DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2204

Restabelecimento de Sistemas de Distribuição — Abordagem Híbrida de Algoritmo Genético e Busca local

Diego A. da Mata * **Michel Bessani** *

* *Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, (e-mail:{diegoadmata;mbessani}@ufmg.br).*

Abstract: In this paper, the restoration problem of power distribution systems is addressed. An introduction to the problem is presented along with some strategies applied to solve it. The use of a hybrid genetic algorithm with local search is suggested aiming to find good solutions in less time. Experiments were performed with the IEEE 14 bus test case and case 30 from MATPOWER, observed results indicated that the hybrid approach results in a better performance when compared with the genetic algorithm without the local search.

Resumo: Nesse trabalho é abordado o problema de restabelecimento de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE). Uma introdução do problema é apresentada juntamente com uma breve discussão sobre estrategias para tratar o problema. A utilização de um algoritmo genético hibrido com busca local é proposta visando encontrar boas soluções em pouco tempo. Experimentos são realizados com as redes IEEE 14 *bus test case* e case 30 do *MATPOWER*, indicando que a abordagem híbrida resulta em melhor performance quando comparada a uma abordagem sem a busca local.

Keywords: Genetic Algorithm; Local Search; Service Restoration.

Palavras-chaves: Algoritmo genético; Busca Local; Restabelecimento de sistemas de distribuição.

1. INTRODUÇÃO

A maior parte das interrupções no fornecimento de energia elétrica são originadas nos sistemas de distribuição (Zidan et al., 2016). Nos Estados Unidos, cerca de 80% dos problemas são provenientes do sistema de distribuição (Ghorbani et al., 2013), sendo as principais causas os problemas com vegetação local, defeitos de equipamentos e problemas com animas. As interrupções resultam em penalidades de origem regulatória para as concessionarias de energia elétrica, as quais são calculadas de acordo com indicadores de continuidade de serviço que ponderam a duração e frequência das interrupções e a quantidade de consumidores afetados (Eriksson et al., 2015).

Visando minimizar tais efeitos, esforços vem sendo aplicados ao problema de restabelecimento de sistemas de distribuição. Diferentes propostas de soluções computacionais visam auxiliar no tratamento eficiente das interrupções de energia (Latare et al., 2017; Shen et al., 2018). Importante ressaltar que o problema de restabelecimento é combinatorial e de difícil solução devido ao grande número de combinações possíveis e das diversas restrições do sistema. O mesmo pertence a classe NP - Completo conforme indicado por (Carrano et al., 2016).

Segundo Goulart et al. (2018), pode-se dividir as abordagens para o problema de restabelecimento em métodos de programação matemática, heurísticas e meta-heurísticas. Cada abordagem possui suas vantagens e desvantagens e são recomendadas de acordo com as diferentes situações inerentes aos aspectos do problema conforme discutido a seguir. As abordagens que utilizam métodos matemáticos tendem a alcançar bons resultados, porém, não possuem boa escalabilidade. Geralmente são utilizadas em problemas com sistemas pequenos ou para gerar soluções para comparação com outros algoritmos.

Os métodos baseados em heurísticas possuem maior escalabilidade se comparados com os métodos de programação matemática, entretanto, não é garantida a obtenção de boas soluções. Já os métodos baseados em meta-heurísticas tendem a ser mais complexos e proporcionam bom tempo de convergência e boas soluções. Tal característica se torna possível pois combina técnicas e princípios das outras abordagens, mesclando assim os seus benefícios.

Em (Rosado and Rider, 2018), o problema de restabelecimento é analisado pela perspectiva de dois modelos, programação cônica de segunda ordem inteira-mista (PCSOIM) e programação linear inteira-mista (PLIM). As duas abordagens são aplicados em um sistema teste e em um real. Apesar dos resultados obtidos serem bem próximos, observou-se que mesmo utilizando *solvers* comerciais, o tempo para obter a solução não foi satisfatório, principalmente no sistema real.

⋆ O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES – Brasil.

Outros autores também abordaram o problema utilizando Algoritmos de Petri, Redes Neurais Artificiais, Otimização por colonia de formigas, métodos Multi Agentes, Algoritmos evolutivos entre outros. Uma visão geral sobre os diferentes métodos aplicados ao problema de reestabelecimento de energia está disponível nas revisões recentes apresentadas por Latare et al. (2017) e Shen et al. (2018).

Neste trabalho, é proposta uma abordagem híbrida em que se combina um Algoritmo Genético (AG) com uma Busca Local (BL) para tratar o problema de restabelecimento de energia. De acordo com El-Milhoub et al. (2006), a combinação AG + BL auxilia na convergência para boas soluções nas regiões mais promissoras. Dessa maneira, a abordagem híbrida proposta será comparada com as soluções encontradas utilizando apenas AG.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, são apresentadas as características do problema de RSDEE juntamente com a modelagem adotada para o mesmo. Na Seção 3, é apresentado o algoritmo proposto. A Seção 4 aborda a metodologia utilizada para realizar os experimentos e a Seção 5 os resultados dos mesmos. Por fim, na Seção 6, encontra-se uma breve conclusão juntamente com propostas de trabalhos futuros.

2. RESTABELECIMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Nessa seção, procura-se apresentar as características e etapas do processo de RSDEE e suas restrições operacionais. Posteriormente é apresentada a formulação do problema.

2.1 Etapas do processo de restabelecimento

O problema de RSDEE pode ser divido em três etapas: identificação da falha, isolamento e restabelecimento sendo essa ultima o foco desse trabalho. A etapa de restabelecimento do sistema pode ainda ser dividida em dois momentos. O primeiro consiste no restabelecimento de forma rápida do máximo de cargas antes mesmo de solucionar a falha, o que é realizado através da manobra de chaves, e o segundo momento é a restauração da rede para sua configuração original após a correção da falha.

A Figura 1 ilustra um sistema em seu estado normal. As chaves $s4$, $s6$ e $s10$ encontram-se abertas e o sistema opera radialmente. Em (Kazmi et al., 2017) e em (Short, 2014) são discutidas algumas vantagens de um sistema radial como: fácil controle de tensão, fácil detecção de falhas, menor custo de implementação e fácil controle e predição do fluxo de cargas. Sendo assim, a operação radial é, normalmente, considerada como uma restrição do problema.

Suponha agora que uma falha ocorreu e a chave $s2$ atuou para proteção. Após atuação da chave, a alimentação dos barramentos 5, 6 e 7 foi interrompida. Geralmente, após a ocorrência de uma falta em uma rede, a chave com proteção imediatamente superior ao componente com a falha atua de forma automática afim de evitar que o problema se propague e comprometa outras partes da rede. Sendo assim, a primeira etapa consiste em identificar a chave que atuou automaticamente após a falha.

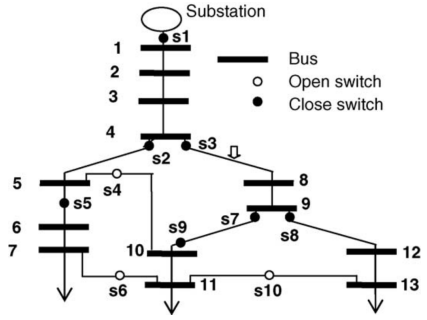

Figura 1. Exemplo de rede de Distribuição - Estado Inicial - Adaptado de Kumar et al. (2006)

Após a atuação da proteção devido a falta, é detectado qual é o primeiro barramento ligado diretamente à chave e o mesmo é isolado pelas chaves a jusante do mesmo, caso existam. Neste exemplo, o barramento 5 pode ser isolado conforme ilustrado na Figura 2, sendo essa a segunda etapa.

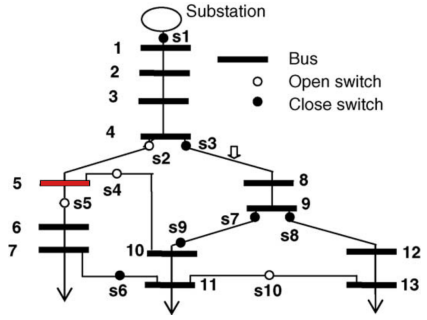

Figura 2. Exemplo de rede de Distribuição - Estado Pós falha - restabelecimento - Adaptado de Kumar et al. (2006)

Por fim, após detectar e isolar a falha, o sistema deve ser restaurado. Nesse exemplo uma sugestão de configuração final das chaves poderia ser a alteração do estado da chave $s6$ de aberto para fechado. Dessa forma, os barramentos 7 e 6 teriam a sua alimentação restaurada. Em sistemas maiores, tal tarefa não é intuitiva como nesse exemplo. Outro ponto importante a se destacar é se as restrições como queda de tensão e níveis de corrente serão respeitadas. Em alguns momentos não é possível absorver toda a carga que encontra-se desconectada devido a estas restrições operacionais, nesse caso pode-se realizar um corte de carga ou então não restaurar estas cargas.

2.2 Formulação do problema

O problema de RSDEE pode ser formulado de diferentes formas. Em (Chian-Hung et al., 2011) a formulação do problema de RSDEE acontece por meio das definições de restrições e objetivos. Como restrições os autores dividiram entre operacionais, operacionais de contingência e heurísticas. As operacionais se resumem basicamente em que todo alimentador deve ser protegido contra sobrecarga. As operacionais de contingência restringem que uma região desenergizada só pode ser suprida por uma região vizinha que não esteja sobrecarregada. Outra restrição é que caso tenha mais de uma região capaz de suprir uma região desenergizada, a com maior capacidade livre deve ser escolhida. Dessa forma as perdas nas linhas são minimizadas.

As restrições heurísticas indicadas pelos os autores são a classificação dos consumidores quanto a sua criticidade e a classificação das regiões quanto a criticidade dos equipamentos disponíveis. Essa abordagem é feita quando existe restrições práticas para um caso específico não sendo esse o escopo desse trabalho. Os objetivos resumem-se em restaurar o maior número possível de cargas com o menor número de permutação das chaves.

Sendo assim, tendo exposto o que geralmente é levado em consideração para esse tipo de problema e utilizando que um sistema de distribuição de energia elétrica pode ser representado por um grafo $G = (B, E)$, onde B é o conjunto de barramentos no sistema, e E representa as conexões entre os barramentos, buscou-se minimizar a seguinte função objetivo,

$$\min_{G} \quad f(G) = \frac{w_1 F_1(G) + w_2 F_2(G) + w_3 F_3(G)}{w_1 + w_2 + w_3} \tag{1}$$

$$\text{sujeito a} \quad V_{bmin} \leq V_b \leq V_{bmax}, \quad \forall b \in B \tag{2}$$

$$I_{emin} \leq I_e \leq I_{emax}, \quad \forall e \in E \tag{3}$$

$$G \quad \text{é Radial} \tag{4}$$

$$\text{onde} \quad F_1 = \sum_{i=1}^{N_0} C_i - \sum_{j=1}^{N_R} C_j \tag{5}$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^{N_c} |eci_i - x_i| \tag{6}$$

$$F_3 = \text{Perdas}(G) \tag{7}$$

O termo F_1 representa a quantidade de carga que ainda não foi restaurada conforme Equação (5), onde N_0 é a quantidade de cargas atendidas no estado inicial do sistema, e N_R é a quantidade de cargas atendidas no estado restaurado. Tal fator é o principal quando se diz respeito ao RSDEE. O termo sintetiza a necessidade de restaurar o maior número possível de cargas. O mesmo contribui diretamente para os indicadores de continuidade que levam em consideração a quantidade de usuários e a quantidade de carga não atendida.

O termo F_2 representa o número de chaves que devem ser permutadas conforme Equação (6), em que N_c é o número de chaves e eci_i e x_i são respectivamente os estados das chaves após o isolamento da falha e na configuração restaurada. Em um cenário onde as chaves necessitam ser manobradas manualmente, esse termo influência diretamente no tempo de restabelecimento. Quanto maior o número de chaves a serem manipuladas manualmente maior será o tempo. Tal termo busca atender os índices relacionados ao tempo de indisponibilidade. Outro fator importante é que existe um custo para realizar cada manobra, mesmo que de maneira automática.

O termo F_3 retrata as perdas nas linhas de distribuição conforme Equação (7). Caso exista uma solução que consiga atender o mesmo número de cargas e realizar o mesmo numero de manobras, é interessante que esse fator seja levado em consideração mesmo não sendo tão significante em um cenário emergencial. Tal termo procura atender as restrições relacionadas as perdas nas linhas de distribuição.

As restrições operacionais de nível de tensão, carregamento e radialidade da rede descritas nas Equações (2), (3) e (4) também são analisadas pelo algoritmo apresentado na Seção 3. Primeiro verifica-se se a radialidade foi respeitada realizando uma busca por ciclos no grafo. Caso seja detectado algum ciclo o algoritmo já penaliza esse indivíduo com um valor consideravelmente alto da função objetivo porem ainda o utiliza para gerar indivíduos futuros. Caso a radialidade seja respeitada é verificado por meio do fluxo de potência se as restrições de carregamento da rede e níveis de tensão são respeitadas. Novamente, se tais restrições não são respeitadas a função objetivo recebe um valor consideravelmente alto. Caso contrario a função objetivo será calculada. Por fim, os termos w_1, w_2 e w_3 representam os respectivos pesos que serão atribuídos na função objetivo.

3. ALGORITMO PROPOSTO

Nessa seção encontra-se o algoritmo proposto. Inicialmente é abordado como foi realizado a codificação do problema, posteriormente é apresentado a detecção e isolamento da falha e por fim é apresentado o AG + BL.

3.1 Codificação do Problema

Para definição de individuo optou-se por dividir as chaves do sistema em dois conjuntos. O primeiro conjunto denominado *Chaves de Manobra - CM*, o qual consiste na representação do conjunto de chaves passiveis de serem permutadas. O segundo conjunto denominado *Chaves de Isolamento - CI* é composto pelas chaves que devem permanecer sempre abertas para isolamento da falha.

Dessa forma o indivíduo é composto por um conjunto de *bits* provenientes de *CM* onde cada *bit* representa uma chave podendo assumir o valor 0 (chave aberta) ou 1 (chave fechada). O conjunto *CM* possui tanto as chaves que estão com estado inicial igual a 0 quanto as chaves com estado inicial igual a 1, uma vez que pode ser necessário abrir uma chave para manter a radialidade da rede após o fechamento de alguma outra chave.

3.2 Restabelecimento do Sistema

Conforme citado anteriormente, primeiro é necessário detectar e isolar a falha. Sendo assim, após uma chave sinalizar a detecção de uma falha, o algoritmo identifica o barramento imediatamente posterior a tal chave. Logo após, são identificados todos os ramos que ligam esse barramento a outros barramentos. Todos os ramos que possuem uma chave seccionadora são isolados. Caso algum desses ramos não possua uma chave seccionadora, é identificado o barramento em que tal ramo está ligado e o processo se repete até alcançar ramos com chaves para que as mesmas possam isolar a falha. Caso não encontre uma chave seccionadora significa que todo aquele ramo já se encontra isolado apenas pela primeira chave que atuou no momento da falha.

Utilizou-se do seguinte conceito de vizinhança: Dado um estado das chaves de uma rede, uma solução vizinha a esse estado inicial é toda aquela que difere do estado em apenas uma chave do mesmo. Pode-se observar melhor tal

conceito na Figura 3 onde existe um individuo cercado por seus vizinhos. Nesse caso também foi adotado o conceito de *first improvement* que consiste em realizar a BL até que uma melhora no valor da função *fintess* seja detectado. Em resumo, a BL é realizada em todos os indivíduos e cada mudança de chave é analisada em ordem aleatória, ao identificar uma primeira melhora o algoritmo passa para o próximo individuo repetindo o processo.

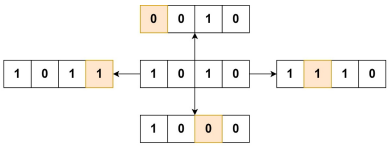

Figura 3. Conceito de Vizinhança - Elaborado pelo Autor

Algoritmo 1: AG + BL

início
- $Ind1 \leftarrow$ Estado Inicial das Chaves do grupo CM
- $Pop \leftarrow Ger_Pop(Ind1)$
- $fit \leftarrow Calc_Fit(Pop, Ind1)$
- $Melhor_Ind \leftarrow EncontraMelhor(fit)$
- **enquanto** $geracao < maxgeracao$ **faça**
  - $Pop \leftarrow Cruzamento(Pop, Melhor_Ind)$
  - $Pop \leftarrow Mutacao(Pop, Tx_MT)$
  - $Pop \leftarrow BuscaLocal(Pop)$
  - $fit \leftarrow Calc_Fit(Pop, Ind1)$
  - $Melhor_Ind \leftarrow EncontraMelhor(fit)$
- **fim**
- **retorna** $Melhor_Ind$

fim

No Algoritmo 1 apresenta-se um pseudocódigo do método proposto. Inicialmente, o estado inicial das chaves é definido como o indivíduo inicial. Posteriormente, uma população é gerada com base em mutações aleatórias do primeiro indivíduo onde os demais indivíduos são vizinhos do estado inicial escolhidos de forma aleatória. Posteriormente, enquanto o critério de parada não é atendido, são realizadas as operações de cruzamento mutação e busca local. O cruzamento gera os $TamPop - 1$ indivíduos para uma população de tamanho $TamPop$ pois o melhor individuo da geração anterior é passado adiante sendo esse o elitismo escolhido. Logo após é aplicado uma mutação com uma taxa Tx_MT e busca local em todos os indivíduos. Se mesmo após a mutação e busca local o melhor individuo continuar sendo o da geração anterior, o mesmo será passado adiante na mesma posição que ocupava anteriormente. Por fim é retornada a melhor configuração do sistema encontrado pelo algoritmo.

Na Figura 4 pode-se observar de maneira macro o fluxo do algoritmo AG + BL e um pouco mais detalhado a BL onde cada individuo ind_i é substituído por um vizinho v_j que foi gerado aleatoriamente, quando tal vizinho for uma solução melhor.

4. METODOLOGIA

Para realizar os experimentos, utilizou-se de redes disponíveis no pacote *MATPOWER* (Zimmerman and Murillo-Sanchez, 2019). As redes utilizadas foram IEEE 14 *bus*

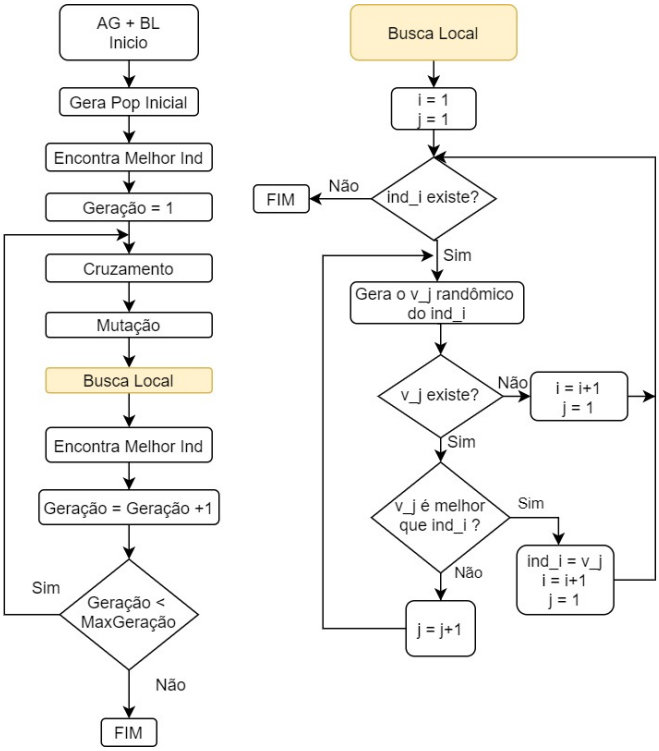

Figura 4. Fluxograma do AG + BL - Elaborado pelo Autor

test case e case 30 do *MATPOWER*. Os experimentos foram realizados em um computador pessoal com Sistema Operacional Windows 10 Pro, processador I5 - 5200U, memória RAM de 8 Gb e utilizando o *MATLAB* versão 8.5.0.197613 (R2015a).

Os pesos dos termos que compõem a função objetivo foram escolhidos como $w_1 = 10$, $w_2 = 10$ e $w_3 = 1$. Tal discrepância diz respeito a importância que os mesmos possuem. Apesar de $w_1 = w_2$, os valores de F_1 possuem maior impacto na função objetivo, conforme esperado, do que F_2, dada a diferença na ordem de grandeza dos mesmos.

O taxa de mutação foi ajustada para 20% em todos os experimentos. Isso indica que todos os indivíduos possuem 20% de chance de sofrer mutação a cada avaliação. Cada processo de mutação indica a mudança do estado de uma chave escolhida de forma aleatória. O método de cruzamento utilizado é o de um-ponto, onde se realiza a seleção aleatória de um ponto para dividir um indivíduo em duas partes e combinar com outro indivíduo dividido no mesmo ponto. Criando assim um novo indivíduo com a primeira parte do primeiro indivíduo e a segunda parte proveniente da segunda parte do segundo indivíduo. Tal método encontra-se ilustrado na Figura 5. Como o método elitista adotado irá perpetuar sempre o individuo de melhor valor da função objetivo, a operação de cruzamento será responsável por gerar todos os outros indivíduos. O tamanho da população adotado foi igual a 5 para todos os experimentos. Os parâmetros necessários foram ajustados de forma empírica utilizando apenas o AG sem a BL. Os mesmos parâmetros foram replicados para os experimentos com AG+BL.

De posse de tais parâmetros foi executado o experimento para os 2 casos. Inicialmente utilizou-se apenas o AG com

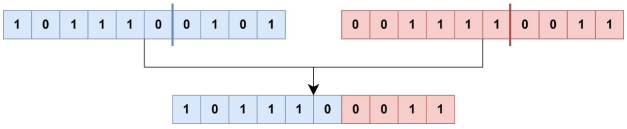

Figura 5. Método de Cruzamento - Elaborado pelo Autor

o critério de parada em 600 gerações. Tal valor foi escolhido considerando experimentos anteriores que apontavam uma convergência do algoritmo antes de atingir tal critério. Posteriormente, foi executado o experimento utilizando-se o AG+BL. Nesse caso o critério de parada utilizado foi 10 gerações. Esse valor também foi escolhido após a realização de experimentos preliminares.

Durante os experimentos, foram registrados os valores da função objetivo juntamente como os valores das 3 componentes F_1, F_2 e F_3, o tempo de execução, e numero de avaliações da função objetivo. Esses valores serão utilizados para comparação dos resultados observados com o AG e com o AG+BL.

5. RESULTADOS

Na Figura 6 são exibidos os valores da Função objetivo e suas componentes normalizadas para o IEEE 14 *bus test case* ao longo da evolução do algoritmo AG+BL. Pode-se observar que o algoritmo AG+BL rapidamente converge, e que para alcançar bons valores para o termo F_1 os termos F_2 e F_3 tiveram aumento dos seus valores. A convergência dos mesmos geralmente ocorre após a convergência de F_1 que possui maior influencia na função objetivo. Essa característica era esperada devido a busca local realizada em torno das soluções candidatas.

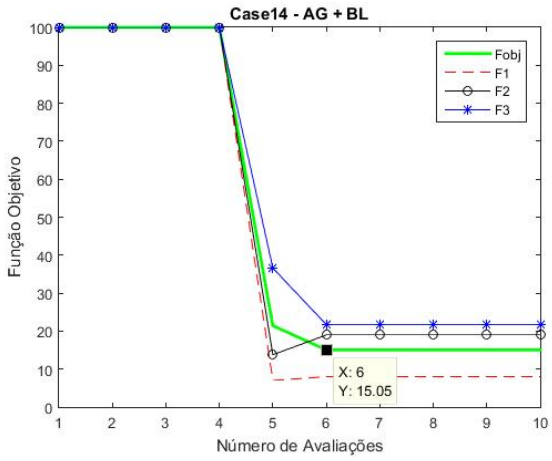

Figura 6. Função objetivo e suas componentes normalizadas - IEEE 14 *bus test case* - AG+BL

A Figura 7 é referente ao AG puro, apresentando a função objetivo agregada e as suas partes F_1, F_2 e F_3 normalizadas. Pode-se observar um comportamento semelhante quando comparado a convergência dos termos. Entretanto o mesmo fica estagnado em um mínimo local durante quase toda a execução. O valor final é apresentado posteriormente na Tabela 1.

O mesmo foi realizado para o case 30 do *MATPOWER*. Na Figura 8 são apresentados os resultados para o AG+BL

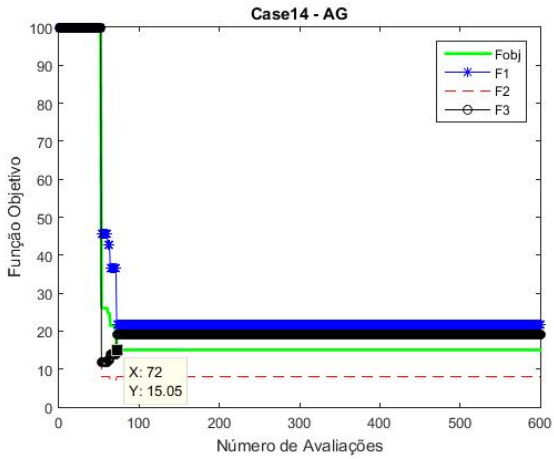

Figura 7. Função objetivo e suas componentes normalizadas- IEEE 14 *bus test case* - AG

e na Figura 9 referente ao algoritmo AG. Nesse caso o AG ficou novamente estagnado em um mínimo local e nesse caso não conseguiu encontrar uma solução de igual qualidade que o AG+BL. Para alcançar bons resultados o AG é obrigado a passar por regiões consideradas não factíveis e a mutação adotada não é capaz de levar o algoritmo a contornar rapidamente este problema. O mesmo não acontece quando combinado com a busca local, a qual resultou em uma maior velocidade de convergência.

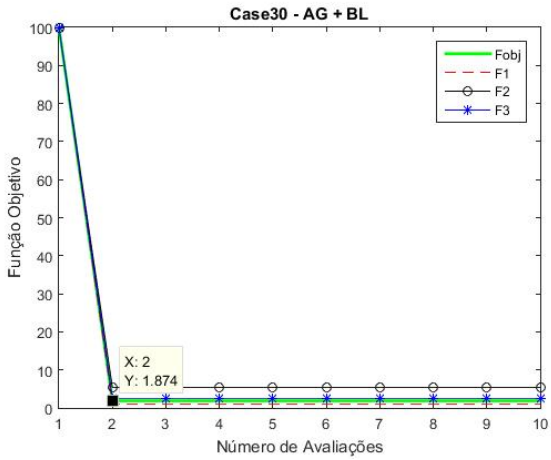

Figura 8. Função objetivo e suas componentes normalizadas - case 30 do *MATPOWER* - AG+BL

A Tabela 1 sintetiza os resultados. Pode-se observar que o AG+BL realiza mais avaliações por geração, isso ocorro porque além de avaliar os indivíduos da população ele também avalia os seus vizinhos durante a BL. Como indicado na Tabela 1 na coluna "Av.", a abordagem AG+BL realizou aproximadamente a metade das avaliações que a abordagem AG em um cenário com 60 vezes menos gerações mostradas na coluna "Ger.". Como a BL insere um direcionamento para regiões mais promissoras, a solução AG+BL resulta em uma maior velocidade de convergência em menor tempo indicado na coluna Tempo Estimado "T.E".

Ao analisar os valores referentes a função objetivo, tanto na Tabela 1 quanto nas Figuras apresentadas anteriormente, percebe-se que o algoritmo AG+BL resultou em

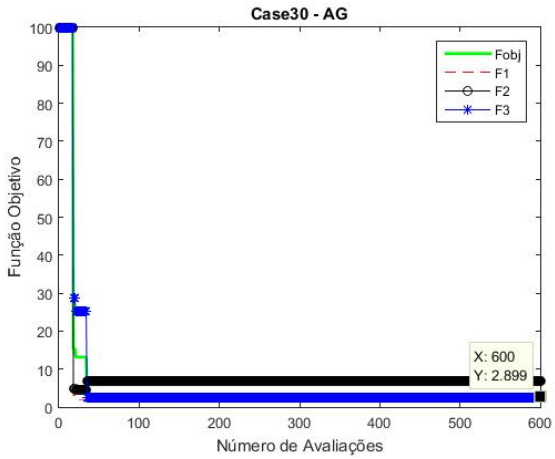

Figura 9. Função objetivo e suas componentes normalizadas normalizadas - case 30 do *MATPOWER* - AG

Tabela 1. Comparação entre a abordagem híbrida AG+BL e o AG sem a busca local.

			AG+BL				
	Av.	Ger.	f	F_1	F_2	F_3	T.E.
C.14	1500	10	15,05	21,7	8	18,98	25,96s
C.30	1750	10	1,8741	2,4	1	5,35	75,08s

			AG				
	Av.	Ger.	f	F_1	F_2	F_3	T.E.
C.14	3000	600	15,05	21,7	8	18,98	92,01s
C.30	3000	600	2,89	2,4	3	6,88	146,83s

melhores soluções que o AG. Isso ocorre devido a capacidade da busca local explorar as regiões mais promissoras localizadas pelo AG, o mesmo não ocorre quando apenas as operações de mutação e cruzamento são realizadas.

6. CONCLUSÃO

Nesse estudo foi abordado o problema de restabelecimento de sistemas de distribuição. O mesmo foi codificado como um conjunto de chaves passiveis de serem manobradas com a finalidade de propor uma configuração final da rede após falha. Foi adotada uma função objetivo que agrega a minimização da quantidade de carga não atendida, menor número de chaves manobradas e menor perda nas linhas.

Uma abordagem hibrida de um algoritmo genético acrescido de uma busca local foi proposta. Para BL o conceito de vizinhança utilizado foi de no máximo a diferença no estado de uma única chave entre um individuo e os seus vizinhos. O algoritmo foi aplicado nas redes IEEE 14 *bus test case* e case 30 do *MATPOWER*. Os resultados foram comparados com um algoritmo genético sem BL.

Foi possível verificar a rápida convergência do algoritmo e a sua facilidade em explorar melhor as soluções do que a abordagem sem BL. Como trabalhos futuros é proposto o acréscimo de novas definições de vizinhança e a avaliação do problema em uma perspectiva multiobjetivo. Pretende-se também realizar estudos comparativos do algoritmo aqui proposto com outras técnicas como busca tabu, *branch-and-cut* e outros. Por fim, outra proposta é avaliar se uma menor frequência de execução da BL durante o processo evolutivo resultará na redução do custo computacional sem prejuízo na qualidade da solução final e contribuindo para escalabilidade da solução.

REFERÊNCIAS

Carrano, E.G., Silva, G.P., Cardoso, E.P., and Takahashi, R.H. (2016). Subpermutation-based evolutionary multiobjective algorithm for load restoration in power distribution networks. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 20, 546–562.

Chian-Hung, L., Chao-Shun, C., Te-Tien, K., Cheng-Ta, T., and Ching-Ying, H. (2011). A multiagent-based distribution automation system for service restoration of fault contigencies. *European Transactions on electrical power*, (21), 239–253.

El-Milhoub, T.A., Hopgood, A.A., Nolle, L., and Battersby, A. (2006). Hybrid genetic algorithms: A review. *Engineering Letters*, 13(3).

Eriksson, M., Armendariz, M., Vasilenko, O.O., Saleem, A., and Nordström, L. (2015). Multiagent-based distribution automation solution for self-healing grids. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 62(4), 2620–2628.

Ghorbani, J., Chouhan, S., Choudhry, M.A., and Feliachi, A. (2013). Hybrid multi agent approach for power distribution system restoration. In *2013 IEEE Energytech*, 1–5. IEEE.

Goulart, F., Maravilha, A.L., Carrano, E.G., and Campelo, F. (2018). Permutation-based optimization for the load restorationproblem withimproved time estimation of maneuvers. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 101, 339–355.

Kazmi, S.A.A., Shahzad, M.K., Khan, A.Z., and Shin, D.R. (2017). Smart distribution networks: A review of modern distribution concepts from a planning perspective. *Energies*, 10(4), 501.

Kumar, Y., Das, B., and Sharma, J. (2006). Service restoration in distribution system using non-dominated sorting genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, 76(9-10), 768–777.

Latare, N.A., Bhat, S.S., and Srivastava, I. (2017). Literature review of service restoration in distribution system. *Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies.*

Rosado, B.R. and Rider, M.J. (2018). Optimal restoration switching sequence in smart distribution networks. *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 1–6.

Shen, F., Wu, Q., Huang, S., López, J.C., Li, C., and Zhou, B. (2018). Review of service restoration methods in distribution networks. In *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 1–6. IEEE.

Short, T.A. (2014). Electric power distribution handbook. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 20, 546–562.

Zidan, A. et al. (2016). Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: State-of-the-art and future trends. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(5), 2170–2185.

Zimmerman, R.D. and Murillo-Sanchez, C.E. (2019). Matpower (version 7.0). *Disponível em: https://matpower.org.*