

Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Por Meio da Otimização por Nuvem de Partículas

Paulo C. F. Freitas, Wilington G. Zvietcovich, Laerty J. S. Damião, Francisco R. A. C. Baracho, Laura F. Souza

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Ouro Preto,
João Monlevade, Minas Gerais, Brasil*

*(paulo.freitas@ufop.edu.br, wilington@ufop.edu.br, laerty.damiao@aluno.ufop.edu.br, f_baracho@ufop.edu.br,
laura.souza1@aluno.ufop.edu.br)*

Abstract: In distribution systems, accurate information about the fault location is necessary for the quick restoration of the service in the face of a power interruption caused by a permanent fault. Consequently, such location is also important to avoid major losses in power quality indicators. Thus, this work proposes a methodology for fault location in distribution systems using the Particle Swarm Optimization meta-heuristic. For this, the information of the meter channels installed in the system is used. Different types of short circuits were considered: phase-to-ground, phase-to-phase, phase-phase-to-earth, and three-phase with different fault impedance values. The simulations have been performed in 33-bus and 202-bus networks and the results have been useful in showing the efficiency of the method in locating the fault points with high precision and low processing time.

Resumo: Em sistemas de distribuição, informações precisas sobre a localização de faltas são necessárias para a restauração rápida do serviço frente à interrupção da energia elétrica, causada por uma falta permanente. Consequentemente, tal localização também é importante para evitar grandes prejuízos nos indicadores de qualidade de energia. Assim, neste trabalho é proposta uma metodologia para a localização de faltas em sistemas de distribuição através da meta-heurística Otimização por Nuvem de Partículas. Para isso, são utilizadas as informações dos canais de medidores instalados na rede elétrica. Foram considerados diferentes tipos de curtos-circuitos: monofásico (fase-terra), bifásico (fase-fase e fase-fase-terra) e trifásico com diferentes valores de impedância de falta. Para validar a metodologia, foram utilizadas redes de 33 e 202 barras. Os resultados mostraram a eficiência do método para localizar os locais de falta, em diferentes casos abordados, com elevada precisão e baixo tempo de processamento.

Keywords: Distribution systems, fault location, optimization, PSO-Algorithm, short circuit.

Palavras-chaves: Algoritmo ONP, curto-circuito, localização de faltas, otimização, sistemas de distribuição.

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de faltas elétricas (ou curtos-circuitos) nas redes elétricas constitui um dos principais problemas para os operadores da rede. Isso porque os requisitos quanto a continuidade e qualidade do fornecimento são cada vez mais exigentes e as redes, normalmente, estão expostas a situações imprevisíveis como, por exemplo, queda de árvores e descargas atmosféricas (Coser et al., 2006). Nesse sentido, dependendo do tipo, da intensidade e tempo de duração, uma falta tem grande potencial para interromper o fornecimento de energia elétrica a grandes blocos de carga (consumidores) devido ao disparo do sistema de proteção (disjuntores, chaves e/ou reles). Essa situação, por sua vez, pode causar prejuízos às concessionárias, dada a possibilidade de danos a equipamentos conectados à rede elétrica e principalmente devido à deterioração dos indicadores de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) (Hubana, 2018)

Frente à interrupção do serviço devido à ocorrência de uma falta, as concessionárias de energia têm procedimentos

próprios para localizar a origem da mesma e enviar as equipes de manutenção para o reparo da área afetada. A localização, isto é, a identificação do local da falta, é de grande importância para a redução dos custos de reparo do sistema elétrico e, por essa razão, sua eficiência é pautada principalmente pela rapidez da execução do processo (Chen et al., 2019), visando reduzir o tempo de interrupção de energia elétrica. Somado a isso, a necessidade de um procedimento rápido para a localização de falta também é evidenciada pela presença, cada vez mais recorrente, de cargas que requerem um serviço de elevada confiabilidade (Deví et al., 2016).

Assim, dada a necessidade de reduzir o tempo de identificação de uma falta elétrica frente à complexidade dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEEs), que normalmente possuem grande quantidade de elementos (linhas, equipamentos, blocos de carga), o problema de localização de faltas é melhor solucionado utilizando sistemas computacionais (*softwares*) os quais precisam de informações da rede e da operação, além de uma quantidade mínima de medidores instalados na rede.

Na literatura, existem diversos métodos para resolver problemas desse tipo que, quanto ao tipo de dados utilizados, podem ser divididos em dois grupos (Cosser et al., 2006). O primeiro grupo utiliza as medições de sinais de regime permanente. Nesse caso, são utilizadas as medições das componentes fundamentais de tensões e correntes, a partir das quais podem ser determinados, por exemplo, o valor da componente reativa da impedância de linha que é, por sua vez, proporcional à distância do ponto de defeito (Dashti and Sadeh, 2014).

Já o segundo grupo utiliza informações contidas nos sinais transitórios registrados durante uma falta. Assim, os conceitos de ondas viajantes e as informações a respeito da energia transitória (Wang et al., 2019) podem ser empregadas na localização do ponto de falta na rede.

Atualmente, visto os avanços para os SDEEs operarem dentro da filosofia das Redes Inteligentes (ou, do inglês: *Smart Grids*), os métodos que utilizam informações reais de uma operação têm à disposição uma vasta quantidade de informações registradas. Essas informações são provenientes de medidores, do sistema de proteção, dos equipamentos de controle entre outros, os quais se comunicam em tempo real com o centro de operação. Neste contexto, tratar o problema de localização de faltas através de métodos heurísticos e meta-heurísticos ou através de sistemas inteligentes que fazem uso de Redes Neurais e Lógica *Fuzzy* tem sido uma prática bastante abordada na literatura (Babayomi et al, 2017).

Neste trabalho, uma metodologia para localização de faltas trifásicas, bifásicas (fase-fase e fase-fase-terra) e monofásicas (fase-terra) é proposta através da meta-heurística Otimização por Nuvem de Partículas (ONP). Para isso, utilizou-se simulações de curto-circuito e medições de tensão no instante de falta. Os testes foram aplicados em sistemas de distribuição radiais de 33 e 202 barras.

2. MODELAGEM DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Para que o processamento da localização de faltas seja realizado por técnicas de otimização, informações medidas e simuladas precisam ser avaliadas através de um modelo matemático, isto é, a partir de uma função objetivo.

Nesse sentido, a forma de medição, a modelagem da função objetivo e a codificação da solução para um método numérico são apresentadas a seguir.

2.1 Medição

Neste trabalho, a localização do ponto de falta é determinada a partir dos valores eficazes da tensão registrados no instante da falta. No sistema elétrico, medições desse tipo podem ser obtidas a partir de medidores modernos que são alocados em pontos estratégicos da rede para fins de proteção, controle e, até mesmo, monitoramento. Isso é possível devido à capacidade de tais medidores de se comunicarem remotamente com os sistemas supervisórios e de aquisição de dados (SCADA).

Outra importante característica dos medidores para aplicação no problema de localização de faltas refere-se à sua capacidade de medição sincronizada que, a partir de um sistema de posicionamento global (GPS), é essencial para medições em mais de um terminal. Isso permite que os dados medidos tenham a mesma referência de tempo e, dessa forma, impede que o processamento da localização seja afetado por variações de impedâncias na rede (Lin et al., 2013).

2.2 Função Objetivo

A função objetivo proposta consiste em minimizar a diferença entre os valores de tensão no instante da falta registrados pelos medidores e simulados via análise de curto-circuito (Grainger and Stevenson, 1994). A representação matemática da função objetivo é dada em (1).

$$F.O. = \min \sum_{i=1}^n (V_{m,A} - V_{s,A})^2 + (V_{m,B} - V_{s,B})^2 + (V_{m,C} - V_{s,C})^2 \quad (1)$$

onde:

- n representa a quantidade de medidores instalados na rede;
- $V_{m,A}$, $V_{m,B}$ e $V_{m,C}$, representam os valores de tensão registrados pelos medidores nas fases A, B e C, respectivamente, no instante da falta;
- $V_{s,A}$, $V_{s,B}$ e $V_{s,C}$, representam os valores de tensão simulados nas fases A, B e C, respectivamente, para o instante da falta.

Destaca-se que no instante da falta o sistema de proteção atua e envia informação à central de operação (ambiente de *Smart Grid*). A partir desta informação, os medidores são acessados remotamente para obter os valores de tensão.

2.3 Codificação da solução

A solução do problema de localização de faltas é representada, na metodologia proposta, por um vetor de três dimensões conforme mostra a Fig. 1. A primeira posição define o valor da impedância acumulada desde a subestação até o local da falta (Z_{ac}), que está diretamente associada ao ponto de defeito (Dashti and Sadeh, 2014). Já a segunda a posição indica o valor da impedância de falta (Z_f). Por sua vez, a terceira posição indica o tipo de falta identificada.

$$\text{Solução} = \begin{bmatrix} Z_{ac} & Z_f & \text{Tipo Falta} \end{bmatrix}$$

Fig. 1 Vetor solução do problema de localização de faltas.

Vale notar que os valores Z_{ac} e Z_f do vetor solução correspondem à falta que leva o sistema às tensões $V_{s,A}$, $V_{s,B}$ e $V_{s,C}$ que, por sua vez, geram o menor custo na função objetivo. A dinâmica do processo iterativo para atingir o valor mínimo da função objetivo é determinada de acordo com o método numérico utilizado que, neste trabalho, é a Otimização por Nuvem Partículas.

3. OTIMIZAÇÃO POR NUVEM DE PARTÍCULAS

A Otimização por Nuvem de Partículas é uma meta-heurística evolucionária que simula o comportamento social de um bando de pássaros (partículas) em voo, com posição localmente aleatória, mas globalmente direcionada (Eberhart and Kennedy, 1995).

No algoritmo, cada partícula guarda as seguintes informações: posição atual; velocidade atual; custo atual; melhor posição pessoal; melhor custo pessoal; melhor posição global e melhor custo global.

A *posição atual* da partícula é tratada como sendo um ponto em um espaço d -dimensional representado por um vetor X . Por exemplo, seja a partícula i que se move em um espaço de dimensão d , então sua posição atual é dada por $X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{id}]$. Logo, cada posição que a partícula toma ao longo de suas iterações possui um relacionado custo avaliado na função objetivo. Se o custo da partícula i na iteração j , isto é, C_j , é o menor custo que a partícula teve dentre todas as iterações já computadas, então C_j é o *melhor custo pessoal* e a posição cuja componentes levam a esse custo é dita ser a *melhor posição pessoal (pbest)*. Representa-se *pbest* através do vetor $P_i = [P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{id}]$.

Se existem n partículas no enxame (nuvem), existem, então, n vetores que representam a melhor posição de cada partícula. Dentre essas, se a melhor posição pessoal da partícula i é a que representa o menor custo, então esse é o *melhor custo global* e essa posição é dita ser a *melhor posição global (gbest)*. Tal posição é representada por $P_g = [P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gd}]$.

A última informação a ser guardada pela partícula é a sua *velocidade atual*, que se relaciona ao passo dado por uma partícula entre duas iterações consecutivas. A velocidade da partícula é representada por um vetor V_i de mesma dimensão do vetor posição X_i .

Diante desses conceitos, apresentam-se as duas equações básicas da Otimização Por Nuvem de Partículas que descrevem, respectivamente, a velocidade e a posição de uma partícula:

$$V_{id} = W \times V_{id} + c_1 \times r_1(P_{id} - X_{id}) + c_2 \times r_2(P_{gd} - X_{id}) \quad (2)$$

$$X_{id} = X_{id} + V_{id} \quad (3)$$

onde:

- V_{id} é a velocidade da partícula i no espaço de dimensão d ;
- W é o coeficiente de inércia da partícula;
- c_1 e c_2 são duas constantes positivas que correspondem às componentes cognitiva e social.
- r_1 e r_2 são números aleatórios entre 0 e 1.

Em (2) o coeficiente de inércia, W , é utilizado para controlar o impacto da velocidade anterior na velocidade atual. Se W for um valor relativamente alto, então a partícula tende a procurar uma posição muito distante à da iteração anterior. Ainda nesta equação, a primeira parcela é chamada de *termo de inércia*; a

segunda parcela é a *componente cognitiva*, que representa o quanto a partícula tende a se locomover baseando-se em sua própria experiência; e a terceira parcela, por sua vez, é a *componente social*, que dita o quanto a partícula tende a se locomover baseando-se na experiência de seus vizinhos.

Especificamente para o desenvolvimento deste trabalho, o algoritmo da ONP foi implementado utilizando 15 partículas. O peso de inércia e os coeficientes cognitivo e social foram definidos de forma experimental da seguinte forma: $W = 0,4$, $c_1 = 0,2$ e $c_2 = 0,3$.

4. APLICAÇÃO DA ONP AO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Para a determinação do local de falta através da ONP, o algoritmo implementado foi desenvolvido em cinco etapas, conforme descrito nas seções seguintes.

4.1 Etapa 1: determinação dos valores pré-falta

O estado de operação da rede antes da ocorrência do defeito é importante para a simulação de falta na etapa 3. Os valores de tensão pré-falta são inicialmente determinados através do fluxo de potência. Como os sistemas utilizados neste trabalho são radiais, utilizou-se o método da Varredura Reversa/Direta nessa tarefa (Shirmohammadi et al., 1988).

4.2 Etapa 2: inicialização dos vetores posição e velocidade das partículas

No algoritmo desenvolvido, a posição das partículas representa uma possível solução do problema e, por essa razão, cada uma delas tem sua posição representada por um vetor de tamanho dois, conforme descrito na seção 2.3. Como posição e velocidade têm, de acordo com (3), a mesma dimensão, observa-se que o vetor V_i também possui duas posições.

Em um processo de otimização, os valores iniciais das variáveis do modelo devem ser tomados para que não haja influência no resultado. Dessa forma, neste trabalho, os vetores posição e velocidade são inicializados com valores aleatórios e nulos, respectivamente. A Fig. 2 ilustra um exemplo.

	Vetor Posição		Vetor Velocidade					
	Z_{ac}	Z_f						
Partícula 1:	$X_1 =$	<table border="1"><tr><td>0,0035</td><td>5,5385</td></tr></table>	0,0035	5,5385	$V_1 =$	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	0
0,0035	5,5385							
0	0							
Partícula 2:	$X_2 =$	<table border="1"><tr><td>0,0051</td><td>1,9426</td></tr></table>	0,0051	1,9426	$V_2 =$	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	0
0,0051	1,9426							
0	0							
Partícula 3:	$X_3 =$	<table border="1"><tr><td>0,0914</td><td>13,897</td></tr></table>	0,0914	13,897	$V_3 =$	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	0
0,0914	13,897							
0	0							
Partícula 4:	$X_4 =$	<table border="1"><tr><td>0,0352</td><td>19,004</td></tr></table>	0,0352	19,004	$V_4 =$	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	0
0,0352	19,004							
0	0							

Fig. 2 Inicialização dos vetores posição e velocidade de cada partícula com valores aleatórios e nulos, respectivamente.

4.3 Etapa 3: cálculo de curto-circuito e avaliação da função objetivo

Com os vetores posição das partículas definidos, as informações sobre Z_{ac} e Z_f são utilizadas para calcular o custo

da função objetivo para cada partícula e para cada tipo de curto-circuito considerado.

Esse procedimento é melhor exemplificado através da Tabela 1, na qual é exposto o custo de cada possível solução, definida pela posição das partículas representadas na Fig. 2.

Tabela 1. Avaliação da Função Objetivo para cada partícula e tipo de falta

X_i	Curto-Circuito			
	Trifásico	Fase-Fase	Fase-Fase-Terra	Fase-Terra
1	132,58	395,79	118,06	3,29
2	128,75	355,37	117,17	4,84
3	111,97	293,79	113,30	2,32
4	88,92	224,86	107,33	14,29

Nesse caso específico, observa-se que $gbest = 2,32$ e $pbest$ é dado pela posição da partícula 3. Assim, caso o processo convirja dessa forma, pode-se determinar a ocorrência de uma curto-circuito fase-terra com impedância de falta dada por $Z_f = 13,897\Omega$ no ponto da rede definido pela impedância acumulada $Z_{ac} = 0,0914\Omega$ (conforme Fig. 2).

Vale mencionar que nesta metodologia trata apenas dos casos em que ocorre um único ponto de falta, não sendo considerado, portanto, múltiplos trechos defeituosos. Da mesma forma, destaca-se que os testes a serem realizados (seção 5) são voltados a faltas de baixa impedância.

4.4 Etapa 4: avaliação da convergência

Uma vez avaliada a função objetivo e determinado o valor de $gbest$, é verificado se houve a convergência do algoritmo. Na metodologia proposta, a convergência é garantida quando $gbest$ não sofrer alterações durante 100 iterações consecutivas. Esse limite foi determinado experimentalmente.

4.5 Etapa 5: atualização das partículas

Caso não ocorra a convergência na iteração recorrente, atualiza-se a velocidade e a posição de cada partícula de acordo com (2) e (3) e, em seguida, retorna-se à etapa 3 para continuidade do processo.

5. RESULTADOS

A metodologia proposta foi aplicada a dois SDEEs radiais: de 33 barras e 202 barras, onde foram simulados diferentes curtos circuitos com impedância de falta limitada de 0 a 20Ω . Os dados dos sistemas utilizados podem ser encontrados em (Zvietcovich, 2006). A implementação computacional foi realizada em Matlab em um computador Intel® Core™ i7 2,8GHz, 6GB RAM.

5.1 Sistema de distribuição IEEE-33 Barras

A rede IEEE-33 barras, ilustrada na Fig. 3, consiste em um SDEE de 32 linhas alimentadas por uma subestação, conectada à barra 1, que opera com uma tensão base de 12,66kV.

Para aplicação do algoritmo de localização considerou-se, nesse sistema, três medidores para registrar a tensão no instante de falta, conectados às barras 1, 3 e 6. Vale ressaltar que foram alocados somente três medidores porque ainda é recorrente a operação de SDEEs com poucos equipamentos de medição. Além disso, é importante destacar que os medidores foram instalados, estrategicamente, na barra principal e nas barras que dão origem a duas ramificações na rede.

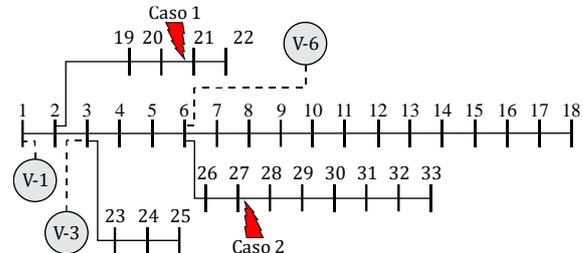


Fig. 3 Sistema IEEE-33 barras e localização dos medidores.

5.1.1 Caso 1: Curto-circuito trifásico

No primeiro caso, considerou-se um curto-circuito trifásico com o trecho de ocorrência e impedância de falta especificados na Tabela 2. Observa-se que, para a especificação do trecho de ocorrência, são identificadas as barras limitadoras (envio e receptora) da linha e a distância percentual do local exato da falta em tal linha, em relação ao seu comprimento total.

Tabela 2. Dados de falta do caso 1 para rede de 33 barras

Falta	Curto-circuito trifásico
Trecho	20-21 à 77,85%
Z_f	0Ω

Nesse cenário, os valores de tensão registrados pelos medidores são mostrados na Tabela 3. Como esperado, por ser um curto-circuito trifásico, as tensões são simétricas entre as fases A, B, e C e, por essa razão, possuem a mesma magnitude.

Tabela 3. Tensões medidas no instante da falta no caso 1

Ponto de Medição	Tensão no instante de falta (p.u.)		
	Fase A	Fase B	Fase C
Barra 1	0,1469	0,1469	0,1469
Barra 3	0,1279	0,1279	0,1279
Barra 6	0,1052	0,1052	0,1052

Os resultados obtidos para o caso 1 são mostrados na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4. Resultados para caso 1 do SDEE de 33 barras

S	Condição de Falta				Tempo (seg.)
	Tipo Falta	Local	Z_f (Ω)	F.O.	
1	Curto-circuito trifásico	20-21 à 77,85%	0	0	9,60
2	Curto-circuito trifásico	24-25 à 50,77%	0	0,0014	8,11

Da Tabela 4, pode-se verificar o algoritmo encontrou duas soluções para o problema sendo que apenas uma delas corresponde ao ponto real de falta (solução 1). Isso ocorre porque dois pontos da rede apresentam o mesmo valor de Z_{ac} , originando uma situação de “simetria” (Majidi; Etezadi-

Amoli, 2018; Kong, 2019). Nesse caso, para o operador definir o local real do defeito, torna-se útil confrontar esse resultado com outras informações do sistema, como oscilografias de relés ou disparo de disjuntores.

5.1.2 Caso 2: Curto-circuito fase-terra

Para o segundo caso foi considerada uma falta fase-terra cuja localização do trecho de ocorrência e impedância de falta são mostradas na Tabela 5. Nessa situação, os valores de tensão registrados pelos medidores são expostos na Tabela 6.

Tabela 5. Dados de falta do caso 1 para rede de 33 barras

Falta	Curto-circuito fase-terra
Trecho	27-28 à 7,22%
Z_f	10 Ω

Tabela 6. Tensões medidas no instante da falta no caso 2

Ponto de Medição	Tensão no instante de falta (p.u.)		
	Fase A	Fase B	Fase C
Barra 1	0,6190	0,9822	1,1219
Barra 3	0,4543	0,9860	1,1297
Barra 6	0,3756	0,9534	1,0966

Após aplicação da metodologia proposta, foram encontrados dois pontos possíveis de falta na rede, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7. Resultados para caso 2 do SDEE de 33 barras

S	Condição de Falta				Tempo (seg.)
	Tipo Falta	Local	Z_f (Ω)	F.O.	
1	Curto-Circuito Fase-Terra	27-28 à 7,22%	10	0	12,81
2	Curto-Circuito Fase-Terra	6-7 à 54,13%	10,92	0	12,51

Dos resultados obtidos, observa-se novamente um caso de “simetria”, sendo que uma das soluções (solução 1) corresponde à localização correta. Destaca-se que essa situação de “simetria” do local de falta é mais recorrente nesse tipo de curto-circuito (fase-terra) devido aos maiores valores da impedância de falta (Z_f).

5.2 Sistema de distribuição de 202 Barras

O sistema de 202 barras, ilustrado na Fig. 4 possui 201 linhas e opera com uma tensão base de 13,8 kV proveniente da subestação conectada à barra 1.

Assim como para o sistema de 33 barras, foram considerados três medidores instalados no sistema. O primeiro está instalado na barra principal (barra 1), e os outros dois estão conectados às barras 25 e 79, que dão origem a dois ou mais ramos da topologia.

5.2.1 Caso 1: Curto-circuito bifásico para a terra

No primeiro caso para o SDEE de 202 barras, considerou-se a ocorrência de uma falta fase-fase-terra conforme mostra a

Tabela 8. Os valores registrados pelos medidores estão indicados na Tabela 9.

Uma vez aplicado o algoritmo de localização de faltas à condição estabelecida pela Tabela 8, obteve-se a solução dada de acordo com a Tabela 10.

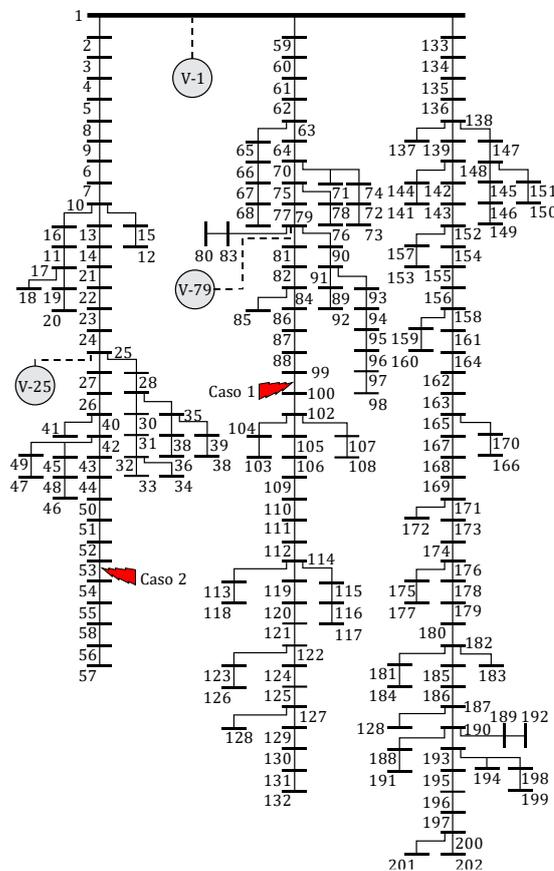


Fig. 4 Sistema 202 barras e localização dos medidores instalados.

Tabela 8. Dados de falta do caso 1 para rede de 202 barras

Falta	Curto-circuito fase-fase-terra
Trecho	99-100 à 50,28%
Z_f	2 Ω

Tabela 9. Tensões medidas no instante da falta no caso 1

Ponto de Medição	Tensão no instante de falta (p.u.)		
	Fase A	Fase B	Fase C
Barra 1	1,3089	0,4403	0,4425
Barra 25	1,2780	0,4299	0,4071
Barra 79	1,4668	0,1167	0,1144

Tabela 10. Resultado para caso 1 do SDEE de 202 barras

S	Condição de Falta				Tempo (seg.)
	Tipo Falta	Local	Z_f (Ω)	F.O.	
1	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra	99-100 à 50,44%	2,0015	0	132,33

Nesse caso, verifica-se que o algoritmo foi capaz de determinar, com boa exatidão, a localização e a impedância da falta ocorrida.

5.2.2 Caso 2: Curto-circuito trifásico

Para o caso 2, a condição de falta é dada por um curto-circuito trifásico conforme indica a Tabela 11.

Tabela 11. Dados de falta do caso 2 para rede de 202 barras

Falta	Curto-circuito trifásico
Trecho	53-54 à 29,27%
Z_f	0 Ω

Os valores registrados por cada medidor no instante da falta estão indicados na Tabela 12.

Tabela 12. Tensões medidas no instante da falta no caso 2

Ponto de Medição	Tensão no instante de falta (p.u.)		
	Fase A	Fase B	Fase C
Barra 1	0,3824	0,3824	0,3824
Barra 25	0,0968	0,0968	0,0968
Barra 79	0,3488	0,3488	0,3488

O resultado da aplicação do algoritmo de localização de faltas é mostrado na Tabela 13. Assim, verifica-se, nesse caso, que o algoritmo foi capaz de determinar, com exatidão, tanto o local quanto a impedância de falta.

Tabela 13. Resultado para caso 2 do SDEE de 202 barras

S	Condição de Falta				Tempo (seg.)
	Tipo Falta	Local	Z_f (Ω)	F.O.	
1	Curto-Circuito Trifásico	53-54 à 29,27%	0	0	63,16

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, uma metodologia para localização de faltas em sistemas de distribuição foi desenvolvida. Dada a necessidade dos operadores de sistemas elétricos de identificar os pontos de falha de forma precisa, aplicou-se ao desenvolvimento deste trabalho a meta-heurística Otimização por Nuvem de Partículas. As técnicas de otimização em problemas desse tipo constituem uma ferramenta importante, visto a grande quantidade de cargas, linhas e barramentos presentes em um sistema de distribuição.

Depreende-se dos resultados obtidos que a técnica de otimização cumpriu seu objetivo, identificando o local da falta bem como sua impedância e o tipo de curto-circuito. Em alguns casos, observou-se que foram encontradas duas soluções devido a uma “simetria” relacionada à impedância acumulada da rede, que é uma característica recorrente das SDEEs radiais e uma limitação do trabalho.

Contudo, frente às implicações de um curto-circuito à continuidade do fornecimento e à qualidade de energia elétrica, destaca-se este desenvolvimento como uma potencial alternativa a ser considerada para a resolução de problemas de localização de faltas em sistemas de distribuição.

Para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação mais detalhada de casos de “simetria” e a correlação de tais casos com outras informações da rede como, por exemplo, operação das chaves e/ou disjuntores. Também se sugere um estudo mais detalhado para faltas elétricas de alta impedância.

REFERÊNCIAS

- Babayomi, O., Oluseyi, P., Keku, G. and Ofodile, N. (2017). Neuro-fuzzy based fault detection identification and location in a distribution network. In *2017 IEEE PES PowerAfrica*, pp. 164-168.
- Chen, R., Yin, X., Yin, X., Li, Y., and Lin, J. (2019). Computational fault time difference-based fault location method for branched power distribution networks. *IEEE Access*, 7, 181972–181982.
- Coser, J. (2006). Contribuições aos métodos para localização de faltas em alimentadores de distribuição. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - UFSC.
- Dashti, R. and Sadeh, J. (2014). Fault section estimation in power distribution network using impedance-based fault distance calculation and frequency spectrum analysis. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 1406–1417.
- Devi, S., Swarnkar, N. K., Ola, S. R., Mahela, O. P. (2016, June). Detection of transmission line faults using discrete wavelet transform. In *2016 Conference on Advances in Signal Processing (CASP)*, pp. 133-138. IEEE.
- Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks*, v. 4, 1942–1948.
- Grainger, J.J. and Stevenson, W.D. (1994). *Power system analysis*, volume 67. McGraw-Hill New York.
- Hubana, T. (2018). Transmission lines fault location estimation based on artificial neural networks and power quality monitoring data. In *2018 IEEE PES ISGT-Europe*.
- Kong, X., Xu, Y., Jiao, Z., Dong, D., Yuan, X. and Li, S. (2019). Fault Location Technology for Power System Based on Information about the Power Internet of Things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
- Lin, P.Y., Lin, T.C., and Liu, C.W. (2013). An intranet-based transmission grid fault location platform using synchronized ied data for the taiwan power system. In *2013 IEEE PES ISGT*, 1–6. IEEE.
- Majidi, M. and Etezadi-Amoli, M.. (2018). A New Fault Location Technique in Smart Distribution Networks Using Synchronized/Nonsynchronized Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1358-1368.
- Shirmohammadi, D., Hong, H. W., Semlyen, A., Luo, G. X. (1988). A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on power systems*, 3(2), 753-762.
- Wang, X., Zhang, H., Shi, F., Wu, Q., Terzija, V., Xie, W., and Fang, C. (2019). Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients. *IEEE Transactions on Smart Grid*.
- Zvietovich, W.G. (2006). Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UNESP.