

A INFLUÊNCIA DA TENSÃO PRÉ-FALTA EM UM MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADO NA MATRIZ Z_{BUS} PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

VIVIANE D. PEDROSA, JÁDER F. D. BREDAS, JOSÉ CARLOS M. VIEIRA JR.

Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

Av. Trabalhador São-carlense n. 400, São Carlos (SP)

E-mails: vivianepedrosa@usp.br, jader.breda@usp.br, jcarlos@sc.usp.br

Abstract— This paper evaluates the influence of the pre-fault voltage on the performance of a new methodology for fault location in power distribution systems, based on the analysis of the impedance matrix (Z_{BUS}). For that, it uses data of smart meters installed in the electrical network, being responsible for the system monitoring and for the voltage and current measurements. In order to mitigate multiple estimation problems and to improve the efficiency of the method, the distribution system was divided into zones, reducing the search area of the algorithm. The study analyzed scenarios with faults in nodes and lines, with distributed generator and different values of fault resistance. The results showed an evident and significant improvement on the performance of the method when considered the pre-fault voltages, as well as the correct identification of the zones with fault and the absence of multiple estimates of the fault location.

Keywords— Fault location; bus impedance matrix; fault indicators; distributed generation; distribution systems.

Resumo— Este artigo avalia a influência da tensão pré-falta no desempenho de uma nova metodologia para localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica, baseada na análise da matriz de impedância (Z_{BUS}). Para isso utiliza dados de *smart meters* que são instalados na rede elétrica, sendo responsáveis pelo monitoramento do sistema e por medições de tensão e corrente. A fim de mitigar problemas de múltipla estimação e melhorar a eficiência do método, foi utilizado mapeamento e a divisão do sistema de distribuição em regiões, diminuindo a área de busca do algoritmo pela barra onde ocorreu a falta. O estudo analisou cenários com faltas em barras e linhas, com gerador distribuído e diferentes valores de resistência de falta. Os resultados mostraram uma evidente e significativa melhoria no desempenho do método quando empregado o valor das tensões pré-falta em todos os cenários simulados, como também a correta identificação das zonas com falha e a inexistência de múltiplas estimativas da localização da falta.

Palavras-chave— Localização de faltas; matriz de impedância de barra; indicadores de falta; geração distribuída; sistema de distribuição.

1 Introdução

Estudos voltados para a localização de faltas em sistemas de distribuição (SD) são importantes visto que têm por finalidade desenvolver e melhorar métodos que identificam a ocorrência de faltas na rede elétrica. Concessionárias de energia utilizam estes métodos para corroborar na manutenção de seus indicadores de continuidade para fornecer um serviço de qualidade de maneira a evitar o pagamento de multas por infringir os limites estabelecidos pelas agências reguladoras. Ainda, além de poder gerar onerações à concessionária responsável pela manutenção do serviço, as faltas presentes nos sistemas também geram prejuízos financeiros com a parada de processos industriais e danos em equipamentos conectados à rede elétrica, vindo a prejudicar também os consumidores conectados à rede.

Contudo, o local exato das faltas em SDs trata-se de algo complexo de se determinar, o que dificulta a execução de ações de controle para a restauração da rede, seja por meio de equipes de manutenção ou de operadores nos centros de operação. Porém, com o avanço dos dispositivos de monitoramento e automação do sistema elétrico rumo às redes inteligentes (*smart grids*), bem como de toda tecnologia associada a essa modernização, busca-se um melhor supervisionamento da rede elétrica quanto à ocorrência de distúrbios. Isso é possível por meio da aquisição de dados por medidores inteligentes (*smart*

meters) quase que em tempo real, podendo ser empregados em metodologias de localização de faltas que utilizem as grandezas elétricas como tensão, corrente e frequência. Essa integração entre as técnicas aplicadas e os equipamentos instalados no sistema, torna o monitoramento mais robusto e eficaz, trazendo maior confiabilidade à operação do SD. Desta forma, os algoritmos para localização automática de faltas são importantes para o setor de operação, planejamento e confiabilidade das concessionárias de energia.

Outro ponto importante, já que tem sido uma tendência buscar descentralizar a geração de energia elétrica, é a inserção de novas fontes de energia conectadas diretamente na rede de distribuição, caracterizando a Geração Distribuída (GD). Uma vez que esses geradores injetam potência na rede elétrica, no contexto da localização de faltas é necessária uma análise do comportamento dos geradores e de seus sistemas de proteção antes e durante as faltas. Assim, deve-se entender o efeito da penetração dos geradores distribuídos determinando o impacto que causam nas práticas de operação e planejamento dos SDs, bem como nas técnicas empregadas para a identificação de defeitos na rede elétrica.

Na literatura encontram-se diversos trabalhos relacionados com a localização de faltas em SDs que se diferem basicamente quanto ao método utilizado, número de variáveis e instrumentação utilizada no processo de localização de faltas.

Como exemplos de trabalhos que não consideram a presença de GD, tem-se Choi (2004) que propõe um método de

localização de faltas utilizando análise direta do circuito elétrico e que pode ser aplicado em qualquer sistema elétrico independente da condição de equilíbrio de fase. Além disso, Trindade (2014) apresenta um método que utiliza os valores de tensão obtidos nos medidores instalados na rede de média tensão para estimar a corrente de falta utilizando a matriz de impedância de barras do sistema. Entretanto, este método apresenta problemas de múltipla estimação, caracterizando mais de uma barra como possível local da falta.

Já no trabalho de Javadian (2009), a presença de GD é considerada e é utilizada uma abordagem para determinar o tipo de falta e a localização exata desta em sistemas de distribuição. Para isso, o método utiliza redes neurais do tipo MLP. Porém, uma fragilidade desses métodos inteligentes é a necessidade de um treinamento prévio, que muitas vezes demanda um alto custo computacional. Outros dois trabalhos que também apresentam GD em seus sistemas analisados são Das (2014) e Alwash (2015), baseados no método das impedâncias, e que avaliam qual o comportamento da falta no SD com a GD, quais são as principais fontes de erros e qual o tipo e o local da falta.

Como visto, dentre os principais desafios encontrados pelas técnicas propostas para a localização das faltas em SDs estão a reduzida disponibilidade de dados dos sistemas (topologia e medições) e a presença de GD no sistema. Neste contexto, o presente trabalho é baseado na ideia proposta em Trindade (2014), e nas melhorias deste no estudo apresentado em Pedrosa e Vieira (2018), que utilizou uma nova forma de abordar a matriz de impedância do sistema com um baixo número de medidores alocados. A matriz Z_{BUS} foi utilizada para estimar os valores de desvio de tensão durante a falta associando esses valores à leitura dos dispositivos indicadores de falta (IFs) por meio de um índice de correspondência, dessa forma vindo a identificar o trecho com defeito. Além disso, considera a inserção de GD no SD, a fim de estudar e analisar os impactos resultantes da conexão do gerador, o que não foi contemplado em Trindade (2014). Com isso, Pedrosa e Vieira (2018) apresentaram em seus resultados uma melhora quanto à eficiência do método, obtendo uma taxa de erro baixa na maioria dos cenários analisados.

A partir dos resultados obtidos em Pedrosa e Vieira (2018) e visto que os níveis de carregamento do sistema se refletem diretamente nas correntes e tensões pré-falta, avanços foram realizados em sua formulação e mostram que, ao considerar o valor correto da tensão de pré-falta, há uma melhoria significativa em relação aos resultados obtidos. Assim, este artigo objetiva acrescentar no método a grande importância de considerar valor das tensões de pré-falta nas barras do sistema. Contudo, para isso ser possível é necessário estimar as tensões nodais antes da ocorrência da falta no sistema. Desta forma, há a necessidade da utilização da ferramenta mais adequada para este caso que é a estimação de estado (Schweppe, 1970).

Ainda, os medidores utilizados neste trabalho são os IFs capazes de monitorar e reportar as grandezas elétricas. Os IFs são sensíveis à passagem da corrente de falta no local da linha em qual estão alocados, sinalizando quando há ocorrência do evento (Usida, 2012).

Portanto, este trabalho mostrará, como principal contribuição, a importância de se integrarem as ferramentas de localização de faltas e estimação de estado em sistemas de distribuição para melhorar a operação de redes de distribuição com presença de GD. Entretanto, vale adiantar que, ainda neste trabalho não será apresentada nenhuma técnica de estimação de estados. Assim, para os valores de tensão na condição de pré-falta do sistema, serão considerados valores obtidos previamente por um cálculo de fluxo de carga com a rede em condições normais de operação.

2 Fundamentos do Método

O método proposto se baseia em Trindade (2014) e também emprega a análise da matriz de impedância de barras (Z_{BUS}), utilizando a leitura dos desvios de tensão provenientes de medidores instalados ao longo do sistema de distribuição. A formulação matemática está apresentada em Pedrosa e Vieira (2018) e será repetida neste trabalho para o pleno entendimento do método.

Considera-se que os desvios são medidos por modernos indicadores de falta instalados no alimentador. Esses desvios medidos são comparados aos desvios calculados pelo algoritmo com os elementos da Z_{BUS} , usando para isso um índice de correspondência (γ_k) entre esses valores. A barra que apresentar o menor γ_k é classificada como a barra da rede elétrica onde aconteceu o curto-circuito.

A formulação matemática é apresentada de forma detalhada a seguir.

2.1 Fundamentos

As tensões nodais durante falta podem ser representadas por (1),

$$V^f = V^0 - Z_{BUS} I^f \quad (1)$$

em que V^f é a tensão durante falta da barra, V^0 é a tensão pré-falta e I^f é a corrente durante falta. Desta representação, admitindo que a falta ocorre na barra k , a tensão nesta pode ser obtida por (2).

$$v_k^f = v_k^0 - Z_{BUS_{kk}} i_k^f \quad (2)$$

em que $Z_{BUS_{kk}}$ é a impedância de Thévenin vista pelo local onde ocorreu a falta, sendo o elemento da diagonal principal da Z_{BUS} correspondente ao barramento sob falta. Na presença de impedância de falta Z_f , a tensão na barra k sob falta pode ser obtida por (3).

$$v_k^f = Z_f i_k^f \quad (3)$$

A partir de (2) e (3), a corrente total de falta trifásica é definida por (4).

$$i_k^f = \frac{v_k^0}{Z_{BUS_{kk}} + Z_f} \quad (4)$$

Assim, a tensão durante falta em qualquer barra pode ser obtida por (5).

$$v_{ik}^f = v_{ik}^0 - Z_{BUS_{ik}} i_k^f \quad (5)$$

em que $Z_{BUS_{ik}}$ é a impedância de transferência entre as barras i e k . Substituindo (4) em (5), obtém-se (6).

$$v_i^f = v_i^0 - \frac{Z_{BUS_{ik}}}{Z_{BUS_{kk}} + Z_f} \cdot v_k^0 \quad (6)$$

A partir de (6), pode-se entender que os desvios de tensão nos nós do sistema, quando da ocorrência de uma falta, podem ser interpretados por uma relação entre os elementos da matriz de impedância de barras, ou seja, entre as impedâncias equivalentes e as de transferência das barras, como mostrado em (7).

$$v_i^0 - v_i^f = \Delta v_i = \frac{Z_{BUS_{ik}}}{Z_{BUS_{kk}} + Z_f} \cdot v_k^0 \quad (7)$$

O valor da tensão pré-falta na barra k torna-se importante para a eficiência do método, como será ilustrado na seção 4, visto que este reflete os níveis de carregamento do sistema no momento antes da falta. No caso de não se ter este valor, pode-se utilizar um processo de estimação de estados para obtê-lo a partir de outras medidas de tensões e correntes do sistema e da própria topologia do sistema. Assim, considerando as tensões por unidade, tem-se:

$$\Delta v_i = \frac{Z_{BUS_{ik}}}{Z_{BUS_{kk}} + Z_f} \cdot v_k^0 (p.u.) \quad (8)$$

Uma outra possibilidade mais simples e não tão eficiente como a anterior (como será visto na seção 4), mas também considerando as tensões por unidade, no caso de não se ter posse do valor da tensão pré-falta na barra k , é considerá-lo igual a 1 p.u., daí tem-se (9).

Em (9) Δv_i é o desvio de tensão na barra i , quando ocorre um curto-circuito na barra k , para $k \neq i$. A partir de (8) ou (9) são estimados os valores de desvios de tensão em todas as barras do sistema utilizando os elementos da matriz Z_{BUS} e impedância de falta nula. Então, tendo um medidor localizado na barra i , entende-se que quando ocorre uma falta, o desvio de tensão medido (Δv_i^m), dado por (10), será semelhante ao calculado (Δv_i).

$$\Delta v_i = \frac{Z_{BUS_{ik}}}{Z_{BUS_{kk}} + Z_f} (p.u.) \quad (9)$$

$$\Delta v_i^m = v_i^0 - v_i^f \quad (10)$$

Para correlacionar esses valores, considerando N medidores no sistema de distribuição, utilizou-se um índice de desvio de tensão (γ) definido por (11). Este índice calcula a diferença entre Δv_i e Δv_i^m , para cada elemento da linha i e coluna j da Z_{BUS} , onde $i \neq j$.

$$\gamma_i = \min \left(\Delta v_{ij} - \Delta v_i^m \right) \quad j = 1, 2, \dots, ncol \quad (11)$$

em que $ncol$ é o número de colunas da Z_{BUS} .

Cada medidor é analisado independentemente, dessa forma cada um estima sua barra de falta. Para cada medidor, a barra associada ao menor valor do índice de correspondência, ou seja, à menor diferença entre os valores de tensão dos medidores e os calculados pela Z_{BUS} , é classificada pelo método como a barra sob ocorrência da falta. Assim, a barra sob falta será aquela que obtiver mais indicações dos medidores em operação.

2.2 Inserção do gerador distribuído e das cargas na Y_{BUS}

As cargas são modeladas por suas potências ativa e reativa, considerando-as como impedância constante. A impedância é transformada em admitância e inserida na Y_{BUS} na posição ii que corresponde à barra em que a carga está conectada. Na análise proposta, a GD é modelada na matriz pela reatância transitória de eixo direto (x'_d), que é convertida em admitância e adicionada à Y_{BUS} na posição jj , correspondente à barra em que o gerador está conectado.

2.3 Fluxograma

A Fig. 1 apresenta o fluxograma da metodologia proposta, indicando todas as etapas utilizadas para localização da falta.

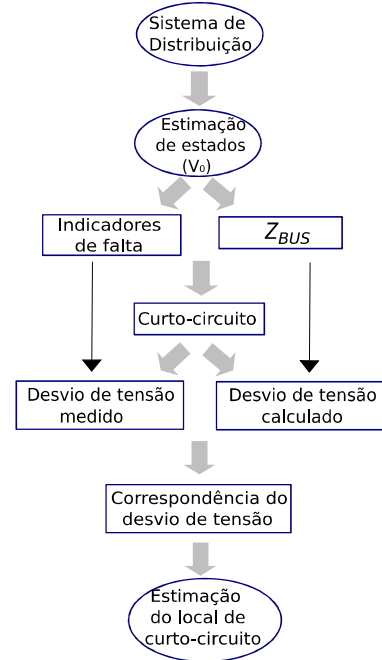


Figura 1. Fluxograma do método proposto.

Passo 1 - Obter os dados topológicos, o carregamento e os valores das impedâncias das linhas de distribuição.

Passo 2 - Após a detecção da falta, dispara-se o método de localização, tendo como primeiro passo a estimação do estado do sistema elétrico para obter as tensões pré-falta. Neste ponto ressalta-se que este trabalho admite que a falta foi detectada corretamente, portanto, a descrição de um método de detecção da falta não é escopo deste estudo. Além disso, ressalta-se que não foi implementada uma técnica de estimação de estado. Considera-se que o estado é estimado corretamente.

Passo 3 - Obter as matrizes Y_{BUS} e Z_{BUS} , considerando o sistema em condições normais de operação.

Passo 4 - A partir das medições dos indicadores de falta, são calculados os Δv^m_i , de acordo com (8) ou (9) e (10).

Passo 5 - Calcular o γ_i para cada IF, de acordo com (11). Assim, cada um indicará uma barra como possível local de falta. Portanto, a barra selecionada por cada IF será a que possuir menor valor de γ_i

Passo 6 - A barra selecionada como possível local de falta será a que receber maior número de indicações, de acordo com o *Passo 3*.

3 Sistema de Distribuição

O sistema IEEE 34 barras (IEEE, 2001) foi utilizado para simulação e testes com o algoritmo proposto. Esse sistema possui ramos trifásicos e monofásicos em tensão de linha de 24,9 kV, com carregamento desequilibrado e tamanho de alimentador de 59,3 km. Para o estudo foram realizadas algumas modificações no SD a fim de simplificar a aplicação do método bem como de direcionar as análises propostas. Assim, foram excluídos os reguladores de tensão presentes no sistema original, as cargas foram redimensionadas a fim de tornar o sistema balanceado, os ramos laterais monofásicos e bifásicos foram transformados em trifásicos e o ramo de baixa tensão foi excluído, visto que este trabalho foca apenas na localização de faltas correndo na rede de média tensão.

A Fig. 2 mostra o sistema de distribuição após as modificações realizadas para o estudo. O gerador distribuído tem seu ponto de acoplamento no nó 16, sendo este escolhido por ser um ramo que apresenta grande quantidade de cargas conectadas à rede elétrica, e está localizado distante da subestação.

A GD foi modelada como uma máquina síncrona, determinando seu valor de reatância transitória, 0,295 p.u., e tendo 1 MVA de potência nominal. Nas simulações foi considerada injetando 50% de sua potência total com fator de potência unitário, ou seja, 500 kW.

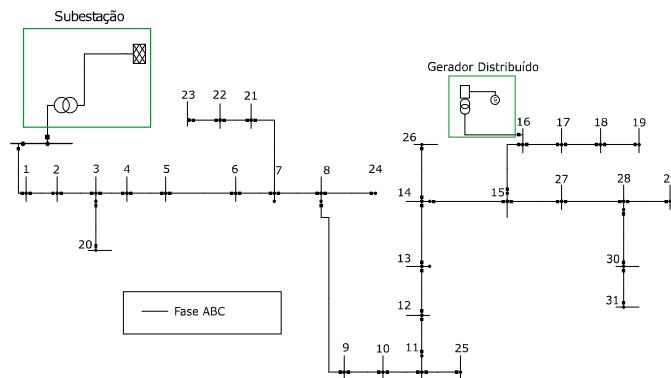


Figura 2. IEEE 34 barras modificado.

3.1 Sistema de monitoramento

Os indicadores de falta (IFs) são empregados em sistemas de distribuição aéreos, instalados em pontos estratégicos da rede, visando identificar regiões afetadas por curtos-circuitos. Dessa forma o defeito é identificado com maior rapidez, diminuindo o tempo de procura do problema pela equipe de manutenção da concessionária, possibilitando assim que o sistema seja rapidamente restabelecido, ou seja, diminuindo o tempo de interrupção.

Neste trabalho, foi admitido o emprego de modernos indicadores de falta para monitoramento e aquisição dos dados de tensão e corrente, grandezas elétricas utilizadas pelo método para localização da falta, levando em consideração que há comunicação entre os IFs e um centro de controle do sistema de distribuição. A alocação desses dispositivos na rede elétrica é definida de acordo com a topologia do SD a fim de posicioná-los em lugares estratégicos, geralmente em ramos laterais ou alimentadores que apresentam grande extensão (Usida, 2012). Levando em consideração essa motivação e estudos empíricos, os IFs foram alocados no sistema IEEE 34 barras, conforme mostra a Fig. 3.

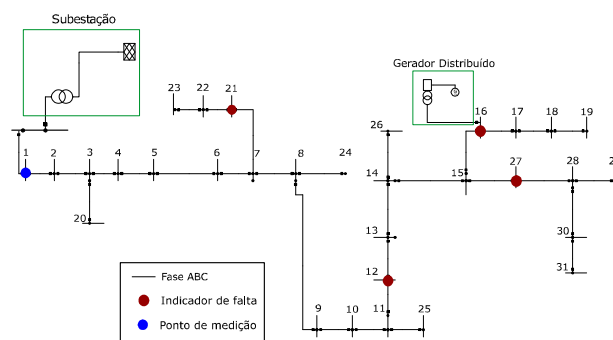


Figura 3. Sistema de distribuição com os pontos de medição.

Como mostrado, os IFs estão instalados no sistema de distribuição nas barras: 12, 16, 21 e 27. Além desses dispositivos, foi levado em consideração um ponto de medição no nó 1 onde a subestação está conectada, visto que sempre há uma supervisão das grandezas elétricas e equipamentos nesse ponto.

3.2 Mapeamento automático de regiões

Com o objetivo de eficientizar o método e diminuir a região de busca do algoritmo, o sistema de distribuição foi dividido em zonas de monitoramento delimitadas pelos pontos de instalação dos indicadores de falta, como ilustrado na Fig. 4. Essa abordagem considera que os IFs possuem comunicação com um sistema de controle responsável pelo recebimento dos dados registrados nas barras onde estão instalados.

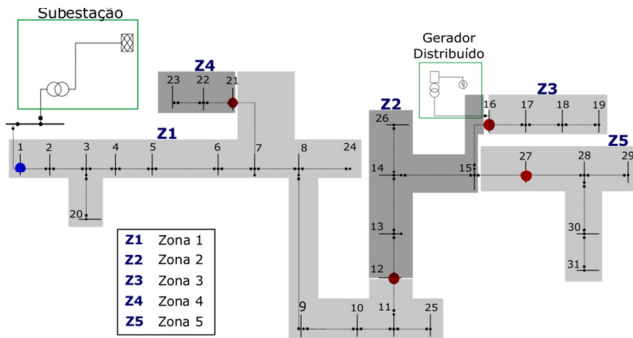


Figura 4. Zonas de mapeamento do SD.

Os IFs que tiverem leitura de corrente acima de um determinado ajuste, serão sensibilizados e considerados no método para determinar a localização da falta. Os IFs não sensibilizados serão descartados pelo método, indicando que a falta não ocorreu naquela região.

4 Simulações e Resultados

O algoritmo foi implementado em MATLAB e foi usado o DIGSILENT PowerFactory (DIGSILENT, 2014) para simular os casos de curto-circuito.

Foram realizadas simulações apenas de faltas trifásicas no SD, utilizando o valor da tensão pré-falta v^0 e comparando aos resultados obtidos sem v^0 , com intuito de demonstrar a influência dessa variável para a metodologia proposta. A seguir são descritos os cenários de simulações:

- *Cenário 1: Falta nas barras; SD com carga e sem GD; $Z_f = 0$;*
- *Cenário 2: Falta nas barras; SD com carga e com GD; $Z_f = 0$;*
- *Cenário 3: Falta nas barras; SD com carga e com GD; $Z_f = 5 \text{ ohm}$;*
- *Cenário 4: Falta nas barras; SD com carga e com GD; $Z_f = 10 \text{ ohm}$;*
- *Cenário 5: Falta na linha (25%); SD com carga e com GD; $Z_f = 0$;*
- *Cenário 6: Falta na linha (50%); SD com carga e com GD; $Z_f = 0$;*

- *Cenário 7: Falta na linha (75%); SD com carga e com GD; $Z_f = 0$;*

Os erros de estimação do local da falta foram calculados utilizando (12).

$$\varepsilon = |D_R - D_E| \quad (12)$$

Em que D_R é a distância real da barra sob falta, D_E é a distância da barra estimada pelo método como sendo a barra sob falta. As distâncias são calculadas tomando por referência a subestação do sistema de distribuição.

4.1 Cenário 1

Este cenário apresenta os resultados obtidos nas simulações de faltas nas barras do SD, com 100% de carregamento do sistema, sem impedância de falta, e sem conexão do gerador distribuído na rede elétrica. A Tabela 1 apresenta os erros de estimação do local da falta para este cenário, ou seja, quantos casos de curto-circuito que obtiveram erro, estes sendo classificados por suas distâncias.

Tabela 1. Resultados do Cenário 1.

Classe de erros (m)	Número de ocorrências	
	Sem v^0	Com v^0
0	17	26
0-500	8	4
500-1000	1	0
>1000	4	0
Somatório dos erros	8,05 km	0,61 km

Pode-se notar que houve uma melhora bastante significativa na estimação do local da falta quando utilizado o valor de v^0 , obtendo nesse cenário 26 casos de acerto, em um total de 30 casos simulados. Os demais erros ficaram todos na classe abaixo de 500 m, demonstrando a otimização do método quanto aos erros de maior distância apresentados sem a utilização do valor pré falta. Contudo, nenhum caso de erro apresentou estimação da barra de falta em região diferente da barra de falta onde realmente aconteceu o curto-circuito, de acordo com a delimitação de zonas de busca determinada pelos IFs.

4.2 Cenário 2

Este cenário apresenta os resultados obtidos nas simulações de faltas nas barras do SD, com 100% de carregamento do sistema, sem impedância de falta, com conexão do gerador distribuído na rede elétrica. A Tabela 2 apresenta os erros de estimação do local da falta para este cenário.

Tabela 2. Resultados do Cenário 2.

Classe de erros (m)	Número de ocorrências	
	Sem v^0	Com v^0
0	14	21
0-500	6	8
500-1000	3	1
>1000	7	0
Somatório dos erros	13,34 km	1,61 km

Neste caso também nota-se que a diferença dos resultados obtidos com a utilização de v^0 , quando comparados aos valores encontrados sem a tensão pré-falta, são bem significativos. O número de acertos aumentou consideravelmente e nenhum caso foi classificado com distância acima de 1000 m. Neste cenário também não houve casos de estimação da barra de falta em região diferente da barra de falta onde realmente aconteceu o curto-circuito.

4.3 Cenários 3 e 4

Estes cenários apresentam os resultados obtidos com 100% de carregamento do sistema, com impedâncias de falta de 5 ohm e 10 ohm, respectivamente, com presença do gerador distribuído na rede elétrica. A Tabela 3 apresenta os erros de estimação do local da falta para estes cenários.

Tabela 3. Resultados dos Cenários 3 e 4.

Classe de erros (m)	Número de ocorrências			
	Cenário 3		Cenário 4	
	$Z_f = 5\Omega$		$Z_f = 10\Omega$	
	Sem v^0	Com v^0	Sem v^0	Com v^0
0	8	9	8	8
0-500	3	5	0	2
500-1000	2	1	1	2
>1000	17	15	21	18
Somatório dos erros	55,85 km	50,08 km	96,32 km	75,64 km

O erro aumentou significativamente com a presença de resistência de falta, mesmo com a utilização da tensão pré-falta, em ambos os cenários. De forma geral, a maioria dos casos simulados apresentou erros acima de 1000 m, mostrando que quanto maior o valor da impedância de falta, maior o erro. Apesar dos efeitos negativos ocasionados pela resistência de falta, nenhum erro apresentou estimação da barra de falta em região diferente da barra de falta onde realmente aconteceu o curto-circuito. Observou-se que, considerando a tensão pré-falta, houve uma melhoria no desempenho global do método. Ressalta-se que a dependência do método com a impedância de falta é elevada e estudos adicionais são necessários para mitigá-la.

4.4 Cenários 5, 6 e 7

Estes cenários apresentam os resultados obtidos para faltas entre os nós, com distâncias de 25%, 50% e 75%, do valor total das linhas entre barras, tendo 100% de carregamento no sistema, sem impedância de falta e com presença do gerador distribuído na rede elétrica. A Tabela 4 apresenta os erros de estimação do local da falta para estes cenários.

Tabela 4. Resultados dos Cenários 5, 6 e 7.

Classe de erros (m)	Número de ocorrências					
	Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7	
	$D = 25\%$		$D = 50\%$		$D = 75\%$	
	Sem v^0	Com v^0	Sem v^0	Com v^0	Sem v^0	Com v^0
0	13	21	15	22	17	17
0-500	4	3	5	3	4	5
500-1000	3	1	2	1	2	0
>1000	8	3	7	3	6	7
Somatório dos erros	31,90 km	21,5 km	20,00 km	14,07 km	16,85 km	15,01 km

Obteve-se erro nulo na maioria dos casos, tendo como pior caso o cenário com distância de 25% da linha. Com a utilização de v^0 esse comportamento se manteve, porém o erro total nos três cenários diminuiu, demonstrando que nesses casos o valor da tensão pré-falta também influenciou nos resultados, melhorando a porcentagem de acertos do algoritmo. Contudo, mesmo dentre os casos mais severos, nenhum erro apresentou estimação da barra de falta em região diferente da barra de falta onde realmente aconteceu o curto-circuito, de acordo com a delimitação de zonas de busca determinada pelos IFs.

4.5 Discussão

Em relação aos cenários analisados, verificou-se que no cenário de carregamento 100%, faltas nas barras e sem GD (Cenário 1), com a utilização da tensão pré-falta o erro praticamente zerou, chegando a menos de 1 km para todos os nós de falta. Com a inserção do gerador o erro aumentou um pouco, porém ainda se mostrou bem abaixo quando comparado com o cenário sem v^0 , garantindo ao algoritmo uma boa eficácia quanto à localização do defeito. Além disso, nos cenários de faltas nas linhas o erro aumentou, porém ainda manteve um bom desempenho, considerando que sua maioria teve erro máximo de 500 m. Contudo, quando inserida a impedância de falta, o algoritmo apresentou erros bastante elevados, em sua maioria acima de 1000 m, mostrando que o método é sensível à impedância de falta, sendo necessário um estudo mais aprofundado de como tratar esse problema e mitigar esses erros. Esse comportamento se manteve nos testes com a utilização dos valores pré-falta, porém diminuíram quantitativamente quando comparados com os valores sem v^0 . Vale salientar também que mesmo nos cenários em que o erro se apresentou mais severo, o algoritmo acertou as regiões em que a falta aconteceu, mostrando que os erros se apresentam na mesma região onde o defeito ocorreu.

5 Conclusões

Neste trabalho foi proposta uma nova forma de abordar a matriz de impedância de barra para estudos de localização de falta, estimando os desvios de tensão quando ocorre um defeito. Para isso, também se utilizou a instalação de indicadores de falta como pontos de monitoramento do sistema capazes de reportar valores de desvios de tensão e corrente, delimitando regiões de busca a fim de melhorar a aplicação do algoritmo no caso de curto-circuito no sistema de distribuição.

Foram realizadas simulações com vários cenários, alterando local e impedância de falta, bem como também foi analisada a presença de geração distribuída conectada à rede elétrica. Em todos os cenários foram realizados estudos com o valor da tensão pré-falta e então comparados aos resultados sem a utilização de v^0 , com finalidade de analisar a sensibilidade do método a essa variável bem como sua interferência nos erros obtidos. Esta comparação mostrou que a utilização da tensão pré-falta melhorou significativamente praticamente em todos os testes realizados, melhorando a eficiência da metodologia proposta pelo presente estudo.

Para mitigar ainda mais este problema, devem ser empregados IFs com elevada precisão que tenham boa confiabilidade, minimizando esses erros de estimação. Além disso, os valores de v^0 devem ser precisos a fim de garantir essa melhoria nos resultados obtidos pelo algoritmo. Assim faz-se necessário o uso de um estimador de estados eficiente para identificar os valores de tensão dos nós do sistema de distribuição antes da ocorrência da falta. Salienta-se que neste estudo não foi implementada nenhuma metodologia para esse fim, sendo utilizados os valores de tensão pré-falta obtidos no fluxo de carga com a rede em condições normais de operação. Para trabalhos futuros, já está em desenvolvimento um metodologia mais abrangente, que realizará esta integração entre as duas ferramentas de operação do SD aqui citadas: localização de faltas e estimador de estado. Ainda, sobre o processo de estimação de estados que será implementado, este terá como base a metodologia abordada em Breda et al (2016) em que os autores utilizaram a técnica de Decomposição em Valores Singulares (DVS) na formulação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento parcial desta pesquisa e à Escola de Engenharia de São Carlos da USP.

Referências Bibliográficas

- Alwash, S. F.; Ramachandramurthy, V. K. and Mithulananthan, N. (2015). Fault-Location Scheme for Power Distribution System with Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1187-1195.
- Breda, J. F. D.; Vieira, J. C. M.; Oleskovicz, M. (2016). Three-phase harmonic state estimation for distribution systems by using the SVD technique. *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*.
- Choi, M. S.; Lee, S. J.; Lee, D. S. and Jin, B. G. (2004). A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 19, no. 1.
- Das, S.; Santoso, S. and Maitra, A. (2014). Effects of distributed generators on impedance-based fault location algorithms. *IEEE PES General Meeting, National Harbor, MD*, pp. 1-5.
- DIgSILENT (2014) PowerFactory, User manual 15, Germany.
- IEEE (2001) 34-Bus Test Feeder - Distribution Test Feeder Working Group. *IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee*.
- Javadian, S. A. M.; Nasrabadi, A. M.; Haghifam, M. R. and Rezvantalab, J. (2009). Determining fault's type and accurate location in distribution systems with DG using MLP Neural networks. *Clean Electrical Power, International Conference on Capri*, pp. 284-289 S.
- Pedrosa, V. D. and Vieira, J. C. M. (2018). Fault Location Using Modern Fault Indicators in the Presence of Distributed Generation. *VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*.
- Schwepe, F. C. (1970). Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 130-135.
- Trindade, F. C. L.; Freitas, W. and Vieira, J. C. M. (2014). Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 29, no 1, pp. 251-260.
- Usida, W. F.; Coury, D. V.; Flauzino, R. A. and Silva, I. N. (2012). Efficient Placement of Fault Indicators in an Actual Distribution System Using Evolutionary Computing. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol 27, no. 4.