

Análise da Localização de Defeitos em Sistemas de Distribuição com Baixo Nível de Monitoramento

Rodrigo de A. Coelho* Jamile P. N. Amoah* Karcus Dantas*
Kézia Dantas** Raquel Zacarias***

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB (e-mails: {rodrigo.almeida, jamile.nascimento}@ee.ufcg.edu.br, karcus@dee.ufcg.edu.br.

** Departamento de Computação, Universidade Estadual da Paraíba, PB (e-mail: kezia.vasconcelos@gmail.com)

*** Light SA, RJ (e-mail: raquel.souza@light.com.br)

Abstract: Voltage, current and frequency are quantities that characterize the behavior of the electrical power system. In a fault condition, the signals have specific aspects that help in the detection and location of faults. However, in large systems, the monitoring of signals does not always occur extensively. This fact is evident in the electrical distribution system (EDS), which presents a greater heterogeneity than the transmission systems. Within this context, one of the alternatives for fault location is the use of metaheuristics based on the states of protective devices. This work presents a study on the use of fault location techniques based on metaheuristics for EDS applications. For this purpose, a 33-bus test system was used to simulate faults and evaluate the status of circuit breakers and relays. Furthermore, in order to identify the level of importance of each device in the diagnosis, the impact of the weights assigned to relays and circuit breakers on the objective function was analyzed. The results were promising and indicated the feasibility of diagnosis of faults using metaheuristics, despite the low level of EDS monitoring.

Resumo: Tensão, corrente e frequência são grandezas que caracterizam o comportamento do sistema elétrico. Em uma condição de falta, os sinais possuem aspectos específicos que auxiliam na detecção e localização do defeito. Entretanto, em sistemas de grande porte, o monitoramento dos sinais nem sempre ocorre de forma ampla. Este fato é evidente nos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE), os quais apresentam uma maior heterogeneidade do que os sistemas de transmissão. Dentro desse contexto, uma das alternativas para o diagnóstico de defeitos é o uso de metaheurísticas com base nos estados dos equipamentos do sistema. Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização de técnicas de localização baseadas em metaheurísticas para aplicações voltadas aos SDEE. Para esta finalidade, utilizou-se um sistema-teste de 33 barras para simulação de faltas e avaliação de estados de disjuntores e relés. Ademais, visando identificar o nível de importância de cada equipamento no diagnóstico, analisou-se o impacto dos pesos atribuídos aos relés e disjuntores na função-objetivo. Os resultados foram promissores e indicaram a viabilidade do diagnóstico de defeitos a partir de metaheurísticas, apesar do baixo nível de monitoramento dos SDEE.

Keywords: Fault Location; Electrical Distribution System; System monitoring; Metaheuristics; Genetic Algorithm.

Palavras-chaves: Localização de Faltas; Sistemas de Distribuição; Monitoramento do Sistema; Metaheurísticas; Algoritmo Genético.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos são sujeitos a vários eventos que podem ocasionar distúrbios na rede e eventuais interrupções no fornecimento de energia, a exemplo de faltas. Tais eventos geralmente ocorrem devido a intempéries naturais, falhas em equipamentos, acidentes em sua estrutura, vandalismo etc. (Cai et al., 2010). Faltas são inevitáveis em um sistema elétrico (Roy and Bhattacharya, 2021), o que

evidencia a necessidade de sistemas de proteção adequados para garantir a integridade do sistema.

Em uma condição de falta, grandezas como corrente, tensão e frequência podem se comportar de maneira peculiar. Isto é, os sinais de tensão e corrente contêm características sobre a condição de operação de um dado sistema, inclusive em um cenário de defeito. Desse modo, uma abordagem típica para detecção de defeitos em sistemas elétricos consiste na análise da tensão e/ou da corrente por meio de técnicas de processamento de sinais, como em Samantaray (2011); Biscaro et al. (2016); Lima et al. (2021).

* O presente estudo foi realizado no âmbito do Programa de P&D da ANEEL, PD-00382-0132/2020, Light SA/UEPB/UFCEG/PaqTc-PB.

Por outro lado, nem sempre o sistema elétrico dispõe de equipamentos de monitoramento de sinais em larga escala. Diante desse cenário, outras técnicas podem ser aplicadas para a análise de ocorrências no sistema, a exemplo do monitoramento dos estados e alarmes de equipamentos.

A utilização dos estados de relés e disjuntores para a detecção de defeitos em sistemas elétricos foi inicialmente proposta por Fukui and Kawakami (1986). McDonald et al. (1992) propuseram um método para o diagnóstico de faltas baseado em lógica de regras, o qual é fundamentado na correlação entre os alarmes dos equipamentos e a topologia do sistema elétrico. Redes Neurais Artificiais também podem ser aplicadas para o diagnóstico de faltas, como proposto em Yang et al. (1994), que associaram a topologia do sistema ao estado de relés e disjuntores. Além das técnicas de aprendizagem de máquinas, o campo dos métodos heurísticos vem sendo utilizado para o diagnóstico de defeitos em sistemas elétricos. As heurísticas são técnicas utilizadas em algoritmos aleatórios para problemas de otimização, as quais são efetivas na redução do número de avaliações e na obtenção de soluções dentro de limites de tempo razoáveis (Pearl, 1984; Hromkovič, 2001).

Os pioneiros no uso de métodos de otimização para o diagnóstico de faltas foram Wen and Han (1995), os quais propuseram o uso de algoritmo genético (AG) para localizar a falta com base nos estados atuais e esperados de relés. Em trabalho posterior, Wen and Han (1996) utilizaram uma nova metodologia, ainda fundamentada no uso do AG, com base nos estados atuais e esperados de disjuntores. O método proposto por Chang et al. (1999) utiliza o algoritmo de otimização da colônia de formigas para localização de defeitos em sistemas elétricos, cuja função-objetivo é dependente dos estados atuais e esperados tanto de relés como de disjuntores. Um método que também é dependente dos estados de relés e disjuntores foi proposto por Guo et al. (2010), todavia, além do AG, os autores aplicaram a busca tabu (BTA) como ferramenta de otimização. O método proposto por Lin et al. (2010) utiliza uma nova função-objetivo, a qual depende tanto de disjuntores como de diferentes tipos de relés, e uma combinação entre AG e BTA para a detecção de defeitos em sistemas elétricos. Zhang et al. (2016) propuseram um método de diagnóstico de faltas com base na BTA que utiliza uma nova função-objetivo baseada em informações oriundas de alarmes e estados de relés e disjuntores. O AG também foi utilizado no método proposto por Xu et al. (2019), o qual é baseado na correlação da topologia do sistema com os estados dos equipamentos do sistema de proteção. Todavia, os trabalhos supramencionados são voltados a sistemas de transmissão e necessitam de informações abrangentes do sistema, demandando um monitoramento amplo.

Em se tratando de sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE), geralmente tem-se um monitoramento menos abrangente, com uma supervisão inferior à conferida aos sistemas de transmissão. Ademais, os SDEE são mais complexos e heterogêneos, normalmente possuindo uma grande quantidade de linhas, equipamentos e blocos de carga (Freitas et al., 2020). Outro ponto importante no que concerne aos SDEE diz respeito à sua natureza assimétrica, cuja rede é naturalmente desequilibrada com configurações variáveis (Pereira et al., 2020). Isto é, o fato

dos SDEE serem amplos e ramificados dificulta um monitoramento tão abrangente quanto o conferido aos sistemas de transmissão.

Destarte, alguns trabalhos são voltados especificamente aos SDEE. Wen and Chang (1998) propuseram um método para detecção de defeitos em sistemas de distribuição por meio de AG e dos estados de relés, disjuntores, baterias dos disjuntores, proteção por fio piloto. Embora os autores ressaltem que o método é voltado para SDEE, o sistema para o qual os testes foram realizados corresponde a um sistema em anel, isto é, a configuração radial, predominante nos SDEE, não foi contemplada no trabalho. Em Leão et al. (2014) foi proposto um método para localização de defeitos utilizando AG a partir de alarmes do sistema de proteção de subestações. Apesar de ser bastante robusto e de levar em conta diversas lógicas de operação, o monitoramento se dá a partir dos dados de subestações, o que pode inviabilizar o diagnóstico de defeitos situados em áreas remotas do sistema. O AG também foi utilizado no método proposto por Shen et al. (2018), o qual utiliza dados provenientes de medidores inteligentes nos terminais dos alimentadores, contudo, o método necessita de um número elevado de medidores para garantir o monitoramento de diversos pontos do sistema. Um método para localização de defeitos em SDEE foi proposto por Xiong et al. (2019), o qual utiliza dados de medidores inteligentes distribuídos em cada barra do sistema, o que pode ser inviável em sistemas com baixo nível de supervisão.

Diante do exposto, este trabalho visa avaliar a utilização de técnicas de localização de faltas baseadas em metaheurísticas para aplicações voltadas aos SDEE. Desse modo, objetiva-se analisar a viabilidade de aplicação, em um SDEE, da metodologia comumente adotada em sistemas de transmissão. Para tanto, utilizou-se um sistema-teste de 33 barras para simulação de faltas e avaliação de estados de disjuntores e relés.

Uma questão relevante no uso de metaheurísticas diz respeito à escolha da função-objetivo e à atribuição dos pesos a cada uma de suas parcelas. Conforme levantamento bibliográfico, constatou-se que a definição dos pesos geralmente é realizada empiricamente, de forma particularizada a cada sistema-teste. Nesse contexto, este estudo também tem o propósito de avaliar o nível de importância de cada equipamento no diagnóstico por meio da atribuição dos pesos na função-objetivo.

2. ALGORITMO GENÉTICO

Algoritmo genético (AG) é um método de otimização introduzido por Holland (1975) e posteriormente, popularizado por Goldberg (1989). Baseando-se nos conceitos da genética e da teoria da seleção natural de Charles Darwin, Holland desenvolveu um método que emula o processo de evolução no formato iterativo, o qual envolve a criação de uma população de indivíduos, avaliação de sua aptidão e geração de uma nova população através de mudanças genéticas (Holland, 1975).

Um fluxograma do AG é apresentado na Figura 1.

Conforme Figura 1, o processo é iniciado com um ou alguns conjuntos de soluções possíveis (indivíduos), denominados

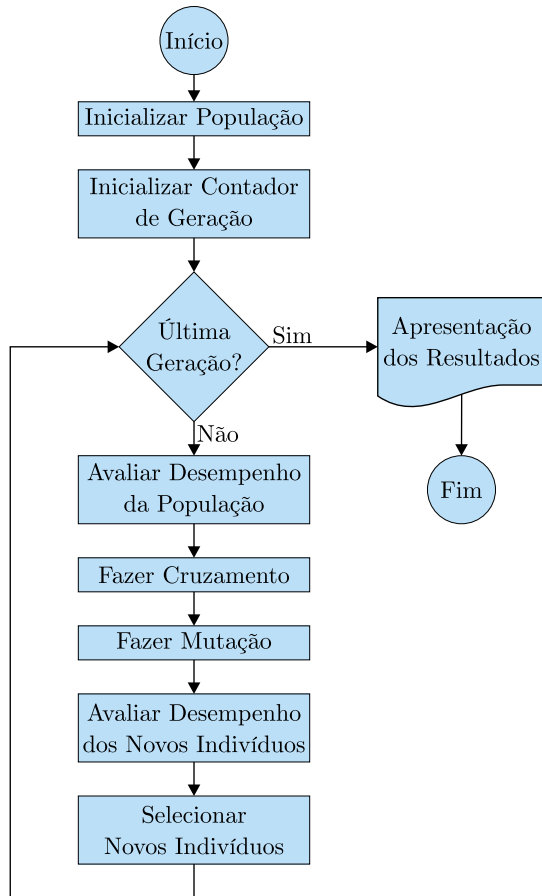


Figura 1. Fluxograma do AG.

de populações. Novas soluções são criadas a partir de alterações aleatórias nas soluções existentes. Um critério de desempenho, denominado de função de adaptação (*fitness*) e um mecanismo de seleção são estabelecidos. Esse mecanismo determina, de acordo com o critério, quais indivíduos devem sobreviver e participar da próxima geração. Além da seleção, há duas outras operações genéticas realizadas com o objetivo de evitar que o algoritmo fique preso em ótimos locais: o cruzamento (criação de novos indivíduos a partir dos existentes) e a mutação (alteração nos cromossomos feita de forma aleatória). Os AG são métodos simples, robustos, flexíveis e capazes de localizar a solução ótima global.

3. METODOLOGIA

Na Figura 2 é apresentado um esquemático para ilustrar a metodologia aplicada ao estudo. A partir do sistema-teste adotado, considerou-se diversos cenários de falta, os quais contemplam casos que abrangem diferentes condições dos estados dos equipamentos: informações corretas; informações espúrias; falha na atuação; e uma combinação entre falha de atuação e informações espúrias. A partir dos cenários de falta, constitui-se uma base de dados contendo os estados dos equipamentos em cada caso. De posse do sistema-teste e da base de dados, realizou-se a modelagem do problema, que compreende a escolha da função-objetivo, a adoção dos pesos da função-objetivo, e a representação dos estados esperados dos equipamentos. Com base nos resultados, avaliou-se a efetividade da

metodologia aplicada ao estudo, bem como analisou-se o impacto dos pesos da função-objetivo.

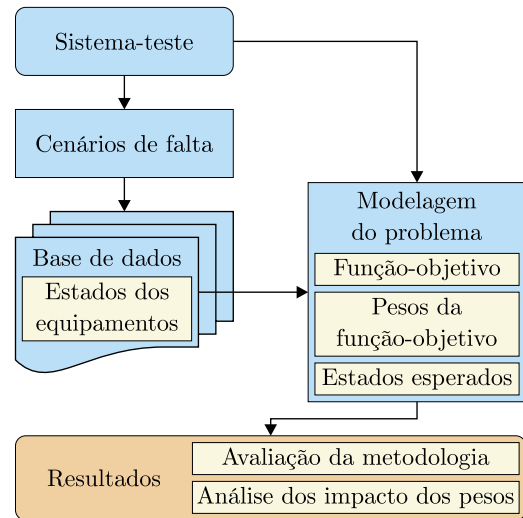


Figura 2. Metodologia aplicada ao estudo.

3.1 Modelagem do problema de localização de faltas

Função-objetivo A função-objetivo adotada corresponde a uma simplificação das funções propostas por Lin et al. (2010) e Xiong et al. (2018), as quais foram desenvolvidas para aplicações em sistemas de transmissão. Assim, tem-se uma função mais compacta, dependente apenas dos estados dos relés de proteção principal e de retaguarda, bem como dos estados dos disjuntores:

$$\begin{aligned}
 E(\mathbf{S}, \mathbf{R}, \mathbf{C}) = & w_r \sum_{k=1}^{n_r} |r_{kp} - r_{kp}^*| |1 - r_{kr} r_{kr}^*| \\
 & + w_{rr} \sum_{k=1}^{n_r} |r_{kr} - r_{kr}^*| + w_c \sum_{k=1}^{n_c} |c_k - c_k^*|, \quad (1)
 \end{aligned}$$

em que:

- “p” e “r” indicam relés de proteção principal e de proteção de retaguarda, respectivamente;
- n_r e n_c correspondem ao número total de relés e de disjuntores, respectivamente;
- r_{kp}^* , r_{kr}^* e c_k^* representam os estados esperados do relé de proteção principal k , do relé de retaguarda k , e do disjuntor k , respectivamente;
- w_r , w_{rr} e w_c são os pesos da função objetivo atribuídos aos relés de proteção principal, relés de proteção de retaguarda, e aos disjuntores, respectivamente.

Pesos da função-objetivo Para avaliar a importância de cada equipamento no diagnóstico dos defeitos, realizou-se uma análise de sensibilidade dos pesos da função-objetivo. Para tanto, foram consideradas duas situações, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Pesos da função-objetivo adotados.

Situação	Valores numéricos		
	w_r	w_c	w_{rr}
$w_r > w_c$	1000	100	1
$w_r < w_c$	100	1000	1

Assim, vislumbra-se identificar, para a função-objetivo definida em (1), qual o equipamento com maior importância no processo de decisão. Essa análise é importante, uma vez que pode subsidiar tanto a atribuição dos pesos em uma função-objetivo já definida, como o desenvolvimento futuro de uma nova função.

Estados esperados De acordo com (1), a função-objetivo é dependente dos estados esperados dos equipamentos, os quais dependem essencialmente da topologia do sistema e decorrem dos estados atuais das seções e dos equipamentos. Os estados esperados utilizados neste trabalho foram adaptados de Chang et al. (1999) e Xiong et al. (2018), conforme apresentado a seguir.

O estado esperado para os relés de proteção principal corresponde a

$$r_{kp}^* = s_k, \quad k \in \{1, \dots, n_r\}, \quad (2)$$

isto é, estado esperado de r_{kp}^* será 1 quando houver falta na seção a qual o relé está inserido (s_k).

Para os relés de proteção de retaguarda, o estado esperado consiste em

$$r_{kr}^* = s_k \wedge (\neg r_{kp}), \quad k \in \{1, \dots, n_r\}, \quad (3)$$

em que \wedge e \neg denotam os operadores lógicos “e” e “não”, respectivamente. Portanto, r_{kr}^* será 1 quando houver falta em s_k e r_{kp} não atuar.

O estado esperado dos disjuntores é obtido conforme

$$c_k^* = s_k \wedge (r_{kp} \vee r_{kr}), \quad k \in \{1, \dots, n_c\}, \quad (4)$$

em que \vee representa o operador “ou” lógico. Logo, o estado de c_k^* será 1 quando houver falta em s_k e ocorrer a atuação de r_{kp} ou r_{kr} .

3.2 Sistema-teste

Para o desenvolvimento desta pesquisa, o sistema-teste selecionado foi o IEEE 33 barras, cuja versão original foi proposta por Baran and Wu (1989). Este consiste em um sistema de distribuição de 33 barras, 32 linhas e nenhuma unidade de compensação de potência reativa. A rede é fornecida por um alimentador conectado à primeira barra, e nenhuma outra unidade de geração existe na rede.

Kiaei and Lotfifard (2019) propuseram uma modificação deste sistema com a inserção de equipamentos de proteção em determinadas barras. Para atender aos objetivos deste estudo, adotou-se parte do sistema de proteção proposto por Kiaei and Lotfifard (2019), a qual consiste de disjuntores e relés conforme ilustrado na Figura 3.

Na Figura 3, c_k representa o disjuntor k , o qual pode ser desarmado por meio dos relés de proteção principal r_{kp} e de retaguarda r_{kr} . Outrossim, é importante salientar que existe a possibilidade do sistema ilustrado na Figura 3 dispor de fusíveis, uma vez que se trata de um SDEE. Todavia, devido a esse tipo de elemento não possuir monitoramento, optou-se por suprimi-lo na modelagem do problema. Portanto, apesar de possuir 33 barras, sob o ponto de vista dos equipamentos de proteção, o sistema dispõe de apenas quatro trechos monitoráveis, conforme representado na Figura 4.

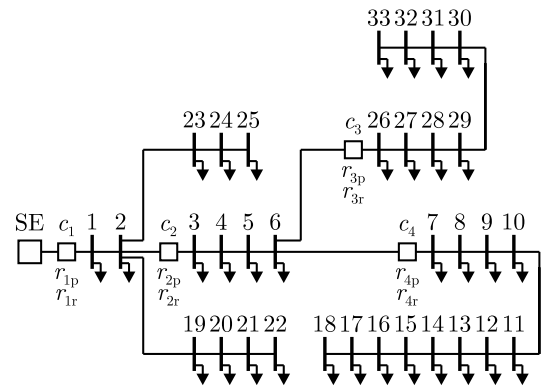


Figura 3. Sistema-teste: 33 barras.

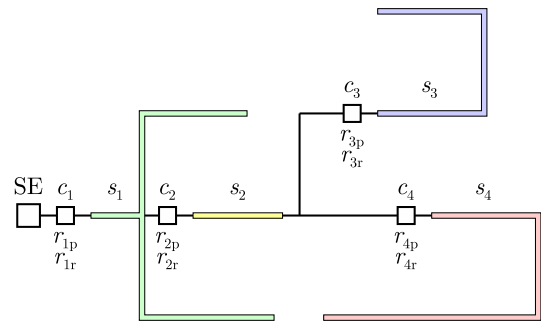


Figura 4. Sistema-teste: 04 seções.

Desse modo, podem ser definidos vetores contendo os estados das seções, dos relés, e dos disjuntores, conforme a seguir.

Os estados das seções são obtidos a partir de:

$$\mathbf{S} = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}, \quad (5)$$

em que $s_k = 1$ indica que o trecho k está desenergizado, enquanto $s_k = 0$ denota condição normal de operação no trecho k .

Os estados dos relés de proteção principal são:

$$\mathbf{R}_p = \{r_{1p}, r_{2p}, r_{3p}, r_{4p}\}, \quad (6)$$

em que $r_{kp} = 1$ representa a atuação do relé de proteção principal k , enquanto $r_{kp} = 0$ indica que o relé k não atuou.

Os estados dos relés de proteção de retaguarda são definidos conforme:

$$\mathbf{R}_r = \{r_{1r}, r_{2r}, r_{3r}, r_{4r}\}, \quad (7)$$

em que $r_{kr} = 1$ e $r_{kr} = 0$ indicam a atuação e a não atuação de um dado relé de retaguarda k , respectivamente.

Os estados dos disjuntores são representados conforme a seguir:

$$\mathbf{C} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}, \quad (8)$$

em que $c_k = 1$ indica a operação (abertura) do disjuntor k , enquanto $c_k = 0$ representa o disjuntor k com contatos fechados.

3.3 Cenários de falta

De posse do sistema-teste, é possível estabelecer cenários de falta que compreendem diversas combinações dos estados de relés e disjuntores. Neste ponto, é importante estabelecer a terminologia adotada na explanação dos casos:

- Estado espúrio: neste caso, o estado do equipamento é inconsistente com a sua condição real. Por exemplo, o estado de um disjuntor que atuou no sistema é determinado erroneamente como 0. Da mesma forma, o estado de um dado relé que não atuou pode ser caracterizado incorretamente como 1.
- Falha na atuação: nesta situação, há falha de atuação em um dado equipamento. A título de exemplo, um relé comandou a atuação de um dado disjuntor, o qual não operou (neste caso, portanto, há falha de atuação no disjuntor). Por conseguinte, a falha de atuação em dado equipamento pode reverberar na ação da proteção de retaguarda.

É importante ressaltar que o universo de possibilidades é proporcional à dimensão do sistema-teste adotado. Isto é, há uma profusão de casos possíveis considerando o estado espúrio e a falha na atuação de equipamentos. Todavia, por questões de espaço, optou-se por simular uma quantidade reduzida de cenários de falha, os quais são sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2. Síntese dos cenários de falha.

Seção sob falta	Atuação esperada	Cenários	Estados espúrios	Falha na atuação
s_1	r_{1p} e c_1	S01.01	Nenhum	Nenhum
		S01.02	c_1	Nenhum
		S01.03	r_{1p}	Nenhum
		S01.04	r_{1r}	Nenhum
		S01.05	r_{1r} e c_1	Nenhum
		S01.06	Nenhum	r_{1p}
		S01.07	c_1	r_{1p}
s_2	r_{2p} e c_2	S02.01	Nenhum	Nenhum
		S02.02	c_2	Nenhum
		S02.03	r_{2p}	Nenhum
		S02.04	r_{2r}	Nenhum
		S02.05	r_{2r} e c_2	Nenhum
		S02.06	Nenhum	r_{2p}
		S02.07	c_2	r_{2p}
s_3	r_{3p} e c_3	S03.01	Nenhum	Nenhum
		S03.02	c_3	Nenhum
		S03.03	r_{3p}	Nenhum
		S03.04	r_{3r}	Nenhum
		S03.05	r_{3r} e c_3	Nenhum
		S03.06	Nenhum	r_{3p}
		S03.07	c_3	r_{3p}
s_4	r_{4p} e c_4	S04.01	Nenhum	Nenhum
		S04.02	c_4	Nenhum
		S04.03	r_{4p}	Nenhum
		S04.04	r_{4r}	Nenhum
		S04.05	r_{4r} e c_4	Nenhum
		S04.06	Nenhum	r_{4p}
		S04.07	c_4	r_{4p}

Conforme apresentado na Tabela 2, considerou-se: quatro casos em que os estados atuais estão corretos e a proteção atuou devidamente; dezesseis casos onde a proteção atuou corretamente, mas os estados dos equipamentos contêm dados espúrios; quatro casos onde a proteção principal falhou e a proteção de retaguarda atuou (estados corretamente representados); e quatro casos em que houve falha na proteção principal e também estados espúrios. Desse modo, totalizou-se vinte e oito cenários de teste.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Esta seção é destinada à apresentação e análise dos resultados obtidos a partir da metodologia aplicada ao trabalho.

4.1 Cenário S01.01 – Estados atuais corretos

No Cenário S01.01 não há inconsistência no que diz respeito aos estados dos equipamentos. Para este caso, os vetores que representam os estados dos relés e disjuntores são expressos por:

$$\mathbf{R}_p = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{C} = \{1, 0, 0, 0\}. \quad (9)$$

A partir de (1), a solução para os estados das seções é:

$$\mathbf{S}_{S01.01} = \{1, 0, 0, 0\}, \quad \text{para } w_r > w_c \text{ e } w_r < w_c, \quad (10)$$

da qual resultam os seguintes estados esperados para os relés e disjuntores:

$$\mathbf{R}_p^* = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r^* = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{C}^* = \{1, 0, 0, 0\}, \quad (11)$$

os quais correspondem exatamente aos estados atuais descritos em (9).

Portanto, para o Cenário S01.01, a relação entre os pesos w_r e w_c é indiferente para o resultado do algoritmo.

4.2 Cenário S01.02 – Estado espúrio de c_1

O Cenário S01.02 representa um dado incorreto do estado do disjuntor c_1 , apesar de sua atuação efetiva. Para este caso, os estados dos equipamentos são:

$$\mathbf{R}_p = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{C} = \{0, 0, 0, 0\}. \quad (12)$$

Conforme (1), a solução para os estados das seções é:

$$\mathbf{S}_{S01.02} = \{1, 0, 0, 0\}, \quad \text{para } w_r > w_c, \quad (13)$$

$$\mathbf{S}_{S01.02} = \{0, 0, 0, 0\}, \quad \text{para } w_r < w_c. \quad (14)$$

A partir de (13) e (14), tem-se os estados esperados descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Cenário S01.02 – Estados esperados.

Equipamento	Resultado	
	$w_r > w_c$	$w_r < w_c$
\mathbf{R}_p^*	$\{1, 0, 0, 0\}$	$\{0, 0, 0, 0\}$
\mathbf{R}_r^*	$\{0, 0, 0, 0\}$	$\{0, 0, 0, 0\}$
\mathbf{C}^*	$\{1, 0, 0, 0\}$	$\{0, 0, 0, 0\}$

De acordo com a Tabela 3, constata-se que os estados das seções estimados quando $w_r < w_c$ ocasionam estados esperados incorretos para os equipamentos. Por outro lado, quando $w_r > w_c$, os estados esperados coincidem com os estados atuais dos equipamentos.

4.3 Cenário S01.03 – Estado espúrio de r_{1p}

Para o Cenário S01.03, tem-se um dado espúrio do relé de proteção principal r_{1p} , embora sua atuação tenha ocorrido efetivamente. Neste caso, tem-se que:

$$\mathbf{R}_p = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{C} = \{1, 0, 0, 0\}. \quad (15)$$

De acordo com (1), os estados das seções são:

$$\mathbf{S}_{S01.03} = \{0, 0, 0, 0\}, \quad \text{para } w_r > w_c \text{ e } w_r < w_c. \quad (16)$$

Como consequência de (16), tem-se:

$$\mathbf{R}_p^* = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r^* = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{C}^* = \{0, 0, 0, 0\}, \quad (17)$$

isto é, apesar do estado atual do disjuntor c_1 ser consistente, nenhum dos estados esperados indica atuação. Isto ocorre devido à estimação dos estados esperados ser independente dos estados atuais dos disjuntores, conforme descrito em (2), (3), e (4).

De posse dos resultados dos Cenários S01.02 e S01.03, algumas constatações podem ser discutidas:

- Quando $w_r < w_c$, o estado da seção foi resultante do estado atual do disjuntor. Isto é, quando w_c é maior que w_r , a expressão referente ao disjuntor se torna dominante na FO, (1);
- Uma vez que o estado esperado do disjuntor depende dos estados atuais dos relés que o comandam, as informações destes devem ser mais relevantes na FO.

4.4 Cenário S01.04 – Estado espúrio de r_{1r}

No Cenário S01.04, o estado do relé de proteção de retaguarda r_{1r} é espúrio. Para este caso, tem-se que:

$$\mathbf{R}_p = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{C} = \{1, 0, 0, 0\}. \quad (18)$$

A partir de (1), a solução para os estados das seções é:

$$\mathbf{S}_{S01.04} = \{1, 0, 0, 0\}, \quad \text{para } w_r > w_c \text{ e } w_r < w_c, \quad (19)$$

da qual resultam os seguintes estados esperados para os relés e disjuntores:

$$\mathbf{R}_p^* = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r^* = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{C}^* = \{1, 0, 0, 0\}. \quad (20)$$

Assim, apesar da informação inconsistente de r_{1r} , o seu respectivo estado esperado foi estimado corretamente. Similarmente ao ocorrido no Cenário S01.01, a relação entre os pesos w_r e w_c é indiferente para o resultado do algoritmo considerando o Cenário S01.04.

4.5 Cenário S01.05 – Estado espúrio de r_{1r} e c_1

O Cenário S01.05 possui informações inconsistentes de r_{1r} e c_1 , as quais são descritas conforme:

$$\mathbf{R}_p = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{C} = \{0, 0, 0, 0\}. \quad (21)$$

De acordo com (1), a solução para os estados das seções é:

$$\mathbf{S}_{S01.05} = \{1, 0, 0, 0\}, \quad \text{para } w_r > w_c, \quad (22)$$

$$\mathbf{S}_{S01.05} = \{0, 0, 0, 0\}, \quad \text{para } w_r < w_c. \quad (23)$$

De (22) e (23), tem-se os estados esperados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Cenário S01.05 – Estados esperados.

Equipamento	Resultado	
	$w_r > w_c$	$w_r < w_c$
\mathbf{R}_p^*	$\{1, 0, 0, 0\}$	$\{0, 0, 0, 0\}$
\mathbf{R}_r^*	$\{0, 0, 0, 0\}$	$\{0, 0, 0, 0\}$
\mathbf{C}^*	$\{1, 0, 0, 0\}$	$\{0, 0, 0, 0\}$

Portanto, conforme Tabela 4, os estados esperados são estimados corretamente apenas quando $w_r > w_c$.

4.6 Cenário S01.06 – Falha na atuação de r_{1p}

O Cenário S01.06 corresponde a uma falha na atuação de r_{1p} e consequente atuação de r_{1r} , conforme descrito por:

$$\mathbf{R}_p = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{C} = \{1, 0, 0, 0\}. \quad (24)$$

A partir de (1), a solução para os estados das seções é:

$$\mathbf{S}_{S01.06} = \{1, 0, 0, 0\}, \quad \text{para } w_r > w_c \text{ e } w_r < w_c, \quad (25)$$

e, consequentemente,

$$\mathbf{R}_p^* = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r^* = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{C}^* = \{1, 0, 0, 0\}. \quad (26)$$

Isto é, apesar da falha de atuação de r_{1p} , o seu estado esperado indica que ele deveria ter atuado. Para esse cenário de falta, a relação entre w_r e w_c foi irrelevante para o resultado do algoritmo.

4.7 Cenário S01.07 – Falha na atuação de r_{1p} e estado espúrio de c_1

No Cenário S01.07, além da falha na atuação de r_{1p} , tem-se o estado espúrio de c_1 . Assim,

$$\mathbf{R}_p = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r = \{1, 0, 0, 0\}, \mathbf{C} = \{0, 0, 0, 0\}. \quad (27)$$

Conforme (1), a solução para os estados das seções é:

$$\mathbf{S}_{S01.07} = \{0, 0, 0, 0\}, \quad \text{para } w_r > w_c \text{ e } w_r < w_c, \quad (28)$$

e, consequentemente,

$$\mathbf{R}_p^* = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{R}_r^* = \{0, 0, 0, 0\}, \mathbf{C}^* = \{0, 0, 0, 0\}. \quad (29)$$

Portanto, o método não localiza corretamente a falta na hipótese de falha em r_{1p} e dado espúrio de c_1 . Embora a informação isolada de r_{1p} garanta um diagnóstico correto, o mesmo não ocorre quando há apenas o dado correto de r_{1r} . Nesse cenário, a relação entre os pesos w_r e w_c não influenciou no resultado do algoritmo.

Além dos resultados supramencionados, na Tabela 5 são apresentados os resultados de cada um dos cenários de falta estabelecidos na Seção 3.3.

A partir dos resultados dispostos na Tabela 5, pode-se inferir que:

- Os casos tipo **01** foram usados como base para apresentar qual a resposta esperada em relação àquele cenário específico. Os demais casos apresentaram estados espúrios ou falha na atuação de um ou mais equipamentos;
- Observou-se na grande maioria dos casos apresentados na Tabela 5, que mesmo com perda de informação o algoritmo de otimização conseguiu atingir o resultado correto;
- Os casos que apresentaram resultados equivocados foram do tipo: **02**, **03**, **05** e **07**;
- Em relação aos casos **02**, bem como os casos **05**, percebeu-se que o estado do disjuntor não exerce grande influencia no processo de decisão, muitas vezes incorrendo em erros quando $w_r < w_c$;
- Nos casos tipo **03**, ao se perder a informação do relé principal (estado espúrio), a informação isolada do disjuntor não foi suficiente para sensibilizar a localização e o algoritmo não determina o local de falta. Porquanto o estado esperado do disjuntor é totalmente dependente dos estados dos relés, resulta que

Tabela 5. Síntese dos resultados.

Cenários	Seção sob falta	Saída do algoritmo	
		$w_r > w_c$	$w_r < w_c$
S01.01	s_1	s_1	s_1
S01.02	s_1	s_1	Sem falta
S01.03	s_1	Sem falta	Sem falta
S01.04	s_1	s_1	s_1
S01.05	s_1	s_1	Sem falta
S01.06	s_1	s_1	s_1
S01.07	s_1	Sem falta	Sem falta
S02.01	s_2	s_2	s_2
S02.02	s_2	s_2	Sem falta
S02.03	s_2	Sem falta	Sem falta
S02.04	s_2	s_2	s_2
S02.05	s_2	s_2	Sem falta
S02.06	s_2	s_2	s_2
S02.07	s_2	Sem falta	Sem falta
S03.01	s_3	s_3	s_3
S03.02	s_3	s_3	Sem falta
S03.03	s_3	Sem falta	Sem falta
S03.04	s_3	s_3	s_3
S03.05	s_3	s_3	Sem falta
S03.06	s_3	s_3	s_3
S03.07	s_3	Sem falta	Sem falta
S04.01	s_4	s_4	s_4
S04.02	s_4	s_4	Sem falta
S04.03	s_4	Sem falta	Sem falta
S04.04	s_4	s_4	s_4
S04.05	s_4	s_4	Sem falta
S04.06	s_4	s_4	s_4
S04.07	s_4	Sem falta	Sem falta
Taxa de acerto		71,43%	42,86%

a informação deste é menos “confiável” e influencia pouco no processo de localização;

- Apesar de exercer pouca influência na função-objetivo, o estado do disjuntor auxiliou no processo de decisão, isso ocorre nos casos tipo **06**. Nesses casos, constatou-se que apesar da perda da informação do relé principal, a qual é extremamente relevante, os estados do disjuntor e do relé de retaguarda possibilitaram a localização correta do defeito.
- Nos casos tipo **07**, notou-se que em um cenário em que ocorre a perda de informação do disjuntor e do relé principal, principais responsáveis pela proteção local, o algoritmo não consegue localizar o defeito. Ou seja, a escassez de equipamentos observáveis pode prejudicar a localização. Isto é, quanto maior a observabilidade do sistema, melhores serão os resultados. Este fato corresponde a um dos motivos da escassez de trabalhos que aplicam otimização aos SDEE, uma vez que estes possuem poucos equipamentos de proteção monitoráveis distribuídos ao longo da rede.

A partir dos resultados, pode-se constatar que comparando-se w_r e w_c , a melhor alternativa é utilizar um peso maior para w_r , ou seja $w_r > w_c$, pois sua taxa de acerto foi de 71,43%, resultado considerado superior quando comparado à $w_r < w_c$, cuja taxa de acerto foi de apenas 42,86%.

No que se refere à aplicabilidade ao sistema de distribuição, apesar da escassez de equipamentos de proteção monitoráveis, o método apresentou bons resultados. O advento

das redes inteligentes pode ser um fator decisivo para superar essa limitação e possibilitar melhores resultados no diagnóstico.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foi realizada uma avaliação da utilização de métodos de localização de falta baseados em metaheurística para SDEE. A modelagem do problema foi baseada em trabalhos consolidados da literatura, e como metaheurística, adotou-se o AG por ser um método clássico, robusto e eficiente.

Uma análise de sensibilidade também foi efetuada, em que comparou-se os pesos dos relés (w_r) e dos disjuntores (w_c) na função-objetivo, com o intuito de observar se existem diferenças significativas no desempenho do método de localização.

Para fins de validação, foi utilizado o sistema teste de 33 barras do IEEE, por ser um SDEE já consolidado na literatura. No total foram simulados 28 casos e, ao final, verificou-se que em relação aos pesos da função objetivo, a melhor opção é utilizar $w_r > w_c$, pois a taxa de acerto foi consideravelmente maior.

No que concerne à adaptação do método para a realidade dos SDEE, os resultados foram satisfatórios, porquanto a maioria dos casos tiveram localizações precisas, mesmo com pouco nível de monitoramento. Portanto, evidencia-se que este método é passível de aplicação ao SDEE, trazendo melhorias na operação e qualidade do sistema elétrico. Além disso, o método pode apresentar desempenho cada vez melhor à medida que ocorram melhorias no monitoramento do SDEE.

REFERÊNCIAS

- Baran, M.E. and Wu, F.F. (1989). Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing. *IEEE Power Engineering Review*, 9, 101–102. doi:10.1109/mper.1989.4310642.
- Bíscaro, A.A.P., Pereira, R.A.F., Kezunovic, M., and Mantovani, J.R.S. (2016). Integrated Fault Location and Power Quality Analysis in Electric Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(2), 428–436. doi:10.1109/TPWRD.2015.2464098.
- Cai, Y., Chow, M.Y., Lu, W., and Li, L. (2010). Statistical Feature Selection From Massive Data in Distribution Fault Diagnosis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(2), 642–648. doi:10.1109/TPWRS.2009.2036924.
- Chang, C.S., Tian, L., and Wen, F.S. (1999). A new approach to fault section estimation in power systems using ant system. *Electric Power Systems Research*, 49, 63–70. doi:10.1016/s0378-7796(98)00127-8.
- Freitas, P.C.F., Zvietcovich, W.G., Damiano, L.J.S., Baracho, F.R.A.C., and Souza, L.F. (2020). Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Por Meio da Otimização por Nuvem de Partículas. In *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2020)*. Santo André-SP, Brasil (virtual). doi:10.48011/sbse.v1i1.2392.
- Fukui, C. and Kawakami, J. (1986). An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers. *IEEE Power*

- Engineering Review*, PER-6, 29–30. doi:10.1109/mper.1986.5527598.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Guo, W., Wen, F., Ledwich, G., Liao, Z., He, X., and Liang, J. (2010). An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25, 1393–1401. doi:10.1109/tpwrd.2010.2048344.
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI. Second edition, 1992.
- Hromkovič, J. (2001). *Algorithmics for Hard Problems: Introduction to Combinatorial Optimization, Randomization, Approximation, and Heuristics*. Texts in Theoretical Computer Science. An EATCS Series. Springer, 1st edition.
- Kiaei, I. and Lotfifard, S. (2019). Fault section identification in smart distribution systems using multi-source data based on fuzzy petri nets. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(1), 74–83. doi:10.1109/TSG.2019.2917506.
- Leão, F.B., Pereira, R.A.F., and Mantovani, J.R.S. (2014). Fast fault section estimation in distribution control centers using adaptive genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63, 787–805. doi:10.1016/j.ijepes.2014.06.052.
- Lima, É.M., Coelho, R.d.A., Brito, N.S.D., and de Souza, B.A. (2021). High impedance fault detection method for distribution networks under non-linear conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 131, 107041. doi:10.1016/j.ijepes.2021.107041.
- Lin, X., Ke, S., Li, Z., Weng, H., and Han, X. (2010). A fault diagnosis method of power systems based on improved objective function and genetic algorithm-tabu search. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25, 1268–1274. doi:10.1109/tpwrd.2010.2044590.
- McDonald, J.R., Burt, G.M., and Young, D.J. (1992). Alarm processing and fault diagnosis using knowledge based systems for transmission and distribution network control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7, 1292–1298. doi:10.1109/59.207347.
- Pearl, J. (1984). *Heuristics: intelligent search strategies for computer problem solving*. The Addison-Wesley series in artificial intelligence. Addison-Wesley Pub. Co.
- Pereira, B., Pereira, C., and Conti, A.D. (2020). Posicionamento Otimizado de Remotas de Medição para Aprimorar a Localização de Falhas em Redes de Distribuição. In *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2020)*. Santo André-SP, Brasil (virtual). doi:10.48011/sbse.v1i1.2488.
- Roy, N.B. and Bhattacharya, K. (2021). *Application of Signal Processing Tools and Artificial Neural Network in Diagnosis of Power System Faults*. CRC Press, 1 edition.
- Samantaray, S.R. (2011). Phase-Space-Based Fault Detection in Distance Relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26, 33–41. doi:10.1109/TPWRD.2010.2058817.
- Shen, G., Zhang, Y., Qiu, H., Wang, C., Wen, F., Salam, M., Weng, L., Yu, B., and Chen, J. (2018). Fault diagnosis with false and/or missing alarms in distribution systems with distributed generators. *Energies*, 11, 2579. doi:10.3390/en11102579.
- Wen, F. and Chang, C.S. (1998). A new approach to fault diagnosis in electrical distribution networks using a genetic algorithm. *Artificial Intelligence in Engineering*, 12, 69–80. doi:10.1016/s0954-1810(97)00006-x.
- Wen, F. and Han, Z. (1995). Fault section estimation in power systems using a genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, 34, 165–172. doi:10.1016/0378-7796(95)00974-6.
- Wen, F. and Han, Z. (1996). A refined genetic algorithm for fault section estimation in power systems using the time sequence information of circuit breakers. *Electric Machines & Power Systems*, 24, 801–815. doi:10.1080/07313569608955711.
- Xiong, G., Shi, D., Zhang, J., and Zhang, Y. (2018). A binary coded brain storm optimization for fault section diagnosis of power systems. *Electric Power Systems Research*, 163, 441–451. doi:10.1016/j.epsr.2018.07.009.
- Xiong, G., Zhang, J., Shi, D., and He, Y. (2019). Oppositional Brain Storm Optimization for Fault Section Location in Distribution Networks. In S. Cheng and Y. Shi (eds.), *Brain Storm Optimization Algorithms: Concepts, Principles and Applications*, Adaptation, Learning, and Optimization 23, 61–77. Springer International Publishing, 1st ed. edition. doi:10.1007/978-3-030-15070-9_3.
- Xu, B., Yin, X., Wu, D., Pang, S., and Wang, Y. (2019). An analytic method for power system fault diagnosis employing topology description. *Energies*, 12, 1770. doi:10.3390/en12091770.
- Yang, H.T., Chang, W.Y., and Huang, C.L. (1994). A new neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9, 220–230. doi:10.1109/61.277693.
- Zhang, Y., Chung, C.Y., Wen, F., and Zhong, J. (2016). An analytic model for fault diagnosis in power systems utilizing redundancy and temporal information of alarm messages. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(6), 4877–4886. doi:10.1109/TPWRS.2016.2519452.