

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Carla Farage Cavalari

Localização de faltas de alta impedância monofásicas por minimização de erros em sistemas de distribuição

Juiz de Fora

2023

Carla Farage Cavalari

Localização de faltas de alta impedância monofásicas por minimização de erros em sistemas de distribuição

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Ramos de Araujo

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cavalari, Carla Farage.

Localização de faltas de alta impedância monofásicas por minimização de erros em sistemas de distribuição / Carla Farage Cavalari. -- 2023.

85 f.

Orientadora: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Coorientador: Leandro Ramos de Araujo

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2023.

1. Faltas de alta impedância. 2. Localização de faltas. 3. Sistemas de distribuição de energia. 4. Erros de medição. I. Araujo, Débora Rosana Ribeiro Penido, orient. II. Araujo, Leandro Ramos de, coorient. III. Título.

Carla Farage Cavalari

Localização de faltas de alta impedância monofásicas por minimização de erros em sistemas de distribuição

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em 25 de agosto de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo – Orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Leandro Ramos de Araujo – Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Marcelo Aroca Tomim
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Silvio Giuseppe Di Santo
Universidade de São Paulo

Juiz de Fora, 02/08/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Debora Rosana Ribeiro Penido Araujo, Professor(a)**, em 25/08/2023, às 17:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Ramos de Araujo, Professor(a)**, em 25/08/2023, às 17:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Aroca Tomim, Professor(a)**, em 26/08/2023, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Silvio Giuseppe Di Santo, Usuário Externo**, em 28/08/2023, às 09:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uffj (www2.uffj.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1388608** e o código CRC **C9061EE6**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Elisete e Sérgio por todo o suporte durante o mestrado, por se preocuparem comigo e quererem sempre me ver bem, mesmo eu tentando resolver meus problemas sozinha sem querer preocupá-los. Aproveito para pedir desculpas por duvidar que eu receberia apoio, hoje eu sei que pedir ajuda quando preciso não faz de mim uma pessoa mais fraca. Agradeço também à minha avó Tereza por todos os anos cuidando de mim.

Agradeço à Deus por estar viva mesmo depois de tudo.

Agradeço à minha orientadora Débora por todos os anos de orientação. Agradeço ao professor Leandro por me ensinar e dividir tanto comigo. Agradeço a ambos pela compreensão e apoio nos momentos em que estive mal.

Agradeço às minhas amigas e amigos que fiz e mantenho durante os anos, obrigada pelo ombro amigo, pelos memes, pelos momentos bons e pelas risadas que vocês me arrancam. Um agradecimento especial a Gabriel Hector, Lais Fonseca, Thales Curty, Matheus Malta, Marina Mattos e Pedro Henrique Lopes. Se eu estou aqui até hoje, vocês foram importantes para isso. Agradeço também a um amigo e companheiro que esteve comigo por muitos anos, Felipe Oliveira. Agradeço aos colegas e amigos que fiz no Nupesp pelos momentos de descontração.

Agradeço aos professores e aos profissionais técnicos e engenheiros que encontrei durante minha jornada.

Agradeço às pessoas que me ajudaram e ajudam a ter saúde mental e física, em especial a Graça Santos e Carolina Dittz.

Agradeço à Capes pelo incentivo financeiro durante o mestrado.

Agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora por toda a estrutura.

Agradeço às pessoas que lutam pelas instituições de ensino que vem sendo sucateadas, que defendem uma educação pública, gratuita e de qualidade. Agradeço às pessoas que acreditam na ciência e na pesquisa e às pessoas que, mesmo sendo privilegiadas, apoiam um país com menos desigualdade.

Por fim, agradeço a mim mesma por não ter desistido de tudo.

“O fim, que também é caminho, motivo do início de uma bonita e desafiadora jornada...
rumo aos recomeços.” (PIRES, 2020)

RESUMO

As faltas de alta impedância têm como principal característica uma baixa corrente de defeito, fazendo com que, na maioria das vezes, os sistemas de proteção convencionais não sejam sensibilizados. Nos últimos anos, as faltas de alta impedância vêm sendo tema de trabalhos na literatura, sendo que a maioria deles define métodos para detecção dessas faltas. Além da detecção, a localização de faltas é importante para que a equipe de manutenção possa efetuar o reparo com mais rapidez e reduzir o número de consumidores impactados com a interrupção no fornecimento de energia. Por esta razão, este trabalho propõe uma metodologia para localização de faltas de alta impedância monofásicas em sistemas de distribuição utilizando medições RMS sincronizadas através da minimização de erros das medições. Essa minimização consiste na resolução de um problema de programação não-linear inteira mista. O método é avaliado para sistemas de distribuição desequilibrados, com incertezas nas cargas e erros nas medições. A metodologia proposta apresentou bons resultados ao estimar o local da falta, mas verificou-se que a precisão dos resultados está atrelada aos erros acrescentados nos dados. Os sistemas IEEE 34 barras e IEEE 123 barras foram utilizados nos testes.

Palavras-chave: Sistemas de distribuição. Faltas de alta impedância. Localização de faltas. Erros de medição.

ABSTRACT

High impedance faults have as their main characteristic a low fault current, which means that, in most cases, conventional protection systems are not sensitive. In recent years, high impedance faults have been the subject of works in the literature, and most of them define methods for detecting these faults. In addition to detection, locating faults is important so that the maintenance team can carry out repairs more quickly and reduce the number of consumers impacted by the interruption in the energy supply. For this reason, this work proposes a methodology for locating single-phase high impedance faults in distribution systems using synchronized RMS measurements by minimizing measurement errors. This minimization consists of solving a mixed integer nonlinear programming problem. The method is evaluated for unbalanced distribution systems, with load uncertainties and measurement errors. The proposed methodology presented good results when estimating the location of the fault, but it was verified that the precision of the results is linked to the errors added to the data. The IEEE 34-node test feeder and IEEE 123-node test feeder were used in the tests.

Keywords: Distribution systems. High impedance faults. Fault detection and location. Exhaustive search.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de um Sistema Elétrico de Potência	16
Figura 2 – Rede de distribuição aérea com condutores nus	19
Figura 3 – Galhos de árvore encostados na rede elétrica em Palmas	20
Figura 4 – Taxonomia das técnicas de detecção de faltas de alta impedância	25
Figura 5 – Curvas tempo x corrente padronizadas	31
Figura 6 – Sistema IEEE 34 barras.....	32
Figura 7 – Sistema IEEE 123 barras.....	33
Figura 8 – Condutor rompido do lado da fonte	35
Figura 9 – Condutor rompido do lado da carga.....	35
Figura 10 – Contato de um condutor energizado com uma árvore	36
Figura 11 – Modelo puramente resistivo	37
Figura 12 – Corrente provocada por uma FAI	38
Figura 13 – Modelo proposto por Emanuel et al. (1990)	38
Figura 14 – Modelos de FAIs propostos por: (a) Sharat, Snider e Debnath (1993); (b) Nam et al. (2001); (c) Sheng e Rovnyak (2004); (d) Lai, Snider e Lo (2006).....	39
Figura 15 – Esquema de um sistema de medição fasorial sincronizada.....	41
Figura 16 – Modelo básico de um PMU.....	42
Figura 17 – Modelo da falta de alta impedância a ser localizada.....	44
Figura 18 – Fob para o nó 812 com FAI de 300Ω na mesma barra	47
Figura 19 – Comportamento da Fob para o nó 812 perto de 300Ω	47
Figura 20 – Comportamento das Fobs de nós próximos a 812	48
Figura 21 – Comportamento da Fob para o nó 54 do IEEE-123 com FAI de 200Ω	48
Figura 22 – Fluxograma do método de localização de FAIs.....	49
Figura 23 – Fob para R_m e R_{m+} em dois casos.....	52
Figura 24 – Comportamento da Fob na presença de erros	53
Figura 25 – Sistema IEEE 34 barras com medidores alocados	56
Figura 26 – Histogramas dos resultados para sistema IEEE-34 sem erros com resistência de (a) 100Ω , (b) 500Ω e (c) 1000Ω	57
Figura 27 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 100Ω	58

Figura 28 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 500Ω	59
Figura 29 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 1000Ω	59
Figura 30 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 2\%$ com resistência de 100Ω	60
Figura 31 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 2\%$ com resistência de 500Ω	60
Figura 32 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 2\%$ com resistência de 1000Ω	61
Figura 33 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 5\%$ com resistência de 100Ω	61
Figura 34 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 5\%$ com resistência de 500Ω	62
Figura 35 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 5\%$ com resistência de 1000Ω	62
Figura 36 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 10\%$ com resistência de 100Ω	63
Figura 37 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 10\%$ com resistência de 500Ω	64
Figura 38 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 10\%$ com resistência de 1000Ω	64
Figura 39 – Sistema IEEE 34 barras com cinco medidores	67
Figura 40 – Sistema IEEE 123 com medidores alocados	68
Figura 41 – Histogramas dos resultados para sistema IEEE-123 sem erros com resistência de (a) 50Ω , (b) 100Ω e (c) 500Ω	69
Figura 42 – Histograma para sistema IEEE-123 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 50Ω	70
Figura 43 – Histograma para sistema IEEE-123 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 100Ω	71
Figura 44 – Histograma para sistema IEEE-123 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 500Ω	71
Figura 45 – Aplicação do método da bisseção	83

Figura 46 – Função densidade de probabilidade de uma variável aleatória normal.....	85
Figura 47 – Ocorrência dos dados conforme desvio padrão em uma curva normal.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da análise com erros do IEEE-34	65
Tabela 2 – Ocorrências dos resultados da análise com erros do IEEE-34	66
Tabela 3 – Resultados da análise com cinco medidores no IEEE-34.....	67
Tabela 4 – Ocorrências dos resultados da análise com cinco medidores no IEEE-34	67
Tabela 5 – Resultados da análise com erros do IEEE-123	72
Tabela 6 – Ocorrências dos resultados da análise com erros do IEEE-34	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRACOPEL	Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade
AG	Algoritmo Genético
AMKELM	<i>Adaptive Multi-Kernel Extreme Learning Machine</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
DTCWT	<i>Dual Tree Complex Wavelet Transform</i>
EEMD	<i>Ensemble Empirical Mode Decomposition</i>
FAI	Falta de Alta Impedância
FDM	<i>Fourier Decomposition Method</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de Transmissão
MT	Média Tensão
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema
PDC	<i>Phasor Data Concentrator</i>
PNL	Programação Não-Linear
PNLIM	Programação Não-Linear Inteira Mista
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RNA	Rede Neural Artificial
RSMSVM	<i>Random Search Multilevel Support Vector Machine</i>
SAMU	<i>Stand-Alone Merging Units</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SD	Sistema de Distribuição
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência

SMFS	Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada
SV	<i>Sampled Values</i>
TC	Transformador de Corrente
TFWG	<i>Test Feeder Working Group</i>
TP	Transformador de Potencial
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
ZSNP	<i>Zero-Sequence Non-synchronized Protection</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	MOTIVAÇÕES	19
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
1.4	OBJETIVOS	26
1.5	PUBLICAÇÕES DECORRENTES.....	26
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
2	CONCEITOS E PREMISSAS BÁSICAS	28
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
2.2	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	28
2.2.1	Proteção dos Sistemas de Distribuição	29
2.2.2	Sistemas Teste	31
2.3	FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA.....	33
2.3.1	Modelos de FAIs	36
2.4	MEDIDORES	40
2.4.1	Medição Não-Fasorial	40
2.4.2	Medição Fasorial	41
2.4.3	Erros Associados à Medição	42
3	MÉTODO PROPOSTO	44
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	44
3.2	MODELAGEM DO PROBLEMA	45
3.3	MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FAIS	49
3.4	COMPORTAMENTO NA PRESENÇA DE ERROS	53
4	RESULTADOS	55
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
4.2	IEEE 34 BARRAS	55
4.2.1	Análise sem Erros	56
4.2.2	Análise com Erros	57
4.2.3	Análise de medidores	66
4.3	IEEE 123 BARRAS	68
4.3.1	Análise sem Erros	68
4.3.2	Análise com Erros	69

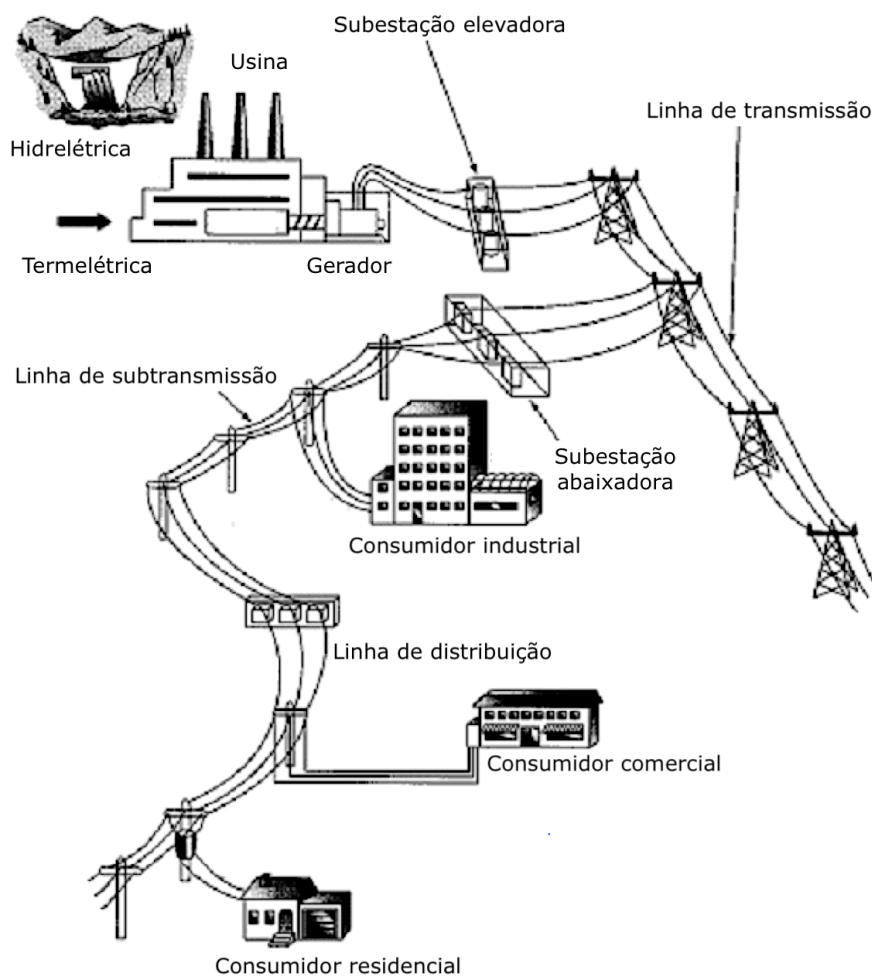
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.1	CONCLUSÕES	74
5.2	TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	77
	ANEXO A – MÉTODO DAS BISSEÇÕES.....	82
	ANEXO B – DESVIO PADRÃO	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A principal função de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é fornecer energia aos consumidores, sejam eles grandes ou pequenos, de acordo com a quantidade demandada e com a qualidade adequada (ROBBA *et al.*, 2020). Para exercer essa função, o SEP é composto por usinas, que geram energia elétrica a partir de diversos tipos de fontes primárias (hidráulica, térmica, eólica, solar, nuclear, dentre outras), essas são interligadas às subestações (SEs) e por meio de linhas de transmissão (LTs), juntamente com as linhas e subestações dos sistemas de subtransmissão, abastecem os sistemas de distribuição, que fornecem energia ao consumidor final (BICHELS, 2018). A Figura 1 mostra o esquema de um SEP.

Figura 1 – Esquema de um Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Lemmon (2017).

À medida em que o sistema elétrico se aproxima dos centros de carga, é necessário abaixar a tensão de transmissão. Essa função é feita pelas subestações de subtransmissão, reduzindo a tensão a um nível correspondente ainda à alta tensão (AT), como 69kV ou 138kV, mas mais baixo que o da transmissão. Dependendo da construção do sistema e da concessionária, essa função pode ser feita pela própria SE de distribuição, abaixando a tensão a partir da transmissão ou da subtransmissão para níveis do sistema de distribuição primária em média tensão (MT), como 13,8kV, por exemplo (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

A função dos Sistemas de Distribuição (SDs) é fornecer energia para os consumidores, podendo ser residenciais, comerciais ou industriais de pequeno porte. Os SDs são compostos pelos alimentadores primário e secundário. Este último tem origem nos transformadores de distribuição, quando a tensão é reduzida a níveis de utilização, como 127V ou 220V, e alimentam as residências e comércios de menor porte (BROWN, 2002).

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) deve atender a três aspectos: (i) operação adequada em condições normais, não ocorrendo interrupções no fornecimento, a partir de desligamentos ou curtos-circuitos; (ii) prevenir falhas, com manutenção de equipamentos e instalações; e (iii) mitigar os efeitos de falhas, fazendo com que seus impactos sejam mínimos, evitando que se alastrem pelo sistema e gerem grandes interrupções (BICHELS, 2018).

É possível garantir um bom funcionamento do sistema com planejamento, construção, operação e manutenção adequados, tendo a melhor relação custo-benefício para suprir as cargas considerando um determinado critério de atendimento. Quando uma indústria deixa de produzir por falhas na rede elétrica, impacta em custos tanto para ela própria, como para as empresas do setor elétrico quanto para os consumidores (OLIVEIRA; SILVEIRA; *et al.*, 2021). Uma confiabilidade total, isto é, uma garantia absoluta que o sistema não terá nenhum desligamento, é impossível considerando um custo razoável de energia, pois para aumentar a confiabilidade do sistema é necessário mais equipamentos e instalações, aumentando consideravelmente os custos (BICHELS, 2018). O estudo de confiabilidade leva em conta os custos das falhas e o custo de investimento no sistema elétrico para chegar a uma solução com custo total mínimo.

A qualidade do fornecimento de energia elétrica pode ser dividida em três áreas: a **qualidade do atendimento**, que é ligada ao relacionamento entre a concessionária e o consumidor, como procedimentos para ligação nova ou para elaboração de estudos, por exemplo; a **qualidade do serviço**, isto é, a continuidade do fornecimento; e a **qualidade do produto**, que está relacionada à forma de onda da tensão (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

Os problemas ocasionados pela baixa qualidade de energia podem provocar grandes prejuízos, principalmente para os consumidores industriais e comerciais. Neste intuito, as agências reguladoras têm, como uma de suas funções principais, a regulamentação e fiscalização dos serviços de energia elétrica através de indicadores (KAGAN; ROBBIA; SCHMIDT, 2009).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada em 1996 para regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica no Brasil. Neste sentido, a ANEEL zela pela qualidade do serviço (NERY, 2012). A ANEEL estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – que “normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e ao desempenho dos sistemas de distribuição” (ANEEL, 2022). O PRODIST é composto por 11 módulos, sendo que o Módulo 8 trata da qualidade do fornecimento de energia elétrica que estabelece, dentre outras coisas, os indicadores da qualidade do produto e do serviço.

Na grande maioria das cidades brasileiras, os sistemas de distribuição possuem redes aéreas, muitas vezes com cabos nus, opção mais barata do que utilizar cabos isolados ou protegidos. Esses alimentadores aéreos são considerados ultrapassados tecnologicamente e implicam numa menor confiabilidade do SD se comparado com redes com algum tipo de isolamento. Como as redes de distribuição estão dentro dos centros urbanos, elas estão vulneráveis a colisões, roubo, contato com materiais da construção civil, dentre outros. Além disso, os condutores nus disputam o espaço com árvores, que podem entrar em contato com a rede acidentalmente, gerando curto-circuito, rompimento de cabo, ou outros problemas (PENTEADO NETO, 2005). Um exemplo de rede aérea de distribuição com cabos nus pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Rede de distribuição aérea com condutores nus



Fonte: G1 (2020).

1.2 MOTIVAÇÕES

Como qualquer sistema elétrico de potência, os sistemas de distribuição possuem equipamentos destinados à sua proteção. Normalmente esses equipamentos atuam na proteção da rede quando são sensibilizados por uma corrente mais alta que um certo valor. A proteção por sobrecorrente nos SDs é feita por disjuntores, chaves fusíveis e religadores.

Um tipo de defeito caracterizado por uma alta impedância no ponto de contato de forma que os equipamentos de proteção contra sobrecorrente não o detectam corretamente é chamado falta de alta impedância (FAI). A alta impedância de contato implica numa corrente de defeito relativamente baixa, por isso a proteção da rede de distribuição acaba não sendo sensibilizada e o defeito pode passar despercebido para o sistema de proteção. Como consequência, o contato acidental com superfícies como solo, grama ou galhos de árvores por exemplo, gera risco de acidentes graves com pessoas ou animais, além do risco de incêndio (OLIVEIRA JÚNIOR, 2006).

Segundo a Abracopel (2016), é frequente casos de choques elétricos devido a fios partidos, postes e grades energizadas. Um problema agravado em épocas de chuvas é a queda de árvores, que podem ficar sob a rede de distribuição. Um caso onde uma árvore está totalmente entranhada na rede elétrica de 13,8kV na cidade de Campo Grande – MS fez com que algumas pessoas tomassem choques ao tocar na árvore. Os donos da casa cuja calçada está a árvore já pediram a poda diversas vezes e chegaram a colocar um aviso sobre a “árvore elétrica” (ABRACOPEL, 2016). Outro caso parecido foi noticiado em Palmas – TO, onde os

galhos de uma árvore, por falta de poda, encostam na rede de distribuição, como pode ser visto na Figura 3. Houve relatos de uma pequena chama ser avistada no meio dos galhos próximos a fiação (G1, 2019). Esses casos podem ser considerados faltas de alta impedância sem o rompimento de condutores e oferecem um perigo considerável para a população.

Figura 3 – Galhos de árvore encostados na rede elétrica em Palmas



Fonte: G1 (2019).

Do ponto de vista jurídico, em caso de danos oriundos das faltas de alta impedância, a concessionária pode ser parcialmente ou até mesmo totalmente responsabilizada. Para evitar a ocorrência de acidentes e diminuir a duração do defeito, de forma a evitar prejuízos tanto para os consumidores quanto para a concessionária, as faltas devem ser detectadas e extintas o mais rápido possível (KOTLINSKI, 2013).

Para que a concessionária possa isolar a área da falta, direcionar as equipes de manutenção para eventuais reparos e, assim, reestabelecer a energia no trecho desligado com mais rapidez e segurança, é necessário conhecer o local de ocorrência do defeito. Por isso, o processo de localização de faltas é importante e pode melhorar os índices de continuidade do fornecimento de energia da concessionária (FANUCCHI, 2014). Atualmente, determinar a localização do defeito para que possa ser feito o reparo pelas equipes de manutenção é realizado pela comunicação dos consumidores e/ou por inspeção visual.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste trabalho, a revisão bibliográfica é focada em trabalhos com métodos de localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. Foram priorizados trabalhos mais recentes.

No trabalho de Li *et al.* (2023), os autores propõem um método para localizar FAIs numa rede de distribuição de 10kV através do coeficiente de reflexão. Primeiramente, é obtido o modelo equivalente com parâmetros distribuídos para o cabo, em seguida, é determinado o espectro do coeficiente de reflexão. Uma transformação integral obtém a função de diagnóstico no domínio espacial. O valor máximo da função de diagnóstico em um cabo não defeituoso é no final de seu comprimento, já para um cabo com falta, o valor máximo da função ocorre no local do defeito. A janela de Kaiser foi aplicada para aumentar a sensibilidade do local da falta. Diferentes valores de resistência de falta foram testados e o método obteve sucesso na localização com resistências de até 2700Ω. FAIs também foram testadas em diferentes locais e o método tem uma queda significativa de sensibilidade quando o defeito ocorre próximo aos terminais.

Em Joga *et al.* (2023), é proposto um método para detectar, classificar e localizar faltas de alta impedância em sistemas de distribuição baseado na teoria dos grafos e na Máquina de Vetores de Suporte multinível de busca aleatória (RSMSVM). A Transformada Wavelet Complexa de Árvore Dupla (DTCWT) é utilizada para decompor os sinais de tensão e corrente pré e pós-falta e um Algoritmo Genético (AG) obtém os locais ótimos para os equipamentos de medição. O método localiza a zona da falta através da técnica de reconhecimento de padrões, feita pela RSMSVM. O método é testado em diferentes SDs com cargas equilibradas e desequilibradas, considerando também a presença de ruído nos sinais. Apesar disso, o trabalho não se propõe em determinar o local exato que ocorre a FAI, mas sim a zona em que ela ocorre no sistema.

Todos os tipos de falta de alta impedância em sistemas de distribuição com diferentes configurações e modos de operação são estudados em Sarangi *et al.* (2022). Os autores propõem um método para detectar e localizar FAIs, onde a falta é identificada através da energia diferencial. A técnica proposta é uma decomposição em modos empíricos por conjunto (EEMD) dos sinais de corrente que alimenta uma *machine learning* extrema multi-kernel adaptativa (AMKELM) para localizar a falta. O método foi aplicado no MATLAB/SIMULINK e foi testado também na presença de diferentes ruídos.

Focando em localizar faltas de alta impedância na presença de erros na medição, Yin *et al.* (2022) propõe um método que extrai as características da falta na presença de ruídos introduzidos pelos medidores de corrente através do método de decomposição de Fourier (FDM) adaptativo combinado com o algoritmo Fuzzy C-means. Extraídos os sinais gerados pela FAI com excelente precisão, o método busca centros de agrupamento baseado no esquema

densidade-distância para localizar a falta. Na literatura, este é um dos poucos, senão o único trabalho cujo objetivo principal é tratar os dados na presença de ruídos para conseguir localizar a FAI com precisão.

O método proposto por Mortazavi, Moravej e Shahrtash (2019) para localizar FAIs em SDs consiste em uma técnica de busca, onde os parâmetros da falta são estimados para cada local provável do defeito. Em cada local buscado, é determinado um modelo equivalente do sistema de distribuição a jusante para estimar a corrente de falta e os parâmetros do arco elétrico, que resultam num valor de tensão na entrada do sistema. O menor erro entre esta tensão simulada e a tensão medida na fase defeituosa obtém o local provável da falta. O desenvolvimento do trabalho é feito no domínio do tempo e usa o sistema IEEE 34-node test feeder para aplicação do método. O método é testado para condições de incertezas nas cargas e com ruídos nos sinais medidos. Como é esperado, o ruído adicionado diminui a precisão dos resultados por provocar uma diferença nos valores de tensão calculados.

O trabalho de Vianna *et al.* (2021) propõe um método para detectar e localizar a área de faltas de alta impedância envolvendo a terra em redes de distribuição de média tensão. Os autores chamam o método de proteção não sincronizada de sequência zero (ZSNP, do inglês *Zero-Sequence non-synchronized Protection*) pois as medições utilizadas são RMS e não utilizam o ângulo dos fasores. O sistema de distribuição é dividido em zonas *quasi*-diferenciais em que as faltas estão localizadas entre elas. A principal característica do trabalho, é usar uma proteção não sincronizada de sequência zero como proteção diferencial, analisando somente o módulo da corrente de sequência zero, fazendo com que o custo de implementação seja mais baixo que métodos que utilizam medições sincronizadas. O método foi testado nos sistemas IEEE 37 e IEEE 123 *Node Test Feeders* e apresenta bons resultados mesmo na presença de geração distribuída e reguladores de tensão e com variação de carga.

A partir das medições de *smart meters* nos lados de baixa tensão dos transformadores de distribuição, o método proposto por Vieira *et al.* (2018) analisa a queda de tensão em casos de falta de alta impedância com rompimento de condutor para detectar e localizar FAIs. Essa queda de tensão somente na fase com defeito produz um fator de desequilíbrio, que permite o algoritmo detectar FAIs tipo série. O método não é apropriado para faltas com dois condutores rompidos ou faltas *shunt*. A região em que a falta está localizada é determinada comparando os fatores de desequilíbrio entre os *smart meters* do sistema, até encontrar um que não apresenta este desequilíbrio.

Um modelo de sistema analítico é empregado em Ramos *et al.* (2020) para localizar faltas de alta impedância e determinar sua seção. O modelo analítico possui dois processos interdependentes: primeiro, a localização da FAI é estimada resolvendo o modelo no domínio da frequência por um processo de mínimos quadrados ponderados; segundo, uma análise estatística identifica a seção do defeito. Esta análise estatística se mostra necessária quando o sistema de distribuição possui ramais laterais, fazendo com que o método determine somente uma localização da falta, ao invés de múltiplas. O modelo de FAI usado pelos autores é com dois diodos antiparalelos e uma resistência. Os autores testaram o método nos sistemas IEEE 13 barras e IEEE 34 barras. Ainda, o método foi testado na presença de 1% de erro no sinal de tensão e 2% de erro no sinal de corrente e apresentou bons resultados.

Seguindo também uma formulação analítica para a localização de uma FAI em um sistema de distribuição, o trabalho de Nunes *et al.* (2019) propõe um método para localizar FAIs através do estimador de mínimos quadrados ponderados com um algoritmo de processamento de erros de parâmetros para minimizar os erros na estimação da distância da falta. O método faz uso de medição em apenas um terminal na subestação. Os espectros dos sinais de corrente e tensão são analisados através da transformada discreta recursiva de Fourier, calculando os fasores de terceira ordem e o fundamental. O sistema de distribuição empregado para testes foi o IEEE 13 *Node Test Feeder*.

Em Lopes *et al.* (2023), os autores fizeram uma revisão do estado da arte dos métodos de localização de FAIs, campo da literatura mais recente na última década e ainda não tão explorado quanto as técnicas para detecção de faltas. De um modo geral, os métodos de localização de faltas de alta impedância têm as seguintes etapas: aquisição de dados por simulação ou testes, processamento dos dados, extração de métricas e um algoritmo de decisão com uma técnica matemática ou uma técnica de classificação para determinar o local da falta. O trabalho de Lopes *et al.* (2023) também compara diversos trabalhos da literatura em relação à representação da FAI (puramente resistiva, modelo não linear ou dados reais) e os sinais de entrada, taxa de amostragem, plataforma utilizada para aplicação, sistema teste, número de medidores, dentre outras características. Ademais, os autores propõem um novo método para localização de FAIs usando o algoritmo *Random Forest* (floresta aleatória, em português) como técnica de decisão e uma abordagem baseada na seleção dos recursos de entrada. Os testes foram feitos sem a presença de ruídos na medição e ao acrescentá-los, a precisão dos resultados cai um pouco.

O trabalho de Ledesma *et al.* (2020) propõe um método para localização de FAIs utilizando medições sincronizadas e duas redes neurais artificiais (RNAs), a primeira para identificar se há falta nas possíveis áreas de observação entre os medidores alocados no sistema e a segunda RNA determina a distância da falta ao primeiro medidor da área de observação. O método foi testado no sistema IEEE 123 barras modificado com acréscimo de gerações distribuídas. Características das redes de distribuição como variação de carga e imprecisão nos dados do sistema foram levadas em consideração pelos autores. Além de apresentar resultados promissores para localizar FAIs, o método também identifica e localiza faltas com baixa impedância.

Também utilizando medições sincronizadas, o trabalho de Penido *et al.* (2022) analisa a componente de sequência zero da tensão e as correntes de sequência para localizar faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de média tensão. O método foi proposto para sistemas com ampla geração fotovoltaica. O método foi testado em diferentes sistemas de distribuição considerando características de SDs reais.

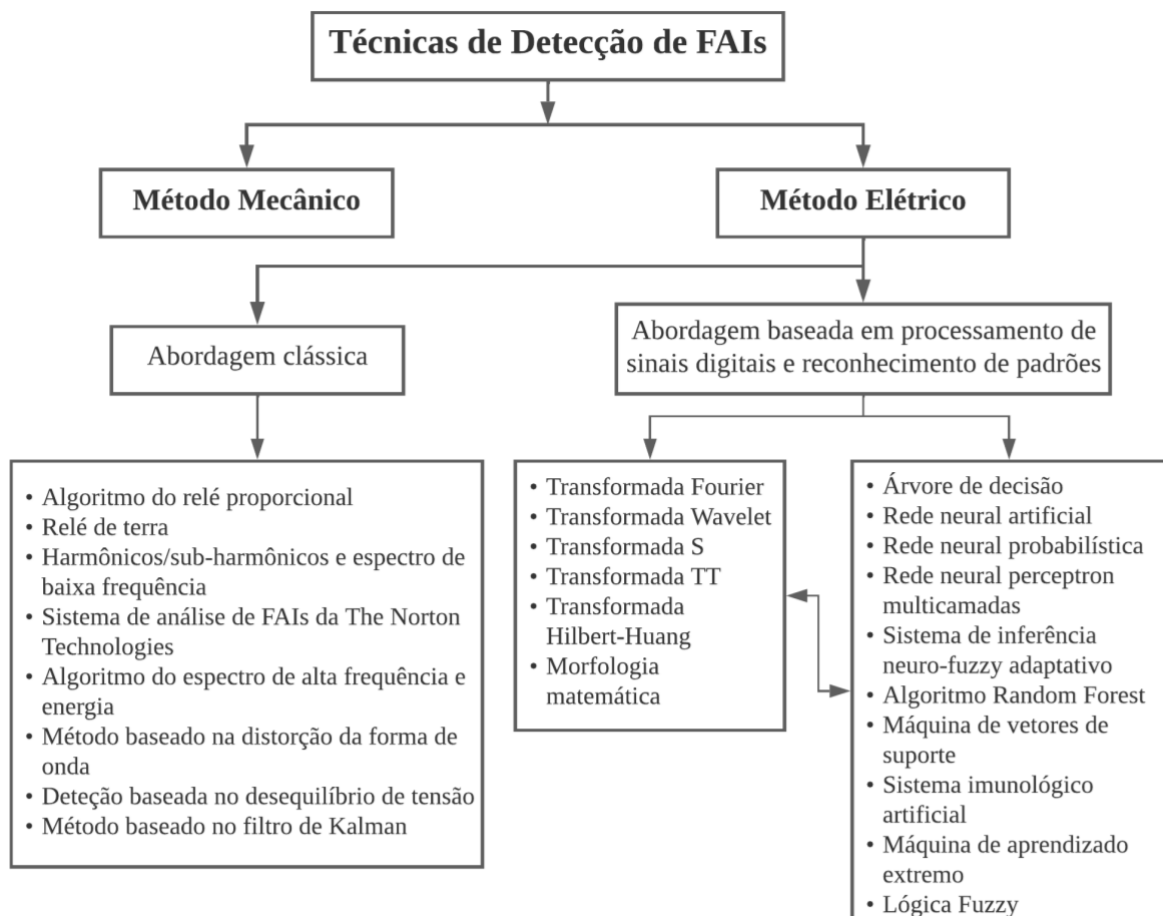
O presente trabalho consiste em propor um método para localizar faltas de alta impedância, ou seja, o foco não é o processo de detecção de FAIs. Existem muitos métodos propostos na literatura para realizar esta função. O trabalho de Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2017) é uma revisão sobre a detecção de FAIs. Nele, os autores comparam as principais técnicas existentes, dividindo em análises no domínio do tempo, no domínio da frequência e pela Transformada *Wavelet*. Já no trabalho de Sedighizadeh, Rezazadeh e Elkalashy (2010), os autores dividem os métodos de detecção de faltas de alta impedância em abordagens clássicas e heurísticas. A abordagem clássica inclui Transformada *Wavelet*, magnitude das correntes e tensões de falta, espectro harmônico de alta frequência ou de baixa frequência, dentre outros. Na abordagem heurística, algumas das técnicas citadas são: redes neurais artificiais (RNAs), Algoritmo Genético, Lógica *Fuzzy*, dentre outros algoritmos.

O trabalho de Mishra e Panigrahi, (2019) apresenta uma boa revisão da literatura das técnicas de detecção de FAIs, resumida conforme a Figura 4, onde as técnicas são divididas primeiramente em métodos mecânico e elétricos e, dentro dos métodos elétricos, trabalhos com uma abordagem clássica e abordagem baseada em processamento de sinais digitais e reconhecimento de padrões. Além disso, os autores fazem uma revisão de diferentes modelos de falta de alta impedância utilizados para simulação. O método mecânico nada mais é que um dispositivo que segura o condutor e aciona caso esse condutor caia ou um dispositivo pendurado

no condutor que funciona como um pêndulo. Ambos os dispositivos devem ser instalados em cada vão para identificar quando há um cabo rompido.

Na mesma linha, Aljohani e Habiballah (2020) discute os modelos de FAI utilizados na literatura e também discute as técnicas em estudos de faltas de alta impedância. Os métodos principais citados são os baseados na aplicação de relés, técnicas de processamento de sinais, estimação de parâmetros da falta, abordagem matemática e métodos baseados em inteligência artificial. Os métodos com inteligência artificial geralmente possuem três partes principais: a aquisição de dados, extração e tratamento de características presente nos dados e o treinamento utilizando algoritmos de *machine learning* (ou aprendizado de máquina).

Figura 4 – Taxonomia das técnicas de detecção de faltas de alta impedância



Fonte: Adaptado de Mishra e Panigrahi (2019).

1.4 OBJETIVOS

A localização de FAIs, conforme já mencionado, é um tema bastante atual e menos explorado que as técnicas de detecção de FAIs entre a comunidade acadêmica. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é propor um método para localização de faltas de alta impedância fase-terra em sistemas de distribuição de média tensão, utilizando uma técnica de minimização de erros a partir das medições de tensão e corrente não-fasoriais sincronizadas disponíveis na rede para determinar em qual nó do sistema ocorreu a falta ou o nó mais próximo.

Os sistemas de distribuição utilizados neste trabalho possuem elementos condizentes com aspectos reais das redes de distribuição através de simulações considerando indutâncias mútuas, capacitância das linhas, bancos de capacitores e cargas desbalanceadas.

Além disto, a proposta desta pesquisa é avaliar o desempenho do método ao adicionar incertezas nas cargas dos sistemas, provenientes de possíveis erros de medição, cujos valores são somente RMS.

Por fim, para alcançar esses objetivos, este método será desenvolvido no *software* Matlab® e utilizará o *software* de simulação de circuitos OpenDSS® para obter as medições dos sistemas.

1.5 PUBLICAÇÕES DECORRENTES

Este trabalho resultou na seguinte publicação:

- “Um método de localização de faltas em sistemas de distribuição baseado em medições fasoriais e busca exaustiva: Análises de sensibilidade a erros de medição”. CBA, Congresso Brasileiro de Automática, 2022.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos, que são estruturados da seguinte forma:

O capítulo 1 apresentou uma contextualização do tema a ser abordado neste trabalho, sua motivação, seus objetivos e uma revisão bibliográfica com trabalhos relevantes e recentes na área.

No capítulo 2, são apresentadas as premissas básicas sobre sistemas de distribuição de energia, incluindo como é feita sua proteção e introduzindo os sistemas teste que serão utilizados neste trabalho. O conceito, os tipos e principais modelos de faltas de alta impedância são discutidos. E, por fim, os tipos de medidores em sistemas de distribuição são relatados.

No capítulo 3, é descrito o método proposto neste trabalho para localizar faltas de alta impedância.

No capítulo 4, divulgam-se os resultados obtidos para o método proposto utilizando os sistemas teste considerando diferentes cenários.

No capítulo 5, são apontadas as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS E PREMISSAS BÁSICAS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos fundamentais para o entendimento do método proposto.

Os sistemas de distribuição, bem como o esquema de proteção mais utilizado nestes sistemas são tratados neste capítulo. Além disso, faltas de alta impedância são discutidas, abordando o conceito, tipos e os modelos utilizados na literatura. Por fim, os medidores e seus erros associados são descritos.

2.2 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Com o avanço da tecnologia, a energia elétrica tem se tornado cada vez mais indispensável e problemas com falta de energia ou baixa qualidade são cada vez menos admitidos. Uma indústria pode ter danos em seus equipamentos ou produtos devido a uma interrupção no fornecimento, por exemplo. Por isso, é importante o correto dimensionamento e operação dos SDs (OLIVEIRA; SILVEIRA; *et al.*, 2021).

As redes de distribuição podem ser classificadas de várias formas: por nível de tensão; rede primária ou secundária; rede aérea ou subterrânea; rede malhada ou radial; rede trifásica ou monofásica; rede com cabos nus, protegidos ou isolados (OLIVEIRA; SILVEIRA; *et al.*, 2021).

Os postes de distribuição têm a função de sustentar os equipamentos do SD, como condutores, transformadores, reguladores de tensão, iluminação pública, equipamentos de proteção, etc. Além disso, os postes costumam ser usados também como suportes do sistema de telefonia e fibra óptica. Já os condutores costumam ser de alumínio e podem ser nus, protegidos ou isolados. Os condutores nus são os mais vulneráveis a danos por queda de árvores, vandalismo e ventanias. Os condutores protegidos, apesar de terem um revestimento contra contatos acidentais, não garantem a completa isolação (OLIVEIRA; SILVEIRA; *et al.*, 2021). Os condutores isolados apresentam melhor proteção.

2.2.1 Proteção dos Sistemas de Distribuição

Qualquer sistema de potência está sujeito a ocorrência de defeitos, por isso, os sistemas de proteção são necessários, pois além de assegurar a integridade dos equipamentos e da rede elétrica, procuram garantir também a segurança da população (OLIVEIRA; ROSSONI; *et al.*, 2021).

O relé de proteção foi desenvolvido em 1901. Este era um relé de indução contra sobrecorrente. Na década de 1930, foram desenvolvidos os relés eletrônicos. Na década de 1980, surgiram os relés digitais, que possuem microprocessadores, fazendo com que o sistema de proteção se tornasse “inteligente”. Os relés digitais, além de possuírem as mesmas funções que os eletromecânicos e os eletrônicos, ainda são mais rápidos, mais sensíveis, tem interface com o usuário, permite o acesso remoto e armazena informações. Os relés fazem o processamento de dados medidos no sistema (tensão, corrente, etc.). Um sistema de proteção é composto basicamente pelos relés, pelo sistema de comunicação, pelos serviços auxiliares e equipamentos de interrupção (OLIVEIRA; ROSSONI; *et al.*, 2021).

As principais funções dos sistemas de proteção em sistemas de distribuição são minimizar a duração de uma falta e minimizar o número de consumidores afetados por ela. Além disso, os sistemas de proteção devem eliminar os possíveis riscos à população e aos equipamentos da rede o mais rápido possível (OLIVEIRA; ROSSONI; *et al.*, 2021).

Um sistema de proteção bem dimensionado proporciona ao sistema de distribuição um alto grau de confiabilidade e segurança e faz com que o tempo de inspeção e localização do defeito seja menor, reduzindo, assim, o tempo de interrupção da energia. Para que o sistema seja bem dimensionado, é preciso levar em conta as características dos alimentadores e das cargas ligadas na rede, correntes de partida de motores, dentre outras. O nível de continuidade do fornecimento também é importante, já que determinadas cargas atendidas têm uma dependência maior com a continuidade do fornecimento de energia para certos processos ou atividades especiais, como hospitais, bancos, indústrias, centros comerciais, etc (CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A., 2017).

Os equipamentos de proteção mais utilizados nos sistemas de distribuição são (CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A., 2017):

- Disjuntor: equipamento de manobra que liga e desliga os circuitos. Na ocorrência de faltas, os relés comandam o disjuntor para abrir o circuito. Os relés associados ao disjuntor geralmente são os de sobrecorrente instantâneo e/ou temporizado.

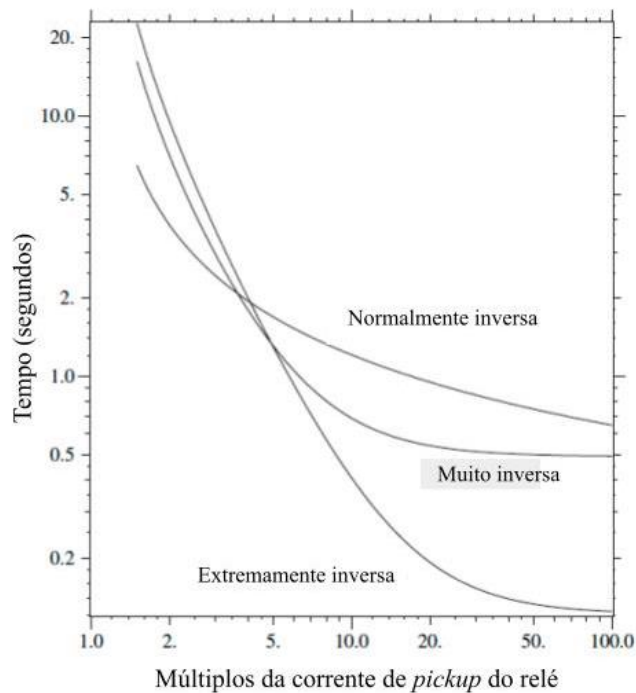
- Religador: equipamento que energiza ou interrompe circuitos automaticamente, realizando essa operação por um número pré-determinado de vezes quando há um curto-circuito. Cada uma das aberturas é chamada de ciclo de operação, sendo seguidas de religamento, exceto a última. No caso de faltas permanentes¹, o religador permanecerá aberto de forma definitiva até ser religado manualmente. Para faltas momentâneas², o religador não completa seu ciclo de operação e um rápido desligamento cessa a falta.
- Chave fusível: equipamento com uma chave e um elo fusível dentro de um cartucho. Este equipamento protege o circuito contra sobrecorrentes pelo rompimento do elo fusível, abrindo o circuito.

Esses equipamentos não devem atuar em caso de energização de equipamentos, partida de motores ou transitórios, somente na ocorrência de faltas. Por isso, esses dispositivos de proteção contra sobrecorrente convencionais atuam conforme uma curva tempo x corrente, isto é, atuam mais rápido quanto mais alta a corrente. Existem formatos padronizados dessas curvas pelo IEEE, que são referência para o ajuste de relés. A Figura 5 mostra um exemplo dos formatos das curvas características dos relés padronizadas pelo IEEE (SHORT, 2004).

¹ Falta permanente ou sustentada não é possível ser eliminada com o desligamento temporário do circuito e requer um reparo da rede.

² Falta momentânea ou transitória pode ser eliminada com o desligamento temporário do circuito seguido de um religamento, por exemplo dois condutores tocam-se devido ao vento.

Figura 5 – Curvas tempo x corrente padronizadas



Fonte: Short (2004).

Um sistema de proteção precisa ter seletividade, isto é, o dispositivo de proteção mais próximo da falta deve atuar antes dos demais. Outro conceito importante na proteção é a coordenação, que é a ordem em que os dispositivos de proteção atuam, no caso dos sistemas de distribuição, a coordenação da proteção permite que o reestabelecimento de energia seja feito automaticamente para faltas momentâneas e que haja seletividade em caso de faltas permanentes (CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A., 2017).

As faltas de alta impedância apresentam correntes de baixa intensidade, sendo a intensidade muito menor que a corrente nominal de um alimentador, desta forma, os métodos de proteção tradicionais tratados nesta seção não são ideais para a detecção, localização e/ou mitigação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. Nesses casos, outros esquemas de proteção com outras metodologias, por exemplo a desenvolvida no presente trabalho, podem ser indicados.

2.2.2 Sistemas Teste

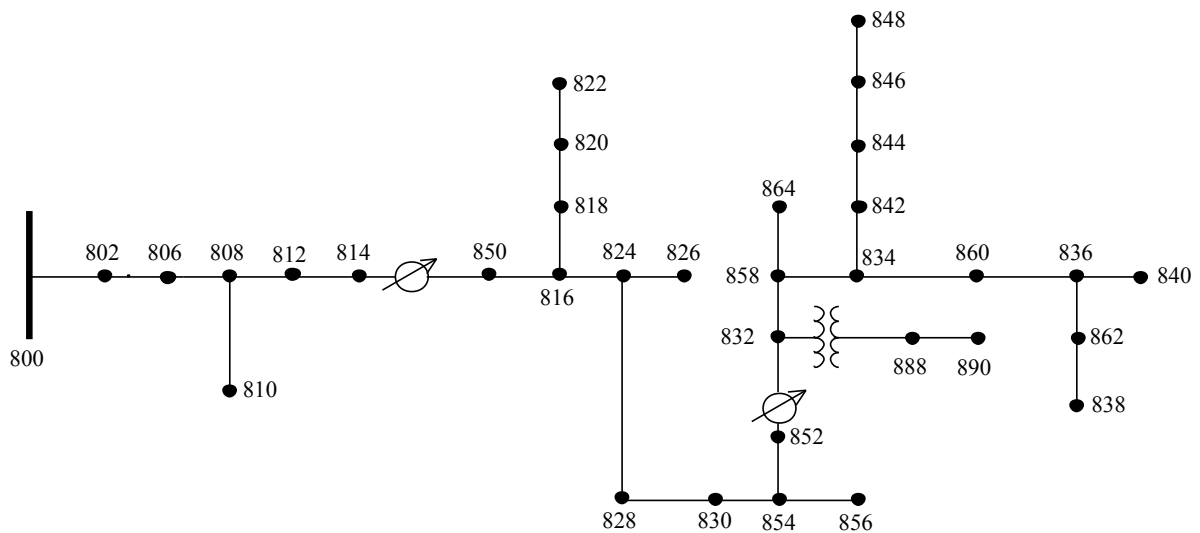
Para testar o método de localização de falta de alta impedância proposto neste trabalho foram utilizados os seguintes sistemas teste: o IEEE 34 *Node Test Feeder* e o IEEE 123 *Node Test Feeder*. Ambos os sistemas foram desenvolvidos pelo *Test Feeder Working Group* (TFWG) para serem usados por pesquisadores para variados estudos em sistemas de

distribuição. Os dados dos sistemas estão disponíveis online com acesso aberto à toda a comunidade (SCHNEIDER *et al.*, 2018). Estes sistemas serão utilizados no Capítulo 4 para apresentar os resultados do método proposto de localização de FAIs. Na sequência faz-se uma breve descrição dos sistemas.

2.2.2.1 IEEE 34 Node Test Feeder

O sistema IEEE 34 barras é um sistema de distribuição extremamente longo, radial, pouco carregado e com tensão de 24,9kV (IEEE, [S.d.]). A Figura 6 mostra o diagrama unifilar deste sistema.

Figura 6 – Sistema IEEE 34 barras

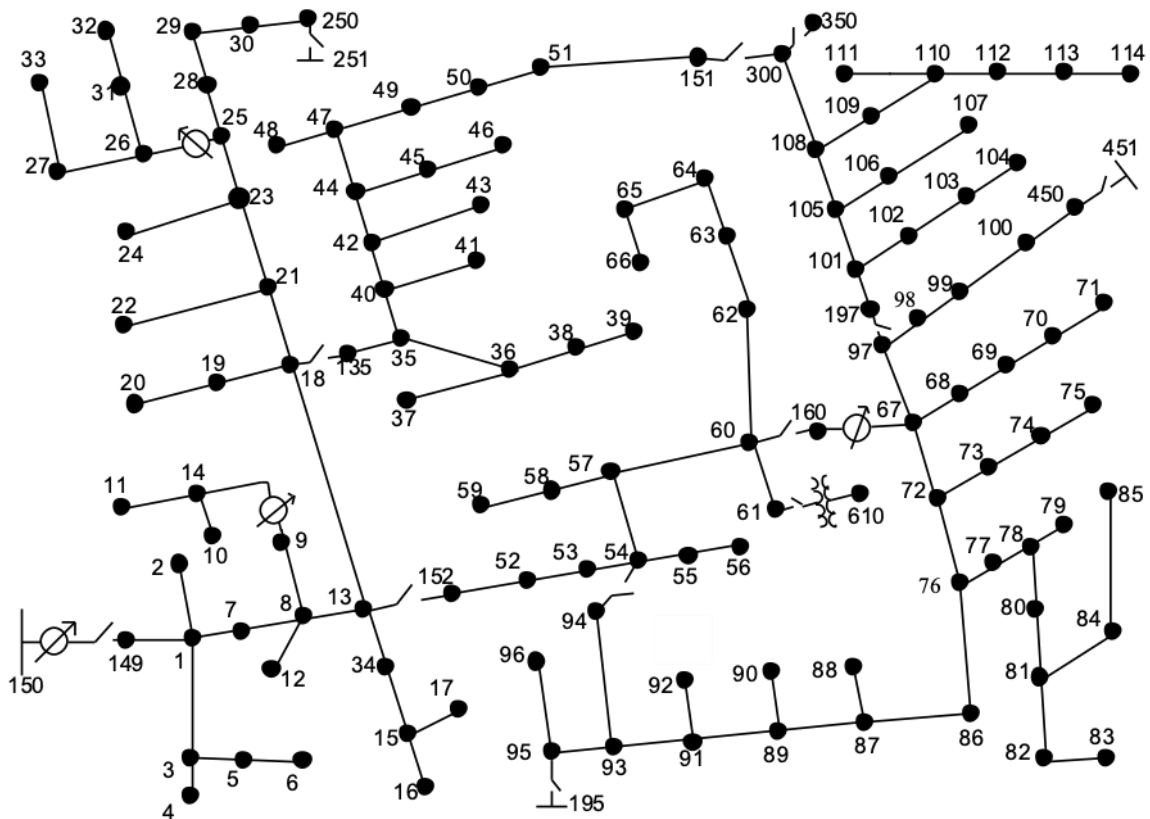


Fonte: IEEE ([S.d.]).

2.2.2.2 IEEE 123 Node Test Feeder

O sistema IEEE 123 barras é um sistema com tensão nominal de 4,16kV, com característica radial e bastante ramificado. Ele tem um tamanho médio e possui vários ramais laterais monofásicos (IEEE, [S.d.]). A Figura 7 exibe este sistema.

Figura 7 – Sistema IEEE 123 barras



Fonte: IEEE ([S.d.]).

2.3 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

A maior parte dos defeitos que ocorrem em sistemas de distribuição são monofásicos e a maioria é causada por fatores ambientais. O curto-circuito é o tipo de defeito mais comum e ele é caracterizado por uma conexão com baixa – ou nenhuma – impedância entre parte(s) energizada(s) do circuito. Por conta disso, a corrente de falta gerada num curto-circuito é alta em relação às correntes de carga dos alimentadores, provocando o aumento da temperatura no local da conexão e nos condutores, podendo causar explosões ou incêndios. Essa alta corrente de falta é muito prejudicial à rede elétrica, então a proteção mais comum nas redes de distribuição é contra sobrecorrente, mencionada no item 2.2.1 (OLIVEIRA; ROSSONI; *et al.*, 2021).

Existem outros tipos de defeitos em redes elétricas, como perturbações na tensão, por exemplo. Um tipo de defeito que não é detectado pelo sistema de proteção contra sobrecorrente convencional é a falta de alta impedância que, por possuir justamente uma alta impedância no

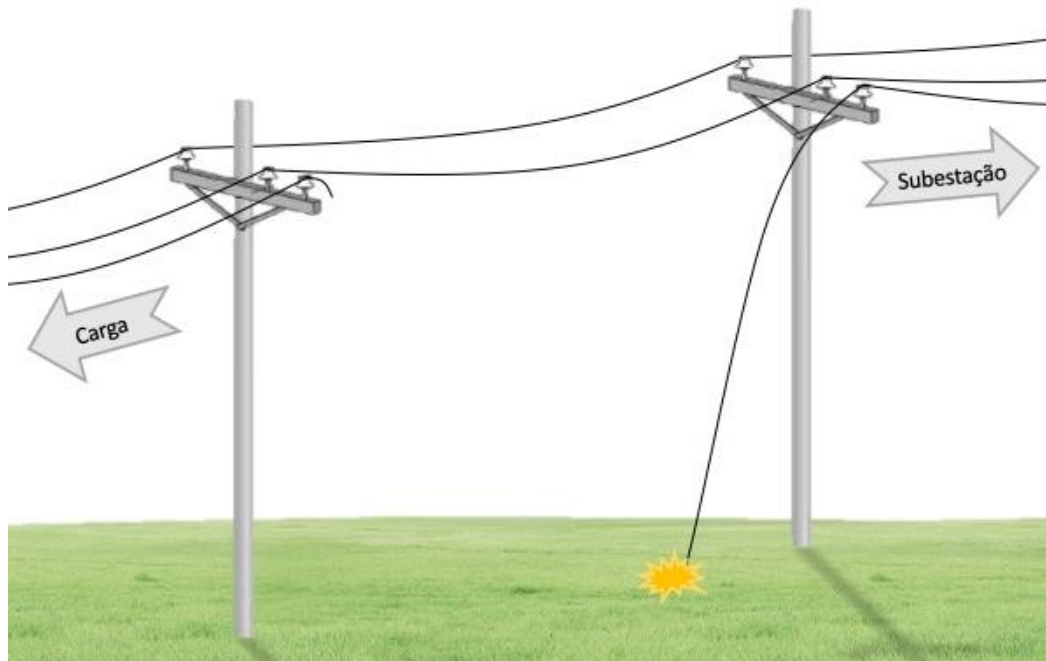
ponto de contato do circuito, gera uma corrente de falta relativamente baixa, da mesma ordem de grandeza de cargas presentes na rede elétrica.

As FAIs podem ocorrer por falhas de equipamentos, falhas nas estruturas, falhas em condutores, contato com árvores ou pipas, descargas atmosféricas, acidentes por falha humana ou naturais, vandalismo, etc. Para reduzir a ocorrência de FAIs, pode-se usar condutores protegidos ou isolados na rede de distribuição, fazer a manutenção preventiva, realizar a poda de árvores e a limpeza da rede. Apesar disso, as redes convencionais, mais susceptíveis a FAIs, ainda são muito utilizadas no país (SILVA, 2020).

As faltas de alta impedância podem ser ativas ou passivas. As FAIs ativas acontecem quando um condutor energizado forma um arco elétrico ao se aproximar de um objeto, ou seja, há um rompimento do isolamento do meio (ar ou solo). As FAIs ativas ainda podem ser série, quando há rompimento do condutor (também chamada de cabo ao solo), ou *shunt*, quando o condutor não se rompe, mesmo em contato com algum objeto com alta impedância. As FAIs passivas acontecem quando o condutor se rompe, mas não entra em contato com nenhum objeto e fica suspenso no poste (também chamado de aberturas), ainda energizado (SILVA, 2020).

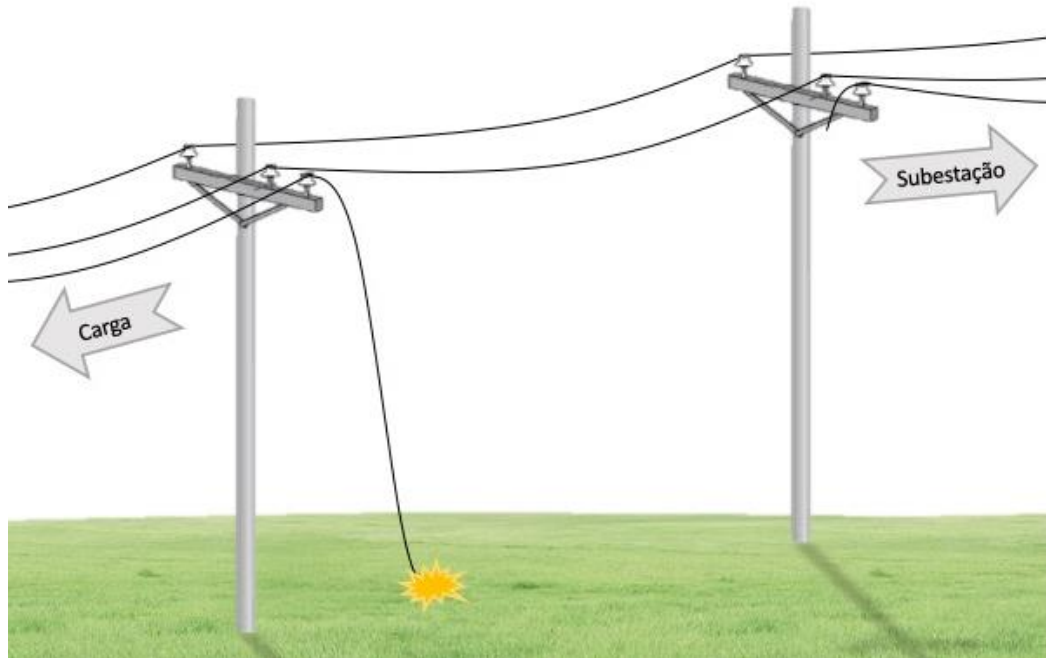
A falta de alta impedância ativa série é a mais estudada entre a comunidade científica. O condutor pode estar caído tanto do lado da carga, quanto do lado da fonte e o fornecimento de energia elétrica costuma ser interrompido. Ambas as Figura 8 e Figura 9 mostram redes de distribuição com FAIs ativas série, com o condutor rompido em contato com o solo, a primeira do lado da fonte e a segunda do lado da carga. A FAI série é mais fácil de ser detectada e localizada do que a falta *shunt*.

Figura 8 – Condutor rompido do lado da fonte



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 9 – Condutor rompido do lado da carga



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Neste trabalho, as faltas de alta impedância estudadas são do tipo ativa *shunt*, onde não ocorre o rompimento do condutor e a rede continua alimentando as cargas do sistema. A Figura 10 mostra o esquema de uma FAI sem condutor caído, onde uma árvore está acidentalmente em contato com uma fase do alimentador primário da rede de distribuição. Mesmo sendo

possível ocorrer faltas envolvendo mais de uma fase, a maioria das ocorrências são de faltas monofásicas envolvendo a terra, por essa razão, somente FAIs fase-terra são estudadas neste trabalho (ELEKTRO, 2014).

Figura 10 – Contato de um condutor energizado com uma árvore

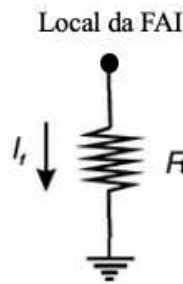


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

2.3.1 Modelos de FAIs

O modelo mais simples para representar uma falta de alta impedância é o puramente linear, onde a falta se comporta como uma resistência constante. Quando acidentalmente a rede de distribuição entra em contato com galhos de árvores, as árvores vivas formam um caminho para a corrente entre o condutor energizado e o solo, já que as árvores têm um bom aterramento devido às raízes. O tronco de uma árvore tem uma resistividade uniforme pela presença de umidade, fazendo com que a árvore possa se comportar como uma resistência linear (IURINIC, 2016). A Figura 11 apresenta um modelo de FAI puramente resistivo.

Figura 11 – Modelo puramente resistivo



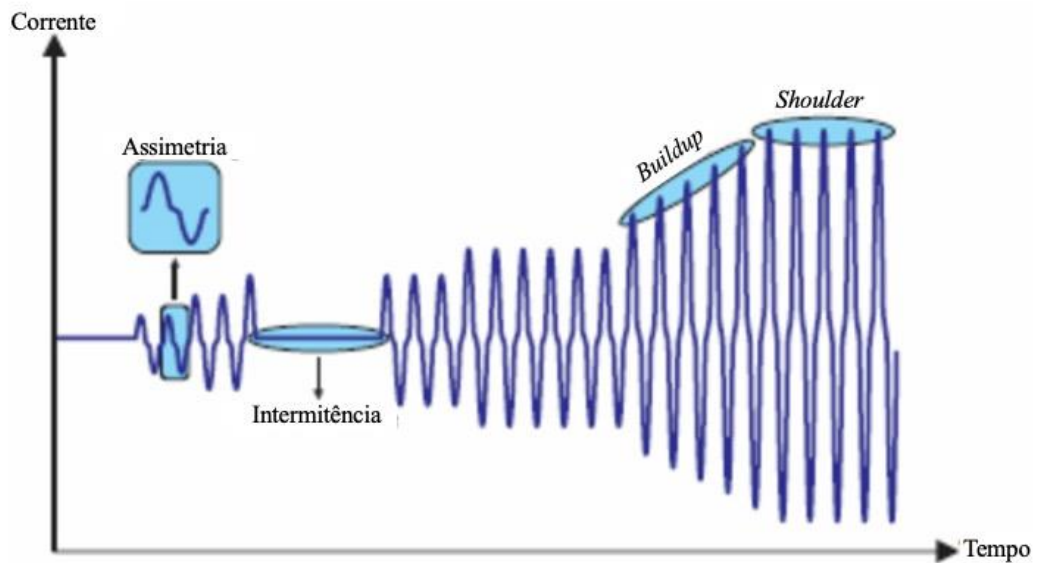
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Quando se trata de faltas de alta impedância com condutor caído ao solo, a magnitude da corrente de falta é influenciada pela superfície em que este condutor está em contato (asfalto, grama seca ou molhada, concreto, etc.). Na maioria das vezes, quando ocorre este contato ou quando o condutor energizado fica muito próximo da superfície, pode surgir um arco elétrico. Entretanto, este arco gerado pela FAI acontece de forma aleatória e transitória, pois o condutor pode ficar saltando no chão ou não ter pontos de contato suficientes na superfície para se estabelecer um arco elétrico estável por exemplo. Por consequência, a forma de onda da corrente gerada por uma FAI com rompimento de cabo apresenta algumas características (SANTOS; LOPES; *et al.*, 2013; SILVA, 2020):

- Intermitência: dependendo da superfície em que o condutor está em contato, o arco elétrico pode não ter um comportamento estável, apresentando descontinuidades na corrente de falta.
- Não linearidade: a relação entre as curvas de tensão e corrente possui característica não linear, causando uma distorção.
- Assimetria: a porosidade e a umidade da superfície provocam uma corrente de falta com característica assimétrica, a qual o semiciclo positivo tem maior amplitude que o negativo.
- *Buildup*: ocorre um crescimento da envoltória da corrente provocada pela FAI, proveniente da acomodação do condutor no solo.
- *Shoulder*: após alguns ciclos de *buildup*, a corrente se estabiliza numa condição de regime permanente.
- Harmônicas: como a forma de onda da corrente de falta apresenta essas distorções mencionadas, conseqüentemente, ela possui conteúdo harmônico.

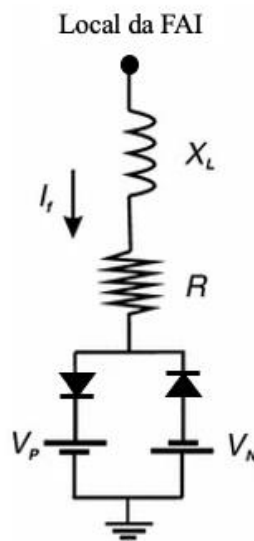
As características apresentadas estão ilustradas na forma de onda da corrente gerada por uma FAI da Figura 12.

Figura 12 – Corrente provocada por uma FAI



Fonte: Adaptado de Aljohani e Habiballah (2020).

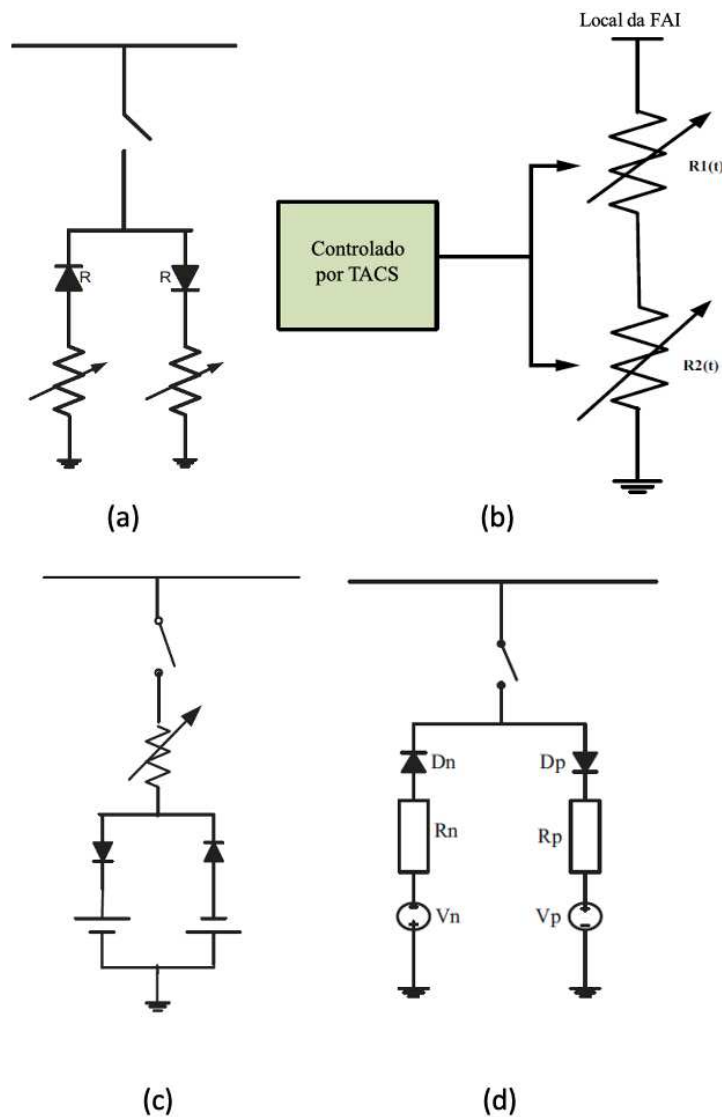
Visando simular uma falta de alta impedância com as características anteriormente mencionadas, a modelagem para simulação é o tema de trabalhos específicos na literatura. Um dos modelos propostos mais famosos e utilizado como base para outros é o proposto por Emanuel *et al.* (1990), que é composto por duas fontes de tensão contínuas conectadas por diodos antiparalelos, isso em série com uma resistência e com uma indutância, ambas constantes. A Figura 13 mostra o modelo da FAI proposto por Emanuel *et al.* (1990). Tem-se que $V_N > V_P$ pois a corrente no semiciclo positivo é maior que a do negativo (SANTOS; SOUZA; *et al.*, 2013).

Figura 13 – Modelo proposto por Emanuel *et al.* (1990)

Fonte: Santos; Souza; *et al.* (2013).

Outro modelo proposto por Sharat, Snider e Debnath (1993) contém duas resistências, conforme ilustrado na Figura 14 (a). Nam *et al.* (2001) propôs um modelo com duas resistências em série que variam no tempo e são controladas externamente por TACS (*Transient Analysis of Control Systems*), mostrado na Figura 14 (b). O modelo proposto por Sheng e Rovnyak (2004) tem dois diodos, duas fontes de tensão contínuas e um resistor não linear, cuja ilustração pode ser vista na Figura 14 (c). O modelo da Figura 14 (d), proposto por Lai, Snider e Lo (2006), é baseado no modelo de Emanuel *et al.* (1990) para superfície com solo arenoso (MISHRA; PANIGRAHI, 2019).

Figura 14 – Modelos de FAIs propostos por: (a) Sharat, Snider e Debnath (1993); (b) Nam *et al.* (2001); (c) Sheng e Rovnyak (2004); (d) Lai, Snider e Lo (2006)



Fonte: Adaptado de Mishra e Panigrahi (2019).

Esses foram apenas alguns modelos propostos na literatura para representar faltas de alta impedância e suas características. Outros modelos e informações mais detalhadas podem ser conferidos em: Mishra e Panigrahi (2019), Aljohani e Habiballah (2020), Santos, Souza, et al. (2013), e Zamanan e Sykulski (2014).

Apesar dos modelos de simulação mais complexos, o arco formado pela falta de alta impedância apresenta característica resistiva. Em quase todos os modelos, o valor RMS das FAIs são praticamente os mesmos. Como o método proposto neste trabalho somente faz uso do valor RMS em regime permanente dos fasores de tensão e corrente, o modelo mais simples de FAI puramente resistiva é suficiente para as análises (LEDESMA *et al.*, 2020). Dessa forma, o modelo da Figura 11 foi o escolhido para aplicação neste trabalho.

2.4 MEDIDORES

Basicamente, tem-se quatro tipos de medição na média tensão dos sistemas de distribuição: (i) medição fasorial sincronizada; (ii) medição fasorial não sincronizada; (iii) medição não-fasorial (ou rms) sincronizada; (iv) medição não fasorial (ou rms) não-sincronizada. Independentemente do tipo de medição, atualmente os dados da rede são obtidos em intervalos regulares de tempo ou em tempo real e são enviados pelo sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) ao centro de controle (GUARACY, 2019).

2.4.1 Medição Não-Fasorial

Na realidade atual do Brasil, os tipos mais comuns de medição das redes de distribuição são não-fasoriais. Esse tipo de medição obtém apenas o valor RMS da grandeza, ou seja, o valor absoluto do fasor de tensão e/ou corrente. Comumente, essa medição é realizada nas saídas dos alimentadores, em religadores instalados no sistema e nos transformadores de distribuição em casos específicos (DINIZ, 2015). As medições não-fasoriais geralmente são não-sincronizadas, mas podem ser sincronizadas. Neste caso, os valores medidos não são plenamente sincronizados, já que as medições são enviadas para um supervisor com uma estampa de tempo e esta estampa de tempo pode apresentar erros de segundos.

Os equipamentos que realizam esse tipo de medição em geral são os transformadores de instrumentos. Como os valores de tensão e corrente nos alimentadores primários possuem valores elevados, a função dos transformadores de instrumento é abaixar essa corrente ou tensão para valores que possam ser usados em instrumentos de medição, controle ou proteção

(FRIEDRICH *et al.*, 2018). Os transformadores de instrumento podem estar acoplados às buchas de outros equipamentos do sistema, como em religadores e transformadores.

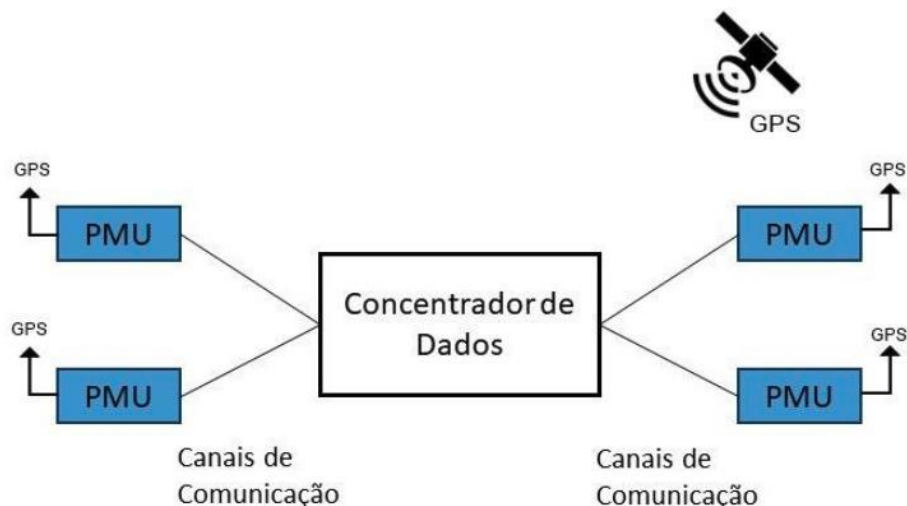
O transformador de corrente (TC) é um transformador de instrumento que abaixa a corrente elétrica de grandes níveis a valores menores padronizados para serem usados em relés, geralmente 5 amperes. Além disso, ele isola o circuito de medição primário na parte de mais alta tensão (FRIEDRICH *et al.*, 2018).

O transformador de potencial (TP) é um transformador de instrumento que abaixa a tensão da bobina primária para valores utilizados em equipamentos de controle, supervisão ou proteção, geralmente 115 V ou $115/\sqrt{3}$ V. O transformador de potencial pode ser indutivo ou capacitivo (FRIEDRICH *et al.*, 2018).

2.4.2 Medição Fasorial

Com o avanço da tecnologia, surgiram os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS), que são formados pelas unidades de medição fasorial, conhecidas também como PMUs (*Phasor Measurement Units*), e pelos concentradores de dados, conhecidos como PDC (*Phasor Data Concentrator*). Os PMUs adquirem os fasores de tensão e corrente, sincronizados no tempo, e os concentradores centralizam, tratam e disponibilizam os fasores para aplicação. Esses fasores, sincronizados no tempo, são chamados de sincrofasores. As PMUs são sincronizadas via satélite por um sistema GPS (*Global Positioning System*) e também são necessários canais de comunicação para permitir a troca de dados entre subsistemas (ANDRADE, 2008). As medições fasoriais geralmente são sincronizadas. A Figura 15 mostra a estrutura de um SMFS.

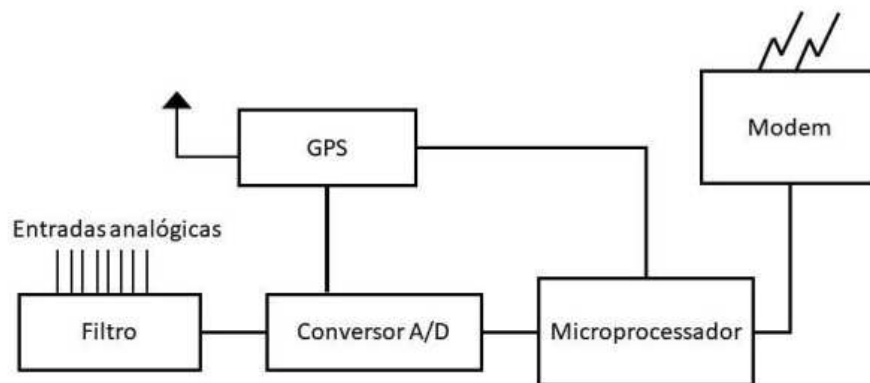
Figura 15 – Esquema de um sistema de medição fasorial sincronizada



Fonte: Reis (2019).

Uma PMU é composta basicamente por uma entrada de sinais analógica (tensão e corrente), um filtro para conter o efeito de *aliasing*, o conversor A/D que discretiza os sinais de entrada analógicos e um microprocessador para tratar os dados amostrados. O GPS promove a referência temporal de amostragem. Na Figura 16, é possível ver um modelo genérico de uma PMU.

Figura 16 – Modelo básico de uma PMU



Fonte: Reis (2019).

Na maioria dos casos, as PMUs obtêm os sinais analógicos de tensão e corrente do sistema através de transformadores de instrumento (TC e TP). Porém, a interface através de transformadores de instrumento não é a única opção. PMUs podem receber sinais através de fluxos de amostras digitais, chamados de valores amostrados – ou SV, do inglês *sampled values* – de forma que a conversão A/D é feita diretamente em transformadores de instrumentos eletrônicos ou SAMU (*stand-alone merging units*) (IEEE, 2018).

Mesmo com a tendência de modernização dos sistemas, a monitoração dos sistemas por sincrofasores requer alto investimento e ainda não é realidade no país. Apesar disso, muitos trabalhos na literatura fazem uso dessa ferramenta de medição sincronizada para obter as grandezas utilizadas pelos respectivos métodos propostos, alcançando bons resultados (LEDESMA *et al.*, 2020).

2.4.3 Erros Associados à Medição

As medições não-fasoriais podem apresentar erros relacionados principalmente com os transformadores de instrumento. Os TCs e TPs destinados à medição são diferentes dos destinados à proteção e controle. A classe de exatidão para os de medição são maiores, pois são destinados ao faturamento de energia. Já a classe de exatidão dos utilizados na proteção é menor, porém eles são construídos para suportar uma corrente muito mais alta por conta da

proteção contra curto-circuitos. O comportamento do material ferromagnético do núcleo dos transformadores ou até mesmo uma falha de calibração podem gerar erros nas medições.

No Brasil, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) tem NBRs (Normas Brasileiras) que especificam as classes de exatidão e outras características e ensaios dos transformadores de instrumento, como:

- ABNT NBR 6856 - Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV - Especificação e ensaios;
- ABNT NBR 6855 – Transformador de potencial indutivo com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV - Especificação e ensaios;
- ABNT NBR 10021 – Transformador de corrente de tensão máxima de 15 kV, 24,2 kV e 36,2 kV - Características elétricas e construtivas.

No cenário internacional, algumas normas para TCs e TPs são:

- IEC 60044 e IEC 61869 – Instrument transformers;
- IEC 62689 – Current and voltage sensors or detectors;
- IEEE C57.13 – Standard Requirements for Instrument Transformers.

No caso dos PMUs, os sinais de entrada podem ser corrompidos por harmônicos, ruídos e mudanças abruptas causadas por mudanças de carga e manobras de controle e proteção que dificultam a estimativa de parâmetros. As cargas não-lineares podem introduzir harmônicas, comutação de equipamentos e ruídos oriundos de fornos a arco são alguns fatores que podem prejudicar a precisão da medição (IEEE, 2018).

A norma internacional IEC/IEEE 60255-118-1 (2018), que normatiza as medidas de sincrofasores, esclarece que a precisão nos padrões IEC incorporam todos os erros de ponta a ponta, abrangendo os erros introduzidos pelo primário do transformador de instrumento e a mensagem com registro de data e hora criada na saída digital, incluindo a sincronização de tempo. No Brasil, o Submódulo 2.13 dos Procedimentos de Rede do ONS (2020) trata do sistema de medição de sincrofasores.

Neste trabalho, as medições serão multiplicadas por um valor aleatório para representar os erros de medição. Esta simples estratégia foi utilizada porque a correta modelagem dos erros de medições não é um escopo deste trabalho. Um dos objetivos deste trabalho é verificar como erros de medição impactam na eficiência do método proposto.

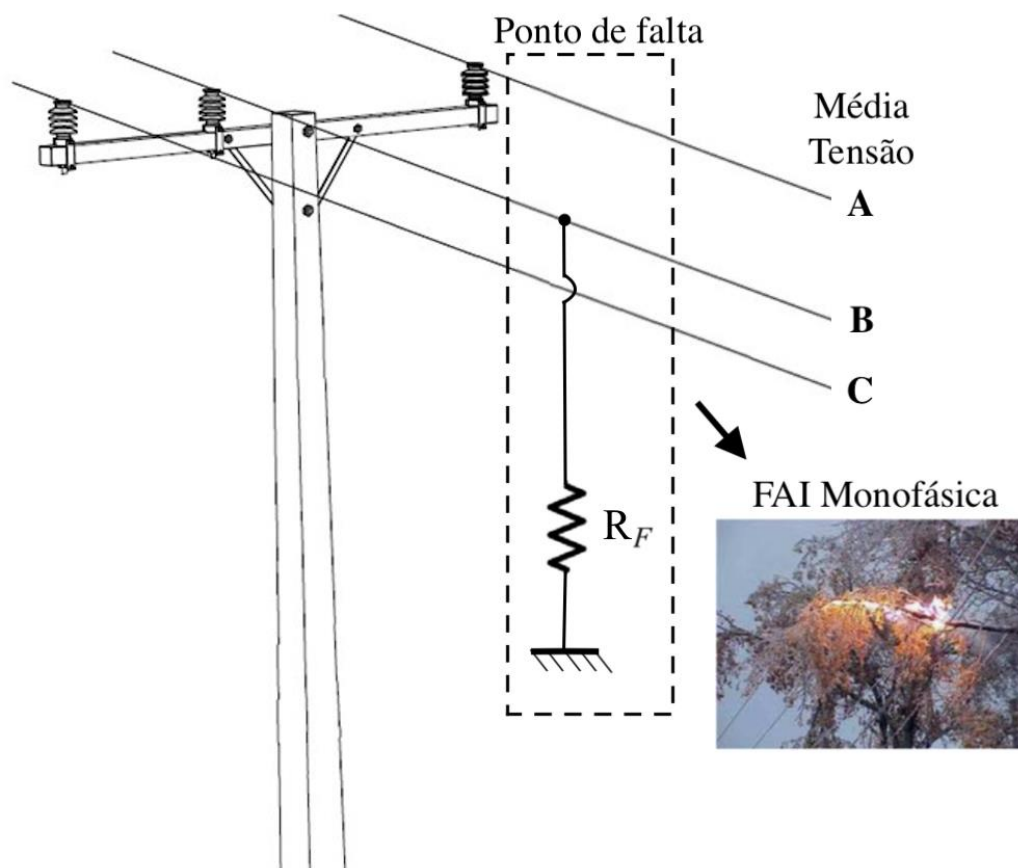
3 MÉTODO PROPOSTO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo é detalhado o método proposto neste trabalho para a localização de faltas de alta impedância monofásicas em sistemas de distribuição. Inicialmente, apresenta-se uma abordagem da filosofia do método e, posteriormente, a metodologia proposta para encontrar o local da falta é aprofundada.

O algoritmo proposto foi desenvolvido utilizando o *software* Matlab® e o *software* OpenDSS® é utilizado para a simulação dos sistemas de distribuição. As faltas de alta impedância estudadas neste trabalho são monofásicas fase-terra na média tensão dos sistemas de distribuição. As faltas monofásicas foram escolhidas por serem o tipo mais comum de defeito nos SDs (ELEKTRO, 2014). O modelo de FAI utilizado neste trabalho está ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Modelo da falta de alta impedância a ser localizada



Fonte: Adaptado de Ledesma *et al.* (2020).

3.2 MODELAGEM DO PROBLEMA

A filosofia do método proposto neste trabalho baseia-se em minimizar a diferença entre as medições no sistema de distribuição defeituoso e os valores das mesmas grandezas obtidas através de um sistema simulado com faltas de alta impedância. Ou seja, quanto menor a diferença entre os valores de tensão e/ou corrente medidos e simulados, mais provável que a falta de alta impedância possua os mesmos parâmetros da simulação.

Este método, então, consiste em resolver um problema de programação não-linear inteira mista (PNLIM), minimizando uma Função Objetivo ou, simplesmente, Fob . O problema é modelado e apresentado de acordo com (1)-(5).

$$Fob = \min \sum_{i \in M} [m_i - \bar{m}_i]^2 \quad (1)$$

Sujeito à:

$$real(I_{inj}(V_{Re}, V_{Im}, r, p)) = 0 \quad (2)$$

$$imag(I_{inj}(V_{Re}, V_{Im}, r, p)) = 0 \quad (3)$$

$$r_{min} < r < r_{máx} \quad (4)$$

$$p \in \{1, \dots, N\} \quad (5)$$

Onde:

m_i é o valor de tensão e/ou corrente medido pelo i -ésimo medidor alocado no sistema de distribuição;

\bar{m}_i é o valor de tensão e/ou corrente da simulação computacional da falta para um dado r e p pelo i -ésimo medidor alocado no sistema de distribuição;

r é a resistência de falta testada, cujo resultado final minimiza a função objetivo, com intervalo de busca inicial definido como $[r_{min}, r_{máx}]$;

p é o possível local da falta;

M é o conjunto de medidores alocados no sistema de distribuição e utilizados nas simulações;

I_{inj} é o vetor dos somatórios das correntes injetadas em cada nó;

V_{Re}, V_{Im} são os vetores de todos os componentes reais e imaginários das tensões nodais;

N é o número de nós do SD.

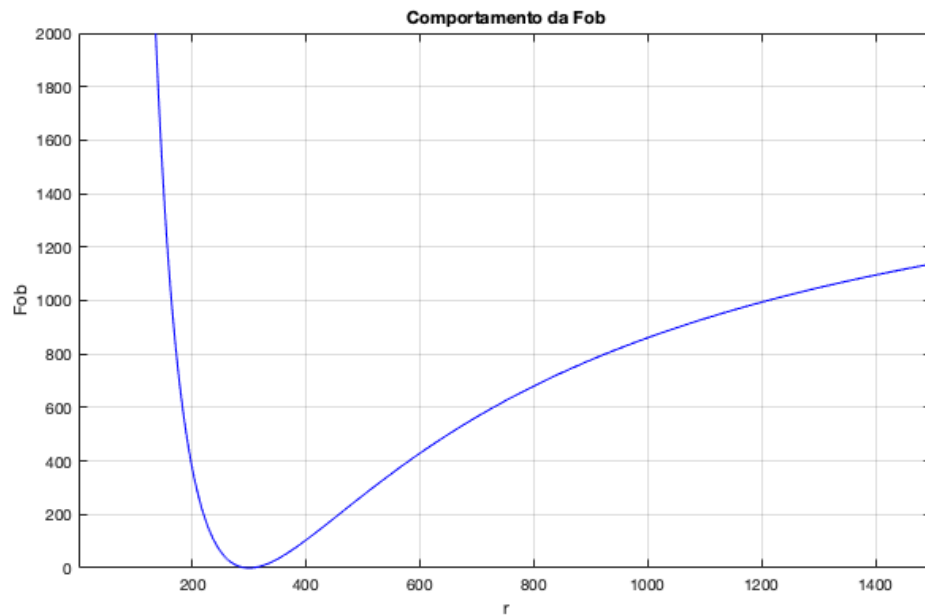
A variável p é uma variável discreta e indica a localização da falta. Seria necessário modificar o modelo do sistema de distribuição incluindo nós fictícios para cada pequena variação de p para encontrar a localização exata da falta. Dessa forma, este trabalho propõe a discretização da variável p , onde ela assume apenas valores que coincidam com os nós do SD ou outras localizações indicadas pelo usuário, portanto, trata-se de um problema de PNLIM. Neste trabalho, os nós procurados serão os nós do sistema estudado, entretanto o usuário pode definir a precisão do método indicando a distância entre dois nós. Nesse caso, o método cria nós fictícios. Essa maior precisão poderá ser utilizada em trabalhos futuros.

O problema PNLIM é transformado em N problemas do problema PNL (programação não-linear), onde o valor de p é fixado em cada problema PNL. Neste caso, o algoritmo proposto otimizará o valor de r para reduzir o valor da função objetivo para cada PNL. Este método visa encontrar os valores de p e r que minimizem a função objetivo (1), que pode ocorrer nas proximidades do ponto de falha.

Para o algoritmo, m_i é um vetor de medidas RMS sincronizadas do sistema, que neste trabalho será chamado de alvo. Já \bar{m}_i também é um vetor, de mesma dimensão de m_i , obtido a partir das medidas dos mesmos locais no sistema, cuja simulação é realizada pelo OpenDSS. As componentes real e imaginária de I_{inj} iguais a zero significam que o fluxo de potência no sistema de distribuição está convergido. Este processo será realizado pelo OpenDSS.

Para analisar o comportamento da função objetivo em um mesmo nó p para diferentes valores de r , tem-se o exemplo de uma falta de alta impedância de 300Ω aplicada na barra 812 do sistema IEEE 34 barras. O valor de r será variado de 10Ω até 1500Ω , simulado na mesma barra 812. Na Figura 18 tem-se o gráfico que mostra o comportamento da Fob ao variar o valor de r . Para resistências menores que 200Ω , a Fob apresenta um rápido crescimento, atingindo valores muito altos quanto menor a resistência, por isso, o gráfico da Figura 18 foi limitado até Fob igual à 2000.

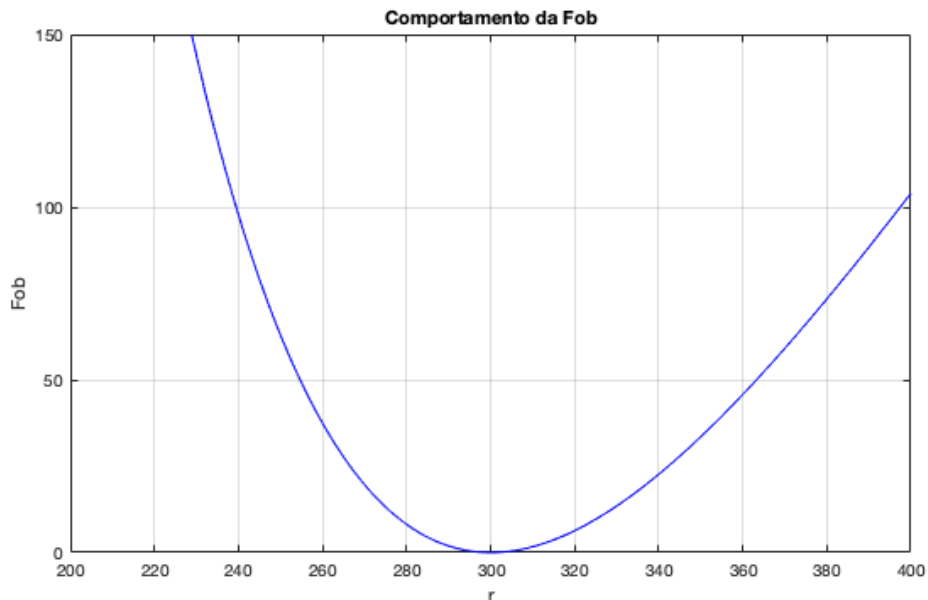
Figura 18 – Fob para o nó 812 com FAI de 300Ω na mesma barra



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 19 mostra a curva da Fob mais perto do mínimo. É possível notar que a curva apresenta um formato convexo com seu valor mínimo igual a zero para r igual a 300Ω .

Figura 19 – Comportamento da Fob para o nó 812 perto de 300Ω

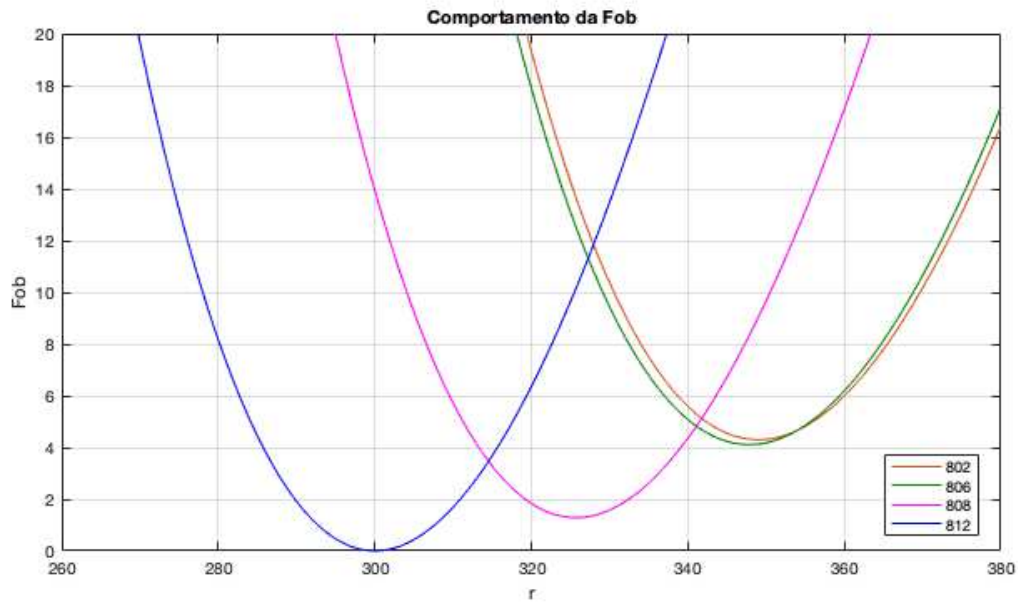


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Acrescentando agora as curvas das Fobs para a mesma FAI de 300Ω no nó 812, calculadas para os nós 808, 806 e 802, próximas ao nó 812, tem-se o gráfico da Figura 20. As

curvas apresentam o mesmo comportamento convexo com valor mínimo próximo de 300Ω , porém o valor mínimo é diferente de zero.

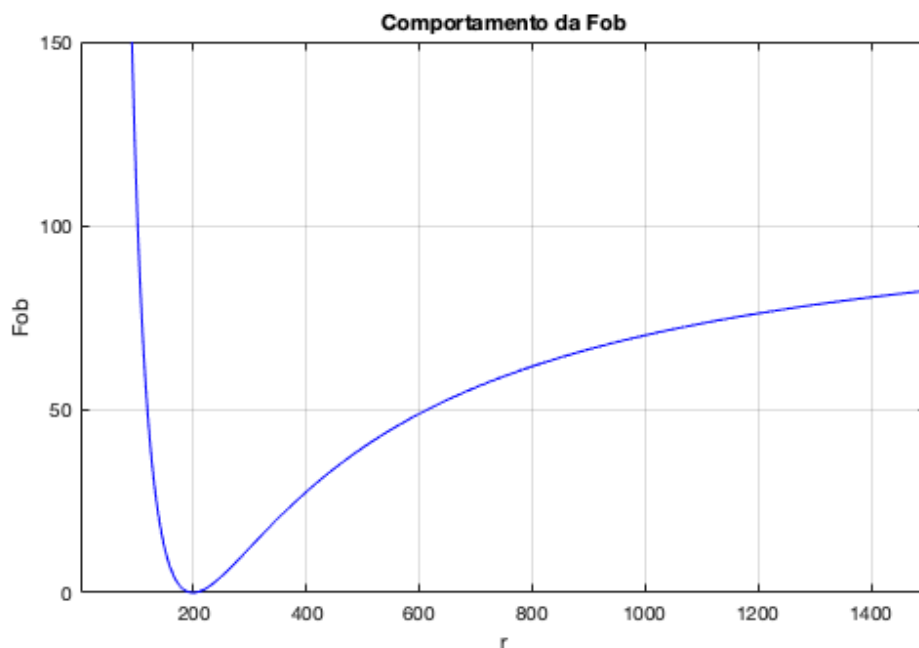
Figura 20 – Comportamento das Fobs de nós próximos a 812



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Fob comporta-se de maneira parecida em função da resistência para o sistema IEEE 123 barras. A Figura 21 mostra um exemplo com a Fob para o nó 54 com uma falta de 200Ω aplicada neste mesmo nó do sistema IEEE-123.

Figura 21 – Comportamento da Fob para o nó 54 do IEEE-123 com FAI de 200Ω



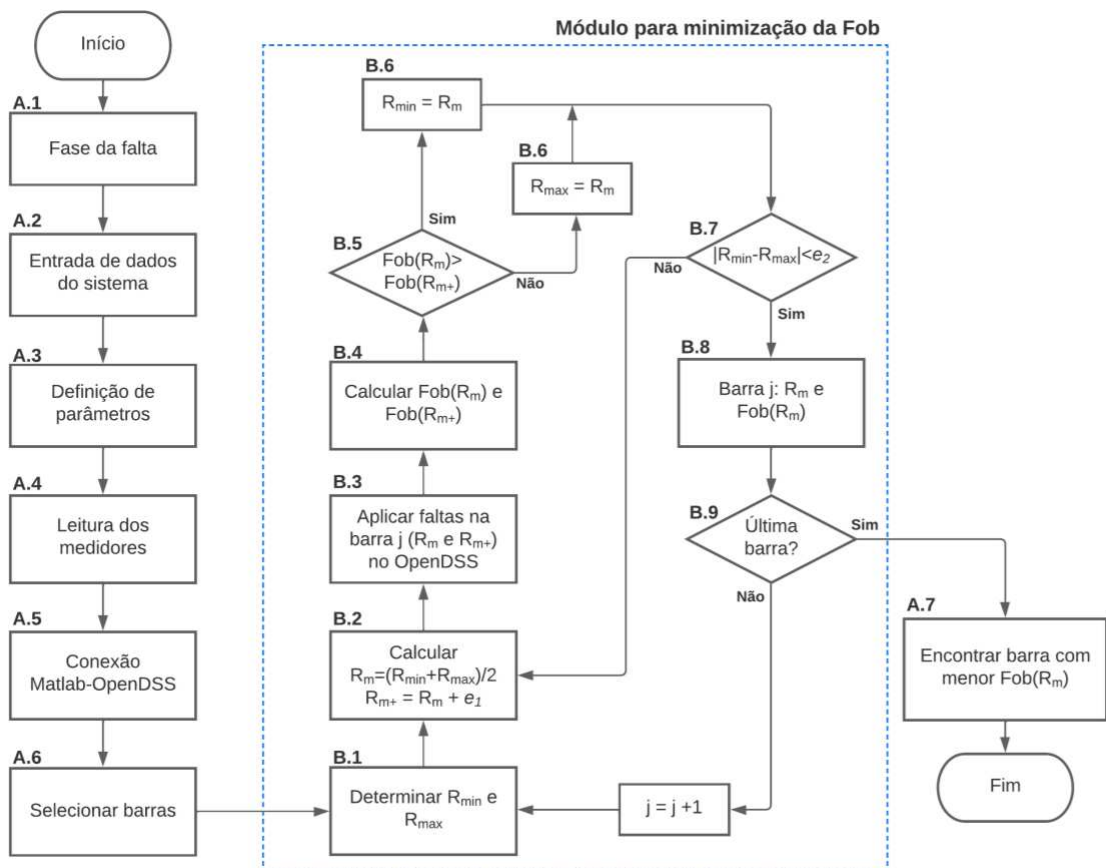
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Constata-se que, comparando o valor mínimo da função objetivo em cada nó do sistema para uma mesma FAI estudada, a menor Fob ocorrerá para o nó em que a FAI está localizada com valor de r igual à resistência de falta. Isto posto, a metodologia proposta neste trabalho para localização de faltas de alta impedância utilizará deste comportamento do mínimo da função objetivo obtido com os parâmetros da falta para determinar o local da FAI.

3.3 MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FAIS

A Figura 22 mostra o esquema proposto para a solução do método apresentado na seção 3.2. Cada uma das etapas será explicada na sequência. É preciso destacar que a proposta deste método consiste em somente determinar o nó do sistema em que a FAI está localizada e seu respectivo valor de impedância, o processo de detecção de FAIs não é tema deste trabalho. Diversos métodos para a detecção da falta são propostos pela literatura, como citado no item 1.3 deste trabalho.

Figura 22 – Fluxograma do método de localização de FAIs



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A.1 – Fase da falta: neste primeiro passo, o algoritmo recebe a informação de que há uma falta de alta impedância na rede e qual a fase de detecção.

A.2 – Entrada de dados do sistema: aqui os dados do sistema de distribuição (por exemplo, o sistema IEEE 34 ou IEEE 123) são incorporados. São necessários os dados das cargas, das linhas e a topologia da rede.

A.3 – Definição de parâmetros: nesta etapa, são definidos o passo e_1 e o critério de parada e_2 do processo iterativo do módulo de minimização da Fob, que será explicado posteriormente.

A.4 – Leitura dos medidores: os valores de tensão e corrente nos locais em que os medidores estão alocados no respectivo sistema são adicionados ao algoritmo. As medições são do tipo RMS sincronizadas. Neste trabalho, os casos de falta estudados são previamente simulados no OpenDSS e as medidas de tensão e corrente são salvas para posterior aplicação no método.

A.5 – Conexão Matlab-OpenDSS: para dar início às simulações do sistema de distribuição, é feita a conexão do Matlab, software em que o algoritmo foi desenvolvido, ao software OpenDSS.

A.6 – Selecionar nós: neste passo, seleciona-se os nós em que serão analisadas FAIs a fim de encontrar o local provável do defeito. O algoritmo pode procurar em todos os nós do sistema ou em apenas um conjunto. Neste trabalho, optou-se por analisar faltas em todos os nós do respectivo SD. Estão definidos, então, os N problemas de PNL, que são resolvidos por um módulo para minimização da Fob, detalhado posteriormente.

A.7 – Encontrar nó com menor Fob: após o processo de encontrar a Fob mínima em cada nó selecionado para análise, o algoritmo ordena os valores encontrados das Fobs. Após a ordenação, o nó do sistema que possui a menor Fob corresponde ao local da falta de alta impedância encontrado pelo método proposto.

Para minimizar o valor da Fob, ou seja, resolver o problema de PNL, a técnica utilizada é baseada no Método da Bisseção (ver mais no ANEXO A – Método das bisseções), cuja função no cálculo numérico é encontrar a raiz de uma função. Originalmente, o Método da Bisseção analisa o sinal da função para determinar o subintervalo mantido no processo iterativo. Aqui, analisa-se a derivada da função para determinar o subintervalo que contém o mínimo da curva. O módulo para minimização da Fob é dividido em nove etapas de um processo iterativo, que serão explicadas na sequência.

B.1 – Determinar R_{\min} e R_{\max} : inicialmente, indica-se um intervalo de resistências que contenha a Fob mínima para iniciar o processo iterativo em determinado nó.

B.2 – Calcular $R_m=(R_{\min}+R_{\max})/2$ e $R_{m+}=R_m+e_l$: para reduzir a amplitude do intervalo $[R_{\min},R_{\max}]$, calcula-se o ponto médio $R_m=(R_{\min}+R_{\max})/2$. Para escolher o próximo subintervalo, é preciso analisar o sinal da derivada deste ponto médio. No cálculo numérico, uma aproximação aceitável para a primeira derivada de uma função qualquer $f'(x_0)$ pode ser calculada como a diferença finita progressiva de ordem 1 conforme (6) tomando $h \neq 0$ pequeno (JUSTO *et al.*, 2020). A função f equivale à Fob.

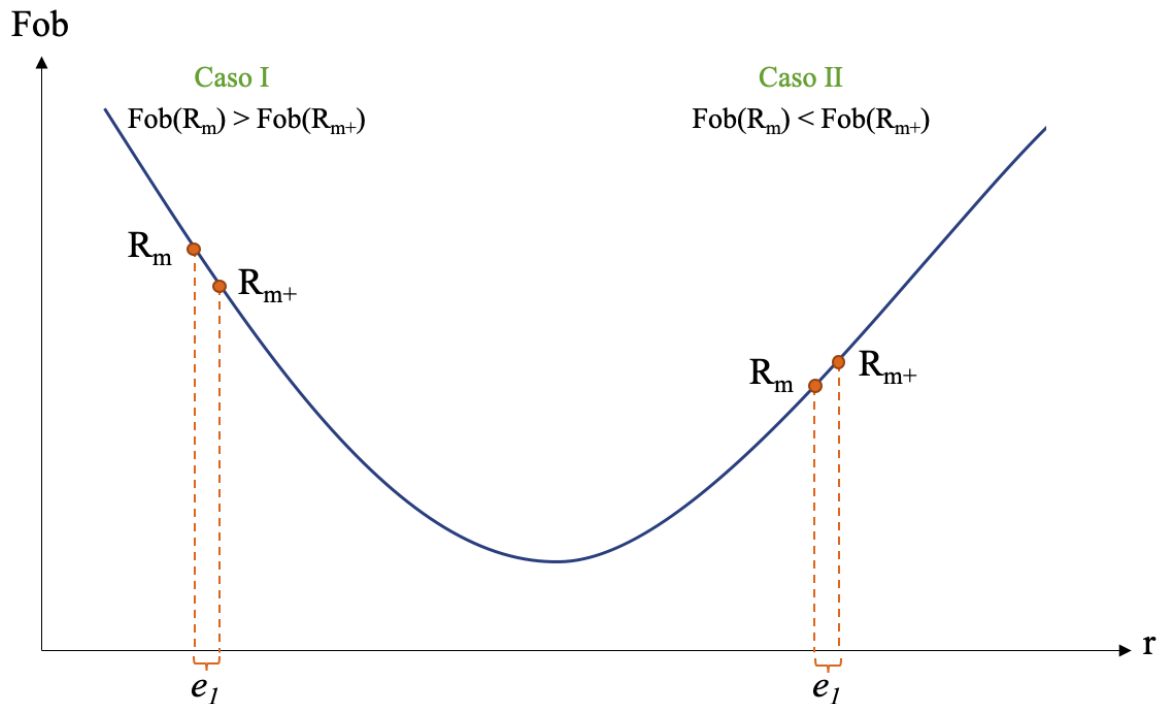
$$D_{+,h}f(x_0): = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} \approx f'(x_0) \quad (6)$$

Nesta etapa, calcula-se primeiramente $R_{m+}=R_m+e_l$, onde o passo e_l é um valor pequeno maior que zero, cujo valor foi estipulado na etapa A.3.

B.3 – Aplicar faltas na barra j (R_m e R_{m+}) no OpenDSS: simular as faltas de alta impedância no OpenDSS para R_m e R_{m+} no nó j .

B.4 – Calcular $Fob(R_m)$ e $Fob(R_{m+})$: a partir das medições obtidas nas simulações da etapa anterior (\bar{m}_i), as funções objetivos são calculadas para as resistências R_m e R_{m+} .

B.5 – $Fob(R_m) > Fob(R_{m+})?$: com a Fob calculada para o ponto médio R_m , nesta etapa analisa-se a inclinação da reta tangente à curva neste ponto para escolher o próximo subintervalo. A derivada aproximada não precisa ser calculada conforme (6) neste caso, pois somente analisando graficamente a Figura 23, é possível saber em qual região da curva da Fob está R_m . Se $Fob(R_m) > Fob(R_{m+})$ no caso I, conclui-se que o ponto mínimo está à direita de R_m . Se $Fob(R_m) < Fob(R_{m+})$ no caso II, conclui-se que o ponto mínimo está à esquerda de R_m .

Figura 23 – Fob para R_m e R_{m+} em dois casos

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

B.6 – $R_{\max}=R_m$ ou $R_{\min}=R_m$: caso a afirmação da etapa anterior seja verdadeira, ou seja, $Fob(R_m) > Fob(R_{m+})$, o intervalo a ser mantido no processo iterativo do Método da Bisseção deve ser $[R_m, R_{\max}]$, isto é, R_m assume o valor mínimo do intervalo. Caso a afirmação da etapa anterior seja falsa, ou seja, $Fob(R_m) < Fob(R_{m+})$, o intervalo adotado deve ser $[R_{\min}, R_m]$, então R_m assume o valor máximo.

B.7 – $|R_{\min} - R_{\max}| < e_2$? : nesta etapa, após ajustar o novo intervalo, é preciso verificar se o processo iterativo chegou a uma aproximação da Fob mínima com certa precisão e_2 (variável de decisão para finalizar o processo iterativo definida na etapa A.3). Desse modo, verifica-se o critério de parada, ou seja, se $|R_{\min} - R_{\max}| < e_2$, o algoritmo passa para o passo B.8. Caso o critério de parada não seja satisfeito, o algoritmo volta à etapa B.2 e, conseqüentemente, são calculados um novo ponto mínimo e um novo intervalo.

B.8 – Barra j : R_m e $Fob(R_m)$: com o critério de parada satisfeito, armazena-se o nó, a Fob mínima e sua respectiva resistência de falta.

B.9 – Última barra? : entre os nós selecionados na etapa A.6, neste passo verifica-se se o processo resultou na Fob mínima e sua resistência em cada um desses nós. Caso o nó j não seja o último nó dentre os selecionados (ou o último dentre todos os nós do sistema), o processo iterativo será reiniciado para o próximo nó ($j = j + 1$). Caso contrário, todas os nós já foram avaliados e o algoritmo passa para a etapa A.7, finalizando o módulo para minimização da Fob.

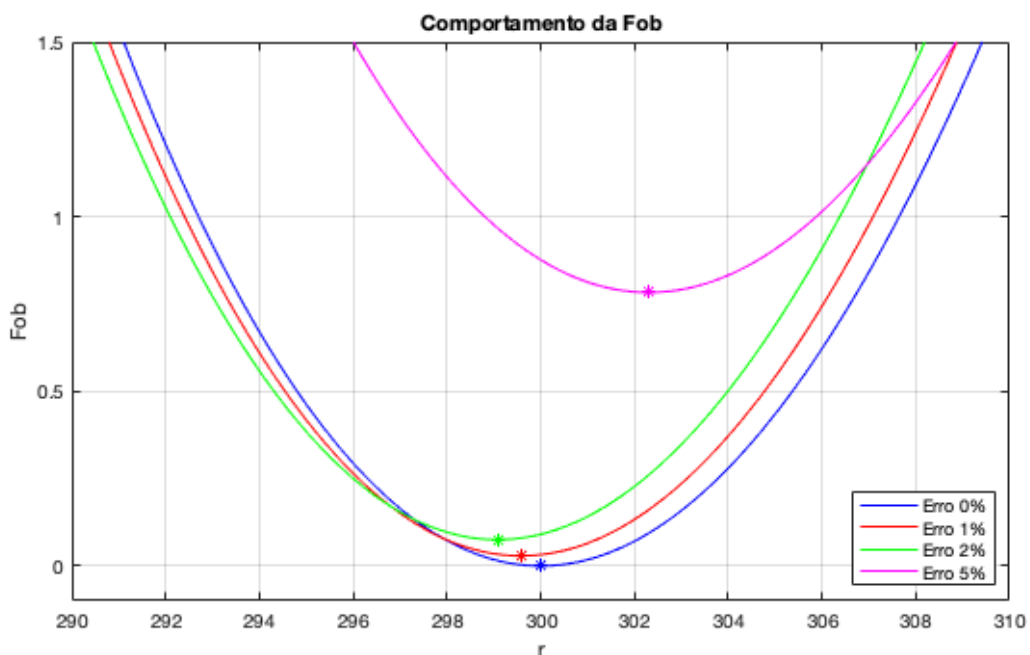
Após passar por todas as fases descritas anteriormente do método proposto, a localização estimada para a falta de alta impedância corresponde à barra com o menor valor da Fob. Este processo é chamado neste trabalho de minimização de erros. O método aqui proposto será aplicado em testes apresentados no próximo capítulo.

3.4 COMPORTAMENTO NA PRESENÇA DE ERROS

Nos sistemas de distribuição reais, geralmente os valores das cargas não são totalmente conhecidos e as medições apresentam erros, conforme comentado no Capítulo 2. Há possibilidade de que as cargas possam ser medidas por medidores inteligentes ou calculadas por estimação de estados, por exemplo. Para representar essas características, neste trabalho as cargas do sistema são multiplicadas individualmente por um valor aleatório dentro do intervalo para representar a falta de precisão dos valores de carga e os erros de medição.

Nesta seção, o comportamento da curva da função objetivo em relação aos erros adicionados aos dados de entrada é avaliado. Considera-se o mesmo exemplo da falta de alta impedância de 300Ω no nó 812 do sistema IEEE 34 barras. A Figura 24 mostra as curvas da Fob para erros em módulo de até 0%, 1%, 2% e 5%.

Figura 24 – Comportamento da Fob na presença de erros



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Analisando a Figura 24 é possível constatar que as quatro curvas da função objetivo no gráfico têm o mesmo formato, porém o valor mínimo não chega em zero quando há presença de erro nas medições, sempre com o menor valor próximo à resistência de 300Ω . Ademais, quanto maior o valor dos erros adicionados, maior o valor mínimo da Fob. Os valores mínimos estão indicados nas curvas da Figura 24 com um asterisco.

O sistema IEEE 123 apresenta o mesmo comportamento da função objetivo ao acrescentar erros nas cargas.

4 RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações do método proposto para localizar faltas de alta impedância monofásicas em alimentadores de média tensão.

O método proposto foi implementado no *software* Matlab e o *software* OpenDSS foi empregado nas simulações dos sistemas de distribuição.

Para analisar se a localização encontrada pelo método proposto é quantitativamente próxima do real local da falta, o erro é calculado dividindo a distância (em metros) entre o local estimado e o real pelo comprimento total do sistema de distribuição estudado. Se a localização resultante do algoritmo fica à montante de onde está a FAI, do ponto de vista da fonte do SD, o erro calculado é negativo. Caso contrário, o erro é positivo. O erro em percentual é calculado conforme (7).

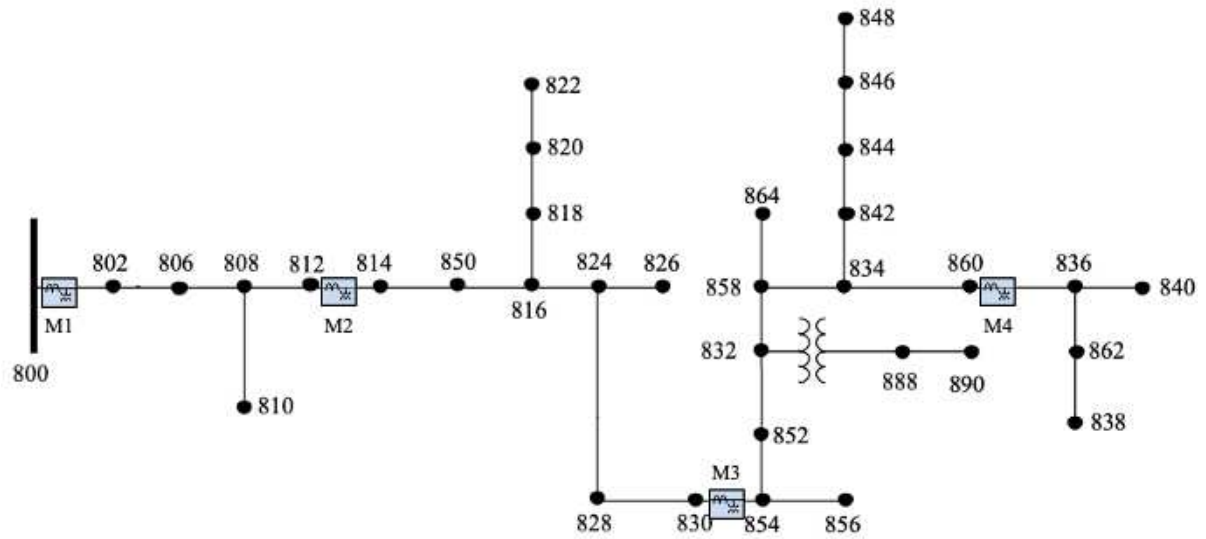
$$\text{Erro (\%)} = \frac{\text{Localização estimada} - \text{Localização real}}{\text{Tamanho total do SD}} \cdot 100 \quad (7)$$

Primeiramente, o método proposto neste trabalho será testado no sistema IEEE 34 barras com os dados de entrada sem qualquer tipo de erro e depois na presença de erros. As mesmas análises serão feitas posteriormente no sistema IEEE 123 barras.

4.2 IEEE 34 BARRAS

No primeiro teste realizado para localizar faltas de alta impedância no sistema IEEE 34 barras, foram alocados quatro medidores ao longo do alimentador principal nas barras 800, 812, 830 e 860. Os reguladores de tensão foram desconsiderados. Os locais dos medidores estão indicados na Figura 25 e foram escolhidos de forma heurística, distribuindo os medidores ao longo de todo o comprimento do alimentador principal do sistema. Ressalta-se que o objetivo deste trabalho não é a alocação ótima de medidores, mas é um tema a ser desenvolvido em trabalhos futuros.

Figura 25 – Sistema IEEE 34 barras com medidores alocados



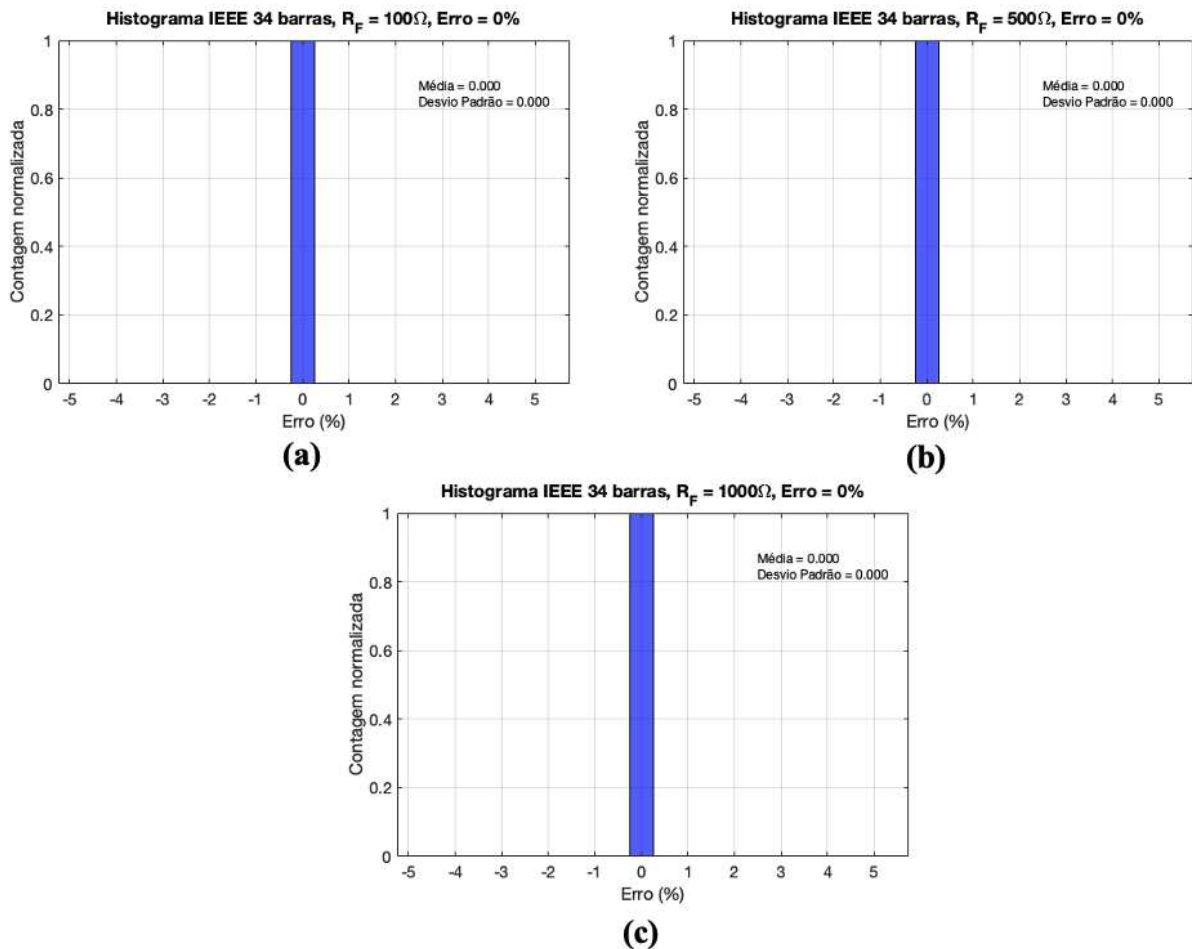
Fonte: Adaptado de IEEE ([S.d.]).

4.2.1 Análise sem Erros

A primeira análise verifica o comportamento do método considerando que não existe nenhum erro ou incerteza de dados. Resistências de falta de 100Ω , 500Ω e 1000Ω são testadas. Em cada um dos casos, as faltas são aplicadas em todas as barras do sistema IEEE-34 e, com os locais resultantes, são calculados os erros da localização da FAI utilizando a equação (7). A partir disso, são obtidos os histogramas da Figura 26 para as respectivas resistências de falta.

Os histogramas da Figura 26 são normalizados, ou seja, o nó com erro nulo atinge 1 quando 100% das faltas testadas são localizadas corretamente. Esses resultados demonstram que, sem a presença de incertezas nos dados de entrada, o método está modelado corretamente e as barras faltosas são localizadas com exatidão.

Figura 26 – Histogramas dos resultados para sistema IEEE-34 sem erros com resistência de (a) 100Ω , (b) 500Ω e (c) 1000Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

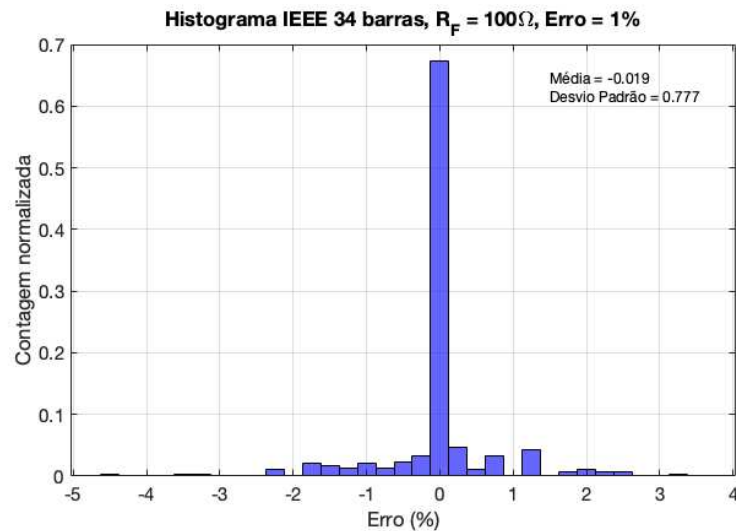
4.2.2 Análise com Erros

Conforme mencionado no Capítulo 2, os medidores presentes no sistema de distribuição podem apresentar erros de medição. Além disso, as cargas nem sempre são conhecidas com precisão. Por isso, esta seção testa o método proposto neste trabalho com a presença de incertezas nos dados de entrada. O objetivo é verificar se o método é robusto para localizar FAIs mesmo com erros nas medições ou nas cargas. Erros nos parâmetros da linha do SD não foram considerados neste trabalho, mas possivelmente serão incorporados em trabalhos futuros.

Para representar essas incertezas nas cargas e nas medições, foram inseridos erros aleatoriamente em todas as cargas do SD. São analisados erros com distribuição uniforme de 1%, 2%, 5% e 10% para resistências de falta de 100Ω , 500Ω e 1000Ω . Neste teste, são aplicadas faltas em todas as barras do sistema.

Inicialmente, considera-se um erro de até $\pm 1\%$ aplicado aleatoriamente em todas as cargas do IEEE 34 barras. Da mesma forma, os erros da localização são calculados e é construído o histograma normalizado com os resultados. A Figura 27 mostra o histograma para faltas com resistência de 100Ω com erros de até $\pm 1\%$ no sistema IEEE-34. Neste caso, o maior erro registrado – em módulo – foi de $-4,62\%$ cuja falta foi aplicada no nó 822 e a solução encontrada para o local da falta foi o nó 820.

Figura 27 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 100Ω



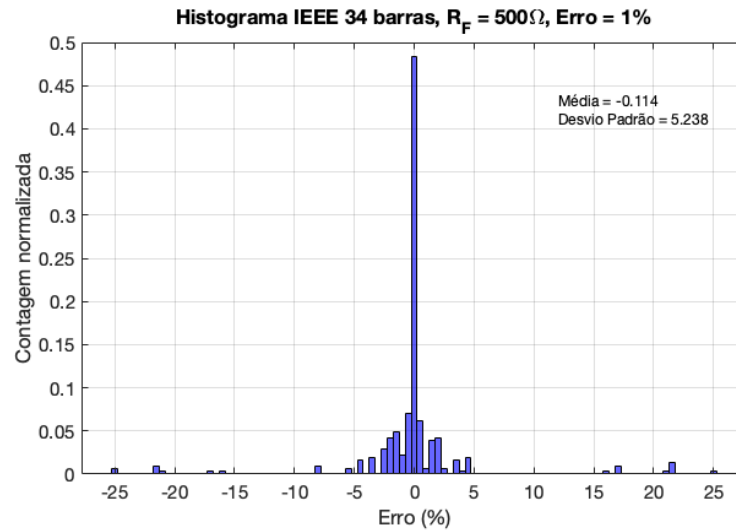
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para o sistema IEEE 34 barras, o passo do processo iterativo e_1 adotado foi 0,001, O critério de parada e_2 foi definido como 0,002 e o número máximo de iterações para encontrar o mínimo da função objetivo adotado foi 30, caso o critério de parada ainda não tenha sido atingido. Todo o processo computacional foi executado em um MacBook com processador Intel Core i5 e memória de 8GB. O tempo médio para localizar apenas uma FAI foi de 10 minutos.

O histograma para faltas com resistência de 500Ω com erros de até $\pm 1\%$ no sistema IEEE-34 pode ser visto nas Figura 28. A média e o desvio padrão estão contidos na figura. Os casos com maiores erros correspondem a faltas aplicadas no nó 828 com resultado para 822, faltas no nó 822 com resultados em 824 e 814, falta no nó 850 e resultado para 822 e falta no nó 816 resultando o nó 822.

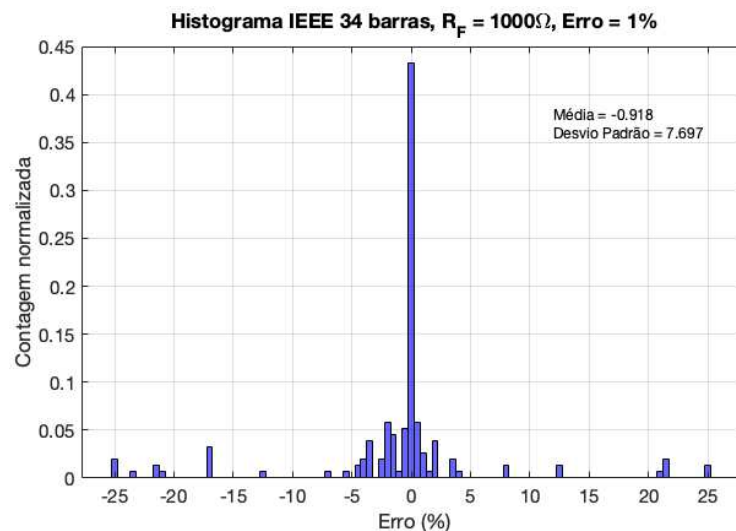
A Figura 29 exibe o histograma para FAIs com resistência de 1000Ω ainda com erros de até $\pm 1\%$. O desvio padrão aumentou para 7,7 e os casos onde o método apresentou os maiores erros foram em faltas nos nós 822, 828, 824 e 812.

Figura 28 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 500Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

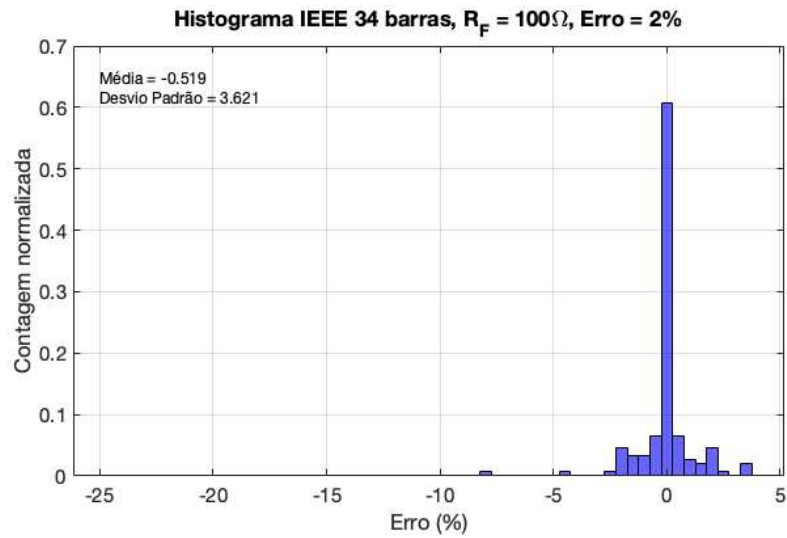
Figura 29 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 1000Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

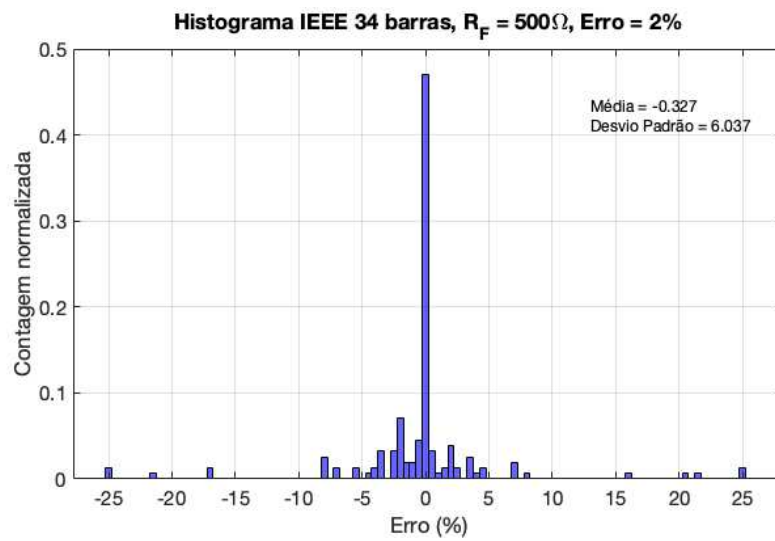
Considerando um erro de até $\pm 2\%$ introduzido aleatoriamente no IEEE-34, os resultados em forma de histograma para resistências de falta de 100Ω , 500Ω e 1000Ω estão contidos nas Figura 30, Figura 31 e Figura 32, respectivamente. No histograma da Figura 30, apenas faltas no nó 824 registraram resultados discrepantes muito acima de 10% em módulo. Já os nós que mais impactaram nos piores resultados das Figura 31 e Figura 32 foram 822, 828, 824 e 820. Para FAIs de 1000Ω , vale mencionar que algumas faltas aplicadas nos nós 850, 856, 810, 808, 812 e 852 também acarretaram erros significativos na localização.

Figura 30 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 2\%$ com resistência de 100Ω



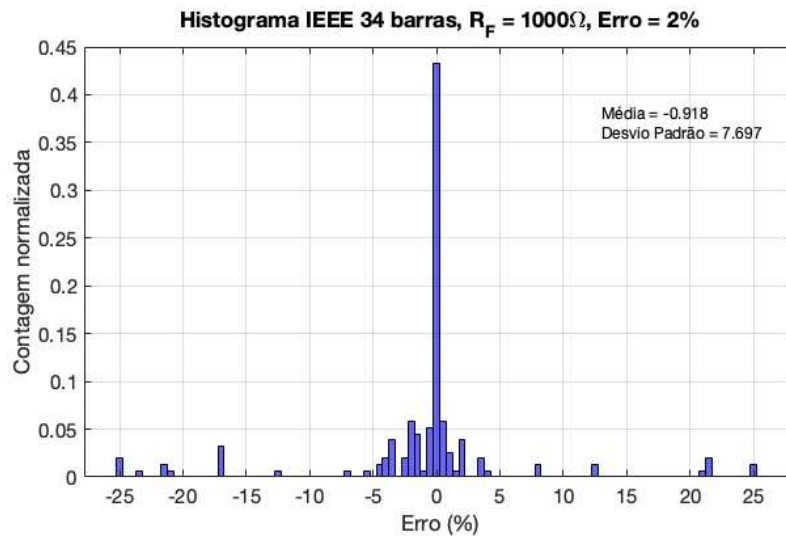
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 31 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 2\%$ com resistência de 500Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

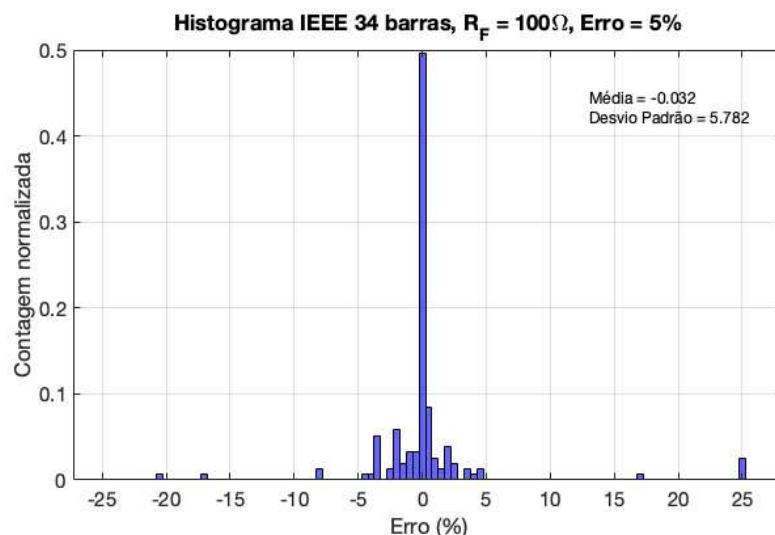
Figura 32 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 2\%$ com resistência de 1000Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Avaliando um erro de até $\pm 5\%$ inserido aleatoriamente no IEEE-34, o resultado em forma de histograma para resistência de falta de 100Ω está contido na Figura 33. Quase metade dos casos acertaram o nó defeituoso, o desvio padrão é de 5,8 e os nós com maior erro na localização foram 822 e 824.

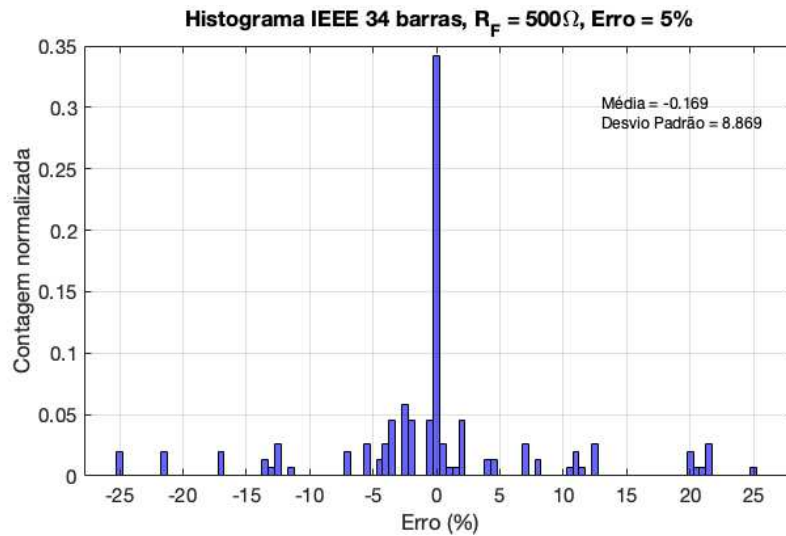
Figura 33 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 5\%$ com resistência de 100Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para resistência de falta de 500Ω , cujo histograma está exibido na Figura 34, quase 30% das observações acertaram o nó com a falta e os maiores erros na localização foram registrados nos nós 822, 828, 824, 814 e 816.

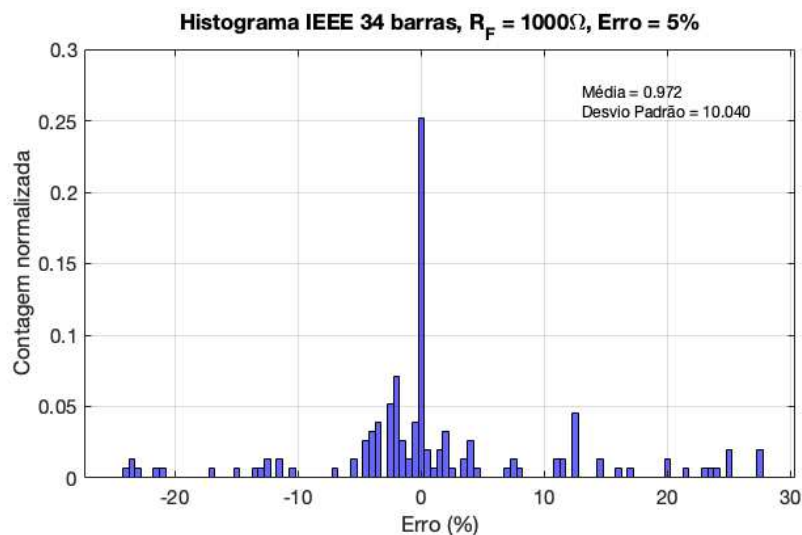
Figura 34 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 5\%$ com resistência de 500Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 35 mostra o histograma dos resultados do método com erros de até $\pm 5\%$ aleatoriamente com resistência de falta de 1000Ω . O desvio padrão é de 10,0 e os maiores erros de localização estão em faltas aplicadas no ramo lateral entre os nós 816 e 822.

Figura 35 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 5\%$ com resistência de 1000Ω

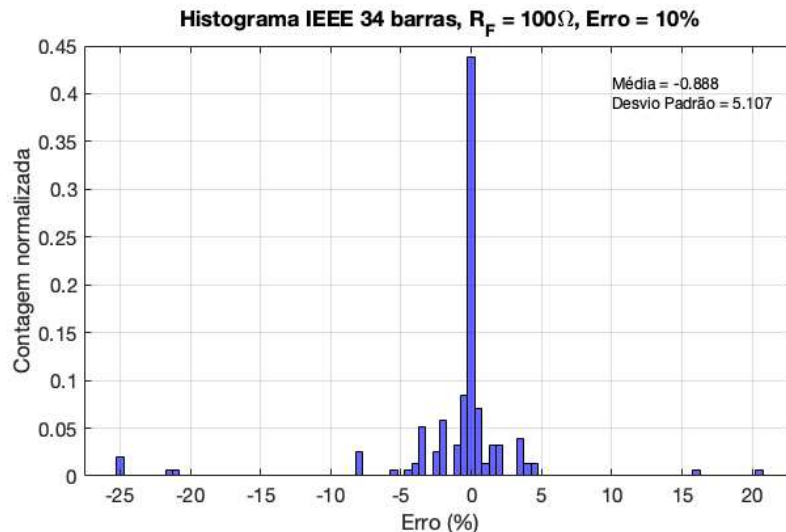


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Por fim, para um erro de até $\pm 10\%$ introduzido no sistema IEEE 34 barras de forma aleatória, os histogramas com os resultados para resistências de falta de 100Ω , 500Ω e 1000Ω podem ser vistos nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38, respectivamente.

A grande maioria dos casos mostrados no histograma da Figura 36 estão contidos entre -5% e +5% de erro, mesmo com um valor alto de incerteza nos dados do sistema. Os nós que apresentaram resultados com erros maiores que 10% em módulo são 828, 822, 820 e 818.

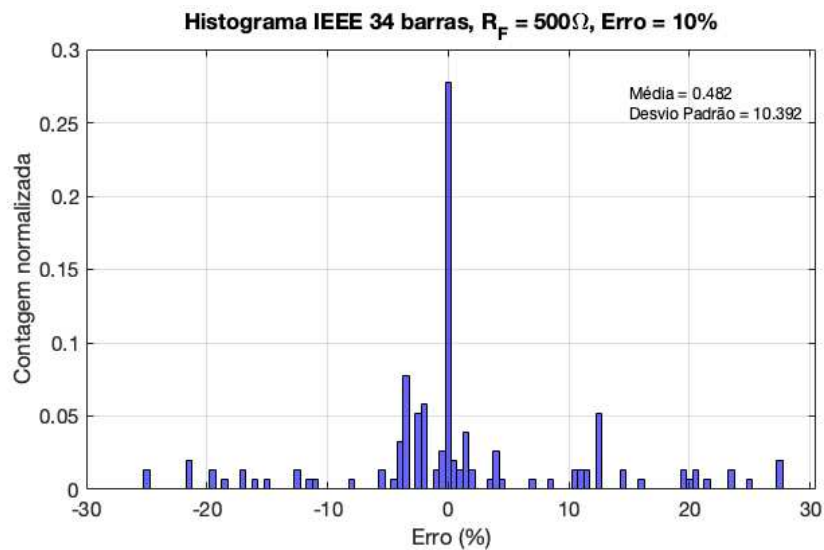
Figura 36 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 10\%$ com resistência de 100Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

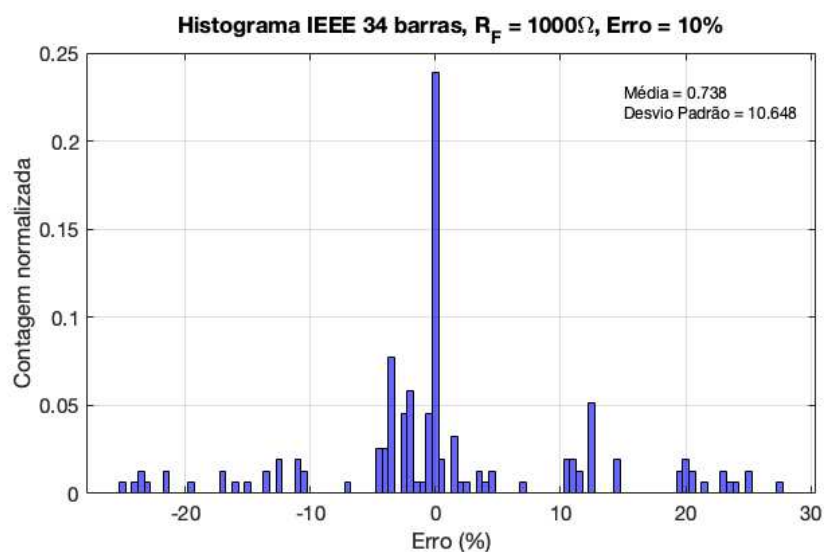
Os histogramas das Figura 37 e Figura 38 traduzem um comportamento diferente, pois com resistências de falta maiores e com um valor alto de incerteza nos dados de entrada, boa parte dos casos têm erros maiores que 5% e os valores do desvio padrão são maiores que 10,0 em ambos os histogramas. Os nós mais responsáveis por esse desvio no erro seguem o mesmo padrão de comportamento dos resultados discutidos anteriormente, localizados no ramo lateral conectado à barra 816 e nos nós próximos.

Figura 37 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 10\%$ com resistência de 500Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 38 – Histograma para sistema IEEE-34 com erros de até $\pm 10\%$ com resistência de 1000Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Sintetizando a análise desta seção, a Tabela 1 contém os resultados obtidos em todos os casos para o sistema IEEE 34 barras. A primeira coluna consiste nos erros presentes nos dados de entrada de até $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$. A segunda coluna é a resistência de falta simulada em todas as barras do SD. A terceira e a quarta coluna são a média e o desvio padrão, respectivamente, cujos valores também estão presentes nos histogramas mostrados nesta seção. A última coluna é correspondente à média dos valores absolutos dos erros calculados por (7), o que facilita a percepção do quão preciso é o resultado, já que os erros da localização podem ser

positivos e negativos, fazendo com que sua média (terceira coluna) sempre fique próxima de zero.

Tabela 1 – Resultados da análise com erros do IEEE-34

Erros dados	R_F (Ω)	Média	Desvio Padrão	Média erros absolutos
1%	100	-0,019%	0,777	0,352%
	500	-0,114%	5,238	2,077%
	1000	-0,918%	7,697	3,676%
2%	100	-0,519%	3,621	1,047%
	500	-0,327%	6,037	2,752%
	1000	-0,771%	7,693	4,292%
5%	100	-0,032%	5,782	2,237%
	500	-0,169%	8,869	5,298%
	1000	0,972%	10,040	6,248%
10%	100	-0,888%	5,107	2,167%
	500	0,482%	10,392	6,517%
	1000	0,738%	10,648	7,075%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Analisando a Tabela 1, nota-se que o desvio padrão e a média dos erros absolutos tende a crescer na medida em que o erro nos dados de entrada aumenta e com o aumento do valor da resistência de falta. Esses fatos ocorrem porque quanto maior os erros nos dados de entrada, maior o valor da Função Objetivo mínima devido ao maior número de resíduos introduzidos no processo de minimização de erros para localizar a falta corretamente. Ademais, quanto maior a resistência, menor a corrente de falta e mais difícil é o processo de localização da FAI.

Para melhor visualizar a porcentagem de vezes que o método acerta com precisão o nó defeituoso ou consegue localizar a falta com bastante proximidade, os histogramas foram cuidadosamente estudados e concentrados na Tabela 2. As colunas de ocorrência correspondem ao cumulativo de observações do percentual dos erros do local estimado da falta E_{LF} , que é o valor absoluto do resultado da equação (7). É possível notar que até o caso com pior resultado, ou seja, com erros de até $\pm 10\%$ com resistência de falta de 1000Ω , mais que a metade possui erro da localização menor que 5% e a quantidade de vezes em que o método acertou o nó defeituoso corresponde a quase 1/5 das simulações.

Tabela 2 – Ocorrências dos resultados da análise com erros do IEEE-34

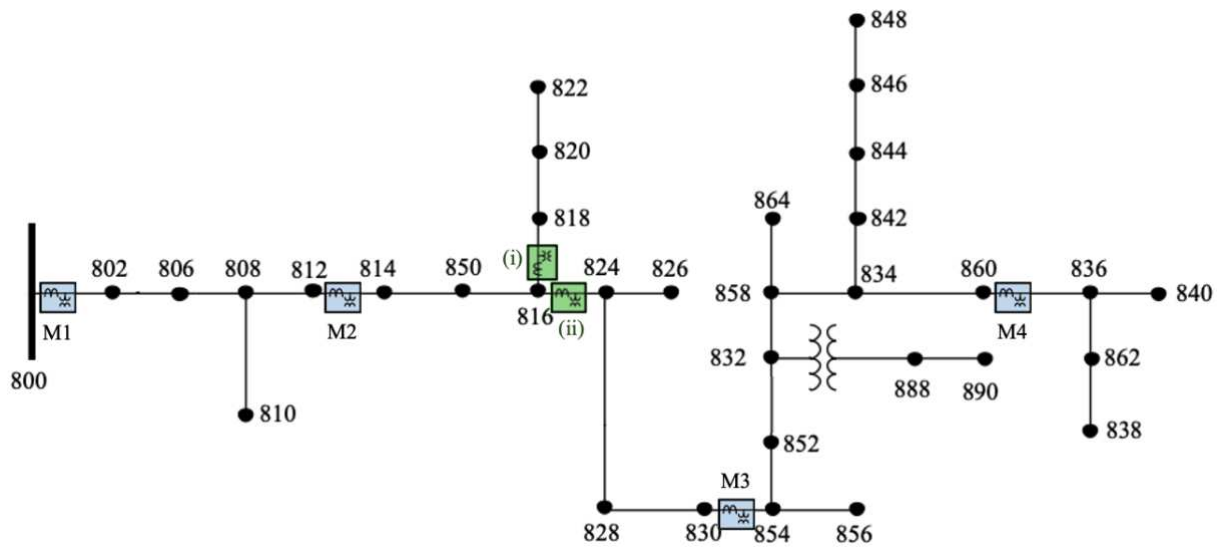
Erros dados	$R_F (\Omega)$	Ocorrência				
		$E_{LF} = 0\%$	$E_{LF} \leq 2\%$	$E_{LF} \leq 5\%$	$E_{LF} \leq 10\%$	$E_{LF} > 10\%$
1%	100	57,3%	96,3%	100,0%	100,0%	0,0%
	500	35,5%	80,3%	92,6%	94,2%	5,8%
	1000	32,3%	69,7%	83,9%	86,5%	13,5%
2%	100	50,3%	92,9%	97,4%	98,1%	1,9%
	500	33,5%	69,0%	85,8%	93,5%	6,5%
	1000	26,5%	55,5%	75,5%	82,6%	17,4%
5%	100	35,5%	78,1%	92,9%	94,2%	5,8%
	500	21,9%	47,7%	68,4%	76,8%	23,2%
	1000	16,8%	43,2%	67,7%	72,3%	27,7%
10%	100	28,4%	74,8%	92,3%	95,5%	4,5%
	500	17,4%	43,9%	66,5%	69,7%	30,3%
	1000	17,4%	38,7%	62,6%	63,9%	36,1%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.3 Análise de medidores

Esta seção analisa o desempenho do método proposto em relação ao número de medidores instalados no sistema. As resistências de falta consideradas neste estudo são de 500Ω e erros de medição de até 1% em módulo. Os maiores erros nos resultados da seção 4.2.2 foram registrados em faltas aplicadas entre os nós 814 e 828 do sistema IEEE 34 barras. Por essa razão, optou-se por acrescentar um quinto medidor no sistema nesta região para verificar novamente a atuação do método. Dois locais foram escolhidos para alocar o medidor adicional: ambos logo à jusante da barra 816, porém com medição de corrente no ramal lateral (i) e no alimentador principal (ii), como ilustrado na Figura 39.

Figura 39 – Sistema IEEE 34 barras com cinco medidores



Fonte: Adaptado de IEEE ([S.d.]).

A Tabela 3 mostra os resultados da análise – média, desvio padrão e média dos erros absolutos – do método comparando com o caso original (quatro medidores) obtido na seção 4.2.2. A Tabela 4 mostra as ocorrências do erro da localização nos dois casos como também no original.

Tabela 3 – Resultados da análise com cinco medidores no IEEE-34

Caso	Média	Desvio Padrão	Média erros absolutos
Original	-0,114%	5,238	2,077%
i	-0,701%	6,583	2,743%
ii	0,587%	5,417	2,264%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 4 – Ocorrências dos resultados da análise com cinco medidores no IEEE-34

Caso	Ocorrência				
	$E_{LF} = 0\%$	$E_{LF} \leq 2\%$	$E_{LF} \leq 5\%$	$E_{LF} \leq 10\%$	$E_{LF} > 10\%$
Original	35,5%	80,3%	92,6%	94,2%	5,8%
i	40,3%	76,6%	87,9%	90,3%	9,7%
ii	40,3%	80,6%	88,7%	91,9%	8,1%

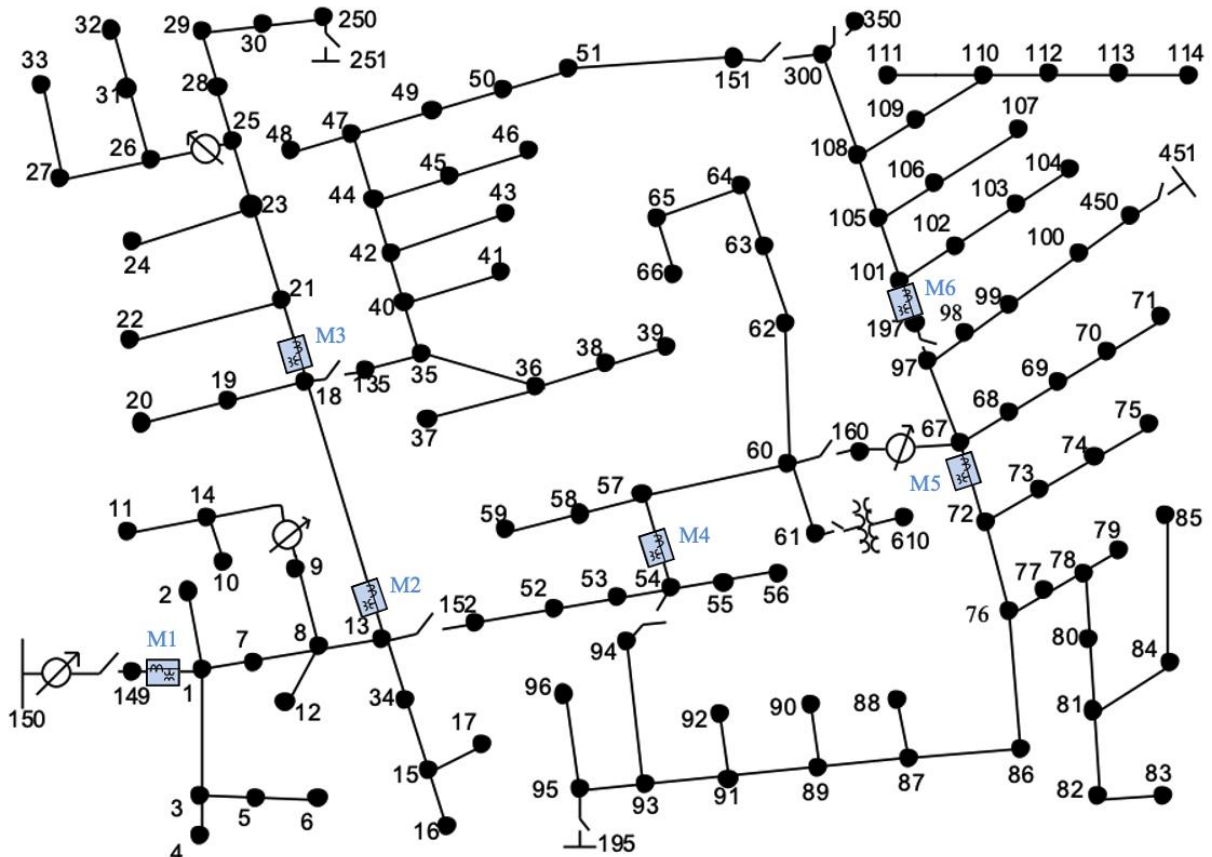
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A partir desses resultados, verifica-se que o medidor acrescentado não melhorou a ocorrência de erros na respectiva região do alimentador. Este não é o objetivo principal deste trabalho e um estudo mais profundo acerca da quantidade e local ótimos pode ser realizado em trabalhos futuros.

4.3 IEEE 123 BARRAS

Nesta seção são realizados testes para localizar FAIs no sistema IEEE 123 barras. Foram alocados seis medidores ao longo do alimentador nas barras 149, 13, 18, 54, 67 e 197, cujos locais estão indicados na Figura 40 e foram escolhidos de forma heurística.

Figura 40 – Sistema IEEE 123 com medidores alocados



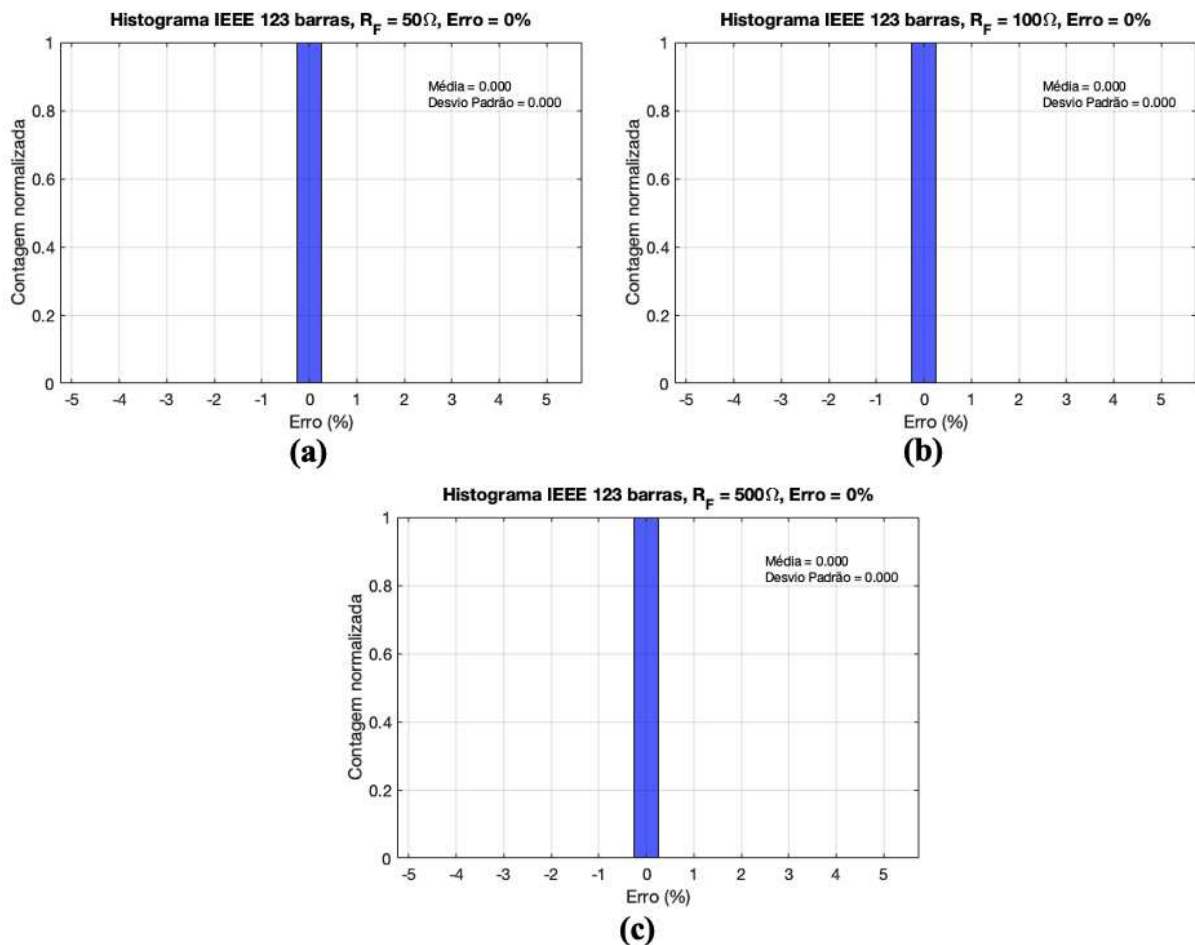
Fonte: Adaptado de IEEE ([S.d.]).

4.3.1 Análise sem Erros

A primeira análise neste sistema testa o comportamento do método considerando que não existe nenhum erro nos dados. Resistências de falta de 50Ω , 100Ω e 500Ω são empregadas. Como a tensão do sistema IEEE-123 é mais baixa que a do sistema IEEE-34, para uma mesma resistência, a corrente de falta no sistema IEEE-123 consequentemente é menor, por isso, optou-se por avaliar resistências de falta mais baixas.

Em cada um dos casos, as faltas são aplicadas em todas as barras do sistema IEEE-123 e, com os locais resultantes, são calculados os erros da localização da FAI utilizando (7) e são construídos os histogramas normalizados da Figura 41 para as respectivas resistências de falta. Para as três resistências averiguadas, as faltas são localizadas corretamente em todas os nós.

Figura 41 – Histogramas dos resultados para sistema IEEE-123 sem erros com resistência de (a) 50Ω , (b) 100Ω e (c) 500Ω



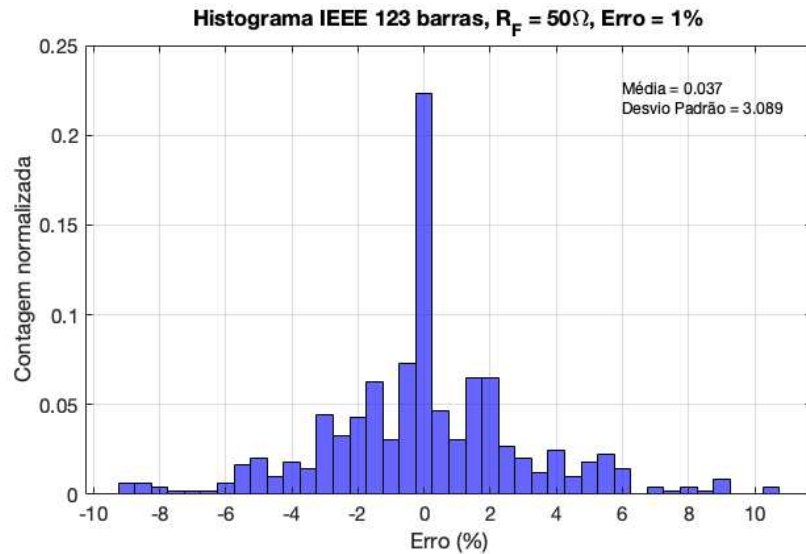
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.3.2 Análise com Erros

Similar às análises feitas para o sistema IEEE 34 barras na seção 4.2, esta seção avalia o método proposto com a presença de incertezas nos dados de entrada para o sistema IEEE 123 barras. Os erros foram inseridos erros aleatoriamente de forma uniforme em todas as cargas do sistema. São analisados erros com módulos de até 1%, 2%, 5% e 10% – com distribuição uniforme – para resistências de falta de 50Ω , 100Ω e 500Ω . Novamente, são aplicadas faltas em todas as barras do sistema.

Utilizando um erro de até $\pm 1\%$ aleatório em todas as cargas do IEEE-123. A Figura 42 mostra o histograma dos erros para faltas com resistência de 50Ω . O maior erro registrado para o histograma da Figura 42 foi de 10,38%.

Figura 42 – Histograma para sistema IEEE-123 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 50Ω

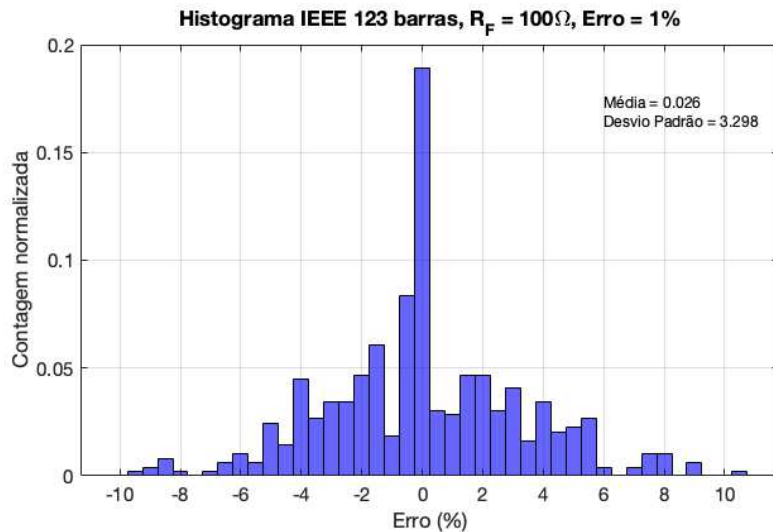


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para o sistema IEEE 123 barras, o passo do processo iterativo e_1 adotado foi 0,1, O critério de parada e_2 foi definido como 0,2 e o número máximo de iterações foi 30. O tempo necessário para localizar apenas uma falta foi cerca de 30 minutos em um MacBook com Intel Core i5 e 8GB de memória. Diminuir o tempo de execução do processo de localização de FAIs não foi prioridade no desenvolvimento deste trabalho e será melhorado em trabalhos futuros.

Para uma resistência de falta de 100Ω , ainda considerando erros de até $\pm 1\%$, o histograma com os resultados está na Figura 43. Neste caso, menos de 20% das observações localizaram corretamente o nó em que ocorreu a FAI, ou seja, o nó estimado pelo algoritmo é o mesmo em que a falta ocorreu.

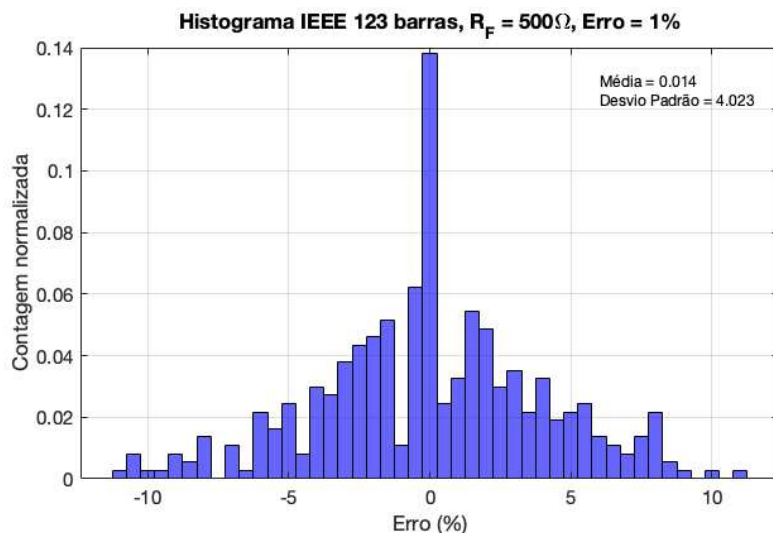
Figura 43 – Histograma para sistema IEEE-123 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 100Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para a resistência de falta de 500Ω , o histograma com os erros pode ser visto na Figura 44. O maior erro registrado, em módulo, foi de $-11,02\%$.

Figura 44 – Histograma para sistema IEEE-123 com erros de até $\pm 1\%$ com resistência de 500Ω



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Visando sintetizar a análise desta seção, os histogramas para os erros de até 2%, 5% e 10% não serão mostrados aqui, mas a Tabela 5 contém os resultados obtidos em todos os casos para o sistema IEEE123. A primeira coluna consiste nos erros nos dados de entrada, a segunda é a resistência de falta, a terceira e a quarta são a média e o desvio padrão, respectivamente, e a última coluna é a média dos valores absolutos dos erros calculados usando (7).

Tabela 5 – Resultados da análise com erros do IEEE-123

Erros dados	R _F (Ω)	Média	Desvio Padrão	Média erros absolutos
1%	50	0,037%	3,0893	2,163%
	100	0,026%	3,2983	2,444%
	500	0,014%	4,0229	3,065%
2%	50	0,063%	3,4171	2,458%
	100	-0,167%	3,5003	2,634%
	500	-0,129%	4,1073	3,246%
5%	50	-0,092%	3,9696	2,965%
	100	0,376%	4,0947	3,180%
	500	0,351%	5,2677	4,221%
10%	50	-0,383%	3,8166	3,083%
	100	-0,238%	4,1198	3,328%
	500	0,971%	7,018	5,689%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Analisando a Tabela 5, nota-se que o desvio padrão e a média dos erros absolutos aumentam conforme os erros nos dados de entrada e a resistência de falta crescem. Esse mesmo comportamento foi observado no sistema IEEE 34 barras.

A Tabela 6 mostra a porcentagem de acertos na localização da FAI feita pelo método, além disso, a ocorrência dos erros do local da falta ELF cumulativa também são destacados nas últimas colunas para melhor visualizar a precisão do método.

Tabela 6 – Ocorrências dos resultados da análise com erros do IEEE-34

Erros dados	R _F (Ω)	Ocorrência				
		$ELF = 0\%$	$ELF \leq 2\%$	$ELF \leq 5\%$	$ELF \leq 10\%$	$ELF > 10\%$
1%	50	22,4%	59,4%	88,6%	99,6%	0,4%
	100	18,9%	50,6%	88,0%	99,6%	0,4%
	500	13,8%	42,0%	78,3%	98,6%	1,4%
2%	50	20,6%	54,2%	83,2%	99,2%	0,8%
	100	17,3%	47,2%	83,7%	99,5%	0,5%
	500	8,9%	38,5%	78,3%	98,4%	1,6%
5%	50	16,5%	43,6%	78,6%	98,4%	1,6%
	100	14,1%	39,0%	79,4%	97,8%	2,2%
	500	7,3%	24,1%	69,9%	92,7%	7,3%
10%	50	9,5%	35,5%	81,8%	99,5%	0,5%
	100	9,2%	32,2%	78,0%	98,6%	1,4%
	500	6,5%	19,8%	54,5%	84,0%	16,0%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Comparando os dados da Tabela 6 com os resultados da Tabela 4 do sistema IEEE34, os resultados obtidos nos testes do sistema IEEE123 estão mais dispersos. Isso é consequência da diferença estrutural dos dois sistemas, já que a distância média entre os nós do sistema de 123 barras é muito menor que a distância média entre os nós do sistema-teste de 34 barras, sendo este mais longo. Dessa forma, a diferença de tensão e corrente de um nó ao outro vizinho no sistema IEEE123 é menor que no IEEE34, dificultando o algoritmo localizar o nó defeituoso com precisão na presença de erros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões do presente trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvido um método para localizar faltas de alta impedância monofásicas em sistemas de distribuição baseada na minimização de erros dos parâmetros da rede. O método utiliza medições de corrente e tensão não-fasoriais sincronizadas obtidas em alguns pontos da rede em um processo de otimização para encontrar o provável local da falta.

As medições não-fasoriais foram escolhidas na aplicação deste trabalho por serem o tipo mais comum de aquisição de dados das redes de distribuição atualmente no país. A quantidade de medidores e sua localização no sistema não são o foco deste trabalho.

Em cada nó do sistema onde a falta de alta impedância pode estar localizada, o algoritmo proposto neste trabalho realiza uma otimização da resistência de falta que minimiza o erro entre as medições de tensão e corrente eficaz, isto é, minimiza a diferença das medições do sistema defeituoso e as medições do sistema simulado com uma falta no respectivo nó com a resistência como variável. Essa diferença de medições é modelada como uma função objetivo.

Para encontrar o nó onde ocorre a falta, o algoritmo procura o nó do sistema cuja função objetivo apresenta o menor valor. Este nó que minimiza o erro das medições corresponde ao resultado do método para o local da falta. O método é capaz de localizar faltas de alta impedância monofásicas que ocorrem na média tensão, tanto no alimentador principal quanto em ramais laterais.

Para validação, foram utilizados dois sistemas para avaliar o método: o IEEE 34-Node Test Feeder e o IEEE 123-Node Test Feeder. Condições como cargas desequilibradas, bancos de capacitores e indutância e capacitância dos condutores foram consideradas com o objetivo de melhor retratar características reais dos sistemas de distribuição. Outra característica importante que muitas vezes são ignoradas pela literatura são as incertezas nos valores das cargas e nas medições oriundas do sistema. As cargas nem sempre podem ser estimadas e/ou medidas com grande precisão, além disso, os valores medidos de tensão e corrente da rede podem conter erros. Por isso, essas incertezas nos dados também são consideradas neste trabalho na avaliação do método.

No quarto capítulo deste trabalho, os resultados da aplicação do método de localização de faltas de alta impedância em ambos os sistemas foram apresentados. Diferentes valores de resistência de falta foram testados e faltas em todos os nós do sistema foram consideradas na construção dos histogramas apresentados no Capítulo 4. O método foi executado primeiramente sem a presença de incertezas nos dados e 100% dos casos testados localizaram corretamente o nó com a falta em ambos os sistemas e com todas as resistências de falta.

Como também é objetivo deste trabalho, os testes do método proposto foram realizados na presença de incertezas nos dados (cargas e medições). Os erros foram inseridos no sistema de forma completamente aleatória, sendo representados ao multiplicar individualmente os valores nominais das cargas por uma constante unitária que pode variar em módulo até 1%, 2%, 5% e 10%. Os resultados em ambos os sistemas testados demonstraram que o método proposto localiza corretamente o nó faltoso em grande parte dos testes e tem a maioria das ocorrências menores que 5%. Foi observado que quanto maior o erro nos dados, menor a precisão do método. Em todos os casos estudados, a média dos erros absolutos foi menor que 10%. Outro fator impactante foi a resistência de falta, pois quanto menor a resistência, melhores os resultados, já que a corrente de falta é maior.

Os dois sistemas de distribuição testados neste trabalho possuem diferenças significativas entre eles. Além de tensão nominal e corrente de carga diferentes, o sistema IEEE 34 barras é menos ramificado e possui maior extensão, já o sistema IEEE 123 barras é mais ramificado, menor em extensão e possui um número bem maior de nós. Dessa forma, analisando os resultados apresentados nas Seções 4.2 e 4.3, conclui-se que o método tem um bom desempenho em sistemas de distribuição, a despeito de suas características.

Ainda cabe mencionar que, observando a Seção 4.2.3, foi possível notar que ao acrescentar um medidor justamente na região do sistema IEEE 34 barras que decorreu os maiores erros registrados na Seção 4.2.2, os resultados não apresentaram qualquer melhora. Isto posto, é de interesse realizar estudos futuros modificando o número e o local de medidores nos sistemas de distribuição.

Assim sendo, de forma geral, o método proposto neste trabalho demonstrou ser eficiente na localização de faltas, mesmo na presença de erros nos dados do sistema, e apresenta potencial para aplicação prática futura.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Melhorias para o método proposto neste trabalho podem ser cogitadas e algumas análises podem ser executadas em futuros trabalhos. Assim sendo, algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Realizar estudos de avaliação do método via simulações estatísticas;
- Desenvolver uma metodologia para melhorar a alocação dos medidores e sua quantidade visando melhorar os resultados;
- Estudar o impacto do local e quantidade de medidores nos resultados;
- Considerar geração distribuída nos sistemas de distribuição;
- Aplicar o método em sistemas de distribuição maiores;
- Validar o método em testes práticos;
- Analisar o método em relação ao tipo de medição utilizada, testando somente com tensões ou somente com correntes, e testando com medições fasoriais;
- Testar a aplicabilidade do método no processo de detecção e identificação da falta;
- Aplicar o método na localização faltas de alta impedância bifásicas ou trifásicas;
- Estudar os impactos da presença de reguladores de tensão no sistema;
- Utilizar sistemas de distribuição com rede secundária de baixa tensão.

REFERÊNCIAS

ABRACOPEL. *Choques elétricos X árvores: O perigo está em sua calçada*. Abracopel. [S.l: s.n.]. Disponível em: <<https://abracopel.org/blog/choques-eletricos-x-arvores-o-perigo-esta-em-sua-calcada-2/>>. Acesso em: 7 fev. 2023. , 27 jan. 2016

ALJOHANI, Abdulaziz; HABIBALLAH, Ibrahim. High-impedance fault diagnosis: A review. *Energies* v. 13, n. 23, p. 6447, 5 dez. 2020.

ANDRADE, Sônia Ribeiro Campos. **Sistema de medição fasorial sincronizada: Aplicações para melhoria da operação de sistemas elétricos de potência**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ANEEL. *Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist)*. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>>. Acesso em: 6 fev. 2023.

BICHELS, Arlei. **Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução**. Curitiba: EDUTFPR, 2018. 497 p. .978-85-7014-208-5.

BROWN, Richard E. **Electric power distribution reliability**. New York: Marcel Dekker, 2002. 365 p. (Power engineering). .978-0-8247-0798-9.

CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. **Proteção de sobrecorrentes do sistema de distribuição de média tensão da Cemig**. , Norma de Distribuição., nº ND-4.15. Belo Horizonte: [s.n.], 2017.

CUNHA, Francisco Gêvane Muniz; CASTRO, Jânio Kléo Sousa De. **Cálculo numérico**. Fortaleza: UAB/IFCE, 2010. 162 p. .978-85-475-0012-2.

DINIZ, Tamara Oliveira. **Avaliação do impacto dos tipos de equipamentos de medição no desempenho da detecção de defeitos em sistemas de distribuição utilizando redes neurais**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.

ELEKTRO. *Norma ND. 78 Proteção de redes aéreas de distribuição* . [S.l: s.n.]. Disponível em: <www.elektro.com.br>. , 2014

EMANUEL, A.E. *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, n. 2, p. 676–686 , abr. 1990.

FANUCCHI, Rodrigo Zempulski. **A detecção e a localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição utilizando transformadas wavelets e redes neurais artificiais**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

FRIEDRICH, Delmonte N. *et al.* **Equipamentos elétricos**. Porto Alegre: Sagah, 2018. .978-85-950249-3-9.

G1. *Galhos de árvore encostam em fiação de poste e moradores temem choques elétricos*. Disponível em: <<https://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2019/10/30/galhos-de-arvore->

encostam-em-fiacao-de-poste-e-moradores-temem-choques-eletricos.ghtml>. Acesso em: 7 fev. 2023.

G1. *Mais de 6 mil clientes são ressarcidos por construção de redes em Rondônia*. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ro/rondonia/especial-publicitario/energisa/consumidor-consciente/noticia/2020/02/21/mais-de-6-mil-clientes-sao-ressarcidos-por-construcao-de-redes-em-rondonia.ghtml>>. Acesso em: 6 fev. 2023.

GHADERI, Amin; GINN, Herbert L.; MOHAMMADPOUR, Hossein Ali. High impedance fault detection: A review. **Electric Power Systems Research** v. 143, p. 376–388, 1 fev. 2017.

GUARACY, Paola Aragão. **Comparação entre métodos para detecção e localização de falta de alta impedância em sistemas de distribuição**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019. 170 p.

GUIMARÃES, Paulo Ricardo Bittencourt. **Métodos quantitativos estatísticos**. 1. ed. ed. Curitiba: IESDE Brasil, 2012. 252p. p. .978-85-387-3028-6.

IEEE. *IEEE PES Test Feeder*. Disponível em: <<https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

IEEE. **IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems - Measurements**. , nº IEC/IEEE 60255-118-1:2018. [S.l.]: IEEE, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8577045>>.9781504453615.

IURINIC, Leonardo Ulises. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma abordagem baseada na estimação de parâmetros associados a modelos no domínio do tempo**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

JOGA, S. Ramana Kumar; SINHA, Pampa; MAHARANA, Manoj Kumar. A novel graph search and machine learning method to detect and locate high impedance fault zone in distribution system. **Engineering Reports** v. 5, n. 1, jan. 2023. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eng2.12556>>.

JUSTO, Dagoberto Adriano Rizzotto *et al.* **Cálculo numérico**. Porto Alegre: REAMAT, 2020. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/reamat/CalculoNumerico>>. .

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni De; ROBBA, Ernesto João. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica** Google-Books-ID: cDjWDwAAQBAJ. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 344 p. .85-212-0355-1.

KAGAN, Nelson; ROBBA, Ernesto João; SCHMIDT, Hernán Prieto. **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica**. São Paulo: Blucher, 2009. .978-85-212-0487-9.

KOTLINSKI, Eliseu. **Detecção de falta de alta impedância em sistema de distribuição radial utilizando redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

- LAI, T.M.; SNIDER, L.A.; LO, E. Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults. **Electric Power Systems Research** v. 76, n. 8, p. 626–633 , maio 2006.
- LEDESMA, Jorge Javier Gimenez *et al.* A two-level ANN-based method using synchronized measurements to locate high-impedance fault in distribution systems. **Electric Power Systems Research** v. 188, p. 106576 , nov. 2020.
- LEMMON, Michael. *Power Systems Analysis*. Disponível em: <<https://www3.nd.edu/~lemmon/courses/ee30372/>>. Acesso em: 5 jul. 2022.
- LI, Shurong *et al.* High impedance grounding fault location method for power cables based on reflection coefficient spectrum. **Energy Reports** v. 9, p. 576–583 , maio 2023.
- LOPES, Gabriela N. *et al.* High impedance fault location methods: Review and harmonic selection-based analysis. **IEEE Open Access Journal of Power and Energy** p. 1–1 , 2023.
- MISHRA, Manohar; PANIGRAHI, Rasmi Ranjan. Taxonomy of high impedance fault detection algorithm. **Measurement** v. 148, p. 106955 , dez. 2019.
- MORETTIN, Pedro Alberto; BUSSAB, Wilton de Oliveira. **Estatística básica**. 6. ed. ed. São Paulo: Saraiva, 2010. .978-85-02-08177-2.
- MORTAZAVI, S. Hamid; MORAVEJ, Zahra; SHAHRTASH, S. Mohammad. A searching based method for locating high impedance arcing fault in distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery** v. 34, n. 2, p. 438–447 , 2019.
- NAM, S.R. *et al.* A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP. In: PROCEEDINGS OF POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2001, Vancouver, BC, Canada. **Anais...** Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2001. p.1175–1180 vol.2. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/970231/>>. 978-0-7803-7173-6. .
- NERY, Eduardo. **Mercados e regulação de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. .
- NUNES, J.U.N. *et al.* Distribution systems high impedance fault location: A spectral domain model considering parametric error processing. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems** v. 109, p. 227–241 , jul. 2019.
- OLIVEIRA, Iberê Carneiro De; ROSSONI, Aquiles; *et al.* **Proteção de sistemas elétricos**. Porto Alegre: Sagah, 2021. .978-65-5690-210-4.
- OLIVEIRA, Iberê Carneiro De; SILVEIRA, Miguel Francisco Da; *et al.* **Transmissão e distribuição de energia**. Porto Alegre: Sagah, 2021. .978-65-5690-211-1.
- OLIVEIRA JÚNIOR, Dilzair Alvimar De. **Faltas de alta impedância: detecção e localização de rompimento de condutores em circuito primário de redes aéreas de distribuição baseado em desequilíbrio de tensão**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

ONS. Submódulo 2.13: Requisitos mínimos para Sistema de Medição Sincronizada de Fasores. **Procedimentos de Rede**. [S.l: s.n.], 2020.

PENIDO, Débora Rosana Ribeiro *et al.* An Analytical Zero Sequence Method to Locate Fault in Distribution Systems Rich in DG. **IEEE Transactions on Smart Grid** v. 13, n. 3, p. 1849–1859 , maio 2022.

PENTEADO NETO, Renato de Arruda. **Sistemas para detecção de falta de alta impedância e de rompimento de condutores em redes de distribuição de energia elétrica**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

PIETROPALO, Ruy César; COSTA, Nielce Meneguello Lobo Da; ANDO, Rosangela de Souza Jorge. *Tópico IV - Desvio Padrão*. **Tecnologias Digitais no Letramento Estatístico**. [S.l: s.n.]. Disponível em: <<https://sgmd.nute.ufsc.br/content/especializacao-cultural-digital/letramento-estatistico/pagina-20.html>>. Acesso em: 23 maio 2023. , [S.d.]

PIRES, Igor. **O fim em doses homeopáticas – Textos cruéis demais**. Brasil: Alt, 2020. .

RAMOS, Maicon J. S. *et al.* Physics-based analytical model for high impedance fault location in distribution networks. **Electric Power Systems Research** v. 188, p. 106577 , 1 nov. 2020.

REIS, Amanda Wohlfahrt. **Simulação de uma unidade de medição fasorial utilizando Typhoon Virtual HIL**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, 2019.

ROBBA, Ernesto João *et al.* **Análise de sistemas de transmissão de energia elétrica**. São Paulo: Blucher, 2020. 522 p. .978-65-5506-009-6.

ROSS, Sheldon. **Probabilidade: um curso moderno com aplicações**. 8a. edição ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. .978-85-7780-688-1.

SANTOS, Wellinsílvia Costa Dos; LOPES, F. V.; *et al.* Detecção de faltas de alta impedância: Revisão da literatura e tendências futuras em Smart Grid. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2013, Araxá. **Anais...** Araxá: [s.n.], 2013.

SANTOS, Wellinsílvia Costa Dos; SOUZA, Benemar Alencar De; *et al.* High impedance faults: from field tests to modeling. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems** v. 24, n. 6, p. 885–896 , dez. 2013.

SARANGI, Swetalina; SAHU, Binod Kumar; ROUT, Pravat Kumar. High-impedance fault identification and location by using mode decomposition integrated adaptive multi-kernel extreme learning machine technique for distributed generator-based microgrid. **Electrical Engineering** , 2 nov. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s00202-022-01658-6>>. Acesso em: 9 fev. 2023.

SCHNEIDER, K. P. *et al.* Analytic Considerations and Design Basis for the IEEE Distribution Test Feeders. **IEEE Transactions on Power Systems** v. 33, n. 3, p. 3181–3188 , maio 2018.

SEDIGHIZADEH, M.; REZAZADEH, A.; ELKALASHY, N. I. Approaches in High Impedance Fault Detection - A Chronological Review. **Advances in Electrical and Computer Engineering** v. 10, n. 3, p. 114–128 , 2010.

SHARAT, A. M.; SNIDER, L. A.; DEBNATH, K. A neural network based back error propagation relay algorithm for distribution system high impedance fault detection. In: APSCOM, 1993, Hong Kong. **Anais...** Hong Kong: [s.n.], 1993. p.613–620.

SHENG, Y.; ROVNYAK, S.M. Decision tree-based methodology for high impedance fault detection. **IEEE Transactions on Power Delivery** v. 19, n. 2, p. 533–536 , abr. 2004.

SHORT, T. A. **Electric power distribution handbook**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. 773 p. (Electric power engineering series). .978-0-8493-1791-0.

SILVA, Hélio Rubens Jacob Da. **Análise de uma nova proposta para identificação de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

VIANNA, João Tito Almeida *et al.* A method to detect and locate faulted area in distribution systems using the existing measurements structure. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems** v. 131, p. 107073 , out. 2021.

VIEIRA, Francinei L. *et al.* High impedance fault detection and location in distribution networks using smart meters. In: 2018 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER (ICHQP), maio 2018, Ljubljana. **Anais...** Ljubljana: IEEE, maio 2018. p.1–6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8378825/>>. 978-1-5386-0517-2. .

YIN, Zhihua *et al.* High sensitivity fault location technology for distribution networks considering measurement error. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems** v. 140, p. 108055 , set. 2022.

ZAMANAN, Naser; SYKULSKI, Jan. The evolution of high impedance fault modeling. In: 2014 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER (ICHQP), maio 2014, Bucharest, Romania. **Anais...** Bucharest, Romania: IEEE, maio 2014. p.77–81. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6842852/>>. Acesso em: 9 mar. 2023. 978-1-4673-6487-4. .

ANEXO A – Método das bisseções

O método da bisseção ou método da dicotomia é um processo que obtém uma aproximação para o zero de uma função baseado no Teorema de Bolzano (JUSTO *et al.*, 2020):

“Se $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, $y = f(x)$, é uma função contínua tal que $f(a) \cdot f(b) < 0$, então existe $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = 0$.”

Ou seja, sendo $f(x)$ uma função real e contínua no intervalo $[a, b]$, se $f(x)$ troca de sinal dentro deste intervalo, ela tem pelo menos um zero entre $[a, b]$.

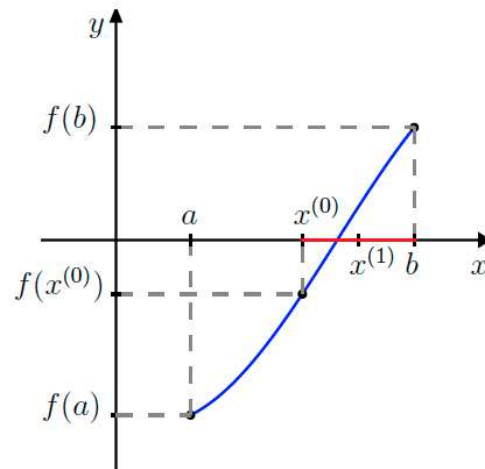
A partir disso, o método da bisseção é um processo iterativo que reduz a amplitude do intervalo que contém o zero da função até obter uma aproximação razoável através de um critério de parada. A cada iteração, o novo intervalo determinado é metade do tamanho do anterior (CUNHA; CASTRO, 2010).

Em cada iteração, é determinado um ponto médio do intervalo $[a, b]$, onde $x_M = \frac{a+b}{2}$ e a escolha do próximo subintervalo depende do valor da função neste ponto $f(x_M)$ da seguinte forma (CUNHA; CASTRO, 2010):

- Se $f(x_M) = 0$, x_M é o zero exato da função f e o processo termina. Este caso não é frequente;
- Se $f(a) \cdot f(x_M) < 0$, o zero da função f está no intervalo $[a, x_M]$;
- Se $f(a) \cdot f(x_M) > 0$, logo $f(b) \cdot f(x_M) < 0$, então o zero da função f está no intervalo $[x_M, b]$;

Seja um exemplo da aplicação do método a Figura 45. Tem-se que a função f é contínua no intervalo $[a, b]$ e $f(a) \cdot f(b) < 0$. O ponto médio calculado na primeira iteração é $x^{(0)}$. Calculando $f(x^{(0)})$, tem-se que $f(x^{(0)}) \cdot f(a) > 0$ e $f(x^{(0)}) \cdot f(b) < 0$, então o zero da função f está entre $x^{(0)}$ e b e o subintervalo escolhido para a próxima iteração é $[x^{(0)}, b]$.

Figura 45 – Aplicação do método da bisseção



Fonte: Justo *et al.* (2020).

Este processo iterativo é feito até que um critério de parada seja satisfeito, onde TOL é a tolerância escolhida para a aproximação (JUSTO *et al.*, 2020):

$$\frac{|b^{(n)} - a^{(n)}|}{2} < TOL$$

ANEXO B – Desvio padrão

Na Estatística, variáveis quantitativas são utilizadas em modelos probabilísticos para serem estudadas e, a partir de seus parâmetros, é possível chegar a determinadas conclusões. Essas variáveis são chamadas de variáveis aleatórias (v.a.) e podem ser discretas ou contínuas (MORETTIN; BUSSAB, 2010). Uma variável aleatória discreta só pode assumir um número contável de valores possíveis (ou infinito enumerável), já uma variável aleatória contínua tem um conjunto de valores possíveis incontável, onde sua função de probabilidade geralmente é representada por uma curva (ROSS, 2010).

Comumente, erros de medidas frutos de experimentos em laboratórios são considerados variáveis contínuas. A partir dos valores observados, é possível construir uma distribuição de frequências e, para observar tendências nos dados, pode-se calcular a média, a variância e o desvio padrão. A média aritmética é a soma de todos os valores da variável dividida pelo número total de amostras. A variância e o desvio padrão são medidas de dispersão dos dados que indicam o quão espalhados estão em torno da região central, representada pela média. A variância é calculada através da equação (GUIMARÃES, 2012):

$$var(X) = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$

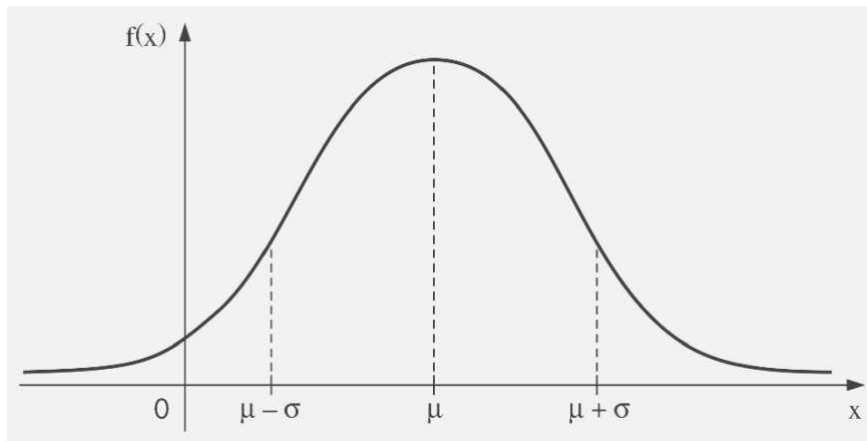
Onde \bar{x} é a média e n é o número total de amostras.

Como a variância é uma medida com dimensão quadrática dos dados, é mais comum utilizar o desvio padrão, que é a raiz quadrada da variância:

$$dp(X) = \sigma = \sqrt{var(X)}$$

O modelo mais comum de distribuição de v.a. contínuas é a distribuição normal ou distribuição gaussiana. Uma função de densidade de probabilidade $f(x)$ com média μ e desvio padrão σ é ilustrada pela curva da Figura 46.

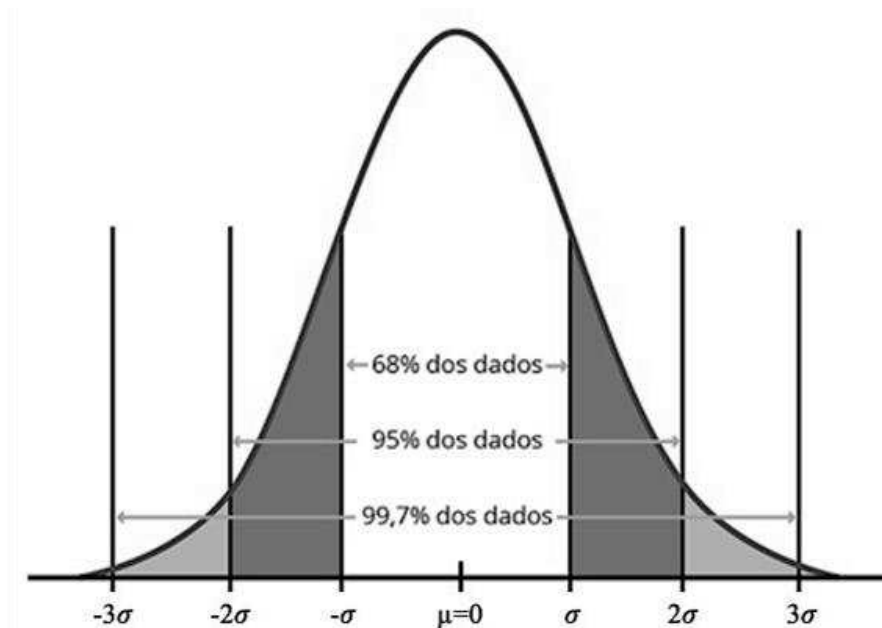
Figura 46 – Função densidade de probabilidade de uma variável aleatória normal



Fonte: Morettin e Bussab, (2010).

Na prática, entre um desvio padrão abaixo da média e um acima da média, estão 68% de todas as observações daquela variável. A Figura 47 ilustra a ocorrência das observações numa curva normal onde a média é zero e o desvio padrão é σ .

Figura 47 – Ocorrência dos dados conforme desvio padrão em uma curva normal



Fonte: Pietropaolo; Costa; Ando ([S.d.]).

Uma curva normal pode ser construída a partir de um histograma, geralmente de forma aproximada. Os histogramas de erros mostrados no Capítulo 4 deste trabalho apresentam comportamento parecido com uma distribuição normal, com maior concentração dos dados próximos da média, por isso, o desvio padrão é uma boa métrica para avaliar quão dispersos os erros estão da média, ou do zero.