

Localização de Falhas em Redes Elétricas Radiais Utilizando Algoritmo De Seleção Clonal

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

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

(laura.souza1@aluno.ufop.edu.br, wilingthon@ufop.edu.br, f_baracho@ufop.edu.br, laerty.damiao@aluno.ufop.edu.br)

Abstract: This work presents the mathematical formulation and the computational implementation of an application of the Clonal Algorithm optimization technique to solve the fault location problem in radial electrical networks in order to avoid damage to the power quality indicators and assist in the work of operation and maintenance in the event of electrical faults. The Clonal Algorithm is inspired by the behavior of the mammals' immune system against infectious agents. In the application of this technique, strategies specific to the problem are used to increase the efficiency of the methodology and avoid possible cases of symmetry of solutions. The tests were carried out in the radial distribution system IEEE-33 bus and, through the results, it was possible to verify the convergence of the algorithm for precise solutions in relation to the real fault locations.

Resumo: Este trabalho apresenta a formulação matemática e a implementação computacional de uma aplicação da técnica de otimização Algoritmo de Seleção Clonal para resolver o problema de localização de faltas em redes elétricas radiais, com a finalidade de evitar prejuízos aos indicadores de energia elétrica e auxiliar nos trabalhos de operação e manutenção diante de ocorrências de faltas elétricas. O Algoritmo de Seleção Clonal é inspirado no comportamento do sistema imunológico dos mamíferos frente aos agentes infecciosos. Na aplicação desta técnica, são utilizadas estratégias próprias do problema com a finalidade de aumentar a eficiência da metodologia e evitar possíveis casos de simetria de soluções. Os testes foram realizados no sistema de distribuição radial IEEE-33 barras e, através dos resultados, foi possível verificar a convergência do algoritmo para soluções precisas em relação aos locais reais de falta.

Keywords: Electrical fault; fault location; optimization radial electrical networks; Clonal Selection.

Palavras-chaves: Falta elétrica; localização de faltas; otimização; redes radiais; Seleção Clonal.

1. INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão e de distribuição estão frequentemente sujeitas a situações de faltas tais como queda de árvores sobre os alimentadores, descargas atmosféricas e curtos-circuitos que podem ser suficientes para interromper o fornecimento de energia de grandes blocos de carga. Nesse contexto, questões como a continuidade do serviço, bem como a confiabilidade do sistema de potência são de fundamental importância para a garantia dos requisitos de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) (Saha et al, 2009).

As faltas elétricas podem resultar em danos mecânicos, que devem ser reparados de forma rápida para posterior reconexão do fornecimento elétrico. Esta atividade é conhecida como restauração da rede elétrica, que pode ter seu tempo reduzido a partir da rápida localização da falta elétrica que provocou o desligamento de uma parte da rede elétrica.

Por outro lado, ocorrem faltas elétricas cuja duração é mínima, mas geram Variações Transitórias de Curta Duração de Tensão, chamadas VTCDs, as quais causam danos aos

equipamentos sensíveis frente às variações de tensão. O problema aqui abordado trata da localização de faltas (Tao et al, 2015).

Em uma busca na literatura, pode-se verificar que a maior parte das pesquisas do tipo são voltadas à localização de faltas em linhas de transmissão (LTs) (Hinge; Dambhare, 2016; Maner; Lavand, 2018; Guha; Flueck, 2020). Isto se deve ao grande impacto das faltas elétricas em LTs, ou seja, deixar sem fornecimento grandes blocos de consumidores. Incrementa-se a maior dificuldade de inspecioná-las quando comparada com as linhas dos sistemas de subtransmissão e distribuição. No entanto, com a redução de custos de equipamentos de proteção e medição, a localização de faltas nestes dois últimos sistemas também tem sido alvo de estudos (Aboshady et al., 2019; Nunes et al, 2019), uma vez que muitas concessionárias operam em um ambiente desregulamentado e de elevada concorrência, razão pela qual a satisfação dos clientes quanto à qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica é uma necessidade do mercado (Saha et al, 2009).

Frente à complexidade das redes elétricas de distribuição de energia elétrica, que pode variar de acordo com o número de

linhas, equipamentos conectados (relés, transformadores, medidores, chaves seccionadoras, etc.) e quantidade de blocos de carga, vários métodos de localização de faltas foram desenvolvidos com a finalidade de auxiliar na solução deste problema.

Em (Hui et al, 2019), os autores utilizaram um modelo matemático para análise de curto-circuito, polo-polo e polo-terra para sistemas de distribuição CC e aplicaram o algoritmo Otimização por Nuvem de Partículas para solucionar o problema de localização de faltas. Já em (Dzafic et al, 2010), propõe-se um método de localização de faltas com base nas condições topológicas dos sistemas de distribuição e nos status dos indicadores de falta presentes. Nesse caso, o algoritmo de Busca em Profundidade foi utilizado para identificar o trecho da linha onde ocorreu a falta elétrica. Por sua vez, um algoritmo que utiliza um sistema multiagente é aplicado para identificar os locais de falta em redes elétricas de distribuição considerando geração distribuída renovável em (Mohamed et al, 2020). Nesta abordagem, especificamente, as medições multi-terminais de vários pontos da rede no instante de pré-falta são extraídas das Unidades de Medição Fasoriais (PMUs) para serem utilizadas no processo de localização de faltas. As PMUs são bastante utilizadas para a avaliação das condições pré-falta. No entanto, vale mencionar também a viabilidade de uso de outros equipamentos tais como relés de proteção, controladores de reguladores de tensão e sensores de corrente, todos conectados via sistema de comunicações (Pereira et al. 2019), (Zavoda et al. 2010), (Parker; McCollough, 2011), (Trindade et al. 2014) e (Cordova; Faruque, 2015).

Diante do estado da arte, propõe-se neste trabalho uma metodologia de localização de faltas por meio do Algoritmo de Seleção Clonal, contribuindo na literatura, através da nova aplicação desta técnica e suas estratégias próprias no problema específico, além de utilizar poucos medidores de tensão, viabilizando a implementação da metodologia em empresas concessionárias. Para fins de validação, a metodologia é aplicada ao sistema teste de 33 barras, focando na localização de faltas assimétricas com presença da terra e impedância de defeito, as quais são mais difíceis de se localizar.

2. PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Quando ocorre uma falta elétrica em algum ponto da rede, o sistema de proteção atua para isolar o defeito e, muitas vezes, deixa sem energia um determinado bloco de carga (grupo de consumidores). Geralmente, instantes depois, algum consumidor comunica à concessionária sobre a interrupção do fornecimento de energia elétrica, que por sua vez aciona a equipe de manutenção. Esta equipe se desloca até a região onde está o consumidor e realiza um rastreamento da rede com o objetivo de identificar o equipamento de proteção que atuou e, posteriormente, localizar o ponto de falta, o que pode demandar elevado tempo (até algumas horas) elevando o tempo de restauração do fornecimento de energia elétrica.

Neste cenário, uma preocupação e desafio recorrente das concessionárias é reduzir o tempo de busca para identificar a falta elétrica, visando atender às normas de QEE. Assim, dispor de uma ferramenta que auxilie na identificação rápida do local de falta é de grande importância para a restauração do

fornecimento do serviço e, além disso, evitar os prejuízos relacionados à deterioração de indicadores de QEE como a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e a Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) (ANEEL, 2018).

Localizar uma falta elétrica, frequentemente provocada por um curto-circuito, significa encontrar o ponto de falta no alimentador da rede elétrica e identificar os demais parâmetros da condição de falta; por exemplo, o tipo de falta (fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra ou trifásica).

Neste trabalho, a localização do ponto de falta é tratada em termos da impedância da seção do trecho da linha entre duas barras que, por sua vez, é a distância percentual entre elas. Por exemplo, no sistema mostrado na Fig. 1, identifica-se uma falta à 75% do trecho 9 (linha 9-10). Nesse caso, especificamente, como se trata de uma configuração radial, pode-se observar que, enquanto o serviço não é completamente restaurado, não há fluxo para as cargas à jusante da barra 9.

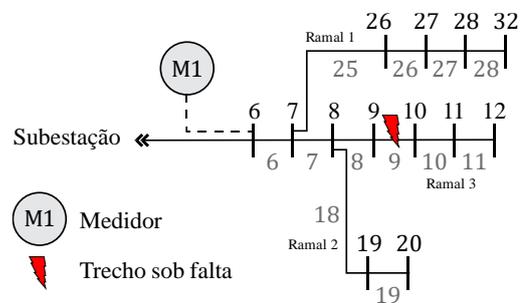


Fig. 1 Rede elétrica radial.

É importante destacar que uma característica recorrente das técnicas de localização de faltas e da topológica das redes radiais é que os resultados podem evidenciar casos de “simetria”; ou seja, quando duas ou mais soluções apresentam o mesmo critério de avaliação, sendo uma a verdadeira e as outras falsas. Por exemplo, para a falta indicada na Fig. 1 uma condição de simetria seria identificar uma outra condição de falta (trecho 27) que gera no instante de falta quase os mesmos valores de tensão na barra 6 do trecho 9, na qual está instalado o medidor.

As condições de simetria dificultam consideravelmente a solução do problema com precisão. Para reduzi-las, ou mesmo, eliminá-las, pode-se alocar um maior número de medidores na rede elétrica ou tratar tais condições dentro do modelo matemático do problema. Essa última alternativa é mais viável porque não implica em custos relacionados à aquisição e instalação de novos medidores. Nos resultados deste trabalho se identifica situações de simetria, as quais são identificadas através de critérios próprios da metodologia, de modo a guiar a busca para este tipo de soluções (casos de simetria).

3. ALGORITMO DE SELEÇÃO CLONAL

O Algoritmo de Seleção Clonal, ou simplesmente Algoritmo Clonal, foi proposto inicialmente por (De Castro; Von Zuben, 2002), sendo seu funcionamento inspirado no comportamento do sistema imunológico dos mamíferos. Uma característica importante desse sistema é sua capacidade de aprender sobre

agentes patogênicos e iniciar uma resposta a eles, através da produção de anticorpos que se ligam aos antígenos associados ao patógeno, marcando-os para destruição.

Nesse sentido, Algoritmos Clonais trabalham simulando o princípio da Seleção Clonal, o qual descreve as características de uma resposta imune adaptativa a estímulos antigênicos. Somente as células capazes de reconhecer antígenos irão se proliferar, sendo selecionadas em relação às demais. Durante a reprodução celular, estas células (clones) estarão sujeitas a um processo de mutação que, juntamente com uma forte pressão seletiva, resultará no aumento da afinidade entre o anticorpo e o antígeno que o selecionou. A repetição desse processo leva progressivamente à geração de soluções melhoradas que, no caso de um sistema imunológico real, implicam em soluções que melhor se adaptam aos agentes infecciosos e, no caso de um algoritmo de computação evolutiva, implicam em soluções que apresentam o melhor valor avaliado por uma Função Objetivo (FO).

Os procedimentos para implementação do Algoritmo Clonal estão apresentados abaixo.

Procedimentos Algoritmo Clonal

1. **Gere** uma população inicial de indivíduos (anticorpos);
2. **Avalie** a população inicial em relação à afinidade com a função objetivo;
3. **Ordene** os anticorpos e selecione os melhores;
4. **Enquanto** o critério de parada não é satisfeito **faça**:
 - 4.1. **Gere** clones;
 - 4.2. **Realize** mutações sobre os clones (proporcional à afinidade);
 - 4.3. **Avalie** os clones de acordo com a afinidade;
 - 4.4. **Selecione** os melhores indivíduos para a próxima geração;
5. **Retorne** o melhor indivíduo da população.

3.1 Representação de uma Solução

Considerando uma ocorrência de falta na rede elétrica mostrada na Fig.1, esta é representada através de um vetor como indicado na Fig. 2, o qual armazena as seguintes informações: trecho de ocorrência, distância dentro do trecho, tipo e impedância de falta.

Trecho	Distância	Tipo	Impedância
9-10	55,50%	Fase-Terra	15,5Ω

Fig. 2 Representação de uma solução.

Destaca-se que, tipos de falta possíveis de ocorrer são fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra ou trifásica. Falhas assimétricas com impedância de defeito entre 0 e 20Ω são apresentadas nos resultados.

3.2 Matriz de Simetria M_{simet}

É construída uma matriz de simetria chamada para indicar os trechos que têm as maiores probabilidades de formarem casos de simetrias (soluções com mesmo custo quando avaliadas

pela função objetivo), e utilizada na metodologia detalhada no item 3.10.

Por exemplo, tomando como referência a barra 6 no sistema da Fig. 1 tem-se a matriz mostrada de simetria na Fig. 3. Essa matriz é construída com m colunas e n linhas, onde m representa a quantidade de ramificações da rede elétrica que se origina a partir da barra do medidor e n representa a quantidade de camadas. Sendo uma camada o grupo de trechos a mesma distância da barra referência (medidor) - no caso da Fig. 1, o medidor está na barra 6.

camada 1	6		
camada 2	7	25	
camada 3	18	8	26
camada 4	19	9	27
camada 5	10	28	
camada 6	11		

Fig. 3 Matriz de simetria para o sistema da Fig. 1.

Uma vez construída esta matriz, pode-se utilizar cada trecho avaliado para construir um vetor de distância-simetria $V_{dist-simet}$, que indica os trechos vizinhos mais prováveis de formar um caso de simetria com um determinado trecho sob avaliação. Como exemplo, para uma avaliação do trecho 9 (alocado na camada 4 da matriz de simetria) tem-se o vetor $V_{dist-simet}$ mostrado na Fig. 4. Nesse caso, a construção se dá colocando o trecho avaliado na ordem 1 e, nas ordens seguintes, coloca-se os trechos mais próximos a ele de acordo com a matriz de simetria, intercalando-se aqueles que estão na mesma camada, em uma camada acima e uma camada abaixo, nesta ordem.

Ordem 1	9	Ordem 5	8
Ordem 2	19	Ordem 6	28
Ordem 3	27	Ordem 7	26
Ordem 4	18	Ordem 8	11
Ordem 5	10	Ordem 9	...

Fig. 4 Vetor de distância-simetria para o trecho 9 do sistema da Fig. 1.

3.3 Vetor distância-trechos V_{dist}

Com a finalidade de obter as distâncias entre trechos da rede elétrica, constrói-se um vetor distância V_{dist} , o qual é utilizado na metodologia no item 3.7. Por exemplo, tem-se uma solução (condição de falta) na Fig. 1, na qual o trecho é 9. A partir deste trecho insere-se em V_{dist} os demais trechos, tanto para a jusante quanto para a montante, como ilustrado na Fig. 5.

9	8	10	7	11	18	6	25	19	26	27	...
---	---	----	---	----	----	---	----	----	----	----	-----

Fig. 5 Distância do trecho 9 para os demais trechos da Fig. 1

3.4 Avaliação da Função Objetivo

A função de avaliação deve ser um índice de mérito não negativo, sendo para este problema a distância entre valores calculados (para uma solução) e valores registrados pelos

medidores utilizando o método de Mínimos Quadrados (Zervakis; Venetsanopoulos, 1992) ou seja:

$$\min f = \sum_{i=1}^{N_m} \left[(V_{m_i,A} - V_{c_i,A})^2 + (V_{m_i,B} - V_{c_i,B})^2 + (V_{m_i,C} - V_{c_i,C})^2 \right] \quad (1)$$

onde:

- $V_{m_i,A}, V_{m_i,B}, V_{m_i,C}$: representam a magnitude da tensão lida pelo medidor m_i nas fases A, B e C, respectivamente;
- $V_{c_i,A}, V_{c_i,B}, V_{c_i,C}$: representam a magnitude da tensão calculada na barra do medidor m_i nas fases A, B e C, respectivamente;
- N_m : é o número de medidores instalados na rede.

3.5 População inicial

O tamanho da população varia de acordo com a complexidade da rede elétrica. Sendo para a rede avaliada (33 barras) de 20 anticorpos (indivíduos), valor mínimo determinado via simulações feitas nesta rede elétrica e que garante os resultados encontrados. Os anticorpos foram gerados aleatoriamente para garantir a diversidade no espaço de soluções.

3.6 Processo de Clonagem

De acordo com a proposta do Algoritmo Clonal original, indivíduos mais aptos devem possuir um número maior de clones que aqueles menos aptos. Sendo assim, no algoritmo implementado, a quantidade de clones gerada por cada indivíduo foi calculada seguindo a equação seguinte:

$$C = (Q - (0.02 \cdot P \cdot Q)) \cdot B \quad (2)$$

onde:

- C : é a quantidade de clones por indivíduo;
- Q : é a quantidade de nós do indivíduo (igual a 4);
- P : é a classificação de um indivíduo em relação aos demais, sendo que o melhor indivíduo possui a classificação 0 e o pior recebe como classificação o valor n , equivalente ao tamanho da população;
- B : é uma constante igual a 0,8.

3.7 Operadores de mutação

Três diferentes tipos de operadores de mutação foram implementados e escolhidos aleatoriamente, sendo cada um deles descritos a seguir.

- M1 - Mutação troca de trecho: Esse operador realiza a troca do trecho do clone (solução) utilizando o vetor V_{dist} (item 3.3). Para isso considera-se os primeiros 50% deste vetor, com a finalidade de fazer uma variabilidade no processo de mutação.
- M2 - Mutação troca do ponto de falta: Esse operador realiza, aleatoriamente, a troca ponto de falta no mesmo trecho do clone (solução).
- M3 - Mutação da impedância de defeito: Esse operador altera o valor da impedância de falta entre 0 e 20Ω .

No processo de mutação calcula-se a intensidade (I) de mutação, isto é, quantas vezes ela é aplicada sobre o clone e calculada aplicando a equação (3).

$$I = \left(\left(\frac{B-0,1}{Q} \right) \cdot P + 0,1 \right) \cdot 10 \quad (3)$$

Conforme pode ser observado, a lógica implementada para definir a intensidade de uma mutação sobre um anticorpo segue o proposto pelo Algoritmo Clonal original, o qual indica que soluções de boa qualidade devem sofrer pouca influência do processo de mutação, enquanto soluções de pior qualidade devem sofrer mutações de maior intensidade.

Cabe destacar que após a aplicação do operador de mutação, os clones que sofreram mutação foram avaliados considerando todos os tipos de curto circuito, pelo incremento computacional mínimo. Aquele curto-circuito com menor função de avaliação foi utilizado nesta metodologia.

3.8 Escolha da próxima população

O anticorpo da população é comparado com o melhor anticorpo do grupo de clones gerados a partir dele e, assim, caso a função de avaliação melhore, este é substituído. Uma vez terminada a substituição, a população é ordenada pela função objetivo, do melhor ao pior deste grupo, onde substitui-se 30% das piores soluções pelo grupo de clones gerados nessa geração (de forma aleatória), garantindo a diversidade entre as soluções escolhidas.

O algoritmo permite que qualquer solução seja escolhida para passar à próxima geração, porém, melhores soluções têm maior probabilidade de serem escolhidas, quando comparadas às piores. O tamanho da população é sempre mantido.

3.9 Critério de parada

O algoritmo Clonal implementado utiliza como critério de parada o número de populações geradas. Para a rede testada considerou-se 20 gerações. Este valor depende do tamanho do sistema elétrico avaliado.

3.10 Busca local

Com a finalidade de encontrar soluções que representam “simetria” realizou-se uma busca local a partir das soluções encontradas pelo Algoritmo Clonal. Para isso, utiliza-se $V_{\text{dist-simet}}$ detalhado no item 3.2, fazendo visita de soluções nos trechos que possuem maior probabilidade de casos de simetria.

4. RESULTADOS

A implementação computacional foi em um ambiente de programação Matlab R2011a e avaliada utilizando uma rede de distribuição IEEE-33 barras (Baran; Wu, 1989), a qual opera com tensão de 13,8kV na barra da subestação e com existência de 3 medidores de tensão nas barras 1(subestação), 3 (bifurcação) e 6 (meio do alimentador principal), conforme ilustra a Fig. 6.

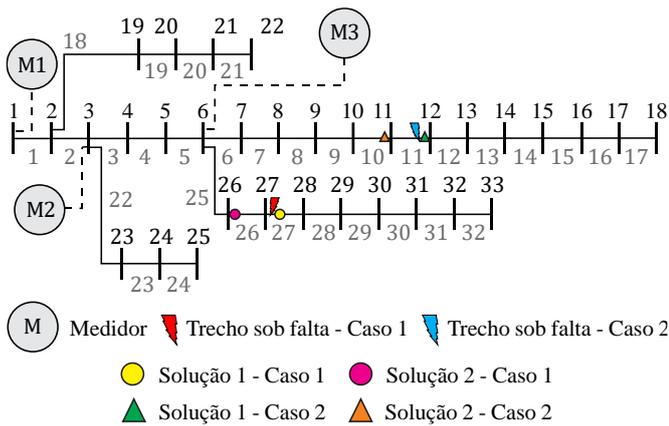


Fig. 6 Sistema IEEE-33 barras com identificação dos medidores instalados e locais de faltas simuladas.

No sistema em questão foram simulados dois casos de falta (curto-circuito) para testar o algoritmo de localização. Ambos são detalhados na Tabela 1.

Tabela 1. Faltas simuladas.

Caso	Trecho	Distância (%)	Tipo	Impedância (Ω)
1	27	7,22	Fase-terra	10,00
2	11	75,20	Fase-fase-terra	15,00

Os resultados para os casos 1 e 2 são mostrados nas Tabela 2, na qual se observa que os trechos de falta foram encontrados na solução (Sol. 1). Já o ponto de falta exato não foi encontrado, que para o caso deste tema, não representa um problema, porque a equipe de manutenção pode ir diretamente para estes trechos e rastrear e identificar rapidamente a falta.

As demais soluções (Sol. 2) representam soluções enquadradas como caso de simetria, ou seja, estas geram quase os mesmos valores de tensão nos medidores no instante da falta elétrica.

Tabela 2. Resultados da localização de faltas.

Caso	Trecho	Distância (%)	Tipo de falta	Impedância (Ω)	FO
1 (Sol. 1)	27	18,86	Fase-terra	9,91	0,0013
1 (Sol. 2)	26	9,30	Fase-terra	10,26	0,0024
2 (Sol. 1)	11	98,19	Fase-fase-terra	15,27	0,0077
2 (Sol. 2)	10	96,19	Fase-fase-terra	14,37	0,0229

Na aplicação da metodologia, foram consideradas faltas assimétricas com presença da terra e impedância de defeito, sendo estas as mais difíceis de se identificar. Dessa forma, foram simuladas condições de falta (20 tentativas/trecho) em todos os trechos (no meio da linha) da rede, com impedância

de defeito igual a 10Ω . Os resultados foram colocados na Tabela 3, na qual se indica a taxa de sucesso. Por exemplo, para faltas fase-terra em 7 trechos dos 32 trechos, a taxa de sucesso em encontrar o trecho no qual ocorreu a falta é entre 80%-85%.

Tabela 3. Taxa de sucesso da metodologia - Rede 33 barras.

Tipo de Falta	Número de trechos	Taxa de sucesso (%)
Fase-terra	7	80-85
	10	75-80
	9	70-75
	6	60-70
Fase-fase-terra	10	85-90
	6	80-85
	9	75-80
	7	70-75

A Fig. 7, a seguir, mostra o desempenho da metodologia no processo de otimização para a simulação da falta elétrica mostrada na tabela 1 (caso 1 - Sol. 1), na qual a solução inicial (melhor solução aleatória da população inicial) tem uma FO elevada. Durante as primeiras gerações o ganho da FO é maior, quando comparada no final.

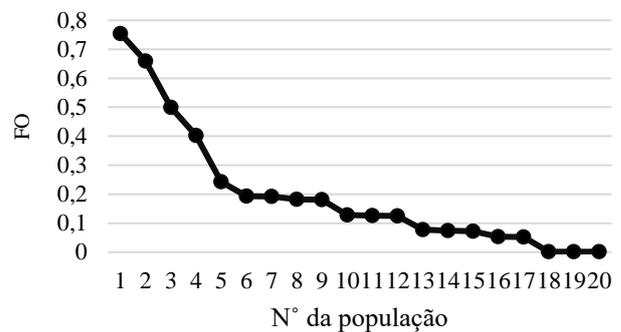


Fig. 7 Convergência do Algoritmo Clonal – Caso 1.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, implementou-se a meta-heurística Algoritmo Clonal para resolver o problema de faltas em redes de distribuição, com operação radial, representando uma alternativa de solução frente a outras técnicas meta-heurísticas encontradas na literatura pesquisada.

Os valores dos parâmetros da técnica Algoritmo Clonal foram determinados a partir de testes da rede avaliada, sendo isto característica das técnicas meta-heurísticas.

A metodologia foi avaliada em uma rede de 33 barras, considerando faltas assimétricas com presença da terra e impedância de defeito, as quais são mais difíceis de localizar. Além disso, considerou-se a existência de poucos medidores, o que torna viável a implementação e os resultados obtidos.

Para trabalhos futuros, pretende-se a generalização da metodologia para sistemas maiores e com existência de Geradores Distribuídos, considerando faltas de alta impedância e a utilização da informação dos sistemas de proteção visando reduzir o espaço de soluções. Assim como utilizar uma técnica de otimização para alocação de medidores e seu impacto ao alterar a configuração da rede elétrica e às cargas.

REFERÊNCIAS

- Aboshady, F., Thomas, D., and Sumner, M. (2019). A new single end wideband impedance-based fault location scheme for distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 173, 263–270.
- ANEEL. (2018). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8. pp. 1-88.
- Baran, M., Wu, F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 1401–1407. IEEE.
- Cordova, J., and Faruque, M. O. (2015). Fault location identification in smart distribution networks with distributed generation. In *2015 North American Power Symposium (NAPS)* (pp. 1-7). IEEE.
- De Castro, L. N., and Von Zuben, F. J. (2002). Learning and optimization using the clonal selection principle. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(3), 239-251.
- Dzafic, I., Mohapatra, P. and Neisius, H. (2010). Composite fault location for distribution management systems. In *2010 Conference Proceedings IPEC*, pp. 795-800.
- Guha, B. and Flueck, A. (2020). Real-Time Wide-Area Fault Locator for Power Transmission Networks Using Sparse PMU Measurements. In *2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pp. 1-5. IEEE.
- Hinge, T.P. and Dambhare, S.S. (2016). Novel fault location algorithm for transmission line using synchronized measurements. In *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 1–6. IEEE.
- Hui, Y., Yan, X., Bin, Q. and Qi, W. (2019). Fault Location Method for DC Distribution Network Based on Particle Swarm Optimization. In *2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET)*, pp. 335-338. IEEE.
- Maner, A.S. and Lavand, S. (2018). Accurate fault location estimation of high voltage transmission line using disturbance record. In *2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, 26–30. IEEE.
- Mohamed, A., Younes, B., Lamhamdi, T., El Moussaoui, H. and El Markhi, H. (2020). Fault Location and Isolation Technique in Smart Distribution Systems with Distributed Generation. In *2020 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, pp. 1-5.
- Nunes, J., Bretas, A. S., Bretas, N. G., Herrera-Orozco, A. R., and Iurinic, L. U. (2019). Distribution systems high impedance fault location: A spectral domain model considering parametric error processing. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 109, 227-241.
- Parker, D. M., and McCollough, N. D. (2011). Medium-voltage sensors for the smart grid: Lessons learned. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-7. IEEE.
- Saha, M., Izykowski, J., and Rosolowski, E. (2009). Fault location on power networks: *Springer science & business media*.
- Tao, S., Zhao, C., Luo, C., and Xiao, X. (2015). Fault location estimation based on voltage sag information of PQMS. In *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 1–5. IEEE.
- Trindade, F. C., Freitas, W., and Vieira, J. C. (2013). Fault location in distribution systems based on smart feeder meters. *IEEE transactions on Power Delivery*, 29(1), 251-260.
- Zavoda, F. (2010). Advanced distribution automation (ADA) applications and power quality in Smart Grids. In *CICED 2010 Proceedings IEEE*, pp. 1-7.
- Zervakis M. E. and Venetsanopoulos A. N. (1992). Iterative least squares estimators in nonlinear image restoration. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 40, no. 4, pp. 927-945.