

PMOGA Aplicado ao Problema de Alocação de Religadores Automáticos em Sistemas de Distribuição Elétrica

Guilherme Pauli
CELESC Distribuição
Florianópolis/SC
guilhermepauli94@gmail.com

Edison Antonio Cardoso Aranha Neto
Instituto Federal de Santa Catarina
Florianópolis/SC
earanja@ifsc.edu.br

Daniel Tenfen
Instituto Federal de Santa Catarina
Florianópolis/SC
daniel.tenfen@ifsc.edu.br

ABSTRACT

The planning of electrical distribution systems is essential and a challenge for Electric Power Distribution Companies along with the need to improve the quality of the energy distribution service. As presented in the recent literature, the use of switches and protection devices can improve the quality of the electricity distribution service and, thus, system reliability indices. The main objective of this work is to propose a model to optimally allocate reclosers in distribution feeders with a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) that is modeled, validated by exhaustive search, when possible, due to computational limitation, proving its effectiveness. Among the possibilities, the Pareto Multi-objective Optimization Genetic Algorithm (PMOGA) was chosen for this work. Then, the developed methodology was applied in real feeders with and without Distributed Generation. Finally, it is concluded that the proposed model for the allocation of reclosers is adequate to solve the problem and positively affects the reliability and can be used in most of the current electricity distribution networks.

PALAVRAS-CHAVE

Algoritmos Genéticos Multiobjetivo, Religadores, Geração Distribuída, Sistemas de Distribuição Elétrica.

1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica representa, historicamente, desafios às concessionárias de distribuição, sendo um dos aspectos mais importantes a ser tratado em seus estudos de planejamento. Os órgãos reguladores, no caso do Brasil a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), exigem que as concessionárias mantenham um padrão de continuidade e, para isso, estabelecem limites para os índices de continuidade [1]. O DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) são usados como as principais métricas para mensurar esses índices [2]. O índice ENS (Energia Não Suprida), apesar de não ser regulamentado pela ANEEL, é amplamente empregado nos estudos de planejamento.

Nos sistemas de distribuição radial, ou operados de forma radial, os equipamentos de proteção e manobra têm papel fundamental na manutenção dos índices de continuidade. Segundo [3] e [4], no planejamento da distribuição de energia elétrica, o posicionamento ideal de chaves e dispositivos de proteção permite melhorar não apenas a operação da rede, mas também os índices de

continuidade. Assim, a confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser significativamente melhorada com a alocação otimizada de religadores que proporcionam uma rápida recomposição do sistema após uma falta [5]. Quando o sistema de distribuição não possui um grande número de barras e o número de religadores é pequeno, é possível realizar uma busca exaustiva, testando todas as combinações possíveis [6]. Porém, conforme o tamanho do sistema começa a crescer, a solução deixa de ser trivial, aumentando exponencialmente o custo computacional.

Com o uso da otimização evolutiva, é possível encontrar o melhor ponto para alocação de religadores para grandes problemas, além de buscar otimizar os índices de continuidade. Sendo assim, neste trabalho foram utilizados Algoritmos Genéticos (AGs) Multiobjetivo para otimizar o problema proposto, os quais são amplamente utilizados na área de Sistemas de Potência [7-11]. O objetivo principal é desenvolver uma metodologia para alocação ótima de religadores em alimentadores do sistema de distribuição.

2 SOLUÇÃO PROPOSTA

O sistema de distribuição é o que mais contribui para a interrupção do fornecimento de energia elétrica, portanto, melhorar a confiabilidade é uma grande preocupação das distribuidoras [2].

2.1 Confiabilidade em Sistemas de Distribuição

Por meio dos índices de continuidade é possível estabelecer metas para as concessionárias de distribuição e estipular penalidades caso tais metas não sejam atingidas [12]. No Brasil, os indicadores de continuidade no fornecimento de energia elétrica são regulamentados pela ANEEL através dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [13]. Os cálculos dos indicadores realizado pela ANEEL são feitos *a posteriori*, através dos dados de ocorrências no sistema de distribuição. Neste artigo os indicadores são calculados de maneira *a priori*, com o intuito de efetuar o planejamento da alocação ótima de religadores no sistema de distribuição visando minimizar os indicadores de continuidade.

2.2 Otimização Multiobjetivo com AGs

AGs são procedimentos de busca probabilística projetados para trabalhar em grandes espaços envolvendo estados que podem ser representados por strings [14]. De acordo com [15], um AG é uma otimização baseada na seleção natural, genética natural e teoria da evolução Darwiniana. Com o passar dos anos os AGs passaram por melhorias e adaptações, como a otimização de problemas

multiobjetivo, destacando-se [16]: MOGA (Multi-objective Optimization Genetic Algorithm) [9]; NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) [7-8]; e PMOGA (Pareto Multi-objective Optimization Genetic Algorithm) [11], [17-18].

Neste artigo, o problema de otimização visa minimizar três índices de continuidade: DEC, FEC e ENS. Trata-se, portanto, de um problema multiobjetivo e para a solucionar este problema implementou-se um algoritmo PMOGA, baseado em [18].

2.3 Modelagem do Problema Proposto

As concessionárias de distribuição de energia elétrica armazenam uma grande quantidade de informações sobre os equipamentos e trechos de rede em uma base de dados georreferenciada.

2.3.1 Redução de Pontos. Baseado em [17] e [19] implementou-se um algoritmo que reduziu em 60% o número de nós do alimentador, sem a perda de informações relevantes.

2.3.2 Taxas de Falha e Tempos de Reparo. Neste artigo, calculou-se essas variáveis apenas como uma média simples de previsão, utilizando um histórico de 5 anos. Outros métodos também podem ser utilizados na metodologia proposta.

2.3.3 Matriz de Alcance. Segundo [17] e [20], um alimentador pode ser representado por um grafo orientado. Para a construção deste grafo se parte de uma matriz de definição de ramos, com barras “De” e “Para”. Considerando a conectividade da matriz, é possível montar a matriz de adjacência (A).

2.3.4 Cálculo dos Indicadores de Continuidade. A metodologia utilizada faz uso da Matriz Lógico-Estrutural (MLE), conforme proposto por [17], [19-20]. O cálculo dos indicadores de continuidade é feito de acordo com [21].

2.4 Estudo de Caso

Para o estudo de caso utilizou-se dados reais de uma concessionária de energia do sul do Brasil. Foi simulado um alimentador principal (alimentador que recebe os religadores) e dois alimentadores de socorro. Há ainda a presença de uma usina de Geração Distribuída (GD) fotovoltaica de 600 kW no alimentador principal, que pode operar em paralelo com os alimentadores de socorro.

Todas as simulações foram executadas em um computador com sistema operacional MacOS Big Sur, processador 2,8 GHz Intel Core i5 Dual-Core, 16 GB de memória 1600 MHz DDR3.

Inicialmente calculou-se os indicadores de continuidade para o estado atual do alimentador, sendo DEC = 15,02 horas/ano, FEC = 5,37 faltas/ano e ENS = 182.472,27 kWh/ano. Na sequência, foi realizada uma análise sem a presença da GD considerando apenas um religador por meio de busca exaustiva (Fig. 1).

Percebe-se que a posição do religador que minimiza o DEC não é a mesma que minimiza o FEC ou o ENS. Essas posições podem ser consideradas como soluções individuais para minimização de cada um dos três objetivos [20], mas a busca pela solução que minimiza todos os indicadores é um problema multiobjetivo. Portanto, cabe encontrar uma solução melhor para o problema, que vise minimizar a função objetivo final, composta das equações (1).

$$f_1 = \min DEC ; f_2 = \min FEC ; f_3 = \min ENS \quad (1)$$

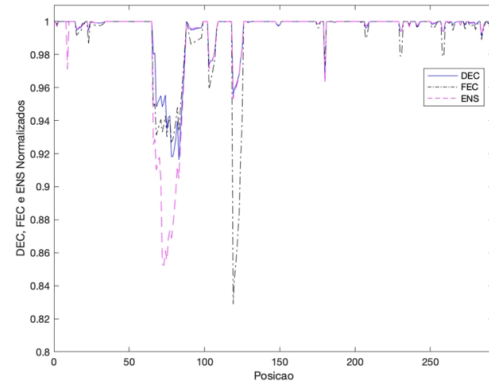


Figura 1: Gráfico de DEC, FEC e ENS x posição do religador.

Para validação do algoritmo PMOGA, implementou-se um algoritmo de busca exaustiva. Foi realizada a alocação de 1 a 3 religadores sem a presença da GD. As Soluções Ótimas de Pareto (SOPs) encontradas para a busca exaustiva estão na Tab. 1.

Posições dos Religadores			Objetivos			Ganho DEC (%)	Ganho FEC (%)	Ganho ENS (%)
Rel. 1	Rel. 2	Rel. 3	Min. DEC	Min. FEC	Min. ENS			
83	-	-	13,775	5,021	165.302,90	8,28%	6,52%	9,41%
78	-	-	13,811	4,996	158.912,18	8,04%	6,99%	12,91%
75	-	-	14,051	5,012	156.511,36	6,45%	6,69%	14,23%
119	-	-	14,359	4,492	174.057,42	4,39%	16,37%	4,61%
73	-	-	14,302	5,05	155.938,78	4,77%	5,98%	14,54%
72	-	-	14,255	5,027	156.105,28	5,09%	6,41%	14,45%
83	119	-	13,115	4,141	156.888,05	12,68%	22,91%	14,02%
78	119	-	13,151	4,116	150.497,33	12,44%	23,37%	17,52%
75	83	-	13,159	4,789	149.109,53	12,38%	10,84%	18,28%
75	119	-	13,392	4,132	148.096,51	10,83%	23,07%	18,84%
72	119	-	13,595	4,148	147.690,43	9,48%	22,78%	19,06%
72	83	-	13,225	4,771	146.920,15	11,94%	11,18%	19,48%
73	119	-	13,642	4,171	147.523,93	9,17%	22,35%	19,15%
75	119	83	12,499	3,909	140.694,68	16,78%	27,23%	22,90%
72	119	83	12,564	3,891	138.505,30	16,35%	27,56%	24,10%
68	119	83	12,542	3,876	144.779,17	16,49%	27,84%	20,66%

Tabela 1: Resultado da Busca Exaustiva - 1 a 3 religadores.

Analisando-se a Tab. 1, percebe-se que através da busca exaustiva chegou-se a um total de 7 SOPs com um tempo de processamento de 2 min para 2 religadores; e 3 SOPs com um tempo de processamento de 2,21 horas para 3 religadores.

Para a execução do PMOGA considerou-se uma população inicial de 100 e 200 indivíduos; 20 e 30 iterações para 2 religadores e 40 e 50 iterações para 3 religadores; taxa de cruzamento de 0,5 e 0,9 e taxa de mutação de 0,05. Para cada uma das configurações de parâmetros foram feitos 10 experimentos. Na Tab. 2 encontram-se os resultados para 3 religadores.

Na avaliação para 2 religadores, no pior dos casos encontrou-se 4 das 7 SOPs. Ressalta-se, porém, que o PMOGA testou apenas 2% de todas as combinações possíveis e já obteve bons resultados. Para o caso com 3 religadores, conforme Tab. 2, verifica-se que no pior dos casos se encontrou 2 das 3 SOPs existentes para essa configuração testando-se apenas 0,02% de todas as combinações possíveis. Os resultados para 2 e 3 religadores apresentam boa qualidade, não apresentando forte dependência dos parâmetros do PMOGA e o índice de dominância também foi baixo.

Variação dos Parâmetros do PMOGA e Comparativo para Três Religadores								
Tam. Pop.	Iter.	Taxa Cruz.	Máx. n_SOP	Mín. n_SOP	Média n_SOP	Tempo Máx. (s)	Tempo Min (s)	Tempo Méd. (s)
100	40	0,5	4	2	3,13	27,45	23,94	25,2
100	40	0,9	4	3	3,13	26,73	24,93	25,67
100	50	0,5	3	3	3	38,34	30,63	32,33
100	50	0,9	3	3	3	38,6	33,16	34,73
200	40	0,5	3	3	3	57,19	49,95	52,01
200	40	0,9	3	3	3	65,89	58,68	61,66
200	50	0,5	3	2	2,87	75,23	62,23	69,19
200	50	0,9	3	3	3	87,89	78,08	81,06

Tabela 2: Avaliação dos Resultados Obtidos via PMOGA através da Variação dos Parâmetros - 3 Religadores.

Considerando a presença da GD operando em paralelo com o alimentador socorro, percebe-se um aumento no número de pontos candidatos que podem ser assumidos pelo alimentador socorro de outra SE. No entanto, os resultados encontrados foram idênticos aos encontrados sem GD. Apesar de serem uma solução possível, os novos pontos candidatos não pertencem ao conjunto de SOPs, portanto, não contemplam as melhores soluções encontradas.

Visando otimizar a quantidade de religadores a serem instalados, optou-se por testar a alocação com até 8 religadores. Na Fig. 2 observa-se os melhores ganhos percentuais obtidos em de cada uma das alocações. Percebe-se que até uma quantidade de 4 religadores os ganhos nos indicadores são praticamente lineares, e passam a sofrer uma redução a cada novo religador.

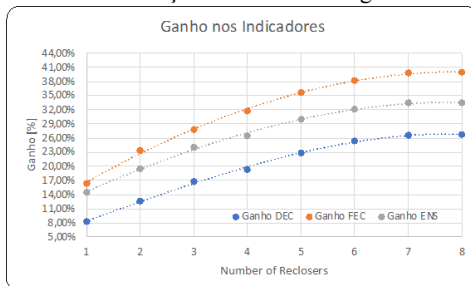


Figura 2: Saturação no ganho com a instalação de religadores.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo demonstrou uma aplicação efetiva do PMOGA para a alocação ótima de religadores no sistema de distribuição, validado por uma busca exaustiva. Percebe-se que os religadores são efetivos na melhoria dos indicadores de continuidade e, um incremento na quantidade de religadores tende a melhorar os índices de qualidade, contudo, os ganhos com a instalação de mais religadores NF não é linear.

Considerando os trabalhos existentes na literatura, pode-se destacar que, através da metodologia desenvolvida, é possível utilizar o algoritmo na maioria dos alimentadores de redes de distribuição primárias, independentemente do número de barras, desde que seja radial ou operado de forma radial. Outra vantagem é a redução do número de barras a serem utilizadas pelos algoritmos, reduzindo consideravelmente o custo computacional. Comparada à busca exaustiva, a metodologia desenvolvida apresenta bons resultados.

A metodologia proposta apresentou boa performance em alimentadores radiais ou operados de maneira radial, mesmo com a presença de GD, comprovando a eficácia da utilização dos religadores como dispositivos de proteção e manobra, melhorando os indicadores de continuidade e a potencialidade do uso de ferramentas como o PMOGA para resolução destes problemas.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. Indicadores Coletivos de Continuidade (DEC e FEC). Available at: <https://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-decontinuidade>.
- [2] S. Ray, A. Bhattacharya, S. Bhattacharjee. Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement. *Int. J. Electric Power Energy System*, v. 76, pp. 53–68, 2016, DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.09.022.
- [3] W. Tippachon, D. Rerkpreedapong. Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization. *Electric Power System Research*, v. 79, n. 7, p. 1171–1178, jul. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epse.2009.02.006>
- [4] R. Billinton, S. Jonnavithula. Optimal switching device placement in radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1646–1651, July 1996, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.1996.517529>
- [5] M. I. Chehardeh, C. J. Hatziadoniu. Optimal placement of remote-controlled switches in distribution networks in the presence of distributed generators. *Energies*, vol. 12, no. 6, 2019, DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en12061025>.
- [6] J. R. Bezerra, G. C. Barroso, R. P. S. Leão, R. F. Sampaio. Multiobjective Optimization Algorithm for Switch Placement in Radial Power Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 2, pp. 545–552, April 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2317173>.
- [7] A. M. Eldurssi and R. M. O'Connell, A Fast Nondominated Sorting Guided Genetic Algorithm for Multi-Objective Power Distribution System Reconfiguration Problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 2, pp. 593–601, March 2015, DOI: 10.1109/TPWRS.2014.2332953.
- [8] A. V. Pombo, J. Murta-Pina, V. F. Pires. Multiobjective planning of distribution networks incorporating switches and protective devices using a memetic optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, v. 136, pp. 101–108, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2014.11.016>.
- [9] N. Gupta, A. Swarnkar, K. R. Niazi. Distribution network reconfiguration for power quality and reliability improvement using Genetic Algorithms. *Int. J. Electric Power Energy System*, 2014, vol. 54, pp. 664–671, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.08.016>.
- [10] W. S. C. Moreira, F. L. R. Mussoi, R. C. G. Teive. Investment Prioritizing in Distribution Systems Based on Multi Objective Genetic Algorithm. In *15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, 2009, pp. 1–6, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISAP.2009.5352941>.
- [11] H. E. Brown, S. Suryanarayanan, S. A. Natarajan, S. Rajopadhye. Improving Reliability of Isolated Distribution Systems with Distributed Renewable Energy Resources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 4, pp. 2028–2038, Dec. 2012, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2012.2200703>.
- [12] E. A. C. Aranha Neto. Alocação de Chaves Automatizadas em Redes de Distribuição Utilizando Múltiplos Critérios. Dissertação (Mestrado), UFSC, Florianópolis, 2006.
- [13] ANEEL. PRODIST Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. 2021.
- [14] D. E. Goldberg, J. H. Holland. Genetic Algorithms and Machine Learning. *Machine Learning* 3. p. 95–99, 1988.
- [15] D. Dehghani, R. Dashti. Optimization of Recloser Placement to Improve Reliability by Genetic Algorithm. *Energy and Power Engineering*, v. 3, n. 4, p. 508–512, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2011.34061>
- [16] R. E. D. Castro. Otimização de Estruturas com Multiobjetivo via Algoritmo Genético. Tese (Doutorado). UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- [17] D. Tenfen. Alocação Ótima de Chaves Telecomandadas em Redes de Distribuição com Multiobjetivo via Algoritmos Genéticos de Pareto. Dissertação (Mestrado), UFSC, Florianópolis, 2011.
- [18] D. Duan, X. Ling, X. Wu, B. Zhong. Reconfiguration of distribution network for loss reduction and reliability improvement based on an enhanced genetic algorithm. *Int. J. Electric Power Energy System*, v. 64, p. 88–95, jan. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.036>.
- [19] M. Sperandio. Planejamento da automação de sistemas de manobra em redes de distribuição. Tese (Doutorado), UFSC, Florianópolis, 2008.
- [20] M. Sperandio et al. A Influência do Cálculo de Taxas de Falha na Alocação de Chaves Automáticas. In *XII ERIAC*. Foz do Iguaçu, 2007.
- [21] D. P. Bernardon et al. Methodology for allocation of remotely controlled switches in distribution networks based on a fuzzy multi-criteria decision making algorithm. *Electric Power Systems Research*, v. 81, n. 2, p. 414–420, fev. 2011. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2010.10.010>.