LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA UTILIZANDO TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

Diego Santana Ferreira, Henrique Amaro Fernandes, e Jônatas Boás Leite
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista – UNESP
Av. Prof. José Carlos Rossi, 1370, Ilha Solteira, São Paulo, CEP 15.385-000
e-mail (diego.santana@unesp.br, henrique.amaro-fernandes@unesp.br, jb.leite@unesp.br)

RESUMO

A crescente demanda por eficiência operacional tem incentivado a modernização do sistema de distribuição de energia com a implementação de novas tecnologias de controle e automação, e condicionamento e processamento de dados. A arquitetura integrada do sistema avançado de gerenciamento de distribuição fornece reconhecimento situacional às redes de distribuição. Com a integração do gerenciamento de faltas, incluindo diagnóstico de faltas e funções de planejamento de comutação, o serviço de localização de faltas, isolamento e restauração do serviço de fornecimento pode ser completamente automatizado. A função de diagnóstico de faltas determina a localização mais provável de um evento de falta, bem como a causa da falta, utilizando informações da rede de distribuição e dos relés por meio de uma arquitetura operacional integrada. Neste trabalho, modelos de análise de redes de distribuição e técnicas de programação não linear são utilizados como funções auxiliares em modernos algoritmos de localização de faltas. A avaliação é realizada sob uma rede de distribuição real com geração distribuída. Os resultados mostram a sensibilidade do método proposto que é capaz de encontrar a barra em falta e fornecer o valor da resistência de falta em 100% dos casos.

PALAVRAS CHAVE. Rede de Distribuição; Gerador Distribuído; Curto circuito; Localização da falta.

Tópicos (EN&PG – PO na Área de Energia, Petróleo e Gás; PM – Programação Matemática; TAG – Teoria e Algoritmos em Grafos)

ABSTRACT

The growing demand for operational efficiency has encouraged the modernization of the power distribution system with the implementation of new technologies for control and automation and conditioning and data processing. The integrated architecture of the advanced distribution management system provides situational awareness to distribution networks. With the integration of fault management, including fault diagnosis and switching planning functions, the service of fault location, isolation and restoration of the power supply can be completely automated. The fault diagnosis function determines the most likely location of a fault event as well as the cause of the fault using information from the distribution network and relays through integrated operating architecture. In this work, distribution network analysis models and nonlinear programming techniques are used as auxiliary functions in modern fault location algorithms. The evaluation is performed under a real-world distribution network with distributed generation. The results show the sensitivity of the proposed method that is able to find the faulted bus and to provide the value of fault resistance to 100% of the cases.

KEYWORDS. Distribution Network; Distributed Generator; Short-Circuit; Fault Location.

Paper topics (EN&PG – PO in the Energy, Oil and Gas Area; PM – Mathematical Programming; TAG – Graph Theory and Algorithms)

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br

1. Introdução

A redução do tempo de restauração da rede de distribuição, em caso de faltas permanentes, nos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) traz benefícios aos consumidores e concessionárias de energia integradas ao sistema. A duração das interrupções de energia é um dos índices de confiabilidade mais importantes para concessionárias de energia. Assim, quanto mais rápido a falta for localizada, menor deve ser o tempo para restaurar o sistema. As faltas são causadas por falhas em qualquer componente conectado à rede devido a diversos motivos, como envelhecimento, descargas atmosféricas, erros humanos e fatores externos que tocam/danificam os cabos ou linhas. Os principais tipos de faltas no SDEE trifásico são:

- Terra monofásica;
- Fase-fase;
- Fase-fase-terra;
- Terra trifásica.

Devido a isso, diferentes tipos de técnicas de identificação/localização de faltas são exploradas para superar esses desafios do SDEE (Haleem, et al., 2018). Os métodos de identificação/localização de faltas são classificados principalmente em:

- Método baseado em impedância;
- Método baseado em ondas viajantes;
- Método baseado na mineração de dados;
- Método integrado.

Um método ineficiente de localização de faltas pode causar degradação dos índices de confiabilidade, que dependem principalmente da duração e frequência da interrupção. Nos sistemas de transmissão de energia elétrica, os métodos de localização de faltas estão razoavelmente consolidados e os curtos-circuitos podem ser localizados com precisão. Contudo, em SDEE não há consenso sobre a melhor prática de localização de faltas porque o método mais adequado depende de vários aspectos, incluindo, por exemplo, o nível de modernização da rede (Paternost, et al., 2019).

A inserção de geradores distribuídos (GD) em SDEE existentes tem grande impacto na operação e no planejamento em tempo real. Diversas incertezas caracterizam a capacidade do sistema elétrico existente de integrar esta forma de geração. Portanto, a geração distribuída deve ser levada em consideração no método de localização de faltas. Os GDs aumentam a complexidade do controle, proteção e manutenção dos SDEEs (Hadjsaid, et al., 1999).

1.1. Trabalhos Relacionados

O algoritmo de localização de falta proposto por Pereira (2009) é baseado na correspondência das magnitudes das quedas de tensão durante a falta. O princípio básico do algoritmo é que, quando ocorre uma falta na rede de distribuição, as quedas de tensão se propagam com diferentes magnitudes e ângulos de fase para cada nó da rede. As diferentes quedas de tensão em cada nó da rede permitem que o algoritmo utilize medições de tensão esparsas a partir de um conjunto reduzido de medidores de tensão estrategicamente posicionados ao longo da rede, fornecendo dados suficientes para resultados precisos de localização de faltas.

A fim de superar algumas das desvantagens observadas anteriormente nos métodos de localização de faltas, Trindade (2014) propõe um método robusto de localização de faltas que explora a capacidade de medição de queda de tensão de medidores inteligentes (MI) e os fundamentos da teoria de curto-circuito. Uma vez detectada e classificada uma falta, o método proposto pode ser utilizado para localizar faltas no sistema de distribuição utilizando MIs instalados na rede primária. Um índice de localização de falta é usado para identificar a barra realmente em falta. Este índice é dado pela soma das diferenças entre os valores estimados das correntes de falta levando em consideração que uma barra está com falta.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br

Em (Lotfifard, et al., 2011), é proposta uma abordagem de localização de faltas baseada em dados coletados de medidores instalados em alguns pontos ao longo da rede de distribuição. A falta em cada nó (um de cada vez) na rede modelada é aplicada e as quedas de tensão são calculadas usando um programa de fluxo de potência. A localização da falta é determinada comparando o quão bem cada caso calculado corresponde ao que foi realmente observado pelos medidores na rede. A comparação é feita levando em consideração a amplitude de tensão característica registrada e a queda de tensão calculada. A diferença por interpolação do ângulo de fase da tensão característica dos afundamentos de tensão registrados e calculados e a diferença entre o ângulo de fase da corrente registrado e calculado no nó raiz também contribuem para determinar o erro na busca da barra em falta.

Neste artigo, são realizadas as seguintes etapas no processo de localização de faltas: a) cálculo do fluxo de potência da rede em condições pré-falta; b) cálculo de correntes de curto-circuito em regime permanente; e c) aplicação do algoritmo de localização de faltas utilizando métodos de programação não linear, em particular, métodos de eliminação e secantes. Após a descrição do método proposto na sessão 3, a avaliação dos resultados do algoritmo implementado é realizada na sessão 4. Por fim, na seção 5, é feito um resumo dos principais resultados obtidos e uma descrição das atividades futuras.

2. Modelo Não Linear de Localização de Faltas

O método de localização de faltas baseado em impedância está entre os mais comuns para localização de faltas em sistemas de distribuição radial, que mede tensões e correntes em uma extremidade, ou ambas as extremidades da linha, e utiliza análise matemática (Senger, et al., 2005). De acordo com Zimmerman e Costello (2005), os métodos de extremidade única usam um algoritmo muito simples e não precisam de um canal de comunicação remoto para coleta de dados, mas a precisão da estimativa é afetada pela combinação de resistência de falta e efeitos de carga, acoplamento mútuo de sequência zero, erros de modelagem, heterogeneidade do sistema e imprecisões de medição de relés. Por outro lado, os métodos de extremidade dupla podem ser mais precisos, mas requerem dados de ambos os pontos finais. No método proposto as medidas de tensões e correntes são feitas em extremidade única, sendo executadas após a detecção e classificação da falta. Assim, a precisão das estimativas da localização das faltas são garantidas pela definição de um modelo de otimização e pelo uso de técnicas de programação não linear, como o método da secante, aliadas aos algoritmos de travessia em grafos.

Inicialmente, a impedância medida pelo relé na subestação, $\bar{Z}_{ss}$, é comparada com os valores de impedância calculados, $\bar{Z}_{ss,i}$, para a falta incidente em diferentes regiões da rede de distribuição. Cada região é representada por uma barra que define uma vizinhança e é organizada em um vetor de barras candidatas, $\boldsymbol{\Omega}_B$. Como o problema de localização de faltas pode ser modelado usando um problema de programação não linear unidimensional, como é dado de (1) a (6), o número de barras candidatas representa a quantidade de experimentos para uma precisão especificada do método de eliminação (Rao, 2009).

$$min\ \varepsilon_{Z,i} = \left|R_{ss} - \hat{R}_{ss,i}\right| + \left|X_{ss} - \hat{X}_{ss,i}\right| \tag{1}$$

Em que

$$\bar{Z}_{ss} = \dot{V}_{ss}^{mean} / j_{ss}^{mean} = R_{ss} + jX_{ss} \tag{2}$$

$$\bar{Z}_{ss,i} = \dot{V}_{ss,i}^{calc} / j_{ss}^{calc} = \hat{R}_{ss,i} + j\hat{X}_{ss,i} \tag{3}$$

$$R_{f,i} = \begin{cases} R_{ss} - \Re\{\bar{Z}_f\}, & R_{ss} > \Re\{\bar{Z}_f\} \\ 0, & R_{ss} \leq \Re\{\bar{Z}_f\} \end{cases} \tag{4}$$

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br

$$\bar{Z}_f = \begin{cases} \bar{Z}^B_{ii,pp}, & se\ 1\phi\ or\ 3\phi \\ \bar{Z}^B_{ii,pp} + \bar{Z}^B_{ii,qq} - \bar{Z}^B_{ii,pq} - \bar{Z}^B_{ii,qp}, & se\ 2\phi \end{cases} \quad (5)$$

$$b_i \in \mathbf{\Omega}_B \cup \mathbf{\Omega}_b \quad (6)$$

Em (1), $\varepsilon_{Z,i}$ é o erro de estimativa de impedância calculado para a falta incidente na *i*-ésima barra b_i com resistência de falta $R_{f,i}$ calculada em (4), em que $\bar{Z}_f$ é a impedância total para falta mono- (1ϕ), bi- (2ϕ) e trifásica (3ϕ) e $\bar{Z}^B_{ii}$ é a impedância nodal da *i*-ésima barra. A minimização do erro de estimação torna possível encontrar a região próxima à barra em falta usando um algoritmo de busca de vizinhança, ou seja, minimizar $\varepsilon_{Z,i}$ para $b_i \in \mathbf{\Omega}_B$. O Algoritmo 1 apresenta um pseudocódigo da rotina para esta busca.

Algoritmo 1 – Busca de Vizinhança por eliminação

```
Entrada: R_ss, X_ss
Saída: b_ff, R_f,f and ε_Z^min
Construir a lista de barras candidatas Ω_B
Para todos b_i ∈ Ω_B Faça
  Determinar o valor de R_f,i usando (4)
  Resolver o fluxo de potência
  Calcular o curto-circuito
  Estimar o erro ε_Z,i usando (1)-(3)
  Se ε_Z,i < ε_Z^min Então
        ε_Z^min ⟵ ε_Z,i
        R_f,f ⟵ R_f,i
        b_f ⟵ b_i
  Fim Se
Fim Para Todos
```

A solução de fluxo de potência e a simulação de curto-circuito são feitas como em (Reiz & Leite, 2019). Após encontrar a vizinhança, o próximo passo do método proposto consiste em procurar a barra em falta dentro da vizinhança, ou seja, minimizar $\varepsilon_{Z,i}$ para $i \in \mathbf{\Omega}_b$. Por se tratar de um problema não-convexo, procurar a barra em falta na vizinhança definida pelo b_f encontrado poderia levar a uma solução ótima local. O parâmetro φ evita isso determinando o número de barras candidatas a montante de b_f de modo que $\mathbf{\Omega}_\varphi \subset \mathbf{\Omega}_B$ e o algoritmo de busca explora barras a jusante dentro das vizinhanças $\mathbf{\Omega}_\varphi$.

O Algoritmo 2 apresenta um pseudocódigo da rotina de busca da barra em falta e da resistência de falta. O procedimento explora a vizinhança de $b_m \in \mathbf{\Omega}_\varphi$ usando o algoritmo de busca em largura, do Inglês *breadth-first search*, (Drozdek, 2012) para encontrar um conjunto $\mathbf{\Omega}_m$ de barras com maior probabilidade de estarem sob falta.

Para cada *i*-ésima barra em $\mathbf{\Omega}_m$, um processo iterativo é iniciado para atualizar o valor da resistência de falta. Na primeira iteração, $k = 1$, o processo é iniciado com $\varepsilon_Z^0 = \varepsilon_{Z,i}$ e $R_f^0 = R_{f,i}$. Este primeiro ponto da curva que relaciona o erro de estimativa com a resistência de falta é conhecido, enquanto o segundo ponto é obtido assumindo $R_f^1 = 1{,}1R_f$ e calculando o valor do erro de estimativa ε_Z^1. Com estes dois pontos e utilizando (7) é possível atualizar o valor da resistência de falta que mais se aproxima do erro de estimativa nulo.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br

$$R_f^{k+1} = R_f^{k-1} - \frac{R_f^k - R_f^{k-1}}{\varepsilon_Z^k - \varepsilon_Z^{k-1}} \varepsilon_Z^{k-1} \tag{7}$$

Este processo de busca do valor da resistência de falta corresponde ao método secante, que é um método de interpolação para problema de programação não linear unidimensional (Rao, 2009) e pode ser considerado uma aproximação por diferenças finitas do método de Newton.

Algoritmo 2 – Busca pela barra em falta usando o método da secante

Entrada: R_{ss}, X_{ss}, $\boldsymbol{\Omega}_\varphi$
Saída: b_f, $R_{f,f}$ e ε_Z^{min}
Para Todas $b_m \in \boldsymbol{\Omega}_\varphi$ **Faça**
  $enfileirar(b_m)$
  Enquanto fila não estiver vazia **Faça**
    $b = desenfileirar()$
    Para Todas b_i à jusante de b **Faça**
      $enfileirar(b_i)$
      $R_{f,i} \Longrightarrow$ Fluxo de Potência $\Longrightarrow$ Curto-Circuito $\Longrightarrow \varepsilon_{Z,i}$
      Se $\varepsilon_{Z,i} < \max_{j \in \Omega_m} \{\varepsilon_{Z,j}\}$ **Então**
        Substituir b_j por b_i em $\boldsymbol{\Omega}_m$
      Fim Se
    Fim Para Todas
  Fim Enquanto
  Para Todas b_i em $\boldsymbol{\Omega}_m$ **Faça**
    Atualizar $R_{f,i}$ usando (7)
    Fluxo de Potência $\Longrightarrow$ Curto-Circuito $\Longrightarrow \varepsilon_{Z,i}$
    Se $\varepsilon_{Z,i} < \varepsilon_Z^{min}$ **Então**
      $(\varepsilon_Z^{min}, b_f, R_{f,f}) \leftarrow (\varepsilon_{Z,i}, b_m, R_{f,i})$
    Fim Se
  Fim Para Todas
Fim Para Todas

3. Resultados Numéricos

A Figura 1 representa o diagrama unifilar de uma rede de distribuição real de uma concessionária de energia elétrica no Brasil (LAPSEE, 2022).

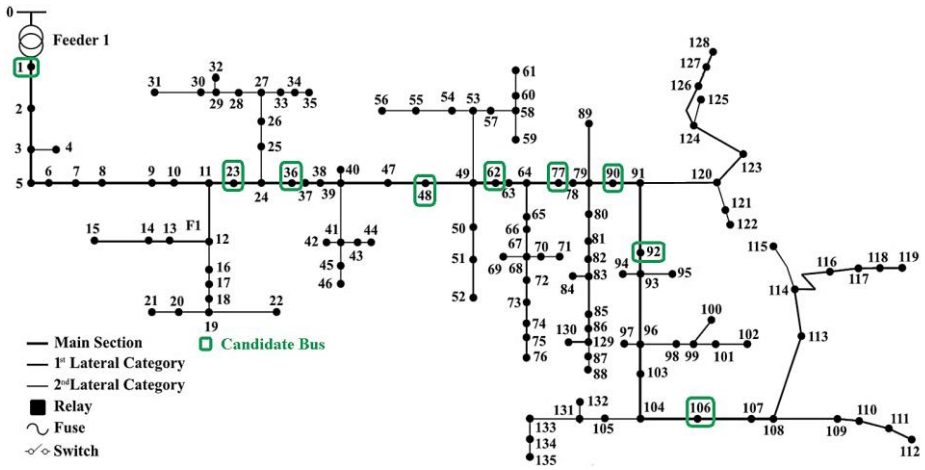
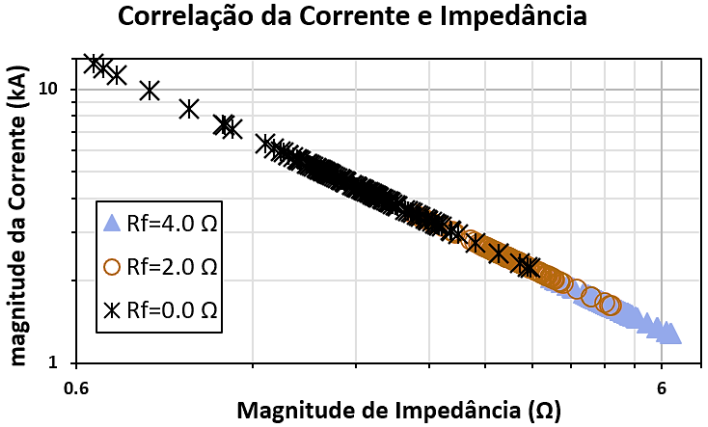


Figura 1. Topologia da rede de distribuição.

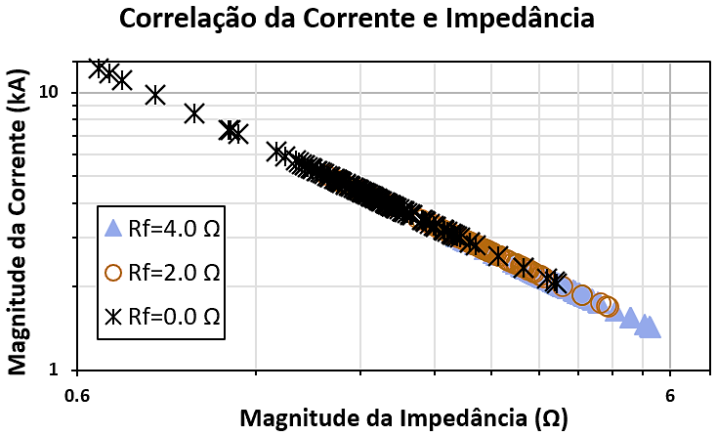
DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br

Esta é uma típica rede de distribuição aérea com tensão de linha de 13,8 kV na barra da subestação. A rede é trifásica e conta com 135 barras.

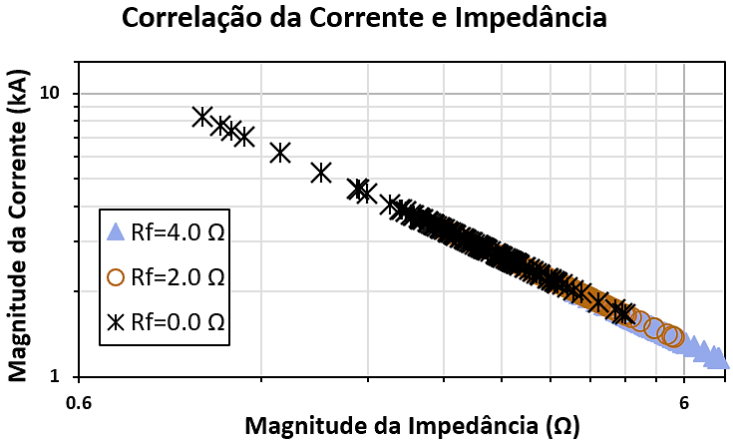
A viabilidade do método proposto, ou seja, calcular a impedância de curto-circuito na barra da subestação, para encontrar a barra em falta é avaliada primeiramente. O gráfico de dispersão da Figura 2 mostra a correlação entre as magnitudes da impedância e da corrente na barra da subestação para diferentes valores de resistência de falta. Os eixos destes gráficos estão em escala logarítmica na base 10, o que auxilia na compreensão do comportamento das grandezas medidas.



a) Falta trifásica (3ϕ).



b) Falta bifásica (2ϕ).



c) Falta monofásica (1ϕ).

Figura 2. Impedância medida e correlação de corrente.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br

Embora as magnitudes estejam correlacionadas negativamente, os gráficos de dispersão mostram uma forte relação. Indica que ambas as magnitudes, impedância ou corrente, podem ser usadas para encontrar a barra em falta independentemente da resistência de falta. O método proposto é posteriormente avaliado simulando uma falta em cada barra da rede de distribuição teste. Como a resistência de falta segue uma função de densidade de probabilidade normal com média de 1,72 Ω e variância de 0,032 Ω (Pedersen et al., 2003), nos testes realizados a resistência de falta foi variada de 0,00 a 4,00 Ω assumindo em dois casos: Base e DG. No caso da GD, uma unidade de geração acoplada eletronicamente de 3,00 MW é alocada na barra #76 com fator de multiplicação de 1,2 para corrente de curto-circuito (Thurner & Braun, 2018). Em ambos os casos, o algoritmo de busca de vizinhança utiliza uma lista de barras candidatas iguais a $\boldsymbol{\Omega}_B$ = {1, 23, 36, 48, 62, 77, 90, 92, 106} da seção principal. A Tabela 1 mostra a sensibilidade do método proposto a diferentes valores de φ no caso base.

Tabela 1. Taxa de verdadeiros positivo (%) no caso base.

		Resistência de Falta (R_f)				
	φ	0 Ω	1 Ω	2 Ω	3 Ω	4 Ω
Falta 3ϕ	0	49,25	48,51	46,27	40,30	31,34
	1	84,33	85,07	82,84	79,85	76,12
	2	100,00	100,00	100,00	99,25	96,27
	3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Falta 2ϕ	0	48,51	46,27	44,03	38,81	33,58
	1	84,33	82,84	81,34	79,10	76,87
	2	100,00	100,00	100,00	98,51	96,27
	3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Falta 1ϕ	0	17,91	10,45	10,45	10,45	10,45
	1	46,27	24,63	24,63	24,63	24,63
	2	73,88	62,69	62,69	59,70	58,21
	3	91,79	90,30	90,30	90,30	88,06
	4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

À medida que o valor de φ aumenta, o desempenho do algoritmo melhora. Para φ = 3, a taxa de verdadeiros positivos é de 100% para as faltas trifásicas e bifásicas, independentemente dos valores de R_f entre 0 Ω e 4 Ω. Para a falta monofásica, a taxa de verdadeiros positivos é de 100% quando φ = 4, independentemente dos valores de R_f entre 0 Ω e 4 Ω. Apesar da sensibilidade do método diminuir à medida que o valor de R_f aumenta, ela pode ser superada aumentando φ.

A Tabela 2 mostra comparativamente a sensibilidade do método proposto no caso com GD. Os resultados do caso com GD são muito semelhantes aos resultados do caso base. Para φ = 3, a taxa de verdadeiros positivos é de 100% para as faltas trifásicas e bifásicas, independentemente dos valores de R_f entre 0 Ω e 4 Ω. Para a falta monofásica, a taxa de verdadeiros positivos é de 100% quando φ = 4, independentemente dos valores de R_f entre 0 Ω e 4 Ω. Apesar da sensibilidade do método diminuir à medida que o valor de R_f aumenta, ela pode ser superada aumentando φ.

A métrica estatística que demonstra de forma mais evidente a diferença entre estes dois casos testados é o desvio padrão da diferença na resistência de falta estimada, conforme apresentado na Tabela 3.

O desvio é maior quando φ = 0, principalmente no caso com GD, uma vez que a sensibilidade do método proposto é menor. Por outro lado, o desvio diminui e chega a zero para φ = 4 indicando que o valor de R_f é estimado com precisão. Da mesma forma que a sensibilidade, o desvio padrão na diferença da resistência de falta estimada também é afetado pelo valor R_f, como

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br

é mostrado nas Figuras 3 a), b) e c). A diferença na resistência de falta estimada depende dos diferentes valores de φ, de $\varphi = 0$ a $\varphi = 4$.

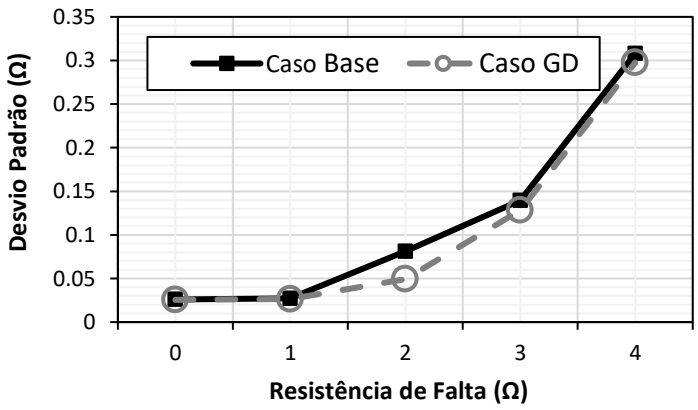
Tabela 2. Taxa de verdadeiro positivo (%) no caso com GD.

		Resistência de Falta (R_f)				
	φ	0 Ω	1 Ω	2 Ω	3 Ω	4 Ω
Falta 3ϕ	0	49,25	48,51	46,27	41,04	31,34
	1	84,33	85,07	83,58	79,85	76,12
	2	100,00	100,00	100,00	100,00	96,27
	3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Falta 2ϕ	0	49,25	47,76	45,52	41,79	36,57
	1	84,33	82,84	81,34	79,85	77,61
	2	100,00	100,00	100,00	100,00	97,76
	3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Falta 1ϕ	0	14,18	10,45	10,45	10,45	10,45
	1	42,54	24,63	24,63	24,63	24,63
	2	70,90	62,69	62,69	59,70	58,21
	3	91,79	90,30	90,30	90,30	88,06
	4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 3. Desvio da resistência de falta estimada (Ω).

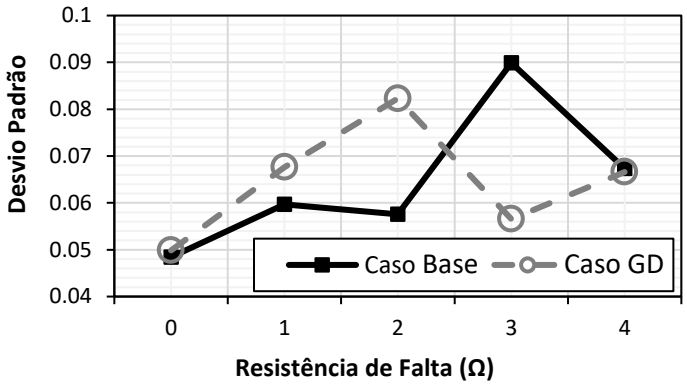
	Falta 3ϕ		Falta 2ϕ		Falta 1ϕ	
φ	Caso Base	Caso DG	Caso Base	Caso DG	Caso Base	Caso DG
0	0,517	0,469	0,199	0,206	0,834	0,836
1	0,058	0,052	0,108	0,107	0,609	0,598
2	0,006	0,005	0,016	0,010	0,073	0,073
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	0,051
4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Conforme mostrado na Figura 3 a), para a falta 3ϕ, os desvios padrão médios estão entre 0,025 e 0,0025. Na Figura 3 b), para falta 2ϕ, os desvios padrão médios estão entre 0,048 e 0,090 Ω. Na Figura 3 c), para falta 1ϕ, os desvios padrão médios estão entre 0,040 e 0,467 Ω.

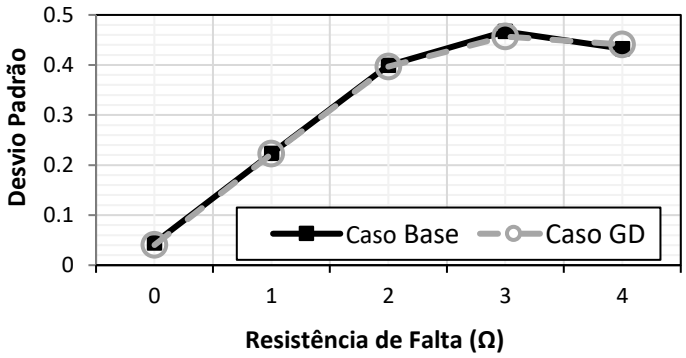


a) Falta trifásica (3ϕ).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br



b) Falta bifásica (2ϕ).

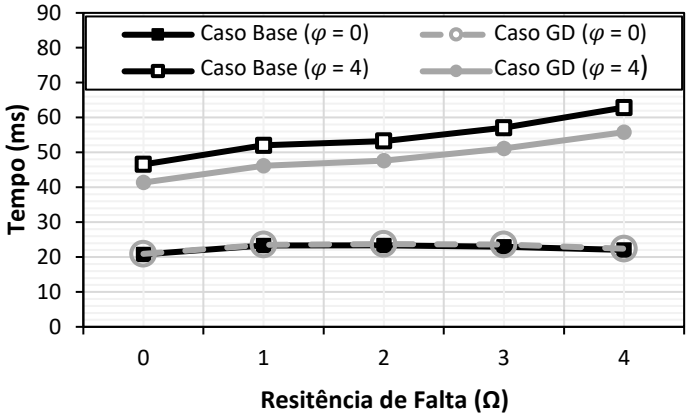


c) Falta monofásica (1ϕ).

Figura 3. Diferenças nas resistências de falta estimadas.

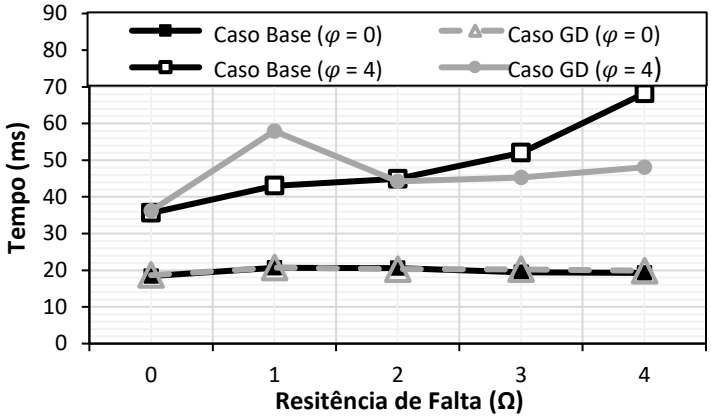
Na Figura 3, os gráficos mostram que a diferença entre o caso base e o caso com GD é menor para faltas 3ϕ e 1ϕ em comparação com faltas 2ϕ, ver (5). Por outro lado, o desvio padrão aumenta à medida que a resistência da falta aumenta, independentemente do tipo de falta.

O método proposto foi implementado em linguagem de programação C# e os testes foram realizados em um sistema computacional Intel© Core™ i7-7700, 3,60 GHz e 16 GB de RAM. A Figura 4 mostra as relações entre o incremento de φ e o tempo médio de processamento para faltas 3ϕ, 2ϕ e 1ϕ, respectivamente.

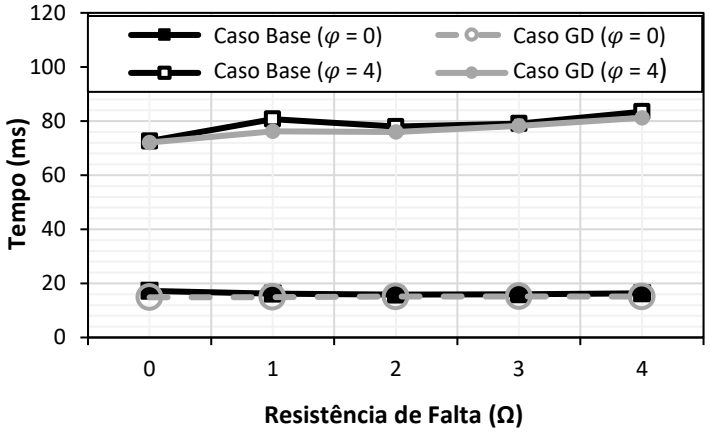


a) Falta trifásica (3ϕ).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br



b) Falta bifásica (2ϕ).



c) Falta monofásica (1ϕ).

Figura 4. Custo computacional médio.

Conforme mostrado nas Figuras 4 a), b) e c), pode-se observar que o incremento de φ aumenta o tempo médio de processamento na localização de falta. Ou seja, aumenta o custo computacional à medida que mais regiões da rede de distribuição são verificadas devido ao aumento do espaço de busca. Entretanto, o tempo médio de processamento para localização ficou abaixo de 90 ms. O caso com DG tem em sua maioria menor custo computacional, indicando que o número de barras simuladas em falta é reduzido porque os valores da resistência de falta são calculados com mais precisão pelo método da secante proposto. Uma vez que o módulo 8 dos procedimentos de distribuição (Aneel, 2020) define um intervalo de interrupção mínimo de 3 minutos para realizar o religamento, o tempo médio de processamento do localizador de falta é baixo.

Mais uma avaliação da metodologia proposta é feita simulando faltas com valores da resistência de falta maiores que 4,00 Ω. A Tabela 4 mostra a sensibilidade com resistências de falta mais altas e sem GD.

Tabela 4. Taxa de verdadeiros positivos (%) sem GD e maiores resistências de falta.

		Resistência de Falta (R_f)			
	φ	**5,00 Ω**	**10,00 Ω**	**15,00 Ω**	**20,00 Ω**
Falta 1ϕ	**5**	100,00	93,28	70,15	67,16
	6	100,00	99,25	79,85	77,61
	7	100,00	100,00	94,78	88,06
	8	100,00	100,00	100,00	100,00

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br

A partir da Tabela 4, com a taxa de verdadeiros positivos para falta monofásica sem GD com resistências de falta maiores, verifica-se a necessidade de aumentar φ ao aumentar a resistência de falta. Isso decorre do aumento do espaço de busca com mais barras apresentando impedância estimada próxima à medida.

4. Considerações Finais

O algoritmo de localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica foi implementado assumindo o erro na estimativa de impedância sendo modelado como um problema de programação não linear resolvido através de métodos de eliminação e secante. O algoritmo proposto é capaz de localizar faltas em uma rede de distribuição do mundo real com e sem GD para diferentes valores de resistências de falta. Os resultados são satisfatórios, pois a sensibilidade é alta atingindo 100% na taxa de verdadeiros positivos com baixo custo computacional. Para menores valores da resistência de falta, até 4,00 Ω, o tempo máximo de processamento fica em torno de 90 ms. Como uma resistência maior aumenta o espaço de busca, o parâmetro do algoritmo φ deve ser ajustado aumentando um pouco o tempo de processamento. Além disso, o parâmetro φ está associado ao tamanho das regiões de vizinhança da rede, então quanto menor é a vizinhança, maior é o parâmetro φ e vice-versa.

Em trabalhos futuros, o número e a localização das barras candidatas em $\boldsymbol{\Omega}_B$ devem ser correlacionados com o desempenho do algoritmo proposto para localização de faltas em redes de distribuição. Uma análise de como a penetração da GD afeta a estimativa da resistência de falta também deve ser estudada.

Referências

A. M. Haleem, M. Sharma, K. Sajan, and K. D. Babu, “A comparative review of fault location/identification methods in distribution networks,” in 2018 1st International Conference on Advanced Research in Engineering Sciences (ARES), 2018, pp. 1–6.

R. F. P. Paternost, T. S. D. Ferreira, and F. C. L. Trindade, “Performance of a fault location method in the context of modern electric power distribution systems,” in 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), 2019, pp. 1–6.

N. Hadjsaid, J.-F. Canard, and F. Dumas, “Dispersed generation impact on distribution networks,” IEEE Computer Applications in Power, vol. 12, no. 2, pp. 22–28, 1999.

R. A. F. Pereira, L. G. W. da Silva, M. Kezunovic, and J. R. S. Mantovani, “Improved fault location on distribution feeders based on matching during-fault voltage sags,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 2, pp. 852–862, 2009.

F. C. L. Trindade, W. Freitas, and J. C. M. Vieira, “Fault location in distribution systems based on smart feeder meters,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 1, pp. 251–260, 2014.

S. Lotfifard, M. Kezunovic, and M. J. Mousavi, “Voltage sag data utilization for distribution fault location,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, pp. 1239–1246, 2011.

E. Senger, G. Manassero, C. Goldemberg, and E. Pellini, “Automated fault location system for primary distribution networks,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1332– 1340, 2005.

K. Zimmerman and D. Costello, “Impedance-based fault location experience,” in 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2005., 2005, pp. 211–226.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br

S. Rao, Engineering Optimization: Theory and Practice. Wiley, 2009.

C. Reiz and J. B. Leite, "Short-circuit calculation in unbalanced three-phase power distribution systems with distributed generation," in 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), 2019, pp. 1–6.

A. Drozdek, Data Structures and Algorithms in C++. Cengage Learning, 2012.

LAPSEE, Distribution system testing - 135 buses, 2022. [Online]. Available: https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenhariaeletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-decursos1193/

K. O. H. Pedersen, A. H. Nielsen, N. K. Poulsen, "Shortcircuit impedance measurement." IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, V. 150 (2), 2003. p. 169 - 174, 2003

L. Thurner and M. Braun, "Vectorized 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 (ISGTEurope), 2018, pp. 1–6

Agência Nacional De Energia Elétrica - Aneel. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Disponível em: < https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888_prodist_modulo_8_v11.pdf>. Acesso em: 11 set. 2024.(Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica, 2020).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193631
https://proceedings.science/p/193631?lang=pt-br