentes ordens no seu espectro de frequência (MISHRA; PANIGRAHI, 2019), elementos observados já nos primeiros trabalhos publicados sobre FAI, como explica Gomes e Ozansoy (2021). Esse conteúdo harmônico característico é adotado por diferentes autores para a detecção das FAIs (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017; GOMES; OZANSOY, 2021; MISHRA; PANIGRAHI, 2019). Cabe também destacar a variação do conteúdo harmônico da corrente durante a FAI devido à não-estacionariedade do sinal (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017).

Figura 1 – Características presentes na corrente medida durante a FAI



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.1.2 Espectro harmônico da corrente medida durante a FAI

Embora o conteúdo harmônico presente na corrente medida durante a FAI possua aleatoriedade e varie ao longo do tempo, a literatura já estabeleceu um perfil esperado para o espectro de frequência da corrente medida durante o evento, assim como ocorre com algumas características gerais da FAI. Esse espectro harmônico está intimamente relacionado às características do arco elétrico formado durante a falta (AUCOIN; RUSSELL, 1982). Dentre as características inerentes ao arco intimamente relacionadas ao espectro harmônico da corrente de FAI, é possível citar: assimetria, avalanche e modulação.

A assimetria da corrente medida durante a FAI está relacionada ao aparecimento de componentes harmônicas pares no espectro, com maior relevância da segunda harmônica (EMANUEL *et al.*, 1990). Dessa maneira, a variação aleatória da assimetria durante o evento faz com que as componentes pares do espectro também variem. Por outro lado, o efeito avalanche presente na forma de onda está relacionado às componentes ímpares, com maior destaque para terceira e quinta (EMANUEL *et al.*, 1990). De forma análoga, a variação aleatória desse efeito faz com que as harmônicas de ordem ímpar também variem ao longo do tempo. De maneira geral, a literatura estabelece que o surgimento de assimetria e avalanche na forma de onda da corrente provoca também o surgimento desses componentes no espectro, adicionalmente, ela estabelece que as componentes harmônicas de ordem ímpar estão mais presentes na corrente de falta do que as de ordem par (WONTROBA *et al.*, 2022; AUCOIN; RUSSELL, 1987).

Os padrões apresentados no parágrafo anterior estão principalmente relacionados aos harmônicas de baixa ordem. Contudo, alguns autores optam por avaliar a presença

de componentes harmônicas de ordens elevadas, superiores a 2 kHz, uma vez que harmônicas de baixa ordem podem ser encontrados mais facilmente que harmônicas de ordens superiores também em eventos que não são FAI (AUCOIN; RUSSELL, 1982; AUCOIN; RUSSELL, 1987; RUSSELL; CHINCHALI; KIM, 1988). A presença dessas componentes ocorre principalmente durante o efeito avalanche, como uma contribuição no nível de detalhe do efeito (WAI; YIBIN, 1998). Dessa maneira, alguns autores optam por adotar essas frequências superiores para detecção da FAI pela potencial maior facilidade em distinguir entre diferentes eventos (AUCOIN; RUSSELL, 1987).

Por fim, a variação aleatória das condições em que o arco elétrico é estabelecido faz com que a sua intensidade também varie ao longo do tempo. Essa variação pode ser observada diretamente na magnitude da corrente medida durante a falta, chamada de modulação. A modulação da corrente de falta, por sua vez, promove o surgimento de componentes inter-harmônicas próximos à frequência fundamental no espectro do sinal (MACEDO *et al.*, 2015). Esses inter-harmônicas também podem ser utilizados para detecção da FAI.

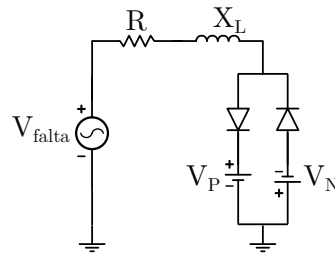
## 2.2 Modelos de FAIs

O desenvolvimento de métodos de detecção de FAI depende da avaliação das características inerentes ao evento e da realização de testes a respeito do desempenho dos métodos desenvolvidos. Contudo, a obtenção de dados reais de FAI pode representar um desafio técnico e econômico impeditivo (GOMES; OZANSOY, 2021). Nesse sentido, o desenvolvimento de modelos capazes de reproduzir as características do fenômeno com fidelidade é fundamental para os estudos sobre FAI.

Sendo assim, já na década de 90 foi proposto um dos principais modelos de FAI, apresentado em Emanuel *et al.* (1990). Conhecido como modelo de Emanuel, sua topologia pode ser observada na Figura 2. Ele foi desenvolvido a partir de dados reais, obtidos experimentalmente por meio de testes realizados com a queda de condutores de 13,8 kV em solo arenoso. A impedância  $R + jX_L$  presente no modelo é responsável por representar a própria impedância da FAI, por outro lado, as fontes  $V_P$  e  $V_N$  representam a tensão de ruptura da rigidez dielétrica do meio durante os semiciclos positivo e negativo, respectivamente, e junto com os diodos são responsáveis por imprimir os efeitos avalanche e assimetria entre os semiciclos presentes na corrente medida durante o evento. Por fim,  $V_{falta}$  representa a tensão no ponto de falta. Embora o modelo de Emanuel seja um marco para os estudos em FAI, ele não é capaz de reproduzir diversas características da corrente de falta, como o *build-up*, o *shoulder*, a modulação, a intermitência ou a aleatoriedade.

Neste sentido, a partir de então, outros modelos foram propostos de forma a tentar representar com mais fidelidade as características das FAIs. Sejam eles modelos baseados no modelo de Emanuel ou não, como discutido em Sedighi e Haghifam (2010).

Figura 2 – Modelo de Emanuel para FAI

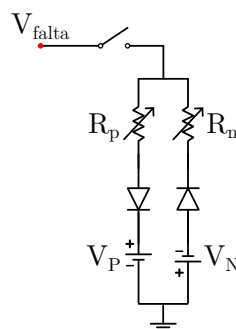


Fonte: Adaptado de Emanuel *et al.* (1990).

### 2.2.1 Modelos adotados em testes dos métodos de detecção

O modelo apresentado em Gautam e Brahma (2013), assim como o modelo de Emanuel, é composto por duas fontes de tensão em Corrente Contínua (CC) em série com diodos em anti-paralelo. A principal diferença entre eles é a divisão da impedância de falta em duas, agora localizadas em cada um dos ramos das fontes. Nesse modelo, os autores propõem a variação aleatória dos valores de cada fonte e das resistências durante a simulação, o que confere aleatoriedade às características da corrente de falta geradas por ele. Contudo, o modelo ainda não é capaz de reproduzir efeitos como *build-up*, *shoulder* ou a modulação característicos do evento. Em Cui e Weng (2020), os autores adotam esse modelo para avaliações práticas da metodologia de detecção de FAI desenvolvidas por eles. A Figura 3 apresenta a sua topologia, em que  $V_{falta}$  representa a tensão no ponto de falta,  $R_p$  e  $R_n$  representam a impedância da falta em cada semiciclo e as tensões  $V_P$  e  $V_N$  representam as tensões de ruptura da rigidez dielétrica do meio durante os semiciclos.

Figura 3 – Modelo de Gautam para FAI



Fonte: Adaptado de Gautam e Brahma (2013).

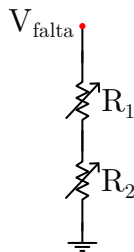
A forma mais simples de representar a FAI é por resistores com resistência elevada. Embora esse modelo não seja capaz de reproduzir as reais características do evento, alguns autores cujos métodos de detecção ou localização são baseados em componentes simétricas podem optar por adotá-lo. Como em Li *et al.* (2020), onde os autores propõem um método de localização de FAI utilizando a componente de sequência 0 monitorada em diferentes terminais da rede. Também como em Vianna, Araujo e Penido (2016), onde os autores



propõem um método de detecção e localização baseado em medição descentralizada da corrente de sequência 0 e comparação da sua magnitude nos diferentes pontos.

Por outro lado, o modelo proposto em Santos *et al.* (2013) não é baseado no modelo de Emanuel e foi desenvolvido de maneira a reproduzir as características: *build-up*, *shoulder*, assimetria e não-linearidade. A Figura 4 apresenta a sua topologia. O resistor  $R_1$  é responsável por simular as características de não-linearidade e assimetria, já o resistor  $R_2$  simula o *build-up* e o *shoulder*. Os valores de cada resistência variam ao longo do tempo por meio de equações polinomiais que modelam essas características. As equações foram selecionadas e parametrizadas por meio da avaliação das formas de ondas de correntes medidas em testes experimentais realizados pelos autores. Em Wontroba *et al.* (2022), os autores adotam esse modelo como parte da validação com testes em malha fechada do método de detecção de FAI que eles propuseram. Embora o modelo seja capaz de reproduzir com fidelidade as características a que se propõem, ele possui um comportamento limitado ao perfil de corrente observado durante os testes experimentais realizados pelos autores e é determinístico. Em Wontroba *et al.* (2022), os autores observaram que a aleatoriedade inerente à falta foi um fator complicador para o desempenho do método de detecção e realizar os testes apenas com um modelo determinístico poderia não ser suficiente para avaliar o método de forma completa.

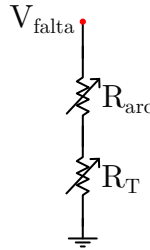
Figura 4 – Modelo de Santos para FAI



Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2013).

Em Wei *et al.* (2021), os autores adotaram uma topologia de modelo de FAI semelhante àquela utilizada no modelo de Santos *et al.* (2013), como pode ser observado na Figura 5. Contudo, o resistor  $R_T$  tem resistência constante e é responsável por representar a baixa condutividade do meio durante a falta, já o resistor  $R_{arc}$  varia ao longo do tempo e é responsável por modelar a não linearidade do arco elétrico. O modelo de Wei *et al.* (2021) é do tipo caixa preta e utiliza a equação de equilíbrio de calor para modelar o comportamento do arco. Os autores também propõem a variação de alguns dos parâmetros do modelo de forma a conferir aleatoriedade ao sinal. Em Afshar *et al.* (2022b), os autores utilizaram o modelo de Wei *et al.* (2021) para avaliar o desempenho prático de um relé embarcado com método de detecção de FAI baseado em componentes harmônicas e não harmônicas.

Figura 5 – Modelo de Wei para FAI



Fonte: Adaptado de Wei *et al.* (2021).

O modelo apresentado em Wang, Geng e Dong (2018), assim como os modelos de Wei *et al.* (2021) e de Santos *et al.* (2013), é composto por dois resistores em série. O primeiro resistor é constante e responsável por representar a baixa condutividade do meio, já o segundo resistor tem a resistência variável ao longo do tempo e é responsável pela característica não linear da relação V-I inerente ao arco elétrico formado durante a FAI. O valor do segundo resistor atualiza a cada passo da simulação e segue um sistema de equações que modela o comportamento da relação V-I. A principal diferença entre os modelos de Wang, Geng e Dong (2018), Wei *et al.* (2021) e Santos *et al.* (2013) é a forma como as resistências variam.

### 2.2.2 Considerações finais sobre a seção

É importante destacar a princípio que outros modelos e variações podem ser encontrados na literatura, contudo a seção teve como objetivo apresentar algumas das diferentes topologias e abordagens encontradas. Sendo assim, o Quadro 1 resume as características observadas na corrente medida durante a FAI reproduzidas por cada modelo apresentado. Ele permite perceber que, embora modelar a FAI como um resistor possa ser uma alternativa simples, ela não é capaz de reproduzir as características do evento, o que impede a adoção dessa estratégia para avaliar técnicas de detecção de FAI baseadas na forma de onda da corrente.

Por outro lado, o modelo de Santos *et al.* (2013) é o que reproduz a maior quantidade de características relacionadas à corrente de FAI, o que permite sua utilização em uma variedade maior de metodologias de detecção. Contudo, ele está intimamente relacionado às características da forma de onda observadas nos testes realizados pelos autores que o desenvolveram, além de ser um modelo determinístico. A dificuldade de gerar sinais de corrente de FAI com características diferentes e aleatórias pode representar uma limitação em sua utilização, como observado em Wontroba *et al.* (2022).

O modelo de Wang, Geng e Dong (2018), por sua vez, não é capaz de reproduzir o *build-up* e o *shoulder*, porém possui maior flexibilidade do que o modelo de Santos *et al.* (2013) nas características geradas. Outra desvantagem do modelo é não gerar sinais

aleatórios. Em contrapartida, os modelos de Gautam e Brahma (2013) e de Wei *et al.* (2021) também não são capazes de reproduzir *build-up* e *shoulder*, mas são capazes de imprimir alguma aleatoriedade aos sinais gerados.

Quadro 1 – Resumo das características geradas por cada modelo

	Resistor	(EMANUEL <i>et al.</i> , 1990)	(GAUTAM; BRAHMA, 2013)	(SANTOS <i>et al.</i> , 2013)	(WEI <i>et al.</i> , 2021)	(WANG; GENG; DONG, 2018)
Baixa corrente	x	x	x	x	x	x
Build-up				x		
Shoulder				x		
Modulação						
Avalanche		x	x	x	x	x
Intermitência						
Aleatoriedade			x		x	
Não-linearidade		x	x	x	x	x
Assimetria		x	x	x	x	x

Fonte: Elaborada pelo autor.

O Quadro 2 apresenta os modelos de FAI adotados em alguns dos artigos presentes na bibliografia. Ele permite notar que, embora seja a alternativa que represente a FAI de maneira mais simplificada, o modelo do resistor é um dos mais adotados. Os trabalhos que optam por adotar esse modelo normalmente utilizam técnicas de detecção baseadas em componentes simétricas ou medições em múltiplos terminais, o que pode justificar seu emprego uma vez que não dependam da forma de onda do sinal. Cabe ainda destacar que os trabalhos presentes no Quadro 2 estão no contexto de aplicação prática dos métodos de detecção de FAI, alinhados com um dos critérios do desenvolvimento do método apresentado nessa dissertação, apresentar um método com a possibilidade de implementação prática.

Em contrapartida, métodos de detecção de FAI baseados na forma de onda da corrente têm a tendência de dependerem de modelos capazes de reproduzir com mais fidelidade as características do evento e, por consequência, as métricas adotadas pelos métodos. Adicionalmente, embora a aleatoriedade e a intermitência não sejam diretamente utilizadas para a detecção da FAI pelos métodos considerados na bibliografia, são características que podem, de maneira geral, dificultar o desempenho dos algoritmos. Logo, adotar modelos capazes de reproduzir esse comportamento pode auxiliar o desenvolvimento de estratégias de detecção mais robustas e próximas da realidade.

Neste sentido, nenhum dos modelos observados na bibliografia foi capaz de reproduzir as características da corrente de FAI de forma completa, especialmente com relação à aleatoriedade inerente ao evento e a sua intermitência. Como mencionado, são fatores que implicam diretamente no desenvolvimento de métodos mais robustos e alinhados com fenômenos reais.

Quadro 2 – Resumo dos modelos adotados em cada trabalho

	Resistor	(GAUTAM; BRAHMA, 2013)	(SANTOS <i>et al.</i> , 2013)	(WEI <i>et al.</i> , 2021)	(WANG; GENG; DONG, 2018)
(LI <i>et al.</i> , 2022)					x
(AFSHAR <i>et al.</i> , 2022b)				x	
(WONTROBA <i>et al.</i> , 2022)		x	x		
(EL-HAMRAWY; MEGAHED; ABBASY, 2021)		x			
(GASHTEROODKHANI; MAJIDI; ETEZADI-AMOLI, 2021)		x			
(DUBEY; JENA, 2021)	x				
(BHANDIA <i>et al.</i> , 2020)		x			
(LI <i>et al.</i> , 2020)	x				
(CUI; WENG, 2020)		x			
(BHANDIA <i>et al.</i> , 2018)		x			
(TANG <i>et al.</i> , 2018)	x				
(WANG; GENG; DONG, 2018)					x
(PIGNATI <i>et al.</i> , 2017)	x				
(VIANNA; ARAUJO; PENIDO, 2016)	x				
(KANTRA; ABDELSALAM; MAKRAM, 2016)	x				
(AFSHAR <i>et al.</i> , 2022a)				x	

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 2.3 Métodos de detecção de FAI

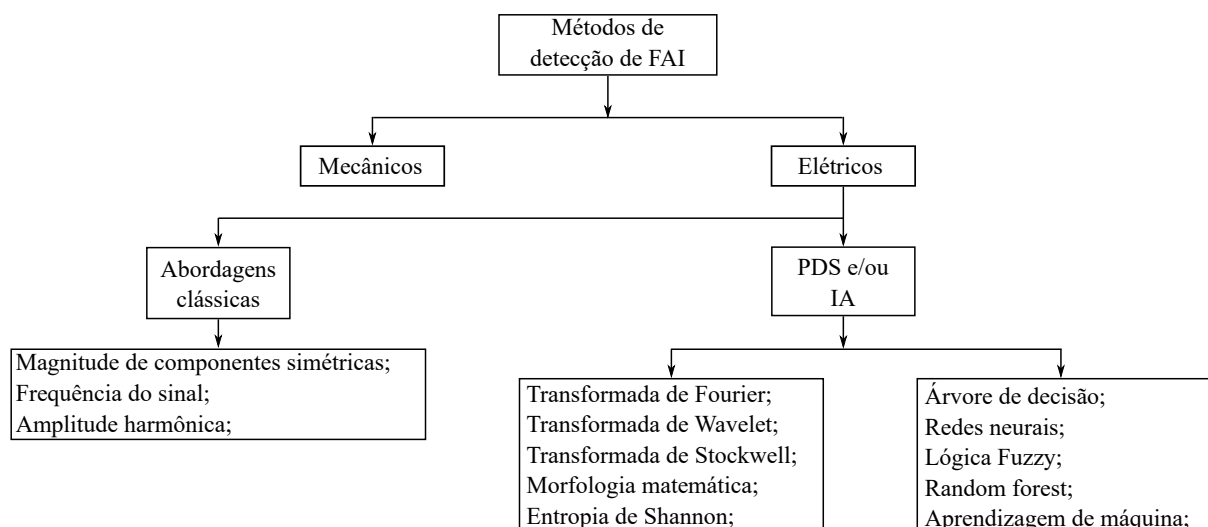
A partir da década de 70, diferentes métodos de detecção de FAI foram propostos com base em diferentes características do evento, técnicas e filosofias (GOMES; OZANSOY, 2021). Essa pluralidade de métodos desenvolvidos pode ser agrupada segundo diferentes critérios e de forma a permitir compreender e ilustrar o atual estado da arte, bem como discutir vantagens e desvantagens a partir de um ponto de vista geral e estratégico. Nesse sentido, em Mishra e Panigrahi (2019), os autores propuseram uma taxonomia para organizar os diferentes métodos de detecção de FAI que os divide com base no princípio de operação: mecânico ou elétrico. Os métodos com princípios mecânicos estão relacionados ao comportamento mecânico da falta, como por exemplo utilizar mecanismos para provocar faltas de baixa impedância quando algum condutor romper, (WESTER, 1998). Por sua vez, os métodos baseados em princípios elétricos monitoram as grandezas elétricas e as

utilizam em conjunto com técnicas de Processamento Digital de Sinais (PDS) ou princípios físicos para detectar a FAI.

Embora a taxonomia proposta em Mishra e Panigrahi (2019) seja capaz de agrupar uma grande variedade de métodos, os autores ainda precisaram criar um conjunto fora do escopo inicial para abranger alguns métodos. Sendo assim, a Figura 6 apresenta uma proposta de taxonomia baseada na proposta de Mishra e Panigrahi (2019) e com o objetivo de incluir por definição os métodos que originalmente ficaram fora da classificação. Logo, ela também divide os métodos de detecção entre princípios mecânicos e elétricos. Os princípios mecânicos compreendem as estratégias de detecção baseadas em monitorar diretamente a infraestrutura da linha, em contrapartida, os princípios elétricos são baseados em estratégias que monitoram grandezas eletromagnéticas e, a partir delas, detectam a falta. Os métodos baseados em princípios elétricos ainda são subdivididos entre abordagens clássicas e abordagens com PDS e/ou algoritmos de Inteligência Artificial (IA). Essa subdivisão depende da forma como o algoritmo utiliza as características extraídas das grandezas elétricas para a detecção.

Um exemplo de métodos de detecção baseados em princípios mecânicos é o apresentado em McAllister, Nowicki e Swirszcz (2009), em que os autores desenvolveram um veículo que percorre a linha e monitora a sua integridade. Ele monitora se o cabo está intacto, se está em contato com galhos ou matéria orgânica e envia os dados coletados para uma central. Embora os princípios mecânicos possam ser efetivos, de maneira geral, eles podem apresentar problemas relacionados à sua autonomia ou por dependerem da instalação de múltiplos equipamentos na rede, o que pode inviabilizar o projeto.

Figura 6 – Taxonomia dos métodos de detecção de FAI



Fonte: Adaptado de Mishra e Panigrahi (2019).

### 2.3.1 Métodos baseados em princípios elétricos

Os princípios elétricos são baseados em monitorar grandezas eletromagnéticas na linha para detectar a FAI. Segundo Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2017), é possível citar dentre as grandezas monitoradas: corrente, tensão e corrente, tensão e intensidade de campo magnético. A corrente pode ser utilizada por sua não linearidade e não estacionariedade demonstrarem componentes de alta e baixa frequência, contudo, as linhas de distribuição e transformadores de corrente (TCs) podem atenuar as informações contidas nesses sinais. Por sua vez, a tensão também pode ser utilizada para detectar a FAI desde que haja uma diferença de tensão considerável entre o ponto de falta e o relé. Como tentativa de aumentar a confiabilidade, alguns autores optam por utilizar ambas as grandezas, entretanto, isso pode encarecer o projeto por depender da instalação de mais instrumentos de medição. Normalmente, os métodos que adotam a tensão e a corrente são baseados em ondas viajantes ou sincrofasores. Por fim, a intensidade de campo magnético nas proximidades do alimentador pode ser utilizada para detectar a FAI, contudo também exige um investimento maior com instrumentos de medida.

Apesar de utilizarem as mesmas grandezas, os métodos baseados em princípios elétricos são divididos em duas abordagens distintas: clássica e com PDS e/ou IA. Os métodos com abordagem clássica monitoram grandezas elétricas que diretamente indicam a ocorrência da falta. Ainda que possam utilizar algumas ferramentas de PDS, como a Transformada de Fourier (TF), normalmente não utilizam limiares de atuação complexos com manipulações matemáticas sofisticadas para detectar a FAI. Por outro lado, os métodos baseados em PDS e/ou IA utilizam técnicas de processamentos de sinais para extrair características da grandeza monitorada e estabelecerem limiares de atuação com diferentes estratégias para detectar a FAI. Também podem utilizar IAs treinadas com essas características para reconhecer padrões e detectar a falta.

#### 2.3.1.1 Abordagens clássicas

Os métodos inseridos no conjunto de abordagens clássicas monitoram alguma das grandezas eletromagnéticas e as utilizam diretamente para detectar a falta. Nesse sentido, os autores em Kantra, Abdelsalam e Makram (2016) propõem um método de detecção de FAI baseado no monitoramento da frequência do sistema por meio de *Phasor Measurement Unit* (PMU). Eles partem da hipótese de que o sistema de distribuição opera de forma estável perto da frequência nominal e, quando ocorre qualquer evento, essa frequência varia além de um desvio típico. Baseado nessa variação da frequência, os algoritmos de detectam a FAI. A partir de dados históricos do sistema, eles modelam a distribuição de probabilidade da frequência como uma curva normal e assumem que a média dessa curva é a própria frequência nominal do sistema. Por meio de dados obtidos pelo PMU, eles calculam o desvio padrão e a probabilidade de ocorrer aquela determinada frequência a

cada amostra lida. Sendo assim, é possível detectar qualquer evento com base na curva normal criada e na probabilidade de ocorrer a frequência lida pelo PMU. Para classificar o evento como FAI, eles apenas monitoram a sua duração.

Outro exemplo de método de detecção baseado em abordagens clássicas é o proposto em Vianna, Araujo e Penido (2016). Os autores propõem um método de detecção e localização de FAI baseado na medição descentralizada da corrente de sequência 0 e da comparação de suas magnitudes nos diferentes pontos de medição sem precisar sincronizar as leituras. O método desenvolvido utiliza medições de corrente de fase descentralizada para calcular a corrente de sequência 0. Uma central recebe os dados da medição descentralizada, compara as magnitudes das correntes de sequência 0 e, caso elas sejam diferentes, detecta a falta monofásica. Embora o método detecte qualquer tipo de falta que tenha sequência 0, os autores afirmam que ele não é apropriado para proteção de baixa impedância pelo atraso na detecção, mas que isso não é necessariamente um problema para FAI.

Embora os métodos de detecção baseados em abordagens clássicas possam ser tipicamente de menor exigência computacional ou complexidade, eles também podem depender da instalação de múltiplos equipamentos ao longo do sistema para a correta detecção da FAI, o que não é necessariamente impeditivo, mas pode representar uma desvantagem quando comparado com outras estratégias. Adicionalmente, outra desvantagem relacionada a essa abordagem é a dificuldade de alguns métodos em distinguir os diferentes tipos de eventos que podem ocorrer no sistema, como no método proposto por Vianna, Araujo e Penido (2016), que detecta tanto eventos de FAI quanto faltas monofásicas de baixa impedância. Mesmo o método apresentado por Kantra, Abdelsalam e Makram (2016) detecta qualquer evento que perturbe a frequência da rede, de forma que os autores precisam utilizar a duração do evento para o classificarem como FAI.

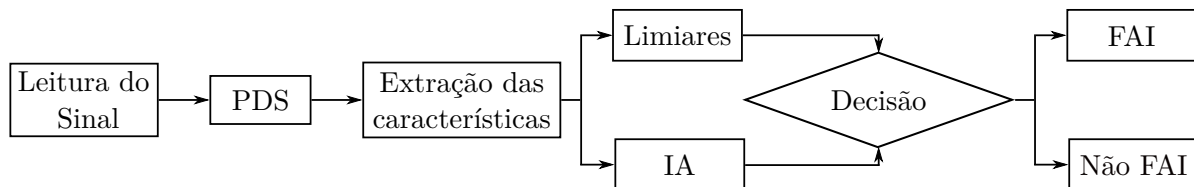
#### 2.3.1.2 Abordagens baseadas em PDS e/ou IA

Os métodos baseados em PDS e/ou IA utilizam técnicas de processamentos de sinais para extrair características da grandeza monitorada e estabelecerem limiares de atuação com diferentes estratégias para detectar a FAI. Em Mishra e Panigrahi (2019), os autores apresentam um fluxograma que sintetiza a sequência geralmente adotada por esses métodos. Como a Figura 7 permite observar, o processo é dividido em cinco etapas: leitura da grandeza elétrica utilizada, aplicação das ferramentas de PDS, extração das características, formulação e ajuste de limiares ou treinamento de algoritmos inteligentes para reconhecer o padrão do evento e, por fim, decisão para classificar o evento como FAI.

Segundo Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2017), é comum que as técnicas de PDS utilizadas para extrair as características do sinal avaliado estejam inseridas em um dos quatro domínios: domínio do tempo, domínio da frequência, domínio da escala de tempo, domínio da escala de tempo-frequência. As técnicas inseridas no domínio do

tempo avaliam as irregularidades de maneira temporal e podem observar grandezas como componentes simétricas, valor eficaz, magnitude ou fase. No domínio do tempo também podem ser empregadas técnicas de processamento estatístico de sinais. Por outro lado, o domínio da frequência utiliza ferramenta para avaliar as frequências de baixa e alta ordem que compõem o sinal. É comum serem utilizadas ferramentas como a *Fast Fourier Transform* (FFT) e o filtro de Kalman. Por sua vez, o domínio da escala de tempo está intimamente relacionado à Transformada de Wavelet (TW), que descreve o espectro de frequência do sinal em cada instante de tempo. Essa característica é bastante interessante para FAIs por sua não estacionariedade. Por fim, o domínio da escala de tempo-frequência analisa a estimativa da energia do sinal localizado em um plano tempo-frequência. É um domínio bastante relacionado com a Transformada de Stockwell (TS), que demanda grande capacidade computacional.

Figura 7 – Fluxograma geral dos métodos baseados em PDS e/ou IA



Fonte: Adaptado de Mishra e Panigrahi (2019).

A quarta etapa do processo descrito pelo fluxograma é o ajuste dos limiares e/ou treinamento dos algoritmos inteligentes. A literatura apresenta duas estratégias para ajustar os limiares de atuação no contexto da detecção de FAI: limiares ajustados pelo operador e auto-adaptativo. Os limiares ajustados pelo operador são parametrizados com base na magnitude esperada das grandezas observadas. Eles dependem das características inerentes à FAI, ao sistema estudado e são estabelecidos a partir de avaliações e estudos de caso em cenários de FAI. Em contrapartida, os limiares auto-adaptativo são calculados de tempos em tempos e de forma automática pelo próprio método de detecção. Eles são elaborados de forma a se adequarem às variações que o sistema pode sofrer.

Em Wontroba *et al.* (2022), os autores propõem um método de detecção de FAI por ruptura de condutor com limiares ajustados que é baseado em componentes simétricas e harmônicos. O método utiliza a TF de ciclo completo para obter a terceira ordem harmônica e a componente fundamental. Ele estabelece limiares para elas com o objetivo de caracterizar o evento como FAI. O método utiliza o teorema de Fortescue para calcular as componentes simétricas da corrente e determinar se ocorreu a ruptura do condutor. Com as componentes simétricas calculadas, ele compara a variação das componentes positiva e negativa com limiares também pré-definidos. Sendo assim, o método utiliza componentes harmônicas para detectar a FAI e componentes simétricas para detectar o rompimento do condutor, ambos por meio de limiares ajustados.



Por outro lado, em Lopes *et al.* (2022), os autores desenvolveram um método de detecção de FAI baseado na variação da energia de componentes harmônicas por meio da TS. Para detecção do evento, foi utilizado um limiar auto-adaptativo atualizado durante os períodos de regime permanente do sistema. A principal vantagem relacionada à adoção desses limiares é garantir que perturbações pré-existentes no sistema, tais como desequilíbrio entre as correntes, ruídos ou harmônicos e suas variações não possam prejudicar o desempenho do método e, dessa forma, promover maior segurança à detecção.

Em paralelo com os ajustes de limiares na quarta etapa do fluxograma, está o treinamento de algoritmos inteligentes para reconhecer os padrões estabelecidos pelas características intrínsecas às FAIs extraídas na etapa anterior. Diferentes técnicas de algoritmos inteligentes são aplicadas, como redes neurais, árvores de decisão ou lógica Fuzzy. Esses algoritmos podem ser aplicados com diferentes estratégias, considerando uma única ou várias características da falta. Como em Cui e Weng (2020), em que os autores utilizam  $\mu$ -PMU para monitorar as correntes e tensões de fase do sistema e a partir delas estabelecer métricas baseadas em componentes de fase, harmônicos, componentes simétricas e diferenças angulares. Todas essas métricas calculadas são aplicadas em uma aprendizagem semi-supervisionada para classificar os eventos como FAI ou não.

Embora os métodos baseados em algoritmos inteligentes possam apresentar um bom desempenho dentro do contexto em que foram desenvolvidos, uma das principais críticas relacionadas a esses métodos é quanto à capacidade de generalização. Normalmente eles passam por uma etapa de treinamento em um cenário estabelecido previamente para que sejam capazes de reconhecer os padrões e caracterizar a FAI. Contudo, em aplicações práticas, o SD pode assumir diferentes configurações, o que alinhado com o seu dinamismo pode dificultar o desempenho desses algoritmos que foram treinados em cenários definidos.

A última etapa do fluxograma consiste na classificação do evento como FAI. De maneira geral, a quarta etapa já apresenta essa classificação, contudo, alguns métodos de detecção podem utilizar a quinta etapa para empregar estratégias adicionais e aumentar a sua confiabilidade. Em Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2017), os autores comentam sobre a utilização de contadores que marcam o número de vezes que o algoritmo detectou a FAI. Assim, apenas após um determinado número de vezes confirmando o evento é que o algoritmo produz algum alerta, como adotado em Wontroba *et al.* (2022). Embora essa seja uma estratégia para aumentar a confiabilidade do método, ela implica em sustentar o evento durante um período maior, o que significa expor pessoas, animais e patrimônios ao condutor energizado também por mais tempo. Em contrapartida, aumentar a segurança significa minimizar as chances de falsos-positivos. Dessa forma, é uma estratégia que depende de uma avaliação cuidadosa ao ser aplicada.

### 2.3.2 Considerações finais sobre a seção

A seção teve como objetivo apresentar e estruturar de maneira sistemática as principais estratégias de detecção de FAI desenvolvidas. Dessa maneira, é possível organizar as metodologias apresentadas pelos autores, bem como entender as vantagens, desvantagens e limitações comuns entre cada categoria. O Quadro 3 discrimina os trabalhos inseridos na bibliografia quanto ao tipo de abordagem empregada no método de detecção. É possível notar que, dentre os trabalhos consultados, as abordagens com PDS e/ou IA são empregadas em quase o dobro dos que adotam a abordagem clássica, o que corrobora com a tendência apresentada em Gomes e Ozansoy (2021).

Quadro 3 – Resumo das abordagens dos métodos de detecção em cada trabalho

	Abordagem Clássica	Abordagem com processamento digital de sinais
(AFSHAR <i>et al.</i> , 2022a)		x
(WANG; GENG; DONG, 2018)		x
(KANTRA; ABDELSALAM; MAKRAM, 2016)	x	
(CUI; WENG, 2020)		x
(PIGNATI <i>et al.</i> , 2017)		x
(WONTROBA <i>et al.</i> , 2022)		x
(DUBEY; JENA, 2021)	x	
(TANG <i>et al.</i> , 2018)		x
(BHANDIA <i>et al.</i> , 2018)	x	
(EL-HAMRAWY; MEGAHED; ABBASY, 2021)		x
(VIANNA; ARAUJO; PENIDO, 2016)	x	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como mencionado, de maneira geral, abordagens clássicas possuem exigências computacionais e complexidades menores. Contudo, essa maior simplicidade pode implicar em maiores dificuldades de distinguir as FAIs de outros eventos e na aplicação de estratégias adicionais para isso, como avaliar o evento por um período de tempo maior. Em contrapartida, as abordagens baseadas em PDS e/ou IA normalmente buscam, além de detectar o evento, estabelecer características que diferenciem as FAIs dos outros eventos comuns no sistema. Entretanto, isso pode representar um maior esforço computacional e complexidade dos algoritmos.

Normalmente, métodos que aplicam abordagens clássicas adotam técnicas no domínio do tempo ou frequência, enquanto os métodos que aplicam abordagens de PDS e/ou IA são mais irrestritos. O Quadro 4 sintetiza o domínio adotado em cada trabalho. Ele permite perceber que a maior parte dos métodos de detecção desenvolvidos e testados por meio de testes em malha fechada adotam ferramentas inseridas no domínio do tempo, o que contraria a tendência observada nos trabalhos gerais sobre detecção de FAI publicados na literatura. Em Gomes e Ozansoy (2021), os autores mostram que, atualmente, a maioria

dos métodos desenvolvidos empregam técnicas no domínio da escala de tempo ou no domínio da frequência, muito relacionado com as características inerentes à corrente medida durante a FAI.

Quadro 4 – Resumo dos domínios adotados em cada trabalho

	Tempo	Freq.	Escala de tempo	Escala de tempo-freq.
(AFSHAR <i>et al.</i> , 2022a)				x
(WANG; GENG; DONG, 2018)	x			
(KANTRA; ABDELSALAM; MAKRAM, 2016)	x			
(CUI; WENG, 2020)	x	x		
(PIGNATI <i>et al.</i> , 2017)	x			
(WONTROBA <i>et al.</i> , 2022)	x	x		
(DUBEY; JENA, 2021)	x			
(TANG <i>et al.</i> , 2018)	x			
(BHANDIA <i>et al.</i> , 2018)	x			
(EL-HAMRAWY; MEGAHED; ABBASY, 2021)			x	
(VIANNA; ARAUJO; PENIDO, 2016)	x			

Fonte: Elaborada pelo autor.

O Quadro 5 apresenta os tipos de limiares adotados por cada autor. A primeira característica que ele permite observar é a diferença entre as quantidades de estratégias que adotam limiares e as que utilizam algoritmos inteligentes. Dentre os trabalhos avaliados, apenas um dos autores empregou algoritmos inteligentes para detecção da FAI, o que também contraria a tendência observada em Gomes e Ozansoy (2021) onde 39% dos trabalhos avaliados adotam essas ferramentas. De maneira geral, a maioria dos trabalhos avaliados adotam limiares ajustados para caracterizar a FAI, o que pode estar relacionado à sua maior simplicidade. Contudo, ao passo que algoritmos inteligentes dependem de treinamento e podem não apresentar capacidade de generalização para garantir a segurança do método de detecção nas possíveis diferentes configurações do sistema, limiares ajustados também estão sujeitos a parametrizações que dependem de características fixas e pré-estabelecidas da rede. Todavia, limiares auto-adaptativos, que foram adotados por apenas dois dos métodos inseridos na bibliografia, podem ser ajustados automaticamente e de forma a atender as diversas mudanças apresentadas pela rede ao longo da operação.

Por fim, o Quadro 6 apresenta uma descrição das variáveis adotadas por cada metodologia. Inicialmente, é possível notar que poucos trabalhos adotaram apenas a tensão do sistema, o que corrobora com as dificuldades relacionadas a extrair características de FAI nessa grandeza. Em contrapartida, ela foi bastante utilizada junto com a corrente, uma vez que, como comenta (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017), pode ser um forma de aumentar a confiabilidade do método de detecção.

Quadro 5 – Resumo dos limiares adotados em cada trabalho

	Ajustado	Auto-adaptativo	Algoritmo Inteligente
(AFSHAR <i>et al.</i> , 2022a)		x	
(WANG; GENG; DONG, 2018)	x		
(KANTRA; ABDELSALAM; MAKRAM, 2016)		x	
(CUI; WENG, 2020)			x
(PIGNATI <i>et al.</i> , 2017)	x		
(WONTROBA <i>et al.</i> , 2022)	x		
(DUBEY; JENA, 2021)	x		
(TANG <i>et al.</i> , 2018)	x		
(BHANDIA <i>et al.</i> , 2018)	x		
(EL-HAMRAWY; MEGAHED; ABBASY, 2021)	x		
(VIANNA; ARAUJO; PENIDO, 2016)	x		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 6 – Resumo das grandezas adotadas em cada trabalho

	Corrente	Tensão	Tensão e corrente
(AFSHAR <i>et al.</i> , 2022a)			x
(WANG; GENG; DONG, 2018)			x
(KANTRA; ABDELSALAM; MAKRAM, 2016)	x		
(CUI; WENG, 2020)			x
(PIGNATI <i>et al.</i> , 2017)		x	
(WONTROBA <i>et al.</i> , 2022)	x		
(DUBEY; JENA, 2021)			x
(TANG <i>et al.</i> , 2018)			x
(BHANDIA <i>et al.</i> , 2018)	x	x	
(EL-HAMRAWY; MEGAHED; ABBASY, 2021)	x		
(VIANNA; ARAUJO; PENIDO, 2016)	x		

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.4 Validação e testes dos métodos de detecção

Independente da estratégia adotada, durante o desenvolvimento do método de detecção de FAI, é necessário a aplicação de testes capazes de validar e garantir a sua efetividade, eficiência e aplicabilidade. Nesse sentido, para garantir a segurança, é preciso avaliar o desempenho da metodologia tanto em reconhecer a FAI nas diversas condições de operação do sistema, quanto em distingui-la de outros eventos que podem ocorrer na rede. Adicionalmente, os testes devem ser realizados de forma a explorar as fragilidades do método, ou seja, devem ser planejados para garantir que, em situações reais, o método de detecção opere corretamente mesmo nos piores cenários. Logo, os tipos de testes aplicados devem estar alinhados com a estratégia adotada na metodologia de detecção.

Uma forma de sistematizar a natureza dos testes aplicados aos métodos de detecção em desenvolvimento é por meio da Matriz de Confusão (MC). Ela categoriza os resultados obtidos por eles em quatro tipos: verdadeiro positivo, falso negativo, falso positivo e verdadeiro negativo, como pode ser observado na Equação (2.1), (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017). Os resultados verdadeiros positivos são aqueles em que o método detectou a FAI e realmente era um evento de FAI. Os resultados falsos positivos são aqueles em que o método detectou a FAI, mas era outro tipo de evento. Os falsos negativos são resultados em que o evento era uma FAI, porém o método não o detectou. Por fim, os verdadeiros negativos são eventos que o método não detectou e realmente não eram FAI. O método de detecção ideal apresenta apenas resultados verdadeiros.

$$C_M = \begin{bmatrix} \textit{Verdadeiro positivo} & \textit{Falso positivo} \\ \textit{Falso negativo} & \textit{Verdadeiro negativo} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Dentre os testes para avaliação de falsos positivos, cabe citar os eventos transitórios que podem possuir características semelhantes, na ótica do método de detecção proposto, aos eventos de FAI. É importante ressaltar que a seleção desses eventos de testes deve estar alinhada com a estratégia de detecção do método. Como em Afshar *et al.* (2022a), em que são realizados testes com chaveamento de carga, de banco de capacitores e energização de transformadores. Os eventos comumente encontrados em trabalhos desenvolvidos no contexto de detecção de FAI são:

- Chaveamento de cargas;
- Chaveamento de bancos de capacitores;
- Energização de transformadores;
- Partida de motor.

Chaveamento de cargas e banco de capacitores representam transitórios de curta duração, já a partida de motor representa um transitório de longa duração. Além desses, outros eventos para avaliação de método de detecção de FAI podem ser encontrados na literatura, como forno a arco, retificadores e cargas não lineares (LOPES *et al.*, 2022). Alinhado com a necessidade de explorar as fragilidades dos métodos de detecção, em Cui e Weng (2020), os autores também adotam testes com geradores distribuídos. Já em Dubey e Jena (2021), o método de detecção depende da comunicação entre diferentes dispositivos, também são testados aspectos como a latência da comunicação.

Os testes com eventos não FAI estão relacionados com a avaliação dos falsos positivos da MC. Além deles, também é necessário avaliar os falsos negativos, que estão relacionados à sensibilidade do método de detecção. Normalmente, esses testes são realizados aplicando

a falta em diferentes pontos da rede, considerando a distância entre o ponto de falta e o de medição. Como em Afshar *et al.* (2022a), no qual a medição era feita na subestação e a falta foi aplicada em diferentes trechos da linha. Já em Vianna, Araujo e Penido (2016), a falta foi aplicada em regiões internas e externas das zonas de detecção do método proposto. Esses testes também podem ser realizados variando o nível de carregamento do sistema, uma vez que isso altera as relações entre as correntes de carga e de falta, variando as características da falta ou do tipo de aterramento da rede, como em Gashteroodkhani, Majidi e Etezadi-Amoli (2021).

Tanto os testes para avaliar os falsos positivos quanto para avaliar os falsos negativos podem ser realizados em diferentes condições de operação da rede, como na presença de ruído, desequilíbrio entre as fases e conteúdo harmônico (LOPES *et al.*, 2022). Dessa forma, é possível testar o método de detecção em cenários mais realistas, sendo assim, garantindo maior efetividade da técnica. Em Li *et al.* (2022), os autores repetem os testes com a inserção de ruídos distribuídos na faixa de 30 a 5dB. Por outro lado, os testes realizados em Lopes *et al.* (2022), são realizados com ruídos entre 60 e 40 dB, o que está mais próximo do valor normalmente encontrado em SD.

Adicionalmente, em Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2017), os autores afirmam que TCs, como dispositivos de *interface* com a rede, podem mitigar as informações contidas no sinal de corrente medida durante a FAI. Contudo, poucos trabalhos encontrados na literatura abordam esse tema. Em Chen *et al.* (2016) os autores avaliam a sensibilidade do TC em medir pequenas amplitudes harmônicas, mas não utilizam uma metodologia sistemática para caracterizar essa sensibilidade ou a aplicam em sinais de FAI. Já os trabalhos Etemadi e Sanaye-Pasand (2008), Subramanian e Venkataraman (2012), Heidari *et al.* (2021), AsghariGovar *et al.* (2018) consideram o TC, mas o foco é avaliar a capacidade do método de detecção em distinguir entre condições de FAI e saturação desses transformadores.

## 2.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica a respeito das faltas de alta impedância. Ele abordou as características observadas na forma de onda da corrente durante o evento, o espectro harmônico produzido pela formação do arco elétrico, alguns modelos para representar a FAI nos *softwares* de simulação, a organização dos métodos de detecção e os tipos de testes aplicados nesses métodos para validar o seu desempenho.

Como parte dos critérios desta dissertação é desenvolver um método de detecção alinhado com as limitações de aplicações práticas para trabalhos futuros, parte da revisão bibliográfica realizada foi orientada para trabalhos publicados no contexto dos testes envolvendo aplicação em *hardware*, dessa forma foi possível observar espaços para contribuições com o desenvolvimento de testes mais robustos e condizentes com situações reais. Dentre

esses espaços, é possível citar principalmente o desenvolvimento de uma diversidade maior de eventos não FAI para avaliar os falsos positivos, considerar a presença de ruído no sinal monitorado e também considerar o impacto da ocorrência de eventos simultâneos no sistema, como por exemplo o chaveamento de bancos de capacitores durante a operação de cargas não lineares.

Dentre os métodos de detecção avaliados, foi possível perceber que, no contexto dos testes com aplicação com aplicações práticas, as abordagens clássicas apresentaram uma proporção maior do que a observada no contexto geral de FAI. Isso pode estar relacionado a possível maior complexidade na implementação das abordagens de PDS e/ou IA, que são abordagens normalmente com vantagem na detecção e distinção dos eventos de FAI. Sendo assim, também é um espaço de contribuição avaliar as dificuldades relacionadas a implementar um algoritmo com essa estratégia e propor ajustes e melhorias que facilitem essa aplicação.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a abordagem adotada nesta dissertação. Ele apresenta inicialmente os aspectos gerais da metodologia, com informações a respeito do sistema teste e ferramentas utilizadas. Posteriormente, apresenta as modelagens de cada evento simulado para validação do método de detecção.

#### 3.1 Metodologia geral do trabalho

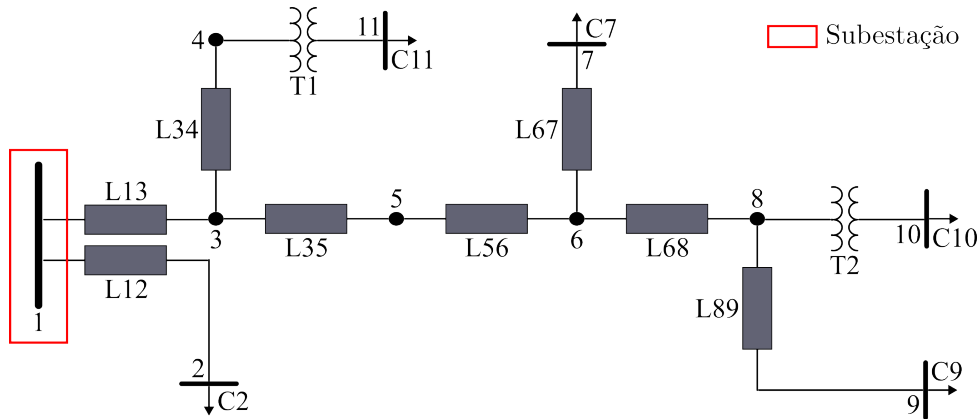
Para ser possível entender o comportamento do sistema durante a ocorrências das FAIs e de outros eventos que podem acontecer nos sistemas de distribuição, foram necessárias análises de formas de ondas que representassem essas situações. Essas formas de onda foram obtidas por meio de simulação computacional seguindo as diretrizes.

- Todos os eventos estudados foram obtidos com a simulação de um mesmo sistema teste;
- Todos os eventos foram submetidos às mesmas condições de carregamento do sistema;
- Todos os sinais foram registrados a partir de um ponto de medição localizado na subestação do sistema;
- As simulações foram realizadas por meio do *software Alternative Transients Program* (ATP);
- Todos os dados foram armazenados com uma mesma taxa amostral de 128 amostras por ciclo;
- Todas as etapas de automatizações, pré-processamento, processamento e análise de resultados foram realizadas por meio da linguagem de programação Python.

Para gerar o banco de dados com as osciografias utilizadas para os estudos dos eventos de FAI e avaliação da proposta de método de detecção, foi utilizado um sistema teste de distribuição baseada em uma rede rural real. Ela é composta por 11 barras, 9 delas com tensão nominal de 11,9 kV e 2 com tensão nominal de 220 V (barras 10 e 11). A barra 1 é a saída da subestação e possui potência de curto-circuito de 162,8 MVA. A maior distância do sistemas corresponde a um comprimento de 17,5 km. Optou-se por realizar os testes com essa rede por ser um arranjo real inserido no cenário brasileiro. A Figura 8 apresenta a topologia da rede e o Apêndice A contém os seus dados.



Figura 8 – Rede de referência para os testes



Fonte: Adaptado de Salles (2007).

Além do carregamento nominal do sistema apresentado no Apêndice A, também foram simuladas outras duas condições de carregamento: 30% e 10%. Essas condições foram atingidas modificando proporcionalmente os valores das cargas. Adicionalmente, as cargas nominais do sistema também foram desequilibradas até que a tensão na subestação apresentasse um fator de desequilíbrio de aproximadamente 0,3%, calculada a partir das tensões de linha do sistema. Foi adotado esse valor porque o sistema teste possui uma elevada potência de curto-circuito, fazendo com que fosse necessário provocar um desequilíbrio severo na corrente para aumentar o desequilíbrio da tensão. Na sequência, foram aplicados os mesmos fatores de multiplicação em cada carga para gerar as outras condições de carregamento. Assim, foram estudados 6 condições de operação: 3 níveis de carregamento para o sistema equilibrado e 3 níveis de carregamento para o sistema desequilibrado.

O *software Alternative Transients Program (ATP)* foi escolhido por ser uma ferramenta consolidada no meio acadêmico. Para modelagem da rede e dos eventos avaliados, foi utilizada a sua *interface* gráfica ATPDraw. Após a etapa de modelagem, foram gerados os cartões com todas as variações de carregamento e eventos necessários para o estudo de maneira automatizada por meio da linguagem Python. As simulações dos cartões também foram executadas por meio da automatização do *software* com o Python.

A linguagem de programação Python foi adotada por ser uma ferramenta gratuita e com um amplo conjunto de ferramentas consolidadas para análise de dados, processamentos de sinais e automatização de tarefas. Adicionalmente, é uma ferramenta que tem se popularizado nos últimos anos no meio acadêmico e já conta com uma documentação detalhada dos seus recursos, o que permite a sua utilização de forma bastante completa.

Por fim, a escolha das taxa amostral de 128 amostras por ciclo está vinculada ao fato de ser uma frequência possível para os dispositivos de proteção convencionais existentes no mercado. Além de proporcionar uma flexibilidade para re-amostragem do

---

sinal para frequências menores. Assim, os dados foram armazenados com 128 amostras por ciclo, porém durante os estudos eles foram re-amostrados de maneira a permitir avaliar o impacto da taxa de amostragem no desempenho do algoritmo proposto.

## 3.2 Metodologia da simulação dos eventos

Com as ferramentas descritas anteriormente, foi gerado um banco de dados composto por eventos de FAI e não FAI. Para os eventos de FAI, foram considerados sinais reais e gerados por modelo. Para os casos de não FAI, foram considerados eventos de chaveamento de banco de capacitores, cargas, transformadores e cargas não lineares. Também foram gerados sinais com a aplicação desses eventos considerando fontes de harmônicas pré-existentes na rede originadas das cargas não lineares e de um gerador distribuído localizado na barra 8. Assim, considerando todos os eventos e condições de operação, foram simulados 20394 casos de testes. As seções a seguir apresentam como cada evento foi considerado.

### 3.2.1 Eventos de FAI

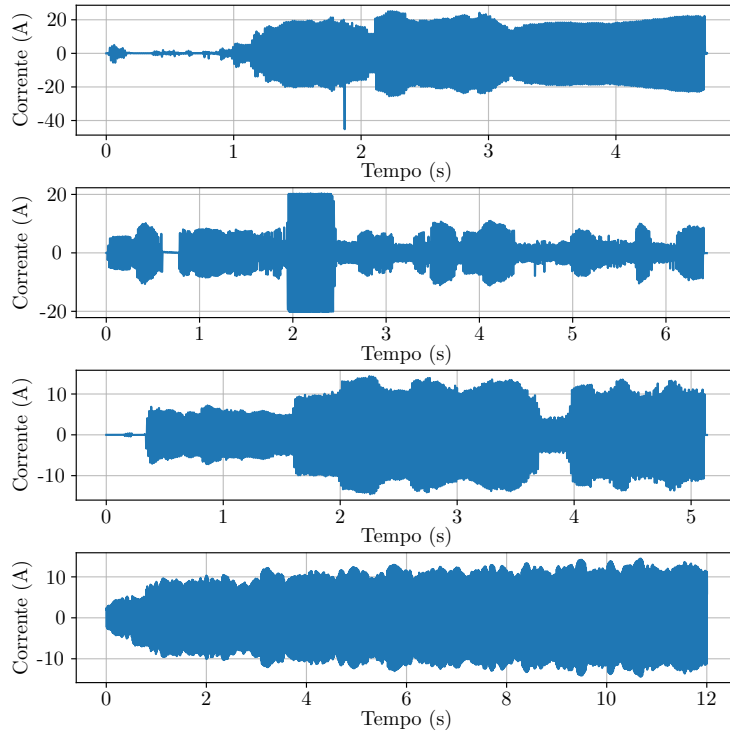
Para investigar as potenciais métricas e avaliar o desempenho do método de detecção, foram simulados casos de FAI variando a barra de incidência e a fase afetada. Assim, foram aplicadas faltas em todas as barras de média tensão do sistema teste e em todas as três fases. Duas estratégias diferentes foram utilizadas para representar os eventos: inserindo oscilografias de eventos reais e por meio de um modelo. Essa estratégia foi adotada para que fosse expandido o banco de dados de testes de maneira contemplar a maior variedade de casos possível e ser representativo frente a aleatoriedade inerente aos eventos de FAI.

#### 3.2.1.1 Simulações com oscilografias reais

As oscilografias de eventos de FAI reais utilizadas nesta dissertação foram obtidas por meio de ensaios reais em um campo de testes de média tensão realizado por Macedo *et al.* (2015). Os ensaios foram realizados com a queda do condutor energizado e contato com o solo composto por areia, terra, cascalho, asfalto e cimento. Foram registradas 33 sinais de corrente de sinais de FAI com diferentes características. A Figura 9 apresenta alguns exemplos de oscilografias utilizadas.

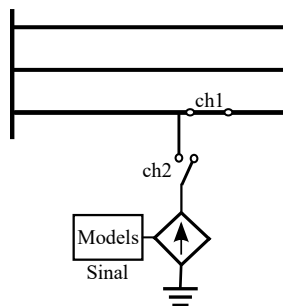
Cada oscilografia foi aplicada na simulação como uma fonte de corrente controlada por meio do ambiente *Models* presente no ATP. Assim, os sinais foram readequados à formatação exigida pelo *software* e redimensionados para atenderem ao período simulado. Adicionalmente, para simular a ruptura e contato do cabo com o solo, foram utilizadas duas chaves temporizadas. Uma normalmente fechada para abrir o circuito na ruptura do condutor e outra normalmente aberta para simular o contato entre a o condutor energizado e a superfície. A Figura 10 apresenta a topologia do circuito utilizada para inserir as oscilografias reais na simulação.

Figura 9 – Exemplos de oscilografias de FAIs reais



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Topologia para inserir sinais reais na simulação

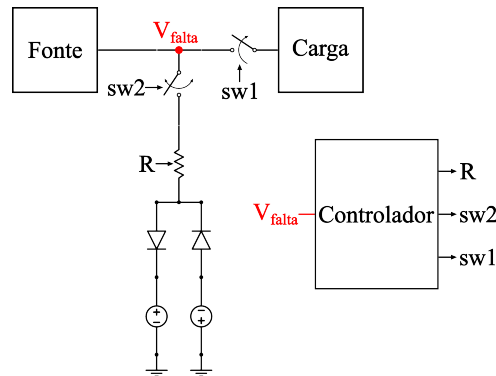


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.1.2 Simulações com a aplicação de modelo

Embora os testes com sinais reais permitam realizar avaliações bastante completas, uma vez que são reproduções de eventos reais, eles estão limitados ao banco de dados disponível. Assim, para avaliar eventos com formas de onda diferentes, foram realizados testes também com a aplicação de sinais gerados por modelo. Dessa forma, o modelo adotado nesta etapa foi introduzido em Trondoli, Lopes e Vieira (2022). Ele é baseado no modelo de Emanuel, completamente parametrizável e capaz de gerar sinais aleatório. A Figura 11 apresenta a sua topologia, onde é possível observar que ele possui componentes que podem ser divididos entre componentes de potência (diodos, fontes e resistor) e componentes de controle (controlador).

Figura 11 – Topologia do modelo de FAI de referência



Fonte: Adaptado de Trondoli, Lopes e Vieira (2022).

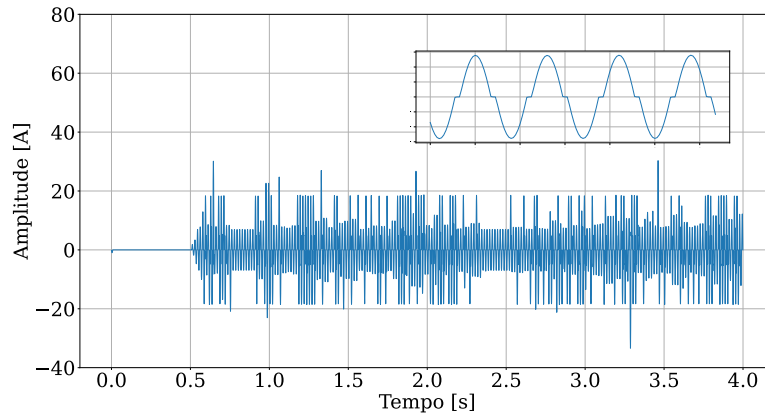
Os componentes de potência presentes no modelo são responsáveis por proporcionar a alta impedância característica da falta, o efeito avalanche e os instantes de ruptura e toque do cabo no solo. A alta impedância da falta é provocada pelo resistor  $R$ , cuja resistência varia ao longo de cada semiciclo da tensão no ponto de falta. O efeito avalanche, por sua vez, é originado pelas fontes de tensão em série com diodos em antiparalelo. Os diodos fazem com que apenas flua corrente pelo modelo quando a tensão no ponto de falta for maior, em módulo, do que a tensão das fontes de tensão CC. Adicionalmente, elas representam a tensão de ruptura da rigidez dielétrica do meio. Por fim, o instante de ruptura do cabo é marcado pela abertura da chave  $sw1$ , enquanto o instante de contato com o solo é marcado pelo fechamento da  $sw2$ .

Por outro lado, o controlador é responsável por operar a abertura e fechamentos das chaves, simulando não apenas o momento de ruptura e toque do cabo no solo, mas também a intermitência do evento ao operar a chave  $sw2$  após o início da falta. Ele também é responsável por modificar a resistência de falta do modelo e, a partir dela, promover as características: *build-up*, *shoulder*, assimetria e modulação. Ele possui três resistências virtuais em série cujo equivalente representa a resistência  $R$ . A primeira resistência é responsável por imprimir o *build-up* e diminuir o seu valor ao longo do tempo, a segunda é responsável pelas assimetrias do sinal e a terceira é responsável pela variação da magnitude da corrente ao longo do tempo. Cada uma das resistências é calculada de forma periódica e em função da tensão no ponto de falta e dos ajustes adotados. A aleatoriedade do modelo é proporcionada durante o cálculo de cada resistência e da operação da chave  $sw2$ .

O modelo permite ser completamente ajustável, de forma que é possível reproduzir as características de eventos escolhidos pelo usuário. Desta forma, mesmo que a forma de onda gerada por ele não seja idêntica aquela utilizada como referência para a sua parametrização, dada a aleatoriedade do evento, é possível reproduzir características semelhantes, como a intermitência, os ciclos de *build-up* e a sua modulação. Assim, nesta dissertação, foram utilizadas as formas de onda das correntes mencionadas anteriormente e

a metodologia para extração de características apresentada em Trondoli, Lopes e Vieira (2022) para parametrizar o modelo durante os testes realizados. A Figura 12 apresenta um exemplo de forma de onda obtida com essa metodologia.

Figura 12 – Forma de onda de um sinal de FAI gerada pelo modelo de Trondoli, Lopes e Vieira (2022)



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2 Chaveamento de cargas, banco de capacitores e transformadores

É frequentemente reportado na literatura que eventos transitórios como aqueles provocados por chaveamento de cargas, bancos de capacitores e transformadores podem ser confundidos com eventos de FAI pelos métodos de detecção. Isso pode ocorrer devido à distorção nas formas de onda da tensão e corrente que esses eventos podem ocasionar durante até alguns ciclos após o chaveamento. Assim, parte da avaliação dos métodos deve envolver verificar a sua capacidade em distinguir entre essas perturbações e eventos de FAI.

Para contemplar todos esses eventos, foram adicionados dois bancos de capacitores trifásicos localizados nas barras 9 e 7 do sistema teste apresentado na Figura 8. Os dois bancos adicionados possuem a mesma potência nominal de aproximadamente 100 kvar. Demais eventos foram simulados com os elementos já presentes no sistema. Adicionalmente, foram inseridas chaves controladas por tempo na conexão entre a rede e cada banco de capacitor, transformador e carga já presentes no sistema teste. Com a operação dessas chaves, foram simulados eventos de energização e desenergização de todos esses elementos.

### 3.2.3 Simulação de cargas não lineares

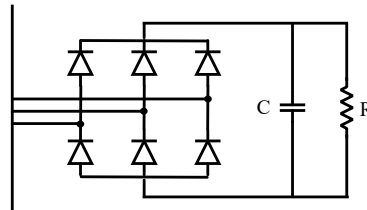
As cargas não lineares são responsáveis por inserir componentes harmônicas na tensão e na corrente dos sistemas de distribuição. Diferente dos eventos transitórios descritos anteriormente, as harmônicas inseridas por esses componentes ocorrem durante toda a sua operação. Assim, representam elementos que precisam ser avaliados durante a fase de testes dos métodos de detecção para garantir a sua robustez.

Esta dissertação considera dois potenciais impactos causado pelas cargas não lineares: os transitórios de energização e desenergização delas; e a sua operação durante a ocorrência dos demais eventos testados. Dessa forma, o principal objetivo dos testes envolvendo as cargas não lineares é avaliar como o método de detecção reage a ocorrência de algum evento na rede com existência prévia de componentes harmônicas. Para isso, foram modelados dois tipos de cargas não lineares: retificador e forno a arco. Assim como nos outros eventos de chaveamento, a energização e desenergização das cargas não lineares foi realizado com o auxílio de uma chave controlada por tempo.

### 3.2.3.1 Simulação de retificadores

Para simulação do retificador, foi utilizado um conversor CA-CC de 6 pulsos não controlado conectado a barra 8 do sistema. Foi utilizada uma potência constante igual a 500 kW. O retificador modelado foi conectado direta na média tensão. A Figura 13 apresenta a topologia do circuito utilizada, onde  $C$  vale  $100 \mu\text{F}$  e  $R$  vale  $1 \text{ k}\Omega$ .

Figura 13 – Topologia do circuito do retificador

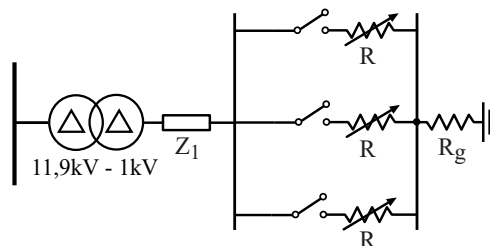


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.3.2 Simulação de forno a arco

O forno a arco considerado nesta dissertação foi construído com base no Modelo de Cassie e encontra-se disponível no banco de exemplos do *software* ATP (PENALOZA, 2023). Ele foi conectado na barra 8 do sistema teste. Possui uma potência aproximada de 272 kW. A Figura 14 apresenta a topologia do circuito utilizado no modelo. É necessário destacar que, embora as duas cargas lineares tenham sido conectadas na barra 8, elas não operam simultaneamente. Foi simulado apenas uma carga por vez.

Figura 14 – Topologia do circuito do forno a arco



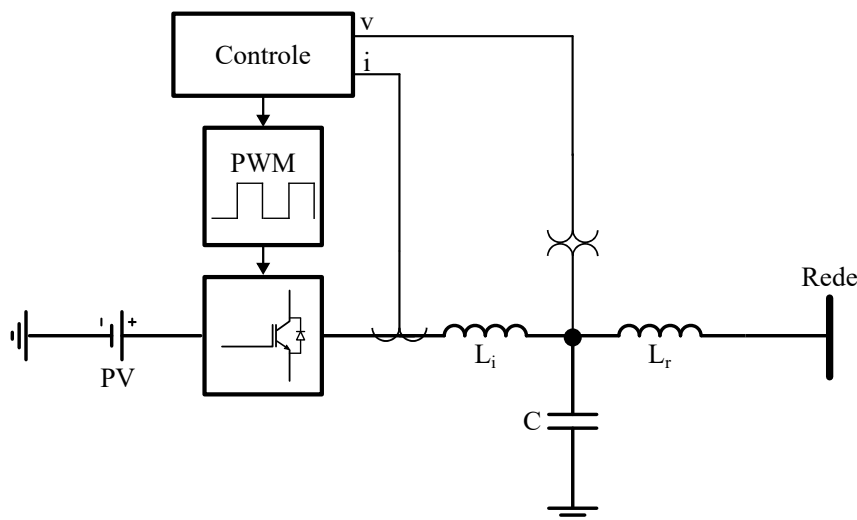
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.4 Simulação de geração distribuída

O crescente aumento na penetração de geradores distribuídos na rede é uma realidade, especialmente aqueles baseados em inversores. Não considerar a presença deles nos testes pode abrir margem para questionamentos relacionados a real representatividade do sistema teste. Adicionalmente, de maneira semelhante às cargas não lineares, a presença de geração distribuída também pode ser uma fonte de conteúdo harmônico na rede.

Desta forma, foi modelado um gerador baseado em inversor de 500 kVA conectado na barra 8 do sistema teste. Foi adotado o modelo chaveado para representar o impacto do inversor na distorção harmônica do sistema. Assim, a Figura 15 apresenta o diagrama unifilar do gerador implementado. Para representar a geração, foi utilizada uma fonte de 1500 V como a tensão do *link* CC. O Apêndice B apresenta o diagrama de blocos e o código com os parâmetros e ganhos utilizado no controle do inversor.

Figura 15 – Diagrama unifilar do gerador distribuído



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 15 também apresenta a estrutura do filtro *LCL* utilizado para mitigar o impacto das harmônicas geradas pelo chaveamento do inversor. A Tabela 1 fornece os valores dos componentes elétricos utilizados no filtro. Maiores detalhes sobre o gerador distribuído podem ser obtidos em Iscuissati (2022), dissertação adotada como referência para construção do circuito e controle do inversor.

### 3.2.5 Falhas monofásicas de baixa impedância

Faltas monofásicas de baixa impedância, embora resguardadas por dispositivos de proteção convencionais, também são responsáveis por inserir distorções nas formas de onda da tensão e corrente durante o seu período transitório. Essas distorções podem sensibilizar os métodos de detecção de FAI. Adicionalmente, elas são responsáveis por

Tabela 1 – Parâmetros do filtro LCL.

Componente	Valor
$L_i$	2,07 mH
$C$	456,7 $\mu$ F
$L_r$	0,057 mH

Fonte: Elaborada pelo autor.

provocar desequilíbrios entre as fases do sistema que também podem ser responsáveis por sensibilizar métodos de detecção baseados na corrente de neutro ou residual.

Para contemplar esses eventos, foram simuladas faltas monofásicas com uma resistência de curto-circuito de  $5 \Omega$  em cada linha de média tensão e em cada fase do sistema. Assim, o evento foi simulado por meio de uma resistência *shunt* conectada através do fechamento de uma chave controlada por tempo após 1 s da simulação.

### 3.2.6 Ruído

A presença de ruído nas medições de tensão e corrente de sistemas de distribuição é um fato que pode comprometer a operação dos métodos de detecção. Essas distorções são responsáveis por adicionar uma nova camada de dificuldade para os algoritmos, especialmente considerando os seus impactos quanto a capacidade do método em diferenciar entre eventos de FAI e não FAI. Assim, esta dissertação considera a presença de ruído modelado como um Ruído Branco Gaussiano nas grandezas elétricas durante os testes de desempenho do método proposto. O ruído será aplicado em uma etapa intermediária entre a simulação dos casos de teste no *software* ATP e a aplicação do método. Para isso, será considerado a formulação apresentado na Equação (3.1) para calcular a relação sinal ruído a ser aplicada. A Equação 3.2 será utilizada para inserir o ruído no sinal simulado. Em ambas as equações,  $G(t)$  representa o ruído Gaussiano,  $n$  é o nível dele,  $SNR$  é a relação sinal ruído,  $signal_{simulado}$  é o sinal original gerado pelo ATP e  $signal$  é o resultado após a adição do ruído.

$$SNR = 20 \times \log \left( \frac{rms(signal)}{rms(nG(t))} \right) \quad (3.1)$$

$$signal = signal_{simulado}(t) + nG(t) \quad (3.2)$$

## 3.3 Considerações finais

Este capítulo apresentou aspectos da metodologia adotada durante a pesquisa visando demonstrar as considerações utilizadas nos testes bem como os eventos avaliados.



Assim, foram apresentados os *softwares* utilizados, o sistema teste, as condições de operação avaliadas, os eventos de FAI, os eventos de transitórios e a operação das fontes harmônicas. Para cada nível de carregamento e condição de operação foram simulados 3288 casos de FAI e 111 casos de eventos não FAI. A Tabela 2 apresenta de forma visual o total de casos estudados. Por fim, todo o banco de dados obtido com aplicação dessa metodologia foi utilizado para formulação e validação do método de detecção proposto.

Tabela 2 – Conjunto de eventos simulados.

	Carregamento de 100%		Carregamento de 30%		Carregamento de 10%	
	FAI	Não FAI	FAI	Não FAI	FAI	Não FAI
<b>Equilibrado</b>	3288	111	3288	111	3288	111
<b>Desequilibrado</b>	3288	111	3288	111	3288	111
<b>TOTAL</b>				<b>20394</b>		

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4 PROPOSTA DE MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

Este capítulo apresenta a proposta de um método de detecção de faltas de alta impedância estabelecida pela ruptura do condutor e contato com superfície de alta impedância do lado da fonte. A proposta visa compor uma metodologia robusta com relação às variações de configuração do sistema, tais como: diferentes níveis de carregamento, presença de geração distribuída e presença de cargas não lineares, chaveamento de cargas, bancos de capacitores e transformadores. Também buscou-se adotar ferramentas com um baixo custo computacional e implementação. Assim, são aspectos gerais do método:

- Adotadas as componentes harmônicas da fundamental até a sétima ordem, visto que essa faixa de frequência é suficiente para representar boa parte das características da FAI, como discutido em Lopes *et al.* (2022);
- Utiliza a corrente residual calculada a partir da soma das correntes de fase medidas na subestação do sistema teste. Esse aspecto parte da premissa que as FAIs são eventos que ocorrem principalmente em apenas uma das fases, assim utilizar a corrente residual permite aprimorar a robustez do método contra eventos trifásicos;
- Baseado em um limiar auto-adaptativo para corresponder de maneira autônoma às variações de características do sistema;
- Possui dois estágios de operação: detecção e confirmação do evento. Dessa forma, após a detecção de um distúrbio, o método utiliza uma estratégia baseada em sua duração para confirmar a ocorrência da FAI. Isso possibilita que ele não seja afetado por eventos transitórios de curta duração;
- Opera com sinais amostrados a 32 amostras por ciclo. Utilizar essa taxa permite que as harmônicas sejam avaliadas até a 16<sup>a</sup> ordem. Porém, como o método utiliza apenas até a 7<sup>a</sup> ordem para detectar a FAI, existe margem para investigar a instalação de filtros para melhorar a qualidade do sinal em estudos futuros, além de ser uma taxa amostral coerente com os *hardwares* atuais.

O método proposto é baseado em ferramentas consolidadas na literatura. A Transformada Discreta de Fourier foi utilizada para obter o espectro harmônico necessário para a detecção; o filtro de Savitzky-Golay foi empregado para calcular o limiar auto-adaptativo do método; por fim, a Entropia de Shannon foi adotada para caracterizar o sinal baseado na complexidade da forma de onda imposta pelas componentes harmônicas presentes na corrente medida durante a FAI. Cada uma das ferramentas será detalhada a seguir.

## 4.1 Filtro de Savitzky-Golay

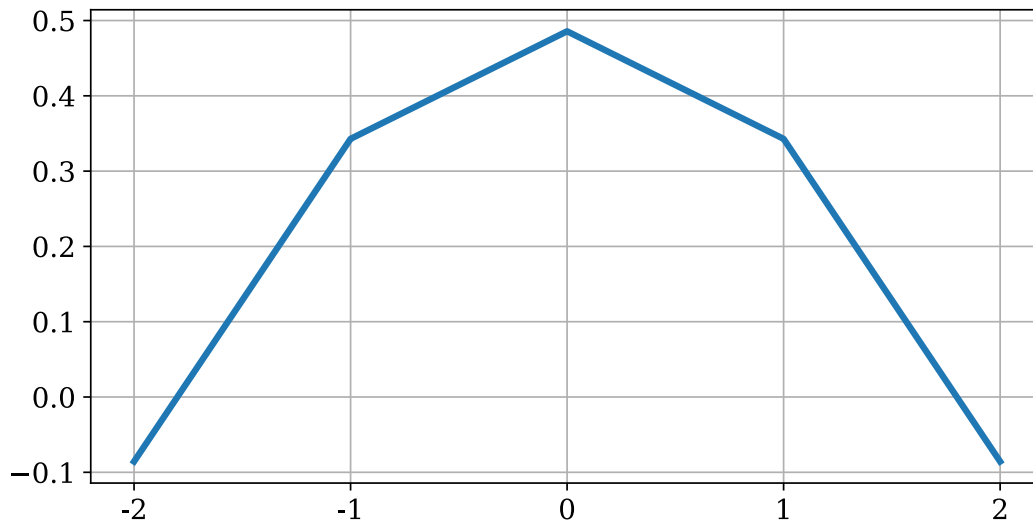
O filtro de Savitzky-Golay é um filtro digital aplicado para suavização de conjuntos de dados (GOLAY, 1964). Dessa forma, ele é capaz de aprimorar a precisão dos sinais e encontrar as tendências deles sem ser afetado pelas suas pequenas distorções. É aplicado por meio da convolução de uma janela formada por coeficientes de polinômios com os dados estudados. Pode ser empregado segundo a Equação (4.1), em que  $m$  é um número adimensional que representa a quantidade de elementos da janela do filtro,  $n$  é o tamanho do conjunto de dados filtrados,  $C$  é o coeficiente da janela,  $y$  é o dado avaliado e  $j$  é o índice do dado dentro do conjunto.

$$Y_j = \sum_{i=\frac{1-m}{2}}^{i=\frac{m-1}{2}} C_i y_{j+i}, \quad \frac{m+1}{2} \leq j \leq n - \frac{m-1}{2} \quad (4.1)$$

### 4.1.1 Filtro de suavização

O filtro de Savitzky-Golay permite que diferentes janelas sejam utilizadas para suavização dos dados, dependendo da ordem do polinômio que origina a janela e da quantidade de pontos adotados. Essas escolhas influenciam diretamente o nível de suavização e a defasagem entre o dado original e o filtrado. Assim, esta dissertação utilizou a janela de 5 pontos formada a partir de um polinômio quadrático fornecida em Golay (1964). Essa janela foi adotada por ser capaz de apresentar o melhor equilíbrio entre suavizar e defasar o sinal dentre as opções avaliadas no contexto da pesquisa. Assim, ela foi utilizada para suavizar os dados de entropia armazenados pelo método durante o cálculo do limiar. A Figura 16 apresenta o formato da janela composta pelos elementos do filtro, o que revela a contribuição de cada dado no cálculo. Ambos os eixos são adimensionais.

Figura 16 – Janela para suavização dos dados

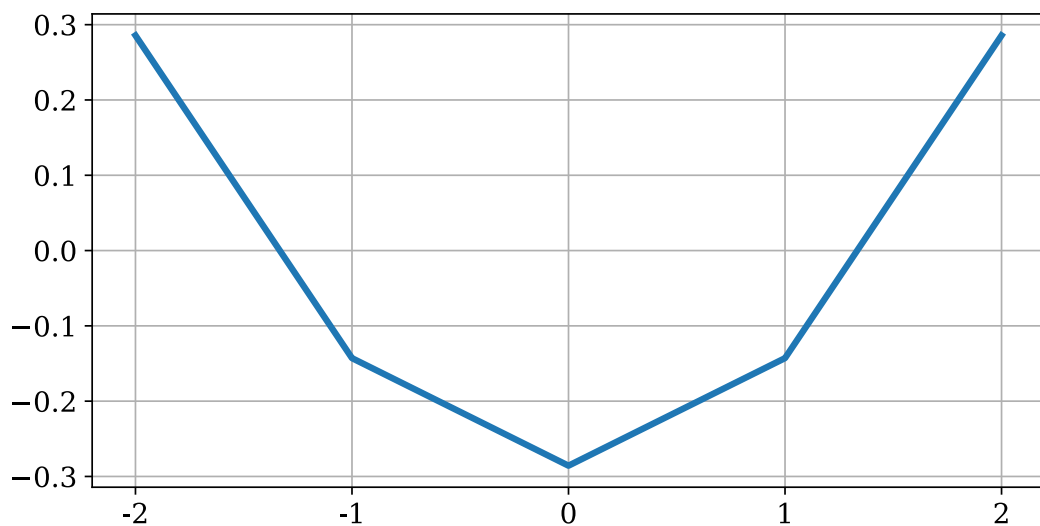


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.2 Filtro de primeira derivada

Além de suavizar sinais digitais, dependendo da janela empregada, o filtro de Savitzky-Golay também permite encontrar as derivadas do conjunto de dados de forma numérica e, assim, obter a sua taxa de variação. Esta dissertação adotou uma janela de 5 pontos formada por meio de um polinômio quadrático para calcular a primeira derivada do sinal, métrica que foi utilizada como forma de obter a taxa de variação da entropia e determinar a condição de regime transitório ou permanente do sistema. A Figura 17 apresenta o formato da janela composta pelos elementos do filtro obtidos em Golay (1964). Diferente da janela de suavização, a Figura 17 permite perceber que o filtro de primeira derivada aplica maior peso dos dados que estão nas extremidades da janela.

Figura 17 – Janela para derivação dos dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Entropia de Shannon

A Entropia de Shannon é um termo formulado pela Teoria da Informação e estabelece uma métrica que mede a redundância de uma mensagem e está relacionada à frequência dos grupos de caracteres que são transmitidos (COVER; THOMAS, 2012). Dessa forma, com base na distribuição de probabilidade desses caracteres, ela é capaz de medir a complexidade da mensagem, visto que quanto mais concentrada for a distribuição de probabilidade, mais fácil é prever o carácter transmitido e menor é o valor da entropia.

De maneira análoga, quando aplicada ao espectro de frequência de um sinal, a Entropia de Shannon também pode mensurar a sua complexidade. Em um sinal senoidal puro, a única frequência presente no espectro é a frequência fundamental, fazendo com que seja simples prever a forma de onda no domínio do tempo, logo a entropia é mínima. À medida que novas frequências são adicionadas ao espectro, mais difícil é prever essa forma de onda, o que leva ao aumento da sua entropia. Dessa maneira, quanto maior for a

presença de componentes harmônicas no espectro, maior a complexidade do sinal e maior o valor da entropia. A Equação (4.2) apresenta a formulação da Entropia de Shannon aplicada ao espectro de frequência de um sinal, em que  $h$  é a magnitude da componente harmônica e  $N$  é a quantidade de componentes harmônicas avaliadas.

$$e = - \sum_{i=1}^{i=N} h_i \times \log(h_i) \quad (4.2)$$

A entropia foi adotada como métrica para caracterizar a FAI dada a aleatoriedade inerente ao evento. Embora existam harmônicas características na corrente medida durante a FAI, como é o caso da terceira e quinta ordem, o seu espectro varia ao longo do tempo de forma indeterminada. Dessa forma, pode ser um desafio estabelecer métricas baseadas exclusivamente nessas harmônicas. Com a entropia, embora o espectro harmônico varie ao longo do tempo, a simples existências dessas frequências faz com que a presença do evento seja visível. Assim, a Entropia de Shannon é uma métrica capaz de condensar o espectro em um número que reflete diretamente o seu comportamento e por isso foi adotada como ferramenta para a detecção de FAI.

### 4.3 Filtro de Fourier

A Transformada Discreta de Fourier é uma ferramenta utilizada para avaliar sinais periódicos no domínio da frequência. Embora durante eventos transitórios em sistemas elétricos os seus sinais de corrente e tensão possam não ser periódicos, é possível assumir que para um curto intervalo de tempo eles são. Assim, ela foi aplicada nessa dissertação como um filtro para componentes harmônicas de interesse considerando uma janela de um ciclo deslizante a cada amostra do sinal. A Equação (4.3) apresenta a formulação da Transformada Discreta de Fourier, em que  $N$  é o tamanho da janela utilizada e  $h$  a ordem da componente harmônica avaliada.

$$F[h] = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{x=N} f[x] e^{-\frac{j2\pi hx}{N}} \quad (4.3)$$

A escolha da Transformada Discreta de Fourier como ferramenta de processamento está diretamente relacionada à sua consolidação na literatura após vários anos sendo estudada em ambiente acadêmico. Outros pontos positivos relacionados à escolha dessa ferramenta é por sua simplicidade de implementação e baixo consumo computacional, o que facilitam a sua aplicação.

### 4.4 Algoritmo de detecção de FAI

Como mencionado, o método de detecção de FAI apresentado é composto por duas etapas que operam em cascata e são responsáveis por detectar e confirmar a ocorrência

de um evento de FAI. Contudo, alguns passos são executados a cada nova amostra dos sinais de entrada e são comuns a ambas as etapas. São elas: leitura das correntes de fase do sistema, cálculo da corrente residual por meio da soma das correntes de cada fase e, por fim, o cálculo da entropia. Após estes passos iniciais, o método verifica qual etapa ele deve percorrer. Essa verificação ocorre por meio de um indicador chamado *Pickup*. Se o *Pickup* não estiver ativo, o método entra na etapa de detecção. Se ele estiver ativo, o método entra na etapa de confirmação.

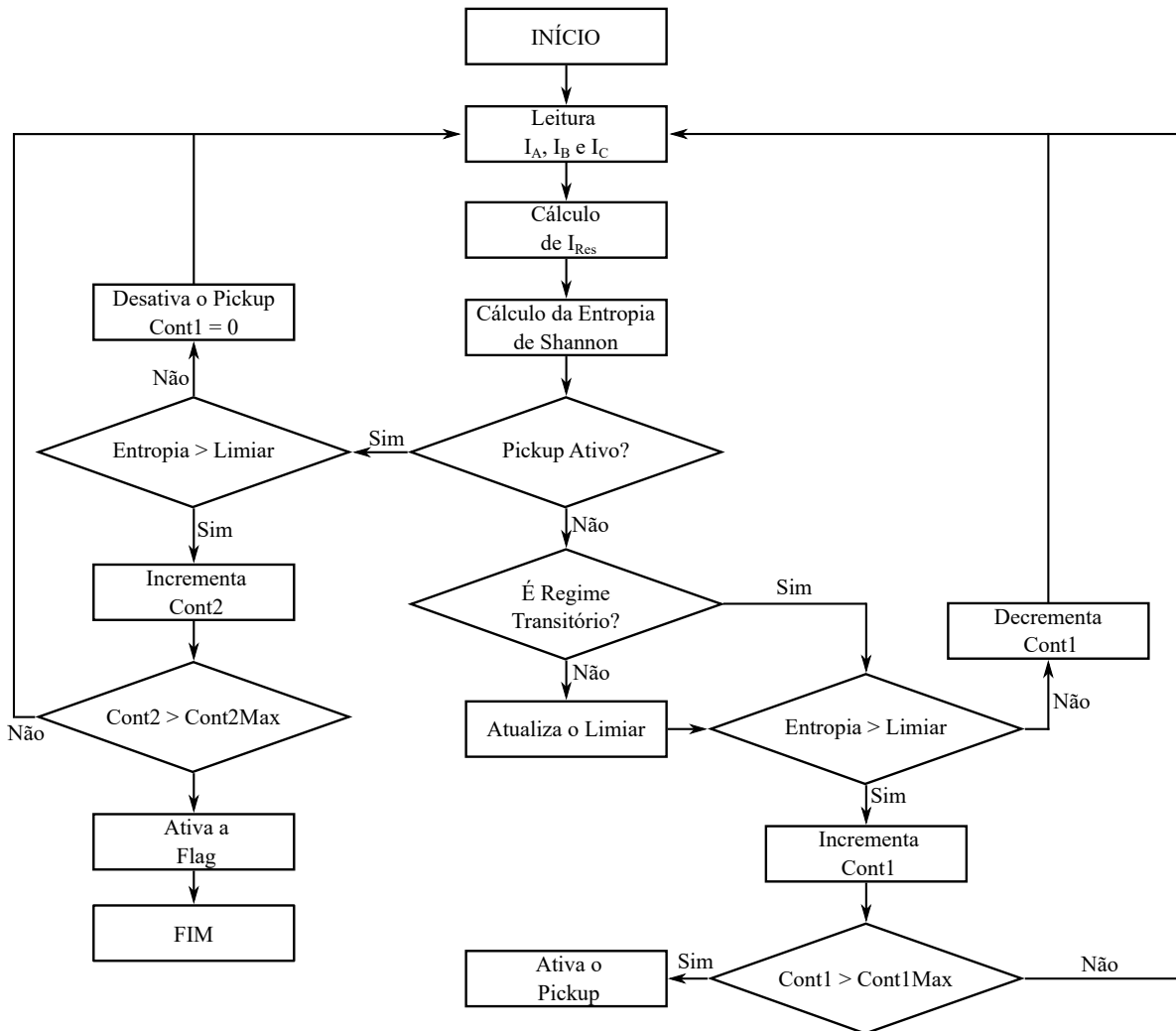
Na etapa de detecção do evento, o método verifica se o sistema está em regime transitório ou não com base nas entropias armazenadas durante o último ciclo do sinal. Ele faz essa verificação por meio da taxa de variação da entropia nesse ciclo. Se ele não estiver em transitório, o método atualiza o limiar de detecção por meio da média das entropias armazenadas em etapas anteriores. Caso ele esteja em transitório, o método avança direto para a verificação do limiar. Se a entropia calculada na amostra atual for superior ao limiar auto-adaptativo, um contador *Cont1* será incrementado, caso contrário será decrementado. Se o contador superar o valor máximo pré definido, o *Pickup* será ativado e o método entrará na segunda etapa.

Com o *Pickup* ativo, na segunda etapa o método para de atualizar o limiar e passa apenas a verificar a cada nova amostra se a entropia atual é superior ao último limiar calculado. Caso a entropia seja superior a esse limiar, um contador *Cont2* será incrementado, caso contrário o *Pickup* será desativado e o *Cont1* reiniciado. Se *Cont2* superar o valor máximo pré definido, o método deve ativar a *flag* de detecção do evento. *Cont2* é reiniciado caso o método saia da segunda etapa sem detectar a FAI. O fluxograma presente na Figura 18 sintetiza todos os passos da operação do método.

#### 4.4.1 Cálculo da Entropia de Shannon

Para calcular a entropia, é utilizado um *buffer* circular formado por  $N$  espaços equivalentes a quantidade de amostras por ciclo do sinal amostrado, ou seja, equivalente a um ciclo inteiro do sinal de entrada. Ele é atualizado a cada nova amostra do sinal com o valor da corrente residual calculada a partir da soma das correntes das três fases do sistema de forma que o algoritmo opere sempre com o último ciclo do sinal. A partir desse *buffer*, são calculadas as 7 primeiras componentes harmônicas da corrente residual. Caso a componente de frequência fundamental seja menor do que 1, é atribuído o valor 0 para entropia  $e$ . Caso contrário, esse espectro é então normalizado pela componente fundamental para que em seguida seja calculada a Entropia de Shannon segundo a Equação (4.2). Essa verificação é necessária para inibir indeterminações matemáticas em casos onde não há corrente residual ou ela é muito pequena. O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo utilizado para isso.

Figura 18 – Fluxograma do método de detecção



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4.2 Verificação do transitório

Para verificar se o sistema está em regime transitório é utilizado um *buffer* circular, chamado *buffer\_transitorio*, composto por  $N$  espaços, em que  $N$  também representa o número de amostras por ciclo dos sinais de entrada do método. Esse *buffer* é atualizado a cada nova amostra dos sinais de entrada com o valor da entropia do ciclo atualizado da corrente residual. É então calculada a derivada de cada amostra do *buffer* com a aplicação do filtro de Savitzky-Golay. Essa aplicação retorna um vetor composto por todas as taxas de variação do *buffer* ao longo de cada amostra que o compõe, assim é calculado o valor médio dessas derivadas para formar a derivada média do ciclo. O sistema é tido como em regime permanente se essa derivada for menor do que um  $\gamma$  pré definido e é tido como em período transitório caso contrário. O Algoritmo 2 apresenta o pseudocódigo utilizado para esse cálculo. O Apêndice C contém os pseudocódigos das funções *Atualiza\_buffer* e *Normaliza*.

---

**Algoritmo 1:** Cálculo da entropia

---

**Entrada:**  $I_A, I_B, I_C$

- 1  $I_{Res} \leftarrow I_A + I_B + I_C$
- 2  $buffer \leftarrow \text{Atualiza\_Buffer}(I_{Res}, buffer)$
- 3  $espectro \leftarrow \text{Filtro\_Fourier}(buffer)$
- 4 **se**  $espectro[1] \leq 1$  **então**
- 5  $e = 0$
- 6 **senão**
- 7  $espectro\_normalizado \leftarrow \text{Nomaliza}(espectro)$
- 8  $e \leftarrow \text{Entropia\_de\_Shannon}(espectro\_normalizado)$
- 9 **fim**
- 10 **retorna**  $e$

---



---

**Algoritmo 2:** Etapa de verificação do transitório

---

**Dados:**  $e, \gamma$

- 1  $buffer\_transitorio \leftarrow \text{Atualiza\_Buffer}(e, buffer\_transitorio)$
- 2  $vetor\_de\_derivadas \leftarrow \text{Savitzky\_Golay\_Derivada}(buffer\_transitorio)$
- 3  $derivada \leftarrow \text{Media}(vetor\_de\_derivadas)$
- 4 **se**  $derivada \leq \gamma$  **então**
- 5  $Transitorio \leftarrow \text{Falso}$
- 6 **senão**
- 7  $Transitorio \leftarrow \text{Verdadeiro}$
- 8 **fim**
- 9 **retorna**  $Transitorio$

---

#### 4.4.3 Limiar auto-adaptativo

O limiar auto-adaptativo do método é atualizado sempre que não é identificado um transitório na entropia. Para isso é mantido um *buffer* circular, chamado *buffer\_limiar*, composto por  $N$  espaços, em que  $N$  representa a quantidade de amostras existentes em um ciclo do sinal de entrada do método. Diferente do que ocorre com os demais *buffers* utilizados pelo algoritmo, o *buffer* do limiar é atualizado apenas quando o sistema está em regime permanente. Assim, após a atualização dele, é aplicada a suavização dos seus valores por meio do filtro de Savitzky-Golay para minimizar o impacto das pequenas distorções presentes nos dados e relevar apenas a sua tendência. Após a aplicação do filtro, é então calculada a média dessas entropias para compor um candidato ao novo limiar. Por fim, o limiar atualizado será o maior valor entre o limiar candidato encontrado na etapa anterior e um limiar mínimo  $\lambda$  ajustado de acordo com a sensibilidade requerida para o método. O Algoritmo 3 apresenta o pseudocódigo utilizado para esse cálculo.

A Figura 19 apresenta um exemplo do resultado obtido com a aplicação dos algoritmos descritos. Na Figura 19a é apresentada a corrente residual obtida. Como o sistema está equilibrado, é possível notar que surge um valor de corrente residual apenas com o início do arco. Na Figura 19b é possível verificar o comportamento da entropia e do



---

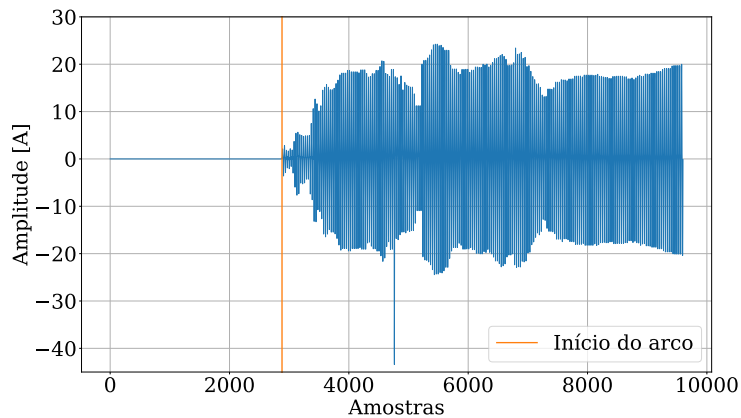
**Algoritmo 3:** Etapa de atualização do limiar
 

---

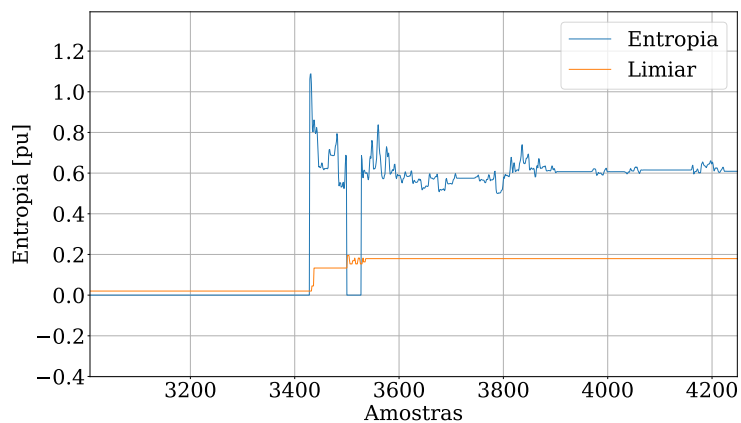
**Dados:**  $e$ ,  $\lambda$ ,  $\text{limiar\_minimo}$   
 1 **se**  $\text{Transitorio} = \text{Falso}$  **então**  
 2      $\text{buffer\_limiar} \leftarrow \text{Atualiza\_Buffer}(e, \text{buffer\_limiar})$   
 3      $\text{vetor\_candidato} \leftarrow \text{Savitzky\_Golay\_Suavizado}(\text{buffer\_limiar})$   
 4      $\text{limiar\_candidato} \leftarrow \text{Media}(\text{vetor\_candidato})$   
 5     **se**  $\text{limiar\_candidato} \geq \lambda$  **então**  
 6          $\text{limiar} \leftarrow \text{limiar\_candidato}$   
 7     **senão**  
 8          $\text{limiar} \leftarrow \lambda$   
 9     **fim**  
 10 **fim**  
 11 **retorna**  $\text{limiar}$

---

Figura 19 – Ilustração da aplicação dos algoritmos sobre a (a) Forma de onda da corrente residual calculada, com (b) Entropia e limiar a cada amostra do sinal



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

limiar do método. É possível verificar nela que a entropia do sinal acompanha diretamente a sua variação. Também é possível notar como o limiar tende a seguir essa entropia apenas no instante sem transitório, como acontece em algumas amostras do início do evento.

## 4.5 Testes e resultados

Todos os testes apresentados nessa seção foram realizados com base no banco de dados de oscilografias formado a partir das simulações realizadas de acordo com o Capítulo 3. Todos os sinais foram obtidos com apenas um ponto de medição realizado na subestação do sistema e foram re-amostrados para 32 amostras por ciclo. Por fim, foram considerados 2 níveis de ruído além dos casos sem: 50 dB e 60 dB.

### 4.5.1 Análise do método de detecção

A parametrização do método foi realizada com base nos testes com o banco de dados simulados. Para isso, foi ajustado primeiro o valor de  $\gamma$ , que começou com 0,1 e foi sendo decrementado até que o limiar passasse a atualizar apenas em regime permanente, como na Figura 19b. Na sequência, o valor de  $\lambda$  foi ajustado. Ele começou com 0 e foi incrementado até que o método conseguisse detectar corretamente 50 casos de teste sorteados aleatoriamente do banco de dados. Por fim, o valor de *Cont1Max* foi ajustado de forma análoga à  $\lambda$ . Assim, foram selecionados  $\gamma$  igual a  $10^{-5}$ ,  $\lambda$  igual a 0,02, *Cont1Max* igual a 9 e *Cont2Max* também igual a 9. A escolha de  $\gamma$  está relacionada à atualização do limiar auto-adaptativo. Logo, valores maiores de  $\gamma$  podem fazer com que o limiar atualize durante eventos transitórios ou durante a presença de qualquer oscilação na corrente residual do sistema. O melhor ajuste para  $\gamma$  é aquele que permite a atualização do limiar apenas para variações de longa duração nas características do sistema, como alterações em sua topologia. O valor de  $\lambda$ , por sua vez, está relacionado à sensibilidade do método. Quanto menor ele for, menor será o limiar mínimo permitido pelo algoritmo. O seu ajuste é realizado com base nas características do sistema e das correntes medidas. Sistemas desequilibrados e com ruído exigem que o método seja menos sensível. A variável *Cont1Max* determina o número de vezes que a entropia pode ultrapassar o limiar para que o método seja sensibilizado. Esse ajuste evita que amostras espúrias causadas por ruído ou operações de chaveamento na rede provoquem a atuação indevida do algoritmo. Por fim, a variável *Cont2Max* determina a duração do evento para que seja confirmado como uma FAI. Assim, o algoritmo espera 9 ciclos para confirmar a ocorrência da falta. Esse valor foi adotado pois com 9 ciclos, de maneira geral, eventos transitórios já finalizaram e faltas de baixa impedância já foram removidas do sistema. A Tabela 3 sintetiza os ajustes adotados.

A Figura 21 apresenta um exemplo de operação do método aplicado com os ajustes descritos na Tabela 3. Foi utilizado o mesmo sinal ilustrado na Figura 19. Nela, é possível notar que ocorre o disparo do *Pickup* logo com o aumento da entropia. Porém, como a entropia diminui durante alguns ciclos, o *Pickup* é desarmado. Na sequência, a entropia volta a ficar superior ao limiar. Após 9 amostras, o *Pickup* é então ativado e o algoritmo entra na segunda etapa. Nessa etapa ele espera durante 9 ciclos para verificar se a entropia se mantém superior ao limiar. Quando esse critério é atingido, a *flag* de atuação é acionada.

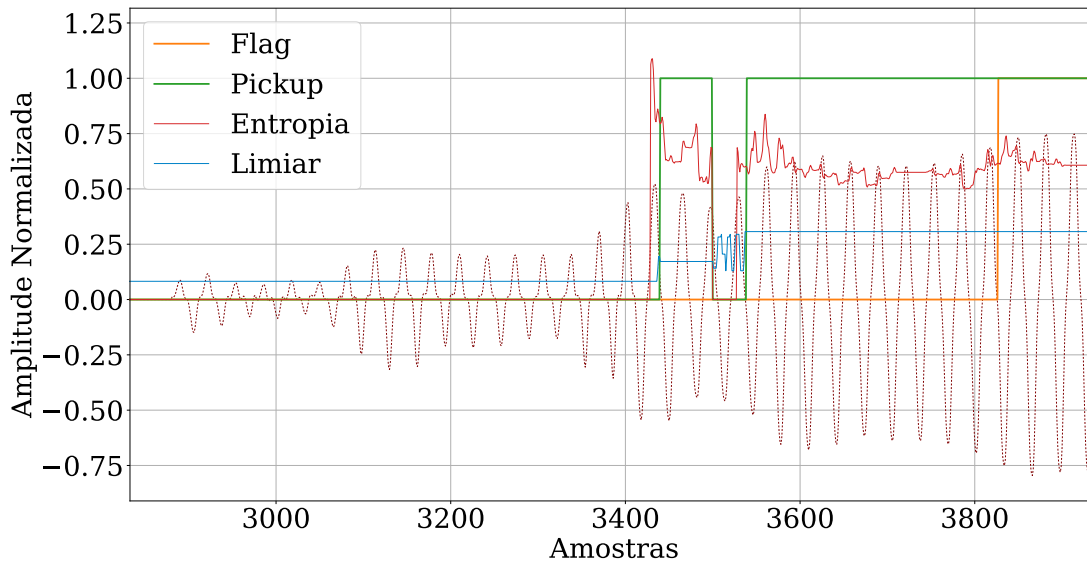
Tabela 3 – Parâmetros ajustados no método de detecção.

Parâmetro	Ajuste
$\lambda$	0,02
$\gamma$	$10^{-5}$
<i>Cont1Max</i>	9
<i>Cont2Max</i>	9

Fonte: Elaborada pelo autor.

É interessante mencionar também que, durante os instantes que o *Pickup* está ativo, o limiar não é atualizado.

Figura 20 – Exemplo de atuação do método para um sinal de FAI



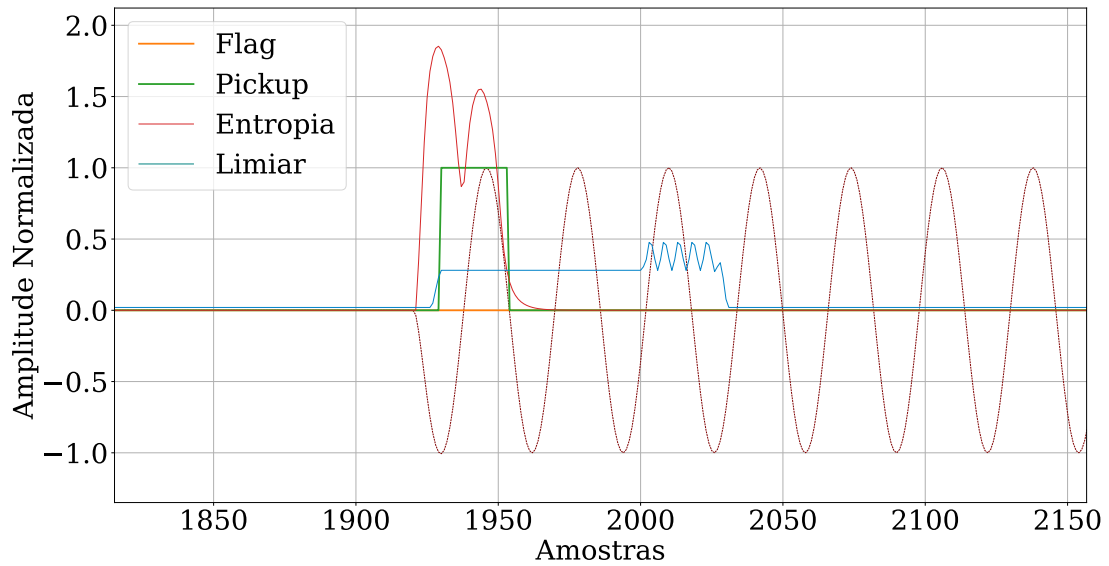
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 21 apresenta novamente o algoritmo com os mesmos ajustes, mas agora aplicado a um sinal de falta monofásica de baixa impedância. Nela, é possível notar que no instante de ocorrência da falta a entropia aumenta, dada a presença de algumas harmônicas durante o transitório. A medida que o sinal avança e o transitório termina, a entropia diminui. O aumento da entropia faz com que o *Pickup* seja ativado. Porém, como o transitório dura menos do que 9 ciclos, não há atuação da *flag* de detecção do evento.

#### 4.6 Avaliação estatística

A aleatoriedade dos eventos de FAI faz com que seja necessário avaliar o desempenho dos métodos de detecção por meio de análises sobre uma extensa quantidade de dados. Nesse sentido, para validação do algoritmo, foram analisados cenários do sistema com cargas equilibradas e desequilibradas, três níveis de carregamento, presença de três níveis de ruído: sem ruído, 60 dB e 50 dB. Por fim, foram avaliadas ocorrência de eventos

Figura 21 – Exemplo de atuação do método para um sinal de falta de baixa impedância



Fonte: Elaborado pelo autor.

simultâneos, como a ocorrência de FAI junto com a operação de forno a arco, retificador e geração distribuída. Também foram avaliados eventos não FAI junto com a operação desses equipamentos.

#### 4.6.1 Avaliações com o sistema equilibrado

A Tabela 4 sintetiza o desempenho do método de detecção proposto frente a diferentes cenários simulados com o sistema operando com equilíbrio entre as suas fases. As condições de atuação corretas foram todas as atuações em que o sistema estava de fato submetido a um evento de FAI, seja com a presença de outras fontes harmônicas ou não e a porcentagem obtida corresponde ao total de eventos de FAI avaliado, ou seja, 3288 para cada condição de operação. As atuações tidas como incorretas são aquelas em que o método detectou um evento que não era FAI e a porcentagem corresponde ao total de eventos não FAI avaliado, ou seja, 111 para cada condição de operação. A Tabela 4 permite perceber que, de maneira geral, as taxas de atuações corretas do método foram superiores a 90%. Também permite notar que o nível de carregamento não causou grandes impactos no desempenho do método. Esse comportamento já era esperado, uma vez que em condições equilibradas, mesmo que a corrente de fase seja elevada, a corrente residual obtida durante a operação do sistema é nula, passando a ser diferente de 0 apenas durante a ocorrência do evento. Por outro lado, o ruído teve um impacto bem mais expressivo nas taxas do método, especialmente nas taxas de detecção incorretas. Isso ocorre porque o ruído é um sinal aleatório em cada uma das fases e isso faz com que seja manifestado um valor de corrente residual também com comportamento aleatório. Adicionalmente, o Ruído Branco Gaussiano está distribuído uniformemente em todo o espectro de frequência. Isso faz com que a entropia da corrente residual do sistema varie de forma semelhante ao

que ocorre em casos de FAI, confundindo o método.

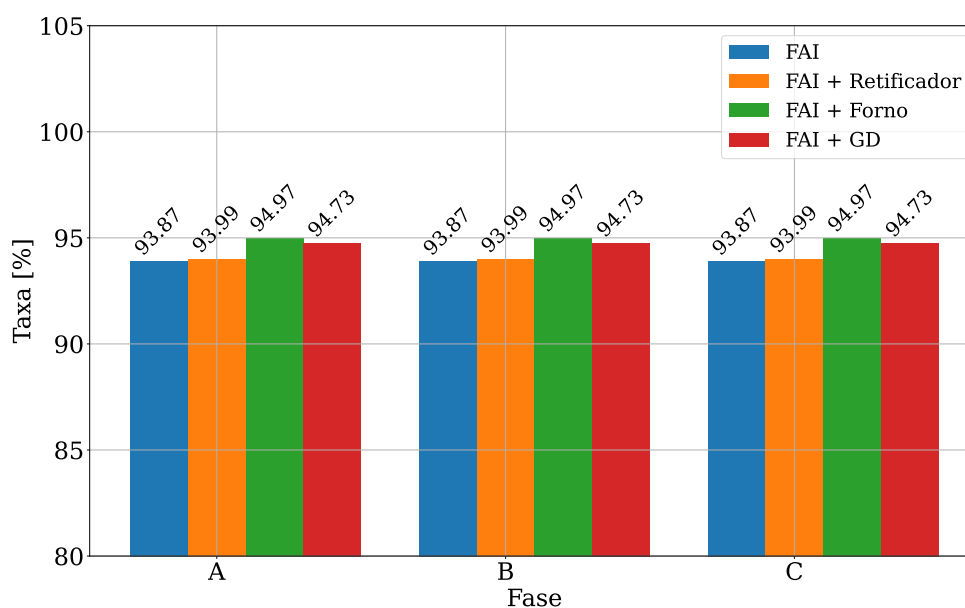
Tabela 4 – Taxas de acerto com o sistema equilibrado.

Ruído	Carregamento 100%		Carregamento 30%		Carregamento 10%	
	Correta	Incorreta	Correta	Incorreta	Correta	Incorreta
Sem Ruído	94,39%	0,00%	97,67%	0,00%	97,05%	0,00%
60 dB	94,97%	12,61%	97,67%	9,90%	97,21%	13,51%
50 dB	89,61%	18,01%	96,56%	20,72%	96,93%	20,72%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Embora as taxas de atuação incorretas tenham atingido valores em torno de 20% na presença do ruído, elas foram todas provenientes dos eventos de faltas monofásicas de baixa impedância. Não houve atuação incorreta para os demais eventos, o que ocorreu pelo caráter transitório deles. Assim, mesmo que possam ter sensibilizado o método, os 9 ciclos de espera foram suficientes para inibir a sua operação. Por outro lado, não foram avaliados casos de operação de proteção convencional contra faltas de baixa impedância e elas foram mantidas durante todo o período simulado. Logo, o transitório inicial provocado pelo evento mais a presença do ruído foram capazes de sensibilizar o método e levá-lo a operação, o que não aconteceria caso ela durasse menos do que 9 ciclos. Adicionalmente, a presença do ruído faz com que o método tenha dificuldade de identificar a condições de transitório do sistema para atuação do limiar pela elevada taxa de variação provocada por ele, inibindo que o limiar se adapte corretamente ao novo cenário com a falta.

Figura 22 – Taxas de detecção por fase para diferentes eventos de FAI com o sistema equilibrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 apresenta as taxas de detecção para os diferentes eventos de FAI

aplicados na três barras do sistema. É possível notar que não foram observados grandes impactos nas taxas de detecção de FAI causados pela existência prévia de harmônicos causados pela operação das cargas não lineares ou da geração distribuída, as taxas ficaram todas próximas a 94%. Esse padrão se manteve para outros níveis de carregamento e ruído, então não foram apresentados neste capítulo para evitar análises repetidas. Também não foram observadas divergências nessas taxas com relação às barras ou fases afetadas.

#### 4.6.2 Avaliações com o sistema desequilibrado

De maneira análoga ao descrito na seção anterior, a Tabela 5 apresenta o desempenho do método de detecção frente a diferentes condições de teste, agora com o sistema com fases desequilibradas. É possível notar que, assim como no caso anterior, o nível de carregamento e a presença do ruído provocam os mesmos impactos em condições de sistemas desequilibrados. Porém, o desequilíbrio prévio do sistema pode fazer com que as taxas de atuação incorretas sejam aumentadas e representa um aspecto a ser aprimorado em trabalhos futuros.

Tabela 5 – Taxas de acerto com o sistema desequilibrado.

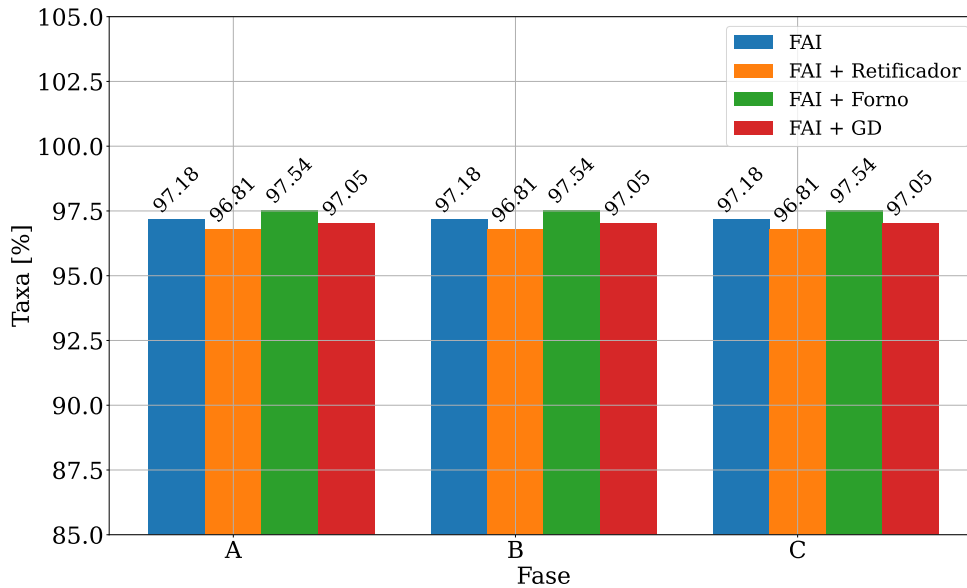
Ruído	Carregamento 100%		Carregamento 30%		Carregamento 10%	
	Correta	Incorreta	Correta	Incorreta	Correta	Incorreta
Sem Ruído	97,15%	1,80%	99,81%	2,70%	97,45%	0,90%
60 dB	97,18%	33,33%	99,87%	34,23%	97,70%	10,81%
50 dB	91,48%	41,44%	98,40%	32,43%	97,57%	19,81%

Fonte: Elaborada pelo autor.

De forma semelhante ao que ocorre com o sistema equilibrado, o ruído também teve impacto nas taxas de atuação incorreta para a condição desequilibrada. Além das atuações para os eventos de faltas de baixa impedância, ele também dificultou a diferenciação entre FAI e alguns dos outros eventos. Com destaque para eventos de chaveamento com a presença pré-existente de harmônicas na rede e nas condições de carregamento 100% e 30%. Assim como ocorre com as condições de faltas monofásicas, o ruído dificulta a atualização do limiar por aumentar a taxa de variação da entropia e como existem harmônicas anteriores ao evento transitório, o limiar pode não conseguir se adaptar de forma apropriada ao evento.

A Figura 23 apresenta a taxa de detecção de FAI junto com fontes harmônicas aplicada nas diferentes fases do sistema. Assim como observado no estudo com a carga equilibrada, a pré-existência de harmônicas não provocou grandes impactos nas taxas de detecção, as quais permaneceram próximas 97%. Adicionalmente, não foram observadas variações nas taxas de detecção com a fase ou barra em que a falta foi aplicada. Adicionalmente, esse comportamento foi observado em todos os níveis de carregamento.

Figura 23 – Taxas de detecção por fase para diferentes eventos de FAI com o sistema desequilibrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.7 Análise de sensibilidade aos ajustes

Esta seção apresenta uma nova proposta de ajustes que buscam diminuir os erros do algoritmo em detectar eventos que não são FAI, mesmo que as taxas de acerto para eventos de FAI também sejam afetadas. Logo, a Tabela 6 apresenta o novo conjunto de ajustes. Uma vez que o ruído não apenas insere um *offset* na entropia, como também faz com que ela varie a cada amostra, a principal modificação nos ajustes foi com relação ao limiar mínimo de operação do método. Foi necessário aumentar o valor de  $\lambda$  para que ele pudesse corresponder a esse *offset* sem depender da atualização do limiar auto-adaptativo, visto que a alta variação provocada pelo ruído pode fazer com que o algoritmo identifique o cenário como um período transitório constantemente. Uma outra vertente de ajuste poderia ser aumentar o valor de  $\gamma$  para diminuir o rigor do algoritmo em distinguir entre transitórios e regime permanente. Porém, essa opção faria com que o limiar se adaptasse à entropia sempre que ocorresse uma variação nela, o que na prática impede a detecção dos eventos. Adicionalmente, também foi necessário incrementar o valor de *Cont1Max* para aumentar a tolerância do método frente a aleatoriedade provocada pelo ruído. Por fim, o valor  $\gamma$  foi decrementado para aumentar a estabilidade do limiar e diminuir a sua taxa de atualização para reforçar o aumento de  $\lambda$ .

A Figura 24 apresenta o mesmo sinal de falta monofásica ilustrado na Figura 21 com os mesmos ajustes da seção anterior, mas agora com a aplicação de um ruído com SNR de 60 dB. Nela, é possível notar que o período transitório não sofre grandes impactos pela presença do ruído e o comportamento do algoritmo é semelhante àquele observado Figura 21. Porém, após a ocorrência da falta e com o sistema já operando em regime, é possível

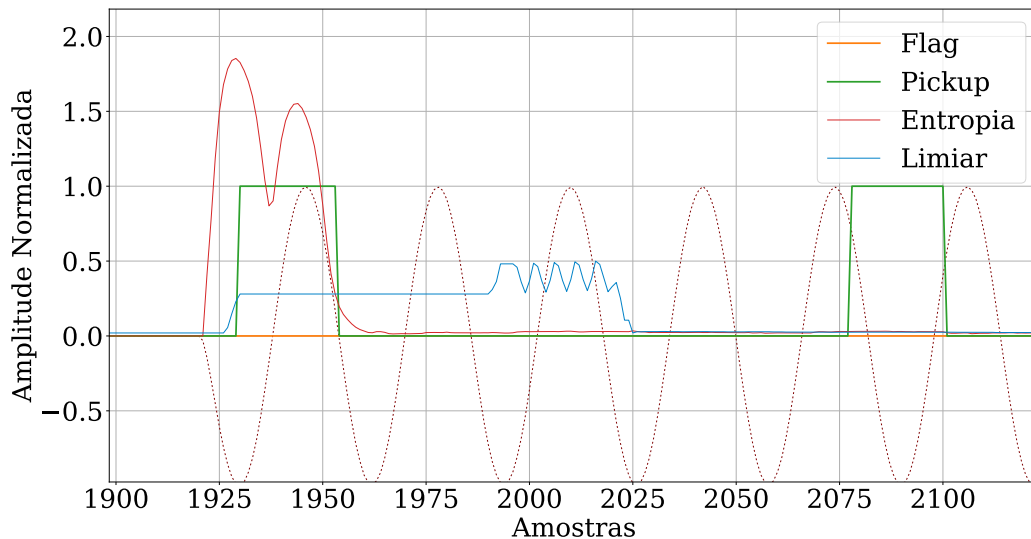
Tabela 6 – Novos parâmetros ajustados no método de detecção.

Parâmetro	Ajuste
$\lambda$	0,0824
$\gamma$	$10^{-6}$
<i>Cont1Max</i>	12
<i>Cont2Max</i>	9

Fonte: Elaborada pelo autor.

notar que o ruído faz com que exista um *offset* na entropia próxima ao limiar mínimo ajustado no método. Como esse ruído é próximo do valor ajustado e varia constantemente, isso pode acabar sensibilizando o algoritmo e ativando o *Pickup*, como acontece próximo da amostra 2075 na Figura 24.

Figura 24 – Exemplo de atuação do método com parâmetros antigos para um sinal de falta de baixa impedância com ruído



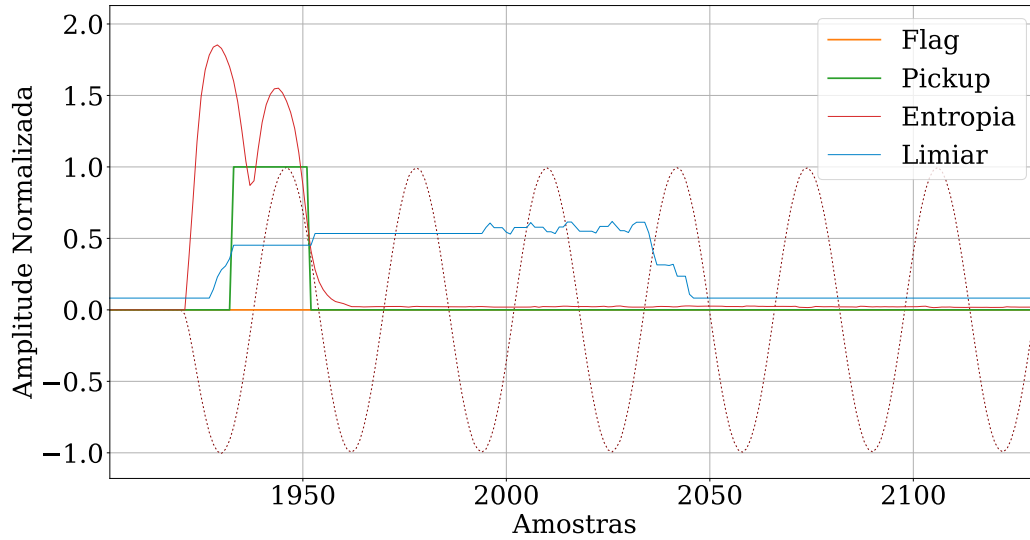
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 25, por sua vez, apresenta o mesmo sinal de falta monofásica com ruído de 60 dB, mas agora o algoritmo foi parametrizado com os novos ajustes. Nela, é possível perceber que, embora o valor de  $\gamma$  tenha diminuído, o limiar ainda é capaz de se ajustar às variações do sistema. Adicionalmente, o aumento no valor de  $\lambda$  fez com que houvesse maior distância entre o ajuste e o valor do *offset* provocado pelo ruído, garantindo que a sua variação não sensibilizasse o método.

Por fim, para validar os novos ajustes, foi realizado um novo conjunto de testes. Para isso, foram sorteados 100 casos de cada categoria: FAI com sistema equilibrado, FAI com sistema desequilibrado, não FAI com sistema equilibrado, não FAI com sistema desequilibrado. Foi aplicado um ruído de 60 dB em cada um desses sinais para então ser avaliado o desempenho do algoritmo. O sorteio foi realizado sem distinguir o nível de



Figura 25 – Exemplo de atuação do método com parâmetros novos para um sinal de falta de baixa impedância com ruído



Fonte: Elaborado pelo autor.

carregamento do sistema. Assim, a Tabela 7 sintetiza os resultados encontrados com os ajustes da Tabela 6 e os compara com os resultados sobre os mesmos eventos ao aplicar o método com os ajustes da Tabela 3. Sobre os novos ajustes, é possível notar que não houve diferença entre os cenários de sistema equilibrado e desequilibrado. Também é possível notar que ambas as taxas, atuação correta e incorreta, reduziram consideravelmente quando comparada com a proposta de ajustes da Tabela 3. O impacto nas atuações corretas está diretamente relacionado ao fato de que alguns eventos de FAI possuem uma baixa corrente de defeito e, assim, não sensibilizaram o método com um limiar mínimo maior do que o ajustado anteriormente. Ao mesmo tempo, os casos de atuação incorreta também reduziram consideravelmente pelos motivos discutidos na Figura 25.

Tabela 7 – Taxas de acerto com os novos parâmetros.

Ajuste	Equilibrado		Desequilibrado	
	Correta	Incorreta	Correta	Incorreta
Tabela 6	80,00%	1,00%	80,00%	1,00%
Tabela 3	96,00%	9,00%	99,00%	30,00%

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.8 Considerações finais

Este capítulo apresentou a proposta de método de detecção de FAI desenvolvida. Foram apresentadas duas propostas de ajustes. Uma com maior taxa de acerto dos eventos de FAI, mas que foi bastante impactada pela presença de ruído nos sinais avaliados. Outra com uma taxa de acerto menor, porém mais robusta com relação ao impacto do ruído.

Os resultados obtidos demonstraram potenciais para a aplicação da Entropia de Shannon como métrica para detecção de FAI que podem ser mais exploradas em trabalhos futuros.

Adicionalmente, os tempos de detecção dos eventos variaram em uma janela de 150 ms a 4 s. Esse tempo foi calculado a partir do momento de ruptura do cabo. Contudo, como o algoritmo depende da formação do arco elétrico para detectar o evento e a ignição dele pode variar a cada teste avaliado, não foi realizado um estudo de tempo médio gasto para detectar os eventos.



## 5 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo desenvolver um método de detecção de FAI baseado na entropia do espectro harmônico da corrente medida apenas na subestação do sistema. Dentre os critérios de desenvolvimento do método, também buscou-se adotar ferramentas com baixo custo computacional de maneira a facilitar a sua implementação prática em trabalhos futuros. Também fez parte do escopo dessa dissertação o desenvolvimento de banco de dados de eventos que representasse diferentes distúrbios que podem ocorrer em sistemas de distribuição, bem como aproximar esses dados de cenários reais de operação com a aplicação de cargas não lineares e geradores distribuídos.

Neste sentido, foi realizada uma revisão bibliográfica com o intuito de caracterizar o estado da arte das pesquisas relacionadas à FAI, especialmente com trabalhos publicados com implementações em *hardware*. Na revisão bibliográfica, o evento de FAI foi caracterizado com relação ao sinal de corrente monitorado durante a falta, bem como com relação ao conteúdo harmônico obtido devido ao surgimento do arco elétrico presente na forma de onda da corrente. Também foram levantados os modelos de falta utilizados para simular a FAI, os tipos de métodos de detecção desenvolvidos atualmente e a forma como são avaliados.

Assim, o algoritmo proposto apresenta duas etapas para detecção e confirmação do evento. A primeira etapa como métrica a Entropia de Shannon aplicada ao espectro de frequência de um ciclo da corrente residual calculada a partir das correntes de fase. Para obter o espectro de frequência emprega a Transformada Discreta de Fourier, ferramenta já bastante explorada pela literatura. Por fim, foi proposta uma lógica de atualização do seu limiar por meio da aplicação dos filtros de Savitzk-Golay. Todas as ferramentas adotadas para o desenvolvimento do método possuem baixo consumo computacional.

Por fim, com o banco de dados obtido a partir da metodologia descrita no Capítulo 3 foi possível avaliar o desempenho do método considerando as diferentes condições de operação. Dentre elas, destacam-se os testes realizados com a combinações de eventos transitórios durante a operação de cargas não lineares. Esse tipo de teste pode revelar características de atuação dos métodos bastante importantes por fornecerem a oportunidade de avaliar o método frente a existência prévia de harmônicas na rede. Destaca-se que esse tipo de avaliação não foi encontrado na etapa de revisão bibliográfica.

De modo geral, os resultados obtidos com a aplicação da Entropia de Shannon como métrica para caracterizar e detectar a FAI se mostraram promissores e revelam um campo com potencial para futuros trabalhos. O método apresentado foi capaz de detectar eventos de FAI com uma taxa de acerto superior a 90% em condições de teste bastante

rigorosas. Ele também possui flexibilidade para que novos ajustes sejam avaliados de forma a deixar o método ainda mais robusto. Destaca-se também a importância da discussão sobre o compromisso em detectar os eventos de FAI em detrimento de garantir que não haja falsos positivos, como visto na Tabela 7, onde são comparados resultados do método com dois ajustes distintos. Adicionalmente, as considerações a respeito da ocorrência de eventos durante a operação de cargas não lineares e geradores distribuídos marcam uma das contribuições propostas por esse trabalho.

## 5.1 Proposta para trabalhos futuros

Esta dissertação introduziu a Entropia de Shannon aplicada ao espectro de frequência como métrica para detectar eventos de FAI. São algumas propostas de trabalhos futuros:

- Avaliar a metodologia proposta considerando diferentes pontos de medição e medições distribuídas pela rede;
- Implementar o algoritmo proposto em *hardware*;
- Avaliar o método considerando diferentes topologias de rede e tipos de aterramento;
- Avaliar outras estratégias para o limiar auto-adaptativo;
- Avaliar outros possíveis critérios para confirmar a ocorrência da FAI, como restrições baseadas em harmônicas específicas;
- Analisar detalhadamente os casos de atuação incorreta em função dos ajustes;
- Investigar meios para tornar o método mais robusto;
- Avaliar a metodologia em sistemas com outros modelos de geração distribuída, controles e representação da fonte primária.

## REFERÊNCIAS

- AFSHAR, M. *et al.* Analyzing performance of relays for high impedance fault (HIF) detection using hardware-in-the-loop (HIL) platform. **Electric Power Systems Research**, v. 209, p. 108027, 8 2022. ISSN 03787796.
- AFSHAR, M. *et al.* High impedance fault detection in a practical platform using a real-time-digital simulator. *In: . [S.l.: s.n.]: IEEE, 2022. p. 1–6. ISBN 978-1-6654-7902-8.*
- ASGHARIGOVAR, S. *et al.* Adaptive CWT-based overcurrent protection for smart distribution grids considering CT saturation and high-impedance fault. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 12, p. 1366–1373, 3 2018. ISSN 1751-8695.
- AUCOIN, B.; RUSSELL, B. Distribution high impedance fault detection utilizing high frequency current components. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-101, p. 1596–1606, 6 1982. ISSN 0018-9510.
- AUCOIN, M.; RUSSELL, B. D. Detection of distribution high impedance faults using burst noise signals near 60 Hz. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 2, p. 342–348, 1987. ISSN 0885-8977.
- BHANDIA, R. *et al.* High impedance fault detection in real-time and evaluation using hardware-in-loop testing. *In: . [S.l.: s.n.]: IEEE, 2018. p. 182–187. ISBN 978-1-5090-6684-1.*
- BHANDIA, R. *et al.* High impedance fault detection using advanced distortion detection technique. **IEEE Transactions on Power Delivery**, p. 2598 – 2611, 2020. ISSN 0885-8977.
- CHEN, J. *et al.* Detection of high impedance faults using current transformers for sensing and identification based on features extracted using wavelet transform. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 10, p. 2990–2998, 9 2016. ISSN 1751-8687.
- COVER, T. M.; THOMAS, J. A. **Elements of Information Theory**. United States: Wiley-Interscience, 2012.
- CUI, Q.; WENG, Y. Enhance high impedance fault detection and location accuracy via  $\mu$ -PMUs. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 11, p. 797–809, 1 2020. ISSN 1949-3053.
- DUBEY, K.; JENA, P. Impedance angle-based differential protection scheme for microgrid feeders. **IEEE Systems Journal**, v. 15, p. 3291–3300, 9 2021. ISSN 1932-8184.
- EL-HAMRAWY, A. H.; MEGAHEDE, A.; ABBASY, N. H. A novel detection method for high impedance fault based real-time modeling and simulation. *In: . [S.l.: s.n.]: IEEE, 2021. p. 1–5. ISBN 978-1-6654-0311-5.*
- EMANUEL, A. *et al.* 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**, v. 5, p. 676–686, 4 1990. ISSN 08858977.
- ETEMADI, A.; SANAYE-PASAND, M. High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 2, p. 110, 2008. ISSN 17518687.

GASHTEROODKHANI, O.; MAJIDI, M.; ETEZADI-AMOLI, M. Fire hazard mitigation in distribution systems through high impedance fault detection. **Electric Power Systems Research**, v. 192, p. 106928, 3 2021. ISSN 03787796.

GAUTAM, S.; BRAHMA. Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, p. 1226–1234, 5 2013. ISSN 0885-8950.

GHADERI, A.; GINN, H. L.; MOHAMMADPOUR, H. A. High impedance fault detection: A review. **Electric Power Systems Research**, v. 143, p. 376–388, 2 2017. ISSN 03787796.

GOLAY, A. S. and M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627–1639, 1964.

GOMES, D.; OZANSOY, C. High-impedance faults in power distribution systems: A narrative of the field's developments. **ISA Transactions**, ISA - Instrumentation, Systems, and Automation Society, v. 118, p. 15–34, 12 2021. ISSN 00190578.

HEIDARI, S. *et al.* Performance evaluation of HHT and WT for detection of hif and CT saturation in smart grids. **Turkish Journal Of Electrical Engineering & Computer Sciences**, v. 29, p. 2403–2415, 9 2021. ISSN 13036203.

HOJE, P. **Poda irregular de árvore causou queda de fio que matou animais no Piauí, diz Equatorial - Municípios**. 2023. Disponível em: <https://piauihoje.com/noticias/municipios/poda-irregular-de-arvore-causou-queda-de-fio-que-matou-animais-no-piaui-diz-equatorial-413995.html>.

ISCUISSATI, R. de B. **Metodologias Probabilísticas para Análise de Falha da Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Distribuídos**. Mar 2022. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP, São Carlos, Mar 2022. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-13042022-111449/pt-br.php>.

KANTRA, S.; ABDELSALAM, H. A.; MAKRAM, E. B. Application of PMU to detect high impedance fault using statistical analysis. *In: . [S.l.: s.n.]: IEEE, 2016. p. 1–5. ISBN 978-1-5090-4168-8.*

LI, J. *et al.* An FTU-based method for locating single-phase high-impedance faults using transient zero-sequence admittance in resonant grounding systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 37, p. 913–922, 4 2022. ISSN 0885-8977.

LI, J. *et al.* High-impedance ground faulted line-section location method for a resonant grounding system based on the zero-sequence current's declining periodic component. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 119, p. 105910, 7 2020. ISSN 01420615.

LOPES, G. *et al.* High impedance fault detection based on harmonic energy variation via S-transform. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 136, p. 107681, 3 2022. ISSN 01420615.

MACEDO, J. R. *et al.* Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 9, p. 2593–2601, 12 2015. ISSN 1751-8695.

Sarah C. McAllister, Thomas J. Nowicki e Grzegorz M. Swirszcz. **Intelligent, self-propelled automatic grid crawler high impedance fault detection and high impedance fault detector and high impedance fault detecting system**. 2009. US 7,496.459 B2.

METROPOLES. **Fio de alta tensão que matou crianças no DF tinha uma “emenda” | Metrôpoles**. 2023. Disponível em: <https://www.metropoles.com/distrito-federal/fio-de-alta-tensao-que-matou-criancas-no-df-tinha-uma-emenda>.

MINAS, A. **Agência Minas Gerais | População deve ter máxima atenção em casos de fios partidos na rede elétrica**. 2021. Disponível em: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/populacao-deve-ter-maxima-atencao-em-casos-de-fios-partidos-na-rede-eletrica>.

MISHRA, M.; PANIGRAHI, R. R. Taxonomy of high impedance fault detection algorithm. **Measurement**, v. 148, p. 106955, 12 2019. ISSN 02632241.

PENALOZA, F. J. **ATPDraw - The graphical preprocessor to ATP Eletromagnetic Transients Program**. 2023. Disponível em: <https://www.atpdraw.net/showpost.php?id=100&kind=0>.

PIGNATI, M. *et al.* Fault detection and faulted line identification in active distribution networks using synchrophasors-based real-time state estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, p. 381–392, 2 2017. ISSN 0885-8977.

RUSSELL, B.; CHINCHALI, R.; KIM, C. Behaviour of low frequency spectra during arcing fault and switching events. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, p. 1485–1492, 1988. ISSN 08858977.

SALLES, N. J. de. **Modelagem e análise dinamica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica na presença de geradores síncronos**. Mar 2007. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Mar 2007.

SANTOS, W. C. dos *et al.* High impedance faults: From field tests to modeling. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 24, p. 885–896, 12 2013. ISSN 2195-3880.

SEDIGHI, A. R.; HAGHIFAM, M. R. Simulation of high impedance ground fault in electrical power distribution systems. *In: . [S.l.: s.n.]: IEEE, 2010. p. 1–7. ISBN 978-1-4244-5938-4.*

SILVA, M. P. da; LOPES, G. N.; VIEIRA, J. C. M. Evaluation of current transformers impact on harmonics caused by high impedance faults. *In: 2023 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT-LA). [S.l.: s.n.], 2023. p. 420–424.*

SILVA, M. P. da *et al.* Implementação de um modelo de falta de alta impedância para simulações em tempo real e testes em malha fechada. **XIX Encontro Regional Ibero-Americano do Cigre - ERIAC**, Cigre, 5 2023.

SUBRAMANIAN, S.; VENKATARAMAN, K. Detection of high impedance fault in mv distribution system. *In: . [S.l.: s.n.]: IET, 2012. p. P19–P19. ISBN 978-1-84919-620-8.*



TANG, T. *et al.* Single-phase high-impedance fault protection for low-resistance grounded distribution network. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 12, p. 2462–2470, 5 2018. ISSN 1751-8695.

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, 4 2022. ISSN 03787796.

VIANNA, J.; ARAUJO, L.; PENIDO, D. High impedance fault area location in distribution systems based on current zero sequence component. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, p. 759–766, 2 2016. ISSN 1548-0992.

WAI, D. C. T.; YIBIN, X. A novel technique for high impedance fault identification. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, p. 738–744, 7 1998. ISSN 08858977.

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, p. 3783–3791, 7 2018. ISSN 1949-3053.

WEI, M. *et al.* Distortion-controllable arc modeling for high impedance arc fault in the distribution network. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 36, p. 52–63, 2 2021. ISSN 0885-8977.

WESTER, C. High impedance fault detection on distribution systems. *In: . [S.l.: s.n.]: IEEE, 1998. p. c5–1–5. ISBN 0-7803-4459-6.*

WONTROBA, A. *et al.* High-impedance fault detection on downed conductor in overhead distribution networks. **Electric Power Systems Research**, v. 211, p. 108216, 10 2022. ISSN 03787796.

## APÊNDICE A – DADOS REFERENTES DO SISTEMA TESTE

A seguir são apresentados os dados referentes ao sistema adotado para os testes e validação do método de detecção de FAI. A subestação desse sistema conta com um transformador com potência de 20 MVA e relação de 138/11,9 kV. A Tabela 8 apresenta os dados de cada um dos transformadores de média tensão.

Tabela 8 – Dados dos transformadores

	Potência nominal	Configuração*	Tensão primária	Tensão secundária
T1	125 kVA	$\Delta - Y$	11,9 kV	220 V
T2	250 kVA	$\Delta - Y$	11,9 kV	220 V

\* Lado de Y é aterrado.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 9 apresenta os dados de cada uma das linhas de distribuição que compõem o sistema. São apresentados os parâmetros de sequência positiva (índice 1) e de sequência zero (índice 0).

Tabela 9 – Dados das linhas de distribuição

	$R_1$	$X_1^L$	$X_1^C$	$R_0$	$X_0^L$	$X_0^C$
L12	1,72 $\Omega$	3,84 $\Omega$	2,28 M $\Omega$	3,50 $\Omega$	20,97 $\Omega$	6,62 M $\Omega$
L13	0,172 $\Omega$	0,384 $\Omega$	0,23 M $\Omega$	0,350 $\Omega$	2,097 $\Omega$	0,66 M $\Omega$
L34	0,516 $\Omega$	1,15 $\Omega$	0,69 M $\Omega$	1,05 $\Omega$	6,29 $\Omega$	1,99 M $\Omega$
L35	1,72 $\Omega$	3,84 $\Omega$	2,28 M $\Omega$	3,50 $\Omega$	20,97 $\Omega$	6,62 M $\Omega$
L56	0,86 $\Omega$	1,92 $\Omega$	1,14 M $\Omega$	1,75 $\Omega$	10,48 $\Omega$	3,3 M $\Omega$
L67	0,172 $\Omega$	0,384 $\Omega$	0,23 M $\Omega$	0,350 $\Omega$	2,097 $\Omega$	0,66 M $\Omega$
L68	0,172 $\Omega$	0,384 $\Omega$	0,23 M $\Omega$	0,350 $\Omega$	2,097 $\Omega$	0,66 M $\Omega$
L89	0,172 $\Omega$	0,384 $\Omega$	0,23 M $\Omega$	0,350 $\Omega$	2,097 $\Omega$	0,66 M $\Omega$

L - Reatância indutiva série.

C - Reatância capacitiva *shunt*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 10 apresenta as cargas presentes no sistema. Elas foram modeladas como uma impedância RL paralela. As potências foram atribuídas de forma a atingir aproximadamente 40% da potência nominal do sistema.

Tabela 10 – Dados das cargas

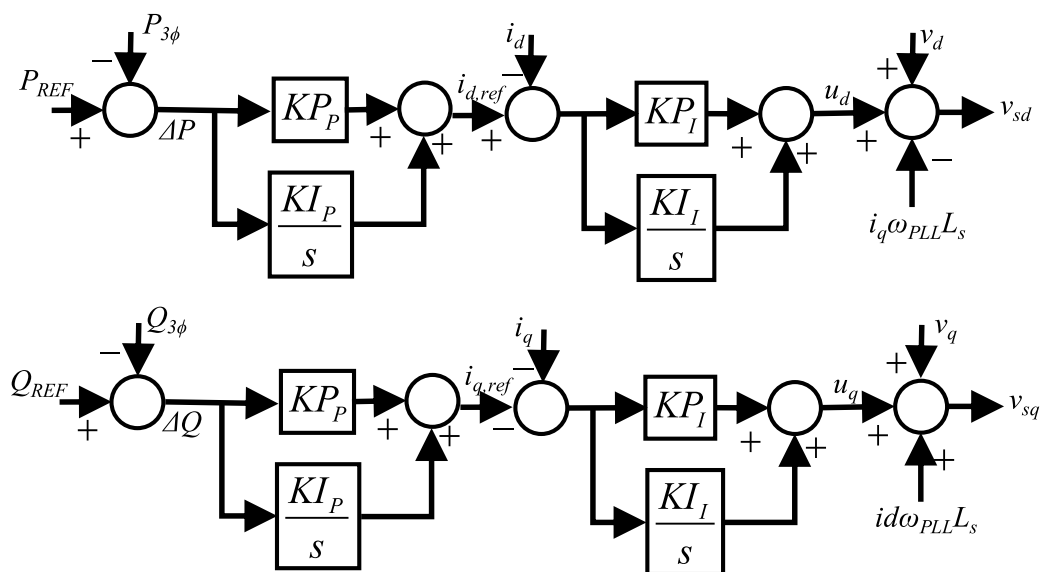
	<b>P</b>	<b>Q</b>
C2	2,5 MW	0,8 MVA <sub>r</sub>
C7	2,5 MW	0,8 MVA <sub>r</sub>
C9	2,5 MW	0,8 MVA <sub>r</sub>
C10	190 kW	62 kVA <sub>r</sub>
C11	95 kW	31 kVA <sub>r</sub>

Fonte: Elaborada pelo autor.

## APÊNDICE B – CÓDIGO UTILIZADO NO CONTROLE DO GERADOR DISTRIBUÍDO

Este Apêndice apresenta a estrutura do controle utilizada no inversor do gerador. Ela utiliza o sistema de coordenadas  $dq$  para desacoplar os controles de potência ativa e reativa e duas malhas de controle para ajustar a corrente e a tensão geradas. A Figura 26 apresenta o diagrama de blocos que representa esse sistema de controle.

Figura 26 – Diagrama de blocos do controle do gerador distribuído



Fonte: Adaptado de (ISCUISSATI, 2022).

O código apresentado a seguir foi implementado em *Models* no ATP com a lógica de controle da Figura 26. Assim, ele contém a forma como cada bloco foi programado e os valores de cada um dos ganhos adotados.

```

1 MODEL VSC
2 DATA
3   freq    {dflt:60} -- Valor em Hz
4   Tf_PLL  {dflt:0.001}
5   Ki_PLL  {dflt:0.01}
6   Kp_PLL  {dflt:10}
7   Tf_PQ   {dflt:0.01}
8   KI_I    {dflt:10}
9   KP_I    {dflt:3}
10  KP_PQ   {dflt:0.01}
11  KI_PQ   {dflt:1}
12  Sbase   {dflt:500000} -- Valor em VA
13  Vbase   {dflt:660} -- Valor em V

```

```
14     Ls      {dflt:0.0207} -- Valor do indutor Li em H
15     Pref    {dflt:0.7}  -- Valor em pu
16     Qref    {dflt:0.01} -- Valor em pu
17
18 INPUT
19     V[1..3]
20     I[1..3]
21
22 OUTPUT
23     Vs[1..3]
24
25 VAR
26     fPLL, w, theta, angle
27     Vd, Vq, Vdfilt, Vqfilt
28     Id, Iq, Idfilt, Iqfilt
29     P, Q, Pfilt, Qfilt, DP, DQ
30     Ibase, Zbase
31
32     Id_ref, Iq_ref, DId, DIq
33     Ud, Uq, Vsd, Vsq, Vs[1..3]
34     time
35
36 HISTORY
37     angle {dflt:0}
38     w {dflt:0}
39     Vdfilt {dflt:0}
40     Vqfilt {dflt:0}
41     Idfilt {dflt:0}
42     Iqfilt {dflt:0}
43     Pfilt {dflt:0}
44     Qfilt {dflt:0}
45     Ud {dflt:0}
46     Uq {dflt:0}
47     Id_ref {dflt:0}
48     Iq_ref {dflt:0}
49     Vsd {dflt:0}
50     Vsq {dflt:0}
51
52 INIT
53     theta:=0
54     Ibase:=Sbase/(sqrt(3)*Vbase)
55     Zbase:=(Vbase/sqrt(3))/Ibase
```

```

56 ENDINIT
57
58 EXEC
59
60      -- Calcula componentes dq --
61      Vd := (2/3) * (V[1]*cos(theta) + V[2]*cos(theta - 2*pi/3) + V
[3]*cos(theta + 2*pi/3))/(Vbase*sqrt(1/3))
62      Vq := (-2/3) * (V[1]*sin(theta) + V[2]*sin(theta - 2*pi/3) +
V[3]*sin(theta + 2*pi/3))/(Vbase*sqrt(1/3))
63      claplace (Vqfilt/Vq) := (1|s0)/(1|s0 + Tf_PLL|s1)
64      claplace (Vdfilt/Vd) := (1|s0)/(1|s0 + Tf_PLL|s1)
65
66      Id := (2/3) * (I[1]*cos(theta) + I[2]*cos(theta - 2*pi/3) + I
[3]*cos(theta + 2*pi/3))/Ibase
67      Iq := (-2/3) * (I[1]*sin(theta) + I[2]*sin(theta - 2*pi/3) +
I[3]*sin(theta + 2*pi/3))/Ibase
68      claplace (Iqfilt/Iq) := (1|s0)/(1|s0 + Tf_PLL|s1)
69      claplace (Idfilt/Id) := (1|s0)/(1|s0 + Tf_PLL|s1)
70      -- Calcula componentes dq FIM --
71
72
73      -- Calcula Potencias --
74      P := (3/2)*(Vdfilt*Idfilt + Vqfilt*Iqfilt)
75      Q := (3/2)*(Vqfilt*Idfilt - Vdfilt*Iqfilt)
76      claplace (Pfilt/P) := (1|s0)/(1|s0 + Tf_PQ|s1)
77      claplace (Qfilt/Q) := (1|s0)/(1|s0 + Tf_PQ|s1)
78      -- Calcula Potencias FIM --
79
80      DP := Pref - Pfilt
81      DQ := Qref - Qfilt
82      claplace (Id_ref/DP) := (KI_PQ|s0 + KP_PQ|s1)/(1|s1)
83      claplace (Iq_ref/DQ) := (KI_PQ|s0 + KP_PQ|s1)/(1|s1)
84
85
86      DId := Id_ref - Idfilt
87      DIq := -Iq_ref - Iqfilt
88
89      claplace (Ud/DId) := (KI_I|s0 + KP_I|s1)/(1|s1)
90      claplace (Uq/DIq) := (KI_I|s0 + KP_I|s1)/(1|s1)
91
92      Vsd := Ud + Vdfilt - Iqfilt*(fPLL*Ls)/Zbase
93      Vsq := Uq + Vqfilt + Idfilt*(fPLL*Ls)/Zbase

```

```
94
95
96 Vs[1] := sqrt(2/3)*(Vsd*cos(theta) - Vsq*sin(theta))
97 Vs[2] := sqrt(2/3)*(Vsd*cos(theta - 2*pi/3) - Vsq*sin(theta -
2*pi/3))
98 Vs[3] := sqrt(2/3)*(Vsd*cos(theta + 2*pi/3) - Vsq*sin(theta +
2*pi/3))
99
100
101      -- Calcula PLL --
102 claplace (w/Vqfilt) := (Ki_PLL|s0 + Kp_PLL|s1)/(1|s1)
103 fPLL := w + 2*pi*freq
104 claplace (angle/fPLL) := (1|s0)/(1|s1)
105 theta := angle MOD (2*pi)
106      -- Calcula PLL FIM --
107
108 ENDEXEC
109 ENDMODEL
```

## APÊNDICE C – FUNÇÕES UTILIZADAS NOS PSEUDOCÓDIGOS

Este Apêndice apresenta os pseudocódigos das funções utilizadas no método de detecção. O Algoritmo 4 exibe a lógica utilizada para atualizar o *buffer* e o Algoritmo 5 mostra como o espectro foi normalizado.

---

**Algoritmo 4:** Função Atualiza\_Buffer

---

**Entrada:** *e, buffer*

```
1 buffer[primeira posição, penultima posição] ← buffer[segunda posição, fim]
2 buffer[fim] ← e
3 retorna buffer
```

---

---

**Algoritmo 5:** Função Normaliza

---

**Entrada:** *espectro*

```
1 pos ← 1
2 para cada item em espectro faça
3   | espectro_normalizado[pos] ← item/espectro[primeira posição]
4   | pos ← pos + 1
5 fim
6 retorna espectro_normalizado
```

---





***EESC • USP***