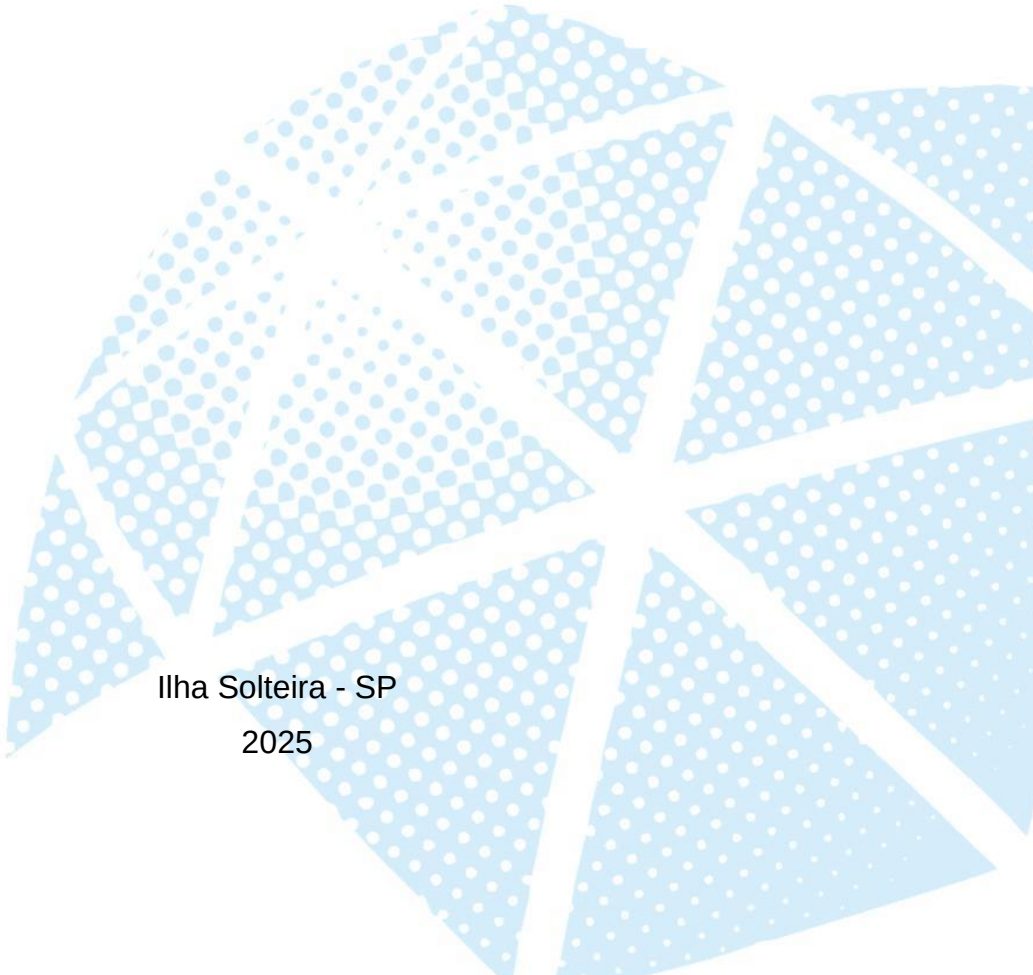
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

HENRIQUE AMARO FERNANDES

USO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE OPERAÇÃO DO RECEPTOR NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA



Ilha Solteira - SP
2025

HENRIQUE AMARO FERNANDES

USO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE OPERAÇÃO DO RECEPTOR NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para a obtenção do grau acadêmico de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Orientador(a): Prof. Dr. Jônatas Boás Leite

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Fernandes, Henrique Amaro.
F363u Uso da curva característica de operação do receptor na avaliação de desempenho de um algoritmo de localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica / Henrique Amaro Fernandes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
73 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025

Orientador: Jônatas Boás Leite

Inclui bibliografia

1. Curva característica de operação do receptor (ROC). 2. Localização de falta. 3. Redes de distribuição.

Sandra Montibeller - CRB-8/060

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e um dias do mês de maio do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente ***Henrique Amaro Fernandes,*** matriculado sob o nº 201053781, tendo como banca examinadora o seu orientador, *o Prof. Dr. Jonatas Boas Leite, o Doutorando Gabriel Victor De Oliveira Blanco e o Doutorando Vagner Antonio de Moraes da Cruz,* apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"Uso da Curva Característica de Operação do Receptor na Avaliação de Desempenho de um Algoritmo de Localização de Faltas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica",** obtendo a nota 10,0 (DEZ) e conceito APROVADO.

Prof. Dr. Jonatas Boas Leite
- Orientador-

Henrique Amaro Fernandes
- Discente-

Doutorando Gabriel Victor De Oliveira Blanco
- Membro da Banca -

Doutorando Vagner Antonio de Moraes da Cruz
- Membro da Banca -

Faculdade de Engenharia – Departamento de Engenharia Elétrica
Avenida Professor José Carlos Rossi, 1370 - CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP - Brasil
Tel (18) 37431150 - Fax (18) 3742-2735 - www.feis.unesp.br

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto esperado dessa pesquisa é corroborar na expansão da utilização do método da curva característica de operação do receptor no que tange ao campo da Engenharia Elétrica para a verificação do desempenho de algoritmos ou simulações computacionais a partir dos dados obtidos.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The expected impact of this research is to support the expansion of the use of the receiver operating characteristic method in the field of Electrical Engineering to verify the performance of algorithms or computational simulations based on the data obtained.

AGRADECIMENTOS

Dedico esta seção de agradecimentos a todos aqueles que me apoiaram durante esta jornada, aos meus pais, os quais foram o meu alicerce mais sólido, ao meu orientador, cujos ensinamentos e conselhos tornaram esta pesquisa possível, mas principalmente a Deus, aquele que esteve comigo desde o início. Também sou grato ao PROPe reitoria pelo financiamento da minha pesquisa acadêmica anteriormente, a qual se tornou o tema do meu Trabalho de Conclusão de Curso.

“*A ciência é sobre saber; a engenharia é sobre fazer*". (Petroski, 1992)

RESUMO

A ampliação da inserção de fontes renováveis de energia está redefinindo as redes de distribuição de energia elétrica, possibilitando o fluxo bidirecional de energia. Com a ascensão desse novo paradigma da geração distribuída (GD), a produção de energia se aproxima dos consumidores, promovendo uma maior confiabilidade das redes. Entretanto, essa integração da GD ao sistema de distribuição de média e baixa tensão, também, intensifica a complexidade dos modelos de rede, consequentemente, a determinação das correntes de curto-circuito, em casos de interrupções. As faltas na rede causam períodos de indisponibilidade do serviço de fornecimento para os clientes, principalmente, quando as faltas são permanentes e prolongadas. Isso evidencia a importância de técnicas eficientes para localização de faltas em redes de distribuição, que possibilitam a rápida restauração do serviço de fornecimento de energia, minimizando a duração das interrupções e as perdas de receita. Este trabalho de graduação propõe, portanto, a utilização da curva característica de operação do receptor para medir e avaliar o desempenho de um algoritmo localizador de faltas em redes de distribuição de média e baixa tensão.

Palavras-chave: curva característica de operação do receptor (ROC); localização de falta; redes de distribuição.

ABSTRACT

The expansion of the integration of renewable energy sources is redefining electrical distribution networks, enabling the bidirectional flow of energy. With the rise of this new paradigm of distributed generation (DG), energy production is moving closer to consumers, promoting greater network reliability. However, this integration of DG into medium- and low-voltage distribution systems also increases the complexity of current calculations in cases of interruptions. Faults in the network cause periods of service unavailability for customers, especially when the faults are prolonged. This highlights the importance of efficient techniques for fault location in distribution networks, enabling the rapid restoration of energy supply services, minimizing interruptions and revenue losses. Therefore, this study proposes the use of the receiver operating characteristic (ROC) curve to measure and evaluate the performance of a fault location algorithm in medium- and low-voltage distribution networks.

Keywords: distribution network; fault location; receiver operating characteristic curve (ROC).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema elétrico de potência (SEP) 16
Figura 2: Esboço de uma rede inteligente 17
Figura 3: Registros oscilográficos de diferentes tipos de faltas 20
Figura 4: Estrutura do sistema avançado de gerenciamento de distribuição 21
Figura 5: Parte de uma rede de distribuição com destaque para a i-ésima barra 26
Figura 6: Falta monofásica à terra 29
Figura 7: Falta bifásica das fases "*b*" e "*c*" 31
Figura 8: Falta trifásica das fases "*a*", "*b*" e "*c*" 32
Figura 9: Classificações dos tipos de GDs 34
Figura 10: Direções das correntes na barra de transferência para GDFT 35
Figura 11: Direções das correntes na barra de transferência para GDFC 36
Figura 12: Fluxograma do funcionamento do algoritmo de localização de falta 37
Figura 13: Esquema de Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição 39
Figura 14: Modelo genérico de uma matriz de confusão 41
Figura 15: Exemplo didático de 2 faltas em um diagrama elétrico de barramentos 42
Figura 16: Matriz de confusão média de 2 simulações baseada na Figura 15 43
Figura 17: Modelo de uma curva ROC com 6 pontos distintos 44
Figura 18: Efeito da variação do parâmetro φ na curva ROC 45
Figura 19: Área da curva $f(x)$ por meio da aplicação do método dos trapézios 46
Figura 20: Arranjo das posições dos blocos de dados na planilha 50
Figura 21: Formulário para salvar os parâmetros calculados pela macro "Calcular" 52
Figura 22: Localização, formatos e armazenamentos dos dados salvos nas planilhas 52
Figura 23: Visualização da Planilha Automática para Análise das Curvas ROC 53
Figura 24: Fluxograma do tratamento de dados para análise da curva ROC 53
Figura 25: Diagrama unifilar da rede de distribuição com 135 barras 54
Figura 26: Exatidão x Precisão – Sem GD – 1ϕ 56
Figura 27: $fprate\ x\ tprate$ – Sem GD – 1ϕ 57
Figura 28: Exatidão x Precisão – Sem GD – 2ϕ 57
Figura 29: $fprate\ x\ tprate$ – Sem GD – 2ϕ 58
Figura 30: Exatidão x Precisão – Sem GD – 3ϕ 58
Figura 31: $fprate\ x\ tprate$ – Sem GD – 3ϕ 59

Figura 32: Exatidão x Precisão – GDFC – 1ϕ 61
Figura 33: $fprate\ x\ tprate$ – GDFC – 1ϕ 61
Figura 34: Exatidão x Precisão – GDFC – 2ϕ 62
Figura 35: $fprate\ x\ tprate$ – GDFC – 2ϕ 62
Figura 36: Exatidão x Precisão – GDFC – 3ϕ 63
Figura 37: $fprate\ x\ tprate$ – GDFC – 3ϕ 63
Figura 38: Exatidão x Precisão – 2GDFCs – 1ϕ 65
Figura 39: Figura 39: $fprate\ x\ tprate$ – 2GDFCs – 1ϕ 66
Figura 40: Exatidão x Precisão – 2GDFCs – 2ϕ 66
Figura 41: $fprate\ x\ tprate$ – 2GDFCs – 2ϕ 67
Figura 42: Exatidão x Precisão – 2GDFCs – 3ϕ 68
Figura 43: $fprate\ x\ tprate$ – 2GDFCs – 3ϕ 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplo de dados reais com sensibilidade e especificidade de vários pontos de corte do IMC para detectar o cancro de mama 47
Tabela 2: Valores de AUC e P% média para cada φ na condição sem GD.....55
Tabela 3: Valores de L e NL para cada φ na condição sem GD 55
Tabela 4: Valores de AUC e P% média para cada φ na condição de 1 GDFC.....60
Tabela 5: Valores de L e NL para cada φ na condição GDFC 60
Tabela 6: Valores de AUC e P% média para cada φ na condição de 2 GDFCs 64
Tabela 7: Valores de L e NL para cada φ na condição 2 GDFCs 64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Pseudocódigo da Macro “Limpar”.....48
Quadro 2: Pseudocódigo da Macro “Calcular” 49
Quadro 3: Pseudocódigo da Macro “Salvar” 52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEE	Sistema de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
MT	Média Tensão
BT	Baixa Tensão
GD	Geração Distribuída
IF	Indicador de Passagem de Falta
CO	Condição de Operação
TF	Tipo de Falta
L	Acerto na Localização da Falta
NL	Erro na Localização da Falta
CC	Curto-Circuito
GDFT	Gerador Distribuído com Fonte de Tensão
GDFC	Gerador Distribuído com Fonte de Corrente
HIF	*High Impedance Fault*
LIF	*Low Impedance Fault*
CML	*Customer Minutes Lost*
ADMS	*Advanced Distribution Management Systems*
DMS	*Distribution Management Systems*
OMS	*Outage Management Systems*
GIS	*Geographic Information Systems*
AMI	*Advanced Metering Infraestruture*
SCADA	*Supervisory Control and Data Acquisition*
PMU	*Phasor Measurement Unit*
IED	*Intelligent Eletronic Device*
SM	*Smart Meter*
ROC	*Receiver Operating Characteristic Curve*
TP	*True Positive*
FP	*False Positive*
FN	*False Negative*
TN	*True Negative*
AUC	*Area Under the Curve*

LISTA DE SÍMBOLOS

$i,\ k$	Barramento/nó de referência e Índice de iteração
$S_i, V_i, I_{i,p}$	Potência complexa, tensão e corrente injetada no nó de referência i
$I_{carga,i,p}$	Corrente fornecida à carga conectada ao nó de referência i
$I_{shunt,i,p}$	Corrente gerada pela admitância de shunt do nó de referência i
$\bar{Y}_{i,p,q}^{sh}$	Admitância shunt entre o barramento i e as fases p e q
M_i	Ramificações i de uma árvore
$\dot{J}_{i,p}$	Corrente injetada no nó de referência i e fase p
$\varepsilon_{\Delta S}$	Critério de convergência do método *backward/forward*
Z_{ff}^{B}	Matriz de impedância nodal ou Matriz de CC
V_f	Tensão de falta
I_f, J_f	Corrente de falta e Vetor da Corrente de falta
Z_f, R_f	Impedância e Resistência de falta
V_a, V_b, V_c	Tensão na fase "*a*", "*b*" e "*c*"
I_a, I_b, I_c	Corrente na fase "*a*", "*b*" e "*c*"
V_0, V_1, V_2	Componentes simétricas de tensão
I_0, I_1, I_2	Componentes simétricas de corrente
ϕ, φ	Tipo de falta e Tamanho do raio de ajuste
Z_{gf}^{B}	Impedância entre a subestação e a falta
Z_{gg}^{B}	Impedância equivalente da conexão do GDFT ao sistema
Z_{ff}^{B}	Impedância da barra onde a falta ocorre
I_{GDFT}	Corrente injetada pelo GDFT
I_{GDFC}	Corrente injetada pelo GDFC
Z_{SS}, R_{SS}, X_{SS}	Impedância, resistência e reatância reais medidas
$Z_{SS,i}^{calc}, R_{SS,i}^{calc}, X_{SS,i}^{calc}$	Impedância, resistência real e reatância calculadas
b_i, Ω_b	N° de barramentos no sistema e vizinhanças de barramentos
$\bar{Z}_{ii,pp}^{B}, \bar{Z}_{ii,pq}^{B}, \bar{Z}_{ii,qp}^{B}, \bar{Z}_{ii,qq}^{B}$	Impedâncias próprias e mútuas entre as fases p e q
$\varepsilon_{Z,i}$	Erro absoluto entre as impedâncias calculadas e medidas
f_prate, t_prate	Taxa de verdadeiros positivos e Taxa de falsos positivos

SUMÁRIO

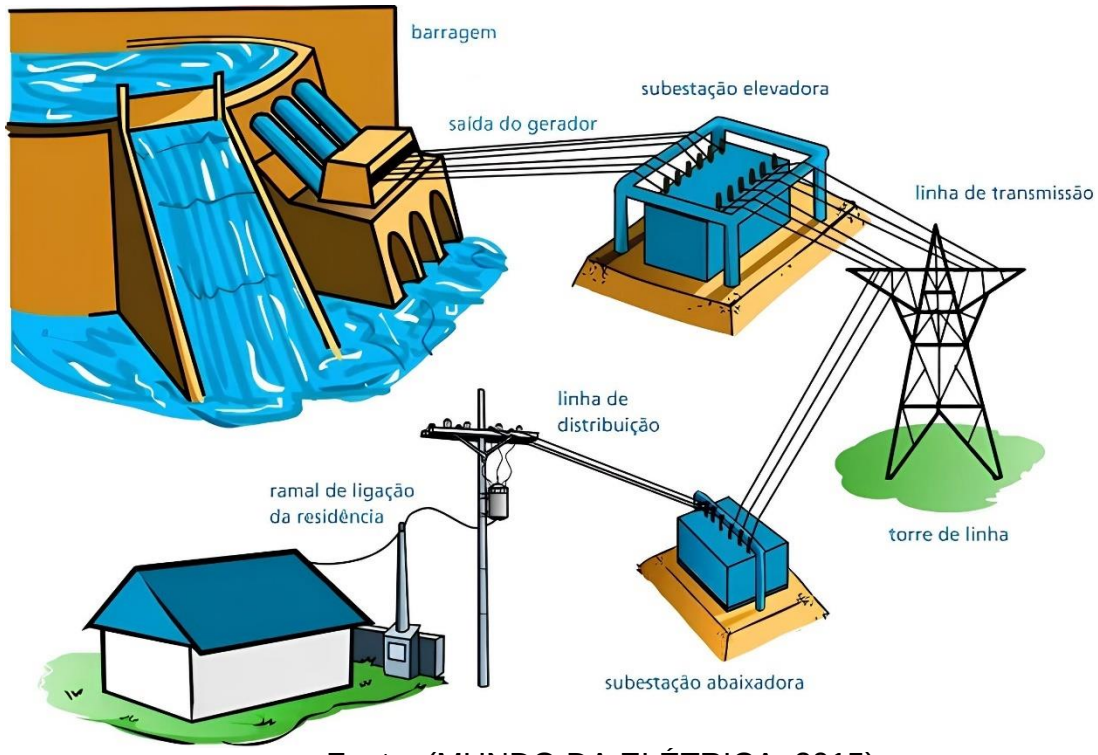
1 INTRODUÇÃO 16
1.1 LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM SDEE 19
1.1.1 Funcionamento do Sistema Central de Chamadas. 21
1.1.2 Funcionamento dos Indicadores de Passagem de Falta 22
1.1.3 Localização de Faltas via Afundamentos de Tensão 22
1.2 OBJETIVOS 24
2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS E CURVAS ROC 25
2.1 CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA 25
2.2 CÁLCULO DE CC E A INFLUÊNCIA DO TIPO DE FALTA. 28
2.2.1.1 Falta monofásica (1ϕ) 29
2.2.1.2 Falta bifásica (2ϕ) 31
2.2.1.3 Falta trifásica (3ϕ) 32
2.2.2 Influência da presença de GDs na rede de distribuição elétrica. 33
2.2.2.1 Gerador de Fonte de Tensão (GDFT) 34
2.2.2.2 Gerador de Fonte de Corrente (GDFC) 35
2.3 MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS 36
2.4 MÉTODO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE OPERAÇÃO DO RECEPTOR 40
2.4.1 Conceito do parâmetro AUC em Curvas ROC 45
2.4.2 Valor de Limiar (*Thereshold or Cut-Off*) na Curva ROC 46
2.4.3 Procedimentos do Tratamento de Dados para a Análise 48
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 54
3.1 1°CASO: SEM GD 55
3.1.1 Monofásico 1ϕ 56
3.1.2 Bifásico 2ϕ 57
3.1.3 Trifásico 3ϕ 58
3.2 2°CASO: COM GDFC 59
3.2.1 Monofásico 1ϕ 60
3.2.2 Bifásico 2ϕ 61
3.2.3 Trifásico 3ϕ 62
3.3 3°CASO: COM 2GDFCS 64

3.3.1 Monofásico 1ϕ 65
3.3.2 Bifásico 2ϕ 66
3.3.3 Trifásico 3ϕ 67
4 CONCLUSÃO 69
5 REFERÊNCIAS 71

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de energia elétrica (SEE) são compostos por três etapas principais: geração, transmissão e distribuição, conforme ilustrado na Figura 1. Cada uma dessas etapas desempenha um papel essencial no fornecimento de energia elétrica aos consumidores, desde a produção até o uso final. Na etapa de geração, diferentes formas de energia (mecânica, química, térmica, etc.) são convertidas em energia elétrica. Na etapa de transmissão, as subestações elevadoras aumentam o nível de tensão gerada até ser adequada ao transporte a longas distâncias, visando reduzir as perdas de energia nas linhas de transmissão. Antes de alcançar as zonas de consumo, a tensão é reduzida em subestações abaixadoras para média tensão (MT), dependendo do tipo de consumidor. Consumidores industriais e comerciais geralmente utilizam tensões acima de 13,8 kV, enquanto consumidores residenciais consomem abaixo desse valor, com uma tensão reduzida a níveis ainda menores (220 V), situando-se numa faixa de consumo de baixa tensão (BT), as quais são entregues às residências por meio do ramal de ligação.

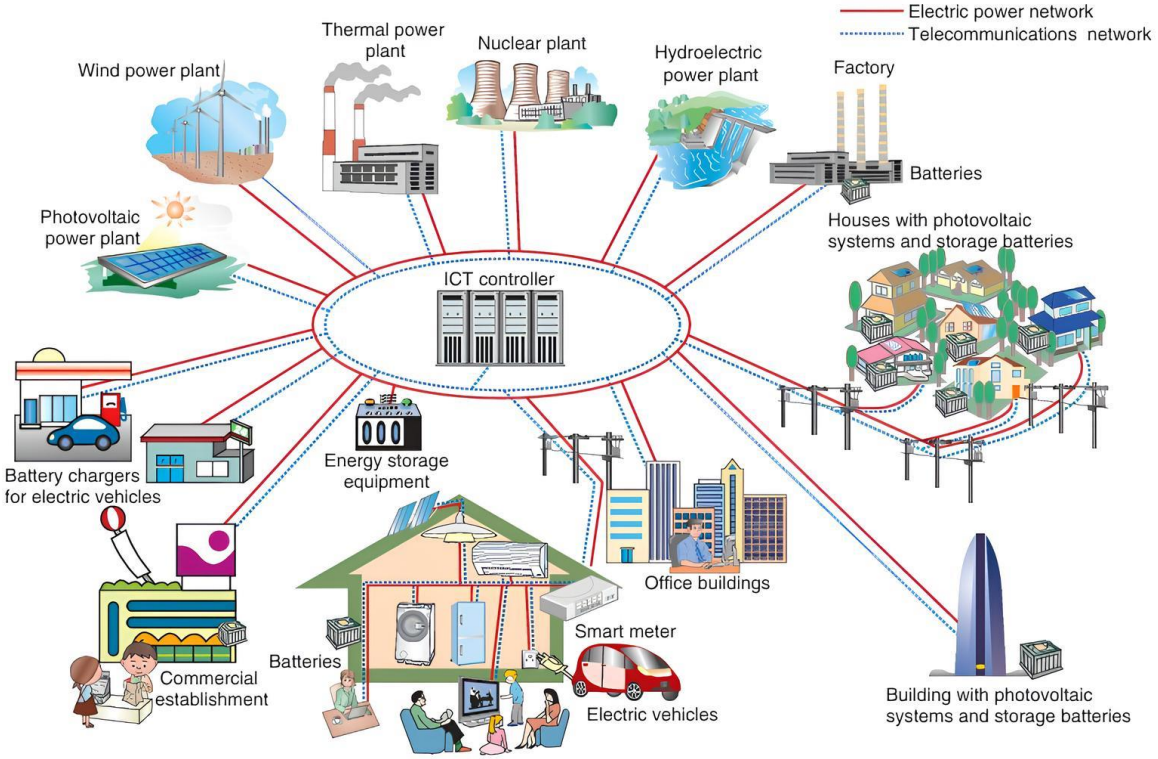
Figura 1: Sistema elétrico de potência (SEP)



Fonte: (MUNDO DA ELÉTRICA, 2015)

Atualmente, o modelo tradicional representando na Figura 1 não reflete mais a realidade do sistema de energia elétrica, em função dos avanços tecnológicos e da maior flexibilização na geração de energia. Esses progressos permitiram que consumidores locais, desde grandes indústrias até pequenas residências, participassem ativamente dessa etapa do processo através da geração por energia fotovoltaica, eólica, etc. Dessa forma, complementa-se o modelo antigo representado na Figura 1 com o sistema de rede inteligente (*smart-grid*) representado na Figura 2, onde se destacam os sensores e sistemas de controle voltados para o monitoramento e proteção do sistema elétrico, promovendo maior integração e acessibilidade do usuário com a rede elétrica.

Figura 2: Esboço de uma rede inteligente



Fonte: (NOZAKI, 2012).

Segundo Nozaki (2012, Vol. 10, p.1), esse modelo da Figura 2 representa um conceito fundamental das redes elétricas inteligentes, o qual tende a se popularizar cada vez mais, “[...] permite novas funções de economia de energia não disponíveis em redes de energia convencionais, como meticulosos ajustes de demanda e oferta de energia; promove a implementação de energia fotovoltaica, eólica energia e outras energias renováveis; e permite a visualização do consumo de energia.

Além de que representa a comunicação entre os elementos que permite um melhor balanceamento da carga, maior inserção de fontes renováveis de energia e

maior autonomia para consumidores que, também, produzem energia. Dessa forma, a digitalização e o armazenamento de energia desempenham um papel crucial na transição energética e na sustentabilidade do sistema elétrico. Entretanto, essa repentina popularização da participação do consumidor como cogerador no sistema de distribuição de energia elétrica começou a apresentar problemas no sistema de distribuição radial clássico de modo geral.

De acordo com Alcala-Gonzalez (2021, p. 405), a GD tem impactado negativamente na coordenação dos relés de proteção, os quais estão localizados em diferentes pontos da rede e podem gerar fluxos bidirecionais de energia, provocando a falha desses dispositivos de proteção (outros problemas são distorção harmônica, queda de frequência e estabilidade e redução da confiabilidade da rede) devido ao aumento das contribuições de correntes nos níveis de falta. A proteção em redes tradicionais foi projetada para distribuição de energia unidirecional, entretanto, a inserção desses diferentes tipos de condições de operação da geração distribuída tornou-se um obstáculo para a precisão e exatidão da proteção e da localização das faltas na rede elétrica “[...] Embora a presença de GD em redes elétricas possa ser benéfica, ela provoca uma transformação estrutural, deixando de se comportar como uma rede de distribuição radial clássica. Fluxos de potência reverso podem ocorrer tanto em regime permanente quanto na presença de falhas”.

Segundo Shafiullah (2017, p. 1) “[...] Dado que os usuários de energia elétrica, geralmente, são conectados à rede através do sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) e qualquer interrupção no mesmo causam minutos do cliente perdidos (do inglês, *Customer Minutes Lost*, CML). A maioria das CMLs é causada por diferentes tipos de faltas, sustentadas por um longo período.” Assim, as técnicas de localização de falhas são essenciais para o rápido restabelecimento do fornecimento de energia, minimizando a duração das interrupções e os prejuízos financeiros.

No entanto, a recente tendência de inserção de GDs nas redes de distribuição está modificando os esquemas de proteção da rede, alterando seus parâmetros técnicos e direção dos fluxos de corrente/potência. Além disso, a precisão das técnicas tradicionais de detecção de falhas também está sendo significativamente afetada.

Um método ineficaz de localização de falhas pode causar a deterioração dos índices de continuidade, que dependem principalmente da duração e frequência das interrupções. Em sistemas de transmissão de energia elétrica, os métodos de

localização de faltas são razoavelmente consolidados e os curtos-circuitos podem ser localizados com precisão.

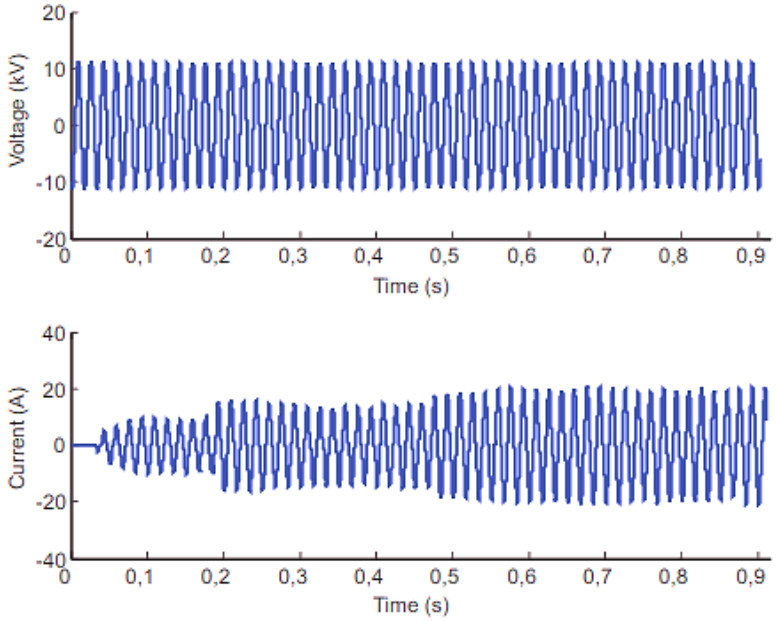
1.1 LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM SDEE

Em sistemas de distribuição, não há consenso sobre a melhor prática de localização de faltas, porque a metodologia mais adequada depende de vários aspectos, incluindo o nível de modernização da rede (Paternost et al., 2019). Métodos de cálculo do fluxo de potência, a matriz de impedância nodal e análise de curto-circuito podem ser utilizados para determinar a localização das seções com falta.

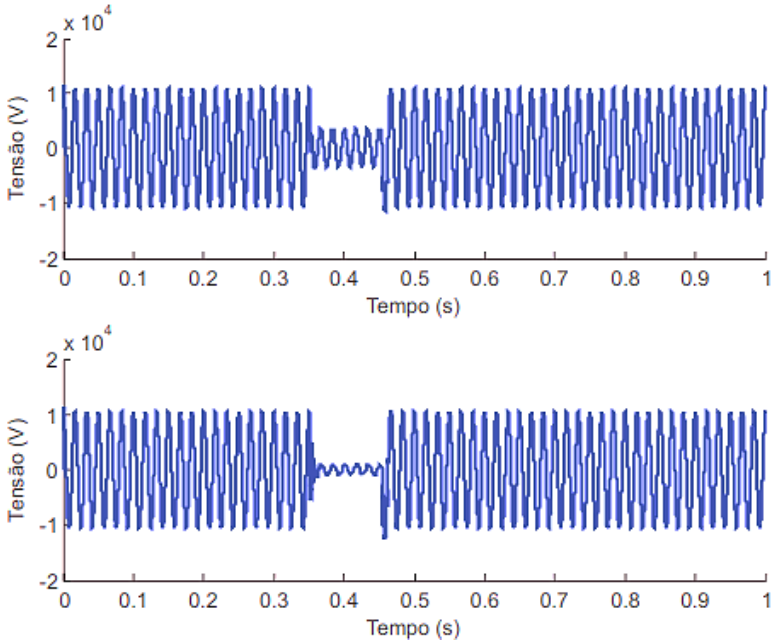
Além desses casos, existem outros 2 casos recorrentes, faltas de alta impedância (do inglês, *High Impedance Fault* - HIF) e faltas de baixa impedância (do inglês, *Low Impedance Fault* - LIF). As faltas do tipo HIF ocorrem quando um condutor primário energizado entra em contato com uma superfície de baixa condutividade, resultando em correntes de falta da mesma ordem de grandeza da corrente de carga e de outros distúrbios comuns ao SDEE. Como consequência, os sistemas de proteção convencionais baseados em sobrecorrente têm dificuldade em detectar esse tipo de falta (Santos, 2016).

Para as faltas HIF, devido à alta resistência, a corrente de falta é relativamente baixa com oscilações, que são pequenas variações na corrente ao longo do tempo, tal característica é demonstrada na Figura 3.a). Já as faltas LIF ocorrem quando há pouca resistência no ponto de falha, como em curtos-circuitos, ou falhas onde a linha de energia entra em contato direto com uma superfície condutora, resultando em uma corrente de falta alta, causando um afundamento significativo da tensão (queda de tensão) nos pontos próximos à falha, como demonstrado na Figura 3.b). Tais características distintas de ambas as faltas são usadas para ser possível discernir esses dois tipos de faltas e localizar a região onde ocorreu essa falha com precisão e exatidão, garantindo maior agilidade na resolução do problema e minimização do prejuízo financeiro.

Figura 3: Registros oscilográficos de diferentes tipos de faltas



a) Faltas de Alta Impedância (HIF).



b) Faltas de Baixa impedância (LIF).

Fonte: (Santos, 2016).

A localização de faltas por HIF, atualmente, pode ser estimada por Transformada Wavelet, Redes Neurais ou Ondas Viajantes (Miliouds, 2012). Neste trabalho, assumem-se as faltas de baixa impedância, que causam interrupções não-programadas nas unidades de consumo.

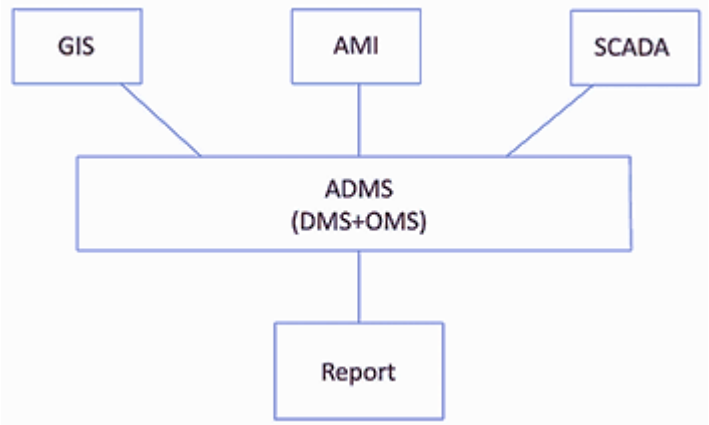
Logo são apresentadas algumas técnicas de localização de faltas, tais como: por central de chamadas (do inglês, *Call Center*); por indicadores de passagem; e por comparação de estados da rede.

1.1.1 Funcionamento do Sistema Central de Chamadas.

Segundo Paternost (2019, p. 14), "[...] surgiu recentemente o conceito de Sistemas Avançados de Gerenciamento de Distribuição (do inglês, *Advanced Distribution Management Systems - ADMS*), o qual integra as funções do Sistema de Gerenciamento da Distribuição (do inglês, *Distribution Management Systems - DMS*) e do Sistema de Gerenciamento de Interrupções (do inglês, *Outage Management Systems - OMS*)". Em resumo, o sistema ADMS serve para monitorar, controlar, otimizar e gerenciar os sistemas de distribuição, com funções do DMS, e detectar, localizar e solucionar defeitos nos sistemas de energia, com funções do OMS. Esse último se fundamenta em chamadas telefônicas, infraestrutura de medição e telecomunicação para isolar e localizar a possível região com falta.

O sistema ADMS, representado pela Figura 4, também é sustentado por um conjunto de ferramentas para visualização geográfica espacial (do inglês, *Geographic Information Systems - GIS*) e numérica (do inglês, *Advanced Metering Infraestruture - AMI*) do problema a partir da integração com sistemas SCADA, que são sistemas de controle e aquisição de dados, para monitorar e controlar os sensores e equipamentos da rede de distribuição em tempo real. Dessa forma, permite-se um panorama unificado e automatizado, aumentando a eficiência operacional e a confiabilidade do sistema.

Figura 4: Estrutura do sistema avançado de gerenciamento de distribuição



Fonte: (Paternost, 2019).

1.1.2 Funcionamento dos Indicadores de Passagem de Falta

A configuração radial convencional do SDEE denota dois conceitos importantes que servem como base para esse trabalho, montante e jusante. Esses conceitos podem ser compreendidos por meio de uma analogia com as características geográficas de um rio. Afirma-se que o movimento da água corrente sempre segue da nascente para a foz do rio.

Ao tomar um ponto de referência fixo e analisar a direção do fluxo de água em relação a esse ponto, se a direção da água estiver "vindo" em encontro ao ponto de referência (ou seja, em direção oposta à nascente), considera-se que todos os elementos da nascente ao ponto de referência estão a montante. Por outro lado, se a direção do fluxo de água estiver no mesmo sentido do fluxo natural (seguindo para a foz), considera-se que todos os elementos do ponto de referência até a foz estão a jusante.

Afirma-se que o mesmo conceito é aplicado no ramo da eletricidade, principalmente no que diz respeito a seletividade e coordenação dos dispositivos de proteção, sendo que os tipos mais convencionais adotados nessas redes elétricas são indicadores de passagem de falta (IFs), cujo propósito é indicar a existência de sobrecorrente no alimentador onde estão instalados, isto é, apenas quando a corrente é maior do que a ajustada no IF.

Segundo Cardoso (2021, p. 21), “[...] Com a alocação adequada desses indicadores, faz-se possível identificar o caminho dos fluxos de correntes de falta desde as fontes de energia até o local das faltas, permitindo a redução do percurso a ser percorrido pela equipe de manutenção na busca pelo local da falta”. Os indicadores de falta não permitem apontar o exato local de uma falta, contudo podem sinalizar a seção em que ocorreu a falta, logo, servem para denotar se a falta está localizada a montante ou a jusante na rede elétrica a partir da sua localização.

1.1.3 Localização de Faltas via Afundamentos de Tensão

Esse método baseia-se diretamente nos afundamentos de tensão nas redes elétricas, tal característica está relacionada às faltas de baixa impedância, onde um curto-circuito (CC) pode causar quedas de tensão de diferentes níveis em um ponto de carga, dependendo de sua localização e tipo. Além disso, as variações de tensão de curta duração são causadas por condições de falta, energização de grandes cargas ou conexões fracas na fiação elétrica (Dugan et al., 2004).

Dependendo da localização da falta, podem ocorrer quedas de tensão, aumentos de tensão ou perda completa de tensão. Logo, é possível localizar a falta em uma rede de distribuição de energia elétrica a partir das comparações de estados da rede:

- Para faltas distantes, a carga pode experimentar apenas uma leve variação de tensão;
- Para faltas próximas, a probabilidade de uma carga ser significativamente afetada é muito maior.

As redes de distribuição apresentam características particulares que as diferenciam das redes de transmissão, isso significa que na maioria das vezes, as redes de distribuição apresentam topologia radial ou, em alguns casos, fracamente malhada, ramais trifásicos, bifásicos ou monofásicos, cargas dos mais variados tipos, relação X/R baixa e ausência de transposição. Dadas essas características, métodos clássicos desenvolvidos, em especial considerando as características das redes de transmissão para cálculo de fluxo de potência, podem não ser apropriados para a análise das redes de distribuição, principalmente devido aos problemas relacionados com a dificuldade de convergência (Pereira, 2007).

Afirma-se que o escopo desse trabalho é analisar um algoritmo para a localização de faltas em uma rede de distribuição de energia elétrica, a fim de fidelizar a simulação, são aplicadas dificuldades propositalmente durante a simulação, como a presença de GDs na rede de distribuição, isso significa que o fluxo de potência pode não ser unidirecional, como em redes tradicionais, onde a energia vai apenas da concessionária para os consumidores, já que a energia pode fluir em ambas as direções, dependendo da demanda e da produção local. O maior problema dessa bidirecionalidade é caracterizado no Ilhamento, quando a parte central da rede está desenergizada, mas outra parte continua com seu ramo energizado devido à presença desses GDs, dificultando na coordenação e efetividade dos dispositivos de proteção.

Por conseguinte, os sistemas de automação das redes de distribuição foram modernizados com dispositivos voltados para proteção, medição e comunicação, como relés de proteção digitais/numéricos, atuando como IEDs (do inglês, *Intelligent Eletronic Devices*). Entretanto, atualmente, devido ao alto grau de complexidade em alguns casos, também são exigidos dispositivos como µPMU (do inglês, *Phasor Measurement Unit* – PMU) e medidores inteligentes (do inglês, *Smart Meter* - SM).

A presença de GDs aumenta o desequilíbrio de cargas, o que impacta nas magnitudes de tensão trifásicas ao longo do alimentador, independente dos reguladores de tensão operando em cada fase (Wu et al., 2018). Porém, tal dispositivo é inviável economicamente devido ao seu alto custo. Finalmente, o SM é um dispositivo eletrônico que registra informações como consumo de energia elétrica, níveis de tensão, corrente e potência. Tal dispositivo possui recursos de processamento e comunicação de dados, oferecendo a oportunidade de melhorar o desempenho dos sistemas de distribuição.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é verificar a confiabilidade e desempenho de um algoritmo para localizar faltas em redes de distribuição sob diferentes condições de operação, que incluem faltas mono-, bi- e trifásicas, com vários valores de resistência de falta e inserção, ou não de GDs.

O desempenho do algoritmo, para cinco limiares de operação, é determinado usando as curvas características de operação do receptor (ROC). A eficiência do método proposto é garantida mediante uma análise comparativa com característica de precisão e exatidão para o algoritmo de localização de faltas. A vantagem de utilizar a técnica para essa análise é a capacidade de distinção entre a presença e a ausência de uma falha com precisão em quaisquer sistemas com classificação binária (1 ou 0, sim ou não, acerto ou erro, etc.), incluindo o algoritmo analisado neste trabalho.

2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS E CURVAS ROC

Afirma-se que a localização de faltas em uma rede de distribuição de energia elétrica é uma preocupação muito antiga com muitos métodos e técnicas bem consolidadas e confiáveis por diversos autores ao longo do tempo, as quais convergem quanto ao modo padrão de localização de falta através da comparação de estados medidos, calculados ou estimados, o que permite identificar aquelas regiões da rede de distribuição com maiores probabilidades de ocorrência da falta na garantia, o que aumenta na eficiência na localização.

2.1 CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA

O cálculo do fluxo de potência em redes de distribuição de energia elétrica tem como principal objetivo determinar o estado operacional da rede, permitindo a análise das tensões nos nós e das correntes que fluem através linhas. Esse processo é fundamentado nas equações de balanço de potência, que garantem a compatibilidade entre a potência ativa e reativa fornecida pelos geradores e consumida pelas cargas.

A maioria dos sistemas de distribuição é projetada de forma radial, o que faz com que métodos de varredura tipo *backward/forward*, como descrito por Leite e Mantovani (2015), sejam especialmente adequados para análise dessas redes.

As redes de distribuição possuem características específicas, como múltiplas fases (1ϕ, 2ϕ e 3ϕ), desequilíbrios nos fluxos e conectividade fracamente malhada. Essas propriedades podem prejudicar a eficiência dos métodos clássicos de cálculo de fluxo de potência, que muitas vezes são projetados para redes equilibradas e altamente interconectadas.

Entre os métodos avançados, destaca-se a abordagem de injeção de correntes, proposta por Garcia et al. (2000), que aplica o método de Newton combinado com técnicas modernas de esparsidade. Nesse método, a tensão em cada barra da rede é calculada com base em uma barra de referência previamente especificada. Com o uso da matriz de impedância nodal, é possível determinar as variações incrementais de tensão causadas pelas injeções de corrente em toda a rede, permitindo uma análise eficiente, mesmo em grandes sistemas.

O método *backward/forward* baseia-se no cálculo das correntes, um processo altamente eficiente para sistemas radiais. Em redes que incluem barras do tipo PQ (onde a potência ativa e reativa são conhecidas), a modelagem da rede torna-se não linear, exigindo um processo iterativo para a resolução.

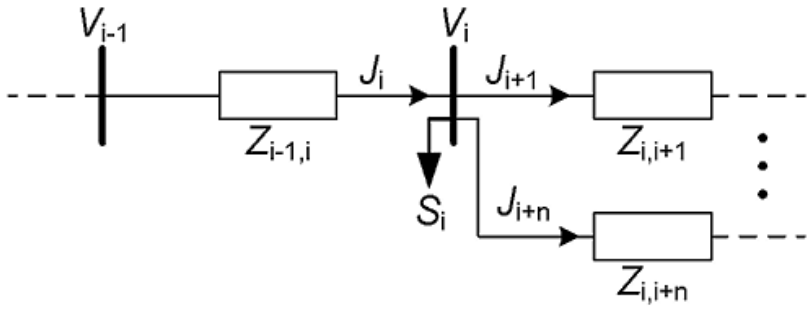
Além disso, uma abordagem importante na aplicação desse método é a organização das barras da rede em camadas, facilitando a localização dos nós extremos. Isso possibilita a identificação das componentes jusantes e montantes da rede, permitindo a construção da lista de adjacências, (Cheng; Shirmohammadi, 1995).

A organização em camadas não só otimiza a execução do método, como também, melhora a precisão na análise das tensões e fluxos de corrente. Além disso, as representações gráficas, como a apresentada na Figura 5, são fundamentais para ilustrar as tensões, as injeções de corrente e os fluxos através das linhas de distribuição. Essas representações não apenas facilitam a interpretação dos resultados, mas também ajudam na validação dos modelos computacionais desenvolvidos.

O método de varredura *backward/forward* continua sendo amplamente utilizado devido à sua simplicidade e robustez em sistemas radiais. No entanto, para redes maiores e mais complexas, como as fracamente malhadas, métodos como o de injeção de correntes têm se mostrado mais adequados, integrando avanços computacionais que lidam com a esparsidade e a complexidade dessas redes.

Esse método tem seu princípio de funcionamento podendo ser demonstrado a partir de uma análise na Figura 5. Na análise, considera-se que as barras são do tipo PQ (potência ativa e potência reativa predeterminadas) e que os índices p e q representam diferentes fases do sistema trifásico (a, b e c), logo, o problema é classificado como não linear e deve ser resolvido por meio de uma análise iterativa como proposto pelo método de varredura *backward/forward*.

Figura 5: Parte de uma rede de distribuição com destaque para a i-ésima barra



Fonte: (Ferreira, 2023).

Primeiro, deve-se tomar uma barra i como referência, cuja tensão é igual a V_i e a potência complexa injetada é S_i. Dessa forma, com base na Lei de Kirchhoff das Correntes, estabelece-se (1), em que a corrente injetada no nó, $I_{i,p}$, é a soma da corrente fornecida à carga conectada à barra, $I_{carga,i,p}$, e da corrente devido à admitância de shunt da barra, $I_{shunt,i,p}$.

$$\dot{I}_{i,p} = \dot{I}_{carga,i,p} + \dot{I}_{shunt,i,p} \tag{1}$$

Em (2), calculam-se as correntes nodais da carga $I_{carga,i,p}$ através das demandas de potência $S_{i,p}$ estimadas na interação k, utilizando os valores da iteração anterior $(k-1)$.

$$\dot{S}_{i,p} = \dot{V}_{i,p} \cdot \dot{I}^{*}_{carga,i,p}$$

$$\dot{I}^{k}_{carga,p} = \left(\frac{\bar{S}_{i,p}}{\dot{V}^{k-1}_{i,p}} \right)^{*} \tag{2}$$

Em (3), consideram-se as influências das correntes parasitas de admitâncias shunt que fluem devido aos efeitos capacitivos e indutivos da rede, atuando como um "dreno" ao fluxo de potência do nó i e p-ésima fase na iteração k.

$$\dot{I}^{k}_{shunt,i,p} = \sum_{q \in \{a,b,c\}} \bar{Y}^{sh}_{i,p,q} \cdot \dot{V}^{k-1}_{i,q}, \qquad p \in \{a,\ b,\ c\} \tag{3}$$

Assim, reorganiza-se e formula-se o cálculo da corrente nodal, representada por (4), a qual descreve a corrente injetada em uma barra i que considera a potência injetada e os efeitos da admitância de shunt, o que é essencial para o método de fluxo de potência em redes de distribuição, garantindo a convergência para valores consistentes de tensão e corrente ao longo das k iterações.

$$\dot{I}^{k}_{i,p} = \left(\frac{\bar{S}_{i,p}}{\dot{V}^{k-1}_{i,p}} \right)^{*} + \sum_{q \in \{a,b,c\}} \bar{Y}^{sh}_{i,p,q} \cdot \dot{V}^{k-1}_{i,q}, \qquad p \in \{a,\ b,\ c\} \tag{4}$$

A varredura b*ackward* baseia-se no conceito de que cada barra recebe corrente das suas barras à montante, e, ao mesmo tempo, consome uma parte devido à sua carga e elementos *shunt*. Essa relação é demonstrada por (5), em que a corrente injetada na barra i e fase p é a soma iterativa resultante da corrente que sobe para o

nó $(i-1)$ na árvore, logo, soma-se a corrente nodal, $I_{i,p}^{k}$, e a corrente injetada das ramificações, M_i, adjacentes e a jusante conectadas ao nó i.

$$j_{i,p}^{k} = -\dot{I}_{i,p}^{k} + \sum_{m \in M_i} \dot{J}_{m,p}^{k}, \qquad p \in \{a,\ b,\ c\} \tag{5}$$

A varredura *forward* é o cálculo das tensões em cada nó da rede de distribuição, partindo do nó a montante e avançando até os últimos nó a jusante, baseando-se no conceito de que a diferença de potencial entre as barras $(i-1)$ e i é dada pela queda de tensão da impedância da linha, $Z_{i-1,i}$, que conecta o nó i de referência a sua barra a montante adjacente $(i-1)$ como demonstrado por (6).

$$\dot{V}_{i,p}^{k} = \dot{V}_{i-1,p}^{k} - \sum_{q \in \{a,b,c\}} \bar{Z}_{i-1,i,p,q} \cdot \dot{J}_{i,q}^{k}, \qquad p \in \{a,\ b,\ c\} \tag{6}$$

Esse critério garante que, para cada fase p, o erro máximo entre potência calculada e potência esperada seja menor que a tolerância, $\varepsilon_{\Delta S}$, como demonstrado por (7). Se essa condição for atendida, significa que a solução atingiu um estado estacionário, e a varredura pode ser interrompida.

$$\dot{S}_{i,p} = \dot{V}_{i,p} \cdot \dot{I}_{i,p}^{*}$$

$$\dot{S}_{i,p} = \dot{V}_{i,p} \cdot \left(\dot{I}_{carga,p}^{k} + \sum_{q \in \{a,b,c\}} \bar{Y}_{i,p,q}^{sh} \cdot \dot{V}_{i,q}^{k-1} \right)^{*}$$

$$\Delta S_{i,p} = \dot{V}_{i,p} \cdot \left(\dot{I}_{carga,p}^{k} + \sum_{q \in \{a,b,c\}} \bar{Y}_{i,p,q}^{sh} \cdot \dot{V}_{i,q}^{k-1} \right) - \bar{S}_{i,p}$$

$$\varepsilon_{\Delta S} \geq \max_{p \in \{a,b,c\}} \left(\left| \Delta S_{i,p} \right| \right) \tag{7}$$

2.2 CÁLCULO DE CC E A INFLUÊNCIA DO TIPO DE FALTA.

A fim de calcular a corrente de curto-circuito, primeiro, deve-se calcular a matriz de impedância nodal, ou matriz de CC, a qual descreve a relação entre as tensões nodais e as correntes injetadas nos nós do sistema, sendo usada para calcular a corrente de falta quando ocorre um curto-circuito em um ponto específico, a qual é representada por (8), onde a dimensão da matriz depende inicialmente do número de fases e barras do sistema.

$$J_f = {Z_{ff}^B}^{-1} + V_f(0) \quad (8)$$

Em seguida, é analisado como o tipo de falta no sistema de distribuição pode aumentar a complexidade da localização de falta na rede elétrica, as quais podem ser monofásica, bifásica ou trifásica.

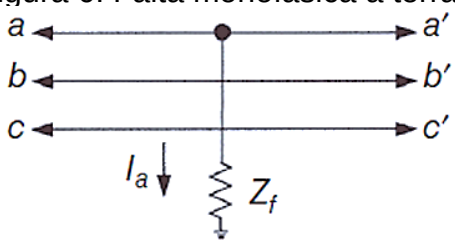
De acordo com Gururajapathy et al. (2017), a falta monofásica (1ϕ) representa 70% das ocorrências de falhas em sistemas de distribuição, a qual ocorre quando um dos condutores de fase toca o solo ou um condutor neutro, sendo considerada menos severa e comum. A falta bifásica (2ϕ) envolve duas fases, sendo responsável por 10% das falhas, é mais complexa e pode levar a situações mais perigosas se não for resolvida rapidamente. A falta trifásica (3ϕ) é a mais severa, com altos níveis de corrente de falha, podendo causar danos significativos ao equipamento, apesar de que sua ocorrência seja em apenas 5% das falhas.

O motivo dessa influência é demonstrado minuciosamente adiante, porém afirma-se que a existência de múltiplas fases e a assimetria nas correntes durante as falhas dificultam, ainda mais, a identificação rápida da localização da falha na rede elétrica, já que geram rastros distintos de corrente e tensão na rede elétrica, levando à necessidade de técnicas modernas, ou avançadas, como métodos baseados em inteligência artificial. Portanto, espera-se que a eficiência na localização das faltas no método analisado seja coerente com o comportamento conhecido dos tipos de falta, onde o nível de dificuldade é organizado como faltas trifásicas > faltas bifásicas > faltas monofásicas.

2.2.1.1 Falta monofásica (1ϕ)

Na Figura 6, o circuito representado na imagem mostra um sistema trifásico onde a fase "a" sofre uma falta monofásica para a terra através de uma impedância Z_f, enquanto as correntes das outras 2 fases são nulas e a tensão na fase CC é expressa por $V_a = I_f \cdot Z_f = I_a Z_f$.

Figura 6: Falta monofásica à terra



Fonte: (Ferreira, 2023).

A fim de obter o vetor de corrente de falta, J_f, primeiro, analisam-se as componentes de sequência de corrente desse tipo de falta, resultando na relação representada por (9).

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \tag{9}$$

Logo, a corrente de falta é dada por $I_a = 3I_0 = 3I_1 = 3I_2$ e a tensão na fase CC é expressa por $V_a = I_a \cdot Z_f$. Conforme a Lei de Tensão dos Nós de Kirchhoff, a componente I_0 é determinada por (10).

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2$$

$$3I_0Z_f = -I_0Z_0 + (V_a - I_1Z_1) - I_2Z_2$$

$$I_0 = \frac{V_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \tag{10}$$

A corrente de falta, I_a, é demonstrada conforme (11) e as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa, são obtidas através da matriz de transformação T_s, cuja origem é a partir da teoria das componentes simétricas, usada para analisar sistemas elétricos desequilibrados, representada por (12).

$$I_a = 3I_0 = \frac{3V_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \tag{11}$$

$$Z_{012} = T_s^{-1}Z_{abc}T_s = T_s^{-1}Z_{ff}^{B}T_s \tag{12}$$

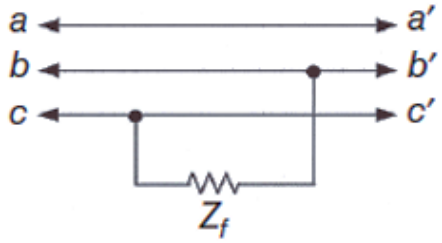
A tensão necessária para estimar a corrente da falta monofásica é a tensão na fase em falta calculada pela solução do fluxo de potência: $V_a = V_f^a(0)$. Portanto, o vetor de corrente de falta monofásica na fase "a" é demonstrado por (13).

$$J_f = [I_a \quad 0 \quad 0]^T \tag{13}$$

2.2.1.2 Falta bifásica (2ϕ)

Na Figura 7, o circuito representado na imagem mostra um sistema trifásico onde a fase "b" sofre uma falta bifásica com a fase "c" através de uma impedância Z_f. A partir da Figura 7, considera-se que $I_a = 0$ e $I_b = -I_c$ e que a tensão de falta é denominada $V_b - V_c = I_f Z_f$.

Figura 7: Falta bifásica das fases “*b*” e “*c*”



Fonte: (Ferreira, 2023).

As componentes de corrente e as componentes de tensão desse tipo de falta são demonstradas por (14) e (15).

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ -I_c \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{I_c}{3}\begin{bmatrix} 0 \\ (-\alpha + \alpha^2) \\ (-\alpha^2 + \alpha) \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{15}$$

A partir das relações em (15), desenvolve-se:

$$V_b - V_c = (V_0 + \alpha^2 V_1 + \alpha V_2) - (V_0 + \alpha V_1 + \alpha^2 V_2) = (\alpha^2 - \alpha)(V_1 - V_2)$$

Da relação (14), assume-se que $I_0 = 0$ e $I_2 = -I_1$, obtendo-se:

$$I_f = I_b = (I_0 + I_1\alpha^2 + \alpha I_2) = (\alpha^2 - \alpha)I_1$$
$$V_b - V_c = I_f Z_f = (\alpha^2 - \alpha)I_1 Z_f$$

Logo, ao igualar as expressões de $V_b - V_c$, obtém-se (16):

$$(\alpha^2 - \alpha)(V_1 - V_2) = (\alpha^2 - \alpha)I_1 Z_f$$
$$I_1 = \frac{V_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \tag{16}$$

Dessa forma, a partir de (14) e (16), obtém-se o cálculo da corrente de falta em (17) e o vetor de corrente da corrente de falta em (18).

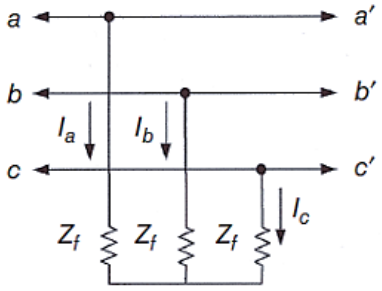
$$I_1 = \frac{I_c(-\alpha+\alpha^2)}{3} = \frac{-j\sqrt{3}I_c}{3} \qquad \rightarrow \qquad I_c = \frac{j\sqrt{3}V_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

$$I_f = I_b = -I_c = \frac{j\sqrt{3}V_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \qquad (17); \qquad J_f = [0 \quad -I_c \quad I_c]^T \qquad (18)$$

2.2.1.3 Falta trifásica (3ϕ)

Na Figura 8, o circuito representado denota uma falta trifásica, em que o local onde ocorre a falha, cada fase está conectada a uma impedância de falta Z_f. Esse tipo de curto-circuito é um dos mais severos em sistemas elétricos, pois envolve todas as três fases, resultando no maior nível de corrente de falta possível.

Figura 8: Falta trifásica das fases "*a*", "*b*" e "*c*"



Fonte: (Ferreira, 2023).

A soma vetorial das correntes é nula, ao considerar-se como uma falta simétrica e sem caminho para a terra. Logo, a partir da Lei de Kirchhoff das Correntes, afirma-se que a componente de sequência zero da corrente é nula ($I_0 = I_a + I_b + I_c = 0$).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \text{ e } \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \qquad (19)$$

Em (20), a corrente I_a é calculada pela tensão de fase V_a dividida pela soma da impedância Z_1 (impedância da fase) e a impedância de falta Z_f. As correntes I_b e I_c estão relacionadas à corrente I_a através de fatores α e α^2, que representam a simetria das fases em um sistema trifásico.

$$\begin{cases} I_a = I_1 = \frac{V_a}{Z_1 + Z_f} \\ I_b = I_1 \alpha \\ I_c = I_1 \alpha^2 \end{cases} \quad (20)$$

Assumindo a matriz diagonal da impedância de falta, Z_f, o vetor da corrente de falta pode também ser estimado por (21), a qual depende de uma operação de inversão de matriz e requer mais informações e dados do que os outros vetores de corrente calculados por (13) e (18), que são mais diretos e baseados em medições simples de corrente.

$$J_f = \left(Z_{ff}^B + Z_f\right)^{-1} V_f(0) \quad (21)$$

Em SDEEs com GDs conectados, a matriz de impedância de barra precisa ser recalculada. Tal ajuste é realizado com uso da redução de Kron, técnica geralmente utilizada para reduzir as barras dos sistemas que possuem injeção de corrente nula ou para transferir os efeitos do cabo neutro para as fases, podendo ser estendida para considerar os efeitos provocados pela presença dos GDs.

2.2.2 Influência da presença de GDs na rede de distribuição elétrica.

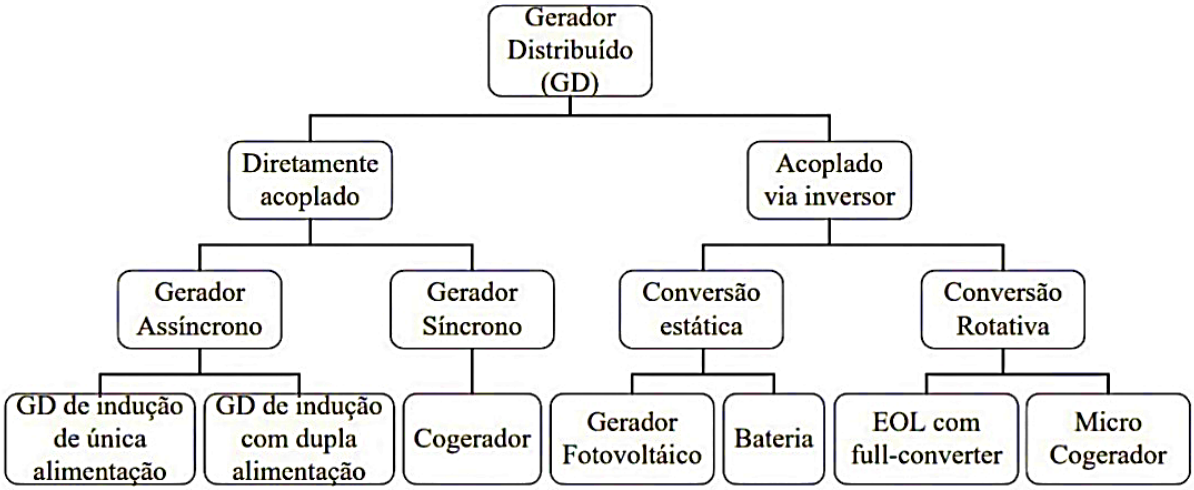
De acordo com Vargas (2018), a escolha do tipo de gerador influencia diretamente o desempenho do sistema elétrico, bem como sua interação com os dispositivos de proteção existentes, dependendo de suas características construtivas e da maneira como são conectadas à rede, os arranjos mais comuns que os GDs podem estar presentes na rede elétrica são representados na Figura 9.

Segundo Reiz (2019, p. 30), “[...] As diferentes tecnologias de GDs existentes podem ser divididas em duas categorias: GDs rotativos, que podem ser acoplados diretamente à rede ou através de um transformador; e GDs conectados por meio de conversores eletrônicos.”

Os GDs baseados em inversores exibem um comportamento similar, pois o inversor regula e restringe as correntes de curto-circuito, porque possuem um módulo controlador que limita a corrente, estabelecendo um valor máximo que pode ser entregue mesmo em condições de curto-circuito. Em contrapartida, os geradores distribuídos rotativos apresentam uma contribuição mais significativa nas correntes de CC devido à tensão remanescente em seus terminais, além de conseguirem sustentar essas correntes por um período mais prolongado.

Os GDs podem ser representados de duas maneiras: como fonte de tensão em série com uma impedância (GDFT) para geradores diretamente acoplados à rede, tendo como exemplo os geradores síncronos e assíncronos, e GDs representados como fonte de corrente (GDFC) para modelos acoplados por meio de inversores, como geradores fotovoltaicos (GFs) (Thurner; Braun, 2018).

Figura 9: Classificações dos tipos de GDs



Fonte: (Reiz, 2019).

2.2.2.1 Gerador de Fonte de Tensão (GDFT)

A matriz de impedância do sistema elétrico é uma matriz simétrica que contém as impedâncias de transferência e impedâncias próprias das barras do sistema. A conexão de um GD ao sistema de distribuição, que se encontra na barra $(N+1)$, na impedância entre as barras h e i, adiciona-se uma nova barra à matriz de impedância.

De modo que é necessário realizar a redução de Kron como demonstrado em (22), cujo propósito é atualizar a matriz de impedância nodal com a presença de um GDFT e manter a dimensão correta da mesma, em que a barra $\bar{Z}_{hi}$ é a impedância de transferência entre as barras h e i, $\bar{Z}_{h(N+1)}$ e $\bar{Z}_{(N+1)i}$ são impedâncias de transferência da barra h e i, respectivamente, em relação à barra do GD que se encontra na posição (N+1).

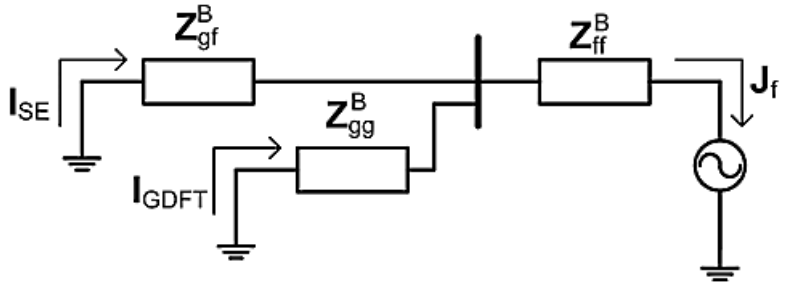
$$\bar{Z}_{hi}^{atual} = \bar{Z}_{hi} - \frac{\bar{Z}_{h(N+1)}\bar{Z}_{(N+1)i}}{\bar{Z}_{kk} + \bar{Z}_{GD}} \qquad (22)$$

Vale dizer que um sistema pode ter múltiplos GDs inseridos, logo, a quantidade de aplicações da redução de Kron no cálculo depende proporcionalmente da

quantidade de GDs no sistema de barramentos, garantindo a correta realização da operação de redução, independentemente do número de GDs instalados no sistema.

Na Figura 10, mostra-se o modelo equivalente, que ilustra como a corrente de falta, J_f, é dividida entre as parcelas da subestação, I_{SE}, e do GDFT, I_{GDFT} são calculadas como demonstrado em (23) e (24). Além de que impedâncias presentes nesse sistema são representadas por Z_{gf}^{B}, Z_{gg}^{B} e Z_{ff}^{B} que denotam a impedância entre a subestação e a barra de falta, impedância equivalente da conexão do GDFT ao sistema e a impedância da barra onde a falta ocorre, respectivamente.

Figura 10: Direções das correntes na barra de transferência para GDFT



Fonte: (Ferreira, 2023).

$$I_{GDFT} = \left(Z_{gg}^{B}\right)^{-1} \bar{Z}_{gf}^{B} J_f \tag{23}$$

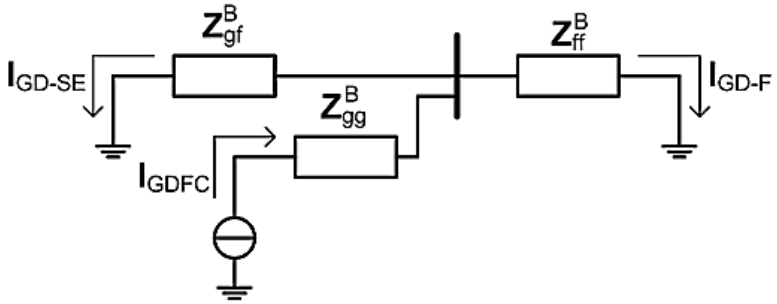
$$I_{SE} = J_f - I_{GDFT} \tag{24}$$

Portanto, afirma-se que a contribuição do GDFT faz com que a impedância vista da subestação seja alterada, afetando a estimativa de distância da falta, a qual é estimada com base na corrente medida na subestação e na impedância da linha, porque a corrente da subestação, I_{SE}, não é mais representativa da corrente de falta total, J_f.

2.2.2.2 Gerador de Fonte de Corrente (GDFC)

Na Figura 11, ilustram-se as direções das correntes na situação de corrente de falta, onde todas as fontes de tensão são consideradas em curto-circuito, permanecendo apenas as fontes de corrente, como o GDFC, que contribuem com a corrente de falta.

Figura 11: Direções das correntes na barra de transferência para GDFC



Fonte: (Ferreira, 2023).

Em (23), onde I_{GD-F} refere-se à contribuição para a corrente de CC do GD conectado à rede via inversores, Z^B_{ff} representa a impedância de barra do nó com defeito, Z^B_{gf} trata-se da impedância de transferência do gerador g em relação à barra em falta, f, e I_{GDFC} refere-se à corrente injetada pelo gerador na condição pré-falta, previamente multiplicado por um fator λ, necessário para corrigi-la devido a situação de CC (Thurner; Braun, 2018).

A parcela da corrente que denota a corrente da subestação é demonstrada por (24), o GDFC pode contribuir na localização de falta, ao contrário do GDFT devido ao comportamento como uma fonte de corrente controlada, injetando corrente proporcional à impedância do sistema sem impor uma tensão fixa, ao contrário do GDFT, que altera significativamente o fluxo de corrente e a impedância aparente vista da subestação. Como resultado, a corrente de falta medida na subestação ainda pode fornecer uma boa estimativa da impedância aparente da linha, minimizando os erros na localização da falta.

$$I_{GD-F} = \left(Z^B_{ff}\right)^{-1} Z^B_{gf} I_{GDFC} \tag{23}$$

$$I_{GD-SE} = I_{GD-F} - I_{GDFC} \tag{24}$$

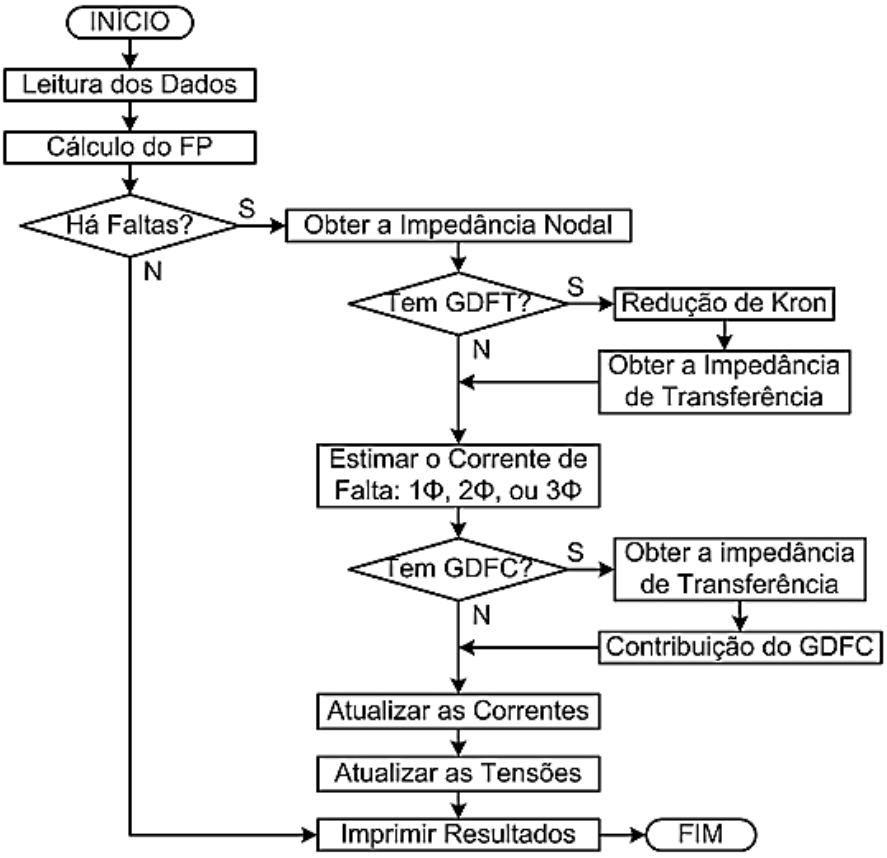
2.3 MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Primeiro, é importante destacar que o algoritmo de localização de faltas analisado neste trabalho é dedicado para redes de distribuição de energia elétrica com geração distribuída e depende do algoritmo de cálculo da corrente de CC, como apresentado na Figura 12 (Ferreira, 2023).

A primeira etapa é a leitura ou registro dos dados do sistema, das configurações da rede, dos parâmetros dos geradores e das cargas, seguido pelo cálculo do fluxo

de potência (FPot), que pode influenciar na resposta do sistema a curtos-circuitos. Após essa etapa, verifica-se se há alguma falta na rede. Caso não haja faltas, o processo é encerrado. No entanto, caso uma falta seja detectada, torna-se necessário obter a impedância nodal, que representa a relação elétrica entre as tensões e corrente em diversos nós do sistema, tal parâmetro influencia diretamente na distribuição das correntes de falta na rede de distribuição de energia elétrica.

Figura 12: Fluxograma do funcionamento do algoritmo de localização de falta



Fonte: (Ferreira, 2023).

Após essa etapa, verifica-se a presença de um GDFT. Em caso positivo, aplica-se a técnica de Redução de Kron para simplificação dos cálculos elétricos e obtém-se a Impedância de Transferência, que se caracteriza pela relação entre a tensão em um ponto do sistema e a corrente injetada em outro ponto. Em seguida, estima-se a corrente de falta, considerando os diferentes tipos de curto-circuito possíveis (monofásico - 1ϕ, bifásico - 2ϕ ou trifásico - 3ϕ).

Na sequência, verifica-se se há GDFC no sistema. Se presente, obtém-se a Impedância de Transferência e adiciona-se a contribuição do GDFC para a corrente

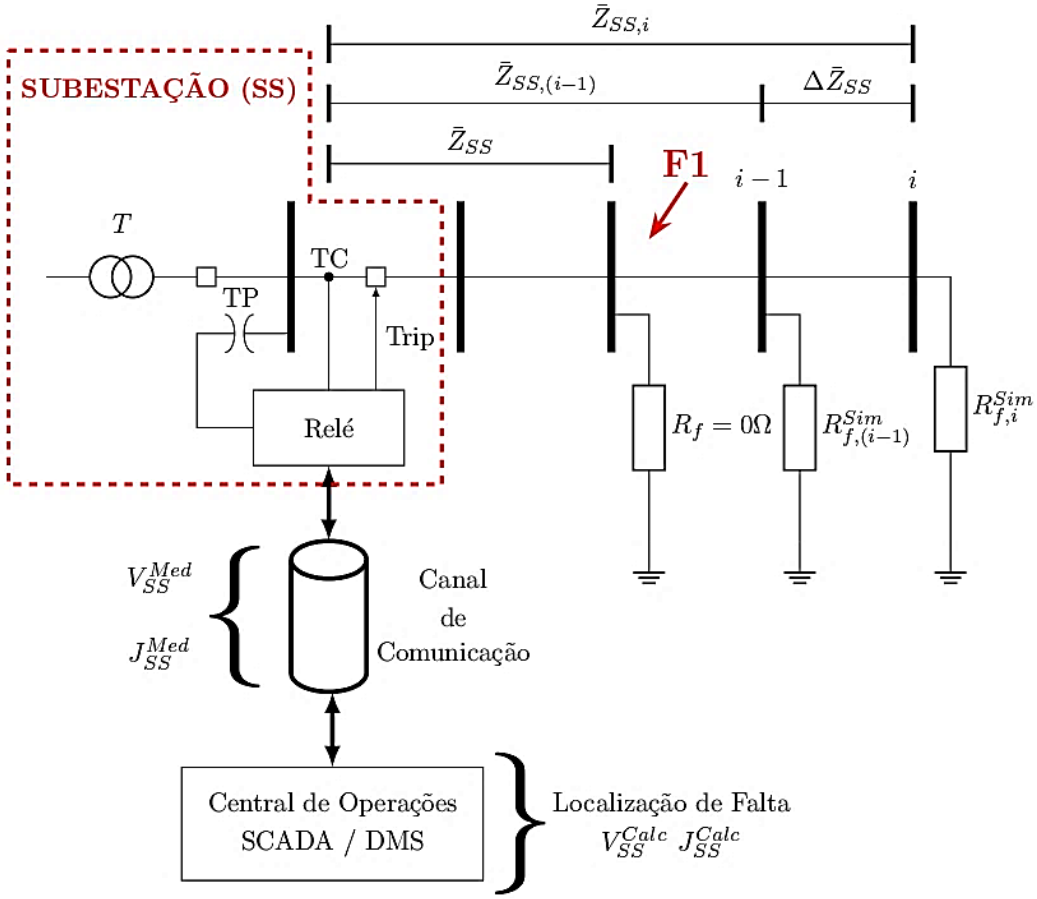
de curto-circuito. Com esses valores determinados, procede-se à atualização das correntes e das tensões, refletindo o impacto da falta no sistema. Por fim, os resultados são impressos, permitindo uma análise detalhada da resposta da rede.

Logo, o cálculo de CC do algoritmo de localização de falta determina a condição de pré-falta, através da solução do fluxo de potência, obtenção da matriz de impedância nodal, estimação da corrente de falta para diferentes tipos de curtos-circuitos e determinação da contribuição dos GDs (Ferreira, 2023).

Inicialmente, a impedância medida na subestação, $\bar{Z}_{SS}$, é comparada com os valores de impedância calculados, $\bar{Z}_{SS,i}$, para a falta incidindo em diferentes regiões da rede de distribuição. Cada região é representada por uma barra b_i que define uma vizinhança e é organizada em um vetor de barras candidatas, Ω_b. A determinação da localização da falta pode ser determinada minimizando o erro da estimativa da impedância de falta, como dado pelo modelo matemático de (25) a (30) (Ferreira, 2023).

Na Figura 13, tem-se uma subestação (SS) conectada a uma linha de transmissão com i quantidades de barras, na qual há um relé que monitora as grandezas elétricas (tensão e corrente) através dos transformadores de potencial (TP) e corrente (TC). As grandezas elétricas (tensão e corrente) medidas $\left(\bar{V}_{SS}^{Med}, \bar{J}_{SS}^{Med}\right)$ são enviadas via um canal de comunicação a uma Central de Operações SCADA/DMS, a qual é responsável pela localização da falta F1 que ocorre em uma posição específica do alimentador, isso permite que os operadores de sistemas elétricos detectem rapidamente falhas na rede e tomem ações corretivas. No caso, a resistência de falta, R_f, pode ser desprezível $\left(R_f = 0\right)$, ou não nula, o que impacta na localização de faltas, como comprovado matematicamente, anteriormente.

Figura 13: Esquema de Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas equações (25) e (26), a impedância medida na subestação, $\bar{Z}_{SS}$, é comparada com os valores de impedância calculados através da análise de curto-circuito, $\bar{Z}^{calc}_{SS,i}$, para a falta incidindo na barra b_i, em diferentes regiões da rede de distribuição.

$$\bar{Z}_{SS} = \frac{\dot{V}^{Med}_{SS}}{j^{Med}_{SS}} = R_{SS} + jX_{SS} \tag{25}$$

$$\bar{Z}^{calc}_{SS,i} = \frac{\dot{V}^{calc}_{SS,i}}{j^{calc}_{SS,i}} = R^{calc}_{SS,i} + jX^{calc}_{SS,i} \tag{26}$$

$$R_{f,i} = \begin{cases} R_{SS} - \Re\{Z_f\}, & para\ R_{SS} > \Re\{\bar{Z}_f\} \\ 0 \quad\quad\quad\quad\quad , & para\ R_{SS} \leq \Re\{\bar{Z}_f\} \end{cases} \tag{27}$$

$$\bar{Z}_{f,i} = \begin{cases} \bar{Z}^{B}_{ii,pp}, & se\ 1\phi\ ou\ 3\phi \\ \bar{Z}^{B}_{ii,pp} + \bar{Z}^{B}_{ii,qq} - \bar{Z}^{B}_{ii,pq} - \bar{Z}^{B}_{ii,qp}, & se\ 2\phi \end{cases} \tag{28}$$

$$b_i \in \Omega_B \in \Omega_b \tag{29}$$

$$\min \varepsilon_{Z,i} = \left|R_{SS} - R^{calc}_{SS,i}\right| + \left|X_{SS} - X^{calc}_{SS,i}\right| \tag{30}$$

A minimização do erro de estimativa, $\varepsilon_{Z,i}$, possibilita, primeiramente, encontrar a região próxima à barra em falta usando um algoritmo de busca da vizinhança através da solução do fluxo de potência e da análise de curto-circuito (Reiz, 2019). Posteriormente, na localização da barra em falta, o procedimento explora a vizinhança usando um algoritmo de busca em largura (Drozdek, 2012) para encontrar um conjunto Ω_m de barras com a provável barra em falta. Para cada i-ésima barra em Ω_m, um processo iterativo é iniciado para atualizar a resistência de falta, correspondente ao método da secante (Rao, 2019).

Devido a não-convexidade do problema, define-se um parâmetro φ, cuja função é determinar o número de barras candidatas em torno de b_f, encontrada na busca da vizinhança, de modo que $\Omega_\varphi \in \Omega_B$. O algoritmo de busca em largura explora φ vizinhanças evitando, assim, soluções ótimas locais. Neste trabalho, o parâmetro φ é definido como um limiar de operação do localizador de faltas, que é dependente do tipo de falta, monofásica (1ϕ), bifásica (2ϕ) ou trifásica (3ϕ), da resistência de falta, R_f, e da inserção do GD.

2.4 MÉTODO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE OPERAÇÃO DO RECEPTOR

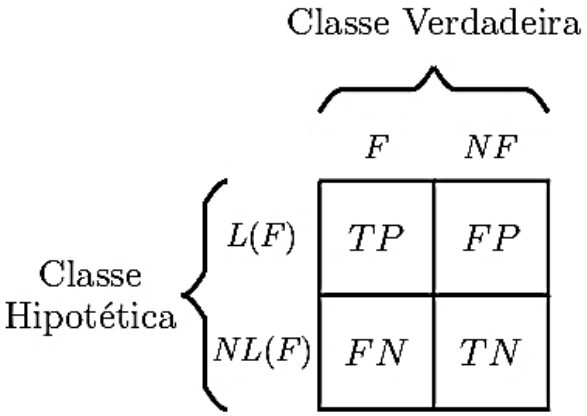
Um gráfico ROC é uma técnica para visualizar, organizar e selecionar classificadores com base em seu desempenho. Os gráficos ROC têm sido usados há muito tempo na teoria de detecção de sinal para representar o balanço entre as taxas de acerto e as taxas de falso alarme dos classificadores (Swets et al., 2000). Os gráficos ROC são conceitualmente simples, mas existem algumas complexidades não óbvias que surgem quando são usados em pesquisas. Formalmente, cada instância I é mapeada para um elemento do conjunto $\{\boldsymbol{p}, \boldsymbol{n}\}$ de rótulos de classes positivos e negativos.

Dado um classificador e uma instância, existem quatro resultados possíveis. Se a instância for positiva e for classificada como positiva, é contada como um verdadeiro positivo; se for classificado como negativo, é contabilizado como um falso negativo; se a instância for negativa e for classificada como negativa, é contada como um verdadeiro negativo; se for classificado como positivo, é contado como um falso positivo.

Portanto, dado um classificador e um conjunto de instâncias, é possível gerar um gráfico ROC bidimensional no qual a taxa de verdadeiro positivo é plotada no eixo Y e a taxa de falso positivo é plotada no eixo X.

O gráfico ROC mostra compensações relativas entre benefícios (verdadeiros positivos) e custos (falsos positivos) (Fawcett, 2006). Na Figura 14, apresenta-se o conceito fundamental para a análise da curva ROC do localizador de faltas, onde se observa a distinção de duas classes: Verdadeira e Hipotética.

Figura 14: Modelo genérico de uma matriz de confusão



Fonte: Elaborado pelo autor.

A classe verdadeira refere-se à ocorrência de falta (F), ou não (NF), em uma barra, enquanto a segunda remete ao acerto do algoritmo, ou seja, se a falta foi corretamente localizada (L), ou não (NL). Assim, existem quatro combinações possíveis que compõem a matriz de confusão: *TP* indica verdadeiros positivos (do inglês, *True Positive*), quando ocorre uma falta na barra e o algoritmo a identifica corretamente; *FP* representa falsos positivos (do inglês, *False Positive*), quando não ocorre falta na barra, mas o algoritmo a localiza erroneamente; *FN* denota falsos negativos (do Inglês, *False Negative*), quando ocorre uma falta na barra e o algoritmo não a identifica; Por fim, *TN* corresponde à verdadeiros negativos (do inglês, *True Negative*), quando não ocorre a falta na barra e o algoritmo não detecta a falta.

Em cada instância, a quantidade de barras da rede de distribuição permite contabilizar os resultados e calcular as taxas, como em (31) e (32). A equação (31) corresponde ao cálculo da taxa de verdadeiros positivos, ou sensibilidade, a qual é a relação entre o número de instâncias classificadas corretamente pelo número total de todas as instâncias positivas da amostra.

Em (32), representa-se o cálculo da taxa de falsos positivos, também conhecido como taxa de alarme falso, é a relação entre o número de instâncias classificadas erroneamente pelo número total de todas as instâncias negativas da amostra.

Para a análise comparativa, consideram-se os conceitos de precisão e exatidão. A precisão, cujo resultado é obtido por (33), corresponde à medida da capacidade do algoritmo de não classificar incorretamente instâncias negativas como positivas, e vice-versa. A exatidão, cujo cálculo é dado por (34), é a capacidade do algoritmo de classificar corretamente tanto as instâncias positivas quanto as negativas.

$$t_p rate = \frac{TP}{FN + TP} \tag{31}$$

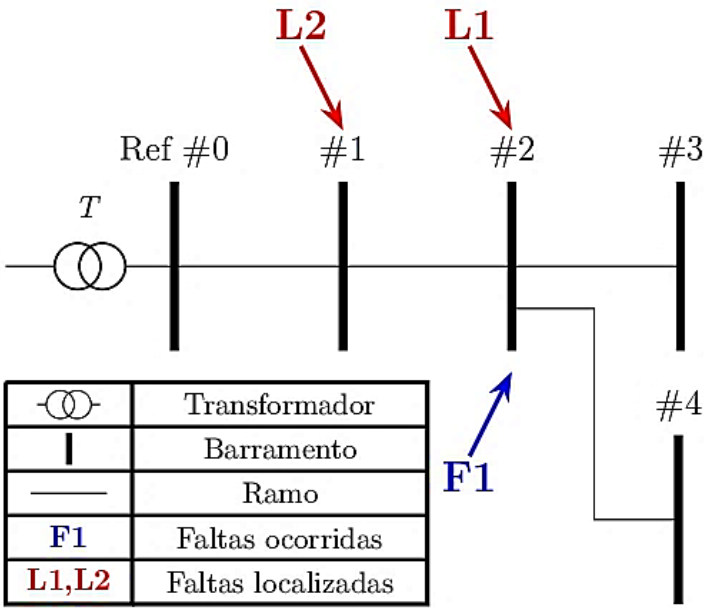
$$f_p rate = \frac{FP}{TN + FP} \tag{32}$$

$$precisão = \frac{TP}{TP + FP} \tag{33}$$

$$exatidão = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \tag{34}$$

Na Figura 15, mostra-se duas simulações do algoritmo de localização de faltas em um diagrama ilustrativo de 4 barras, alimentadas por 1 transformador de potência, *T*, para demonstrar a aplicação do conceito da matriz de confusão explicitada na Figura 14 na avaliação da capacidade do algoritmo de localizar a falta F1.

Figura 15: Exemplo didático de 2 faltas em um diagrama elétrico de barramentos

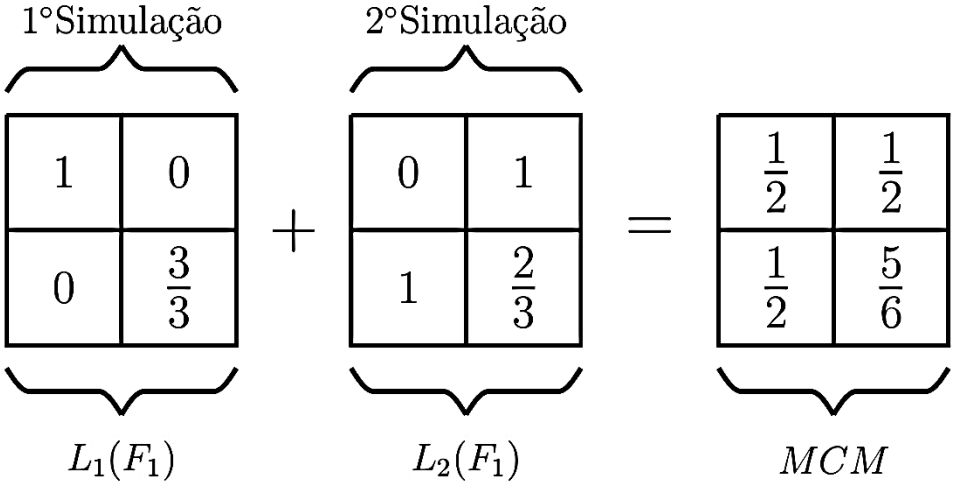


Fonte: Elaborado pelo autor.

Tal análise é demonstrada em mais detalhes na Figura 16, que representa um caso meramente demonstrativo, mas o resultado apontado pela Figura 16 é verossímil e coerente, porque houve apenas 1 acerto em 2 simulações, caracterizando uma taxa de falsos positivos, uma taxa de verdadeiros positivos, precisão e exatidão iguais a 0.5, 0.375, 0.5 e 0.57,respectivamente .

Na 1°simulação $[L1(F1)]$, nota-se que a falta verdadeira está sobre a barra #2 e a barra hipotética apontada pelo algoritmo de localização de faltas é a barra #2, assim houve o acerto do algoritmo, assim, TP = 1, FP = 0, FN = 0 e TN = 3/3 = 1. Já na 2°simulação $[L2(F1)]$, nota-se que a falta verdadeira permanece sobre a barra #2, mas a barra hipotética apontada pelo algoritmo de localização de faltas é a barra #1, logo, a falta ocorreu e o algoritmo falhou na localização de falta, dessa forma, TP = 0, FP = 1, FN = 1 e TN = 2/3.

Figura 16: Matriz de confusão média de 2 simulações baseada na Figura 15

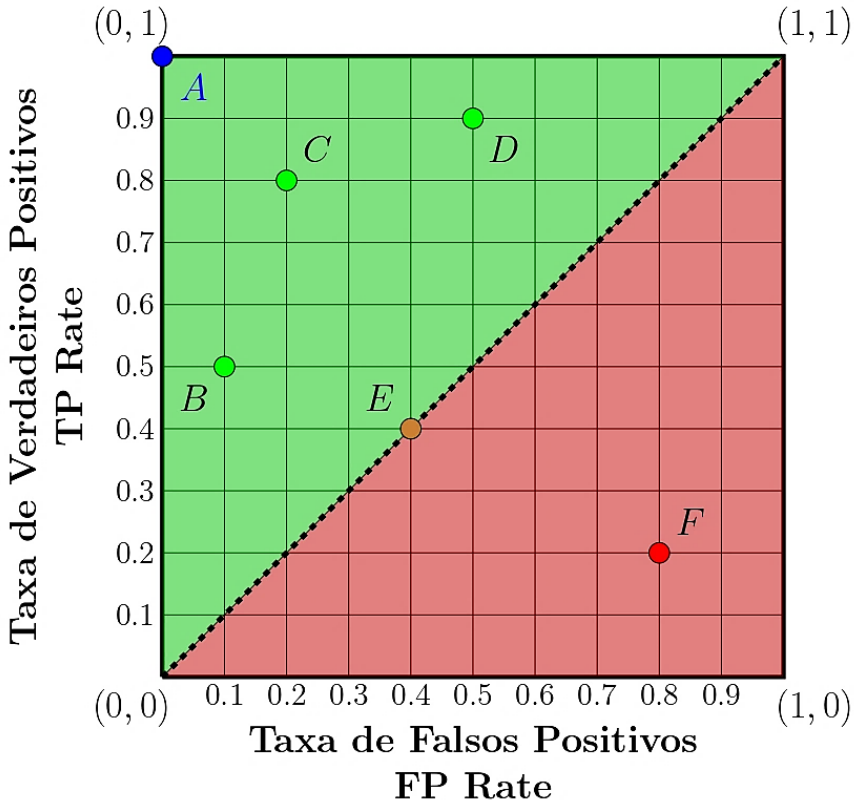


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 17, apresenta-se o espaço ROC que demonstra as diversas classificações de cada ponto ($f_p rate$, $t_p rate$) e as regiões possíveis onde a curva ROC pode estar situada. Observa-se que a tendência para um bom desempenho é o deslocamento desses pontos do ponto $(0,0)$ para o ponto $(1,1)$ ao longo da linha diagonal $y = x$, que serve como referência para avaliar como o classificador se compara a uma previsão aleatória. Essa diagonal é plotada quando a taxa de verdadeiros positivos ($t_p rate$) é igual à taxa de falsos positivos ($f_p rate$). O ponto de operação do classificador pode se encontrar abaixo ou sobreposto a linha diagonal, caracterizando a região vermelha, o que indica um desempenho ruim do classificador, como ocorre com os pontos E e F.

Entretanto, quando esse ponto está acima da linha diagonal, ou seja, está na região verde, indica um desempenho bom do classificador, como ocorre com os pontos A, B, C e D. Além disso, o algoritmo de localização de faltas, como um classificador pode apresentar pontos de operação em diferentes posições na região ROC dependendo do seu limiar de operação, isto é, do valor do parâmetro de ajuste φ que determina a quantidade de vizinhanças exploradas na busca da barra em falta.

Figura 17: Modelo de uma curva ROC com 6 pontos distintos

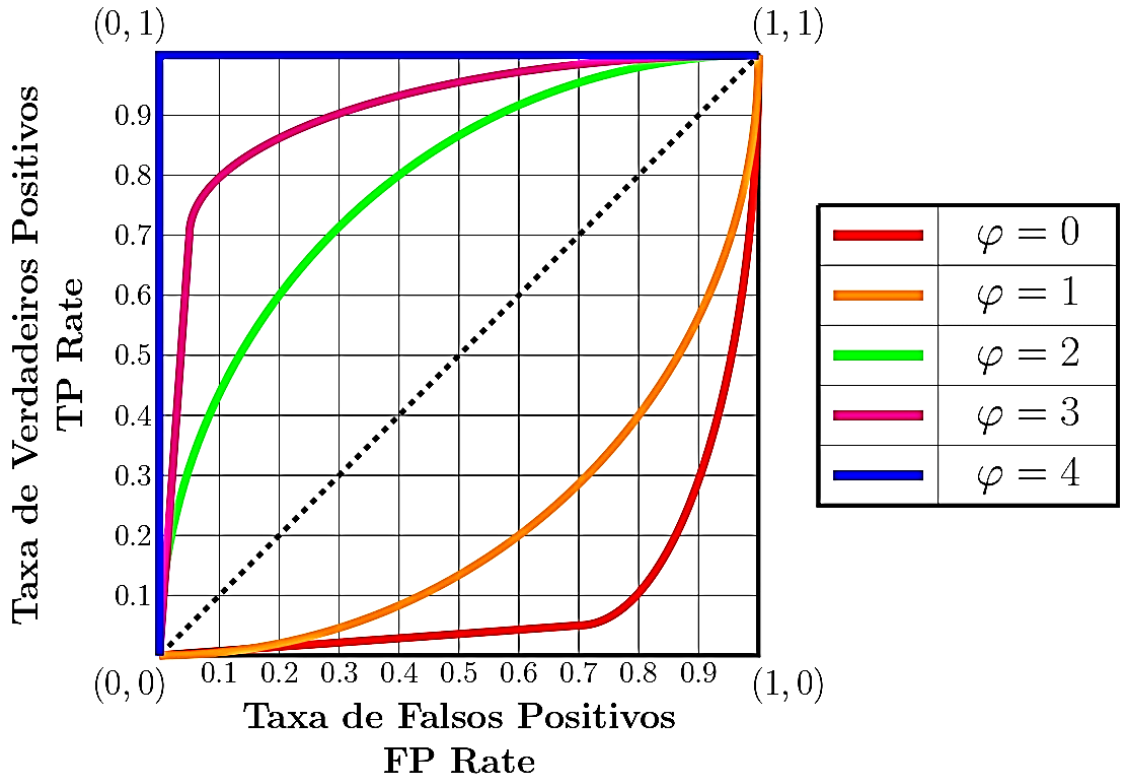


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 18, complementa-se o exposto anteriormente, apresentando uma projeção de comportamento da curva ROC, que é uma representação gráfica da atuação de um classificador binário em diferentes limiares de decisão, conforme a variação do parâmetro φ. Nessas projeções, há uma variação contínua nas condições de dependência do localizador de falta, entretanto, a simulação computacional de faltas em redes de distribuição é realizada de forma inteira. Em cada instância, seleciona-se aleatoriamente uma barra da rede e um valor da resistência de falta. Os resultados das instancias são organizados no conjunto $\{\boldsymbol{p}, \boldsymbol{n}\}$ para geração de pontos ROC usando o algoritmo de Fawcett (2006), onde $\boldsymbol{p}$ representa os casos positivos

(faltas corretamente identificadas), e $\boldsymbol{n}$, os negativos (ausência de falta ou falsas detecções).

Figura 18: Efeito da variação do parâmetro φ na curva ROC

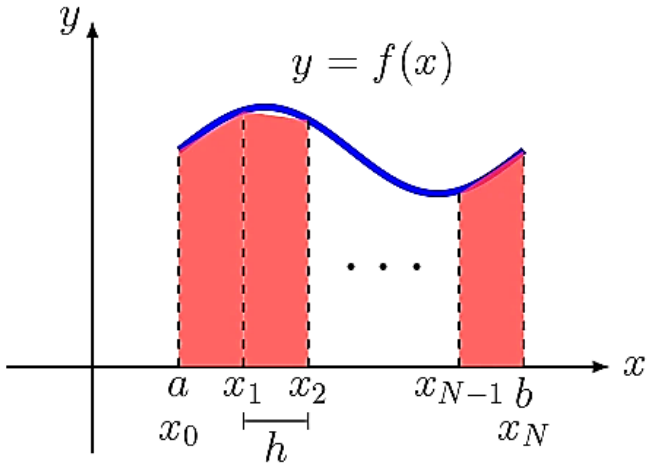


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.1 Conceito do parâmetro AUC em Curvas ROC

De acordo com (Fawcett, 2006), AUC (do inglês, *Area Under The Curve*) é o conceito utilizado para avaliação da curva ROC de um modelo de classificação, representando a sua porção unitária de área $\{AUC \in \mathbb{R} | 0 \leq AUC \leq 1\}$. Na Figura 19, tem-se uma curva genérica $f(x)$ e calcula-se a área embaixo da curva por meio da integral dos limites de a a b, cujo resultado pode ser estimado por meio da divisão de diversas áreas trapezoidais, a partir do número de pontos, N, dos vetores x e y igualmente espaçados em h.

Figura 19: Área da curva $f(x)$ por meio da aplicação do método dos trapézios



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, este parâmetro é crucial para a análise deste trabalho, onde se espera a proporcionalidade direta entre o aumento do parâmetro φ e do valor de AUC, a qual é obtida somando as áreas dos trapézios formados entre os pontos da curva ROC, garantindo uma aproximação numérica da integral definida, tal parâmetro é calculado por (35).

$$\int_a^b f(x) \approx \frac{h}{2}\left[f(x_0) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} f(x_i) + f(x_N)\right] \qquad (35)$$

Dessa forma, o método dos trapézios ilustrado fornece um princípio fundamental para a computação da AUC, garantindo uma estimativa precisa da capacidade discriminativa de um classificador.

2.4.2 Valor de Limiar (*Thereshold or Cut-Off*) na Curva ROC

A técnica da curva ROC é popular no campo das ciências biológicas, principalmente na área médica, um exemplo clássico e prático é o tratamento de pacientes com câncer de mama e a aplicação de uma droga para o combate do tumor, entretanto, caso o paciente apresente um alto índice de massa corporal (IMC), a tendência é a absorção da parte da droga pela gordura presente no corpo antes que atinja o tumor, o que prejudica a eficácia da quimioterapia.

Baseado nesse contexto, fez-se o levantamento de dados por meio do registro do número de pacientes saudáveis $(t_p rate)$ e doentes $(f_p rate)$ após o tratamento em

questão, gerando um diagnóstico clínico em relação a diferentes valores de limiar do IMC, a fim de validar o quão eficiente e eficaz foi o procedimento utilizado à medida que se aumentava o critério do valor de limiar do IMC.

De acordo com (Hajian-Tilaki, 2013), assume-se que os pacientes são diagnosticados como doentes se o valor de IMC for maior do que o valor de limiar definido, mostrando-se os cálculos da sensibilidade e da especificidade de vários valores de corte do índice de massa corporal (IMC) para a previsão do câncer da mama assim como é mostrado na Tabela 1.

Nota-se que quanto maior for o valor de limiar, menor será o critério de rigorosidade, o que culmina no aumento dos casos de falsos e verdadeiros negativos, porque quanto menor for o IMC, maior é o desempenho da absorção da droga. A análise desses dados via curva ROC e AUC permite a seleção otimizada do ponto de corte e a comparação com outros métodos, ou variáveis.

Tabela 1: Exemplo de dados reais com sensibilidade e especificidade de vários pontos de corte do IMC para detectar o cancro de mama

Valor de Limiar do IMC (kg/m^2)	Doentes $(n = 100)$		Saudáveis $(n = 200)$		Sensitividade	Especificidade
	TP	FN	TP	FN		
18	100	0	200	0	1,000	0,000
20	100	0	198	2	1,000	0,010
22	99	1	177	23	0,990	0,115
24	95	5	117	83	0,950	0,41
26	85	15	80	120	0,850	0,600
28	66	34	53	147	0,660	0,735
30	47	53	27	173	0,470	0,865
32	34	66	17	183	0,340	0,915
34	21	79	14	186	0,210	0,930
36	17	83	6	194	0,170	0,970
38	7	93	4	194	0,070	0,980
40	1	99	1	199	0,010	0,995

Fonte: Hajian-Tilaki, 2013.

Esta subseção é dedicada a elucidar o porquê da variação do valor de limiar e da seleção do seu melhor ponto de limiar são fundamentais na análise deste trabalho, pois a curva ROC e o valor limiar são relevantes quando os modelos de classificação geram probabilidades de pertencer a uma classe específica e se torna necessário decidir um ponto de corte para atribuir as instâncias às classes.

Afirma-se que a análise se trata da capacidade do algoritmo em identificar uma falta randômica dentre as barras existentes em um alimentador de distribuição, onde há apenas as possibilidades da falta ser localizada ou não, entretanto, esses dados das simulações são gerados a partir da variação crescente da resistência de falta (R_f), os quais servem como os valores limiares citados nessa subseção.

2.4.3 Procedimentos do Tratamento de Dados para a Análise

O algoritmo de localização de faltas foi implementado no ambiente de desenvolvimento integrado, considerando os dados de uma rede de distribuição real. Cada instância simulada fornece os seguintes dados: 1) barra em falta; 2) barra localizada; 3) resistência de falta (R_f) estimada, em ohms; e 4) tempo de processamento do algoritmo, em ms. Em seguida, fez-se o seguinte procedimento para o tratamento de dados, criaram-se 3 macros para realizar o tratamento de dados da análise da curva ROC, conforme simplificado pelos pseudocódigos.

Primeiro, o usuário deve apagar todo a planilha, desde o conteúdo, formatação e objetos configurados (gráficos) conforme demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1: Pseudocódigo da Macro “Limpar”

```
01- INICIO Apagar()
02-     Selecionar todas as células da planilha
03-     Limpar conteúdos
04-     Limpar formatação
05-     PARA CADA gráfico na planilha FAÇA
06-         Excluir gráfico
07-     FIM PARA
08- FIM
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Quadro 2, mostra-se o procedimento de cálculo a ser seguido, onde os dados obtidos pela simulação são copiados e colados na célula E1, a qual foi escolhida casualmente para padronizar as posições dos resultados das simulações. Em seguida, os dados são convertidos para colunas, utilizando o caractere de “espaço” como delimitador, e removendo as colunas de resistência de falta (R_f) e tempo de processamento, isolando apenas os barramentos com as faltas simuladas e as localizações dos barramentos com falta efetuadas pelo algoritmo de localização de faltas.

Quadro 2: Pseudocódigo da Macro “Calcular”

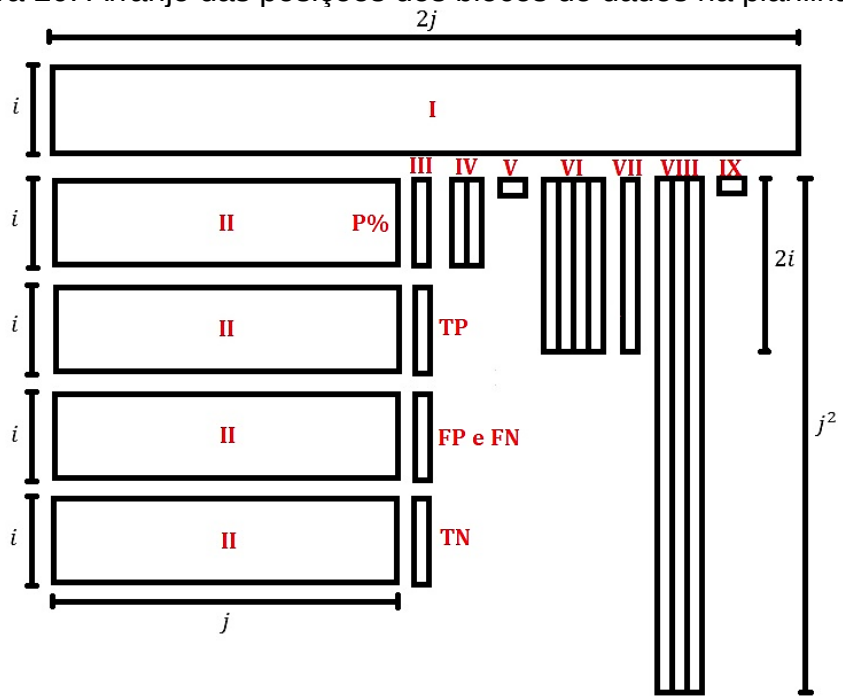
```
01- INICIO Calcular()
02-     Definir e configurar os parâmetros iniciais de cálculo.
03-     SE célula E1 não está vazia ENTÃO
04-         Converter texto dos dados da coluna E para colunas.
05-         Remover colunas de resistência de falta e tempo de processamento.
06-         Registrar o número total de linhas e o número total de colunas.
07-         Calcular TP, FP, FN, TN e montar as matrizes de confusão médias.
08-         Calcular P%_média, Exatidão e Precisão
09-         PARA CADA coluna i FAÇA
10-             MenorErro ← infinito
11-             CombinaçãoIdeal ← nulo
12-             PARA CADA coluna j ≠ i (aleatória) FAÇA
13-                 Calcular quantidades de L e NL.
14-                 Calcular f_p rate e t_p rate .
15-                 Calcular AUC.
16-                 Calcular erro e ← |AUC − P%_média|.
17-                 SE e < menorErro ENTÃO
18-                     menorErro ← e.
19-                     combinaçãoIdeal ← (i, j).
20-                 FIM SE
21-             FIM PARA
22-             SE menorErro ≠ 0 ENTÃO
23-                 Armazenar combinaçãoIdeal como melhor.
24-             FIM SE
25-         FIM PARA
26-         Recalcular P%_média, Exatidão e Precisão para a melhor combinação
27-         Plotar gráfico Exatidão x Precisão
28-         Plotar gráfico f_p rate x t_p rate
29-     FIM SE
30- FIM
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de automatizar a análise da curva ROC para se adaptar aos diferentes intervalos de valores de R_f, por exemplo $\{R_f \in \mathbb{R} \mid 0 \leq R_f \leq 4,\ R_f \equiv 0\ (mod\ 0{,}2)\}$, o que resultaria em 21 linhas, tal valor pode mudar dependendo da alteração dos limites dos parâmetros da simulação do algoritmo de localização de falta, como o limite de R_f ou do passo inserido, esses impactam diretamente no número de linhas dos dados gerados, representadas por i. Além da necessidade de adaptação às diferentes quantidades de simulações que podem ser feitas, no caso o número de colunas, representadas por j, sempre será o dobro do número de simulações (1 coluna contendo a barra com a falta e 1 coluna contendo a barra localizada com falta), conforme representados pelo bloco I da Figura 20, logo, leem-se os valores de linha

e coluna antes de, propriamente, iniciar o tratamento de dados, permitindo o ajuste automático de quaisquer possíveis intervalos de dados.

Figura 20: Arranjo das posições dos blocos de dados na planilha



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, são montadas matrizes de confusão $(i\ x\ j)$ pelos cálculos dos parâmetros TP, FP, FN e TN com 4 blocos de matrizes espaçados verticalmente em 3 linhas, cujos valores de TP, FP e FN podem ser determinados por 1 ou 0, e TN pode ser expresso por $1/|b_i|$ ou $(|b_i|-1)/|b_i|$, em caso verdadeiro ou falso de forma respectiva, onde b_i representa o número total de barramentos no SDEE analisado, conforme discorrido anteriormente com a didática apresentada pelo esquema da Figura 15, esses blocos estão representados como II na Figura 20.

Na horizontal desses blocos, são realizados os cálculos das médias de TP, FP, FN, TN e P% para cada linha, os quais são representados pelos blocos III da Figura 20, sendo que $P\%$ é calculado pela soma de todos os elementos das colunas de uma linha dividido pelo total de elementos das colunas e multiplicado por 100. Depois, realiza-se o cálculo dos valores de $precisão\ x\ exatidão$, localizados no bloco IV, cujos cálculos foram demonstrados por (34) e (35), de forma respectiva.

A partir deste momento, os cálculos dos blocos V, VI, VII, VIII e IX são recalculados em vários *loops* para garantir que a melhor solução seja encontrada.

Entretanto, afirma-se que o procedimento é inserir 2 colunas (total de linhas = $2i$), substituindo os acertos por L e os erros por NL, localizados no bloco VI, dessa forma, são calculadas as contagens totais de L e NL no bloco V da Figura 20. Ainda no bloco VI da Figura 20, também são calculadas as colunas de $f_p rate$ e $t_p rate$, além dos valores de AUC no bloco VII, aplicando o método do trapézio discutido na subseção 2.4.1.

Após isso, calcula-se o erro absoluto entre os valores de AUC e $P\%_{média}$ para cada uma das possíveis comparações (total de linhas = j^2), o qual é localizado no bloco VIII, onde espera-se que o caso ideal aponte um erro relativo nulo, entretanto, espera-se que caso isso não ocorra, a combinação de colunas ideal é aquela que proporcionou o menor erro absoluto, o que está posicionado no bloco IX, mantendo a coerência entre a curva ROC calculada e a porcentagem média de acerto do algoritmo para a condição de operação, tipo de fase e resistência de falta configuradas no código, haja vista que tais parâmetros não podem ser acentuadamente discrepantes.

Por fim, após a seleção da melhor combinação possível de colunas, reinsere-se essa combinação, reatualizando os blocos V, VI, VII, VIII e IX, e plotando os gráficos de Exatidão por Precisão e os gráficos de $f_p rate \; x \; t_p rate$ ao final da compilação.

Ao final da compilação, o usuário pode salvar os resultados dessa compilação por meio da macro “Salvar”, esquematizada pelo Quadro 3, e visualizada pela Figura 21. A finalidade para a criação dessa macro é registrar os dados de diferentes simulações em planilhas separadamente na mesma pasta, nomeando o arquivo como Caminho = "C:\Users\" & Usuario & "\Documents\" & PastaDestino & "\" & NomeArquivo & "", onde “Usuario” é o nome do usuário registrado no computador do usuário, “PastaDestino” é a pasta onde a planilha estará localizada.

Além disso, tem-se NomeArquivo = "" & CO & " - " & TF & "", onde o nome do arquivo é determinado pelas configurações do usuário sobre a condição de operação (CO), tipo de fase (TF) e tamanho do raio de ajuste (Phi = 0, Phi = 1, Phi = 2, Phi = 3 ou Phi = 4), conforme visualizado no formulário da Figura 21, sendo que o nome da aba da planilha é dado pelo tamanho do raio de ajuste (φ), obtendo-se um grupo de planilhas como demonstrado na Figura 22.

Dessa forma, basta disponibilizar uma visualização geral dos resultados, com diferentes simulações para diferentes valores do raio de ajuste φ. Com esse objetivo centrado, foi realizado um tratamento de dados no Power Query, formatando e

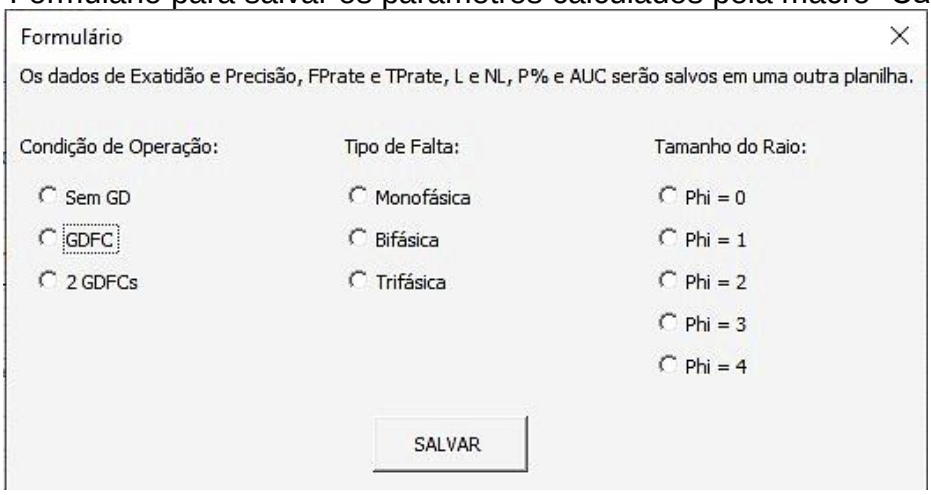
alinhando as colunas para realizar a plotagem de diferentes gráficos para cada uma das planilhas separadamente, conforme demonstrado pela Figura 23, onde o usuário apenas precisa alterar os valores das listas suspensas da condição de operação e tipo de falta para a visualização dos gráficos obtidos em simulações passadas.

Quadro 3: Pseudocódigo da Macro “Salvar”

```
01- INICIO Salvar()
02-         Exibir formulário de seleção
03-         SE botão OK for pressionado ENTÃO
04-             Configurar condição de operação e tipo de fase
05-             Criar nova planilha
06-             Copiar dados relevantes da análise ROC
07-             Armazenar na nova planilha
08-         FIM SE
09- FIM
```

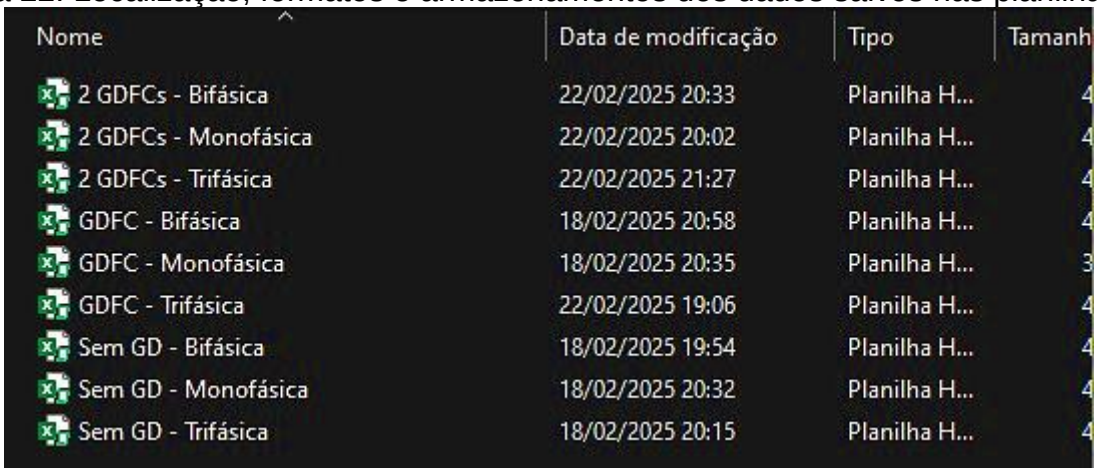
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21: Formulário para salvar os parâmetros calculados pela macro “Calcular”



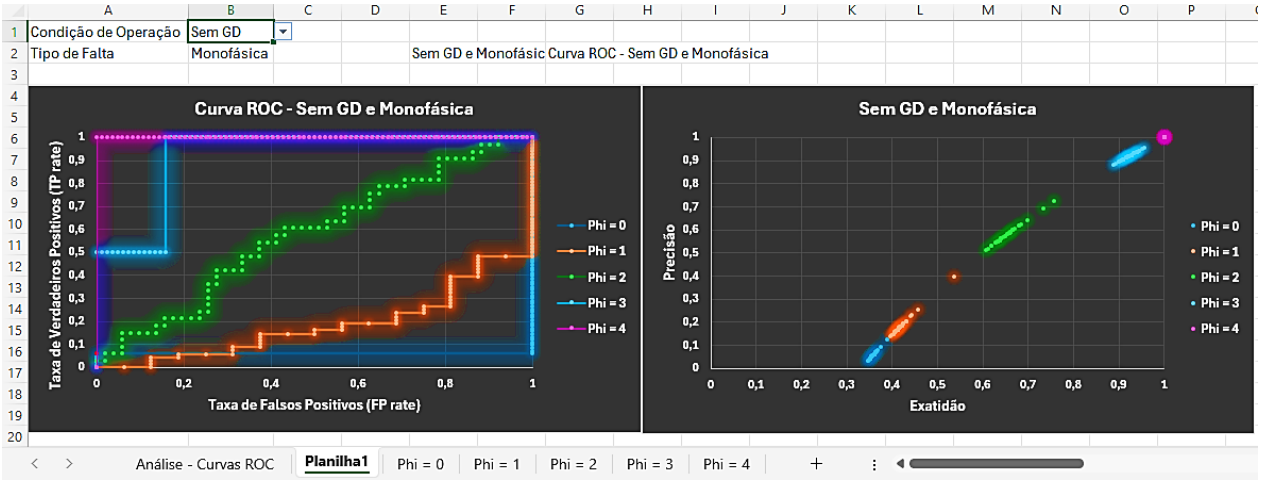
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22: Localização, formatos e armazenamentos dos dados salvos nas planilhas



Fonte: Elaborado pelo autor.

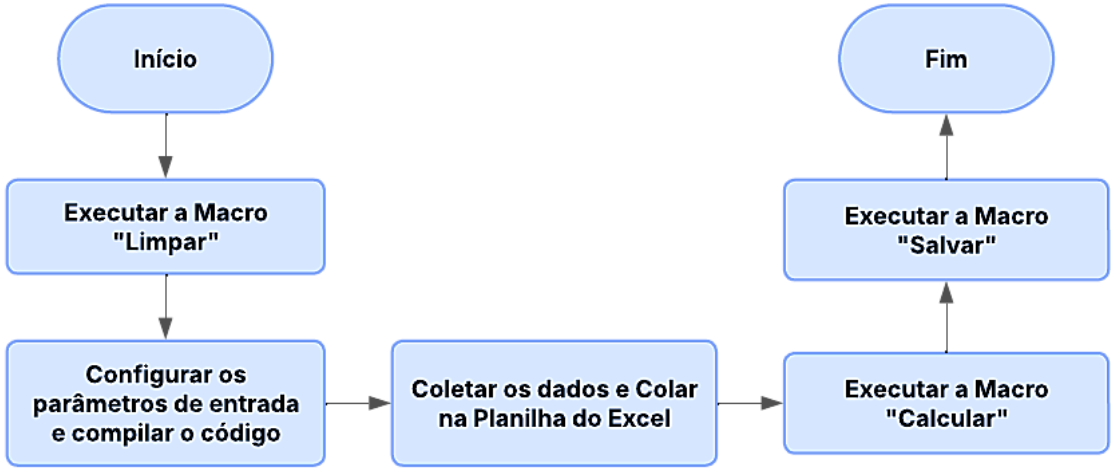
Figura 23: Visualização da Planilha Automática para Análise das Curvas ROC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, apenas espera-se que o usuário utilize o passo-a-passo demonstrado pelo fluxograma da Figura 24 para realizar a análise das curvas ROC, o qual deve executar a macro “Limpar” para deletar os dados de simulações anteriores, inserir os dados do algoritmo de localização de falta na planilha, executar a macro “Calcular” e salvar esses dados para uma visualização mais detalhada na outra aba da Planilha.

Figura 24: Fluxograma do tratamento de dados para análise da curva ROC

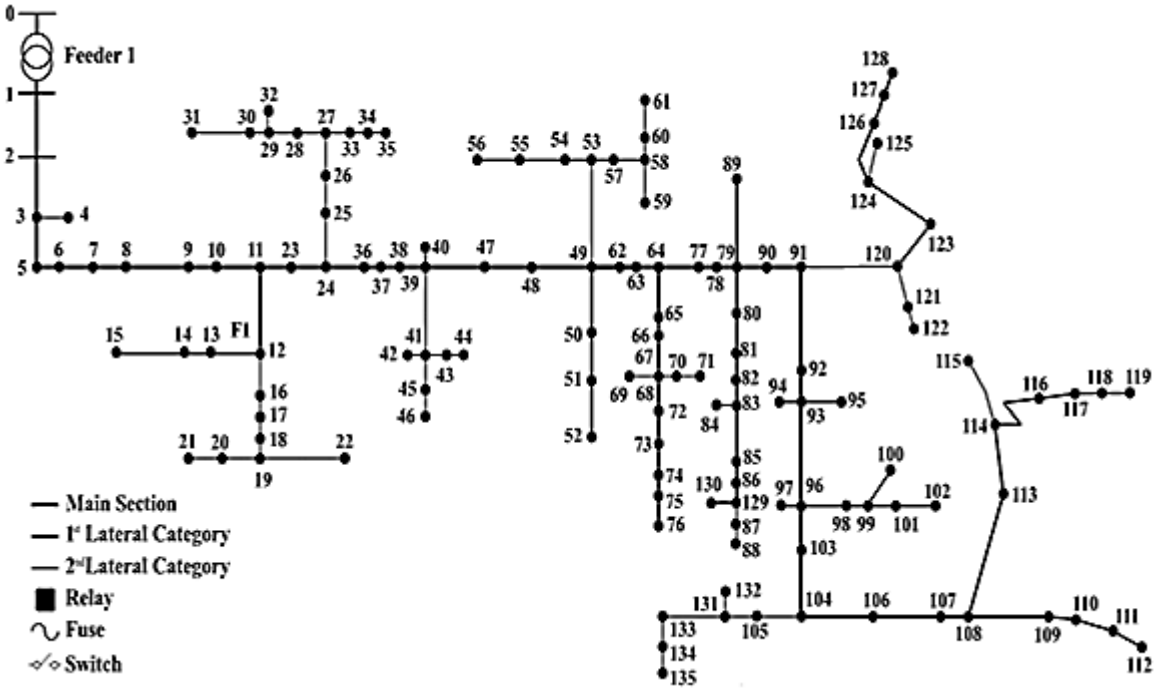


Fonte: Elaborado pelo autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 25 representa o diagrama unifilar de uma rede de distribuição funcional de uma concessionária de energia elétrica no Brasil que foi utilizado como base para o algoritmo de localização de falta, trata-se de uma rede de distribuição aérea convencional trifásica de 135 barras com magnitude da tensão de linha de 13,8 kV na barra de subestação.

Figura 25: Diagrama unifilar da rede de distribuição com 135 barras



Fonte: LaPSEE, 2022.

Assim, realizaram-se 160 simulações e geraram-se 42 amostras, configurando uma amostragem de 160 colunas diferentes (25.600 combinações possíveis) e 84 instâncias na curva ROC, os quais são determinados pela resistência de falta $\{R_f \in \mathbb{R} \mid 0 \leq R_f \leq 4,\ R_f \equiv 0\ (mod\ 0{,}1)\}$. Esses dados são configurados por meio da seleção do tipo de falta $(1\phi, 2\phi\ ou\ 3\phi)$, a condição de operação (Sem GD, GDFC ou 2 GDFCs) e do parâmetro φ a ser simulado $\{\varphi \in \mathbb{N} \mid 0 \leq \varphi \leq 8\}$. Após a geração dessas instâncias, utilizou-se o software Microsoft Excel® para realizar o tratamento de dados.

3.1 1°CASO: SEM GD

Assim como comentado anteriormente sobre o caso sem GD, o controle e monitoramento da rede são relativamente mais simples, uma vez que a origem da energia é mais previsível e desconsidera a influência de outras parcelas de correntes.

Com $\varphi = 0$, o algoritmo de localização de falta tem um desempenho ruim para os três tipos de falta com as curvas ROC abaixo, ou sobrepondo a diagonal e o algoritmo tem melhor desempenho na localização de faltas 2ϕ e 3ϕ com somente uma curva abaixo da diagonal, conforme mostrado nas Figuras 27, 29 e 31.

Na falta 1ϕ, há três curvas abaixo da diagonal (1ϕ, 2ϕ ou 3ϕ), indicando um maior custo computacional na localização deste tipo de falta. O comportamento ideal do algoritmo é atingido com $\varphi = 4$ para todos os tipos de falta. Isso é confirmado nos gráficos de exatidão por precisão, nas Figuras 26, 28 e 30.

Pelas Tabelas 2 e 3, afirma-se que os valores de AUC e P% média começam baixos para $\varphi = 0$, indicando uma performance inicial fraca. Para as faltas 2ϕ e 3ϕ, o algoritmo apresenta um comportamento semelhante, em que o incremento de φ resulta em um aumento da exatidão e precisão, que atingem 100% em φ= 3.

Tabela 2: Valores de AUC e P% média para cada φ na condição sem GD

Sem GD	φ	0		1		2		3		4	
		AUC	$P\%$	AUC	$P\%$	AUC	$P\%$	AUC	$P\%$	AUC	$P\%$
Falta	1ϕ	0,060	5,80	0,103	18,33	0,581	58,05	0,921	91,92	1	100
	2ϕ	0,363	36,28	0,803	80,28	1	100	1	100	1	100
	3ϕ	0,379	37,95	0,816	81,86	0,988	99,30	1	100	1	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3: Valores de L e NL para cada φ na condição sem GD

Sem GD	φ	0		1		2		3		4	
		L	NL	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
Falta	1ϕ	1	83	16	68	51	33	82	2	84	0
	2ϕ	32	52	76	8	84	0	84	0	84	0
	3ϕ	28	56	70	14	83	1	84	0	84	0

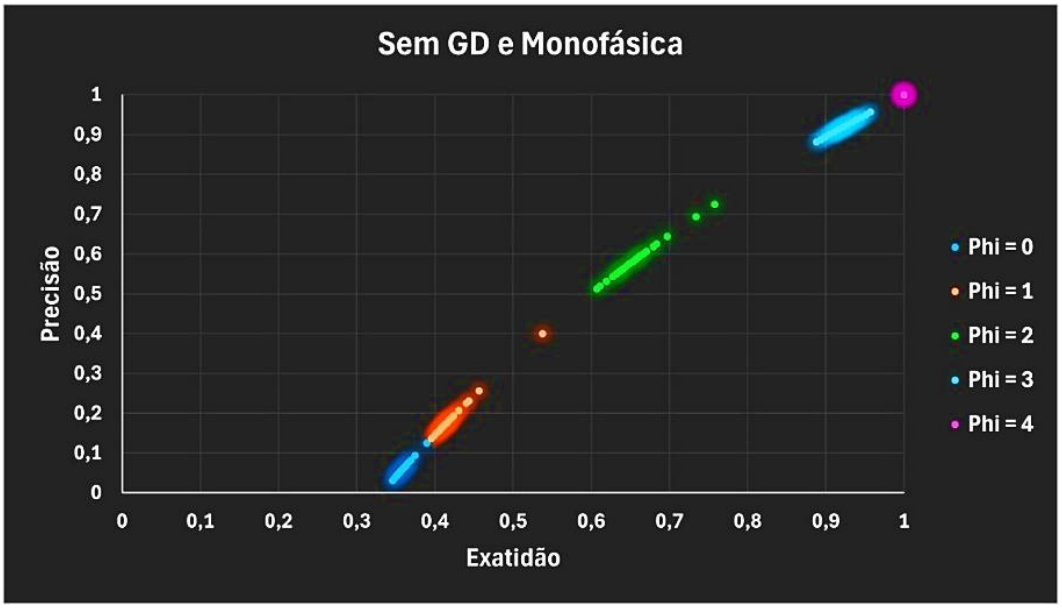
Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse comportamento é degradado para falta 1ϕ em que o algoritmo tem exatidão e precisão abaixo de 50% para $\varphi = 0$ e $\varphi = 1$. Contudo, essas métricas melhoram e atingem 100% para $\varphi = 4$.

3.1.1 Monofásico (1ϕ)

Nas faltas monofásicas, observa-se no gráfico, um desempenho significativamente inferior para os valores de $\varphi = 0,1$ e 2, quando comparado a $\varphi = 3$ e 4. A forma de cálculo da reatância de falta $R_{f,i}$ para falta monofásica depende apenas de um termo $\bar{Z}^{B}_{ii,pp}$, o que apesar de ter menos parcelas a serem consideradas, faz com que seja mais suscetível a desvios quando a medição é influenciada por pequenos erros. Isso se reflete nos baixos valores de exatidão e precisão para os primeiros valores de φ.

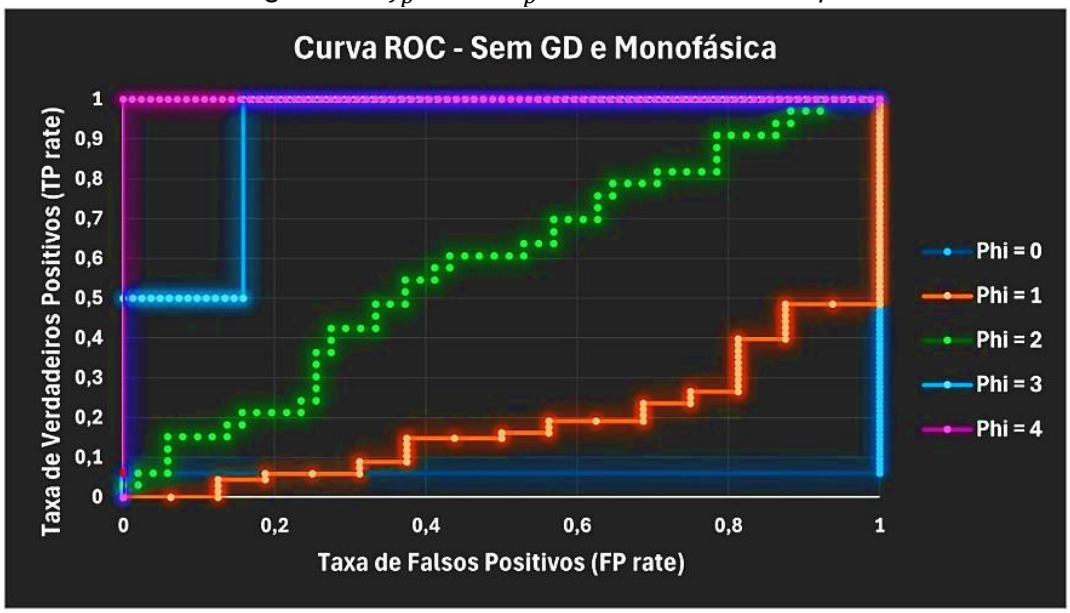
Figura 26: Exatidão x Precisão – Sem GD – 1ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já os melhores desempenhos $(\varphi = 3\ e\ 4)$ indicam que em determinados limiares, o algoritmo consegue isolar corretamente os padrões mesmo em cenários mais ruidosos, sugerindo um efeito positivo da parametrização.

Figura 27: $f_p rate\ x\ t_p rate$ – Sem GD – 1ϕ

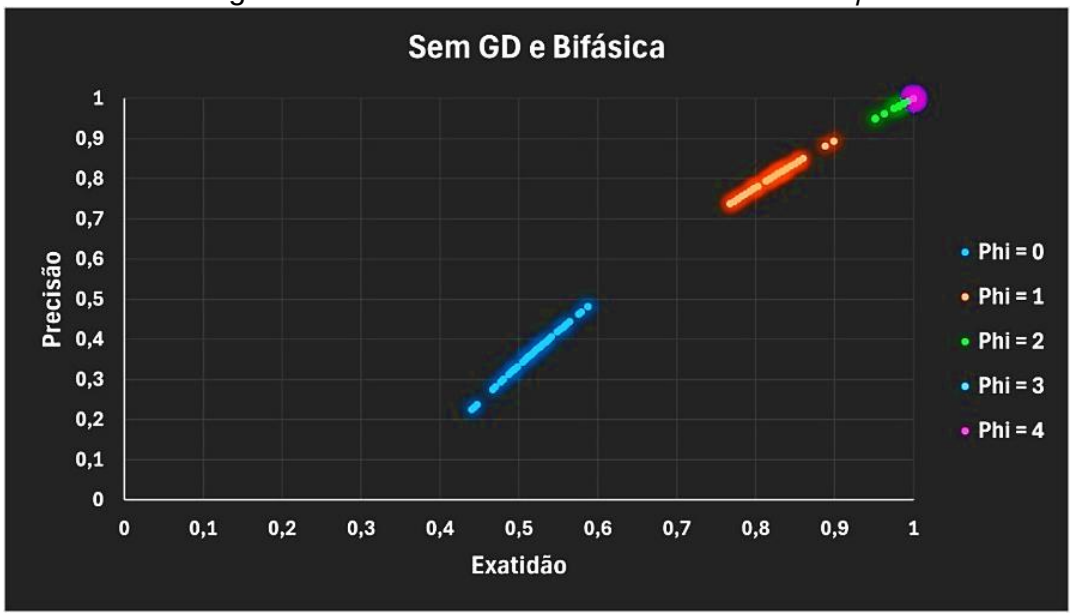


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Bifásico (2ϕ)

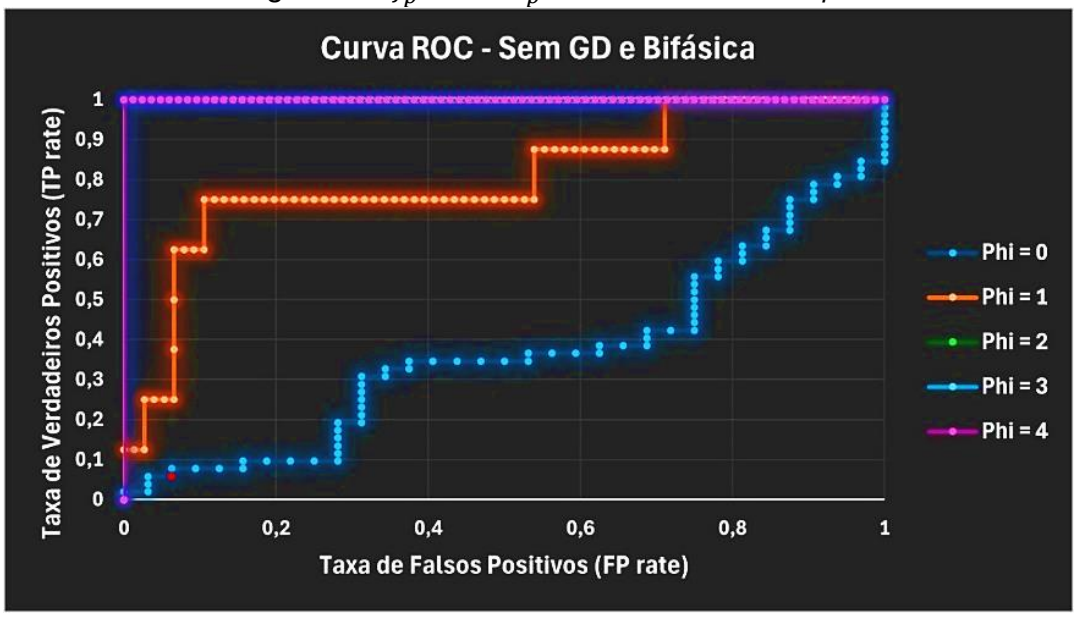
A partir das Figuras 28 e 29, afirma-se que a falta bifásica sem GD apresenta menor sensibilidade ao parâmetro φ, já que valores de $\varphi \geq 2$ são suficientes para o método alcançar desempenho quase perfeito. Uma possível explicação para isso é a simplificação dos padrões de corrente e tensão da condição de operação sem GD, a qual facilita a identificação da falha bifásica.

Figura 28: Exatidão x Precisão – Sem GD – 2ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29: $f_p rate\ x\ t_p rate$ – Sem GD – 2ϕ

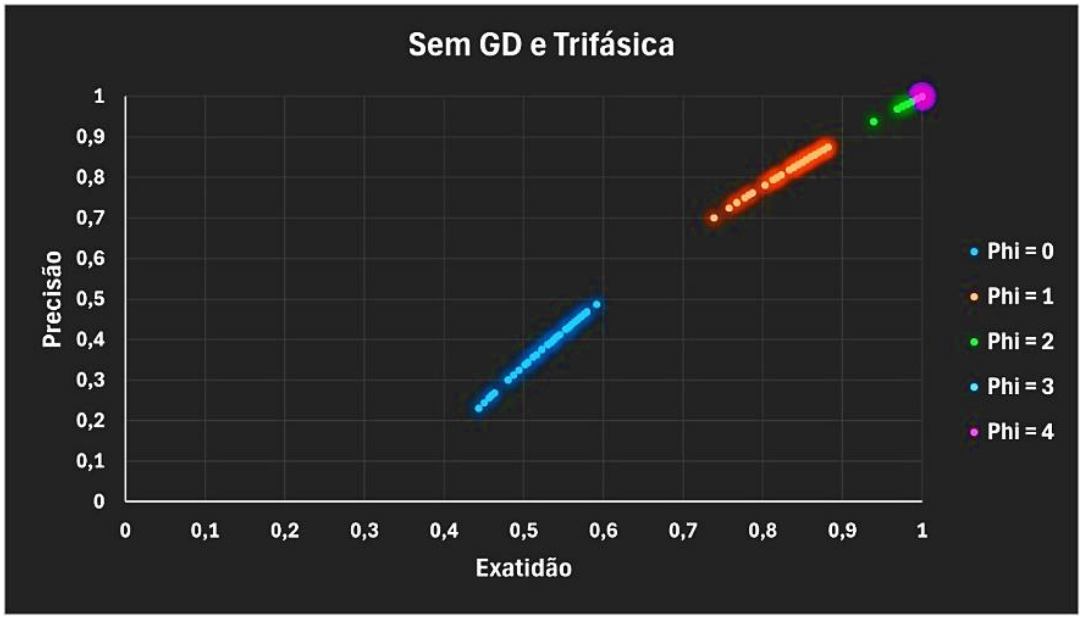


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Trifásico (3ϕ)

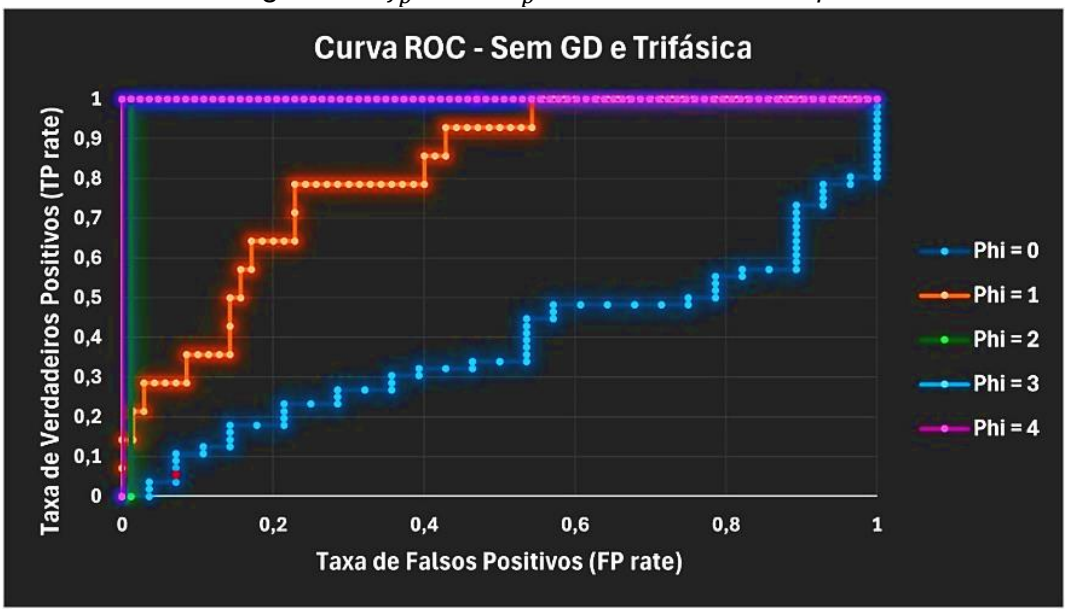
A partir das Figura 30 e 31, nota-se que os gráficos da falta trifásica têm um comportamento similar quando comparado ao da falta bifásica, entretanto, apresenta transições mais suaves do desempenho intermediário para o ótimo. A característica mais marcante desse caso é na simplicidade do padrão de corrente trifásico, que tende a impactar todas as fases de forma simétrica e intensa.

Figura 30: Exatidão x Precisão – Sem GD – 3ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31: $f_p rate\ x\ t_p rate$ – Sem GD – 3ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 2°CASO: COM GDFC

Um GD de 1 MW, que opera como fonte de corrente (FC) no curto-circuito, é inserido na rede de distribuição. Nas Figuras 33, 35 e 37 são apresentadas as curvas ROC do localizador para três tipos de falta. Em geral, os resultados obtidos permitem concluir que a inserção do GD contribui para melhorar o desempenho do algoritmo de localização de faltas. Para a falta 1ϕ, somente duas curvas ROC $\varphi = 0$ e $\varphi = 1$ estão abaixo da diagonal.

O comportamento ideal é obtido com $\varphi = 2$ para a falta 2ϕ. Este aumento no desempenho é confirmado nos gráficos de exatidão e precisão nas Figuras 32, 34 e 36. A exatidão e precisão do algoritmo atingem 100% com um menor $\varphi = 2$ para faltas 2ϕ e 3ϕ. A degradação do algoritmo é menos intensa para faltas 1ϕ em que a exatidão e precisão estão totalmente abaixo de 50% com $\varphi = 0$. Em adição às curvas, nas Tabelas 4 e 5 são apresentados dados quantitativos, como AUC das curvas ROC e porcentagem média de acertos P% para cada valor de φ nos casos base e com GDFC.

Tabela 4: Valores de AUC e P% média para cada φ na condição de 1 GDFC

GDFC	φ	0		1		2		3		4	
		AUC	$P\%$	AUC	$P\%$	AUC	$P\%$	AUC	$P\%$	AUC	$P\%$
Falta	1ϕ	0,060	5,97	0,169	16,28	0,585	58,5	0,905	91,15	1	100
	2ϕ	0,381	38,13	0,817	81,8	1	100	1	100	1	100
	3ϕ	0,371	37,11	0,816	81,84	0,988	99,32	1	100	1	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5: Valores de L e NL para cada φ na condição GDFC

GDFC	φ	0		1		2		3		4	
		L	NL	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
Falta	1ϕ	1	83	12	72	55	29	81	2	84	0
	2ϕ	39	45	70	14	84	0	84	0	84	0
	3ϕ	26	58	69	15	83	1	84	0	84	0

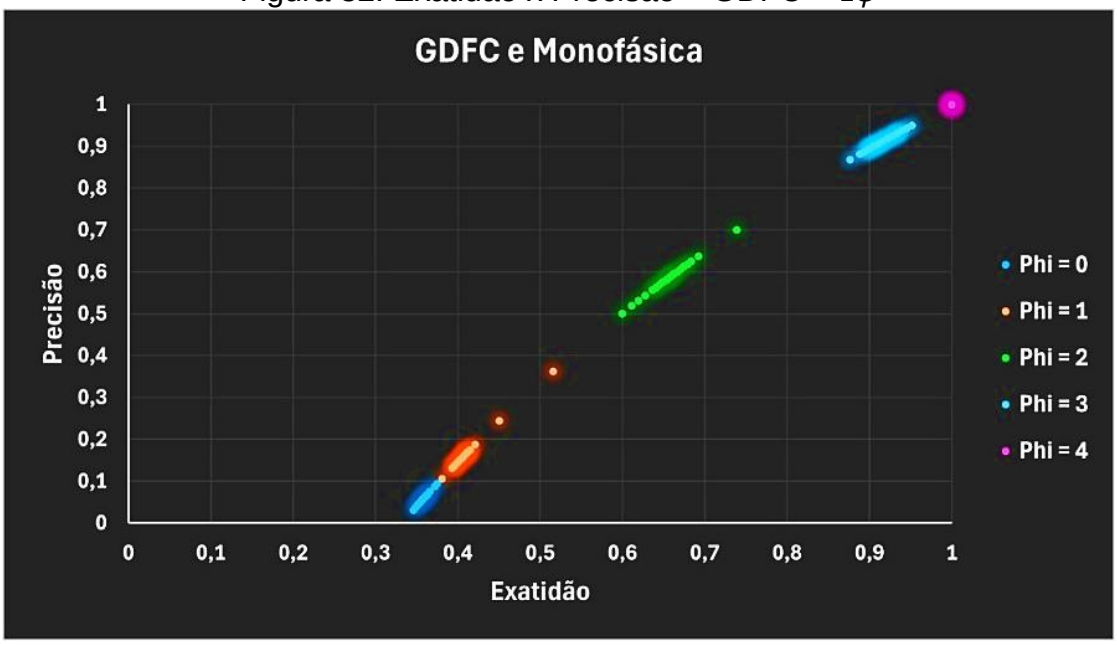
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto maior o valor do AUC, melhor é o desempenho do algoritmo de localização de faltas. O comportamento ideal, $AUC_{max} = 1$, é obtido com $\varphi = 4$ para todos os tipos de falta e casos de operação. Em particular, para falta 2ϕ no caso com GDFC, o comportamento ideal é obtido com $\varphi = 2$. Comparando as curvas ROC com os valores de AUC, o algoritmo de localização de faltas começa a ter um bom desempenho para AUC maior que 0,6 em que as curvas ROC estão acima da diagonal.

3.2.1 Monofásico (1ϕ)

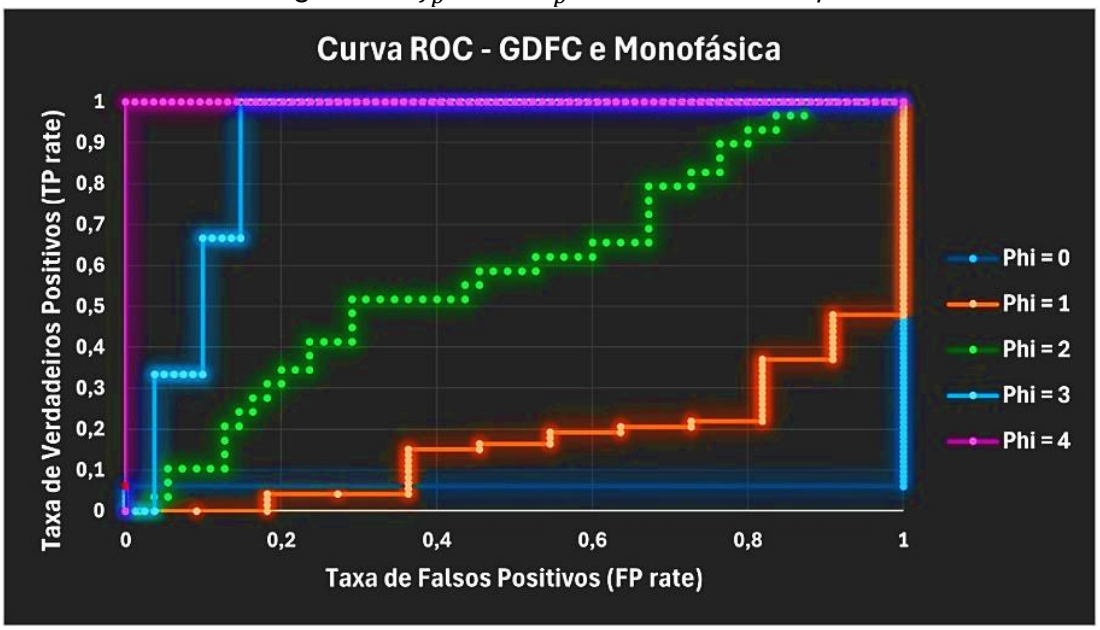
Assim como no caso a falta monofásica da condição sem GD, o algoritmo de localização de faltas apresentou mais dificuldade para localizar as faltas corretamente e o uso de GDFC melhora significativamente a capacidade de identificar faltas monofásicas, especialmente em baixos valores de φ, o que é analisado pelas Figuras 32 e 33.

Figura 32: Exatidão x Precisão – GDFC – 1ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33: $f_p rate\ x\ t_p rate$ – GDFC – 1ϕ

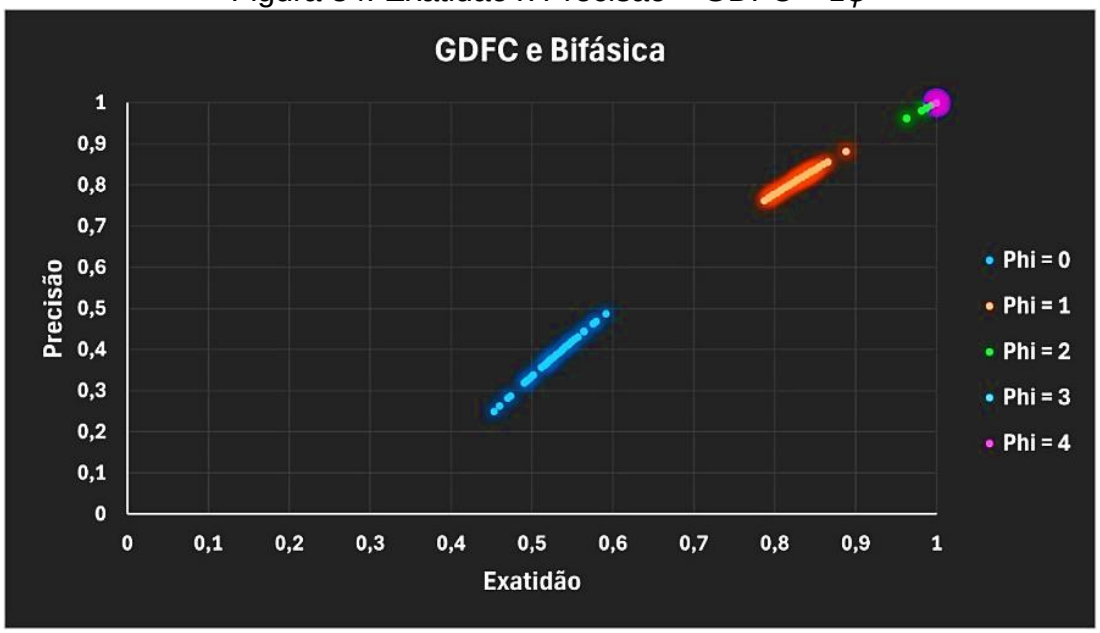


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Bifásico (2ϕ)

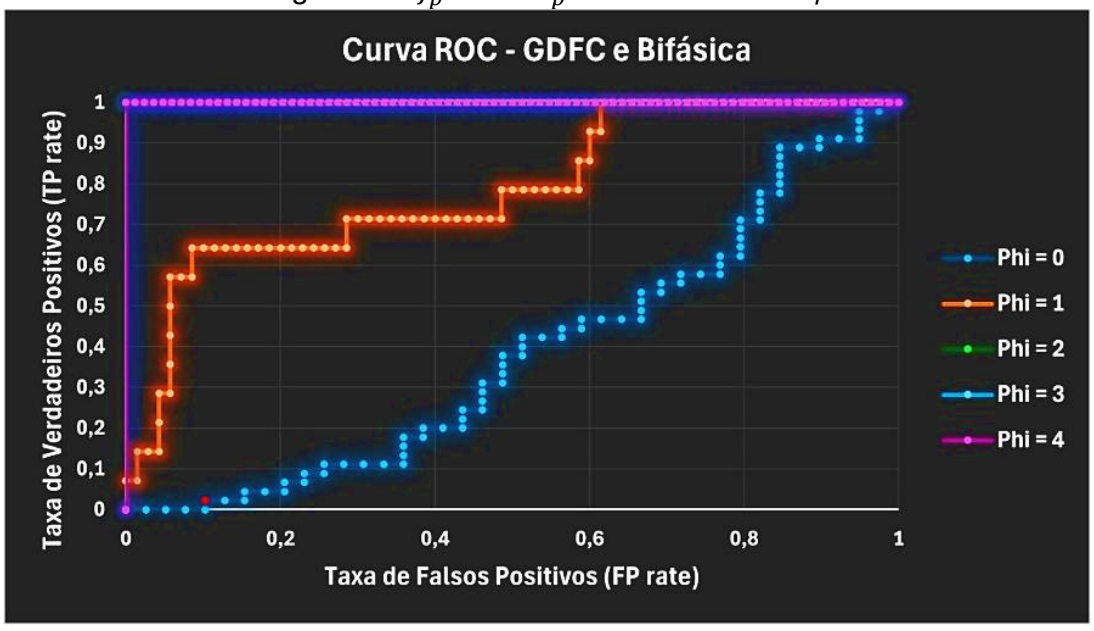
Nota-se uma antecipação da performance ótima com menor φ, sendo o melhor caso de localização de falta realizado nesse trabalho, onde $\varphi = 2$ garante um desempenho de 100%.

Figura 34: Exatidão x Precisão – GDFC – 2ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35: $f_p rate\ x\ t_p rate$ – GDFC – 2ϕ



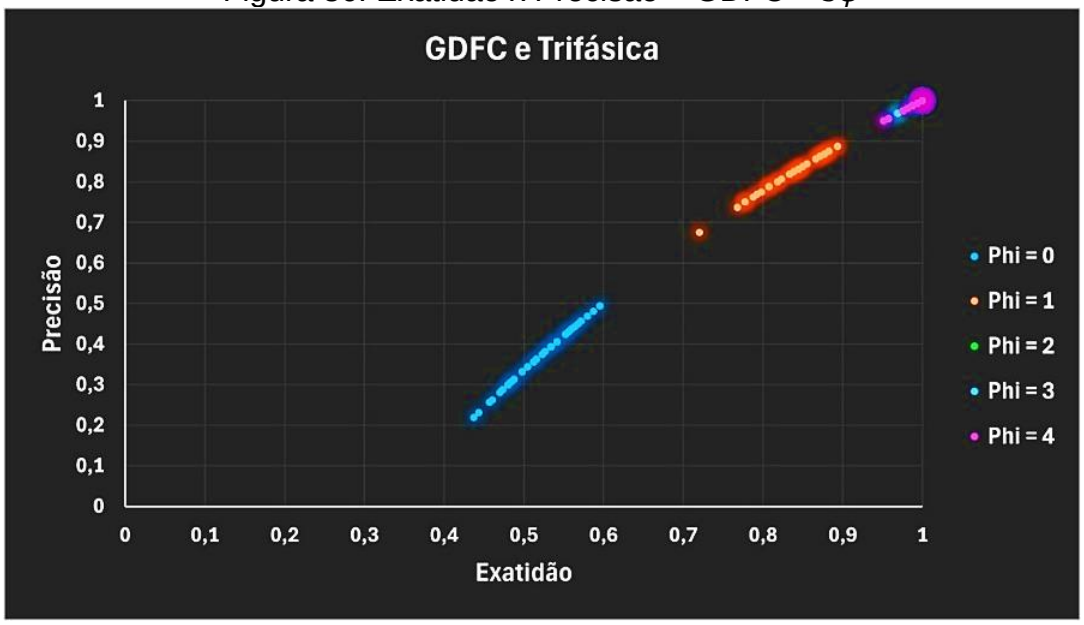
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Trifásico (3ϕ)

A partir das Figura 36 e 37, afirma-se que não só aumenta o desempenho geral, como também reduz a necessidade de altos valores de φ para alcançar alta acurácia, tornando o sistema mais robusto e responsivo a diferentes tipos de faltas,

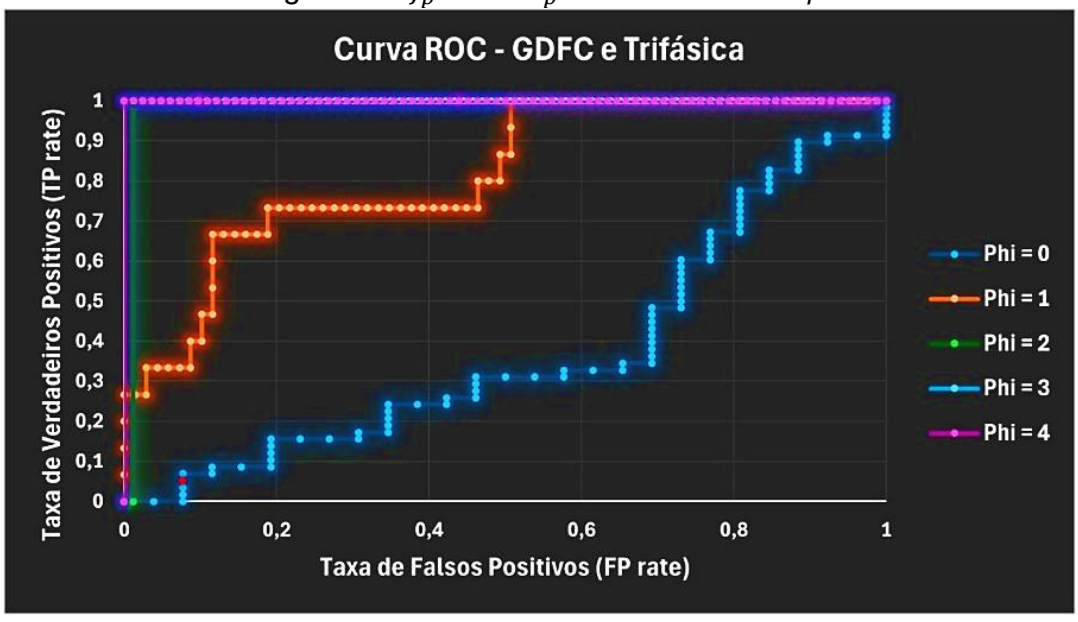
especialmente as mais desafiadoras como a monofásica, caracterizando uma melhora exponencial de $\varphi = 1$ a $\varphi = 2$ assim como já analisado nas faltas bifásicas.

Figura 36: Exatidão x Precisão – GDFC – 3ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37: $f_p rate\ x\ t_p rate$ – GDFC – 3ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 3°CASO: COM 2GDFCS

Dois GDs de 1 MW, que opera como fonte de corrente (FC) no curto-circuito, é inserido na rede de distribuição. Nas Figuras 39, 41 e 43 são apresentadas as curvas ROC do localizador para três tipos de falta.

Nota-se um comportamento interessante a respeito das Figura 39, 41 e 43 em comparação com aqueles das Figuras 33, 35 e 37, na qual se nota a permanência da complexidade para a falta 1ϕ em ambos os casos com AUC máxima para $\varphi = 4$, a perda da eficiência da falta 2ϕ com taxa de acerto 100% apenas para $\varphi = 3$ em diante, e a otimização da falta 3ϕ, a qual apresenta predominantemente maiores valores de AUC para os valores de φ.

Analisando as Tabelas 6 e 7, nota-se que a inserção de 2 GDFCs melhora significativamente o desempenho do algoritmo de localização de faltas, especialmente para faltas 2ϕ e 3ϕ, onde se verifica que ambas chegam ao caso ideal para $\varphi = 3$. Logo, existem prós e contras entre o 2° e o 3° caso para as faltas 2ϕ e 3ϕ, onde se necessita saber previamente qual tipo de falta deve ser priorizada, já que no caso do GDFC, nota-se a sua superioridade na localização de faltas 2ϕ, o qual chegou ao caso ideal para $\varphi = 2$, e sua inferioridade para faltas 3ϕ, o qual chegou ao caso ideal apenas para $\varphi = 4$, em relação ao desempenho do caso de 2GDFCs.

Tabela 6: Valores de AUC e P% média para cada φ na condição de 2 GDFCs

2 GDFCs	φ	0		1		2		3		4	
		AUC	$P\%$	AUC	$P\%$	AUC	$P\%$	AUC	$P\%$	AUC	$P\%$
Falta	1ϕ	0,058	5,71	0,167	16,68	0,569	56,90	0,909	90,79	1	100
	2ϕ	0,386	38,56	0,804	80,63	0,988	99,03	1	100	1	100
	3ϕ	0,372	37,17	0,824	82,50	1	100	1	100	1	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7: Valores de L e NL para cada φ na condição 2 GDFCs

2 GDFCs	φ	0		1		2		3		4	
		L	NL	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
Falta	1ϕ	3	81	12	72	53	31	81	3	84	0
	2ϕ	33	51	76	8	84	0	84	0	84	0
	3ϕ	27	57	69	15	83	1	84	0	84	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.1 Monofásico (1ϕ)

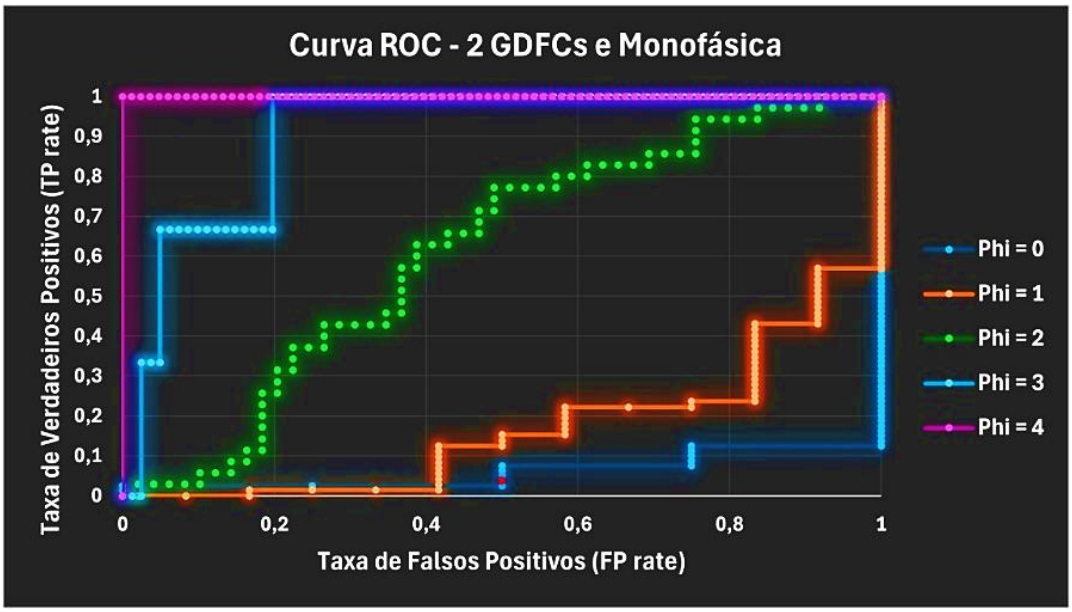
A degradação do desempenho com 2 GDFCs e sua reversão com aumento de φ é novamente a característica mais marcante para a falta monofásica, já que uma parcela de corrente é injetada na rede, fazendo com que a análise das componentes simétricas e dos transitórios seja menos informativa. Entretanto, nota-se que não houve uma grande diferença entre os casos de 1 GDFC e 2 GDFCs, um possível motivo disso pode ser a não incorporação das adaptações necessárias no algoritmo, haja vista que se esperava um aumento na dificuldade da localização da falta para lidar com a influência dos 2 GDFCs.

Figura 38: Exatidão x Precisão – 2GDFCs – 1ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39: Figura 39: $f_p rate\ x\ t_p rate$ – 2GDFCs – 1ϕ

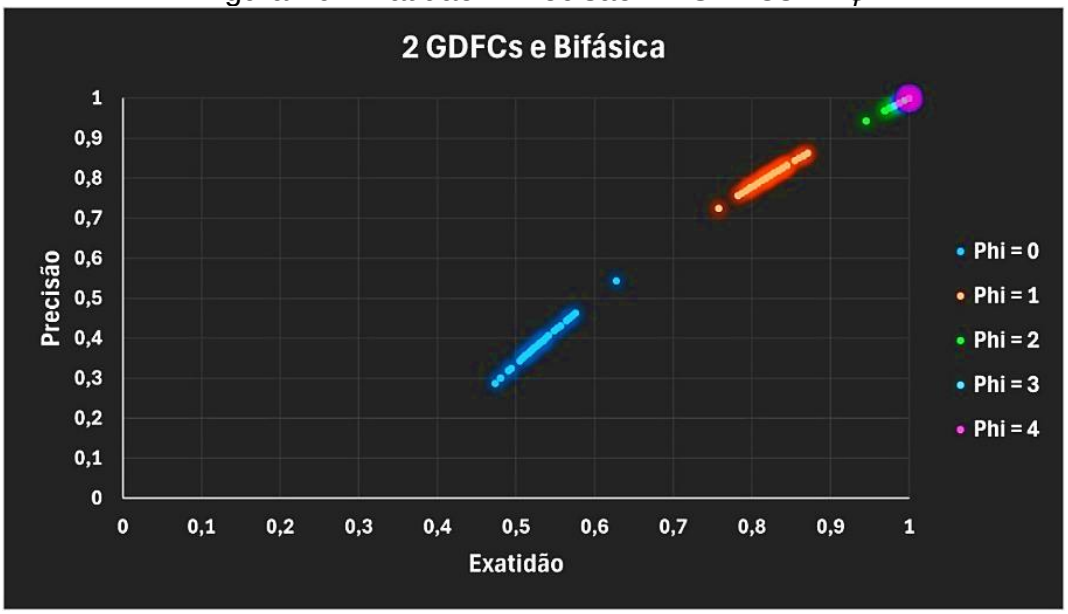


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Bifásico (2ϕ)

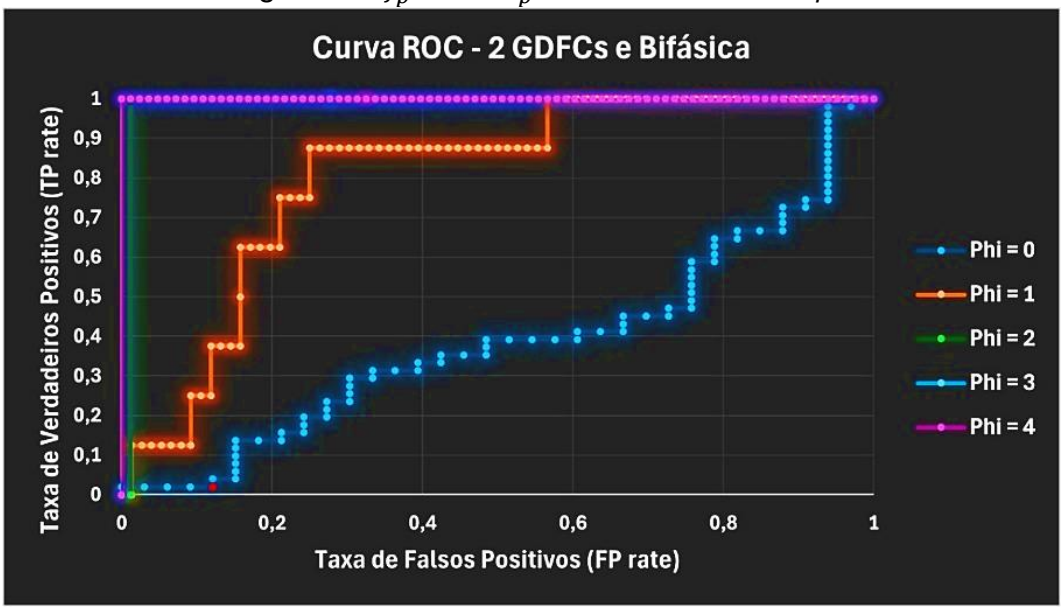
Nas Figuras 40 e 41, observa-se uma boa separação entre os diferentes valores de φ, especialmente para $\varphi = 0, 1$ e 4, indicando que o sistema responde de forma distinta conforme o deslocamento de fase. O comportamento é mais linear e consistente, sugerindo maior estabilidade na resposta do sistema, porém, também não se verifica nenhuma diferença significativa entre os casos GDFC e 2 GDFCs.

Figura 40: Exatidão x Precisão – 2GDFCs – 2ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41: $f_p rate\ x\ t_p rate$ – 2GDFCs – 2ϕ

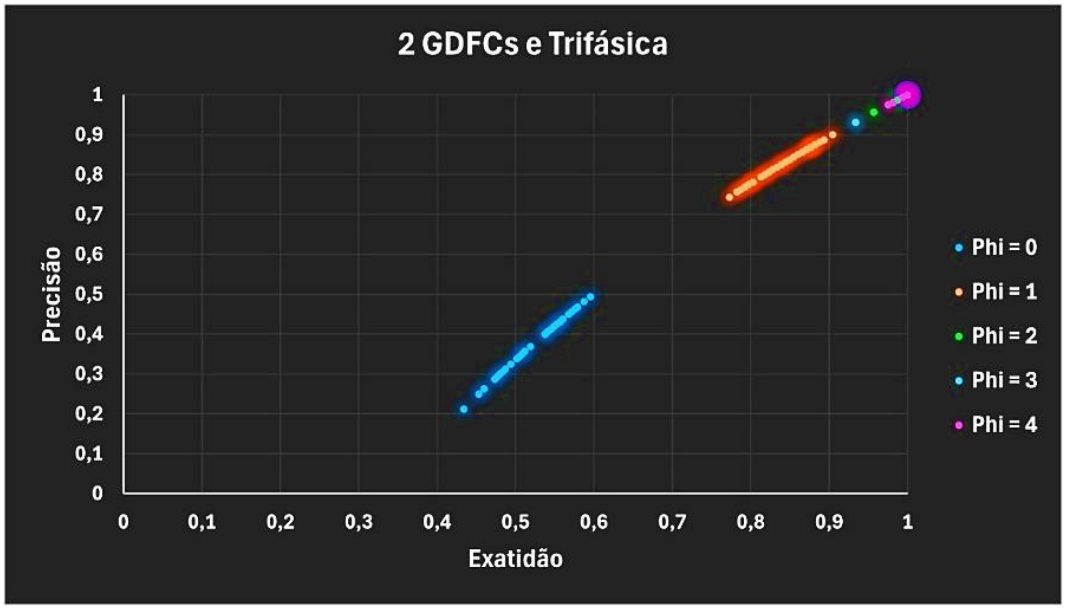


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Trifásico (3ϕ)

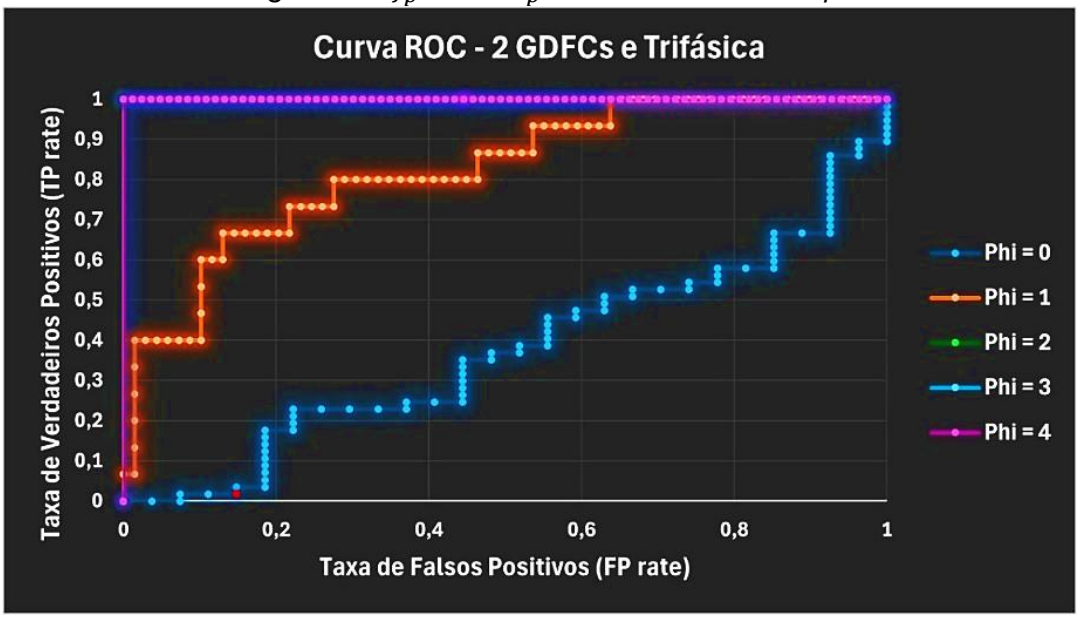
Nas Figuras 42 e 43, verifica-se um desempenho ROC muito acentuado para $\varphi = 4$, que permanece praticamente no topo, indicando excelente classificação. Também, apresenta boa performance para $\varphi = 4$, similar ao bifásico. Curiosamente, as curvas de $\varphi = 2$ e 3 estão ausentes ou sobrepostas, sugerindo que nesses casos o modelo pode não estar conseguindo distinguir bem entre classes, ou que os dados são insuficientes. A curva para $\varphi = 0$ sobe mais lentamente, mas é mais suave que no bifásico, o que indica uma melhor robustez.

Figura 42: Exatidão x Precisão – 2GDFCs – 3ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43: $f_p rate\ x\ t_p rate$ – 2GDFCs – 3ϕ



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 CONCLUSÃO

Os gráficos ROC são ferramentas muito úteis para visualizar e avaliar classificadores, sendo capazes de fornecer uma medida mais rica do desempenho da classificação do que medidas escalares, como taxa de erro ou custo do erro. O algoritmo de localização de falta, como classificador de barras em falta, tem seu desempenho adequadamente determinado usando as curvas ROC. No processo de avaliação, o conhecimento do algoritmo e seus limiares de operação são fundamentais para o bom uso dos gráficos ROC.

Além de que as medidas de precisão e exatidão também contribuem para validar os gráficos ROC, pois localizadores de falta perfeitos possuem 100% de exatidão e precisão que se refletem na máxima área abaixo da curva ROC, ou seja, AUC igual a 1, o que caracteriza na diminuição da dispersão dos pontos dos gráficos de Precisão por Exatidão e a migração desses pontos para a região ótima (extremo superior direito).

Nas faltas monofásicas e trifásicas, verifica-se um desempenho significativamente inferior para os valores de $\varphi = 0, 1$ e 2, quando comparado a $\varphi = 3$ e 4. A forma de cálculo da reatância de falta $R_{f,i}$ para falta monofásica depende apenas de um termo $\bar{Z}^{B}_{ii,pp}$, o que apesar de ter menos parcelas a serem consideradas, faz com que seja mais suscetível a desvios quando a medição é influenciada por pequenos erros. Isso se reflete nos baixos valores de exatidão e precisão para os primeiros valores de φ. Já os melhores desempenhos ($\varphi = 3\ e\ 4$) indicam que em determinados limiares, o algoritmo consegue isolar corretamente os padrões mesmo em cenários mais ruidosos, sugerindo um efeito positivo da parametrização.

Já nas faltas bifásicas, nota-se que o desempenho do modelo melhora consideravelmente em todos os valores de φ, especialmente para φ = 2, 3 e 4. As faltas bifásicas envolvem múltiplos componentes da impedância entre diferentes fases, como $\bar{Z}^{B}_{ii,qq}$, $\bar{Z}^{B}_{ii,pq}$ e $\bar{Z}^{B}_{ii,qp}$, resultando em um cálculo mais robusto da reatância de falta $R_{f,i}$. Isso torna a diferenciação das condições normais e de falta mais precisas. Além disso, o modelo parece responder melhor às variações de φ, ajustando corretamente os limiares de detecção, o que se evidencia pelas curvas ROC mais elevadas e agrupamentos mais precisos no gráfico de exatidão e precisão.

Além disso ao comparar numericamente os acertos (L) e erros (NL) cometidos durante a simulação entre as faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas, comprova-se

que as quantidades de elementos L e NL são distintos para cada simulação, e não necessariamente, uma quantidade mais alta de L apresenta uma AUC maior, já que o cálculo de AUC depende do arranjo das amostras das simulações.

Neste sentido, afirma-se que o bom desempenho do algoritmo de localização de faltas é determinado para AUC maior que 0,6. Logo, a implementação desse algoritmo de localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão na realidade apenas seria possível para o mínimo parâmetro de ajuste φ que garantisse uma taxa de acerto de 100%, proporcionando o maior custo-benefício disponível. Os resultados apresentados e análises efetuadas evidenciam, portanto, a viabilidade dos gráficos ROC na avaliação de algoritmos de localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica.

Por fim, apresentam-se algumas propostas de melhorias a fim de aprimorar a eficiência e a automação do processo de análise dos dados obtidos ao longo do estudo. A criação de um dashboard no Power BI com objetivo de centralizar e organizar as informações de maneira mais clara e acessível, facilitando a tomada de decisões. Paralelamente, propõe-se o ajuste do algoritmo para incluir a análise do caso GDFT, o que permitirá uma abordagem mais abrangente dos diferentes tipos de falta. Além disso, sugere-se a revisão da programação no ambiente Visual Studio para garantir a correta geração dos dados dos casos mono-, bi- e trifásicos, uma vez que o desempenho do algoritmo se mostrou satisfatório mesmo diante de variações na complexidade das faltas. Também se destaca a importância de desenvolver uma interface ou recurso de integração que viabilize a comunicação direta entre o Visual Studio e o Microsoft Excel, eliminando a necessidade de transferências manuais e promovendo maior agilidade e confiabilidade nos resultados.

5 REFERÊNCIAS

BETTONI, Luiz MM et al. Uma aproximação linear para modelagem matemática do balanceamento de cargas em redes de distribuição. **Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, p. 286-297, 2009.

CARDOSO, Manuela Luz et al. Alocação de indicadores de passagem de falta em redes de distribuição com base em custos de compensação por interrupção consumidora. 2021.

Fawcett, T. *An introduction to roc analysis*. Pattern recognition letters 27, 8 (2006), 861–874.

FERREIRA, Diego Santana. Localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica com geração distribuída. 2023.

GARCIA, Paulo AN et al. *Three-phase power flow calculations using the current injection method*. **IEEE Transactions on power systems**, v. 15, n. 2, p. 508-514, 2000.

GURURAJAPATHY, Sophi Shilpa; MOKHLIS, Hazlie; ILLIAS, Hazlee Azil. *Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review*. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 74, p. 949-958, 2017.

LEITE, Jônatas Boás; MANTOVANI, José Roberto Sanches. *Development of a smart grid simulation environment, part I: Project of the electrical devices simulator*. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 26, p. 80-95, 2015.

MILIOUDIS, Apostolos N.; ANDREOU, Georgios T.; LABRIDIS, Dimitrios P. *Enhanced protection scheme for smart grids using power line communications techniques—Part I: Detection of high impedance fault occurrence*. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 4, p. 1621-1630, 2012.

MUNDO, DA ELÉTRICA. Um pouco mais sobre o Sistema Elétrico de Potência (SEP) [em linha]. ago. 2015.

PATERNOST, Rudolf Francesco Palumbo. Investigação do uso de dados para a localização de faltas em redes modernas de distribuição de energia elétrica. 2019. 1 recurso online (122 p.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: https://hdl.handle.net/20.500.12733/1636983. Acesso em: 4 mar. 2025.

PEREIRA, Rodrigo Aparecido Fernandes. Localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando medições esparsas de tensões. 2007.

PETROSKI, Henry. *To engineer is human: the role of failure in successful design*. New York: Vintage Books, 1992.

THURNER, Leon; BRAUN, Martin. V*ectorized calculation of short circuit currents considering distributed generation-an open source implementation of IEC 60909*. In: **2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)**. IEEE, 2018. p. 1-6.

SANTOS, Wellinsílvio Costa dos et al. Identificação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. 2016.

SCHNEIDER, Kevin P. et al. *Analytic considerations and design basis for the IEEE distribution test feeders*. **IEEE Transactions on power systems**, v. 33, n. 3, p. 3181-3188, 2017.

Swets, J. A., Dawes, R. M., and Monahan, J. *Better decisions through science*. Scientific American 283, 4 (2000), 82–87.

VARGAS, Murillo Cobe. Análise dos impactos das faltas na proteção de sobrecorrente em redes de distribuição com elevada penetração de geração distribuída fotovoltaica. **Universidade Federal do Espirito Santo**, p. 41-57, 2018.

WU, Zhi et al. *Optimal micro-PMU placement using mutual information theory in distribution networks*. **Energies**, v. 11, n. 7, p. 1917, 2018.