

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ELIS CAROLINE DE SOUZA TRINDADE

**DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM PARQUES
EÓLICOS**

Ilha Solteira

2023

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ELIS CAROLINE DE SOUZA TRINDADE

DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM PARQUES EÓLICOS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação.

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T833d Trindade, Elis Caroline de Souza.
Detecção, classificação e localização de faltas em parques eólicos. / Elis Caroline de Souza Trindade. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
111 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2023

Orientador: Fábio Bertequini Leão
Inclui bibliografia

1. Parques eólicos onshore. 2. Detecção de faltas. 3. Classificação de faltas.
4. Localização de faltas. 5. Distância Euclidiana. 6. Sistema de proteção.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Detecção, Classificação e Localização de Faltas em Parques Eólicos

AUTORA: ELIS CAROLINE DE SOUZA TRINDADE

ORIENTADOR: FABIO BERTEQUINI LEÃO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Elétrica, área:
Automação pela Comissão Examinadora:

Fábio Bertequini Leão

Prof. Dr. FABIO BERTEQUINI LEÃO (Participação Presencial)

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Jose Roberto Sanches Mantovani
Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI (Participação Presencial)

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Jose Carlos de Melo Vieira Junior
Prof. Dr. JOSE CARLOS DE MELO VIEIRA JUNIOR (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Ilha Solteira, 03 de março de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser tudo em minha vida e ser quem direciona todos os meus passos.

Aos meus pais, por sempre me incentivarem a estudar e a buscar os meus objetivos e serem sempre o motivo do meu esforço e dedicação, principalmente a minha mãe Elizângela por todo amor, preocupação e apoio.

Ao meu irmão Kauã, por ser o amor da minha vida e o principal motivo para eu nunca desistir mesmo em meio as dificuldades.

As minhas amigas que sempre torceram por mim Ane, Salina e minhas primas Dani e Daiane que sempre estiveram prontas para me amparar nos momentos difíceis. Aos meus colegas de moradia, Arthur, Isabela, Duda e Sarah, por sempre torcerem por mim, pelos momentos de descontração e acolhimento que foram fundamentais.

Em especial à Thamires, por ser minha maior incentivadora, por acreditar em mim mesmo quando eu mesma não acreditava, por me acalmar nos momentos de angústia e ansiedade, sem você teria sido muito mais difícil, obrigada é pouco por tudo o que você fez por mim.

Ao Prof. Fábio Bertequini Leão que tornou possível a conclusão deste trabalho, agradeço a confiança em mim creditada, a competência e o constante incentivo e dedicação em suas sábias orientações durante o transcorrer desta pesquisa.

Ao Prof. João Luiz Bérghamo Zamperin que me orientou durante a graduação e foi um grande incentivador para que eu seguisse no mestrado, assim como o Prof. Breno Moreira de Oliveira, sempre serei grata.

Aos colegas do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LAPSEE e em especial ao amigo Edivan Queiroz, que sempre esteve disposto a me ajudar durante a pesquisa e me auxiliou no início do mestrado.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e da seção de pós-graduação da FEIS/UNESP que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade e apoio financeiro através das bolsas de mestrado no país. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Se teus olhos forem bons, todo teu corpo terá luz”.
Matheus 6:22.

RESUMO

A partir do aumento da competitividade das centrais de geração eólica na comercialização de energia elétrica no país, a integração de parques eólicos ao sistema interligado nacional (SIN) trouxe consigo grandes desafios e inovações, uma vez que os sistemas elétricos de potência (SEP) que contam com esse tipo de geração, apresentam respostas diferentes considerando a geração convencional (geradores síncronos) frente a distúrbios que possam ocorrer. Sabe-se que os SEP estão constantemente expostos a adversidades seja por intempéries, descargas atmosféricas ou desgastes naturais de seus componentes e para garantir a segurança e confiabilidade na incorporação da geração eólica na matriz energética Brasileira é de fundamental importância a agilidade e precisão no processo de restauração da normalidade caso ocorra alguma falta. Com isso, esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um algoritmo de detecção e classificação de faltas e um algoritmo iterativo de localização de faltas em redes coletoras de parques eólicos *onshore*. Para a detecção e classificação da falta, a metodologia empregada baseia-se no cálculo da distância Euclidiana de amostras do sinal de tensão do sistema e para a localização das faltas utiliza-se uma metodologia baseada em impedância aparente, usando dados de um terminal de medição. Foram realizados inúmeros testes de curtos-circuitos considerando dois parques eólicos, em diferentes condições operativas. Os resultados mostram a eficiência do método proposto ao detectar os 420 casos de faltas testados com 100% de precisão e classificar corretamente 97,14% das faltas aplicadas para resistência de falta de até 100Ω . Para a localização de faltas o método apresentou erro máximo percentual de 9,32% para faltas do tipo fase-terra, também se analisou a influência da resistência de falta, tipo de falta e distância da falta em relação ao terminal de medição para a localização da falta. Salienta-se da importância dos resultados favoráveis excelentes na detecção e classificação da falta, uma vez que a detecção e classificação do tipo de curto-circuito ocorrido é imprescindível no algoritmo de localização de faltas empregado e evidencia-se que os algoritmos aplicados para redes internas de parques eólicos trouxeram bons resultados podendo ser aplicados em casos reais auxiliando as equipes de manutenção no restabelecimento das condições operativas do sistema.

Palavras-chave: parques eólicos *onshore*; detecção de faltas; classificação de faltas; localização de faltas; distância Euclidiana; sistema de proteção.

ABSTRACT

From the increased competitiveness of wind power generation plants in the sale of electricity in the country, the integration of wind farms to the national interconnected system (SIN) brought with it great challenges and innovations, since the electric power systems (SEP) that rely on this type of generation, have different responses compared to conventional generation (synchronous generators) in the face of disturbances that may occur. It is known that the EPS are constantly exposed to adversities, whether due to bad weather, atmospheric discharges or natural wear and tear of their components, and to guarantee safety and reliability in the incorporation of wind generation in the Brazilian energy matrix, agility and precision in the process of restoration of normality in the event of a fault. Thus, this dissertation presents a study on the state of the art regarding the main methodologies used in the detection, classification and location of faults in transmission lines and the development of a robust and complete algorithm, capable of detecting, classifying and locating faults in networks. wind farm collectors. For fault detection and classification, the methodology employed is based on the calculation of the Euclidean distance of samples of the system's voltage signal and for fault location, a methodology based on apparent impedance is used, using data from a measurement terminal. . Numerous short-circuit tests were carried out considering two wind farms, under different operating conditions. The results show the efficiency of the proposed method in detecting the 420 fault cases tested with 100% accuracy and correctly classifying 97.14% of applied faults for fault resistance up to 100Ω . For fault location, the method presented a maximum percentage error of 9.32% for phase-to-earth faults. of the lack. The importance of excellent favorable results in fault detection and classification is emphasized, since the detection and classification of the type of short circuit that occurred is essential in the fault location algorithm employed and it is evident that the algorithms applied to internal networks of wind farms brought good results and can be applied in real cases, helping maintenance teams to restore the operating conditions of the system.

Keywords: wind farms onshore; fault detection; fault classification; Euclidean distance; protection system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perspectivas globais de novas instalações eólicas entre 2022-2026.	15
Figura 2 - Representação da inserção da geração eólica no SIN.	16
Figura 3 - Teorema da superposição usado para decompor a rede em circuitos monofásicos equivalentes.	22
Figura 4 - Ilustração dos principais equipamentos que compõem uma Central geradora eólica.	26
Figura 5 - Diagrama esquemático do sistema elétrico de um Parque eólico.	27
Figura 6 - Rede coletora com topologia Radial simples.	28
Figura 7 - Rede coletora construída com topologia: (a) Anel; (b) Anel parcial.	28
Figura 8 - Diagrama unifilar simplificado com os tipos de proteção utilizados em uma CGE, com suas respectivas funções de proteção.	32
Figura 9 - Curto-circuito monofásico com conexão com a terra: (a) curto na fase a (b) curto na fase b, e (c) curto na fase c.	36
Figura 10 - Curto-circuito monofásico fase (a).	37
Figura 11 - Curto-Circuito bifásico: (a) fases a e b, (b) fases b e c e (c) fases a e c.	38
Figura 12 - Curto-circuito bifásico entre as fases (a) e (b).	38
Figura 13 - Curto-circuito bifásico com conexão à terra: (a) fases a e b, (b) fases b e c, e (c) fases a e c.	39
Figura 14 - Curto-circuito bifásico com conexão a terra entre as fases (a) e (b).	40
Figura 15 - Curto-circuito trifásico (abc).	41
Figura 16 - Curto-circuito trifásico.	41
Figura 17 - (a) Sinal contínuo no tempo e (b) Sinal discreto no tempo.	43
Figura 18 - Representação genérica de um sistema.	44
Figura 19 - Diagrama de tolerâncias de um filtro passa-baixas.	49
Figura 20 - Respostas em frequência de magnitude do filtro de <i>Butterworth</i> projetado.	51
Figura 21 - Um ciclo do sinal de tensão.	52
Figura 22 - Comparação entre o primeiro meio ciclo e o segundo meio ciclo invertido do sinal de tensão.	53
Figura 23 - Um ciclo do sinal de tensão após uma falta.	53
Figura 24 - Fluxograma de detecção.	55
Figura 25 - Fluxograma de classificação.	58
Figura 26 – Sub-rotinas do método utilizado.	59
Figura 27 - Diagrama unifilar do circuito equivalente em falta.	60
Figura 28 - Diagrama de falta monofásica.	62
Figura 29 - Diagrama de falta bifásica.	64

Figura 30 - Diagrama de falta bifásica-terra.	65
Figura 31 - Diagrama de falta trifásica.	66
Figura 32 - Sistema equivalente de Thévenin.	67
Figura 33 - Impedância equivalente vista do ponto de falta para falta a montante do gerador.	67
Figura 34 - Circuito equivalente de um sistema elétrico.	68
Figura 35 - Circuito equivalente decomposto em função das componentes de sequências.	69
Figura 36 - Fluxograma de localização.	73
Figura 37 - Parque eólico conectado a uma rede de distribuição de 20 kV.	75
Figura 38 - Parque eólico conectado a uma rede de distribuição de 34,5 kV.	77
Figura 39 - Curto-circuito trifásico no instante de tempo 0,2s no AL2.3 amostrado no PCC.	79
Figura 40 - Curto-circuito trifásico no AL2.3.	80
Figura 41 - Curto-circuito trifásico no AL1.1.	81
Figura 42 - Distância da detecção das contingências simuladas para calibração do <i>limit</i> .	82
Figura 43 - Distâncias máximas de detecção simuladas no sistema teste I.	84
Figura 44 - Distâncias máximas de detecção simuladas no sistema teste II.	84
Figura 45 - Distância Euclidiana envolvendo todas as fases (<i>distt</i>) - Sistema teste I.	86
Figura 46 - Distância Euclidiana envolvendo todas as fases (<i>distt</i>) - Sistema teste II.	87
Figura 47 - Distância Euclidiana mediana normalizada (<i>distfmed</i>) - Sistema teste I.	88
Figura 48 - Distância Euclidiana mediana normalizada (<i>distfmed</i>) - Sistema teste II.	88
Figura 49 - Erros percentuais em função da R_f para o algoritmo de LDF – Conjunto I.	94
Figura 50 - Erros percentuais em função da R_f para o algoritmo de LDF – Conjunto II.	95
Figura 51 - Erros percentuais em função do tipo de falta para o algoritmo de LDF – faltas monofásicas.	96
Figura 52 - Erros percentuais em função do tipo de falta para o algoritmo de LDF – Faltas bifásicas.	96
Figura 53 - Erros percentuais em função do tipo de falta para o algoritmo de LDF – Faltas bifásicas-terra.	97
Figura 54 - Erros percentuais em função do tipo de falta para o algoritmo de LDF – Faltas trifásicas.	97
Figura 55 - Erros percentuais em função da distância da falta em relação ao terminal local – Conjunto I.	98
Figura 56 - Erros percentuais em função da distância da falta em relação ao terminal local – Conjunto II.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos técnicos mínimos para conexão de Centrais Geradoras Eólicas no SIN.	30
Tabela 2 - Descrição do código ANSI para as funções de proteção.	33
Tabela 3 - Impedância de sequência positiva de cada segmento do SEP.	76
Tabela 4 - Impedância de sequência zero de cada segmento do SEP.	76
Tabela 5 - Impedância de sequência positiva de cada segmento do SEP.	77
Tabela 6 - Impedância de sequência zero de cada segmento do SEP.	78
Tabela 7 - Análise de contingência para calibração do <i>limit</i> .	30
Tabela 8 - Conjunto de simulações para o sistema teste I.	83
Tabela 9 - Conjunto de simulações para o sistema teste II.	83
Tabela 10 - Precisão do algoritmo de detecção.	85
Tabela 11 - Precisão do algoritmo de classificação.	89
Tabela 12 - Conjunto de simulações para a etapa de localização de faltas.	91
Tabela 13 - Distâncias estimadas na LDF referente ao conjunto I.	92
Tabela 14 - Distâncias estimadas na LDF referente ao conjunto II.	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3	CENTRAIS GERADORAS EÓLICAS	26
3.1	REDES COLETORAS	27
3.1.1	Redes coletoras aéreas e subterrâneas	29
3.2	ACESSO AO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL	29
3.2.1	Requisitos técnicos mínimos para conexão de centrais geradores eólicas	29
3.3	SISTEMA DE PROTEÇÃO DAS CENTRAIS DE GERAÇÃO EÓLICA	31
3.3.1	Proteção dos alimentadores	34
4	ANÁLISE DO EFEITO DE CURTOS-CIRCUITOS NOS SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE	35
4.1	TIPOS DE CURTOS-CIRCUITOS	35
4.1.1	Curto-Circuito monofásico	36
4.1.2	Curto-circuito bifásico	37
4.1.3	Curto-circuito bifásico com conexão à terra	39
4.1.4	Curto-circuito Trifásico	40
5	PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS	42
5.1	AMOSTRAGEM	44
5.2	A SÉRIE DE FOURIER	45
5.3	A TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (TDF)	46
5.3.1	Estimação das componentes fundamentais por transformada discreta de Fourier de ciclo completo (TDFCC)	47
5.4	FILTRAGEM DE SINAIS	48
5.4.1	Projeto do filtro Butterworth	49
6	MÉTODO DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS	52
6.1	DISTÂNCIA EUCLIDIANA NA DETECÇÃO DA FALTA	54
6.2	DISTÂNCIA EUCLIDIANA NA CLASSIFICAÇÃO DA FALTA	56
7	MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	59

7.1	FALTA MONOFÁSICA	61
7.2	FALTA BIFÁSICA E BIFÁSICA-TERRA	63
7.3	FALTA TRIFÁSICA	65
7.4	ALGORITMO PROPOSTO PARA LDF	66
7.4.1	Cálculo da Impedância equivalente da fonte (Z_R).....	67
7.4.2	Cálculo da Tensão equivalente da fonte (E_{Th}).....	70
7.4.3	Considerações	73
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
8.1	SISTEMA TESTE I	75
8.2	SISTEMA TESTE II	76
8.3	DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO	78
8.3.1	Resultados do algoritmo de detecção	82
8.3.2	Resultados do algoritmo de classificação	86
8.4	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	90
8.4.1	Influência da resistência de falta	94
8.4.2	Influência do tipo de falta	95
8.4.3	Influência da distância da falta em relação ao terminal	98
8.4.4	Considerações	99
9	CONCLUSÃO	101
9.1	TRABALHOS FUTUROS.....	102
	REFERÊNCIAS	103
	APÊNDICE A	109

1 INTRODUÇÃO

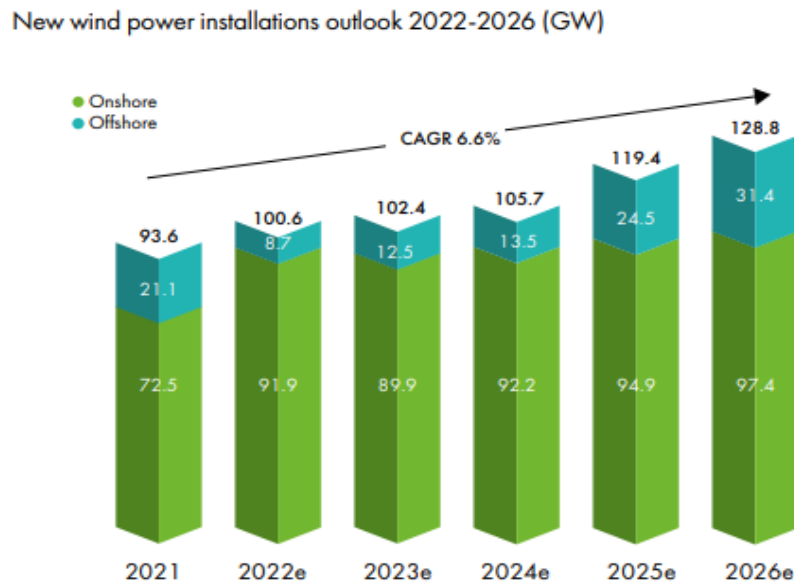
A dependência da humanidade em consumir energia elétrica vai além da comodidade usual proporcionada pela conversão desta energia em luz, calor ou movimento. A energia elétrica no Brasil é considerada como bem público (Lei 9.427, de 26 de dezembro de 1936) e sua disponibilidade está diretamente relacionada ao desenvolvimento socioeconômico de uma determinada região (SECCO, 2015). Dado esse fator, a busca incessante pela diversificação da matriz energética brasileira e o aumento da confiabilidade no abastecimento e operação faz-se necessário uma vez que transtornos provocados pela interrupção no abastecimento de energia elétrica atingem à diversos tipos de atividades e consumidores (industriais, comerciais e residenciais) gerando grandes prejuízos econômicos.

Todavia a matriz elétrica brasileira ainda é caracterizada pela preeminência de grandes centrais hidrelétricas, chegando a 54,61% de potência fiscalizada em janeiro de 2023, seguido pelas usinas termoeletricas 24,45% e centrais geradoras eólicas 12,56%, segundo base de dados do Sistema de Informações de Geração (SIGA) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023).

Entretanto, as construções de novas centrais hidrelétricas encontram dificuldades, devido os distanciamentos dos centros de cargas, além dos impactos ambientais associados a estruturação de novos reservatórios e de suas longas linhas de transmissão, assim como ocorre nas centrais de geração térmicas, que possuem além do elevado custo de combustível, aspectos ambientais relacionados ao aquecimento global e a emissão de CO₂ (SECCO, 2015). Desse modo, há um aumento da motivação pela competitividade das centrais de geração eólica na comercialização de energia elétrica no país, posto que os custos de operação estão cada vez menores e a capacidade instalada cada vez maior, além de não possuir custos na obtenção da fonte primária.

Em 2022 o Brasil ocupava a 6ª posição no *ranking* mundial de energia eólica *onshore* (em terra), com 21,5 GW de capacidade instalada. O *Global Wind Energy Council* ressalta uma perspectiva positiva de mercado para a indústria eólica global nos próximos cinco anos, com a CAGR (Taxa de crescimento anual composta) prevista em 6,6%, como se observa na Figura 1. Espera-se que mais de 557 GW de nova capacidade sejam adicionados entre 2022-2026, ou seja, uma média de cerca de mais de 110 GW de novas instalações a cada ano até 2026.

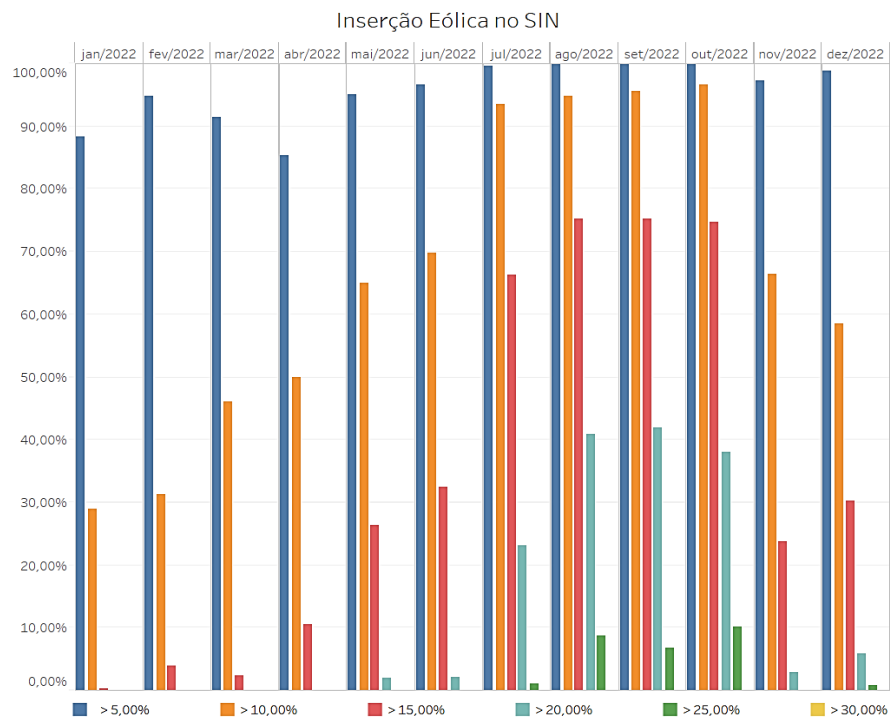
Figura 1 - Perspectivas globais de novas instalações eólicas entre 2022-2026.



Fonte: Global Wind Energy Council (GWEC 2022).

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a geração de energia a partir dos ventos alcançou a marca de 22GW de capacidade instalada em julho de 2022 o que representa cerca de 9.200 aerogeradores em operação em 812 parques eólicos distribuídos em 12 estados do Brasil. Em termos de representatividade e abastecimento da geração verificada pela fonte eólica, observa-se no gráfico da Figura 2, os índices que quantificam o tempo em que a geração eólica do sistema interligado nacional (SIN) foi maior que determinados percentuais da carga ao longo dos meses de 2022. Portanto, para uma coluna que está em 80% e representa “>10%”, a interpretação é que, em 80% do tempo do mês, ao menos 10% da carga foi atendida por geração eólica.

Figura 2 - Representação da inserção da geração eólica no SIN.



Fonte: Operador Nacional do Sistema (ONS, 2022).

Contudo a integração dos parques eólicos no SIN, traz consigo grandes desafios e necessidades de inovações tecnológicas, devido o comportamento dos sistemas constituídos por aerogeradores serem diferentes dos convencionais composto por geradores síncronos (SECCO, 2015).

O aumento contínuo da demanda de energia elétrica, associado à competitividade do mercado de energia, tem forçado as concessionárias de energia a conciliarem a qualidade dos serviços prestados com os custos operacionais envolvidos (KAZEMI; FOTUHI-FIRUZABAD; BILLINTON, 2007).

1.1 MOTIVAÇÃO

Todos os sistemas elétricos do mundo estão sujeitos a interrupções do suprimento em suas operações. A construção de um sistema totalmente imune às falhas exigiria redundâncias de equipamentos e circuitos, com investimentos tão elevados que a tarifa de energia necessária para remunerá-los seria inaceitável pela sociedade (Operador Nacional do Sistema, 2020).

O principal fenômeno responsável por desligamentos não programados dos SEPs, e consequente interrupção do fornecimento de energia aos consumidores, é o curto-circuito, também considerado como o tipo de falha mais severo. O curto-circuito decorre de alterações estruturais da rede, que promovem a abrupta redução da impedância entre dois pontos de diferentes potenciais, produzindo correntes elevadas nos circuitos envolvidos, que geralmente excedem as correntes nominais do sistema. Dependendo da magnitude e duração do curto-circuito, os esforços eletrodinâmicos e térmicos dos equipamentos podem ser excedidos, causando danos aos equipamentos, às instalações elétricas e podendo colocar em risco a segurança de seres vivos expostos ao fenômeno. Adicionalmente, a ocorrência de curtos-circuitos implica também em alterações bruscas das grandezas, como tensões e frequência, impactando negativamente a operação normal do sistema (SATO, 1979; SATO; FREITAS, 2015).

Uma vez que se observa a forte penetração da geração eólica na matriz energética brasileira, faz-se necessário estudos e metodologias para garantir a segurança e confiabilidade da alocação eficiente desse tipo de geração no SIN, sendo de fundamental importância a agilidade e precisão no processo de restauração da normalidade caso ocorra alguma falta nesses sistemas. As pesquisas de novas técnicas, tecnologias e filosofias de diagnóstico/prognóstico de faltas vêm sendo intensificadas nos últimos anos com o intuito de minimizar a atuação dos operadores de subestações, tornando o processo de diagnóstico de faltas mais ágil e preciso (TONELLI-NETO, 2015). Contudo, observa-se um déficit no Brasil no que diz respeito as metodologias desenvolvidas e aplicadas para a localização de faltas em parques eólicos.

Embora os sistemas de proteção sejam bastante eficientes contra as falhas, é pertinente salientar que tão importante quanto o desligamento das redes defeituosas, é a localização precisa e rápida do ponto de falta, uma vez que se estabelece ferramentas para que as equipes de manutenção reparem a rede no menor tempo possível (RAMOS, 2018). Os relés de distância para proteção de linhas de transmissão e alimentadores fornecem alguma indicação do percentual da linha afetada pela falta, mas não são projetados para identificar o local com exatidão.

Os estudos sobre faltas no SEP e a filosofia de proteção adotada são temas frequentes de pesquisas e debates para os engenheiros de proteção e comunidade científica. Sabe-se que as etapas de detecção e classificação de uma falta em sistemas de transmissão ou distribuição de energia elétrica antecedem a execução do algoritmo de localização de faltas (LDF) e são de grande importância na operação do SEP. Os procedimentos de diagnóstico realizados a partir da detecção de uma falta ocorrida no alimentador (AL) do parque eólico, envolvem o processo

de localização, que consiste na determinação do ponto (distância em km do terminal local) em que o curto-circuito ocorreu, sendo fundamental para o rápido estabelecimento da geração de energia e garantia da confiabilidade do sistema.

Em todos os casos, existe a motivação de se prover ferramentas automatizadas que possam auxiliar equipes de manutenção na normalização do sistema. A utilidade de um processo adequado de localização de faltas se torna evidente ao se observar que muitos alimentadores possuem quilômetros de extensão. Desse modo, a indicação do local da falta pode reduzir o tempo gasto na manutenção. Já os processos de classificação podem auxiliar na preparação, por parte da equipe de manutenção, do conjunto de medidas a serem adotadas na normalização do sistema (SEVERIANO JUNIOR, 2013). Uma vez que, o custo da interrupção da energia afeta o gerador e consequentemente o consumidor e, como nenhuma rede elétrica é imune a blecautes, por menor que sejam as chances da ocorrência desses, o sistema deve estar preparado para o restabelecimento das cargas no menor tempo possível, possibilitando o retorno às condições normais de operação (GOMES, P.; GUARINI, A.P, 2005).

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem por objetivo apresentar um completo e robusto diagnóstico de faltas em alimentadores aéreos de parques eólicos *onshore* (em terra), empregando metodologias existentes anteriormente idealizadas para linhas de transmissão. O propósito é testar e validar a aplicação desses algoritmos em alimentadores de centrais de geração eólicas. Inicialmente implementou-se uma técnica baseada no cálculo da distância Euclidiana de amostras do sinal de tensão para detectar e classificar curtos-circuitos nesses alimentadores. Assim, após a falta ser detectada e corretamente classificada, implementou-se um algoritmo de LDF baseado na impedância aparente de sequência positiva dos sinais de tensão e corrente elétrica, para localizar o curto-circuito nos alimentadores de parques eólicos.

Para a implementação das metodologias desenvolvidas nesta pesquisa utilizou-se o *Software* MATLAB® e para modelagem das centrais de geração eólicas adotadas para as simulações de curtos-circuitos efetuadas de modo a validar essas metodologias utilizou-se o *Software* DigSilent® *Power Factory*.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em 9 capítulos. O conteúdo de cada capítulo é apresentado, resumidamente, a seguir.

No capítulo 1 apresenta-se a introdução do trabalho e descrevem-se as motivações e objetivos desta pesquisa.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica referente ao estado da arte das principais metodologias empregadas na detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão. O foco se dará principalmente nas técnicas de LDF em sistemas de transmissão de energia elétrica baseados em impedância aparente utilizando dados de um terminal. Serão abordados tanto metodologias atuais, quanto métodos que formularam a base para a algoritmos de LDF em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica (STEE).

No capítulo 3 descreve-se resumidamente a estrutura das Centrais de Geração Eólicas (CGE). Neste capítulo também é realizada a apresentação das características técnicas dos principais equipamentos elétricos que integram os complexos eólicos atualmente. Discute-se principalmente os dispositivos e funções de proteção utilizadas nas CGE para a detecção e isolamento das faltas que possam ocorrer nas redes elétricas internas ou nas linhas e alimentadores que conectam ao SIN.

No capítulo 4 são apresentados os principais tipos de curtos-circuitos, causas, percentual de ocorrências e as formas de ondas dos sinais de tensão e corrente elétrica no instante de falta.

No capítulo 5 apresentam-se as teorias fundamentais referentes às técnicas de processamento digital de sinais empregadas nesta dissertação, incluindo o processo de filtragem de sinais.

O capítulo 6 refere-se à metodologia utilizada neste trabalho para detecção e classificação de faltas em alimentadores de parques eólicos, que foi implementada através do *software* MATLAB®.

No capítulo 7 apresentam-se a técnica aplicada nesta dissertação para a localização de faltas nos alimentadores dos parques eólicos e o equacionamento geral para cada tipo de falta.

No capítulo 8 são discutidos os resultados obtidos para diferentes tipos de faltas simulados na implementação dos algoritmos de detecção, classificação e localização de faltas em alimentadores reais de dois parques eólicos distintos. Também são apresentados resultados sobre a sensibilidade do método considerando a influência da resistência de falta, tipo de falta e a distância da falta em relação ao terminal local na localização da falta.

No capítulo 9 encontram-se as conclusões desta pesquisa e trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A detecção, classificação e localização de faltas são temas centrais de várias publicações da literatura especializada. Diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos no que se refere ao tratamento do sinal, nas quais aplicaram-se técnicas como: transformada de Fourier (TF); transformada *Wavelet* (TW); e análise de multirresolução (AMR) (FARIA, 2020). Atualmente também se têm utilizado técnicas que envolvem sistemas de inferência *Fuzzy*; redes neurais artificiais (RNAs) entre outras.

Entretanto, no que se refere as metodologias de diagnóstico de falta aplicadas à parques eólicos *onshore*, poucos trabalhos são encontrados na literatura. Sendo assim, este capítulo contém uma revisão bibliográfica dos principais algoritmos de detecção, classificação e localização de faltas aplicados principalmente em linhas de transmissão abordados na literatura, uma vez que, as redes elétricas internas dos parques eólicos modelados nesta dissertação são tratadas e equacionadas como sistemas de transmissão de linhas curtas.

As técnicas para LDF em sistemas de transmissão, podem ser classificadas de acordo com a literatura em três categorias principais: métodos baseados em ondas viajantes; métodos baseados em impedância; e métodos baseados no conhecimento. Também podem ser classificadas em função do número de terminais de monitoramento: os dados utilizados podem ser provenientes de um terminal ou de multiterminais de monitoramento e de acordo com as condições de medição dos dados utilizados: dados de pré-falta, pós-falta, ou durante a falta. A busca pela melhoria na precisão e o baixo custo computacional dos algoritmos de LDF, faz com que esse tema seja alvo de pesquisadores há muito tempo. Para Salim (2008), isso se deve a grande variedade de métodos disponíveis e a diversidade de sistemas elétricos com diferentes características.

Para as metodologias de LDF uma ênfase será dada nas técnicas baseadas em impedância aparente utilizando dados de um terminal, uma vez que esta pesquisa faz uso desta metodologia. De acordo com Kawady e Stenzel (2002) estes métodos têm como vantagens a dependência somente da informação disponível em equipamentos de medição de um dos terminais e a facilidade de implementação e simulação. Outra grande vantagem é o fato de não necessitar de meios de comunicação e sua simples implementação em relés de proteção digitais ou gravadores digitais de faltas (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

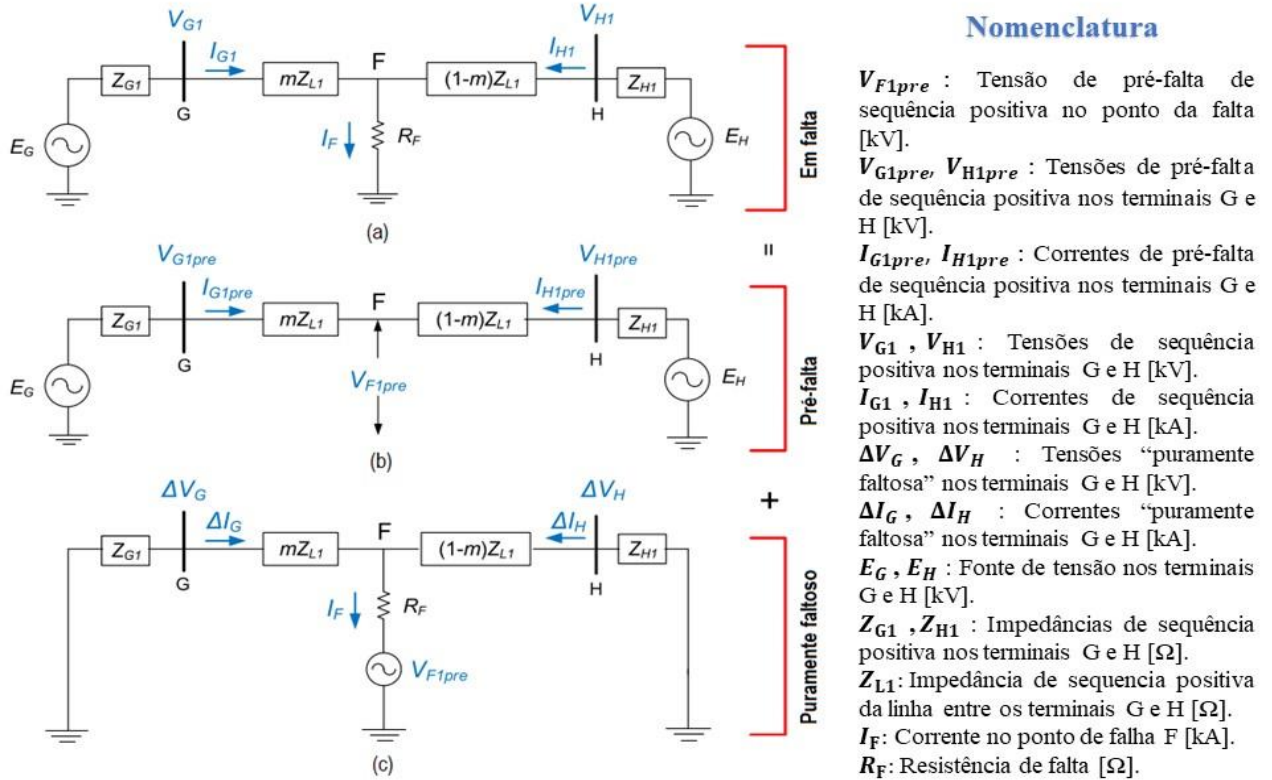
De acordo com Horowitz e Phadke (2008) os métodos baseados em ondas viajantes requerem equipamentos especiais e possuem elevados custos para sua implementação e são

usualmente empregados em linhas ou cabos subterrâneos onde as faltas tendem a serem permanentes e o uso de equipamentos e elevados custos de implementação são justificados, não sendo o objetivo desta dissertação, portanto, mais informações podem ser encontradas em Gale *et al.* (1993) e Saha, Izykowschi e Rosolowshi (2010). Assim como métodos baseados no conhecimento, que podem ser vistos com mais detalhes em Khaparde *et al.* (1991) e Ayyagari (2011).

De modo geral, metodologias de LDF baseadas em impedância aparente utilizam componentes fundamentais do sinal de tensão e corrente, para calcular a impedância aparente da LT entre o ponto de medição e ponto da falta, com isso, através da comparação entre a impedância aparente e a impedância da linha por unidade de comprimento, estima-se a distância da falta (LIMA, 2013).

O desenvolvimento de metodologias baseadas em impedância aparente teve grande avanço a partir dos trabalhos de Takagi *et al.* (1981) e Takagi *et al.* (1982a), os quais apresentaram um equacionamento para LDF baseados em impedância utilizando o princípio da superposição de circuitos elétricos. O método proposto por Takagi *et al.* (1982b) foi idealizado para LDF em linhas de transmissão de energia elétrica e foi inovador para a época ao considerar linhas curtas de transmissão de energia elétrica. O método calcula a distância da falta utilizando dados de um terminal e considerando que a LT é uma linha curta com geometria assimétrica. O equacionamento é baseado no princípio da superposição considerando um circuito monofásico analisado em três partes, conforme a Figura 3: (a) circuito monofásico em falta, (b) circuito monofásico pré-falta e (c) circuito monofásico puramente faltoso. Deste modo o circuito apresentado na Figura 3(a) corresponde a soma do circuito de pré-falta e o circuito puramente faltoso.

Figura 3 - Teorema da superposição usado para decompor a rede em circuitos monofásicos equivalentes.



Fonte: Adaptado de Das *et al.*, (2014).

O método desenvolvido por Takagi *et al.* (1982b) apresenta eficiência para faltas francas ($R_F=0 \Omega$). Contudo, a utilização do Teorema da superposição contribui para uma estimativa errônea da corrente de falta, vista do terminal local, quando se eleva a resistência de falta. Entretanto, dado o pioneirismo tanto nas análises, quanto nas considerações realizadas, esse trabalho possui grande importância para LDF fundamentada na impedância até os dias atuais. Isso porque o método de Takagi *et al.* (1982b) abriu um vasto campo de estudos na área, influenciando os desenvolvimentos de outras metodologias e servindo de parâmetro de comparação (SALIM, 2008; LIMA, 2013).

Eriksson, Saha e Rockefeller (1985) apresentaram uma técnica de localização baseada em impedância utilizando dados de um terminal, com um diferencial em relação ao método idealizado por Takagi *et al.* (1982b) ao considerar a influência da alimentação remota da linha de transmissão tomando por base o modelo completo da rede. O método é baseado nas

componentes simétricas e apesar de apresentar melhores resultados em relação ao método proposto por Takagi *et al.* (1982b), seu uso depende do conhecimento da impedância aparente da fonte conectada ao terminal remoto, assim como todos os parâmetros do sistema.

Em Novosel *et al.* (1998) é apresentada uma versão modificada do método de Eriksson, Saha e Rockefeller (1985), sendo uma técnica de localização de faltas aplicável para localização de faltas em linhas de transmissão radiais curtas. As cargas servidas pela LT são agrupadas no final do alimentador e é assumido um modelo de carga de impedância constante. Os autores propõem duas formas distintas de estimar a distância da falta: uma resulta em uma função quadrática, a qual não requer um algoritmo iterativo para resolução; e outra resulta em uma equação linear para obtenção da distância estimada da falta, porém esta última requer o uso de um algoritmo iterativo para a sua resolução (LIMA, 2013).

Liang *et al.* (1998) desenvolveram um algoritmo de detecção e classificação de faltas baseado em análise multirresolução (*Multi-Resolution Analysis* - MRA) por *wavelet*. O algoritmo efetua a detecção da falta analisando os coeficientes de detalhe gerados pela MRA. Como os valores produzidos são significativamente pequenos, as variações acentuadas são interpretadas como uma falta. A classificação é feita comparando os valores de variação acentuada das diferentes fases. A princípio são somados os três primeiros valores de variação acentuada e posteriormente são obtidos os índices relativos. Os autores destacam a necessidade da análise minuciosa do efeito do ângulo de inserção da falta, uma vez que a consequência nos valores de variação acentuada é significativa. Também é adotado o uso da componente de sequência zero para solucionar o problema do ângulo de inserção na classificação de curtos-circuitos bifásico-terra e trifásico.

Izykowski, Rosolowski e Saha (2004) apresentaram em seu trabalho um método de localização de faltas para linhas paralelas utilizando sinais de tensão e corrente medidos no terminal local. Apresentam um equacionamento simples que não requer conhecimento das impedâncias dos sistemas equivalentes conectados aos terminais da linha, bem como o uso de medições pré-falta. No trabalho também é abordada uma compensação de capacitâncias shunt das linhas para obter melhor precisão do algoritmo de localização da falta para linhas longas.

Silva *et al.* (2006) propuseram um novo método para detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica usando dados oscilográficos de corrente e tensão do sistema. A técnica baseia-se na transformada *wavelet* e em uma rede neural *Perceptron* Multicamadas (*Mult Layer Perceptron* - MLP). Inicialmente as amostras de corrente são normalizadas e em seguida aplica-se a transformada discreta *wavelet* (*Discrete Wavelet*

Transform - DWT). A detecção da falta é realizada analisando as formas de onda da corrente no domínio do tempo e no primeiro nível de decomposição da DWT, diferenciando a energia dos coeficientes *wavelet* do sinal de corrente entre uma falta e um afundamento de tensão. A classificação utiliza as amostras de tensão e corrente relacionadas ao tempo de eliminação da falta normalizadas pelo maior valor absoluto e utiliza-se uma rede neural MLP para a classificação final. Cada padrão de entrada da rede neural é formado por um janelamento que une cinco amostras consecutivas de tensão e corrente. O método é capaz de distinguir faltas de outros distúrbios de qualidade de energia, como afundamentos de tensão e transitórios oscilatórios, que são comuns na operação de sistemas de energia.

Jiang *et al.* (2011) apresentaram uma estrutura híbrida para detectar e localizar falta em linhas de transmissão de energia elétrica. O algoritmo proposto apresenta técnica de discriminação de faltas baseado nas formas de onda de tensão e correntes trifásicas medidas quando ocorrem eventos de falta na LT. Os componentes de sequência negativa das grandezas de corrente e tensão trifásica são usados para obter uma detecção rápida de faltas online. Uma variedade de métodos incluindo, transformada *Wavelets* multinível, análise de componentes principais, máquinas de vetores de suporte e redes neurais de estrutura adaptativa, são utilizados para identificar o tipo e a localização da falta.

O trabalho de Lima (2013) baseia-se no algoritmo de LDF de impedância aparente de sequência positiva e estende o trabalho de Bretas e Salim (2006), sendo aplicado em sistemas de transmissão de energia elétrica, considerando dados de tensão e corrente de apenas um terminal de medição. O equacionamento foi desenvolvido em função das componentes simétricas e o método considera como dados de entrada as componentes fundamentais de tensão e corrente. Também faz uso da potência de curto-circuito para estimar o sistema equivalente conectado ao terminal remoto.

Hamidi e Livani (2017), apresentaram um algoritmo de localização de faltas baseado em ondas viajantes multiterminais para sistemas híbridos de transmissão (consistindo de uma linha aérea e múltiplos cabos submarinos) em parque eólico *offshore*. A entrada para o algoritmo foram medições de transientes de tensão sincronizados em todas as extremidades receptoras. Essas medições foram obtidas por transdutores ópticos de tensão equipados com receptores de sistema de posicionamento global (GPS). A Transformada de Clarke foi aplicada às tensões medidas para obter as tensões de modo-1. Utilizou-se a Transformada de *Wavelet* discreta para decompor as tensões de modo-1 nas extremidades receptoras e os primeiros tempos de chegada da onda foram então obtidos observando os quadrados do coeficiente de

transformação *Wavelet*. A identificação do segmento defeituoso e a localização de faltas são executadas usando as diferenças entre os primeiros tempos de chegada da onda medidas. De acordo com os resultados da simulação, o método proposto é capaz de identificar o segmento defeituoso e estimar a localização da falta, entretanto, seu desempenho diminui para faltas próximas ao ponto de conexão entre as linhas aéreas e os cabos submarinos e nas extremidades dos terminais.

Li *et al.* (2018), propuseram um novo método de detecção e localização de faltas para sistemas multiterminais de transmissão em corrente contínua com parques eólicos *offshore*. O método utilizou componentes de alta frequência detectados a partir do sinal de corrente de falta. Os sinais de corrente de falta foram detectados em todos os terminais para criar espectros de frequência, fornecendo informações sobre os componentes de frequência característicos contidos no sinal. Para a detecção e classificação, utilizou-se medições de corrente de uma extremidade e para a localização da falta considerou medições de duas extremidades. Uma vantagem do método proposto é que ele é independente da resistência de falta.

Peixoto *et al.* (2020), analisaram a aplicação do método de Takagi e de simples reatância para a localização de faltas em uma rede interna de média tensão de um parque eólico *onshore* e compararam os resultados encontrados na simulação com um caso real, com base na oscilografia gerada pelo relé no momento da ocorrência da falta. Os métodos são baseados em impedância e consideram dados de um terminal de medição. Aplicou-se para uma falta bifásica franca ocorrida em um circuito aéreo de um parque eólico e apresentaram resultados satisfatórios para esse caso.

O método proposto por Alencar, Santos e Panazio (2020) para detectar e classificar faltas em LT foi baseado no cálculo da distância Euclidiana de amostras dos sinais de tensão. Diversos casos de faltas foram simulados ao longo de uma LT de 500 kV e 200 km e uma segunda LT de 440 kV e 330 km de comprimento para verificar a eficiência do método. Concluiu-se que, o esquema proposto se mostrou promissor para ser empregado em estágios anteriores ao de localização de faltas nos relés digitais, uma vez que verificou-se sua capacidade em detectar e classificar correntemente todas as condições de faltas.

3 CENTRAIS GERADORAS EÓLICAS

Neste capítulo, descreve-se resumidamente a estrutura das centrais de geração eólicas (CGE). Discutem-se os dispositivos e funções de proteção utilizadas nas CGE para a detecção e isolamento das faltas que possam ocorrer nas redes elétricas internas ou nas linhas e alimentadores que conectam ao SIN. Devido ao escopo desta dissertação ênfase será dada na estrutura e sistema de proteção das redes coletoras que compõem este sistema.

Central geradora eólica é o nome dado ao conjunto de equipamentos e sistemas destinados à geração, coleta e transmissão de toda energia convertida da fonte eólica em eletricidade. Na Figura 4, ilustra-se de maneira didática um esquema do trajeto que a energia elétrica percorre para acessar o SIN.

Figura 4 - Ilustração dos principais equipamentos que compõem uma Central geradora eólica.



Fonte: Adaptado de ALSTOM (AUdEE, 2012).

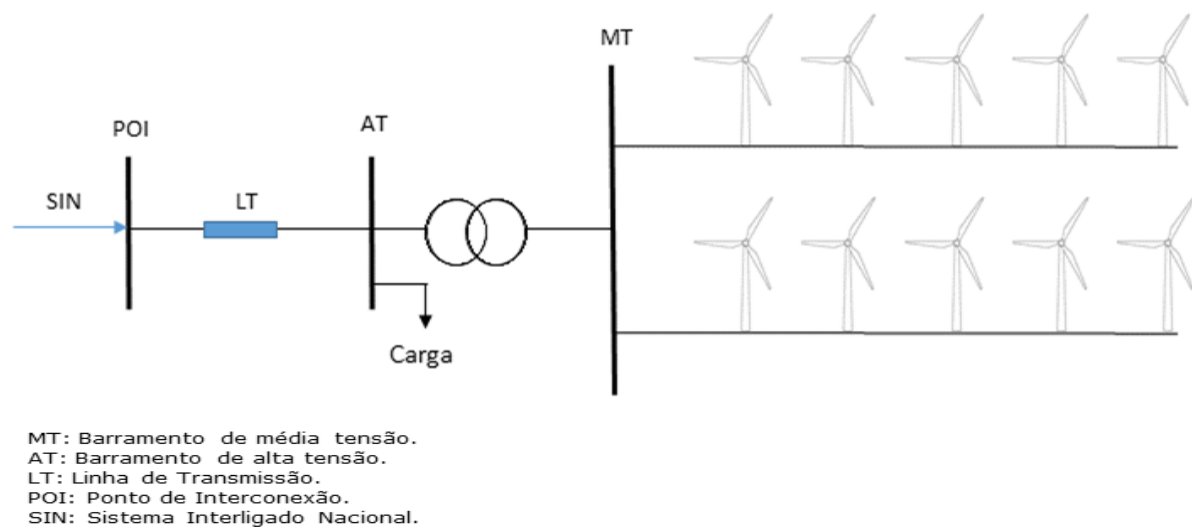
Os diferentes equipamentos e subsistemas que compõem uma central geradora eólica são:

- 1) Aerogerador;
- 2) Central de transformação;
- 3) Rede Coletora;
- 4) Subestação Coletora; e
- 5) Linha de Transmissão

3.1 REDES COLETORAS

As redes coletoras ou redes de média tensão (RMT) são responsáveis pela interligação das subestações unitárias dos aerogeradores até as subestações coletoras e estão presentes em todos os parques eólicos (Figura 5). Sua concepção é bastante similar as redes urbanas de sistemas de distribuição, seguindo os mesmos princípios construtivos (MACIEL, 2021).

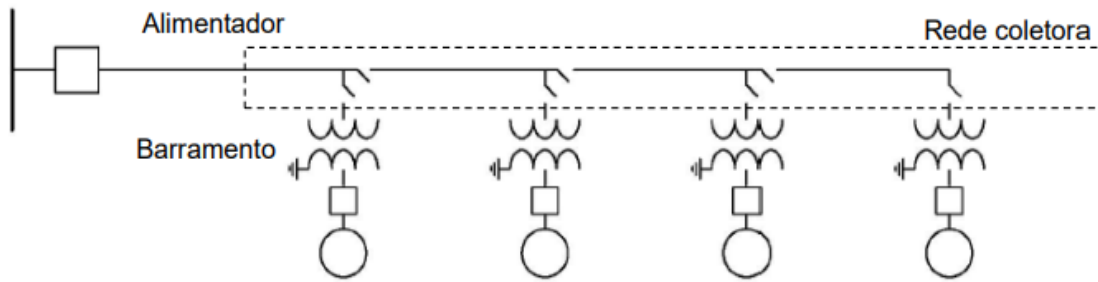
Figura 5 - Diagrama esquemático do sistema elétrico de um Parque eólico.



Fonte: Elaboração da própria autora.

As redes coletoras podem ser construídas de diferentes formas e em diferentes topologias. Das topologias disponíveis, a radial simples (Figura 6) é a mais utilizada nas CGE no Brasil (SECCO, 2015). O sistema radial simples é aquele no qual a alimentação é feita apenas por um único alimentador. É o mais simples e de menor custo de implementação. Entretanto, possui como desvantagem uma demanda maior de tempo para que o fornecimento seja restabelecido quando há algum defeito, pois, o circuito todo fica desligado, ou pelo menos, o trecho além do ponto de defeito.

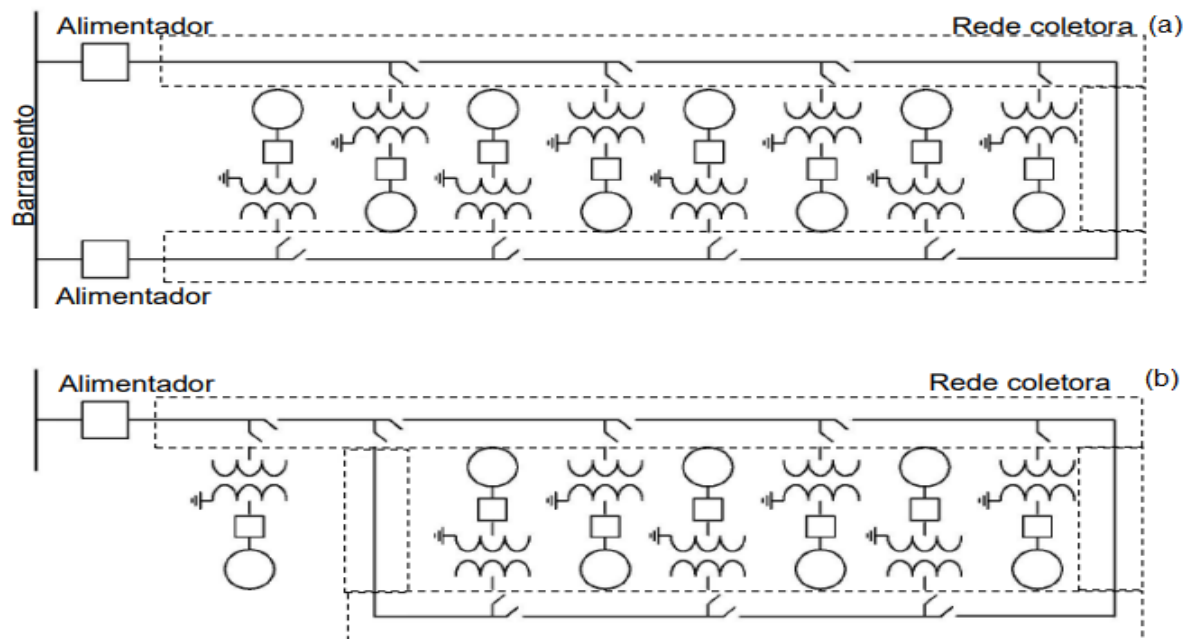
Figura 6 - Rede coletora com topologia Radial simples.



Fonte: Secco (2015).

A configuração em anel, ilustrada na Figura 7 tem maior flexibilidade e permite melhor continuidade do fornecimento, uma vez que, a passagem da energia gerada se dá por dois caminhos distintos. O custo é mais elevado que o radial, devido a necessidade de um conjunto maior de disjuntores e relés para dar flexibilidade ao sistema, assim como, uma maior capacidade dos cabos, que devem estar dimensionados para atender às emergências quando a alimentação passa a ser feita de uma só extremidade.

Figura 7 - Rede coletora construída com topologia: (a) Anel; (b) Anel parcial.



Fonte: Secco (2015).

3.1.1 Redes coletoras aéreas e subterrâneas

As redes coletoras podem ser classificadas de acordo com o tipo de instalação dos condutores, sendo aérea, subterrânea ou mista:

I. As redes aéreas são caracterizadas por possuírem condutores flexíveis nus comumente de Liga de alumínio (CAL) apoiados ou ancorados em cadeias de isoladores de porcelana, vidro ou poliméricos, instalados em cruzetas no topo de postes, normalmente de concreto. Por ser a mais antiga e o de menor custo de implantação, é o tipo mais encontrado em utilização. Quando comparada com redes subterrâneas, as redes aéreas possuem maiores vulnerabilidades a eventos externos, devido a sua exposição, causados por exemplo, pela ocorrência de descargas atmosféricas, atos de vandalismo, ou até mesmo contato acidental de aves de grande porte (KAWABATA, 2018; SECCO, 2015).

II. Redes subterrâneas são redes que utilizam cabos isolados, instalados em valas, diretamente enterrados ou em dutos corrugados prioritariamente ao longo das vias de acesso interno das CGE. Possuem maior proteção contra eventos externos, e por isso apresentam índice de falha menor quando comparada as redes aéreas, porém possuem alto custo de implementação (KAWABATA, 2018; SECCO, 2015).

III. As redes podem ser consideradas mistas, quando contem parte aérea e parte enterrada. Esse tipo de instalação é comumente utilizado em parques eólicos, com rede predominantemente aérea e cabos subterrâneos nas saídas dos aerogeradores e nas travessias (KAWABATA, 2018).

3.2 ACESSO AO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

A integração de instalações de geração eólica ao sistema interligado nacional (SIN), é um processo colaborativo, com interação entre os agentes e os principais órgãos do setor elétrico. Os principais documentos que regem o processo de integração da geração são: Resolução Normativa ANEEL 583/2013, e o submódulo 7.13 dos Procedimentos de Rede (Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS).

3.2.1 Requisitos técnicos mínimos para conexão de centrais geradores eólicas

Tabela 1 - Requisitos técnicos mínimos para conexão de Centrais Geradoras Eólicas no SIN.

Descrição	Requisitos técnicos mínimos
1. Operação em regime de frequência não nominal	Deve-se atender às seguintes condições: (a) Desligamento instantâneo permitido para operação abaixo de 56 Hz; (b) Operação abaixo de 58,5 Hz por período de tempo mínimo de 20 s; (c) Operação entre 58,5 e 62,5 Hz por tempo ilimitado; (d) Operação acima de 62,5 Hz por período de tempo mínimo de 10 s, sendo a temporização da proteção de desligamento por sobrefrequência definida com base em avaliação do desempenho dinâmico, para garantir a segurança operativa do SIN; (e) Desligamento instantâneo permitido para operação acima de 63 Hz.
2. Geração/absorção de potência reativa	Na conexão da central geradora às instalações sob responsabilidade de agente de transmissão, a central geradora deve propiciar os recursos necessários para, em regime permanente, operar com fator de potência indutivo ou capacitivo dentro a faixa de: Mínimo de 0,95 capacitivo; e mínimo 0,95 indutivo.
3. Operação em três modos de controle distintos	A central geradora deve ser capaz de operar: (a) Controle de tensão; (b) Controle de potência reativa; e (c) Controle do fator de potência.
4. Operação em regime de tensão não nominal	No ponto de conexão da central geradora às instalações sob responsabilidade de agente de transmissão, a central geradora deve ser capaz de operar: (a) Entre 0,90 e 1,10 p.u. da tensão nominal por período de tempo ilimitado; (b) Entre 0,85 e 0,90 p.u. da tensão nominal por período de tempo mínimo de 5 segundos; e (c) Entre 1,10 e 1,20 p.u. por período de tempo mínimo de 2,5 segundos.
5. Fator de potência em regime de tensão não nominal (V-Q/Pmax)	A injeção de potência reativa em regime permanente, no ponto de conexão da central geradora às instalações sob responsabilidade do agente de transmissão ou distribuição, deve ser garantida numa dada faixa operativa de tensões, entre: $-0,329 \text{ Q/Pmax} - \text{FP}=0,95\text{c}$ e $0,329 \text{ Q/Pmax} - \text{FP}=0,95\text{i}$. Observando os limites de tensão entre fases admissíveis a 60 Hz estabelecidos no Submódulo 2.3.
6. Participação em SEP	Deve ser possível a desconexão automática ou redução de geração por ação do controle de potência da central geradora.
7. Potência ativa de saída	(a) A potência de saída da central geradora deve recuperar-se a 85% do valor pré-falta em até 4 segundos após a recuperação da tensão a 85% da tensão nominal; (b) Cabe ao ONS a responsabilidade de definir a rampa de recuperação da potência em função das características do sistema onde as centrais serão inseridas; (c) Não será admitida redução na potência de saída da central geradora para frequências na faixa entre 58,5 e 60,0 Hz e tensões entre 0,90 e 1,10 pu no ponto de conexão às instalações sob responsabilidade do agente de transmissão; e (d) Para frequências na faixa entre 57 e 58,5 Hz é admitida redução na potência de saída de até 10%.

Fonte: Procedimentos de rede do ONS, submódulo 2.10 (2020).

3.3 SISTEMA DE PROTEÇÃO DAS CENTRAIS DE GERAÇÃO EÓLICA

Os sistemas de proteção dos sistemas elétricos são ajustados para operar o mais rápido possível e para que se possa operar um sistema elétrico com o maior grau de confiabilidade, é necessária a utilização de um conjunto de funções de proteção, cada um específico para um determinado evento. Os relés são dispositivos que detectam condições anormais de operação do sistema elétrico de potência e iniciam ações corretivas, com o objetivo de normalizar o sistema ou retirar de operação equipamentos ou partes do circuito que apresentem condições anormais de operação (MAMEDE, 2011).

A capacidade de ser seletivo é um dos conceitos fundamentais de um sistema de proteção elétrica. O estudo de seletividade em uma planta eólica, assim como em outras plantas de geração, é realizado com o objetivo de garantir a estabilidade e aumentar a disponibilidade do sistema elétrico protegido, evitando o desligamento indevido de equipamentos em condições normais. Portanto, a seletividade refere-se à característica que um sistema de proteção deve ter para que, ao ser submetido a correntes anormais, faça atuar os dispositivos de proteção de maneira a desenergizar somente a parte do circuito afetado, permitindo que os componentes que apresentam condições normais de operação não sejam afetados, ou sofram o menor impacto possível (SECCO, 2015; MAMEDE, 2011).

Nos parques eólicos uma gama de funções de proteção é utilizada e o conceito de zoneamento da área dos parques eólicos costuma ser adotado sendo associadas funções de proteção específicas para as diferentes zonas de atuação, conforme o tipo de equipamento ou componente a ser protegido, como por exemplo: geradores, transformadores, barramentos, linhas de transmissão etc. É comum encontrar uma padronização nas funções de proteção que são associadas para cada aplicação, independente do fabricante do IED (*intelligent electronic device*) (SECCO, 2015), conforme ilustra na Figura 8. O sistema de proteção principal de uma determinada zona de proteção é denominada proteção primária.

Tabela 2 - Descrição do código ANSI para as funções de proteção.

Código ANSI	Descrição
21	Relé de impedância/distância
25	Relé de verificação de sincronismo ou sincronização
27	Relé de subtensão
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
50/62BF	Relé de proteção contra falha de disjuntor
51	Relé de sobrecorrente temporizado
51V	Relé de sobrecorrente com restrição de tensão
59	Relé de sobretensão
67	Relé de sobrecorrente direcional
68	Relé de bloqueio por oscilação de potência
79	Relé de religamento
81	Relé de sub/sobrefrequência
86	Relé auxiliar de bloqueio
87	Relé de proteção diferencial

Nota: L: proteção de linha; T: proteção de transformador; B: proteção de barra.

Fonte: Elaboração da própria autora.

Os estudos de seletividade são comumente realizados através de *softwares*, que permitem a demonstração gráfica dos tempos de atuação da proteção em função da corrente de curto-circuito, a fim de comparar de maneira visual, a diferença entre os tempos de atuação dos dispositivos de proteção à montante e à jusante (SECCO, 2015). É importante ressaltar que o sistema de proteção de uma central de geração eólica deve seguir as recomendações dos procedimentos de rede (PR) do ONS. Os módulos 2 e 11 dos PR estabelecem os pré-requisitos de segurança operativa do sistema de proteção, uma vez que atuações incorretas ou falhas nesses dispositivos podem acarretar diversos danos como: desligamentos não seletivos, corte no abastecimento de energia elétrica, corte de cargas indevidas, oscilações na qualidade de energia, entre outros.

Além disso, os sistemas de proteção primária estão sujeitos a falhas, os equipamentos que compõem a rede devem ser dimensionados para suportar correntes elevadas, até que algum dispositivo de proteção de retaguarda acione o disjuntor. Em geral um esquema de retaguarda consiste na duplicação dos componentes de proteção primária de modo que a falha do esquema primário não impossibilite a remoção da falta. Também é comum a utilização de um esquema de proteção de retaguarda constituído na utilização de zonas de proteção vizinhas à zona de proteção primária (GIOVANINI, 2005; ZANETTA JUNIOR, 2006).

A proteção do sistema pode indicar a área onde ocorreu a falta, definida através das zonas de proteção, também pode indicar a seção faltosa através da utilização de relés de distância, enquanto algoritmos de LDF é utilizado para estimar com considerável exatidão a posição da falta, podendo ser utilizados como complemento para os sistemas de proteção, contribuindo para rápida estimação do local da falta.

3.3.1 Proteção dos alimentadores

O barramento de média tensão da subestação coletora é o ponto de convergência de toda energia gerada por cada *cluster* de determinada CGE, transmitida através dos alimentadores de média tensão. Esses alimentadores são conectados ao barramento de média tensão através de disjuntores instalados em colunas de cubículos para uso interno ou através de disjuntores/religadores para instalação de uso externo (SECCO, 2015).

A proteção típica dos alimentadores de redes coletoras de usinas eólicas inclui elementos de sobrecorrente de fase e terra, sub e sobretensão, proteção de sobrecorrente direcional e relés de sub/sobrefrequência. Os lados de alta dos transformadores elevadores responsáveis por elevar a tensão proveniente dos geradores de turbinas eólicas (*Wind Turbine Generators-WTG*) são normalmente conectados em delta e são protegidos por fusíveis. No conjunto de fusíveis geralmente inclui-se um fusível limitador de corrente de *backup*. As principais preocupações de coordenação do alimentador são a sensibilidade às falhas e a coordenação com os fusíveis usados para proteger cada transformador elevador. Os elementos de sobrecorrente da fase do alimentador devem coordenar com os fusíveis do lado de alta do transformador elevador (HENRIKSEN; KUMM, 2008). Os elementos de sobretensão devem ser ajustados para aproximadamente 110% e 115% da tensão nominal do barramento. Os relés de falha do disjuntor normalmente serão incorporados em todos os relés de proteção do disjuntor das centrais de geração eólicas (BRADT *et al.*, 2010).

4 ANÁLISE DO EFEITO DE CURTOS-CIRCUITOS NOS SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE

Os SEP estão constantemente sujeitos às ocorrências que geram perturbações no seu estado normal, provocando alterações em grandezas elétricas como: corrente, tensão, frequência e potência. Essas alterações podem provocar sérias violações nas restrições operativas do sistema, nas quais a integridade de equipamentos e instalações são comprometidas. Nestes casos são necessárias ações preventivas e/ou corretivas para sanar ou limitar as consequências desses distúrbios (SATO; FREITAS, 2015).

Em geral, os curtos-circuitos são as perturbações mais comuns e as mais severas, e podem ser gerados a partir do rompimento do isolamento entre as fases ou entre a fase e terra. O curto-circuito dá origem a correntes elevadas circulando em todos os elementos energizados, tendo como resultado severos distúrbios de tensão ao longo de todo o sistema elétrico, ocasionando, muitas vezes, danos irreparáveis ao sistema e às instalações das unidades consumidoras (MAMEDE, 2011; FARIA, 2020). Os tipos de curtos-circuitos que podem ocorrer no sistema elétrico são: monofásico com conexão à terra, e bifásico ou trifásico com ou sem conexão à terra, respectivamente.

4.1 TIPOS DE CURTOS-CIRCUITOS

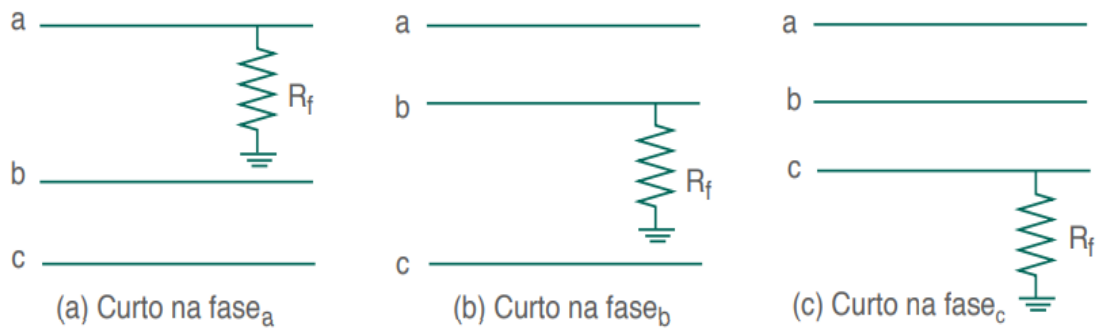
As faltas que ocorrem no sistema de distribuição de energia elétrica podem ser classificadas em dois tipos: faltas desequilibradas (assimétricas) e faltas equilibradas (simétricas). Essas faltas também podem ser classificadas como: faltas em série ou shunt (GURURAJAPATHY *et al.*, 2017). Os curtos-circuitos que ocorrem com maior frequência são os desequilibrados, com predominância de curto-circuito fase-terra (monofásico). O curto-circuito trifásico, apesar de sua frequência de ocorrência relativa ser pequena, é o de maior importância e análise por ser considerado o mais severo. Entretanto, é possível que em algumas situações a corrente de curto-circuito monofásico seja maior do que a corrente de curto-circuito trifásico (SATO; FREITAS, 2015). O desenvolvimento matemático para todos os casos de curto-circuito empregando componentes simétricas pode ser consultado na referência Zanetta Junior (2006). Nas próximas seções serão apresentados os efeitos dos diferentes tipos de curto-circuito nos sinais de tensão e corrente instantâneos que serão empregados como base para o desenvolvimento do método desta dissertação.

4.1.1 Curto-Circuito monofásico

A falta monofásica (fase-terra), apresentada na Figura 9, ocorre quando uma das fases entra em contato com o fio terra ou neutro. Podem ser geradas por fatores como: ventania, queda de árvore, ou qualquer outro incidente (GURURAJAPATHY *et al.*, 2017; GONEN, 2014).

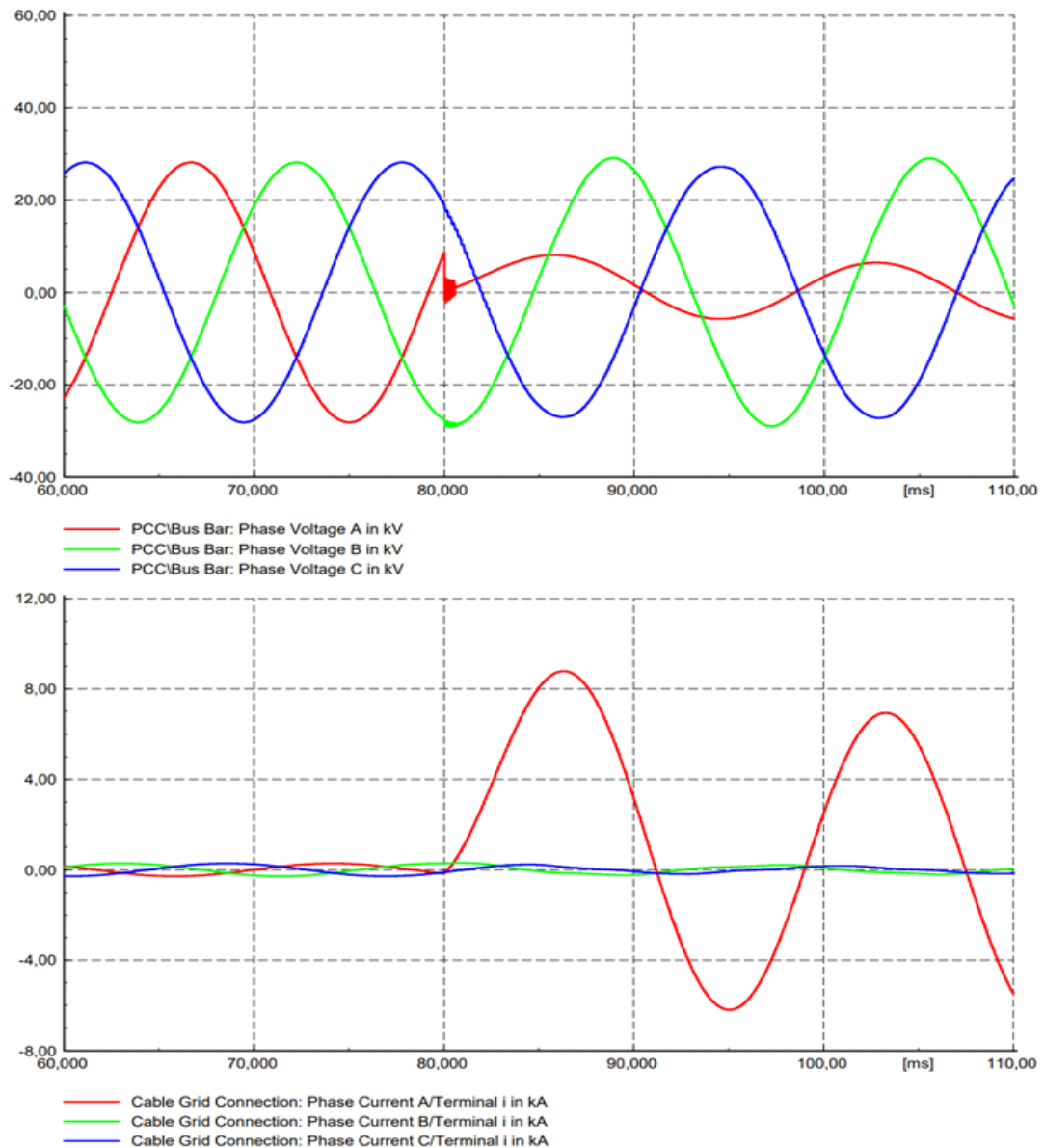
Na Figura 10, apresenta-se o comportamento das formas de ondas das tensões e correntes trifásicas, na ocorrência de um curto-circuito franco monofásico na fase (a), no instante de tempo de 80ms.

Figura 9 - Curto-circuito monofásico com conexão com a terra: (a) curto na fase a (b) curto na fase b, e (c) curto na fase c.



Fonte: Faria (2020).

Figura 10 - Curto-circuito monofásico fase (a).

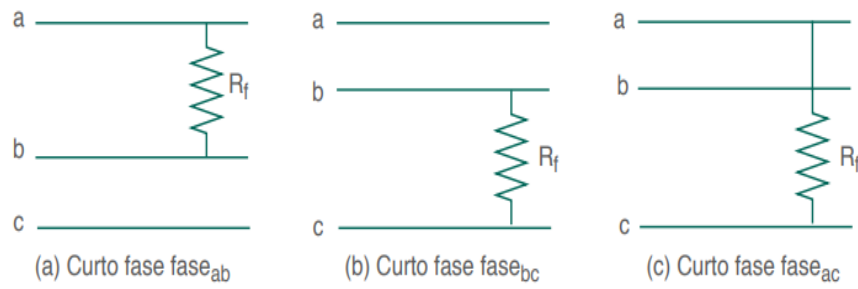


Fonte: Elaboração da própria autora.

4.1.2 Curto-circuito bifásico

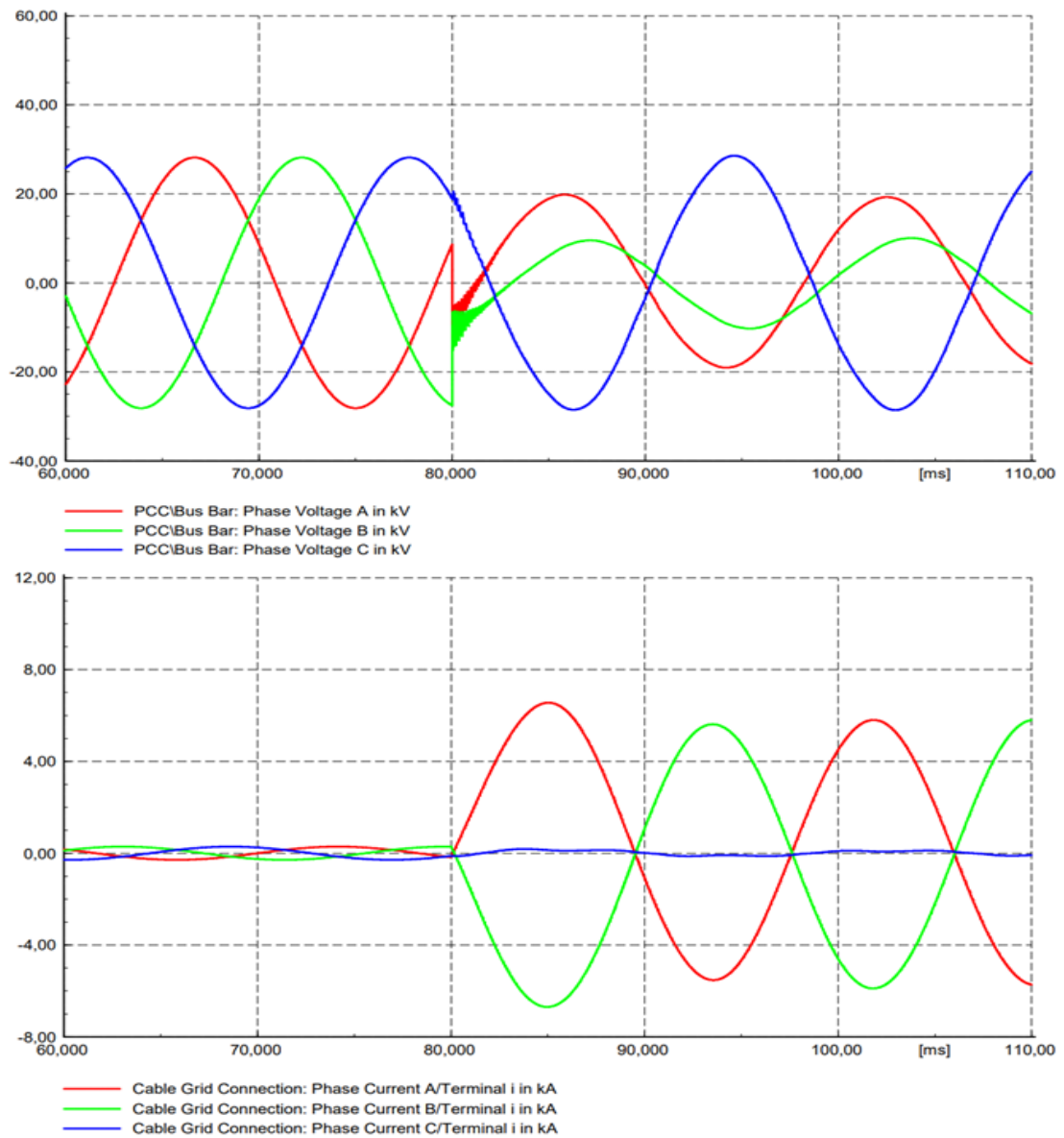
A falta bifásica (fase-fase), pode ocorrer em sistemas de potência aéreos ou subterrâneos em decorrência de ventos fortes, ou quando dois condutores estão em contato (GURURAJAPATHY *et al.*, 2017; GONEN, 2014). Na Figura 11, são ilustrados os tipos de curtos-circuitos bifásicos. Na Figura 12, apresenta-se o comportamento das formas de ondas das tensões e correntes trifásicas para um curto-circuito franco entre as fases (a) e (b).

Figura 11 - Curto-Circuito bifásico: (a) fases a e b, (b) fases b e c e (c) fases a e c.



Fonte: Faria (2020).

Figura 12 - Curto-circuito bifásico entre as fases (a) e (b).

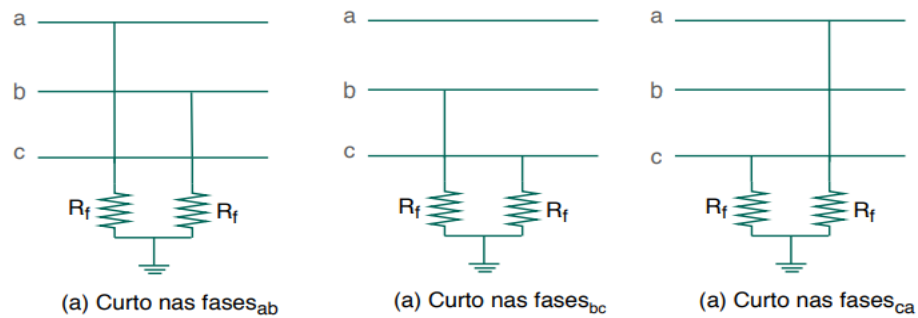


Fonte: Elaboração da própria autora.

4.1.3 Curto-circuito bifásico com conexão à terra

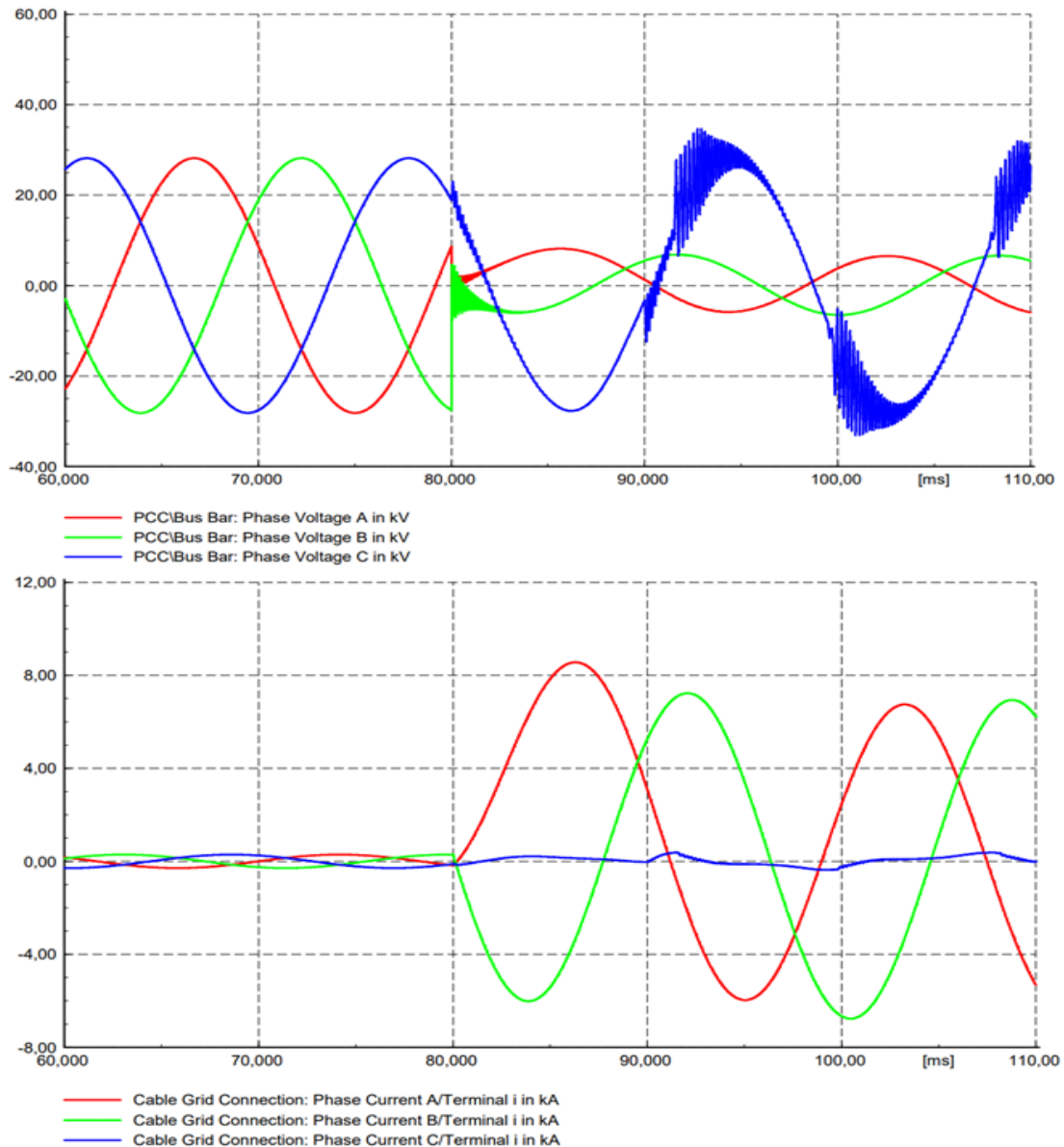
Esse tipo de curto-circuito (fase-fase-terra), ilustrado na Figura 13, ocorre quando uma árvore em queda conecta duas fases à terra. Trata-se de uma falta séria que resulta em uma assimetria significativa, e se não eliminada, pode resultar em um curto-circuito trifásico (GURURAJAPATHY *et al.*, 2017; GONEN, 2014). Na Figura 14, apresenta-se o comportamento das formas de ondas das tensões trifásicas para um curto-circuito franco entre as fases (a) e (b) com conexão a terra.

Figura 13 - Curto-circuito bifásico com conexão à terra: (a) fases a e b, (b) fases b e c, e (c) fases a e c.



Fonte: Faria (2020).

Figura 14 - Curto-circuito bifásico com conexão a terra entre as fases (a) e (b).



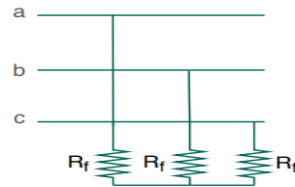
Fonte: Elaboração da própria autora.

4.1.4 Curto-circuito Trifásico

Também caracterizado como falta simétrica, o curto-circuito trifásico (fase-fase-fase) apresentado na Figura 15, possui característica como: nível de tensão igual a zero e corrente de falta muito elevada. Pode ocorrer em razão de falhas em equipamentos, torre caída ou uma linha conectando as fases. Embora sua frequência de ocorrência seja relativamente pequena, é o curto-circuito mais analisado por ser considerado o mais severo (SATO; FREITAS, 2015;

GURURAJAPATHY *et al.*, 2017). Na Figura 16, apresenta-se o comportamento das formas de ondas das tensões e correntes trifásicas para um curto-circuito franco ($R_f=0$) trifásico.

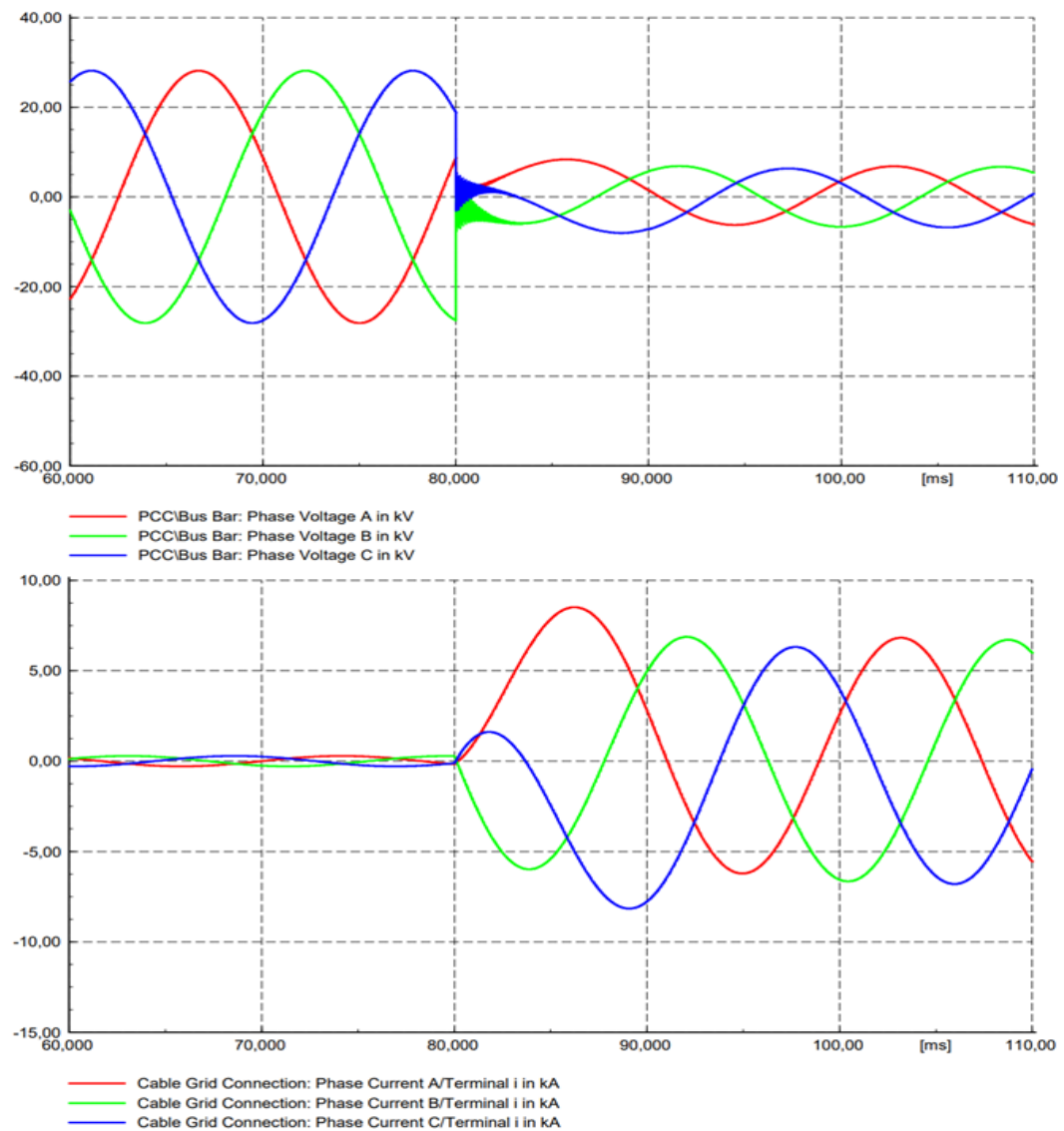
Figura 15 - Curto-circuito trifásico (abc).



(a) Curto trifásico

Fonte: Faria (2020).

Figura 16 - Curto-circuito trifásico.



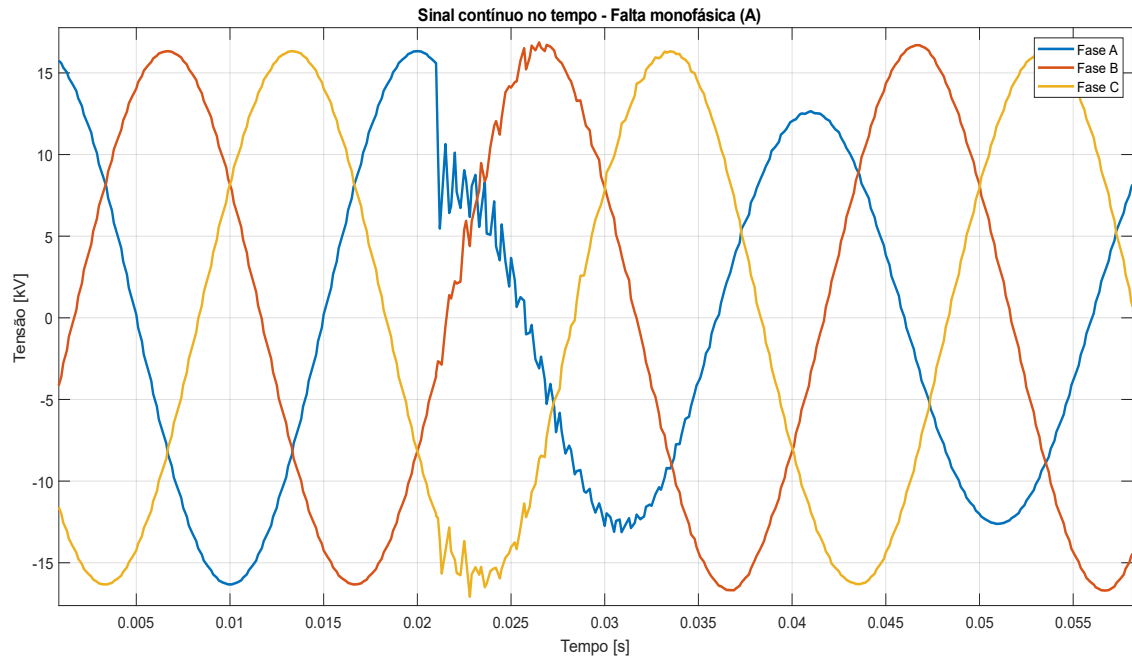
Fonte: Elaboração da própria autora.

5 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

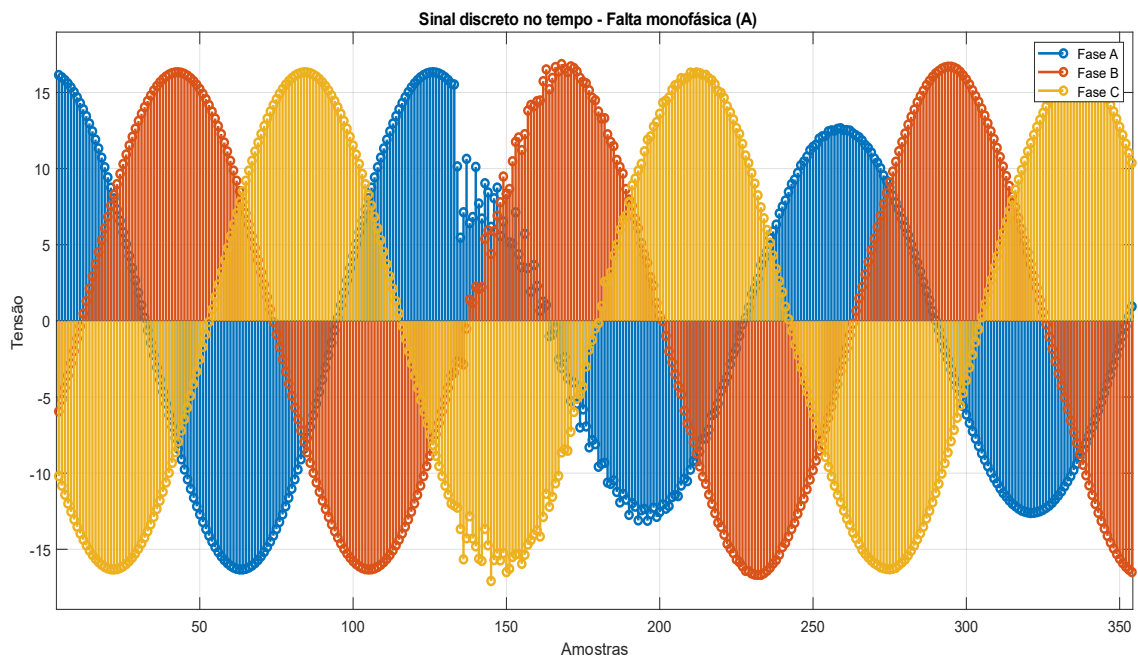
Neste capítulo são abordados os embasamentos teóricos relativos às técnicas de processamento de sinais utilizada nesta pesquisa.

Um sinal pode ser definido como a transferência de informação de qualquer fenômeno físico, é representado matematicamente como funções de uma ou mais variáveis independentes. Tensões e correntes como uma função do tempo em um circuito elétrico são exemplos de sinais. Os sinais podem ser separados, basicamente, em dois tipos: contínuos e discretos. No caso dos sinais de tempo contínuo, a variável independente é contínua e, portanto, esses sinais são definidos em um conjunto contínuo de valores da variável independente. Em contrapartida, os sinais de tempo discreto são definidos somente em instantes discretos, ou seja, a variável independente assume apenas um conjunto discreto de valores (OPPEHEIM; WILLSKY, 2010). Na Figura 17 (a) é ilustrado um exemplo de um sinal contínuo no tempo para uma falta monofásica (A) no instante 0,021s e na Figura 17 (b) o mesmo sinal discretizado no tempo.

Figura 17 - (a) Sinal contínuo no tempo e (b) Sinal discreto no tempo.



(a)



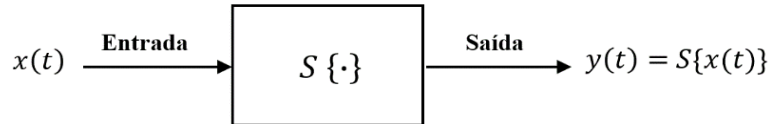
(b)

Fonte: Elaboração da própria autora.

O processamento de sinais é responsável pela extração de informações e/ou modificação das características do sinal original (LATHI, 2007). Sistemas são conjuntos de componentes responsáveis pelo processamento de sinais, observa-se uma representação genérica de um sistema na Figura 18, os sistemas atuam como operadores sobre um sinal entrada para

determinar uma saída, isto é, trata-se de uma função $S \{ \cdot \}$ que relaciona sinais do domínio no contradomínio (BERNARDES, 2019).

Figura 18 - Representação genérica de um sistema.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Os sinais também podem ser classificados em periódicos e aperiódicos. Entretanto, sabendo-se que sinais de tensão e corrente elétrica constituem a classe de sinais periódicos, estende-se neste trabalho somente a teoria envolvendo essa classe de sinais. Um sinal $x(t)$ é dito ser periódico se para alguma constante positiva T_0 a equação (1) for satisfeita.

$$x(t) = x(t + T_0) \quad \text{para todo } t \quad (1)$$

O menor valor de T_0 que satisfaz a condição de periodicidade da Equação (1) é o período fundamental de $x(t)$. Sendo assim, um sinal periódico permanece não alterado quando deslocado no tempo por um período.

5.1 AMOSTRAGEM

Um sistema que opere em tempo discreto pode processar um sinal em tempo contínuo, a partir de suas amostras, ou seja, sinais de tempo discreto podem ser obtidos a partir de sinais de tempo contínuos, através da representação de seus valores ou amostras uniformemente espaçadas no tempo. Essa propriedade vem de um resultado conhecido como o teorema da amostragem ou teorema de Nyquist. O processo de amostragem é feito a uma determinada frequência, denominada frequência de amostragem que pode ser obtida utilizando a equação (2).

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (2)$$

Sendo:

f_s : frequência de amostragem, em Hz; e

T_s : taxa de amostragem, em segundos.

A amostragem de um sinal deve garantir que a informação contida no sinal original seja preservada de modo que não haja perdas. O Teorema de Nyquist estabelece que a taxa (frequência) de amostragem mínima para que essa premissa possa ser atendida deve ser no mínimo maior que duas vezes a maior frequência do sinal original (BERNARDES, 2019). Assim, o sinal original amostrado pode ser reconstituído integralmente sem erro de *aliasing*. Desta forma, a frequência de amostragem f_s dos dados de entrada pode ser obtida pela equação (3).

$$f_s = \frac{1}{T_s} > 2f_{max} \quad (3)$$

O erro conhecido como *aliasing* consiste em uma sobreposição de espectros, no qual uma componente de alta frequência superposta ao sinal desejado se manifesta como sendo uma componente de baixa frequência. Para evitar que este erro ocorra durante a fase de processamento digital do sinal, é necessária uma medida preventiva chamada filtragem anti-*aliasing*, que como o próprio nome sugere, tem por finalidade eliminar as altas frequências do espectro (OLIVEIRA, 2016). Será abordado mais detalhadamente esse processo de filtragem no tópico 5.4 deste capítulo, priorizando as características do filtro utilizado para atenuação das componentes de alta frequência dos sinais de tensão e corrente elétrica utilizados neste trabalho como entrada para o algoritmo de LDF.

5.2 A SÉRIE DE FOURIER

Um sinal periódico $x(t)$ pode ser representado como a soma de senoides (ou exponenciais) da série de Fourier (LATHI, 2007), conforme a equação (4).

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (4)$$

Sendo ω_0 a frequência angular fundamental (equação (5)); a_n e b_n são as amplitudes e n representa a ordem da harmônica do sinal $x(t)$.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (5)$$

Os coeficientes da série de Fourier a_0 , a_n e b_n são determinados através das equações (6), (7) e (8).

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) dt \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (8)$$

A série de Fourier também pode ser escrita na forma compacta, como na equação (9).

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n) , \quad (9)$$

em que C_n e θ_n são relacionados com a_n e b_n conforme as equações (10), (11), e (12).

$$c_0 = a_0 \quad (10)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (11)$$

$$\theta_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (12)$$

5.3 A TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (TDF)

É possível construir de forma direta a transformada de Fourier de um sinal periódico a partir de sua representação em série de Fourier. A transformada resultante consiste em um trem de impulsos no domínio da frequência com as áreas dos impulsos proporcionais aos coeficientes da série de Fourier (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

Considerando-se um sinal de tempo discreto periódico, com período N , que obedece a equação (13).

$$\tilde{x}[n] = \tilde{x}[n + rN], \quad r, N \text{ inteiros}, \quad (13)$$

Em que se define a frequência fundamental do sinal conforme equação (14):

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{N} \quad (14)$$

Assim como os sinais periódicos de tempo contínuo, tal sequência pode ser representada por uma série de Fourier correspondente a uma soma de sequências exponenciais complexas harmonicamente relacionadas, isto é, exponenciais complexas com frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012). A TDF é definida na equação (15) como sendo uma operação sobre a sequência discreta $\tilde{x}[n]$,

$$\tilde{X}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (15)$$

chegando ao par transformado: $\tilde{x}[n] \leftrightarrow \tilde{X}[k]$.

5.3.1 Estimação das componentes fundamentais por transformada discreta de Fourier de ciclo completo (TDFCC)

A TDFCC fornece os coeficientes da série de Fourier de um sinal $x(t)$, a partir de um ciclo de amostras do sinal. Utilizou-se o desenvolvimento da série de Fourier para um período equivalente a um ciclo fundamental de um sinal digitalizado periódico e considerando N

amostras por ciclo (SOUZA *et al.*, 2020). As componentes reais e imaginárias desse sinal periódico podem ser obtidas através das equações (16) e (17).

$$X_{re}(k) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \cos\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (16)$$

$$X_{im}(k) = -\frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \sin\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (17)$$

Sendo $x(k - N + m)$ em (16) e (17) a m -ésima amostra da k -ésima janela de dados do sinal x janelado.

Após o equacionamento da parte real e imaginária, pode-se obter o módulo $|X|$ e a fase $\angle X$ na frequência fundamental dos fasores sob análise a partir das seguintes equações:

$$|X| = \sqrt{X_{re}^2 + X_{im}^2} \quad (18)$$

$$\angle X = \arctan\left(\frac{X_{im}}{X_{re}}\right) \quad (19)$$

A metodologia aplicada nesta pesquisa faz uso das componentes fundamentais de tensão e corrente para estimar a LDF. Esses sinais apresentam além da componente fundamental, uma componente CC e componentes de alta-frequência. Desta forma, utiliza-se a TDFCC para extrair a componente fundamental de corrente e tensão do sinal (SOUZA *ET AL.*, 2020).

5.4 FILTRAGEM DE SINAIS

Para que uma determinada componente de frequência f do sinal analógico possa ser completamente reconstituída durante o processo de amostragem realizado por conversores analógicos digitais (A/D), a frequência de amostragem deve ser maior que $2f$ (Teorema de Nyquist). Como a taxa de amostragem dos relés digitais são fixas, quando ocorrem faltas na linha, gerando dessa forma transitórios eletromagnéticos que possuem componentes de alta frequência, juntamente com os componentes da frequência fundamental, é necessária uma

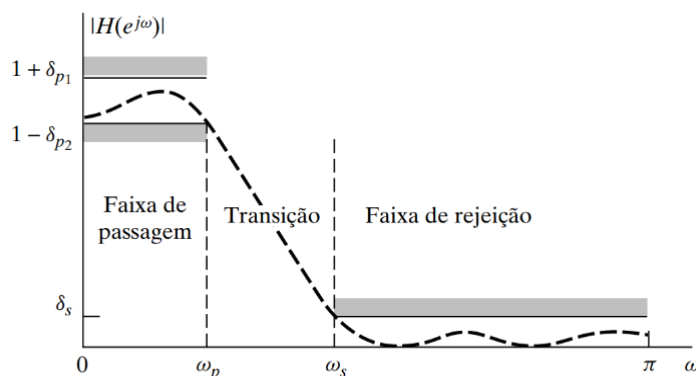
filtragem analógica antes dos relés processarem os dados obtidos dos transformadores de instrumentos (TP's e TC's) para evitar que ocorra uma sobreposição dos espectros de frequência (*aliasing*) (MACHADO, 2013). Para evitar este problema são utilizados filtros passa-baixas, também chamados de filtros *anti-aliasing*, cuja frequência de corte deve ser, no máximo, igual à metade da taxa de amostragem (PHADKE; THORP, 2009). O projeto de filtros de tempo discreto corresponde à determinação dos parâmetros de uma função de transferência ou de uma equação de diferenças que aproxima uma resposta ao impulso ou uma resposta em frequência dentro de tolerâncias especificadas.

Neste trabalho será utilizado o filtro passa-baixa *Butterworth* de terceira ordem para a realização deste processo. Em algoritmos de proteção, os filtros *Butterworth* de terceira ordem são normalmente os mais utilizados (PHADKE; THORP, 2009), devido ao fato de não apresentarem oscilações ao longo da faixa de passagem (COURY ET AL., 2007).

5.4.1 Projeto do filtro *Butterworth* de terceira ordem

Os filtros passa-baixas são aqueles que possuem ganho próximo a um para frequências abaixo da frequência de corte e atenuam qualquer sinal de frequência maior. Na Figura 19 é mostrada uma representação típica dos limites de tolerância associados à aproximação de um filtro passa-baixas de tempo discreto que idealmente tem ganho unitário na faixa de passagem e ganho nulo na faixa de rejeição.

Figura 19 - Diagrama de tolerâncias de um filtro passa-baixas.



Fonte: Oppenheim; Schafer (2012).

Para as especificações do filtro analisou-se o espectro do sinal a ser filtrado. A partir de então estabeleceu-se as especificações do filtro analógico. Nesses casos, converte-se

diretamente as especificações do filtro de tempo contínuo efetivo em especificações do filtro de tempo discreto por meio da relação: $\omega = 2\pi f/fs$, sendo f a frequência especificada do filtro e fs a frequência de amostragem utilizada.

Especificações do filtro analógico:

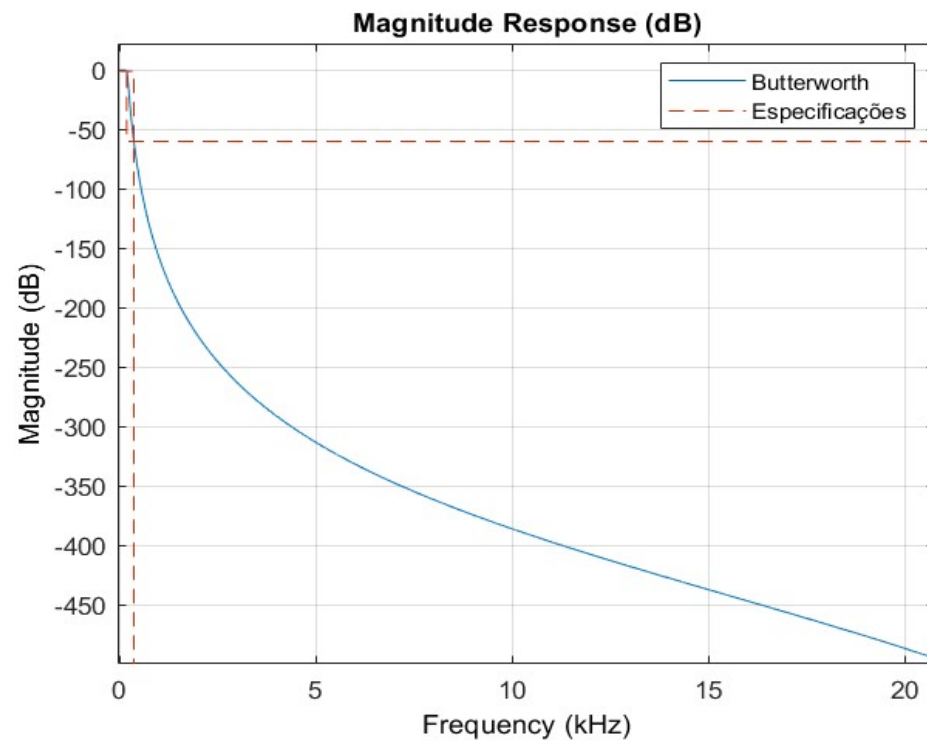
- Faixa de passagem: 0 a 180Hz;
- Frequência de rejeição: 360Hz;
- Largura de transição: 180Hz;
- Máximo *Ripple* na faixa de passagem: 1dB;
- Mínima atenuação na faixa de rejeição: 60dB;
- Frequência de amostragem: 62500Hz; e
- Frequência de corte $(\omega_p + \omega_s)/2$: 270Hz.

Normalizando: $\omega = 2\pi f/fs$:

- Faixa de passagem: 0 a $\omega_p = 0,00576\pi \text{ rad}$;
- Frequência de rejeição: $\omega_s = 0,01152\pi \text{ rad}$;
- Largura de transição: $\Delta \omega = 0,00576\pi \text{ rad}$;
- Máximo *Ripple* na faixa de passagem: $R_p = 1\text{dB}$ ($\delta_p = 0,1220$);
- Mínima atenuação na faixa de rejeição: $R_s = 60\text{dB}$ ($\delta_s = 0,001$);
- Frequência de amostragem: 62500Hz; e
- Frequência de corte: $0,00864\pi \text{ rad}$.

A principal característica desse filtro é que a resposta em magnitude é plana (flat) na banda de passagem e de corte. Possui resposta monotonicamente decrescente com o ganho tendendo a zero. A partir da Figura 20, é possível observar a resposta em frequência de magnitude do filtro de *Butterworth* projetado. No projeto do filtro usando o pacote de projeto de filtro de tempo discreto no MATLAB, o *software* opta por satisfazer as especificações na faixa de rejeição e exceder na faixa de passagem e as entradas típicas seriam as tolerâncias desejadas e as frequências críticas de tempo discreto. O projeto trata implícita ou explicitamente de quaisquer deformações prévias necessárias nas frequências (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

Figura 20 - Respostas em frequência de magnitude do filtro de *Butterworth* projetado.



Fonte: Elaboração da própria autora.

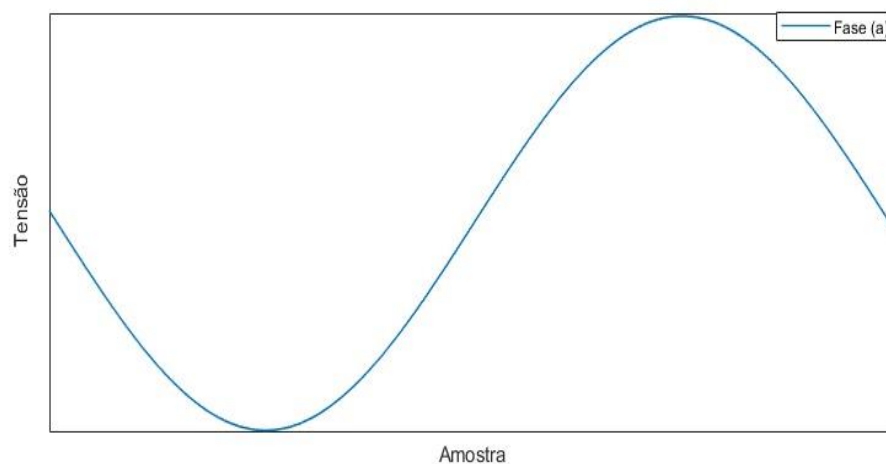
6 MÉTODO DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS

Para que um algoritmo de localização de faltas seja executado de modo preciso e confiável, deve-se primeiro detectar e classificar a falta corretamente. Portanto, neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada nesta pesquisa para detecção e classificação de faltas de curto-circuito. Essa metodologia estende o trabalho de Alencar, Santos e Panazio (2020).

Na proposta do algoritmo de detecção e classificação de falta é empregada a distância Euclidiana para detectar e classificar a ocorrência da falta. A detecção ocorre a partir da variação da distância Euclidiana entre dois pontos consecutivos dos valores amostrados dos sinais de tensão. Escolheu-se a tensão como sinal de entrada para o algoritmo, uma vez que há uma menor variação desse sinal durante as faltas. Após a detecção, a distância Euclidiana também é utilizada para indicar em quais fases ocorreu a falta e, consequentemente, classificar os tipos de faltas.

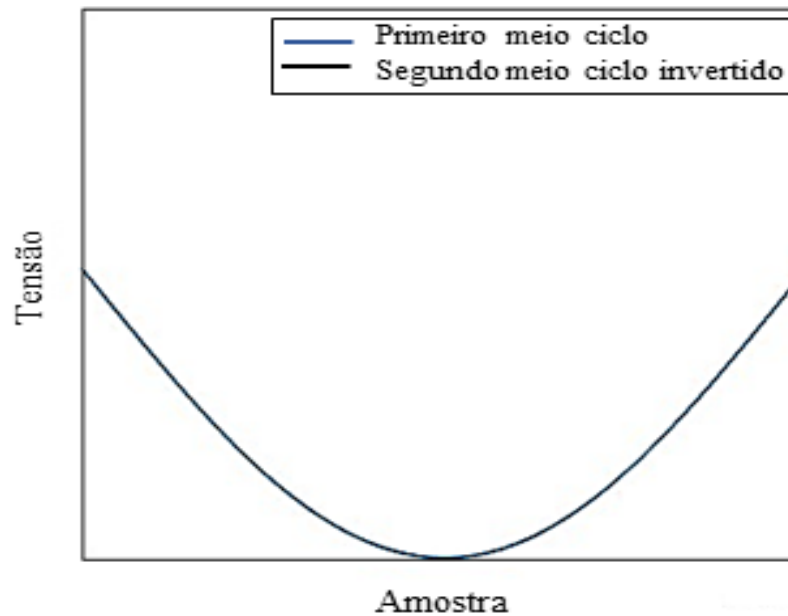
Na Figura 21, apresenta-se a fase (a) de um sinal de tensão trifásico, mostrando apenas um ciclo da frequência fundamental do sinal. Considerando que se trata de um sinal periódico, observa-se que a comparação entre o primeiro meio ciclo e o segundo meio ciclo invertido deve ser idealmente nula (Figura 22).

Figura 21 - Um ciclo do sinal de tensão.



Fonte: Elaboração da própria autora.

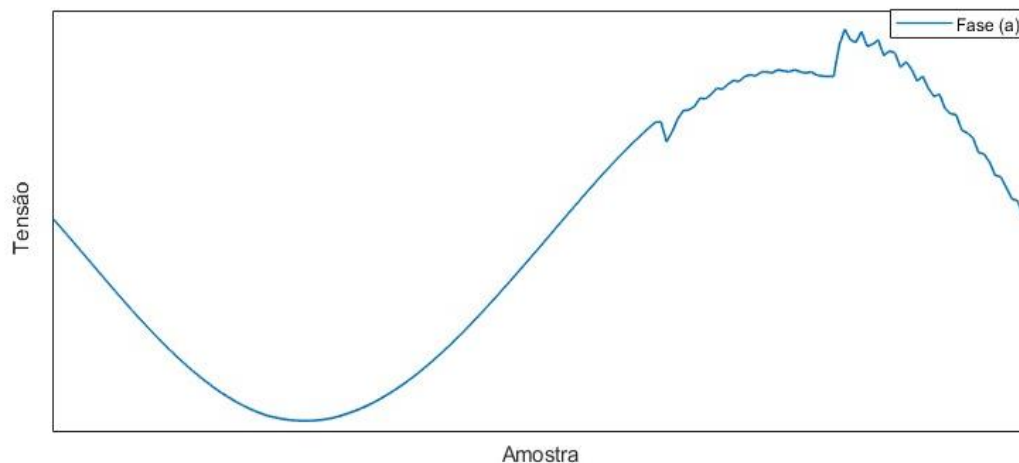
Figura 22 - Comparação entre o primeiro meio ciclo e o segundo meio ciclo invertido do sinal de tensão.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Uma vez que ocorre uma falta no sistema, o sinal de tensão tende a sofrer uma deformação como indica a Figura 23. Neste sentido, observa-se que ao se calcular a distância Euclidiana entre o ciclo do sinal de tensão antes da ocorrência da falta e após, o resultado não será nulo.

Figura 23 - Um ciclo do sinal de tensão após uma falta.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Para calcular as distâncias, considera-se um sinal de tensão representado pelo vetor $V = [v[1] \cdots v[N]]$, onde $v[n]$ é a tensão instantânea na n -ésima amostra e N corresponde a quantidade de amostras da sequência, sendo que este sinal corresponde a uma janela contendo um ciclo do sinal de tensão. A partir disto, o sinal v é dividido em dois sinais com o mesmo intervalo de tempo. Conforme as equações (20) e (21).

$$V_1 = [v[1] \cdots v[N/2]] \quad (20)$$

$$V_2 = [v[(N/2) + 1] \cdots v[N]] \quad (21)$$

Sendo assim, a distância Euclidiana entre V_1 e o inverso de V_2 pode ser calculada através da norma Euclidiana entre V_1 e o inverso de V_2 , conforme a equação (22).

$$dist = \| V_1 - (-V_2) \| = \sqrt{\sum_{i=1}^{N/2} (V_1[i] - (-V_2[i]))^2} \quad (22)$$

Admitindo que o sinal de tensão seja trifásico, a equação (22) pode ser reescrita por fase, conforme as equações (23), (24) e (25) respectivamente.

$$dista = \| V_{a1} + V_{a2} \| \quad (23)$$

$$distb = \| V_{b1} + V_{b2} \| \quad (24)$$

$$distc = \| V_{c1} + V_{c2} \| \quad (25)$$

6.1 DISTÂNCIA EUCLIDIANA NA DETECÇÃO DA FALTA

O objetivo ao definir a distância Euclidiana dada pela equação (22) é determinar o nível de perturbação ocorrida no SEP. Em casos que não existe distúrbio ou nos casos em que o distúrbio é pequeno, o valor de $dist$ calculado será pequeno e pode ser desprezado. No entanto, em casos que os distúrbios são mais expressivos a distância Euclidiana será maior e um valor

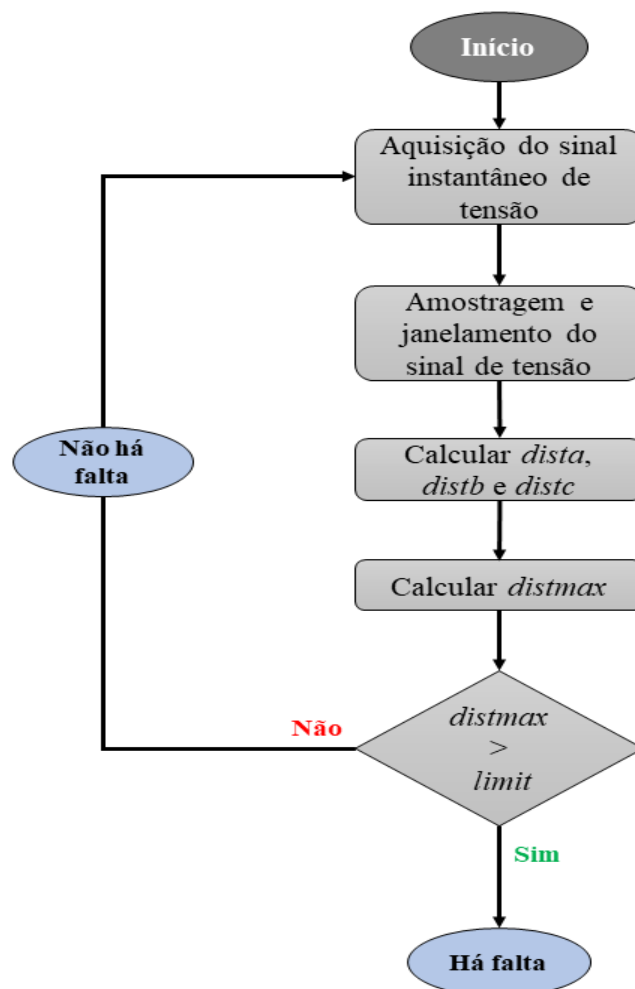
limite baseado nesta distância pode indicar a ocorrência de uma falta (ALENCAR; SANTOS; PANAZIO, 2020).

Após o cálculo das distâncias ($dista$, $distb$ e $distc$), define-se como $distmax$, a maior distância entre $dista$, $distb$ e $distc$, conforme equação (26).

$$distmax = \text{máximo}(dista, distb, distc) \quad (26)$$

Assim, para detectar a ocorrência de curto-circuito no SEP, um limite de detecção deve ser definido, denominado como $limit$. Portanto se $distmax > limit$ existe falta, caso contrário não existe. No fluxograma da Figura 24, ilustra como ocorre a detecção da falta através do método proposto.

Figura 24 - Fluxograma de detecção.



Fonte: Elaboração da própria autora.

6.2 DISTÂNCIA EUCLIDIANA NA CLASSIFICAÇÃO DA FALTA

A distância Euclidiana também pode ser utilizada para indicar em quais fases ocorreu a falta e, conseqüentemente, classificar as faltas. Entretanto, para ocorrer a classificação da falta de maneira precisa, não se pode apenas admitir um limite para valores das distâncias Euclidianas, uma vez que curtos-circuitos em uma fase podem interferir em outras fases. A equação (27) é usada para determinar a distância Euclidiana envolvendo todas as fases ($distt$). Comparando o valor de $distt$, por meio de um valor de $limitT$, é possível estimar inicialmente duas hipóteses para o tipo de falta.

$$distt = \| (Va1 + Vb1 + Vc1) + (Va2 + Vb2 + Vc2) \| \quad (27)$$

A falta pode ser monofásica ou bifásica-terra, caso o valor de $distt$ calculado seja superior ao $limitT$ adotado, caso contrário, a falta pode ser bifásica ou trifásica, ou seja, o $distt$ é utilizado para indicar o envolvimento da terra na classificação da falta.

Determinam-se em (28) e (29), quais fases possuem menor valor de distância ($distmin$) e valor mediano ($distmed$) de distância Euclidiana. A fase de maior valor é obtida a partir da equação (26). Sendo esses os parâmetros utilizados para definir as fases que envolvem a falta.

$$distmin = \text{mínimo} (dista, distb, distc) \quad (28)$$

$$distmed = \text{mediana} (dista, distb, distc) \quad (29)$$

Com isso, as distâncias de classificação são normalizadas para cada fase empregando a normalização *Min-Máx* conforme as equações (30) a (32). A normalização preserva as relações entre os valores de dados originais sendo o resultado obtidos em um intervalo entre 0 a 1.

$$dista(n) = \frac{dista - distmin}{distmax - distmin} \quad (30)$$

$$distb(n) = \frac{distb - distmin}{distmax - distmin} \quad (31)$$

$$distc(n) = \frac{distc - distmin}{distmax - distmin} \quad (32)$$

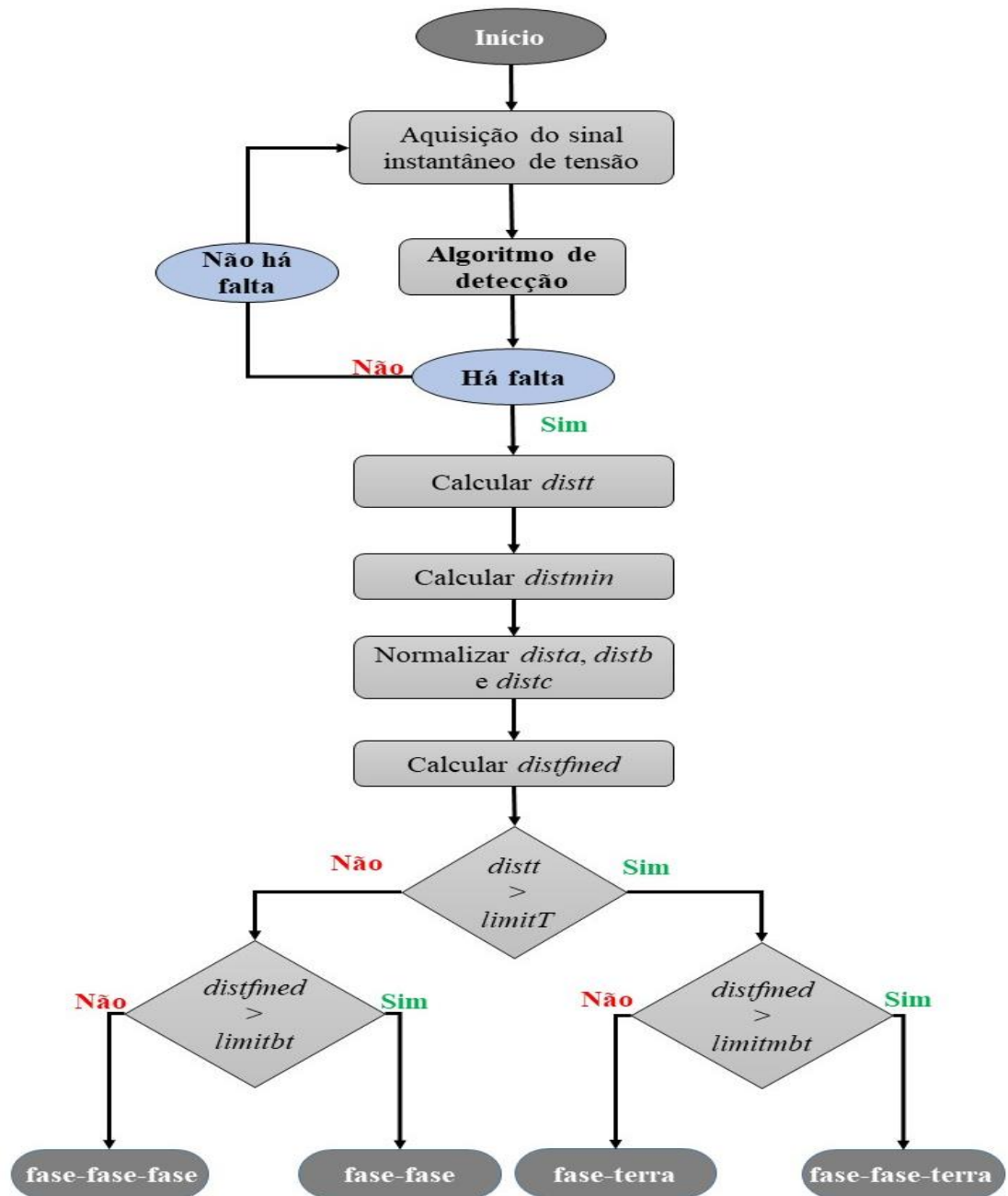
Determina-se em (33) as fases que possuem valor mediano (*distfmed*) de distância Euclidiana normalizada.

$$distfmed = \text{mediano} [dista(n), distb(n), distc(n)] \quad (33)$$

Nas faltas monofásicas a distância Euclidiana mediana normalizada (*distfmed*) tende a ser mais próxima de zero, enquanto nas faltas bifásicas-terra ela tende a ser próxima de um. Nas faltas bifásicas a distância Euclidiana mediana normalizada tende a ser mais próxima de um, enquanto nas faltas trifásicas ela tende a ser próxima de zero. Esse critério observado é utilizado na classificação das faltas, sendo assim define-se *limitmbt* como sendo o limite de classificação entre faltas monofásicas e bifásicas-terra e *limitbt* para faltas bifásicas e trifásicas. Os limites para a classificação foram ajustados baseado nas simulações em dois parques eólicos distintos.

No fluxograma da Figura 25, observa-se como a classificação ocorre empregando o algoritmo proposto.

Figura 25 - Fluxograma de classificação.

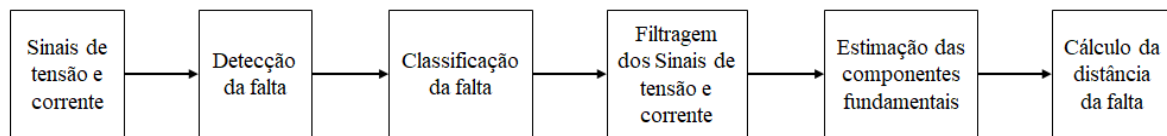


Fonte: Elaboração da própria autora.

7 MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Neste capítulo apresenta-se o método de localização de faltas utilizado nesta pesquisa. Na Figura 26 apresenta-se o diagrama resumido contendo as sub-rotinas que foram implementadas no MATLAB para a LDF, que são detalhados ao decorrer deste capítulo.

Figura 26 – Sub-rotinas do método utilizado.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Antes da localização da falta realiza-se a sua detecção e classificação (Capítulo 6) e é imprescindível destacar a importância desses processos na LDF, uma vez que só é possível o cálculo do ponto de falta no sistema a partir da metodologia proposta após sua correta classificação, considerando que a equação utilizada na etapa de LDF dependerá das fases classificadas em falta, como será detalhada a seguir. Portanto algoritmos que detectam e classificam as faltas com uma boa precisão são fundamentais na etapa prévia de LDF.

O processo de filtragem dos sinais de tensão e corrente, assim como a estimação das componentes fundamentais foram detalhadas no capítulo 5, englobando a etapa de processamento digital de sinais realizada nesse trabalho.

Historicamente, os algoritmos que usam dados de um terminal são, de início, os mais estudados e difundidos. Apresentam a vantagem de não dependerem dos dados do terminal remoto e, por consequência, de nenhum sistema de comunicação e sincronização entre os terminais. Em relação à precisão, esta pode ser comprometida por alguns fatores: a falta de informações do terminal remoto normalmente conduz a simplificações na formulação dos métodos; o valor da resistência de falta, sendo desconhecido, quando elevado, influencia de maneira negativa os resultados; os valores das impedâncias das fontes equivalentes terminais, presentes na formulação de vários algoritmos, no momento do curto-circuito, são desconhecidos; a utilização de dados coletados do lado da fonte fraca conduz a resultados menos precisos (SILVEIRA, 2007).

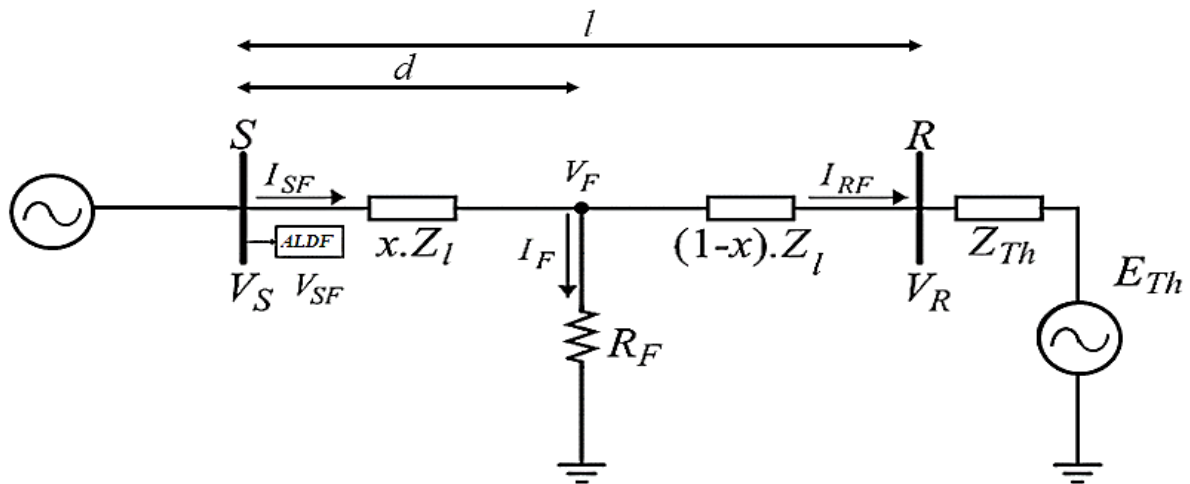
O presente equacionamento do algoritmo de LDF fundamentado na impedância de sequência positiva estende o trabalho de Lima (2013). Utilizam-se dados de tensão e corrente

de um único terminal e faz uso das componentes de seqüências na estimação do ponto de falta. Deste modo, será apresentada a modelagem matemática implementada para LDF aplicada a alimentadores de parques eólicos para faltas do tipo: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e fase-fase.

Referente ao sistema sob falta é importante destacar algumas considerações: o sistema é considerado equilibrado, a resistência de falta é constante e a mesma para todas as fases em falta. Considera-se também para o equacionamento, que os alimentadores do sistema são transpostos, ou seja, a impedância de seqüência positiva do alimentador é igual a impedância de seqüência negativa e o equacionamento é feito baseado em componentes de seqüências.

A Figura 27, apresenta o diagrama unifilar de um circuito equivalente em falta, no qual a partir deste obteve-se o equacionamento para tensões trifásicas de fase para uma falta.

Figura 27 - Diagrama unifilar do circuito equivalente em falta.



Fonte: Adaptado de Lima (2013).

Onde:

V_{SF} : tensão de fase durante a falta no terminal local [V];

V_F : tensão de fase no ponto de falta [V];

V_S : tensão de fase no terminal local [V];

V_R : tensão de fase no terminal remoto [V];

I_{SF} : corrente de fase durante a falta, contribuídas pelo terminal local [A];

I_{RF} : corrente de fase durante a falta, contribuídas pelo terminal remoto [A];

Z_l : impedância série do alimentador [Ω];

Z_{Th} : impedância do sistema conectado ao terminal remoto [Ω];

E_{Th} : fonte de tensão conectada ao terminal remoto [Ω];

I_F : corrente de falta [A];

R_F : resistência de falta [Ω];

l : comprimento do alimentador [Km];

x : valor por unidade da distância da falta em relação ao tamanho total do alimentador

$$0 \leq x \leq 1;$$

d : distância da falta em relação ao terminal local por unidade de comprimento [Km],

$$d = x \cdot l;$$

ALDF: Algoritmo de localização de faltas.

Utilizando a representação da Figura 27 pode-se escrever a tensão no ponto de falta conforme a equação (34).

$$[V_F] = [V_{SF}] - x \cdot [Z_l] \cdot [I_{SF}]. \quad (34)$$

Sendo V_{SF} e I_{SF} os vetores de tensões e correntes trifásicas respectivamente medidas no terminal local (S). A partir da equação (34) é possível obter as equações genéricas para as tensões no ponto de falta, em faltas fase-terra e faltas envolvendo mais de uma fase, equações (35) e (36) respectivamente.

$$[V_{Fm}] = [V_{SFm}] - x \cdot [Z_{lm}] \cdot [I_{SFm}], \quad (35)$$

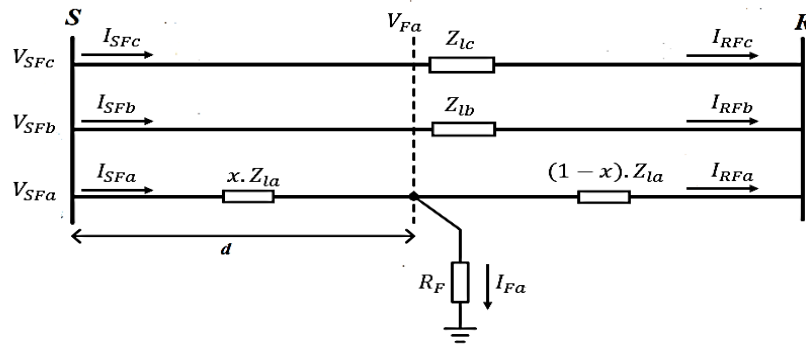
$$[V_{Fm} - V_{Fn}] = [V_{SFm} - x \cdot Z_{lm} \cdot I_{SFm}] - [V_{SFn} - x \cdot Z_{ln} \cdot I_{SFn}]. \quad (36)$$

A partir das equações (35) e (36), realiza-se o desenvolvimento do equacionamento do algoritmo de LDF para os tipos de faltas considerados nesta pesquisa. Os subscritos “ m ” e “ n ” indicam genericamente as fases que envolvem a falta.

7.1 FALTA MONOFÁSICA

Considerando uma falta fase-terra na fase (a), conforme a Figura 28, a tensão no ponto da falta (equação (37)) pode ser obtida a partir da equação genérica (35).

Figura 28 - Diagrama de falta monofásica.



Fonte: Adaptado de Lima (2013).

$$V_{Fa} = V_{SFa} - x \cdot (Z_{la} \cdot I_{SFa}) \quad (37)$$

Considera-se $V_{Fa} = R_F \cdot I_{Fa}$ e que a expressão pode ser reescrita em função das componentes simétricas, conforme a equação (38).

$$R_F \cdot I_{Fa} = (V_{SF0} + V_{SF1} + V_{SF2}) - x \cdot (Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot I_{SF1} + Z_{l2} \cdot I_{SF2}) \quad (38)$$

Neste caso, considera-se a impedância de sequência positiva do alimentador como sendo igual a impedância de sequência negativa ($Z_{l1} = Z_{l2}$). Portanto, obtém-se a equação (39) em função das componentes simétricas que foram estimadas a partir dos fasores das componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente obtidos por transformada de Fourier de ciclo completo.

$$R_F \cdot I_{Fa} = (V_{SF0} + V_{SF1} + V_{SF2}) - x \cdot [Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot (I_{SF1} + I_{SF2})] \quad (39)$$

Sendo:

V_{SF0} : tensão de sequência zero no terminal S durante a falta;

V_{SF1} : tensão de sequência positiva no terminal S durante a falta;

V_{SF2} : tensão de sequência negativa no terminal S durante a falta;

Z_{l0} : impedância de sequência zero do alimentador;

Z_{l1} : impedância de sequência positiva do alimentador;

I_{SF0} : corrente de sequência zero contribuída pelo terminal S durante a falta;

I_{SF1} : corrente de sequência positiva contribuída pelo terminal S durante a falta;

I_{SF2} : corrente de sequência negativa contribuída pelo terminal S durante a falta;

Rearranjando a equação (39), isolando o x e considerando que $V_{SFa} = (V_{SF0} + V_{SF1} + V_{SF2})$ tem-se a equação (40).

$$x = \frac{V_{SFa} - R_F \cdot I_{Fa}}{[Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot (I_{SF1} + I_{SF2})]} \quad (40)$$

Multiplicando-se a equação (40) pelo conjugado da corrente de falta (I_{Fa}^*), observa-se que $R_F \cdot I_{Fa} \cdot I_{Fa}^*$ resulta em um número real. Sendo assim, uma vez que se considera apenas a parte imaginária da equação (40), a parcela referente a R_F pode ser desconsiderada. Resultando por fim na equação (41) para distância da falta em relação ao terminal local.

$$x = \frac{\Im(V_{SFa} \cdot I_{Fa}^*)}{\Im\{[Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot (I_{SF1} + I_{SF2})] \cdot I_{Fa}^*\}} \quad (41)$$

Onde $\Im$ e $*$ representam, respectivamente, a parte imaginária e o conjugado de um número complexo.

Para as faltas fase-terra na fase (b) e (c) o cálculo da distância da falta em relação ao terminal local pode ser obtido a partir das equações (42) e (43), respectivamente.

$$x = \frac{\Im[(V_{SF0} + a^2 \cdot V_{SF1} + a \cdot V_{SF2}) \cdot I_{Fb}^*]}{\Im\{[Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot (a^2 \cdot I_{SF1} + a \cdot I_{SF2})] \cdot I_{Fb}^*\}} \quad (42)$$

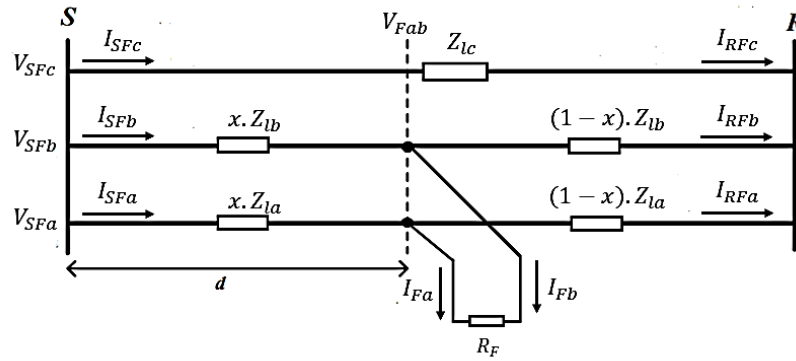
$$x = \frac{\Im[(V_{SF0} + a \cdot V_{SF1} + a^2 \cdot V_{SF2}) \cdot I_{Fc}^*]}{\Im\{[Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot (a \cdot I_{SF1} + a^2 \cdot I_{SF2})] \cdot I_{Fc}^*\}} \quad (43)$$

onde o operador complexo $a = (-0.5 + 0.866i)$ e $a^2 = (-0.5 - 0.866i)$ na forma retangular.

7.2 FALTA BIFÁSICA E BIFÁSICA-TERRA

Os modelos ilustrados nas Figuras 29 e 30 são, respectivamente, adotados para o desenvolvimento do equacionamento para LDF do tipo fase-fase e fase-fase-terra.

Figura 29 - Diagrama de falta bifásica.



Fonte: Adaptado de Lima (2013).

Por inspeção da Figura 29 pode-se adotar as equações (44), (45) e (46).

$$(V_{Fa} - V_{Fb}) = R_F \cdot (I_{Fa} - I_{Fb}) \quad (44)$$

$$(I_{Fa} - I_{Fb}) = I_{Fab} \quad (45)$$

$$(V_{Fa} - V_{Fb}) = R_F \cdot I_{Fab} \quad (46)$$

Substituindo os subscritos m e n da equação (36) pelos subscritos das respectivas fases em falta (a) e (b), sem perda de generalidade, e isolando x obtém-se as equações (47) e (48), respectivamente.

$$(V_{Fa} - V_{Fb}) = (V_{SFa} - x \cdot Z_{la} \cdot I_{SFa}) - (V_{SFb} - x \cdot Z_{lb} \cdot I_{SFb}) \quad (47)$$

$$(V_{Fa} - V_{Fb}) = (V_{SFa} - V_{SFb}) - x \cdot (Z_{la} \cdot I_{SFa} - Z_{lb} \cdot I_{SFb}) \quad (48)$$

Substituindo a equação (46) na equação (48) obtém-se:

$$R_F \cdot I_{Fab} = (V_{SFa} - V_{SFb}) - x \cdot (Z_{la} \cdot I_{SFa} - Z_{lb} \cdot I_{SFb}) \quad (49)$$

A equação (50) resulta da substituição dos componentes de fase do lado direito da equação por componentes de sequência e considera-se novamente que a impedância de sequência positiva do alimentador é igual a impedância de sequência negativa.

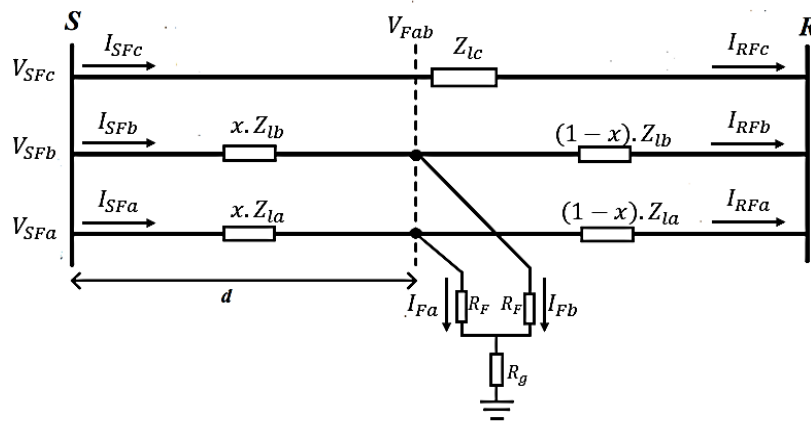
$$R_F \cdot I_{Fab} = [(1 - a^2) \cdot V_{SF1} + (1 - a) \cdot V_{SF2}] - x \cdot [Z_{l1} \cdot (1 - a^2) \cdot I_{SF1} + (1 - a) \cdot I_{SF2}] \quad (50)$$

Assim como no equacionamento para faltas monofásicas multiplica-se a equação (50) pelo conjugado da corrente de falta (I_{Fab}^*) e isola-se x para obter a equação para a distância da falta em relação ao terminal local considerando duas fases faltosas, conforme a equação (51).

$$x = \frac{\Im\{[(1 - a^2) \cdot V_{SF1} + (1 - a) \cdot V_{SF2}] \cdot I_{Fab}^*\}}{\Im\{[Z_{l1} \cdot (1 - a^2) \cdot I_{SF1} + (1 - a) \cdot I_{SF2}] \cdot I_{Fab}^*\}} \quad (51)$$

Na Figura 30 observa-se o diagrama para uma falta bifásica-terra, a partir de sua análise por inspeção pode-se realizar o desenvolvimento do equacionamento para esse tipo de falta. Adotando os mesmos passos anteriores para obtenção da equação (51), observa-se que para as condições dos diagramas apresentados, as equações de LDF para faltas bifásicas e bifásicas-terras são equivalentes. Vale ressaltar que as equações referentes as outras fases são obtidas de maneira análoga as equações anteriores, podendo ser vistas com mais detalhes em Lima (2013).

Figura 30 - Diagrama de falta bifásica-terra.

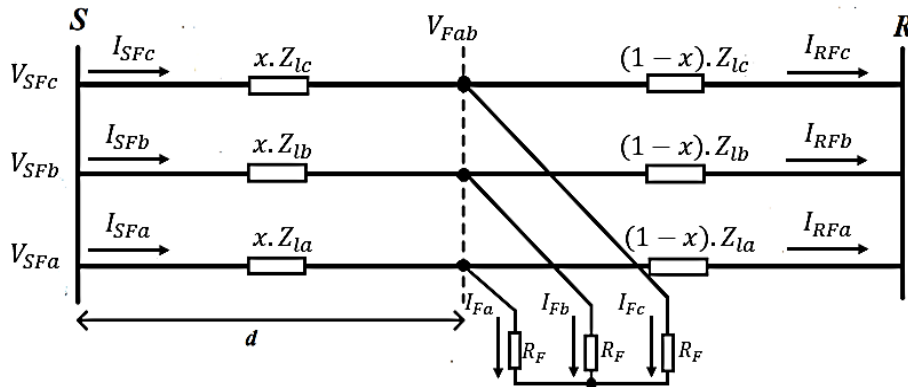


Fonte: Adaptado de Lima (2013).

7.3 FALTA TRIFÁSICA

Para o equacionamento da LDF para uma falta trifásica adota-se o modelo representado na Figura 31.

Figura 31 - Diagrama de falta trifásica.



Fonte: Adaptado de Lima (2013).

O desenvolvimento do equacionamento foi realizado por Lima (2013) através da análise de Thévenin nas fases (b) e (c), e conclui-se que para as condições dos sistemas citados as equações de LDF para faltas do tipo bifásica, bifásica-terra e trifásicas são as mesmas.

7.4 ALGORITMO PROPOSTO PARA LDF EM PARQUES EÓLICOS

Antes da localização da falta é fundamental a sua detecção e classificação. A ocorrência de um curto-circuito está estritamente relacionada com a alteração dos valores de tensão e corrente elétrica, além de perturbações em grandezas como: ângulo de fase e frequência. A partir disto, para a aplicação do algoritmo de LDF fazem-se algumas considerações iniciais:

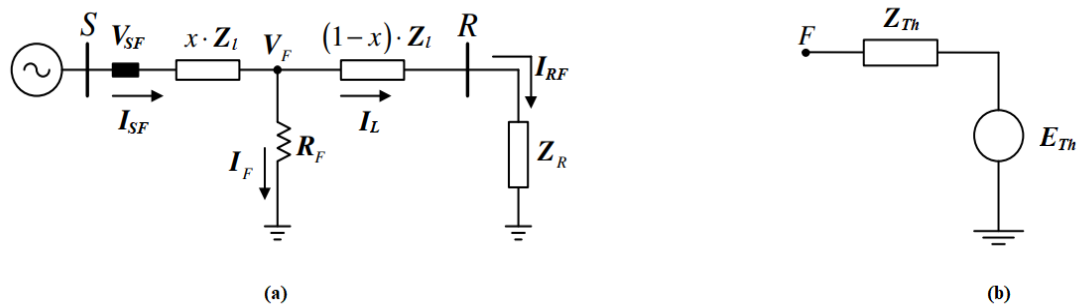
- I. Estão disponíveis as medidas de tensão e correntes trifásicas pré-falta e durante a falta no terminal local;
- II. O tipo de falta é um dado de entrada do algoritmo; e
- III. São conhecidos os parâmetros do sistema como: impedância série, impedância de sequência zero e de sequência positiva, assim como a extensão do alimentador em unidade de comprimento.

O método de LDF proposto é baseado num algoritmo iterativo semelhante ao proposto em Lima (2013). Para a técnica iterativa utilizada estima-se a corrente de falta pela diferença entre a corrente no terminal local da seção faltosa e a corrente no terminal remoto. Para a estimativa da corrente no terminal remoto, o presente trabalho utiliza o teorema de Thévenin, o qual é aplicável a circuitos lineares (STEVENSON, 1974). O método busca representar o equivalente de Thévenin, a partir das extremidades da linha, através das ondas de tensões e correntes registradas no terminal local. O sistema equivalente de Thévenin a jusante da falta é

fundamental para a atualização da corrente no terminal remoto, sendo a determinação deste obtida a partir dos dados de regime permanente do sistema faltoso (NUNES, 2010).

Na Figura 32 são apresentados em (a): o circuito equivalente a jusante da falta e em (b): o sistema equivalente de Thévenin para esse circuito.

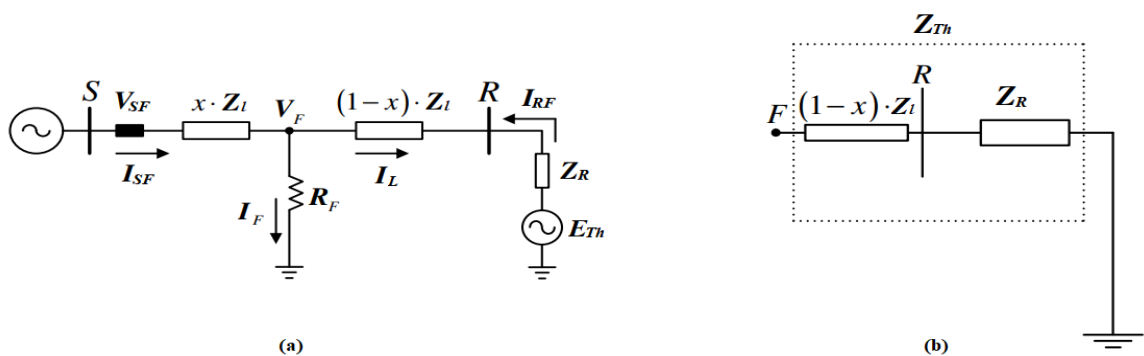
Figura 32 - Sistema equivalente de Thévenin.



Fonte: Adaptado de Nunes (2010).

A impedância equivalente vista do ponto da falta, pode ser observada na da Figura 33, em que consiste em (a): o circuito equivalente a montante da falta e em (b): o sistema equivalente para esse circuito. Sendo fundamental para a estimativa do sistema equivalente, considerando os dados do circuito pré-falta e em falta.

Figura 33 - Impedância equivalente vista do ponto de falta para falta a montante do gerador.



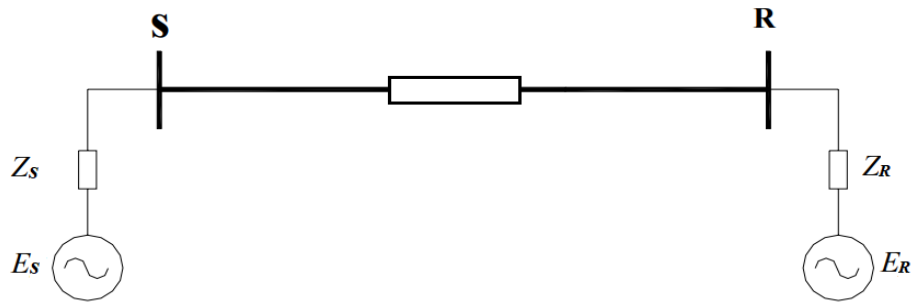
Fonte: Adaptado de Nunes (2010).

7.4.1 Cálculo da Impedância equivalente da fonte (Z_R)

O método busca representar o equivalente de Thévenin a partir das extremidades do alimentador, através das ondas de tensões e correntes medidas. Para tanto considera-se as condições da topologia de rede, sendo possível obter as impedâncias equivalentes, no momento

do curto-circuito. O sistema elétrico pode ser representado, conforme o diagrama unifilar da Figura 34, sendo Z_S e Z_R as impedâncias vistas das barras S e R respectivamente.

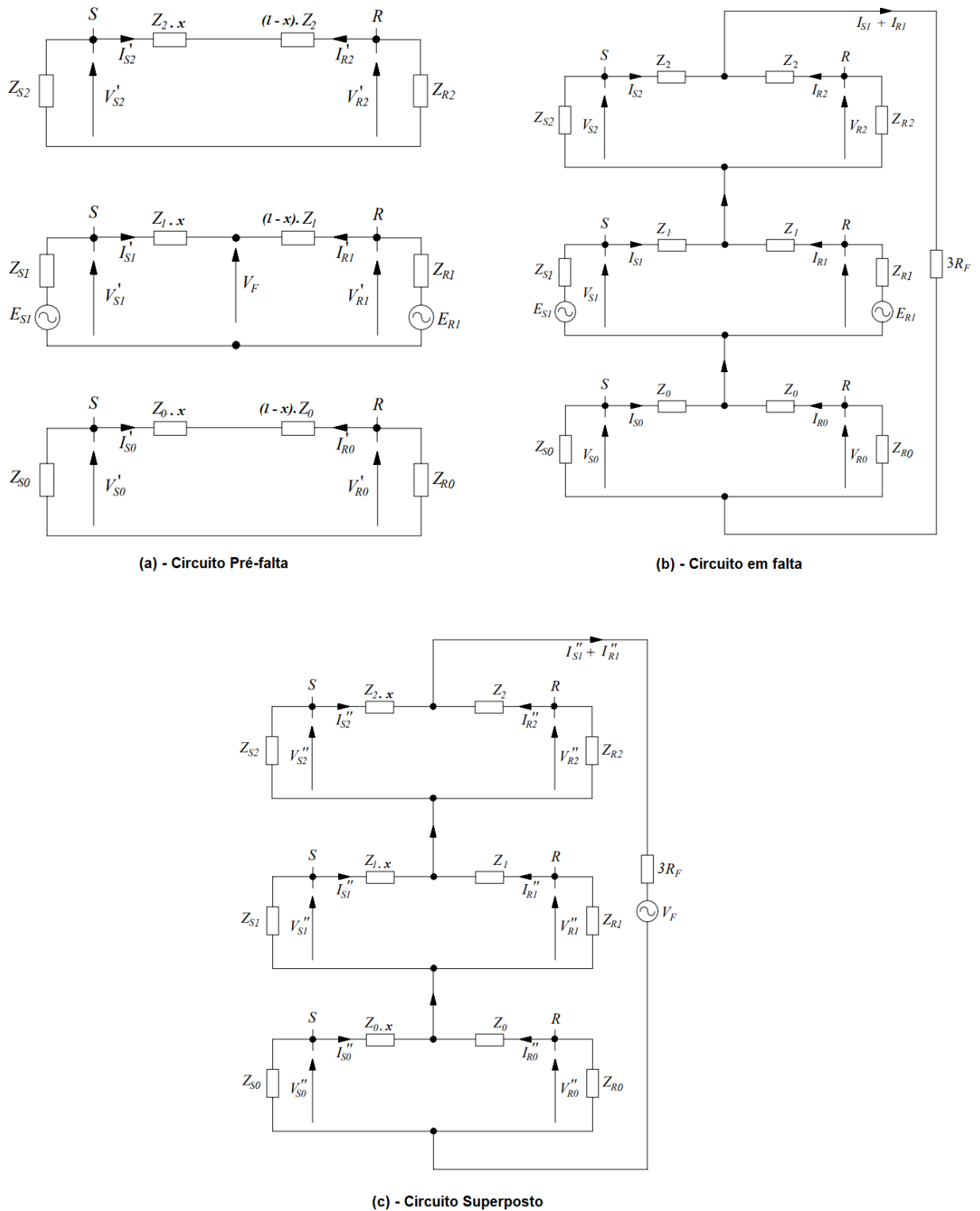
Figura 34 - Circuito equivalente de um sistema elétrico.



Fonte: Adaptado de Silveira (2007).

No cálculo das impedâncias equivalentes, utiliza-se a técnica das componentes simétricas e o teorema da superposição. Desta forma, decompõe-se o circuito em redes de sequência, conforme o tipo de falta ocorrido (SILVEIRA, 2007). O circuito em componentes de sequências correspondente é mostrado na Figura 35(a). Na ocorrência de uma falta fase-terra em um ponto do alimentador, obtém-se o circuito equivalente em falta, conforme Figura 35(b). Através do teorema da superposição, chega-se ao circuito superposto da Figura 35(c), que pode ser obtido a partir das condições de pós-falta e pré-falta, respectivamente.

Figura 35 - Circuito equivalente decomposto em função das componentes de seqüências.



Fonte: Adaptado de Silveira (2007).

A ocorrência da impedância de seqüência está relacionada ao tipo de falta. Assim, um curto-circuito fase-terra nas impedâncias de seqüência positiva, negativa e zero das fontes, ao

passo que um curto-circuito trifásico resultará apenas na de sequência positiva (SILVERA, 2007).

As impedâncias das fontes são calculadas a partir do circuito superposto da Figura 35(c), conforme as equações (52) à (55).

$$Z_{S1} = -\frac{V_{S1} - V'_{S1}}{I_{S1} - I'_{S1}} = -\frac{V''_{S1}}{I''_{S1}} \quad (52)$$

$$Z_{S0} = -\frac{V_{S0} - V'_{S0}}{I_{S0} - I'_{S0}} = -\frac{V''_{S0}}{I''_{S0}} \quad (53)$$

$$Z_{R1} = -\frac{V_{R1} - V'_{R1}}{I_{R1} - I'_{R1}} = -\frac{V''_{R1}}{I''_{R1}} \quad (54)$$

$$Z_{R0} = -\frac{V_{R0} - V'_{R0}}{I_{R0} - I'_{R0}} = -\frac{V''_{R0}}{I''_{R0}} \quad (55)$$

Portanto a impedância equivalente vista do ponto de falta para falta a montante do gerador (Z_{Th}) é estimada conforme a equação (56) considerando o circuito equivalente da Figura 33.

$$Z_{Th} = (1 - x) \cdot Z_l + Z_R \quad (56)$$

7.4.2 Cálculo da Tensão equivalente da fonte (E_{Th})

As tensões equivalentes de Thévenin para cada fase são estimadas através do cálculo da tensão no ponto da falta, no período pré-falta. A partir de uma estimativa inicial da distância e dos dados medidos no período pré-falta, calcula-se a tensão no ponto da falta no período pré-falta de acordo com as equações por fase (57), (58) e (59), respectivamente.

$$V_{Ra} = V_{Sa} - x((I_{S1} + I_{S2}) \cdot Z_{l1} + Z_{l0} \cdot I_{S0}) \quad (57)$$

$$V_{Rb} = (V_{S0} + a^2 \cdot V_{S1} + a \cdot V_{S2}) - x((a^2 \cdot I_{S1} + a \cdot I_{S2}) \cdot Z_{l1} + Z_{l0} \cdot I_{S0}) \quad (58)$$

$$V_{Rc} = (V_{S0} + a \cdot V_{S1} + a^2 \cdot V_{S2}) - x((a \cdot I_{S1} + a^2 \cdot I_{S2}) \cdot Z_{l1} + Z_{l0} \cdot I_{S0}) \quad (59)$$

A tensão equivalente de Thévenin será igual a tensão no ponto da falta no período pré-falta, conforme o conjunto de equações (60).

$$\begin{aligned} E_{Tha} &= V_{Ra} \\ E_{Thb} &= V_{Rb} \\ E_{Thc} &= V_{Rc} \end{aligned} \quad (60)$$

A seguir são apresentados os passos que descrevem o algoritmo de localização de faltas proposto nesta pesquisa após todas as considerações dessa seção terem sido realizadas:

- I. Assume-se que a corrente que circula no terminal remoto é igual a corrente de pré-falta no terminal local, conforme a equação (61). A contribuição fornecida pelo gerador é desconsiderada neste método.

$$I_S = I_R \quad (61)$$

- II. Estima-se a corrente de falta pela diferença entre a corrente durante a falta no terminal S (I_{SF}) e a corrente contribuída pelo terminal remoto pré-falta (I_R), utilizando a equação (62);

$$I_F = I_{SF} - I_R \quad (62)$$

- III. Calcula-se a estimativa inicial da distância da falta, utilizando a equação específica para cada falta: fase-terra equação (41) ou fase-fase, fase-fase-terra e fase-fase-fase equação (51).
- IV. Uma vez estimada a distância percentual inicial da falta, é realizada a análise de convergência do algoritmo através da equação (63);

$$|x(i) - x(i - 1)| < \delta \quad (63)$$

onde i é o número de iterações do algoritmo e δ é uma tolerância definida sendo adotada $\delta = 10^{-3} \times l$;

- V. Se x convergiu finaliza-se o algoritmo, caso contrário passa-se para o próximo passo;
- VI. Determina-se a tensão das fases no ponto da falta, de acordo com as equações:

$$V_{Fa} = V_{SFa} - x((I_{SF1} + I_{SF2}) \cdot Z_{l1} + Z_{l0} \cdot I_{SF0}) \quad (64)$$

$$V_{Fb} = (V_{SF0} + a^2 \cdot V_{SF1} + a \cdot V_{SF2}) - x((a^2 \cdot I_{SF1} + a \cdot I_{SF2}) \cdot Z_{l1} + Z_{l0} \cdot I_{SF0}) \quad (65)$$

$$V_{Fc} = (V_{SF0} + a \cdot V_{SF1} + a^2 \cdot V_{SF2}) - x((a \cdot I_{SF1} + a^2 \cdot I_{SF2}) \cdot Z_{l1} + Z_{l0} \cdot I_{SF0}) \quad (66)$$

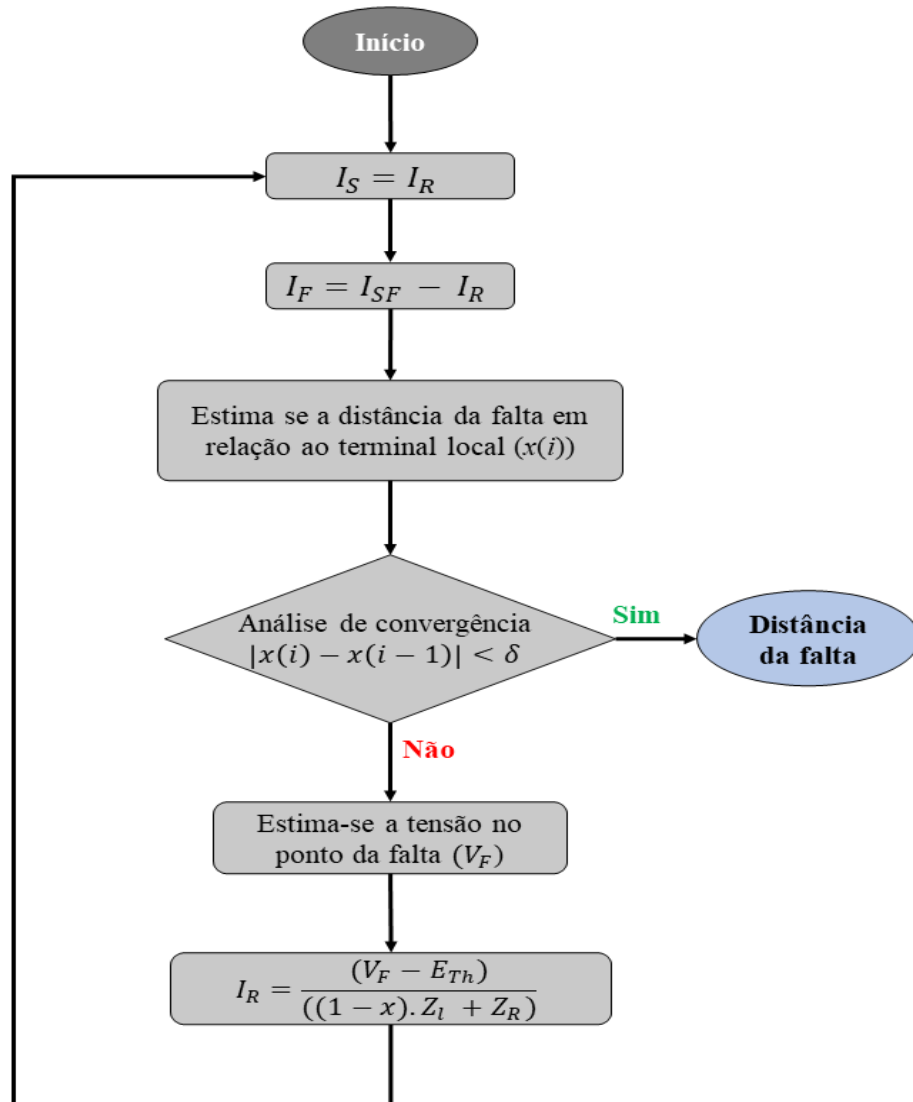
VII. Considerando o sistema apresentado na Figura 32, obtém-se por meio da equação (67) a corrente no terminal remoto durante a falta.

$$I_R = \frac{V_F - E_{Th}}{(1 - x) \cdot Z_l + Z_R} \quad (67)$$

VIII. Com o valor atualizado da corrente no terminal remoto I_R retorna-se ao passo II.

Este algoritmo é executado até a convergência, onde então obtém-se uma estimativa do local da falta. O algoritmo iterativo descrito nesta seção é ilustrado no fluxograma da Figura 36.

Figura 36 - Fluxograma de localização.



Fonte: Elaboração da própria autora.

7.4.3 Considerações finais

A técnica de localização de falhas proposta nesse capítulo, faz uso do equacionamento desenvolvido em Lima (2013) para o cálculo do local da falta e para estimar o circuito equivalente de Thévenin baseia-se no trabalho desenvolvido por Silveira (2007). O equacionamento apresentado é desenvolvido em componentes simétricas e faz uso da teoria da superposição, destina-se a localização de falhas do tipo monofásica, bifásica, bifásica terra e trifásica. A metodologia é fundamentada no cálculo da impedância aparente a partir de medições de um terminal dos sinais de tensão e corrente no período pré-falta e durante a falta.

O algoritmo de LDF utiliza como dados de entrada os fasores das componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente, obtidos por transformada de Fourier de ciclo completo, além dos parâmetros referentes ao sistema e tipo de falta. Na metodologia a modelagem do gerador não é considerada. No próximo capítulo será analisado o desempenho do método de detecção, classificação e localização de faltas proposto nesta dissertação e como determinados parâmetros podem influenciar a localização da falta.

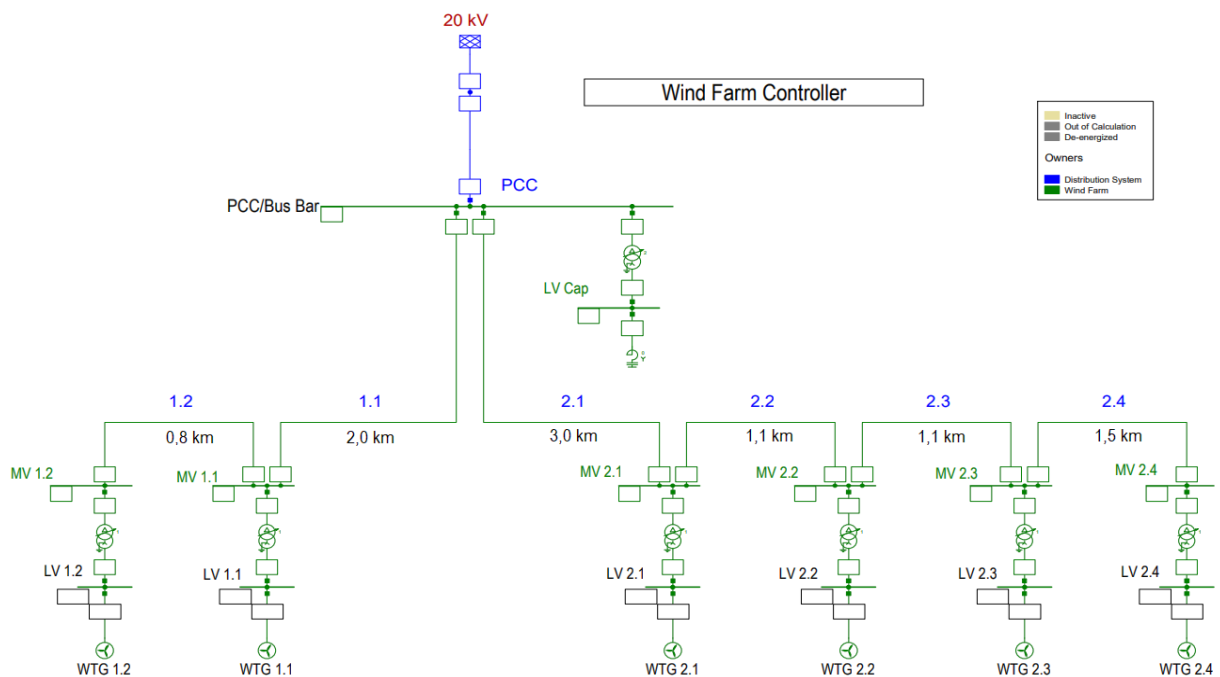
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os sistemas teste utilizados para o estudo de caso, bem como os resultados obtidos com os algoritmos de detecção, classificação e localização de faltas apresentados nos capítulos anteriores, 6 e 7 respectivamente. Para isto, implementou-se dois parques eólicos com configurações distintas e diversas situações de faltas são simuladas.

8.1 SISTEMA TESTE I

Visando o desenvolvimento e testes do algoritmo proposto para a detecção, classificação e localização de faltas, um parque eólico *onshore*, conectado a uma rede de distribuição de 20kV foi escolhido e modelado (Figura 37), permitindo a geração de sinais de tensão e corrente precisos do sistema em condições normais e em falta. Este sistema, constituído de um parque eólico com 6 aerogeradores com gerador de indução do tipo duplamente alimentado (*Doubly-Fed Induction Generator – DFIG*) de 2,5 MW cada, conectado a uma rede de distribuição de 20 kV e frequência elétrica de 50Hz, foi retirado da base de dados do *software* DigSilent® *Power Factory*, com todos os controles (tensão, corrente, frequência e potência) implementados.

Figura 37 - Parque eólico conectado a uma rede de distribuição de 20 kV.



Fonte: Adaptado de DigSilent® *Power Factory* (2014).

A proposta é testar e validar o algoritmo a partir de diferentes condições operativas. Para isto, aplicou-se nesse SEP diversas situações de faltas nos alimentadores 1.2, 2.2 e 2.4.

As impedâncias de sequências positiva e zero calculadas para cada seguimento dos trechos analisados constam nas Tabela 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 - Impedância de sequência positiva de cada segmento do SEP.

Identificação do Segmento	R (Ω)	X(Ω)
1.1	0,42200	0,24442
1.2	0,16880	0,09777
2.1	0,63300	0,36662
2.2	0,23210	0,13443
2.3	0,23210	0,13443
2.4	0,31650	0,18331
Total	2,00450	1,16098

Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 4 - Impedância de sequência zero de cada segmento do SEP.

Identificação do Segmento	R (Ω)	X(Ω)
1.1	1,6940	0,5940
1.2	0,6776	0,2376
2.1	2,5410	0,8910
2.2	0,9317	0,3267
2.3	0,9317	0,3267
2.4	1,2705	0,4455
Total	8,0465	2,8215

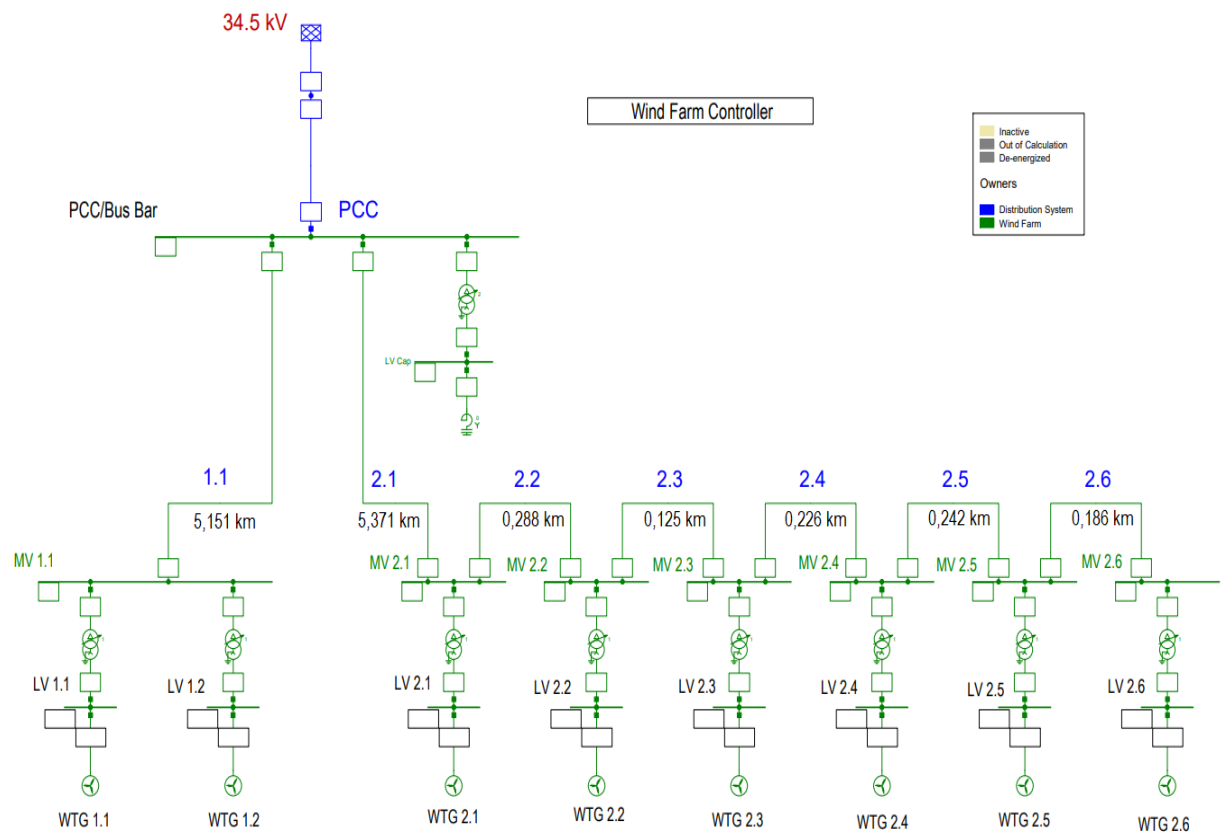
Fonte: Elaboração da própria autora.

8.2 SISTEMA TESTE II

Além do SEP apresentado na Figura 37, um parque eólico real de 34,5 kV, adaptado de Peixoto *et al.* (2020), é modelado no *software* DigSilent® Power Factory. O sistema é

pertencente ao Complexo Eólico Ventos do Tianguá localizado na Serra de Ibiapaba, no município cearense de Tianguá, contendo uma extensão de 6,438 km, saindo da subestação coletora até o aerogerador WTG 2.6 (Figura 38). São obtidos os resultados de fluxo de carga e análise de curto-circuito considerando faltas monofásica, bifásica, bifásica-terra e trifásica nos alimentadores 1.1, 2.2, 2.4 e 2.6. Na Figura 38, pode-se observar o circuito do parque eólico implementado, composto por 8 aerogeradores com 1,69MW de potência ativa cada e frequência da rede elétrica de 60Hz.

Figura 38 - Parque eólico conectado a uma rede de distribuição de 34,5 kV.



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

As impedâncias de sequências positiva e zero calculadas para cada seguimento dos trechos analisados, constam nas Tabela 5 e 6 respectivamente.

Tabela 5 - Impedância de sequência positiva de cada segmento do SEP.

Identificação do Segmento	R (Ω)	X(Ω)
1.1	1,086861	0,629493

2.1	1,133281	0,656379
2.2	0,060768	0,035196
2.3	0,026375	0,015276
2.4	0,047686	0,027619
2.5	0,051062	0,029574
2.6	0,039246	0,022731
Total	2,445279	1,416268

Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 6 - Impedância de sequência zero de cada segmento do SEP.

Identificação do Segmento	R (Ω)	X(Ω)
1.1	4,362897	1,529847
2.1	4,549237	1,595187
2.2	0,243936	0,085536
2.3	0,105875	0,037125
2.4	0,191422	0,067122
2.5	0,204974	0,071874
2.6	0,157542	0,055242
Total	9,815883	3,441933

Fonte: Elaboração da própria autora.

8.3 DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

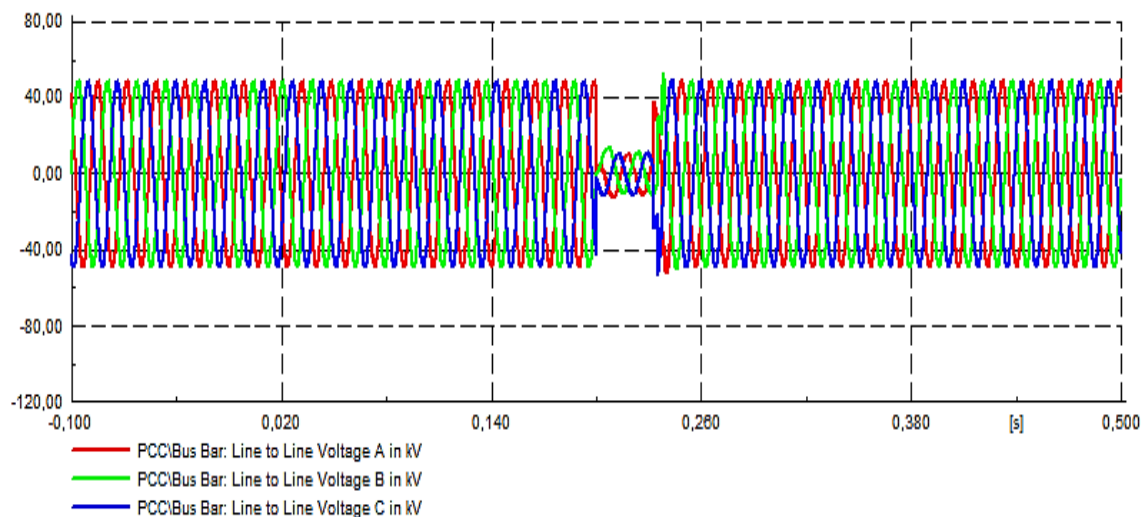
Para desenvolver o método proposto, diversas situações de falta foram simuladas em diferentes alimentadores (AL) dos parques eólicos testados. Simulou-se em ambos os sistemas no *software* DigSilent® faltas, com valores de resistências de falta: 0Ω , 10Ω , 20Ω , 30Ω , 50Ω e 100Ω para curtos-circuitos monofásicos AT, BT e CT, bifásico-terra ABT, BCT e CAT, bifásico AB, BC e CA e para faltas trifásicas adotaram-se valores diferentes de resistências de faltas sendo: 0Ω , 1Ω , 2Ω , 3Ω , 4Ω e 5Ω , pois na prática em geral as faltas trifásicas costumam serem acometidas com menores resistências. O tempo de simulação total para obtenção do sinal de tensão é de 0,1s e as faltas são aplicadas em, aproximadamente, 0,021s e 0,020s para os sistemas teste I e II, respectivamente.

Os sinais de tensão foram amostrados na barra PCC de ambos os sistemas, para cada falta. As frequências de amostragem (f_s) adotadas para a discretização dos sinais foram de 62,5kHz e 62,520kHz para frequências das redes elétricas de 50Hz e 60Hz respectivamente. Para a escolha das frequências de amostragem realizaram-se alguns testes variando f_s entre 5kHz-100kHz e considerou-se para este trabalho as frequências que apresentaram melhores resultados (62,5kHz e 62,520kHz) na detecção e que contém a menor quantidade de amostras por ciclos do sinal, visto que, o tempo de processamento do algoritmo pode ser afetado devido a quantidade de amostras discretizadas a partir do sinal de tempo contínuo.

Utilizou-se uma janela de dados com o comprimento ajustado para conter um ciclo do sinal de tensão. Visto que, os sistemas simulados possuem frequência elétrica diferentes, 50Hz e 60Hz respectivamente, por conseguinte, o comprimento da janela será diferente para cada sistema. A implementação do algoritmo é realizada empregando o *software* MATLAB® 2022.

Como apresentado no capítulo 4, ao ocorrer um distúrbio, o sinal de tensão tende a sofrer alterações quando comparado ao mesmo sinal em condições normais de operação. Por exemplo, na Figura 39, apresenta-se a tensão trifásica instantânea em um intervalo de tempo de 0 a 0,5s, no qual ocorre um curto-circuito trifásico com resistência de falta igual a 0Ω , no instante 0,2s do alimentador 2.3 do sistema da Figura 38.

Figura 39 - Curto-circuito trifásico no instante de tempo 0,2s no AL2.3 amostrado no PCC.

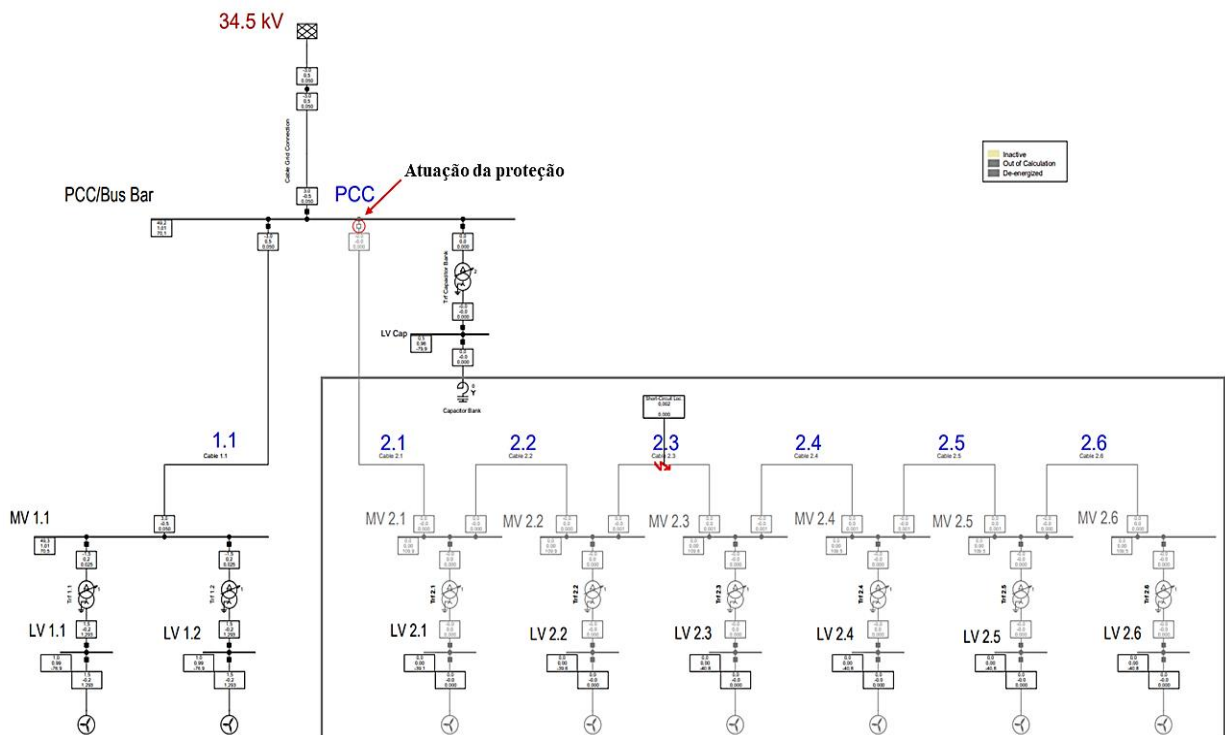


Fonte: Elaboração da própria autora.

Verifica-se que, em aproximadamente 0,03s (o que representa a aproximadamente dois ciclos do sinal) após a falta, há a atuação da proteção localizada no PCC. A proteção atua de modo a isolar a parte do sistema sob curto-circuito para manter energizada a parte em condições normais do parque eólico. Nas Figuras 40 e 41, observa-se à atuação da proteção no PCC

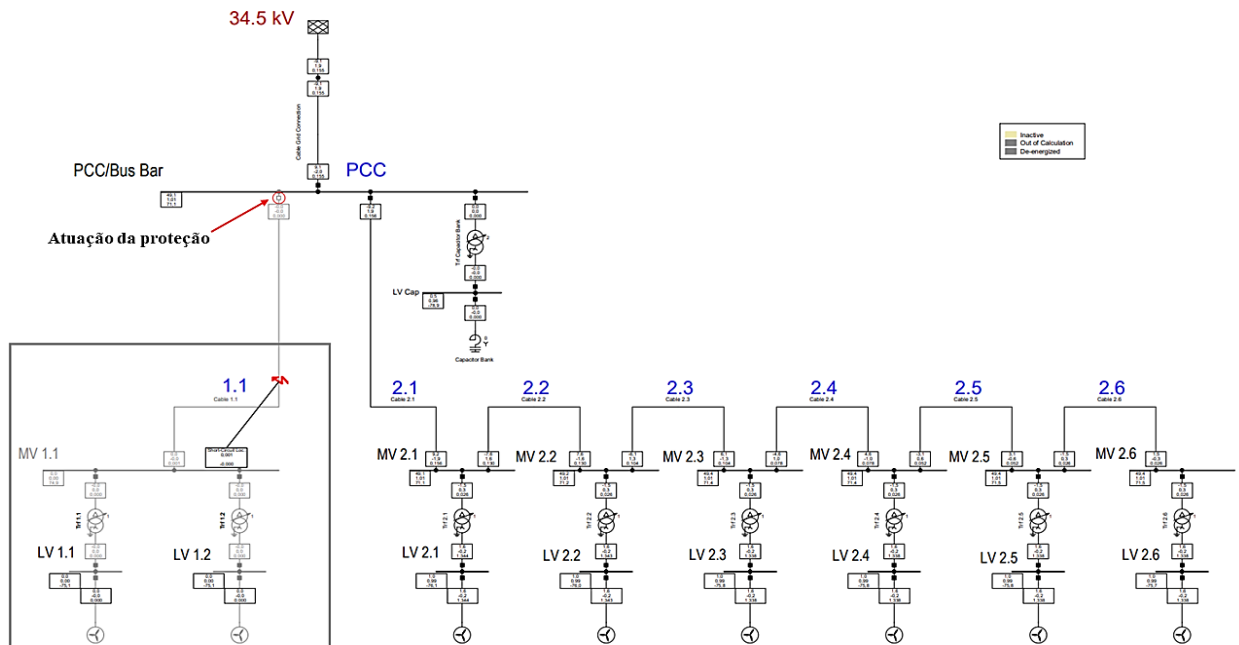
(círculo vermelho) e a parte desenergizada do sistema (em cinza) de acordo com o local da falta. Nota-se que a proteção atua indicando a área geral onde ocorre a falta. Todavia, para resistências de faltas mais elevadas, muitas vezes os relés de sobrecorrente que são normalmente utilizados para a proteção do sistema (Figura 8), não são sensibilizados na ocorrência do curto-circuito. Portanto, evidencia-se a importância de métodos mais sensíveis e que são capazes de auxiliar os sistemas de proteção na detecção da falta.

Figura 40 - Curto-circuito trifásico no AL2.3.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 41 - Curto-circuito trifásico no AL1.1.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na metodologia desenvolvida, o limite de detecção deve ser calibrado de modo que o algoritmo de detecção seja insensível a casos que causem alteração no sinal da tensão, mas que não constituem um curto-circuito. Para calibração do *limit* fez-se uma análise de contingências no sistema da Figura 38, considerando os seguintes casos: desligamento de um alimentador, desligamento de um transformador, saída de geradores, saída de um alimentador e um transformador e saída de geradores e transformadores conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Análise de contingência para calibração do *limit*.

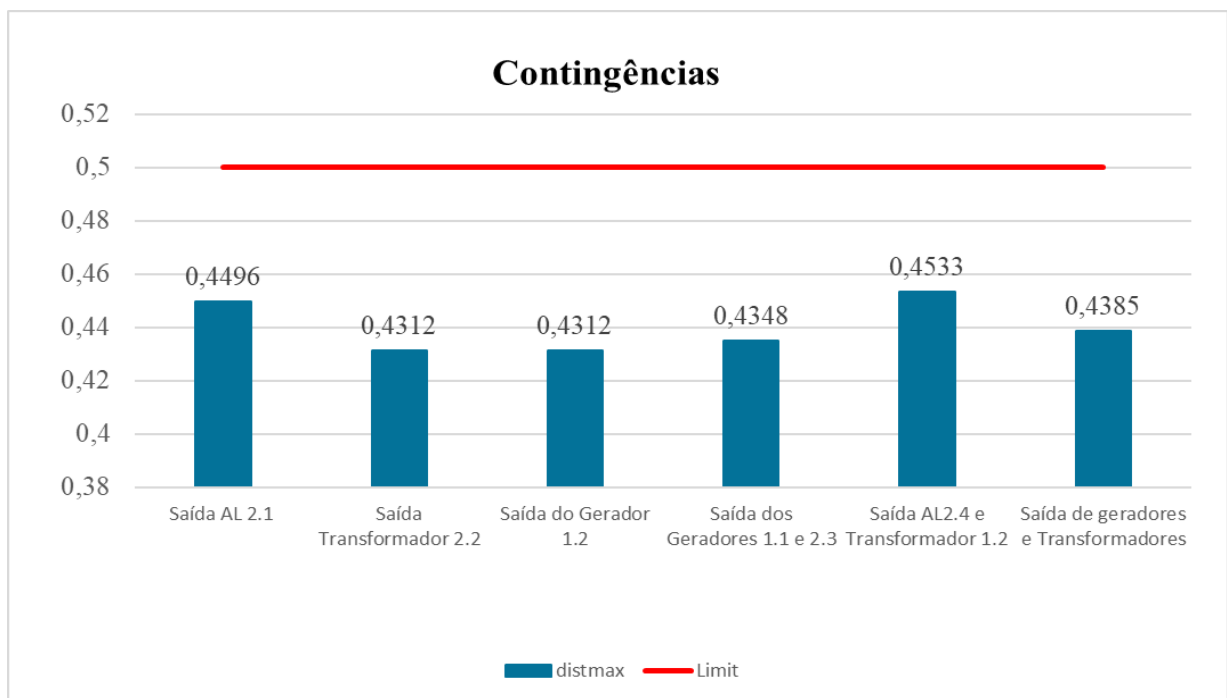
Contingências	<i>distmax</i>
Saída do AL 2.1	0,4496
Saída do transformador 2.2	0,4312
Saída do gerador 1.2	0,4312
Saída dos geradores 1.1 e 2.3	0,4348
Saída do AL2.4 e transformador 1.2	0,4533
Saída de geradores e transformadores	0,4385

Fonte: Elaboração da própria autora.

8.3.1 Resultados do algoritmo de detecção de faltas

Para confirmar a existência de falta no SEP é necessário definir o valor que *limit* deve assumir, permitindo diferenciar entre uma situação de falta e à operação normal do SEP. Após simuladas diversas situações de faltas, pequenos distúrbios (Tabela 7) e condições de operação normais no sistema da Figura 38, o valor de *limit* = 0,5 foi definido como parâmetro para a detecção da falta, ou seja, para valores acima desse limite o algoritmo de detecção identifica a existência de um curto-circuito no sistema. Considerando que o algoritmo de detecção deve ser insensível a casos que não constituem um curto-circuito, embora causem alteração no sinal de tensão, na Figura 42 é possível verificar os valores de *distmax* calculados para as contingências simuladas (Tabela 7), observa-se que não ultrapassam o limite calibrado, ou seja, não ocorre a detecção em situações que não constituem um curto-circuito.

Figura 42 - Distância da detecção das contingências simuladas para calibração do *limit*.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Para o sistema teste I (Figura 37), simularam-se 180 curtos-circuitos em três alimentadores distintos. E para o sistema teste II (Figura 38) foram simulados 240 casos de faltas em quatro alimentadores distintos, sendo 60 faltas em cada alimentador para ambos os sistemas. Portanto, considerando os sistemas testes I e II, 420 casos de faltas foram simulados

para a detecção e classificação da falta. Os resultados serão analisados para as condições de curto-circuito conforme as Tabela 8 e 9, nas quais, apresenta-se o conjunto de dados para os sistemas testes I e II, respectivamente.

Tabela 8 - Conjunto de simulações para o sistema teste I.

Sistema teste I		
Considerações das simulações	Conjunto I	Conjunto II
Tipos de faltas	• AT, BT, CT; • ABT, BCT, CAT; • AB, BC, CA.	• ABC
Resistência de falta	0Ω, 10Ω, 20Ω, 30Ω, 50Ω e 100Ω	0Ω, 1 Ω, 2Ω, 3Ω, 4Ω e 5Ω
Alimentadores	1.2, 2.2 e 2.4	

Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 9 - Conjunto de simulações para o sistema teste II.

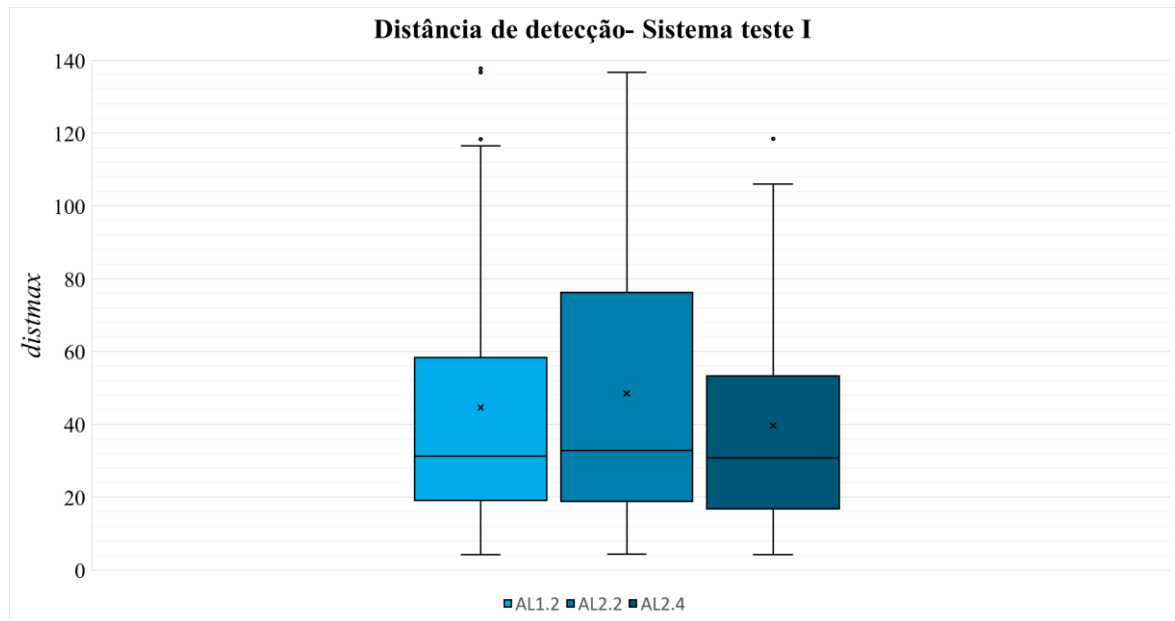
Sistema teste II		
Considerações das simulações	Conjunto I	Conjunto II
Tipos de faltas	• AT, BT, CT; • ABT, BCT, CAT; • AB, BC, CA.	• ABC
Resistência de falta	0Ω, 10Ω, 20Ω, 30Ω, 50Ω e 100Ω	0Ω, 1 Ω, 2Ω, 3Ω, 4Ω e 5Ω
Alimentadores	1.1, 2.2, 2.4 e 2.6	

Fonte: Elaboração da própria autora.

Um curto-circuito resulta em um valor de *distmax* superior ao *limit* (0,5) e em caso de operação normal no SEP ou pequenos distúrbios os valores de *distmax* são inferiores ao *limit* (Figura 42). Para representar os valores de *distmax* calculados nas simulações realizadas, utilizou-se os *boxplots* mostrados nas Figura 43 e 44 para os conjuntos I e II. Este tipo de gráfico permite a representação visual de um conjunto de dados por meio de cinco estatísticas: o valor máximo, representado pela cauda superior; o quartil superior, representado pelo limite superior

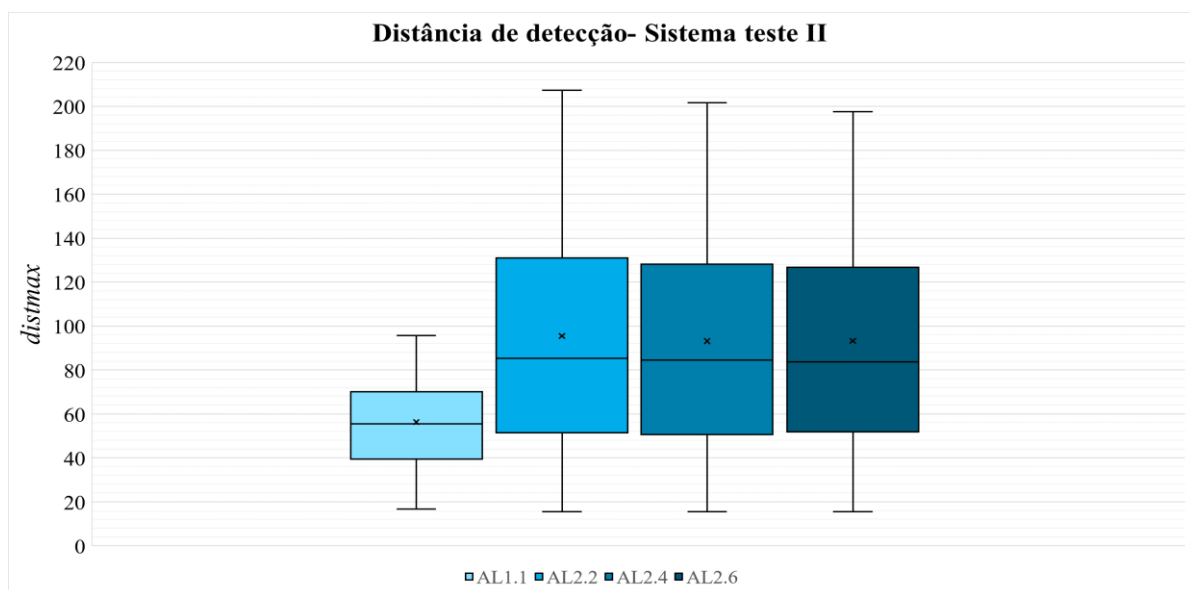
da caixa; a mediana, representada pela linha intermediária da caixa; o quartil inferior, representado pelo limite inferior da caixa; e o valor mínimo, representado pela cauda inferior, também pode-se observar os valores discrepantes (*outliers*) dos dados obtidos através de simulações.

Figura 43 - Distâncias máximas de detecção simuladas no sistema teste I.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 44 - Distâncias máximas de detecção simuladas no sistema teste II.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Portanto, é possível verificar que para todas as faltas simuladas em ambos os sistemas, o valor de *distmax* encontra-se acima do limite estabelecido (*limit*), ou seja, há detecção do curto-circuito em todos os casos. Sendo assim, a precisão do algoritmo de detecção proposto aplicado a alimentadores de parques eólicos apresentou uma taxa de acerto de 100%, independente da resistência de falta e características do sistema. Os resultados podem ser vistos na Tabela 10, o que demonstra um excelente resultado na aplicação da metodologia nesses sistemas. Curtos-circuitos com resistências de falta elevadas, muitas vezes, não são detectados pelo sistema de proteção, entretanto o algoritmo proposto mostrou-se sensível nesses casos.

Tabela 10 - Precisão do algoritmo de detecção.

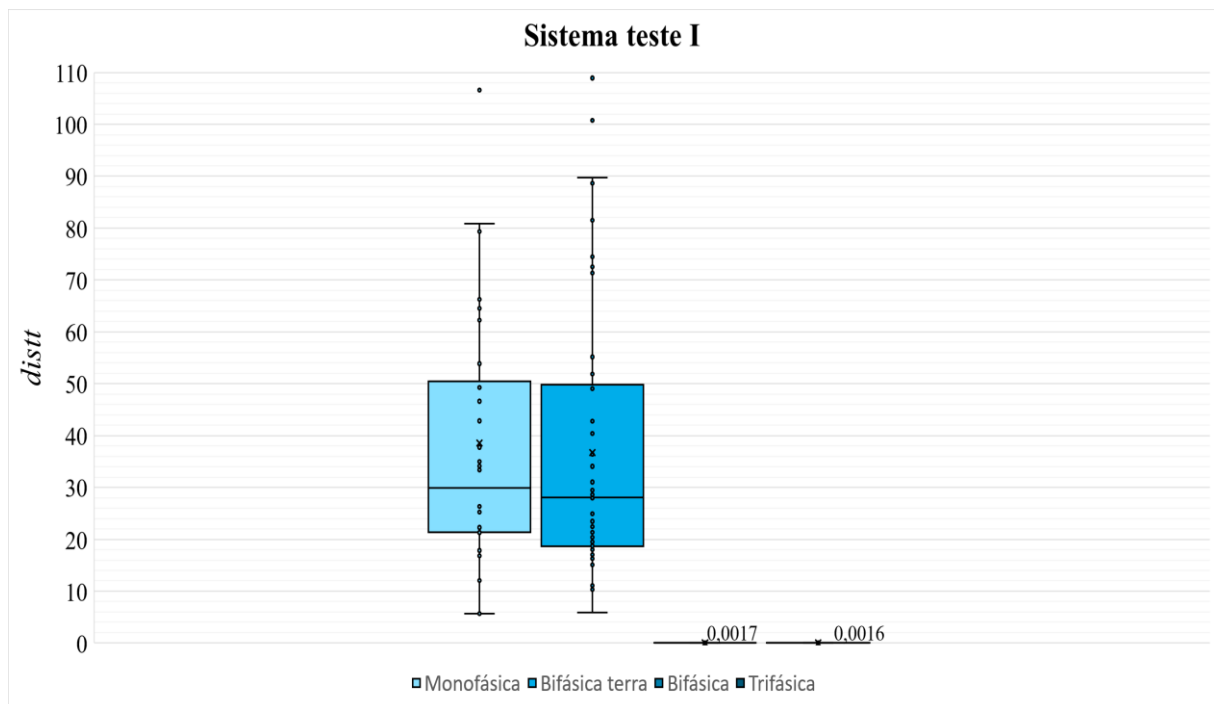
Tipo de Falta	Resistência de falta (Ω)	Total de faltas simuladas	Precisão da detecção
A	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
B	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
C	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
AB	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
BC	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
CA	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
ABT	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
BCT	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
CAT	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
ABC	0	7	100,00%
	1	7	
	2	7	
	3	7	
	4	7	
	5	7	
Total		420	100,00%

Fonte: Elaboração da própria autora.

8.3.2 Resultados do algoritmo de classificação de faltas

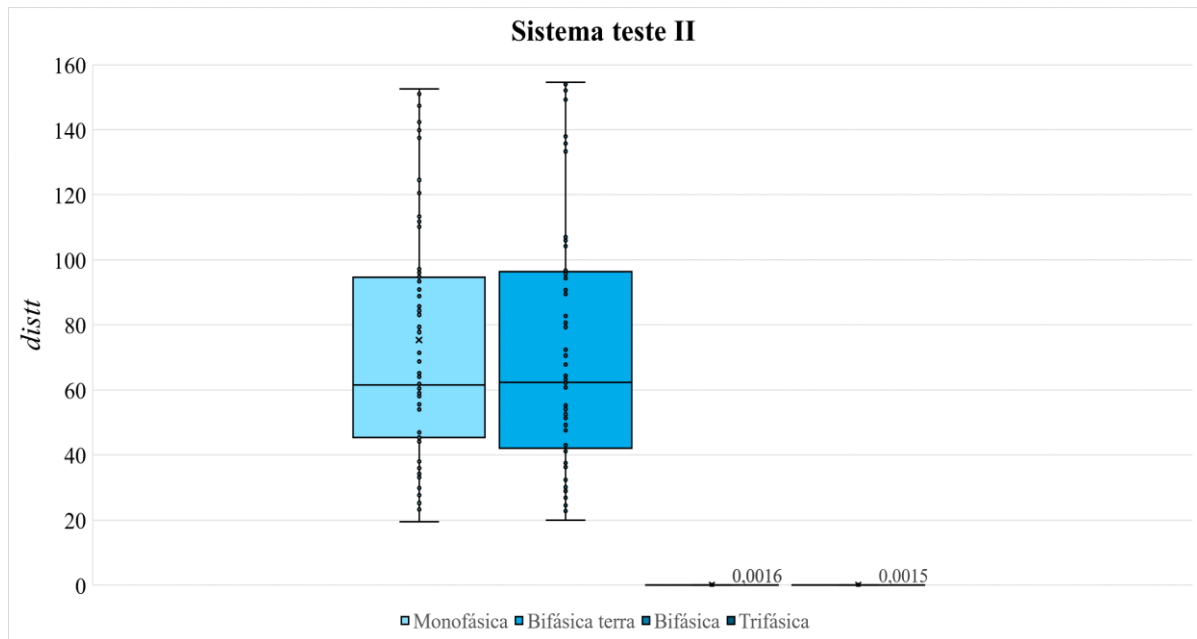
Para a classificação da falta, após o cálculo das distâncias Euclidianas envolvendo todas as fases (*distt*) e a normalização feita nos valores de distância calculados para cada fase, definiu-se $limitT = limit = 0,5$, baseado nas simulações de faltas realizadas, ou seja, este limite irá definir o envolvimento da terra na classificação da falta, caso o $distt > limitT$ a falta está condicionada a duas hipóteses: falta monofásica ou bifásica-terra e caso contrário as hipóteses podem ser falta bifásica ou trifásica. E a partir da *distfmed* definida, classifica-se o tipo de falta entre as hipóteses, conforme o fluxograma da Figura 25. Sendo assim, nas Figuras 45 e 46, apresenta-se dois gráficos contendo os valores de *distt* obtidos nas simulações para ambos os sistemas testes modelados. É possível verificar a diferença de *distt* para o envolvimento da terra no curto-circuito.

Figura 45 - Distância Euclidiana envolvendo todas as fases (*distt*) - Sistema teste I.



Fonte: Elaboração da própria autora.

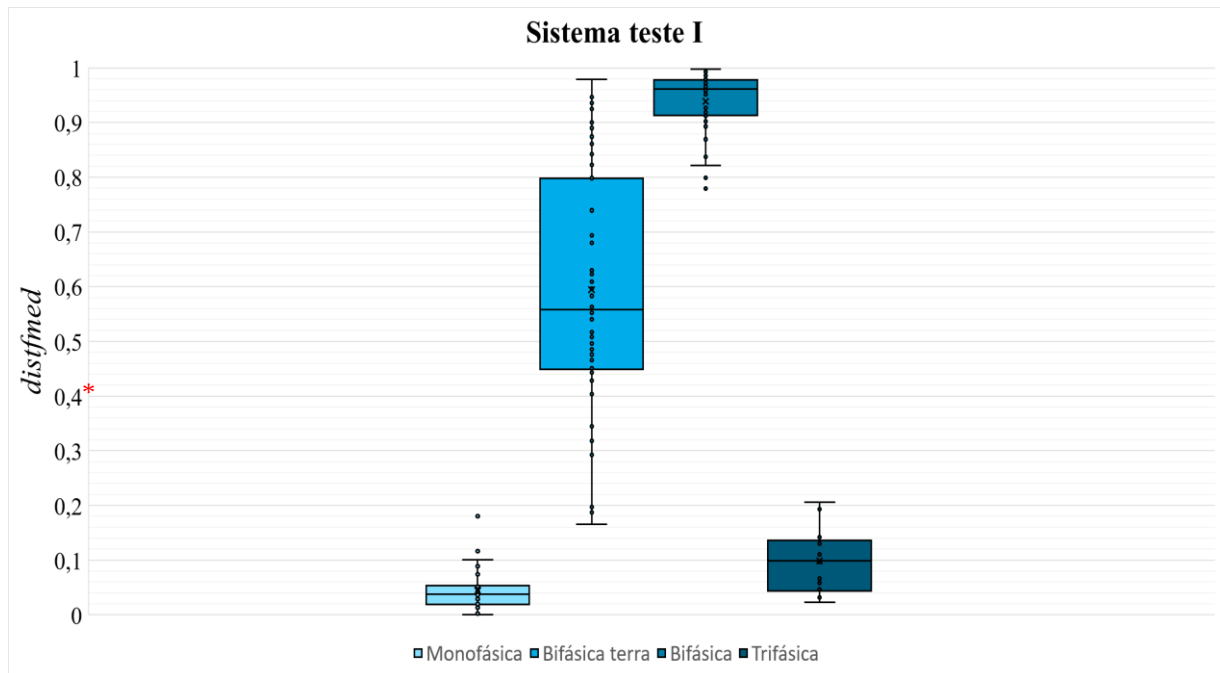
Figura 46 - Distância Euclidiana envolvendo todas as fases (*distt*) - Sistema teste II.



Fonte: Elaboração da própria autora.

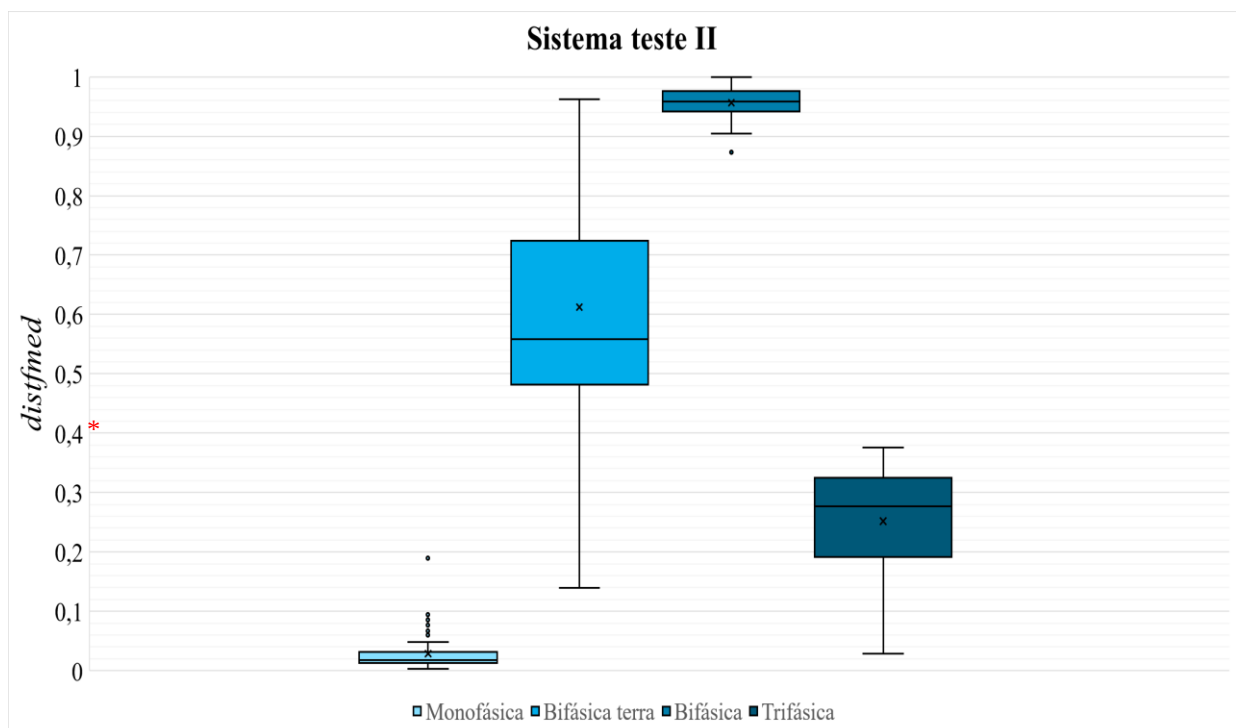
A partir da análise exaustiva de elevada quantidade de casos de simulações de faltas, observou-se que nas faltas monofásicas a distância Euclidiana mediana normalizada (*distfmed*) tende a ser mais próxima de zero, enquanto nas faltas bifásicas-terra ela tende a ser próxima de um e no caso das faltas bifásicas a *distfmed* tende a ser mais próxima de um, enquanto nas faltas trifásicas ela tende a ser próxima de zero. A partir disso, definiram-se os limites para a classificação entre as faltas monofásica e bifásica-terra como sendo $limitmbt=0,4$ e o limite para a classificação entre as faltas bifásica e trifásica, como sendo $limitbt = 0,4$, ou seja, $limitmbt = limitbt$. Desta forma, apresentam-se dois gráficos nas Figuras 47 e 48 com os valores calculados de *distfmed* para os sistemas testes modelados e para todos os valores de resistências de faltas adotadas, o * em vermelho representa os limites $limitmbt = limitbt$. Verifica-se que em ambos os sistemas há erros na classificação para faltas bifásica-terra uma vez que existem valores de *distfmed* abaixo do $limitmbt$, observa-se que nestes casos as faltas estão sendo classificadas como monofásicas.

Figura 47 - Distância Euclidiana mediana normalizada (*distfmed*) - Sistema teste I.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 48 - Distância Euclidiana mediana normalizada (*distfmed*) - Sistema teste II.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na Tabela 11 é possível identificar a precisão do algoritmo de classificação proposto. Dos 420 curtos-circuitos simulados no total, 408 foram classificados corretamente. Portanto, o

algoritmo apresentou uma taxa de acerto de 97,14% considerando todas as faltas simuladas em ambos os sistemas testes, o que demonstra um ótimo resultado na classificação do tipo de curto-circuito ocorridos nos alimentadores dos parques eólicos simulados.

Tabela 11 - Precisão do algoritmo de classificação.

Tipo de Falta	Resistência de falta (Ω)	Total de faltas simuladas	Precisão da classificação
A	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
B	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
C	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
AB	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
BC	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
CA	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	
	50	7	
	100	7	
ABT	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	71,43%
	50	7	
	100	7	
BCT	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	57,14%
	50	7	
	100	7	
CAT	0	7	100,00%
	10	7	
	20	7	
	30	7	71,43%
	50	7	
	100	7	
ABC	0	7	100,00%
	1	7	
	2	7	
	3	7	
	4	7	
	5	7	
Total		420	97,14%

Fonte: Elaboração da própria autora.

Por fim, analisando os resultados obtidos a partir das simulações verifica-se que os erros na classificação se deram para resistências de falta em 50Ω e 100Ω e todos os erros foram para faltas do tipo bifásica-terra. De 180 curtos-circuitos simulados no sistema teste I, 8 faltas foram classificadas de maneira errônea sendo: 4 faltas ABT classificadas como AT; 1 falta BCT classificada como AT; 1 falta CAT classificada como AT; e 2 faltas com erro nas fases faltosas sendo 1 falta BCT classificada como CAT e 1 falta BCT classificada como ABT. E das 240 faltas simuladas no sistema teste II, 4 faltas apresentaram erro na classificação, sendo: 3 faltas ABT classificadas como AT; e 1 falta CAT classificada como AT.

O maior tempo de processamento do algoritmo aplicado para detecção e classificação considerando a janela de dados adotada, foi de aproximadamente 0,055s.

8.4 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

O método de localização de faltas proposto apresentado no Capítulo 7 utiliza as medições de pré-falta nos primeiros ciclos da falta, medidas no barramento de média tensão (PCC). Considerando que os sinais aquisitados estão no domínio do tempo e a localização de faltas baseia-se na análise fasorial, é necessário realizar o processamento dos sinais. Sendo assim, nesta dissertação, conforme apresentado no capítulo 5, utiliza-se um filtro de *Butterworth* de terceira ordem para filtragem dos sinais e a transformada de Fourier de ciclo completo para a extração dos componentes fundamentais dos sinais de tensão e de corrente. A aplicação da metodologia é feita através de simulações de faltas em diversos pontos de um sistema teste, executados no *software* DigSilent®. As rotinas computacionais que compõe a metodologia proposta foram desenvolvidas no Matlab (MATLAB, 2022).

Para avaliação da metodologia considera-se apenas o Sistema teste I apresentado na Figura 37. As faltas foram aplicadas nos alimentadores 1.2, 2.2 e 2.4 em 20%, 50% e 80% do comprimento de cada um. O erro obtido pelos algoritmos é expresso em função do comprimento total da linha, dado pela equação (68). Do ponto de vista prático, a apresentação do erro em quilômetros facilita o atendimento para a equipe de manutenção (SILVEIRA, 2007).

$$erro (\%) = \left| \frac{d_{real} - d_{estimada}}{l} \right| \cdot 100, \quad (68)$$

Sendo d_{real} , $d_{estimada}$ e l , a distância real, a distância estimada e o comprimento total do alimentador, respectivamente.

Uma vez que a etapa de localização da falta utiliza os resultados obtidos nas etapas de detecção e classificação implementadas nessa pesquisa, optou-se por considerar nos testes as resistências indicadas na Tabela 12, visto que, os erros encontrados na etapa de classificação se deram para resistências de falta em 50Ω e 100Ω . A ideia é verificar a eficiência da etapa de localização de faltas considerando que as etapas anteriores foram bem sucedidas, uma vez que interfere diretamente no método. Portanto este trabalho tem por objetivo localizar faltas a priori considerando resistências de falta em até 40Ω .

Tabela 12 - Conjunto de simulações para a etapa de localização de faltas.

Sistema teste I		
Considerações das simulações	Conjunto I	Conjunto II
Tipos de faltas	• AT, BT, CT; • ABT, BCT, CAT; • AB, BC, CA.	• ABC
Resistência de falta	0Ω , 10Ω , 20Ω e 40Ω	0Ω , 2Ω , 4Ω , e 5Ω
Distância da falta	20%, 50% e 80%	
Alimentadores	1.2, 2.2 e 2.4	

Fonte: Elaboração da própria autora.

Nas Tabela 13 e 14, observam-se os resultados das distâncias estimadas na LDF para as simulações referentes aos conjuntos I e II, respectivamente. A partir dos resultados calcula-se o erro percentual de acordo com a equação (68), considerando a distância da falta em relação ao terminal de medição (distância exata). Sendo assim, analisa-se a influência da resistência de falta, tipo de falta e distância da falta em relação ao terminal local.

Tabela 13 - Distâncias estimadas na LDF referente ao conjunto I.

Conjunto I																	
AL 1.2						AL 2.2						AL 2.4					
Faltas	Rf = 0Q																
	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)
	20,00%		50,00%		80,00%		20,00%		50,00%		80,00%		20,00%		50,00%		80,00%
AT	2,16	2,15985	2,4	2,3995	2,64	2,64341	3,22	3,22099	3,55	3,54738	3,88	3,87729	5,5	5,50214	5,95	5,95295	6,4
BT	2,16	2,1541	2,4	2,39529	2,64	2,63271	3,22	3,22232	3,55	3,54553	3,88	3,87461	5,5	5,48713	5,95	5,93963	6,4
CT	2,16	2,15425	2,4	2,4021	2,64	2,64437	3,22	3,23607	3,55	3,56238	3,88	3,89576	5,5	5,49533	5,95	5,93655	6,4
AB	2,16	2,1627	2,4	2,40314	2,64	2,64226	3,22	3,21688	3,55	3,54439	3,88	3,87679	5,5	5,49993	5,95	5,94543	6,4
BC	2,16	2,15788	2,4	2,39589	2,64	2,64366	3,22	3,22287	3,55	3,55426	3,88	3,88275	5,5	5,50066	5,95	5,94686	6,4
CA	2,16	2,17014	2,4	2,38819	2,64	2,66004	3,22	3,22557	3,55	3,55647	3,88	3,88805	5,5	5,46809	5,95	5,90164	6,4
ABT	2,16	2,15718	2,4	2,39686	2,64	2,63556	3,22	3,21841	3,55	3,55289	3,88	3,88868	5,5	5,50415	5,95	5,95128	6,4
BCT	2,16	2,1561	2,4	2,40362	2,64	2,64048	3,22	3,22114	3,55	3,55202	3,88	3,88892	5,5	5,49771	5,95	5,95852	6,4
CAT	2,16	2,16017	2,4	2,39926	2,64	2,63746	3,22	3,21613	3,55	3,55156	3,88	3,88575	5,5	5,4986	5,95	5,95535	6,4
Faltas	Rf = 10Q																
	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)
	20,00%		50,00%		80,00%		20,00%		50,00%		80,00%		20,00%		50,00%		80,00%
AT	2,16	2,18292	2,4	2,3621	2,64	2,6829	3,22	3,26357	3,55	3,60562	3,88	3,81641	5,5	5,61197	5,95	6,06011	6,4
BT	2,16	2,12928	2,4	2,36388	2,64	2,61031	3,22	3,2504	3,55	3,64757	3,88	3,85416	5,5	5,57802	5,95	5,83607	6,4
CT	2,16	2,15744	2,4	2,21679	2,64	2,67958	3,22	3,31198	3,55	3,74296	3,88	3,96228	5,5	5,44939	5,95	6,07559	6,4
AB	2,16	2,19913	2,4	2,40906	2,64	2,6856	3,22	3,29238	3,55	3,51948	3,88	3,93885	5,5	5,43147	5,95	5,84745	6,4
BC	2,16	2,20576	2,4	2,42355	2,64	2,59705	3,22	3,19808	3,55	3,59704	3,88	3,80832	5,5	5,51357	5,95	6,08021	6,4
CA	2,16	2,09709	2,4	2,32131	2,64	2,56014	3,22	3,1201	3,55	3,54515	3,88	3,91571	5,5	5,35845	5,95	5,77727	6,4
ABT	2,16	2,12522	2,4	2,35387	2,64	2,58007	3,22	3,26147	3,55	3,59947	3,88	3,95214	5,5	5,59023	5,95	5,85641	6,4
BCT	2,16	2,15647	2,4	2,25681	2,64	2,65978	3,22	3,33777	3,55	3,70698	3,88	3,96228	5,5	5,46932	5,95	6,07009	6,4
CAT	2,16	2,12522	2,4	2,35387	2,64	2,58007	3,22	3,1201	3,55	3,54515	3,88	3,91571	5,5	5,35845	5,95	5,77727	6,4
Faltas	Rf = 20Q																
	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)
	20,00%		50,00%		80,00%		20,00%		50,00%		80,00%		20,00%		50,00%		80,00%
AT	2,16	2,23595	2,4	2,50153	2,64	2,75201	3,22	2,93475	3,55	3,74977	3,88	4,10562	5,5	5,89245	5,95	6,39458	6,4
BT	2,16	2,26365	2,4	2,54319	2,64	2,79971	3,22	2,99432	3,55	3,6127	3,88	3,9929	5,5	5,2889	5,95	5,7208	6,4
CT	2,16	2,25974	2,4	2,51178	2,64	2,7647	3,22	3,07166	3,55	3,37851	3,88	3,68145	5,5	5,26784	5,95	5,66862	6,4
AB	2,16	2,0925	2,4	2,31691	2,64	2,73879	3,22	3,29754	3,55	3,63245	3,88	3,73489	5,5	5,29881	5,95	6,14263	6,4
BC	2,16	2,21942	2,4	2,47812	2,64	2,73784	3,22	3,33452	3,55	3,68478	3,88	3,741	5,5	5,5714	5,95	6,11789	6,4
CA	2,16	2,25631	2,4	2,49541	2,64	2,75463	3,22	3,36312	3,55	3,69389	3,88	3,69301	5,5	5,2995	5,95	6,16926	6,4
ABT	2,16	2,27358	2,4	2,53187	2,64	2,78933	3,22	2,99932	3,55	3,63274	3,88	3,99033	5,5	5,29476	5,95	5,74128	6,4
BCT	2,16	2,25997	2,4	2,51083	2,64	2,76531	3,22	3,09258	3,55	3,39877	3,88	3,6815	5,5	5,27843	5,95	5,62231	6,4
CAT	2,16	2,27358	2,4	2,53187	2,64	2,78933	3,22	3,36312	3,55	3,69389	3,88	3,69301	5,5	5,2995	5,95	6,16926	6,4
Faltas	Rf = 40Q																
	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)
	20,00%		50,00%		80,00%		20,00%		50,00%		80,00%		20,00%		50,00%		80,00%
AT	2,16	2,30299	2,4	2,56904	2,64	2,81701	3,22	3,48912	3,55	3,89237	3,88	3,60008	5,5	5,0664	5,95	6,50145	6,4
BT	2,16	2,31004	2,4	2,5529	2,64	2,80437	3,22	3,56874	3,55	3,94792	3,88	4,32003	5,5	5,00921	5,95	5,41059	6,4
CT	2,16	2,34125	2,4	2,61123	2,64	2,88667	3,22	3,47482	3,55	3,83962	3,88	3,60478	5,5	4,98515	5,95	5,37959	6,4
AB	2,16	2,24357	2,4	2,32291	2,64	2,70209	3,22	3,30265	3,55	3,65679	3,88	3,74001	5,5	5,37542	5,95	5,59617	6,4
BC	2,16	2,29195	2,4	2,49169	2,64	2,74722	3,22	3,4055	3,55	3,66	3,88	3,7372	5,5	5,48286	5,95	6,18307	6,4
CA	2,16	2,29396	2,4	2,52193	2,64	2,51463	3,22	3,39135	3,55	3,75478	3,88	3,67001	5,5	5,22478	5,95	5,5996	6,4
ABT	2,16	2,30009	2,4	2,55395	2,64	2,80841	3,22	3,56874	3,55	3,85797	3,88	4,2005	5,5	5,10998	5,95	5,49051	6,4
BCT	2,16	2,33014	2,4	2,60525	2,64	2,81245	3,22	3,41484	3,55	3,82943	3,88	3,63167	5,5	5,12014	5,95	5,47706	6,4
CAT	2,16	2,30009	2,4	2,55395	2,64	2,80841	3,22	3,39135	3,55	3,75478	3,88	3,67001	5,5	5,22478	5,95	5,596	6,4

Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 14 - Distâncias estimadas na LDF referente ao conjunto II.

Conjunto II																		
AL 1.2						AL 2.2						AL 2.4						
Rf = 0Ω																		
Falta	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)
	20%		50%		80%		20%		50%		80%		20%		50%		80%	
	2,16	2,14663	2,4	2,37705	2,64	2,60989	3,22	3,19967	3,55	3,50423	3,88	3,82711	5,5	5,43948	5,95	5,84528	6,4	6,2826
Rf = 2Ω																		
Falta	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)
	20%		50%		80%		20%		50%		80%		20%		50%		80%	
	2,16	2,19913	2,4	2,40906	2,64	2,6856	3,22	3,13833	3,55	3,44758	3,88	3,78101	5,5	5,29814	5,95	5,75358	6,4	6,21765
Rf = 4Ω																		
Falta	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)
	20%		50%		80%		20%		50%		80%		20%		50%		80%	
	2,16	2,12199	2,4	2,36663	2,64	2,47314	3,22	3,30176	3,55	3,68565	3,88	3,8101	5,5	5,26393	5,95	5,66726	6,4	6,74101
Rf = 5Ω																		
Falta	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)	Distância exata (Km)	Distância estimada (Km)
	20%		50%		80%		20%		50%		80%		20%		50%		80%	
	2,16	2,14668	2,4	2,37914	2,64	2,41411	3,22	3,29418	3,55	3,6854	3,88	3,93214	5,5	5,80809	5,95	5,64349	6,4	6,69745

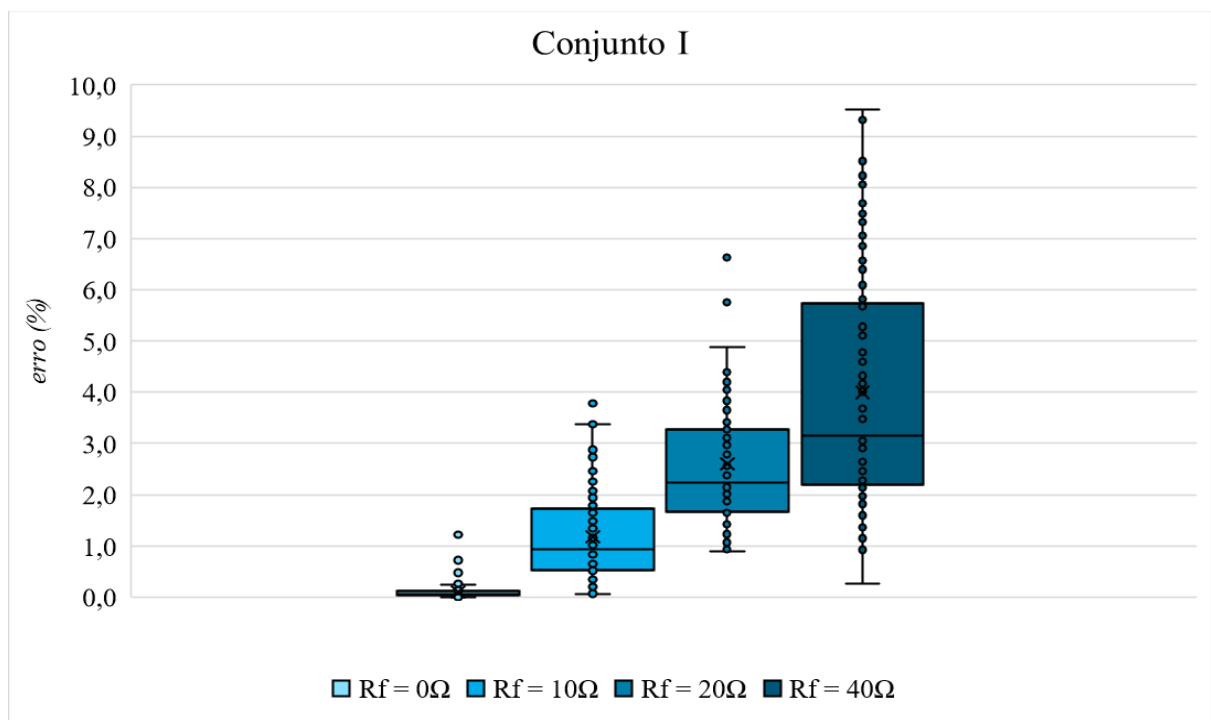
Fonte: Elaboração da própria autora.

8.4.1 Influência da resistência de falta

A precisão dos localizadores de faltas podem ser influenciadas, de uma forma geral, por diversos fatores. Algumas fontes de erros são de difícil intervenção como as geradas por transformadores de instrumentos e pelo processo de aquisição de dados. Outras podem ser minimizadas na formulação de algoritmos (SILVEIRA, 2007).

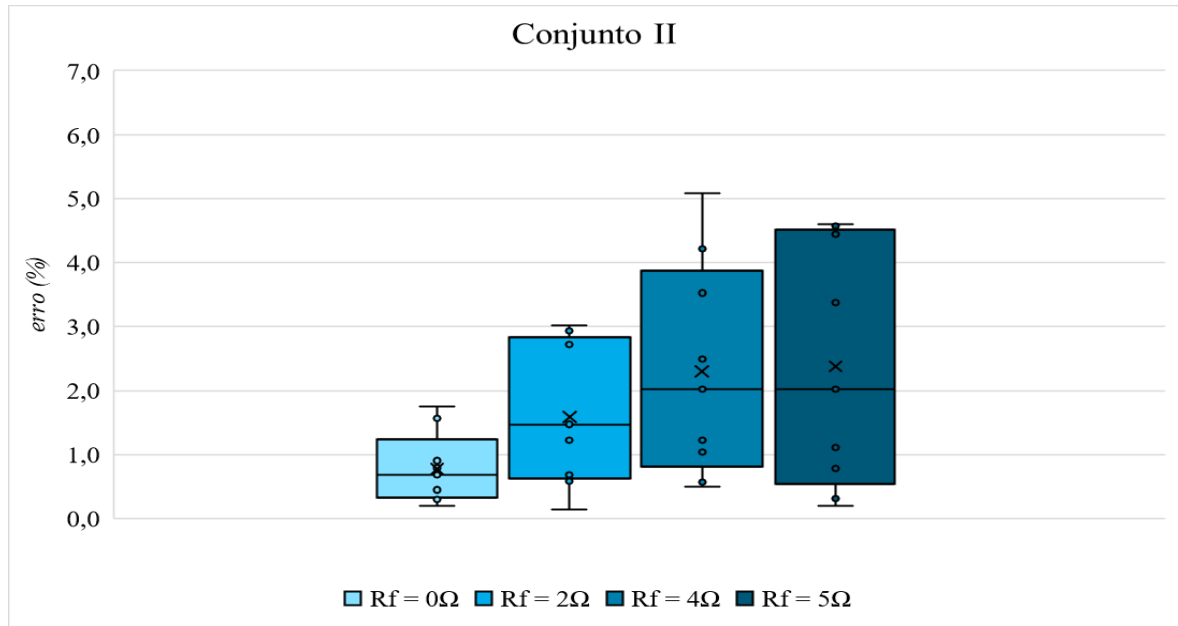
A análise das Tabelas 13 e 14 permitem verificar a tendência da elevação do erro percentual, que é calculado empregando a equação (68), com o aumento da resistência de falta, independentemente do tipo de falta associado e distância da falta em relação ao terminal local. Tais aumentos podem ser visualizados nas Figura 49 e 50, nas quais apresentam-se graficamente os erros percentuais obtidos para faltas referentes aos conjuntos I e II, respectivamente, em função da resistência de falta (R_f).

Figura 49 - Erros percentuais em função da R_f para o algoritmo de LDF – Conjunto I.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 50 - Erros percentuais em função da R_f para o algoritmo de LDF – Conjunto II.

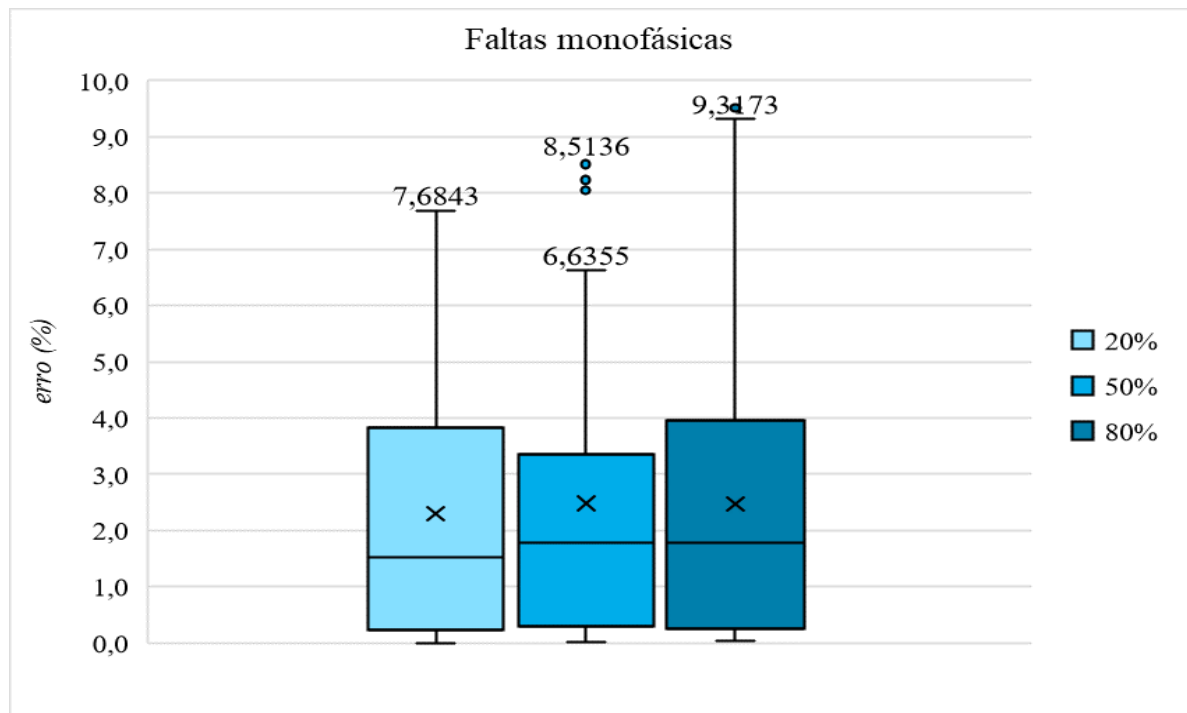


Fonte: Elaboração da própria autora.

8.4.2 Influência do tipo de falta

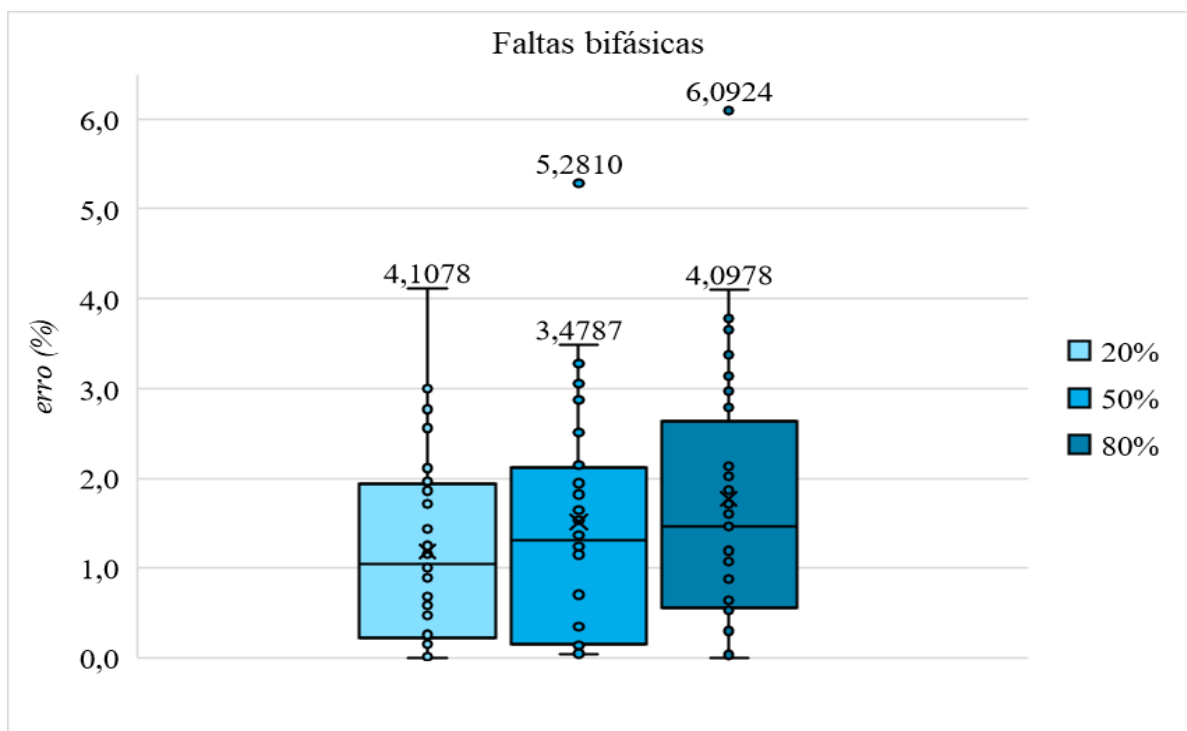
A influência do tipo de falta também pode ser analisada com base nos resultados apresentados nas Tabelas 13 e 14, para os conjuntos de simulações I e II, respectivamente. Inicialmente, analisando as faltas do tipo monofásica para as três fases (AT, BT e CT), é possível observar que para o tipo de falta em questão, a fase exerce pouca influência nos resultados. Sendo assim, explorando os resultados obtidos, verifica-se graficamente através das Figuras 51 a 54 que o tipo de falta exerce uma pequena influência sobre os resultados, independentemente da condição analisada. Neste caso, os erros percentuais médio e máximo estimados para as faltas que não têm envolvimento da terra são menores em relação às estimativas obtidas para as faltas do tipo fase-terra por exemplo. O erro percentual máximo na LDF foi de aproximadamente 9,32% sendo para uma falta fase-terra.

Figura 51 - Erros percentuais em função do tipo de falta para o algoritmo de LDF – faltas monofásicas.



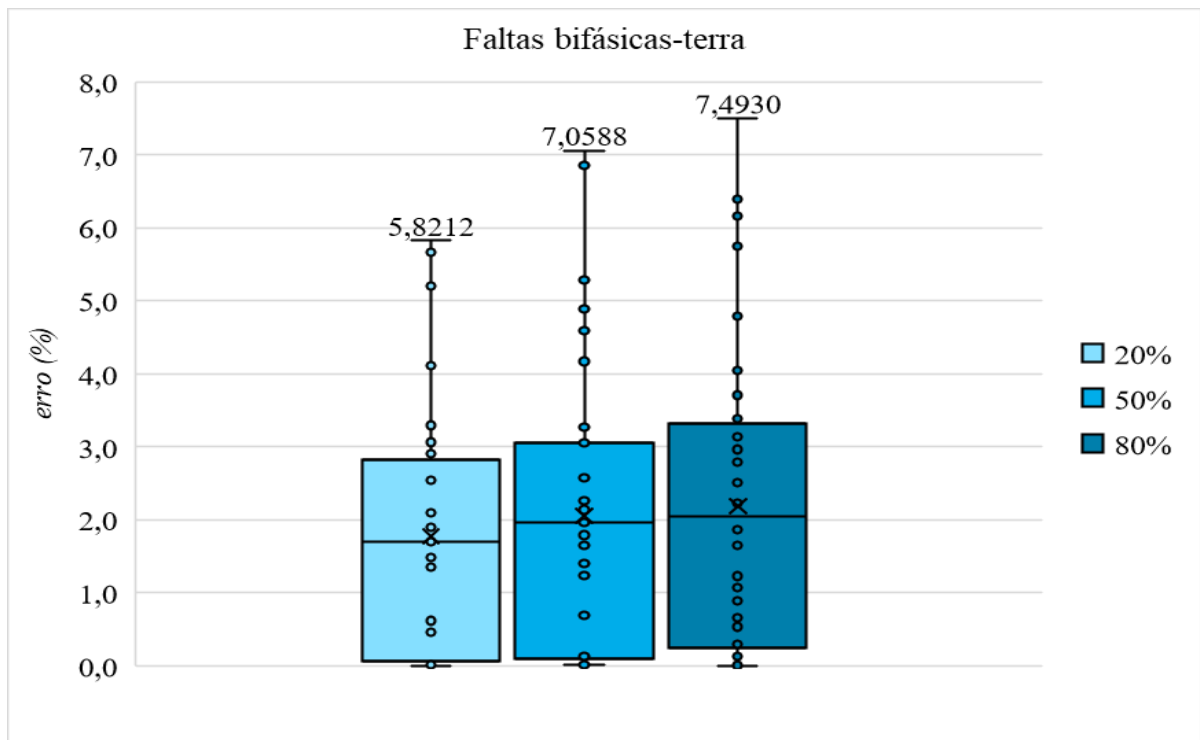
Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 52 - Erros percentuais em função do tipo de falta para o algoritmo de LDF – Faltas bifásicas.



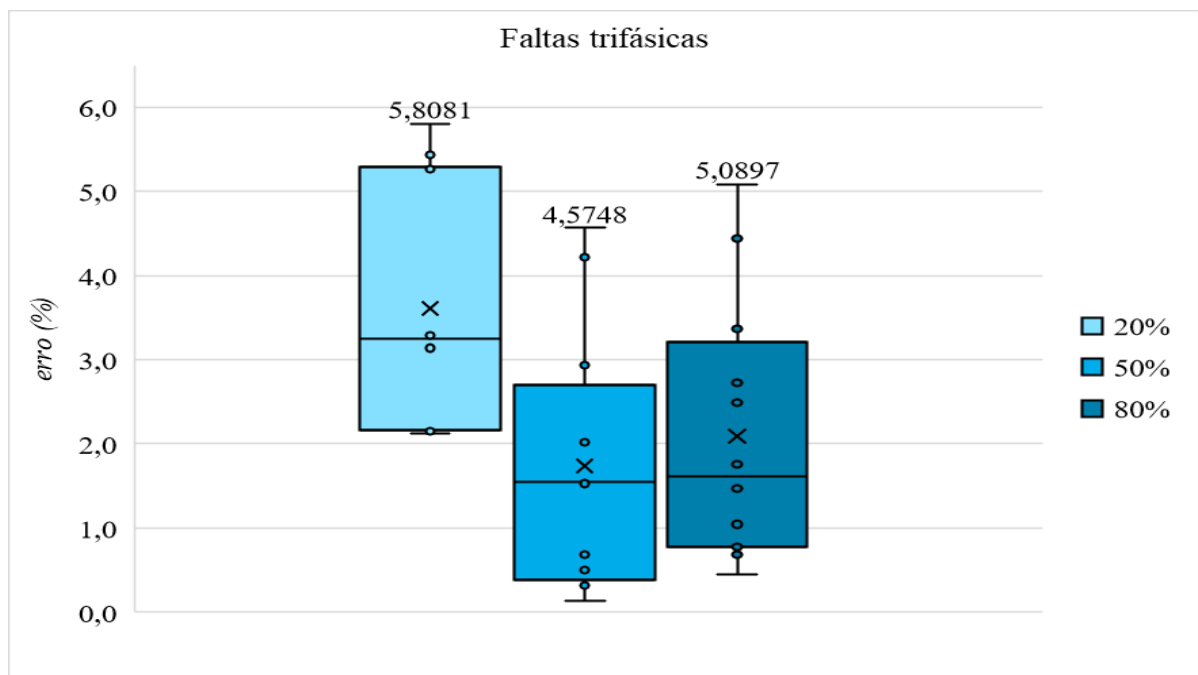
Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 53 - Erros percentuais em função do tipo de falta para o algoritmo de LDF – Falhas bifásicas-terra.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 54 - Erros percentuais em função do tipo de falta para o algoritmo de LDF – Falhas trifásicas.

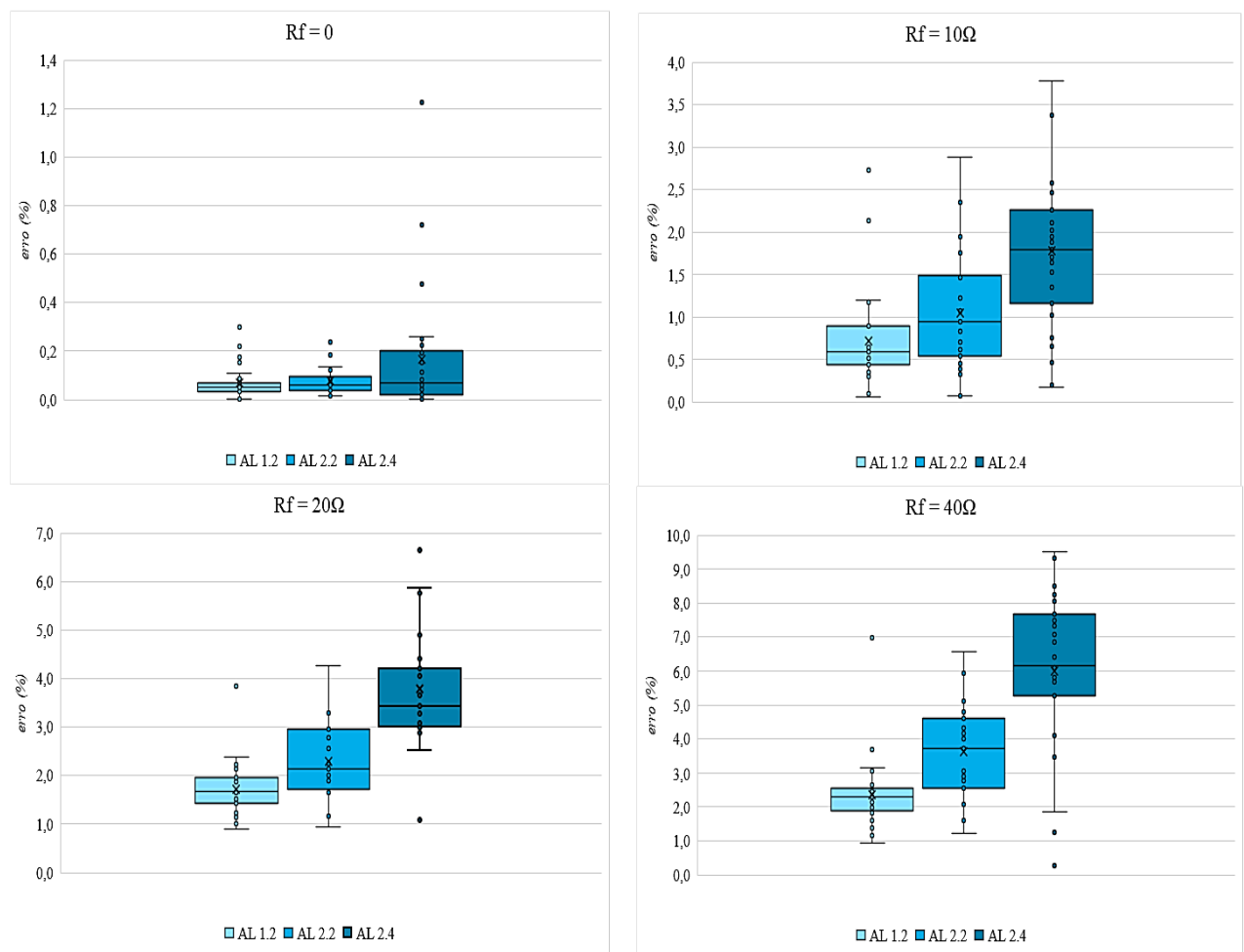


Fonte: Elaboração da própria autora.

8.4.3 Influência da distância da falta em relação ao terminal de medição

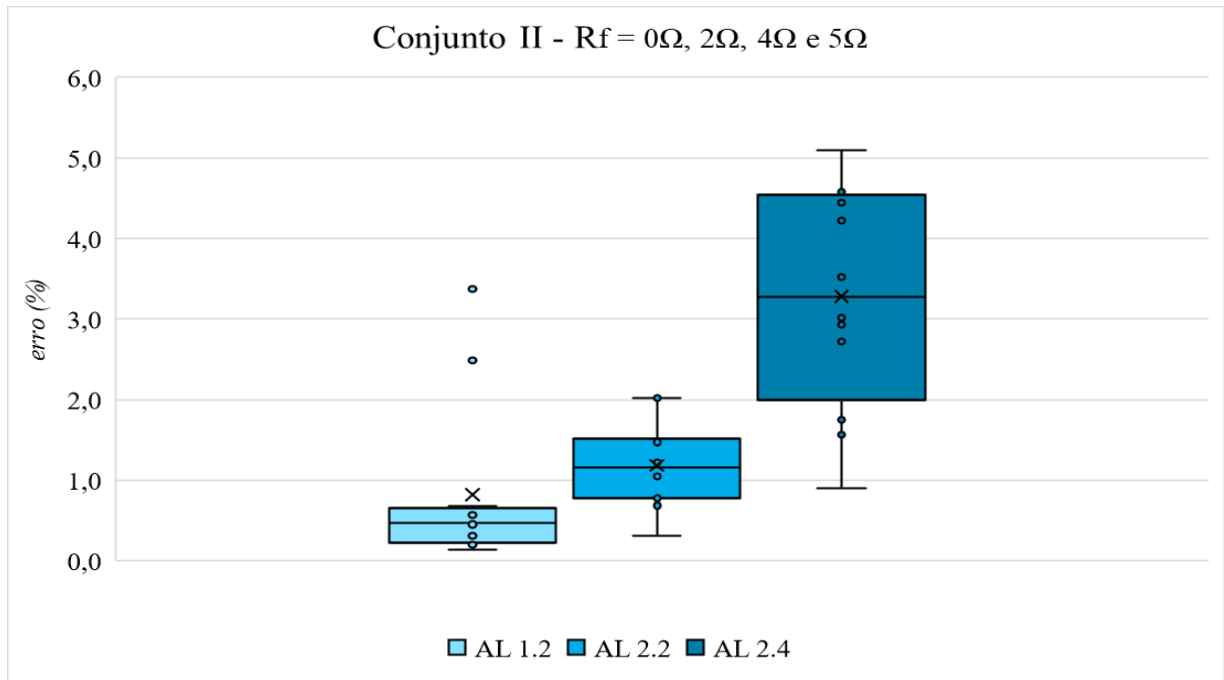
Por utilizar apenas dados de um terminal, à medida que a falta se aproxima do terminal remoto, os erros tendem a aumentarem. Portanto, analisando os valores de erros percentuais apresentados nas Tabelas 13 e 14, para os diferentes conjuntos de simulações, pode-se verificar a tendência destes em elevar-se com o aumento da distância da falta, independentemente do tipo de falta associado. Tal tendência pode ser visualizada nas Figuras 55 e 56, considerando os erros percentuais obtidos para faltas em função da distância da falta dos conjuntos I e II, respectivamente. Nota-se que a influência da distância da falta neste caso é bem considerável principalmente para resistência de faltas acima de 10Ω . Também é possível observar que para faltas francas a influência da distância da falta em relação ao terminal local é mínima.

Figura 55 - Erros percentuais em função da distância da falta em relação ao terminal local – Conjunto I.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 56 - Erros percentuais em função do da distância da falta em relação ao terminal local
– Conjunto II.



8.4.4 Considerações finais

A partir dos erros percentuais resultantes do método proposto é possível realizar a avaliação do seu desempenho. Nos resultados apresentados na seção 8.4.1, é verificada a tendência de aumento do erro devido ao aumento da resistência de falta.

A influência do tipo de falta também pode ser verificada na seção 8.4.2, uma vez que há uma elevação no erro percentual principalmente para faltas monofásicas. Na seção 8.4.3, em todos os casos, a tendência é de aumento do erro percentual com o aumento da distância da falta, apresentando-se mais uniforme para faltas francas, e mais acentuadas para faltas com resistências maiores que 10Ω . Também é possível observar que os erros percentuais médios e máximos são maiores para faltas com resistência de 40Ω e com maiores distâncias da falta em relação ao terminal local, o que era de se esperar, uma vez que, esses parâmetros influenciam diretamente a localização da falta.

Em termos de tempo de processamento do algoritmo proposto o método de LDF por se tratar de um método iterativo resulta em um maior tempo de processamento, o método apresentou uma média de 18 iterações para convergência. E para o diagnóstico completo da

falta (detecção, classificação e localização) apresentou-se um tempo máximo de processamento em aproximadamente 0,56s.

Vale ressaltar que é desconsiderada a capacitância shunt do alimentador, fato que contribui para melhora dos resultados apresentados. Entretanto, deve-se salientar que foram utilizados apenas dados de tensão e corrente de um terminal, o que aumenta a tendência de erros, uma vez que os dados referentes ao terminal remoto precisaram ser estimados. Contudo, com os valores de erros percentuais médios é possível estimar em um caso real a localização aproximada da falta, podendo na prática ser utilizado pelas equipes de manutenção para auxiliar no processo de restabelecimento rápido do sistema.

9 CONCLUSÃO

A detecção, classificação e localização de faltas em redes internas de parques eólicos é uma tarefa de extrema relevância, que contribui para o bom desempenho e aumento da confiabilidade do sistema, trazendo maior eficiência e agilidade no diagnóstico de faltas e consequentemente no restabelecimento do fornecimento da energia elétrica.

Essa pesquisa propôs dois algoritmos robustos, capazes de juntos fornecerem um completo diagnóstico de falta em redes coletoras de parques eólicos. Visto isso, para avaliar os métodos inúmeros casos de faltas foram simulados ao longo de alguns alimentadores de dois parques eólicos (sistemas teste I e II), considerando diversas condições de faltas e operativas do SEP. Para a detecção do curto-circuito resultou-se em um método insensível a casos que alteram o sinal da tensão, mas não constituem um curto-circuito, tornando a detecção exclusivamente para casos que constituem uma falta com 100% de precisão, sendo assim, foram testados e avaliados 420 tipos de curtos-circuitos, com diferentes resistências de faltas de até 100Ω .

Após a detecção o algoritmo foi capaz de classificar o tipo de falta, identificando inclusive as fases faltosas em cada caso com 97,14% de precisão. Vale ressaltar que mesmo com resistências de faltas acima de 40Ω o método apresentou taxa de acerto em 100%, o que demonstrou excelentes resultados, uma vez que, o algoritmo não exige técnicas de processamentos de sinais, como; Transformada *Wavelet*, análise de multirresolução, entre outros, tornando-o mais simples de ser implementado e de menor exigência computacional.

Para a LDF implementou-se um algoritmo para sua validação simularam-se casos de faltas ao longo de 20%, 50% e 80% do comprimento de três alimentadores de um circuito de um parque eólico (Sistema teste I), no total 360 faltas foram consideradas para a obtenção dos resultados. Calculou-se o erro percentual da distância estimada da falta com relação à distância exata e o comprimento total do alimentador, com isso analisaram-se os resultados frente aos parâmetros que podem influenciar a LDF. A partir disso, obteve-se que, independentemente do tipo de falta, a resistência de falta tem influência nos resultados, visto que, os erros percentuais calculados foram mais uniformes para faltas francas, e mais proeminentes para faltas com resistências maiores que 10Ω . Além disso, o algoritmo de LDF mostrou-se sensível a distância da falta em relação ao terminal de medição, no qual, apresentou o maior erro percentual médio em 6,1615% e erro percentual máximo em 9,3173% ambos para $R_f = 40\Omega$ e alimentador 2.4.

No que se refere ao esforço computacional exigido em razão dos métodos propostos para o diagnóstico completo da falta (detecção, classificação e localização) apresentou-se um

tempo máximo de processamento em aproximadamente 0,56s, sendo o método de LDF o maior responsável por esse tempo, visto que, trata-se de um método iterativo e sua implementação exige um adequado processamento dos sinais empregados. Entretanto, em termos de tempo de processamento obteve-se um bom resultado ao considerar ambos algoritmos.

De modo geral, o método proposto apresentou ótimos resultados na detecção e classificação de curtos-circuitos em alimentadores de parques eólicos ressaltando-se o reduzido tempo de processamento devido ao reduzido esforço computacional necessário para obtenção dos resultados. E para a localização da falta o método apresentou bons resultados, passíveis de serem melhorados. A partir desses resultados verifica-se que a resistência de falta afeta de forma efetiva os resultados obtidos para o algoritmo de LDF. Isto se deve ao fato de imprecisões inerentes ao processo de estimação da corrente contribuída pelo terminal remoto, o que influencia diretamente o cálculo da corrente de falta empregada nas equações de LDF. Essas incertezas são consequências de suposições adotadas para a estimação do sistema equivalente conectado ao terminal remoto.

9.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando a grande relevância e abrangência deste tema, fazem-se necessários muitos trabalhos para que se satisfaça todas as contribuições possíveis ao assunto, sendo assim, existe a necessidade de aprofundar estes estudos e estender esta metodologia para condições de análise mais abrangentes, visando principalmente a melhora da eficácia e confiabilidade do método de LDF tratado nesta dissertação, são sugeridos os seguintes tópicos para dar continuidade a este trabalho:

- Análise da LDF a partir de simulações considerando os valores de precisão dos equipamentos de medição;
- Análise da LDF com a adição do efeito capacitivo nos alimentadores;
- Testes do método para sistemas elétricos de potência maiores;
- Utilizar dados de medições do terminal remoto para a estimação da impedância equivalente de Thévenin.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, DF: ANEEL, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL. **SIGA - Sistema de Informações de Geração**. Brasília, DF: ANEEL, 2022. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>.
- ALENCAR, G. T.; SANTOS, R. C.; PANAZIO, A. O. N. **Deteção e classificação de faltas em linhas de transmissão utilizando distância Euclidiana**. [S. l.]: SBSE, 2020.
- ANTON, H.; RORRES, C. **Álgebra Linear com aplicações**. 10. ed. Porto alegre: Bookman, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA- ABEEOLICA. São Paulo: [s. n.], 2022. Disponível em: <http://abeeolica.org.br>.
- AYYAGARI, S. B. **Artificial neural network-based fault location for transmission lines**. [S. l.: s. n.], 2011.
- BERNARDES, H. R. S. **Deteção e classificação de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica usando a análise multirresolução e a rede neural artificial ARTMAPfuzzy** 2019. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"— UNESP, Ilha Solteira, 2019.
- BÍSCARO, A.; PEREIRA, R.; KEZUNOVIC, M.; MANTOVANI, J. Integrated fault location and power-quality analysis in electric power distribution systems. **IEEE Transactions on power delivery**, Piscataway, v. 31, n. 2, p. 428–436, 2015.
- BRADT, M., BEHNKE, M. R., BLOETHE, W. G., BROOKS, C., CAMM, E. H., DILLING, W., ZAHALKA, G. **Wind plant collector system fault protection and coordination**. IEEE PES T&D, 2010.
- BRETAS, A. S.; PIRES, L.; MORETO, M.; SALIM, R. H. A bp neural network-based technique for hif detection and location on distribution systems with distributed generation. **International Conference on Intelligent Computing**, Cairo, p. 608–613, 2006.
- CARDENAS, J.; MUTHUKRISHNAN, V.; MCGINN, D.; HUNT, R. Wind farm protection using an IEC 61850 process bus architecture. *In*: IET INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 10th, 2010. Proceegns [...] [S. l.]: Managing The Change, 2010. p. 1-5.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA EÓLICA E SOLAR- CRESESB. **Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica**. [S. l.]: 2008.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. SEL/EESC/USP, 2007.

CPFL. **Análise estatística das atuações das proteções de linhas de transmissão em 1995.** Relatório OSPP-002/96, 1996.

DAS, S.; SANTOSO, S.; GAIKWAD, A.; PATEL, A. M.; Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application, **IEEE Access**, Piscataway, p. 1-20, 2014.

DECANINI, J.; TONELLI-NETO, M.; MINUSSI, C. Robust fault diagnosis in power distribution systems based on fuzzy artmap neural network-aided evidence theory. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Stevenage, v. 6, n. 11, p. 1112–1120, 2012.

DEHGHANI, M.; KHOOBAN, M. H.; NIKNAM, T. Fault detection and classification based on a combination of wavelet singular entropy theory and fuzzy logic in distribution lines in the presence of distributed generations. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 78, p. 455–462, 2016.

EL-FOULY, T. H. M.; ABBEY, M. On the compatibility of fault location approaches and distributed generation. In: CIGRE/IEEE Pes SYMPOSIUM INTEGRATION OF ON WIDE SCALE RENEWABLE RESOURCES INTO POWER DELIVERY SYSTEMS, 2009, Calgary. **Proceedings** [...] [S. l.]: Calgary, 2009. p. 1–5.

ERIKSSON, L.; SAHA, M.; ROCKEFELLER, G. D. An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 2, n. 2, p. 44, 1985.

FARIA, A. S. S. **Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição com a inserção de geração distribuída.** 2020. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"- UNESP, Ilha Solteira, 2020.

FREITAS, L. F. **Análise do Comportamento Estrutural e Geotécnico de Estruturas em Casca Cônica Empregadas como Fundação para Aerogeradores Onshore.** 2021. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais- CEFET-MG. Belo Horizonte. 2021.

GALE, P. F., P. A. CROSSLEY, Xu BINGYIN, Ge YAOZHONG, B. J. CORY, J. R. J. BARKER. Fault location based on travelling waves. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 5., [s. l.]. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 1993. p. 54-59.

GASPAR, A.R.; MEDEIROS, A.G.M.; ROCCA, A.D., *et al.*, “Gestão e Modelagem das Usinas Eólicas e Fotovoltaicas no SIN sob o Ponto de Vista da Análise de Curto-Circuito. In: STPC, 8., 2016, Brasília, DF. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2016.

GIOVANINI, R. **Epochs: uma plataforma para avaliação de novas tecnologias baseadas em agentes para proteção de sistemas elétricos de potência.** 2005. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2005.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL - GWEC. **Global wind report: annual market update 2022**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2022>.

GOMES, P.; GUARINI, A. P. O processo de recomposição das cargas após grandes perturbações: um processo de desenvolvimento continuado. *In: SNPTEE*, 28., 2005, Curitiba. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2005.

GONEN, T. **Electric power distribution engineering**. 3. ed. Oxfordshire: Taylor & Francis, 2014.

GURURAJAPATHY, S.; MOKHLIS, H.; ILLIAS, H. A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, Oxford, v. 74, p. 949–958, 2017.

HAMIDI, R. J., & LIVANI, H. Traveling-Wave-Based Fault-Location Algorithm for Hybrid Multiterminal Circuits. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 1, p. 135–144, 2017.

HENRIKSEN, L. L.; KUMM, J. J. Protective relaying applied to large wind plant collector systems. *In: 2008 IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION*, 2008, [s. l.]. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2008.

HOROWITZ, S.; PHADKE, A. **Power system relaying**. Chichester: John Wiley and Sons, 2008.

IZYKOWSKI, J.; SAHA, M. M.; ROSOLOWSKI, E. A method of fault location based on measurements from impedance relays at the line ends. *In: 2004 EIGHTH IEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION*, 2004, Amsterdam. **Proceedings [...]** Amsterdam: [s. n.], 2004. v. 1, p. 176–179.

JIANG, J.-A. *et al.* A hybrid framework for fault detection, classification, and location—part i: concept, structure, and methodology. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 26, n. 3, p. 1988 - 1998, jul. 2011. ISSN 0885-8977.

KHAPARDE, S.A; KALE, P.B; E AGARWAL, S.H. Application of Artificial Neural Network in Protective Relaying of Transmission Lines. *In: INTERNATIONAL FORUM ON APPLICATIONS OF NEURAL NETWORKS TO POWER SYSTEMS*, 1., 1991, Seattle. **Proceedings [...]** Seattle: [s. n.], 1991. p. 139-143.

KAWABATA, D. M. T. **Avaliação de custos para implantação de redes coletoras de energia para centrais eólicas**. 2018. 68 f. Monografia de especialização (Especialização em Energias Renováveis) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR, Curitiba, 2018.

KAWADY, T. A.; STENZEL J. A Practical Fault Location Approach for Double Circuit Transmission Lines Using Single End Data. **IEEE Power Engineering Review**, Piscataway, v. 22, n. 12, p. 62-63, 2002. DOI: 10.1109/MPER.2002.4311921.

KAZEMI, S.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; BILLINTON, R. Reliability assessment of an automated distribution system. **IET Generation, Transmission Distribution**, Stevenage, v. 1, n. 2, p. 223–233, March 2007. ISSN 1751-8687.

LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

LEDESMA, J. J. G.; NASCIMENTO, K. B. do; ARAUJO, L. R. de; PENIDO, D. R. R. A two-level ann-based method using synchronized measurements to locate high-impedance fault in distribution systems. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 188, p. 106576, 2020.

LI, J., YANG, Q., MU, H., LE BLOND, S., & HE, H. A new fault detection and fault location method for multi-terminal high voltage direct current of offshore wind farm. **Applied Energy**, Oxford, v. 220, p. 13–20, 2018.

LIANG, J.; ELANGOVA, S.; DEVOTTA, J. B. X. A wavelet multiresolution analysis approach to fault detection and classification in transmission lines. **Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 20, n. 5, p. 327-332, 1998.

LIMA, D. A. C. **Localização de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica baseada na impedância aparente**: algoritmo utilizando dados de um terminal. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRS, Porto Alegre, 2013.

MACIEL, N. C. **Avaliação da utilização da geração eólica no processo de recomposição do sistema interligado nacional**. 2021. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, Rio de Janeiro, 2021.

MACHADO, E. **Compensação dinâmica dos transitórios de baixa frequência de transformadores de potencial capacitivos para otimização da proteção de linhas de transmissão**. 2013. Ph.D. (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 8. ed. [S. l.]: LTC, 2011.

MARQUES, J. **Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador 105 de indução com dupla alimentação**. 2004. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2004.

MOURA, L. P.; LIMA, M. S.; OLIVEIRA, J. C.; TRONCHA, G. S.; REIS, A. “Estrutura física de parques eólicos e os princípios de funcionamento das topologias de geração. *In*: CEEL, 16., 2018, Uberlândia. **Anais** [...] Uberlândia: [s. n.], 2018.

NOVOSEL, D.; HART, D.; HU, Y.; AND MYLLYMAKI, J. **System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads**. U.S. Patent 5 839 093, Nov. 17, 1998.

NUNES, J. U.N. **Localização de faltas em alimentadores primários de distribuição de energia com a presença da geração distribuída**. 2010. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Porto Alegre, 2010.

OLESKOVICZ, M.; COURRY, D. V.; FELHO, O. D.; USIDA, W. F.; CARNEIRO, A. A.; PIRES, L. R. Power quality analysis applying a hybrid methodology with wavelet transforms and neural networks. **International journal of electrical power & Energy systems**, London, v. 31, n. 5, p. 206–212, 2009.

OLIVEIRA, D. S. **Classificação e localização de faltas em sistemas de transmissão de energia com compensação série utilizando redes neurais artificiais**. 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimentos de rede**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br>

OPPENHEIM, A. V.; WILLISKY, A. S.; HAMID, S.; NAWAB, S. H. **Sinais e sistemas**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Processamento em tempo discreto de sinais**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

PEIXOTO, L. B.; COELHO, R. R. A.; MAMEDE, D. R.; PAULA, D. G. A.; SANTOS, S. G. D. **Aplicação do método de simples reatância e takagi na localização de falta em uma rede de média tensão de um parque eólico**. [S. l.]: SBSE, 2020.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer relaying for power systems**. New Jersey: Wiley Online Library, 2009.

RAMOS, M. J. S. **Localização de falta de alta impedância em sistemas de distribuição: uma abordagem no domínio da frequência e estimação de parâmetros através do MMQP**. 2018. 128 f. Tese de doutorado em Engenharia elétrica - Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2018.

REIS, J. M. V. S. **Comportamento dos geradores eólicos síncronos com conversores diante de curto-circuito no sistema**. 2013. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. Fault location on series-compensated transmission line using measurements of current differential protective relays. In: 2010 MODERN ELECTRIC POWER SYSTEMS, 2010, Wroclaw. **Proceedings [...]** Piscataway: [s. n.], 2010. p. 1-6.

SALIM, R. H. *et al.* Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 23, n. 4, p. 1846 - 1856, out. 2008. ISSN 0885-8977.

SATO, F. **Análise de curto-circuito em sistemas elétricos de potência**. 1979. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas, 1979.

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SECCO, G. P. **Procedimento para estudo de coordenação das proteções elétricas em Centrais de Geração Eólica**. 2015. 125 f. Tese (Doutorado em Sistema de potência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PoliUSP, São Paulo, 2015.

SEVERIANO JUNIOR, C. A. **Localização e classificação de faltas em linhas de transmissão utilizando o método dos mínimos quadrados e inteligência computacional**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo Horizonte, 2013.

SILVA, K. M.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ANN. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 21, n. 4, p. 2058-2063, 2006.

SILVEIRA, E. G. **Localização de faltas em linhas de transmissão: desenvolvimento de novos algoritmos e implementação de sistema computacional para aplicações práticas**. 2007. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo Horizonte, 2007.

SINGH, M.; SANTOSO, S., Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants. Report NREL/SR-5500-52780. **National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, v. 162, Golden, CO, 2011.

SOUZA, F. M. S. *et al.* **Localização de faltas em linhas de transmissão pelo método das componentes fundamentais**. [S. l.]: SBSE 2020.

SPERA, David A. **Wind turbine technology: fundamental concepts wind turbine engineering**. 2. ed. New York: ASME Press, 2009.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K. SAKAGUCHI, T. A New Alogorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I - Fourier Transformation Method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-100, n. 3, p. 1316-1323, March 1981.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K. SAKAGUCHI, T. "A New Alogorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part II - Laplace Transformation Method," in **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-101, n. 3, p. 564-573, March 1982a.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R; MATSUSHIMA, T. Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-101, n. 8, p. 2892-2898, Aug. 1982b.

TONELLI-NETO, M. D. S. **Desenvolvimento de um sistema inteligente para o diagnóstico e prognóstico de falhas em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2015. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho- UNESP, Ilha Solteira, 2015.

ZANETTA JUNIOR, L. C. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. São Paulo, 2006.

APÊNDICE A – ESPAÇOS VETORIAIS EUCLIDIANOS

Os matemáticos e os físicos fazem uma distinção entre dois tipos de quantidades físicas: os escalares, que são quantidades que podem ser descritas simplesmente por um valor numérico, e os vetores, que são quantidades que requerem não só um valor numérico, mas também uma direção e um sentido para sua descrição física completa.

Em meados do século dezessete foi materializada explicitamente a ideia de utilizar parte de números para situar pontos no plano e ternos de números para situar pontos no espaço tridimensional. (ANTON: RORRES, 2012).

A.1 ESPAÇO EUCLIDIANO N -DIMENSIONAL

Na segunda metade do século dezoito, os matemáticos e físicos começaram a perceber que não havia a necessidade de parar com ternos, pois quádruplos (a_1, a_2, a_3, a_4) de números poderiam ser considerados pontos de um espaço de dimensão quadro e assim por diante, uma n -upla de números sendo pontos de um “espaço n -dimensional”. (ANTON: RORRES, 2012).

A.1.1 Vetores no espaço n - dimensional

Se n é um número inteiro positivo, dizemos que uma sequência $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ de números reais é uma n -upla ordenada. O conjunto de todas as n -upla ordenadas é chamado o espaço n -dimensional e denotado $\mathbb{R}^n$.

Ao considerar vetores cujos pontos iniciais não estão na origem. Pode-se obter os componentes desse vetor através da Equação 1. Se $\overrightarrow{P_1 P_2}$ denota o vetor de ponto inicial $P_1 (x_1, y_1)$ e ponto final $P_2 (x_2, y_2)$, tem-se:

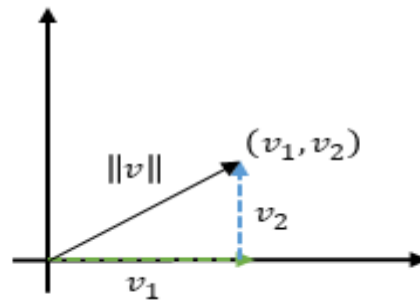
$$\overrightarrow{P_1 P_2} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1) \quad (\text{A1})$$

Ou seja, os componentes de $\overrightarrow{P_1 P_2}$ são obtidos subtraindo as coordenadas do ponto inicial das coordenadas do ponto final.

A.1.2 Distância Euclidiana

Denotamos o comprimento de um vetor v pelo símbolo $\|v\|$ e dizemos que este é a norma Euclidiana, o comprimento ou a magnitude de v (sendo que o termo “norma” é um sinônimo matemático comum para comprimento), como sugere a Figura A1. O operador $\| \cdot \|$ corresponde a norma Euclidiana.

Figura A1 - Norma do vetor centralizado na origem.



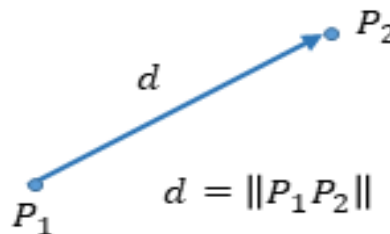
Fonte: Elaboração da própria autora.

Segue pelo Teorema de Pitágoras que a norma de um vetor (v_1, v_2) de $\mathbb{R}^2$ é determinada de acordo com a equação A2.

$$\|v\| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (\text{A2})$$

Se P_1 e P_2 forem pontos no $\mathbb{R}^2$ ou $\mathbb{R}^3$, então o comprimento do vetor $\overrightarrow{P_1 P_2}$ é igual a distância d entre os dois pontos (Figura A2).

Figura A2 - Distância entre dois pontos.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Especificamente, se $P_1 (x_1, y_1)$ e $P_2 (x_2, y_2)$ forem pontos em $\mathbb{R}^2$, pode-se calcular a distância Euclidiana ou norma Euclidiana entre P_1 e P_2 de acordo com a equação A3.

$$d = \|P_1 P_2\| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (\text{A3})$$

Se $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ e $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, forem pontos em $\mathbb{R}^n$, então denota-se a distância Euclidiana entre u e v por $d(u, v)$ conforme a equação A4.

$$d(u, v) = \|u - v\| = \sqrt{(u_1 - v_1)^2 + (u_2 - v_2)^2 + \dots + (u_n - v_n)^2} \quad (\text{A4})$$