



revista científica

LINKSCIENCEPLACE
interdisciplinar



Revista Científica Interdisciplinar. ISSN: 2358-8411

Nº 1, volume 3, artigo nº 7, Janeiro/Março 2016

D.O.I: <http://dx.doi.org/10.17115/2358-8411/v3n1a7>

RESTABELECIMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA TÉCNICA ENXAME DE PARTÍCULAS

Leonardo Willer Oliveira¹

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE)

Ângelo Rocha Oliveira²

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

Ivo Chaves Silva Junior³

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Flávio Vanderson Gomes⁴

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Edimar José Oliveira⁵

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Resumo

Este artigo propõe uma metodologia para restabelecimento ótimo de sistemas elétricos radiais de distribuição após a ocorrência de faltas. Este complexo problema requer um processo decisório em que a natureza combinatória pode inviabilizar a avaliação de todas as soluções possíveis dentro de tempos aceitáveis. Portanto, a metodologia proposta baseia-se na técnica enxame de partículas (EP) binário para tratamento das variáveis discretas associadas com as decisões de chaveamento. O processo de restabelecimento envolve um modelo multi-objetivo de reconfiguração em que os objetivos são maximizar a carga

¹ professor dos cursos de Engenharia Elétrica da UFJF e coordenador do curso de Engenharia Elétrica-Energia da UFJF., leonardo.willer@ufjf.edu.br

² professor do curso de Engenharia de Controle e Automação e do curso técnico de Eletrotécnica do CEFET-MG, Campus III – Leopoldina. Atua no departamento de Elétrica/Eletrônica do CEFET-MG, angelo@leopoldina.cefetmg.br

³ professor dos cursos de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE), ivo.junior@ufjf.edu.br

⁴ professor dos cursos de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE), flavio.gomes@ufjf.edu.br

⁵ Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), edimar.oliveira@ufjf.edu.br

atendida e melhorar a regulação de tensão, com perdas e número de chaveamentos mínimos. Um estudo de casos é realizado para validação da metodologia proposta.

Palavras-chave: distribuição ; enxame de partículas ; reconfiguração ; restabelecimento.

Abstract

This paper proposes an approach for the optimal restoration of radial electrical distribution systems after an incident. The complex problem requires a decision-making process whose combinatorial nature can avoid the assessment of all possible solutions within feasible computational times. Therefore, the proposed approach is based on the binary particle swarm optimization (PSO) for handling the discrete variables related to the switching decision. The restoration process comprises a multi-objective reconfiguration model in which the objectives are to maximize the supplied load and improve the voltage regulation, with minimum loss and switching maneuvers. A case study is performed to evaluate the proposed methodology.

Keywords: distribution ; particle swarm optimization ; reconfiguration ; restoration.

INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência são sujeitos a eventos predominantemente não programados e associados com reparos devido a algumas ocorrências como falhas em equipamentos, descargas atmosféricas, contatos com árvores e colisões (SAFAEI; BANJEVIC; JARDINE, 2012). Em sistemas de distribuição, a ocorrência destas faltas pode implicar na abertura de uma ou mais trechos de alimentadores da rede, podendo afetar o suprimento de energia. Os impactos referentes à interrupção de fornecimento de energia dependem do tempo requerido para localizar a falta, isolar os trechos ou a região afetada e transferir parte ou todo o seu carregamento para outros alimentadores (DUQUE; MORINIGO, 2006), (BORGES et al., 2011).

Após o isolamento da região afetada, o suprimento deve ser restabelecido em sua totalidade ou em parte através de reconfiguração da rede elétrica (BORGES et al., 2011). Esta tarefa é conhecida como restabelecimento (ADIBI et al., 1987) e pode ser realizada seguindo diversas decisões programadas que incluem ações de chaveamento e estratégias de corte de carga se necessárias, com o principal objetivo de maximizar a carga atendida. Em outras palavras, o principal propósito é

minimizar a duração de interrupção de energia aos consumidores (SAFAEI; BANJEVIC; JARDINE, 2012).

Considerando o número de opções de reconfiguração para o restabelecimento do fornecimento, este é um problema de natureza combinatória envolvendo a busca por um grande espaço de soluções (LAMBERT-TORRES et al., 2009). Além do grande porte deste problema, sua resolução requer a utilização de programação não linear inteira mista (ADIBI et al., 1987). Adicionalmente, este é um problema complexo de otimização combinatória que geralmente envolve múltiplos objetivos e restrições não lineares (SANCHES et al., 2014). Algoritmos evolutivos (SANCHES et al., 2014), (STęPIEń; FILIPIAK, 2014) e métodos heurísticos como enxame de partículas e algoritmos genéticos (LAMBERT-TORRES et al., 2009) têm sido propostos para lidar efetivamente com este tipo de problema de otimização.

A referência (JORGE et al., 2014) propõe um algoritmo genético como método de otimização para o restabelecimento de energia com um codificação que garante uma estrutura radial para a rede elétrica. Outros métodos aplicados ao restabelecimento de sistemas de distribuição são sistemas inteligentes, lógica fuzzy, colônia de formigas, busca tabu, redes neurais artificiais e modelos híbridos, conforme revisão realizada na referência (SUDHAKAR; SRINIVAS, 2010). Modelos multi-objetivos para o problema de restabelecimento como da referência (CHEN, 2010) são a tendência de pesquisa nesta tema (JORGE et al., 2014).

De acordo com Wu, Tsai e Hsu (2007), o enxame de partículas consiste em um algoritmo eficaz para auxiliar no processo decisório do problema de reconfiguração de alimentadores de distribuição. Como o método tradicional de enxame de partículas foi desenvolvido para problemas contínuos de otimização (WU; TSAI; HSU, 2007), uma versão modificada denominada enxame de partículas binário foi apresentada na referência (KENNEDY; EBERHART, 1997) e investigada para reconfiguração de redes de distribuição em (WU; TSAI; HSU, 2007) e (CHANG; LU, 2002).

Este artigo apresenta uma metodologia para restabelecimento ótimo de sistemas radiais de distribuição baseada na técnica enxame de partículas binário.

Esta técnica é aplicada para reconfigurar a rede de distribuição após a eliminação de defeitos, através da representação das opções de chaveamento como variáveis binárias. O modelo multi-objetivo de otimização proposto visa à maximização da demanda atendida e da regulação de tensão com perdas e número de chaveamentos mínimos. Portanto, a principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta para lidar com os diferentes objetivos deste problema técnico tentando estabelecer um compromisso adequado entre os mesmos. Um sistema conhecido da literatura é utilizado no estudo de casos realizado para demonstrar a aplicabilidade da metodologia proposta.

DESENVOLVIMENTO

1. Metodologia proposta

A metodologia proposta para restabelecimento de sistemas de distribuição considera múltiplos objetivos e restrições (SANCHES et al., 2014) através de um modelo de otimização não linear inteiro misto. Neste sentido, a função objetivo deste modelo é formulada como

$$\text{Min} \left[\rho_{LC} \text{PNS} + \rho_v \sum_{k=1}^{NBv} (V_{\min} - V_k) + \rho_{pl} \frac{L_{pl}}{PL_t} + \rho_{sw} n_{sw} \right]. \quad (1)$$

Em que:

- PNS Carga total discreta não suprida (kW);
- $V_{\min}$ Limite inferior de tensão (V);
- V_k Módulo de tensão da barra k (V);
- NBv Número de barras em que as tensões encontram-se abaixo do limite ($V_{\min}$);
- L_{pl} Perda total de potência ativa (kW);
- PL_t Carga total do sistema (kW);
- n_{sw} Número de manobras de chaveamento.

A função da Equação (1) trata do compromisso entre os objetivos do problema de restabelecimento, que são maximizar o atendimento da demanda e a

regulação de tensão, com perdas técnicas e número de chaveamentos mínimos. Os fatores de penalidade devem refletir este compromisso e são definidos por análises empíricas e de sensibilidade.

O problema de otimização é sujeito a restrições que envolvem (i) a estrutura radial da rede de distribuição; (ii) as equações de fluxo de potência; (iii) as opções de chaveamento (aberto ou fechado). Os conjuntos de restrições (ii) e (iii) são modelados como

$$PG_k - PL_k + \sum_{m \in \Omega_k} x_{km} P_{km} = 0, \quad (2)$$

$$QG_k - QL_k + \sum_{m \in \Omega_k} x_{km} Q_{km} = 0, \quad (3)$$

$$x_{km} = 0 \text{ ou } 1, \quad (4)$$

$$V_k \geq V_k^{\min}. \quad (5)$$

Em que:

PG_k e QG_k	Gerações de potência ativa (kW) e reativa (kVAr) na barra k , respectivamente;
PL_k e QL_k	Carga ativa (kW) e reativa (kVAr) na barra k , respectivamente;
P_{km} e Q_{km}	Fluxos de potência ativa (kW) e reativa (kVAr) no trecho que conecta as barras k e m , respectivamente;
Ω_k	Conjunto de barras conectadas à barra k através de um ou mais trechos;
x_{km}	Variável binária associada às chaves manobráveis tal que $x_{km} = 0$ ou 1 indica trecho km aberto ou fechado, respectivamente;
V_k	Módulo de tensão (pu) da barra k ;
$V_k^{\min}$	Valor mínimo requerido de tensão (pu) em qualquer barra do sistema.

A restrição de radialidade da rede elétrica é atendida automaticamente através da aplicação dos passos do enxame de partículas binário (WU; TSAI; HSU, 2007) a um conjunto inicial de topologias radiais candidatas. As configurações deste

conjunto são derivadas da topologia radial base em que os trechos afetados pela falta são desconectados. No presente trabalho, esta topologia é denominada caso base. As demais configurações do conjunto inicial são derivadas utilizando-se a técnica de troca de posições, baseada em teoria de grafos de modo a manter a estrutura radial, assim como na referência (OLIVEIRA et al., 2014).

Cada solução candidata da técnica enxame de partículas binário proposta é avaliada através do cálculo de fluxo de potência observando-se as restrições (2) e (3). A restrição modelada na Equação (4) é tratada pelo enxame de partículas binário.

O modelo de otimização atende à restrição de limite de tensão formulada em (5) através da função objetivo (1) e dos fatores de compromisso ou penalidade. Neste sentido, este modelo penaliza soluções com tensões abaixo do limite inferior através da segunda parcela da Equação (1). A restrição de limite superior de tensão não é necessária em se tratando de sistemas de distribuição sem a presença de geração distribuída.

Destaca-se que o maior objetivo da função (1) é geralmente associado com a demanda não suprida (PNS), pois uma das maiores questões do setor de energia é a satisfação do consumidor, que está intimamente relacionada com a interrupção do fornecimento (BORGES et al., 2011), (FUKUYAMA; CHIANG, 1995). Os níveis de tensão também constituem uma questão importante devido à qualidade de energia e à confiabilidade. Entretanto, em alguns casos, não é possível atender a estes objetivos simultaneamente e os fatores de penalidade devem estabelecer um compromisso adequado entre eles.

A técnica de enxame de partículas consiste de um método evolutivo inspirado no comportamento social de pássaros (KENNEDY; EBERHART, 1995). Neste método baseado em população, um indivíduo é chamado de partícula e se move através de um espaço de busca guiado pela melhor posição encontrada por si mesmo (pbest) e pela melhor posição encontrada por toda a população (gbest). Portanto, um indivíduo atualiza sua velocidade e posição como

$$v_{idu} = wv_{id} + c_1 r_1 (pbest_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (gbest - x_{id}), \quad (6)$$

$$x_{idu} = x_{id} + v_{idu}. \quad (7)$$

Em que:

- v_{idu} Velocidade atualizada da partícula id;
- x_{idu} Posição atualizada da partícula id;
- v_{id} Valor anterior de velocidade da partícula id;
- x_{id} Posição anterior da partícula id;
- w Coeficiente de inércia;
- c_1 e c_2 Constantes de aceleração;
- r_1 e r_2 Variáveis aleatórias no intervalo [0, 1].

A codificação de uma solução candidata para o problema de restabelecimento gera uma sequência de posições que recebem '0' ou '1', em que '0' significa chave aberta e '1' chave fechada. Portanto, o tamanho de uma solução codificada é dado pelo número de chaves manobráveis e o processo de atualização deve gerar apenas valores binários para cada posição, o que não é garantido pelo modelo formulado nas Equações (6) e (7). Entretanto, o EPB apresenta algumas modificações que tornam este modelo aplicável ao problema de restabelecimento, sem estratégias de arredondamento ou similares que podem afetar a eficácia da técnica de otimização.

No EPB, os operadores algébricos das Equações (6) e (7) são substituídos por operadores de deslocamento, que consistem em operadores binários utilizados em linguagens de programação computacional (WU; TSAI; HSU, 2007). Estes operadores são aplicados ao código de uma solução candidata para gerar outro indivíduo através de trocas de posições que emulam os operadores das Equações (6) e (7), porém mantendo-se a estrutura binária. Cada operador de deslocamento tem três elementos, (i) a posição que será trocada, (ii) a direção do deslocamento no vetor codificado (direita ou 1; esquerda ou 0), (iii) e o número de passos de deslocamento (WU; TSAI; HSU, 2007).

Como exemplo, supondo-se que o vetor $S1 = [1,0,1]$ representa uma

configuração radial para um sistema de distribuição em que as chaves manobráveis 1 e 3 estão fechadas e a chave 2 encontra-se aberta. Adicionalmente, o vetor $SO = [2,1,1]$ é um operador de deslocamento, em que o primeiro elemento (2) refere-se à chave 2, o segundo (1) indica a direção direita e o terceiro elemento (1) estabelece um único passo nesta direção. Se o operador SO for aplicado à configuração $S1$, a nova configuração resultante $S2 = [1,1,0]$ será obtida. Isto significa que o operador SO pode ser considerado, neste caso, como uma parcela que deve ser adicionada a $S1$ a fim de obter $S2$, emulando o operador de adição (+). Outros operadores são emulados seguindo mecanismos similares para se obter o modelo EPB.

2. Algoritmo proposto

O fluxograma da Figura 1 resume os passos do EPB aplicado ao problema de restabelecimento.

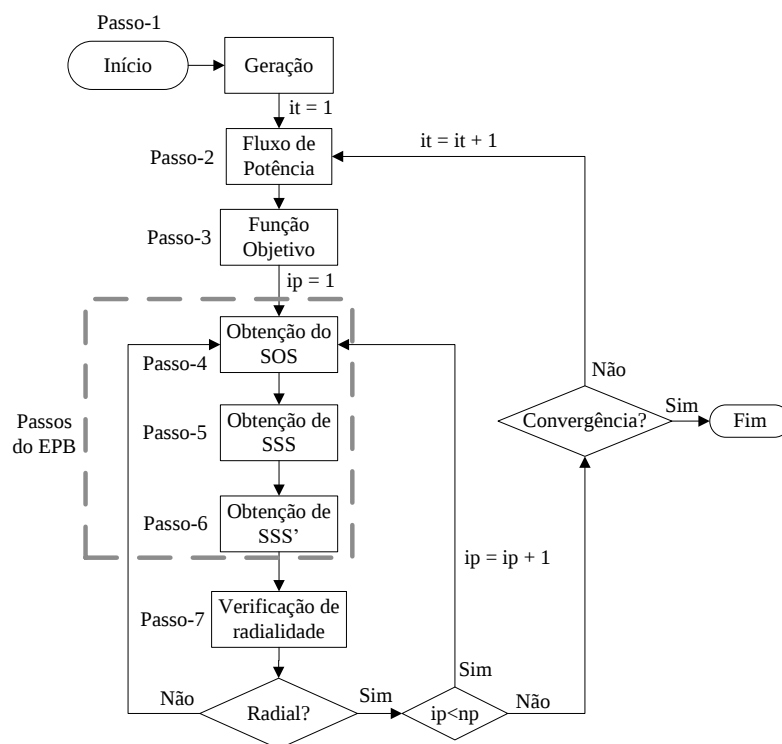


Figura 01 – Fluxograma do algoritmo proposto

Fonte: OLIVEIRA et al. (2015).

Os passos deste algoritmo são descritos na sequência.

Passo-1: Geração do conjunto inicial de configurações radiais candidatas derivadas da topologia radial base através da técnica de troca de ligações em que os trechos afetados pela(s) falta(s) encontram-se desconectados.

Passo-2: Cálculo do fluxo de potência para cada solução candidata que compõe o conjunto de partículas.

Passo-3: Neste passo, a função objetivo (1) é avaliada para cada solução candidata a partir dos resultados do fluxo de potência e do número de manobras de chaveamento do caso base para cada solução (n_{sw}).

Passo-4: Este passo é dedicado à obtenção do conjunto de operadores de deslocamento (SOS) do EPB para cada solução candidata 'ip'. Este conjunto é derivado de processos que emulam os operadores $c_1r_1(pbest_{id} - x_{id})$ e $c_2r_2(gbest - x_{id})$ da Equação (6), através de trocas de posições na estrutura binária de x_{id} para se obter $pbest_{id}$ e $gbest$, respectivamente. Portanto, o conjunto SOS contém os deslocamentos necessários para emular as operações da Equação (6).

Passo-5: Neste passo, a sequência de estados SSS é determinada através da aplicação dos operadores de deslocamento de SOS. Esta sequência consiste na velocidade atualizada (v_{idu}) da Equação (6) para cada solução candidata 'ip'.

Passo-6: Este passo é dedicado à obtenção da sequência de estados SSS' relativa à posição atualizada x_{idu} da Equação (7) para cada solução candidata 'ip'. Isto é realizado através da aplicação dos operadores que emulam a Equação (7) às estruturas binárias de x_{id} e v_{idu} .

Passo-7: Este passo avalia a estrutura binária da solução candidata 'ip' a fim de verificar se este código corresponde a uma topologia radial, com base em teoria de grafos, assim como na referência (OLIVEIRA et al., 2014). Se a solução relacionada à partícula 'ip' não for radial, então uma nova topologia será gerada para 'ip' nos Passos-4 a 6. Isto é possível sorteando-se novos valores para as variáveis

aleatórias r_1 e r_2 da Equação (6). Este processo é repetido até que a partícula 'ip' receba uma configuração candidata radial. Quando isto ocorre, o algoritmo verifica se todas as 'np' partículas do EPB tenham sido atualizadas, incrementa o índice 'ip' para a próxima partícula ou verifica o critério de convergência em caso de atualização de todas as configurações. O critério de convergência é dado pelo número máximo de iterações (it), que consiste no número de atualizações aplicadas ao enxame de partículas.

Assim como mostrado na Figura 1, os passos do EPB envolvem os Passos-4 a 6, em que as topologias candidatas dadas pelas respectivas partículas são atualizadas. Para maiores detalhes sobre este procedimento de atualização, recomenda-se o trabalho de Wu, Tsai e Hsu (2007).

3. Resultados

Esta seção apresenta um estudo de caso para avaliar a metodologia proposta para restabelecimento ótimo de sistemas de distribuição, utilizando-se o sistema teste de 33 barras da literatura (BARAN; WU, 1989), de 12,66 kV, cinco chaves normalmente abertas e um carga total de 3715 kW. A tensão da subestação é mantida em 1,0 pu. Adicionalmente, considera-se que todos os trechos têm chaves manobráveis acopladas, significando que todo trecho pode ser chaveado durante o processo de restabelecimento. Os resultados foram obtidos a partir da implementação do modelo proposto no software MATLAB® versão 7.9.0.529 (R2009b). Esta implementação incluiu o desenvolvimento do código do EPB (WU; TSAI; HSU, 2007), do fluxo de potência via método de Newton-Raphson e das rotinas que aplicam os conceitos de teoria de grafos para gerar topologias candidatas radiais.

A Tabela 1 apresenta os fatores de penalidade ou de compromisso entre os objetivos da Equação (1) determinados por uma análise empírica ou de sensibilidade para o estudo de caso realizado.

Tabela 01 – Fatores de penalidade ou de compromisso entre os objetivos

Fator	ρ_{LC}	ρ_V	ρ_{SW}	ρ_{PI}
Valor	1,0e-3	1,0e-5	1,0e-6	1,0e-8

Fonte: OLIVEIRA et al. (2015)

Conforme descrito anteriormente, a determinação destes fatores é importante para o problema de otimização multi-objetivo em questão, em que os principais objetivos são maximizar o atendimento da demanda e minimizar as violações de tensão. Portanto, os fatores ρ_{LC} e ρ_V recebem os maiores valores de modo que tenham maior impacto na função objetivo. Por outro lado, o fator relativo à perda de potência recebe o menor valor, pois se espera que o tempo necessário para o restabelecimento não seja elevado. Entretanto, a consideração deste fator é necessária, pois o impacto nas perdas do sistema pode ser significativo dependendo da frequência e da duração da interrupção no fornecimento. Finalmente, o fator ρ_{SW} expressa a importância de se considerar o custo e a vida útil das chaves manobráveis no problema de restabelecimento.

O sistema de 33 barras utilizado neste estudo foi previamente reconfigurado por Oliveira et al. (2010) e Oliveira et al. (2014), visando à minimização de perdas, resultando no conjunto de chaves abertas [S_7 , S_9 , S_{14} , S_{32} e S_{37}]. Esta configuração foi considerada neste estudo como a topologia base, a partir da qual as demais configurações candidatas do conjunto inicial foram derivadas. Assim como na referência (BORGES et al., 2011), as faltas consideradas afetam os trechos S_5 e S_{35} , e o limite inferior de tensão é 0,9 pu. A Figura 2 mostra este sistema reconfigurado, ou seja, a topologia radial base, em que as linhas tracejadas representam as chaves abertas e os círculos na cor cinza representam as barras cujo fornecimento foi interrompido pelas faltas.

Tabela 02 – Resultados para o sistema teste

Método	EPB proposto	(BORGES et al., 2011)	(LIN; CHIN, 1998)
Configuração final (chaves abertas)	S₅, S₇, S₁₄, S₃₂, S₃₅	S₅, S₇, S₉, S₃₂, S₃₅	S₅, S₁₄, S₃₂, S₃₅, S₃₇
Tensão mínima (pu)	0,93	0,93	0,84
Perda técnica (kW)	188,67	195,00	331,75
Número de chaveamentos	2	2	2

Fonte: OLIVEIRA et al. (2015)

Comparando-se a solução final da metodologia proposta com a topologia base da Figura 2, conclui-se que o processo de restabelecimento consistiu no fechamento das chaves S₉ e S₃₇. Esta solução difere da solução de Borges et al. (2011). Ambas atendem à restrição de limite de tensão (0,9 pu) sem corte de carga. Entretanto, a metodologia proposta resulta em uma solução mais eficiente, com menores perdas técnicas. A restrição de tensão não é atendida pela solução de Lin e Chin (1998) sem cortes de carga. Nesta solução, para que a restrição de limite de tensão seja atendida, apenas 79% da carga total pode ser restabelecida, ou seja, é necessário um corte de carga de 21%.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma metodologia de otimização para restabelecimento ótimo de sistemas radiais de distribuição de energia baseada na técnica de enxame de partículas binário. O problema multi-objetivo visa à maximização da demanda atendida e da regulação de tensão com perdas técnicas e número de chaveamentos mínimos. A principal contribuição foi o desenvolvimento de um modelo capaz de lidar com os diferentes objetivos do problema de restabelecimento tentando estabelecer uma relação adequada de compromisso entre eles. A técnica de otimização utilizada para alcançar estes objetivos permite tratar a natureza binária das variáveis associadas com as opções de chaveamento sem a necessidade de estratégias de arredondamento ou similares, que podem afetar a solução ótima do problema.

Adicionalmente, a técnica proposta garante a obtenção de apenas soluções candidatas radiais durante o processo de otimização. O estudo de caso realizado demonstrou a aplicabilidade da metodologia proposta neste trabalho.

Os autores deste artigo agradecem o apoio do CNPq e do grupo de pesquisa “Otimização Heurística e Bio-inspirada” da UFJF.

REFERÊNCIAS

ADIBI, M. et al. Power System Restoration - A Task Force Report. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 2, n. 2, p.271-277, 1987.

BARAN, M.e.; WU, F.f.. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **IEEE Transactions On Power Delivery**, v. 4, n. 2, p.1401-1407, abr. 1989.

BORGES, T. T. et al. Distribution systems restoration using the Interior Point Method and sensibility analysis. **2011 IEEE Power And Energy Society General Meeting**, [San Diego], p.1-4, jul. 2011.

CHANG, R.f.; LU, C.n.. Feeder reconfiguration for load factor improvement. **2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, p.980-984, 2002.

CHEN, Wen-hui. Quantitative Decision-Making Model for Distribution System Restoration. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 25, n. 1, p.313-321, fev. 2010.

DUQUE, O.; MORINIGO, D.. Load restoration in electric distribution networks using a metaheuristic technique. **Melecon 2006 - 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference**, [Malaga], p.1040-1043, 2006.

FUKUYAMA, Y.; CHIANG, Hsaio-dong. A parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems. **Proceedings Of 1995 IEEE International Conference On Fuzzy Systems. The International Joint Conference Of The Fourth IEEE International Conference On Fuzzy Systems And The Second International Fuzzy Engineering Symposium**, [Yokohama], p.275-282, 1995.

JORGE, Mendoza B. et al. Multi-fault service restoration in distribution networks considering the operating mode of distributed generation. **Electric Power Systems Research**, v. 116, p.67-76, nov. 2014.

KENNEDY, J.; EBERHART, R.c.. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. **1997 IEEE International Conference On Systems, Man, And Cybernetics. Computational Cybernetics And Simulation**, [Orlando, FL], p.4104-

4108, 1997.

KENNEDY, J.; EBERHART, R.. Particle swarm optimization. **Proceedings Of Icn'n'95 - International Conference On Neural Networks**, [Perth, WA], p.1942-1948, 1995.

LAMBERT-TORRES, Germano et al. Comparison between PSO and GA in System Restoration Solution. **2009 15th International Conference On Intelligent System Applications To Power Systems**, [Curitiba], p.1-6, nov. 2009.

LIN, Whei-min; CHIN, Hong-chan. A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration. **Ieee Transactions On Power Delivery**, v. 13, n. 3, p.870-875, jul. 1998.

OLIVEIRA, Leonardo W. de et al. Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for energy losses minimization. **International Journal Of Electrical Power & Energy Systems**, v. 32, n. 8, p.840-848, out. 2010.

OLIVEIRA, Leonardo W. de et al. Artificial Immune Systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution networks for energy loss minimization. **International Journal Of Electrical Power & Energy Systems**, v. 56, p.64-74, mar. 2014.

OLIVEIRA, Leonardo Willer de et al. Restabelecimento de Sistemas de Distribuição de Energia Através da Técnica Enxame de Partículas. In: ENCONTRO INTERESTADUAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (EINEPRO), 1., 2015, São João da Barra, RJ. **Anais...** . São João da Barra, RJ: Fmepro, 2015. p. 1 - 11

SAFAEI, Nima; BANJEVIC, Dragan; JARDINE, Andrew K. S.. Workforce Planning for Power Restoration: An Integrated Simulation-Optimization Approach. **Ieee Trans. Power Syst.**, v. 27, n. 1, p.442-449, fev. 2012.

SANCHES, Danilo Sipoli et al. Multiobjective evolutionary algorithm with a discrete differential mutation operator developed for service restoration in distribution systems. **International Journal Of Electrical Power & Energy Systems**, v. 62, p.700-711, nov. 2014.

STAPIEN, Jan; FILIPIAK, Sylwester. Application of the evolutionary algorithm with memory at the population level for restoration service of electric power distribution networks. **International Journal Of Electrical Power & Energy Systems**, v. 63, p.695-704, dez. 2014.

SUDHAKAR, T. D.; SRINIVAS, K. N.. Restoration of power network - a bibliographic survey. **Euro. Trans. Electr. Power**, v. 21, n. 1, p.635-655, 25 ago. 2010. Wiley-Blackwell.

WU, Wu-chang; TSAI, Men-shen; HSU, Fu-yuan. A New Binary Coding Particle Swarm Optimization for Feeder Reconfiguration. **2007 International Conference On Intelligent Systems Applications To Power Systems**, [Toki Messe, Niigata], p.1-6, nov. 2007.

Sobre os Autores

Autor 1: professor dos cursos de Engenharia Elétrica da UFJF e coordenador do curso de Engenharia Elétrica-Energia da UFJF. Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE). Atua na área de planejamento, operação e otimização de sistemas elétricos de potência. Líder do grupo de pesquisa “Otimização Heurística e Bio-inspirada” da UFJF, leonardo.willer@ufjf.edu.br

Autor 2: professor do curso de Engenharia de Controle e Automação e do curso técnico de Eletrotécnica do CEFET-MG, Campus III – Leopoldina. Atua no departamento de Elétrica/Eletrônica do CEFET-MG. Mestre e doutorando em Engenharia Elétrica pela UFJF. Possui interesse nas seguintes linhas de pesquisa: otimização, operação e proteção de sistemas de potência e energia, redes neurais artificiais e automação industrial, angelo@leopoldina.cefetmg.br

Autor 3: professor dos cursos de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE). Possui interesse nas seguintes linhas de pesquisa: estudo e aperfeiçoamento de técnicas de otimização bioinspirada, desenvolvimento de heurísticas construtivas, análise de sensibilidade, programação linear, não linear e dinâmica, ivo.junior@ufjf.edu.br

Autor 4: professor dos cursos de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE). Tem experiência na área de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, atuando principalmente no desenvolvimento de modelos e técnicas para análise de sistemas elétricos: fluxo de potência, curto-circuito, otimização e reconfiguração/planejamento de sistemas de distribuição, flavio.gomes@ufjf.edu.br

Autor 5: Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Atua no Departamento de Energia Elétrica da UFJF. Seu principal interesse é análise de sistemas elétricos de potência, edimar.oliveira@ufjf.edu.br