



# HEURÍSTICA HÍBRIDA APLICADA NO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Leonardo de Assis Nizer <sup>1</sup>  
Ricardo Luiz Barros de Freitas <sup>2</sup>

## RESUMO

Perdas elétricas é um problema que acomete a todos os segmentos do sistema elétrico de potência, ocorrendo principalmente nos centros de transformação de tensão e durante o transporte. Em especial, os sistemas de distribuição concentram grande parte desse revés por possuírem a maior parte da demanda energética e por suas extensas redes com elevado grau de ramificações. Nesse sentido, este trabalho utiliza uma metodologia heurística híbrida para minimizar as perdas ativas através da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica baseada no algoritmo de Prim em conjunto a uma Meta-heurística Multipartida, gerando topologias radiais diversas. Além disso, utiliza Heurística Busca Dispersa com Algoritmo Genético para, partindo de um grupo de soluções de boa qualidade da técnica anterior, realizar combinações entre esses resultados, saindo de ótimos locais e explorando mais intensamente o espaço de possibilidade do problema. Os algoritmos foram implementados em linguagem C e testados nos sistemas adaptados de 23, 33, 49, 51, 136 e 415 barras, amplamente utilizados na literatura especializada. Constatou-se um bom desempenho do programa desenvolvido, em que a técnica Multipartida encontrou boas soluções para os sistemas e 23, 33 e 51 barras, enquanto que o Algoritmo Genético encontrou as melhores topologias para os sistemas de 49, 136 e 415 barras, ou seja, aquelas com menor perfil de perdas elétricas.

**Palavras-chave:** Reconfiguração de sistemas de distribuição, Algoritmo genético, Multipartida, Prim.

## INTRODUÇÃO

A possibilidade da falta de energia elétrica com o aumento frequente de novos consumidores é uma realidade no mundo e um fator de preocupação para as concessionárias de energia. Novas residências, comércios e indústrias são construídas continuamente, provocando um aumento na demanda de energia. Em relação ao Brasil, o consumo de energia elétrica no ano de 2019 subiu 1,3% em relação ao ano anterior, compreendendo a demanda do Sistema Interligado Nacional, dos sistemas isolados e da autoprodução, sendo 79,4% desta demanda pertencente aos setores mencionados (EPE, 2020).

---

<sup>1</sup> Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, [leonardo.nizer@unioeste.br](mailto:leonardo.nizer@unioeste.br);

<sup>2</sup> Professor orientador: Pós-Doutor, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, [rlbfreitas@gmail.com](mailto:rlbfreitas@gmail.com).

Trabalho resultante de um projeto de pesquisa.



Em um sistema elétrico de potência, a maior parte da energia é transmitida e direcionada para os sistemas de distribuições, os quais tem a finalidade de fornecer um serviço confiável e de baixo custo aos consumidores, de forma a garantir que a energia seja entregue em quantidade e qualidade (LAVORATO *et al.*, 2010). Entretanto, além das concessionárias tentarem atender o crescimento da demanda, existe também outro desafio, a perda de energia.

Durante o processo de transporte e na elevação/rebaixamento da tensão, parte dessa energia é perdida, acarretando em custos que se refletem em equipamentos para restaurar o nível de tensão em segmentos da rede e devido ao próprio montante de energia não faturado. Essas são as perdas técnicas, decorrentes das características não ideais dos materiais, mas também existem as perdas comerciais, frutos de fraudes e/ou erros de medição. Segundo relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as perdas totais em sistemas de distribuição representaram, aproximadamente, 14% do total de energia injetado nesses sistemas, sendo 7,3% devido às perdas técnicas, com um custo estimado da ordem de R\$ 7,9 bilhões (ANEEL, 2020).

Em cima disso, planejar a operação das redes de distribuição, buscando a redução de perdas elétricas é de fundamental importância para redução de custos e melhoria nos serviços das concessionárias. E uma das formas de se fazer isso é através da técnica de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE), que, de maneira simplificada, se baseia na abertura e fechamento de chaves para refazer as rotas da energia elétrica, podendo assim distribuir mais adequadamente essa energia entre as cargas, evitando sobrecargas e minimizando as perdas. Em resumo, é um problema que busca topologias e perfis de perdas otimizados, porém, vale ressaltar que trata-se de um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) de grande complexidade (LAVORATO *et al.*, 2010).

Em virtude disso, por se tratar de uma PNLIM, não existem algoritmos eficientes que encontrem a solução ótima em tempo factível. Com isso, se utilizam heurísticas que visam reduzir o espaço de busca ao mesmo tempo em que podem fornecer soluções adequadas para o problema.

Em 1957 o engenheiro e matemático Robert Clay Prim apresentou uma metodologia para encontrar a árvore geradora mínima (AGM) de um grafo. É estabelecido que para um conjunto de ramos ou caminhos que conectam  $N$  nós, existe um número finito de redes de conexão distintas que relacionam  $N-1$  caminhos para interligar todos os  $N$  nós, sendo uma



delas a AGM (PRIM, 1957). Metodologia essa que é amplamente utilizada em problemas que podem ser abstraídos pela teoria de grafos, como é o caso da RSDEE.

Baran e Wu (1989) abordam o problema de RSDEE buscando, além de reduzir as perdas, realizar um balanceamento de cargas e com isso apresenta métodos aproximados para o cálculo de fluxo de carga. Miranda *et al.* (1994) utiliza o Algoritmo Genético (AG) visando minimizar as perdas e custos de investimento a partir de um modelo de PNLIM multiestágio. Berna-Agustin (1998) também faz uso do AG para minimizar custos e elabora uma metodologia que permite a escolha de vários tipos de condutores e capacidades de subestações. Possagnolo (2015) apresenta uma metodologia baseada na meta-heurística busca em vizinhança variável para encontrar topologias que minimizem perdas e considera vários níveis de demanda.

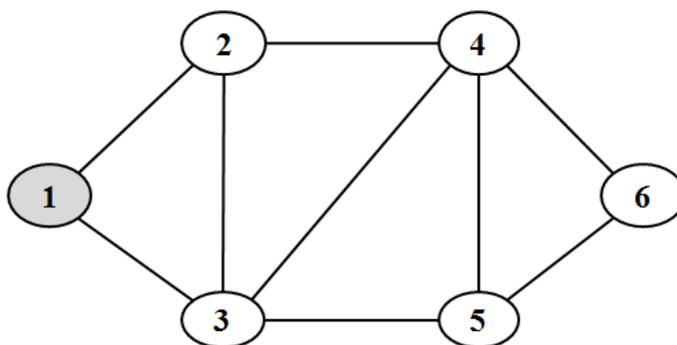
Com essa temática, este trabalho trata do problema RSDEE utilizando algoritmos dinâmicos que buscam a reconfiguração de sistemas de distribuição com o objetivo de gerar soluções viáveis de operação e realizar as comparações entre si utilizando informações de perdas ativas, custo de construção dos sistemas e custo das perdas. Foram implementadas de maneira complementar as heurísticas Multipartida (MP) em conjunto com o algoritmo de Prim, Busca Dispersa (BD) e combinações com Algoritmo Genético. O programa desenvolvido foi testado nos sistemas de mono alimentação adaptados de 23 barras (NAHMAN; PERIC, 2008), 33 barras (BARAN; WU, 1989), 49 barras (BORNIOI, 2018), 51 barras (MIRANDA *et al.*, 1994), 136 barras (MONTAVANI *et al.*, 2000) e 415 barras (BERNAL-AGUSTIN, 1998). Constatou-se boa eficiência em tempo de execução e ao encontrar topologias radiais de boa qualidade, sendo que para os sistemas de 23, 33 e 51 barras a técnica MP apresentou os melhores resultados e para os de 49, 136 e 415 barras, o AG encontrou as melhores soluções.

## **METODOLOGIA**

Os sistemas de distribuição mais antigos, conforme foram expandindo-se ao longo do tempo, adquiriram aspecto construtivo malhado, isto é, com o surgimento de novos pontos de consumo (barras do sistema), foram feitas novas linhas de distribuição (ramos ou circuitos), muitas vezes sem planejamento, gerando uma topologia aonde várias linhas chegam em um mesmo ponto de demanda. A Figura 1 ilustra um sistema hipotético de 6 barras malhado, em que a subestação ou alimentador é a barra 1.



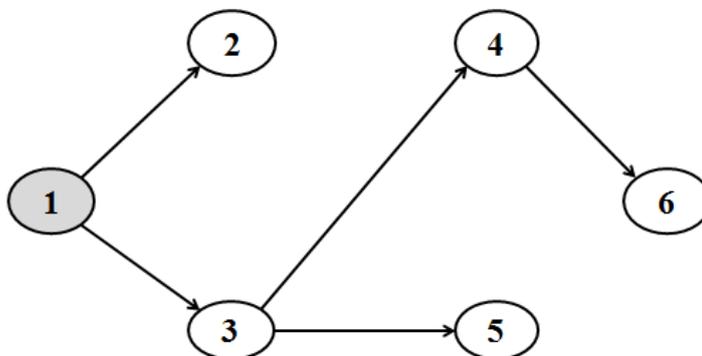
Figura 1 – Sistema hipotético de 6 barras malhado.



Fonte: elaborado pelos autores.

Por sua vez, esses sistemas operam de forma radial, em que o fluxo de energia, originado da subestação, parte em uma única direção para atender a demanda das barras (Figura 2). Essa topologia apresenta menor custo de operação e reduz perdas, visto que a passagem de corrente ocorre apenas nas linhas fundamentais para atender a carga requerida.

Figura 2 – Uma das topologias radiais possíveis para o sistema hipotético de 6 barras.



Fonte: elaborado pelos autores.

Diante disso, existe um número finito de radiais distintas (ou árvores geradoras possíveis) de acordo com um sistema malhado de estudo. Dessa forma, a técnica de RSDDE visa vasculhar esse espaço de busca, que geralmente é muito grande, a fim de encontrar topologias radiais de boa qualidade – com baixo perfil de perdas.

Assim, a formulação matemática apresentada na sequência busca minimizar perdas elétricas ativas em sistemas de distribuição com demanda fixa.



$$\min v = \sum_{(ij) \in \Omega_t} n_{ij} x_{ij} p_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$Q_k^D - P_k^D - \sum_{(ij) \in \Omega_t} x_{ij} P_{ij} \quad \forall k \in \Omega_b \quad (2)$$

$$Q_k^S - Q_k^D - \sum_{(ij) \in \Omega_t} x_{ij} Q_{ij} \quad \forall k \in \Omega_b \quad (3)$$

$$\underline{V} \leq V_k \leq \bar{V} \quad \forall k \in \Omega_b \quad (4)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro} \quad \forall ij \in \Omega_t \quad (5)$$

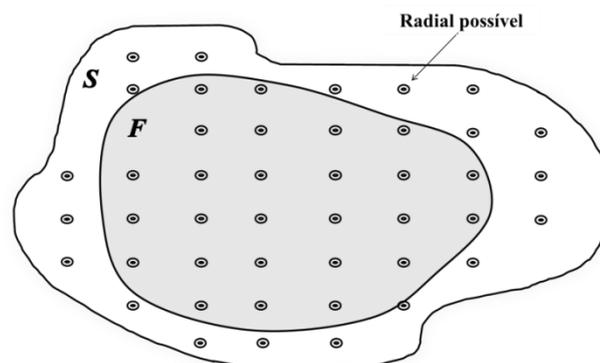
$$x_{ij} \text{ inteiro} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_t \quad (6)$$

$$n_{ij} = \sum_{(ij) \in \Omega_t} x_{ij} = n_k - 1 \quad \forall ij \in \Omega_t \quad (7)$$

A função objetivo  $v$  representa as perdas ativas totais,  $n_{ij}$  é o número de circuitos ou ramos que o sistema possui em sua configuração malhada,  $x_{ij}$  representa o estado do circuito  $ij$  em questão, se ele está chaveado ( $x_{ij} = 1$ ) ou não está ( $x_{ij} = 0$ ), e  $p_{ij}$  é a perda elétrica ativa do circuito  $ij$ . Em relação às restrições,  $P_k^S$  e  $Q_k^S$  representam a potência ativa e reativa fornecida pela subestação à barra  $k$ ,  $P_k^D$  e  $Q_k^D$  são a potência ativa e reativa de demanda da barra  $k$  (demanda máxima),  $\underline{V}$  e  $\bar{V}$  representam os limites de tensão inferior e superior aceitáveis para a barra  $k$ ,  $n_k$  é o número de barras do sistema,  $\Omega_b$  é conjunto de barras do sistema e  $\Omega_t$  é o conjunto de circuitos da configuração malhada.

Dessa forma, cada radial representa uma solução dentro de um espaço finito  $S$  de possibilidades, sendo que, dadas as restrições do problema, existe um subconjunto  $F$  de soluções factíveis, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Região de solução do problema.



Fonte: elaborado pelos autores



Para realizar essa otimização a partir da RSDEE foram implementadas diferentes técnicas heurísticas complementares em linguagem C: o algoritmo da árvore geradora mínima de Prim para gerar o sistema radial a partir do malhado; uma Meta-heurística Multipartida para gerar radiais distintas e factíveis; a Heurística Busca Dispersa para formar um Conjunto de Soluções de Qualidade (CSQ) que represente a diversidade das topologias encontradas pela técnica Multipartida; e a Meta-heurística Algoritmo Genético para realizar combinações entre as radiais do CSQ.

### **Multipartida com o algoritmo de Prim**

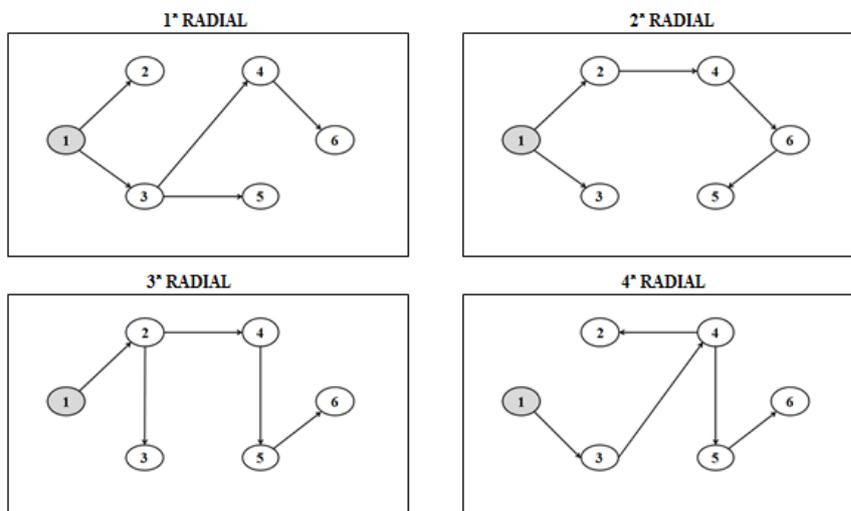
Com um sistema malhado de entrada, são atribuídos pesos aos ramos com base em um fluxo de carga malhado realizado em um pré-processamento dos dados. Dessa forma, esses valores servem de referência para o algoritmo de Prim construir a AGM que corresponde ao sistema radial, como mostrado na Figura 2. Esta é uma metodologia gulosa ou míope, em que a solução é construída elemento a elemento, no caso, barra a barra pela escolha dos circuitos do sistema malhado de maiores peso conectados às barras disponíveis na interação em que o algoritmo se encontra, partindo-se sempre da subestação.

Com a radial formada, é feito o cálculo do fluxo de carga radial de varredura proposto por Shirmohammadi *et al.* (1988). Aonde, a partir de um processo iterativo com critério de convergência numérico, são determinadas as tensões e correntes nas barras, correntes e perdas nos circuitos e a perda total do sistema. Em seguida, é realizado um teste de factibilidade deste fluxo verificando se a tensão das barras está dentro de uma faixa de 93% a 103% em relação à tensão da subestação, caso esteja o sistema é armazenado, se não é deletado da memória do programa.

Com isso, a técnica Multipartida inicia desta solução inicial do primeiro Prim e varia os pesos do sistema malhado de forma aleatória, repetindo o processo construtivo da radial, mas agora havendo a possibilidade do algoritmo de Prim tomar escolhas diferentes e gerar novas topologias que terão seus perfis de perdas calculados pelo fluxo de carga. O processo se repete até um número  $N$  de tentativas. A Figura 4 ilustra o princípio da técnica MP na geração de radiais mostrando, além da primeira, outras três radiais possíveis para o sistema de 6 barras.



Figura 4 – Meta-heurística Multipartida na geração de radiais.



Fonte: elaborado pelos autores.

## Busca Dispersa

A Busca Dispersa visa formar um Conjunto de Soluções de Qualidade que represente os melhores resultados da técnica MP e a diversidade das radiais formadas por ela. Dessa forma, o CSQ é composto de  $N_{csq}$  sistemas radiais distintos, em que  $N_{csq}/2$  é formado pelas topologias de menor perda e  $N_{csq}/2$  pelas topologias escolhidas pela lógica de maior-menor distância. Ou seja, para compor a segunda metade do CSQ são selecionadas as radiais mais diferentes daquelas já armazenadas no conjunto, com maior número de ramos distintos entre as topologias (maior distância), e, dentre essas, é escolhida aquela com menor diferença (menor distância). Assim, na primeira inserção no CSQ a comparação é feita apenas com as  $N_{csq}/2$  radiais de menor perda e na medida em que vão sendo acrescentadas novas, a comparação maior-menor distância também é feita.

## Combinação com Algoritmo Genético

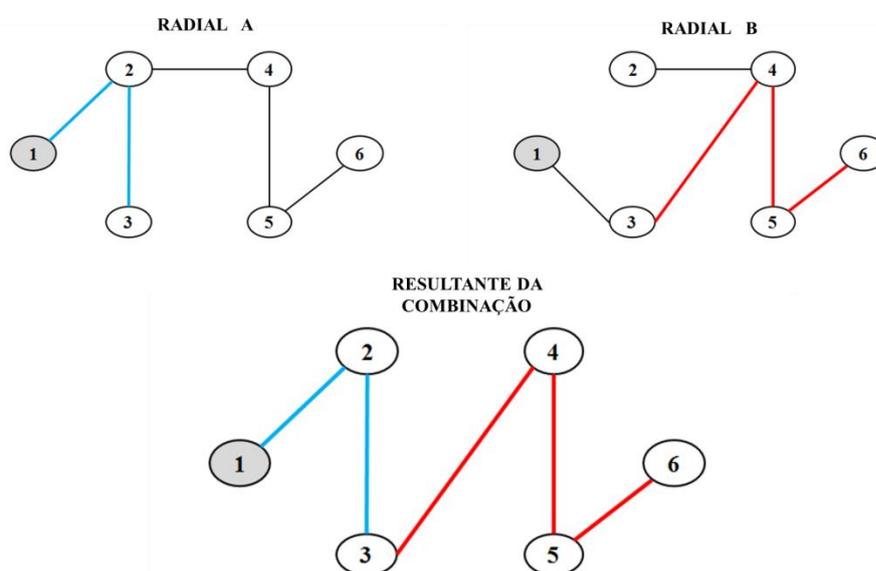
A última heurística empregada é a combinação das radiais do CSQ com Algoritmo Genético, realizando  $N_{csq}(N_{csq} - 1)$  tentativas de combinações factíveis e diferentes de todas as outras topologias encontradas pelas técnicas anteriores. O AG funciona da seguinte forma: tendo uma Radial A e outra Radial B, é escolhido um valor aleatório (menor que  $nb - 1$  e maior que 1) de circuitos da Radial A para compor a nova radial que será formada, os demais circuitos para completar a topologia são preenchidos pela Radial B. Na sequência, parte-se da



Radial B e a nova solução é preenchida com os ramos da Radial A. Dessa forma, cada duas radiais podem resultar em um par de topologias distintas.

Nesse sentido, as combinações são feitas entre os sistemas armazenados pelo CSQ, em que cada nova radial formada, sendo diferente de todas as outras, passa pelo cálculo do fluxo de carga para determinar seu perfil de perdas. A Figura 5 apresentado um exemplo de uma combinação genética com o sistema hipotético de 6 barras, em que foram escolhidos 2 ramos da Radial A (azuis) e três ramos da Radial B (vermelhos), resultando em uma nova radial.

Figura 5 – Combinação com Algoritmo Genético.



Fonte: elaborado pelos autores.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados testes com os sistemas adaptados de 23, 33, 49, 51, 136 e 415 barras, sendo os dois últimos redes de distribuição reais. Em especial, o sistema de 136 barras representa parte da cidade de Três Lagoas, no Mato Grosso do Sul.

Foram realizadas 1000 iterações na tentativa de gerar radiais diferentes e factíveis para todos os sistemas teste na Meta-heurística Multipartida (MP). Com as soluções encontradas, a Busca Dispersa (BD) formou um Conjunto de Soluções de Qualidade (CSQ) com 20 desses resultados. Assim, foram feitas 380 tentativas de combinações com as radiais do CSQ pelo Algoritmo Genético (AG) buscando encontrar soluções diferentes de todas as demais, factíveis e de menor perfil de perdas, varrendo o espaço de busca do problema. A Tabela 1 apresenta um diagnóstico geral do desempenho das técnicas heurísticas empregadas.



Tabela 1 – Diagnóstico geral das soluções.

Sistema	Algoritmo	Iterações	Radiais iguais	Não factíveis	Factíveis	Tempo de execução (s)	Tempo total (s)
23 barras	MP	1000	161	0	839	0,32	
	BD	—	—	—	—	0,13	0,65
	AG	380	361	0	19	0,20	
33 barras	MP	1000	337	0	663	0,15	
	BD	—	—	—	—	0,018	0,21
	AG	380	368	0	12	0,05	
49 barras	MP	1000	0	0	1000	1,10	
	BD	—	—	—	—	0,74	2,56
	AG	380	170	0	210	0,72	
51 barras	MP	1000	267	0	733	0,35	
	BD	—	—	—	—	0,08	0,58
	AG	380	366	0	14	0,15	
136 barras	MP	1000	0	474	526	1,36	
	BD	—	—	—	—	0,09	1,99
	AG	380	93	5	282	0,54	
415 barras	MP	1000	0	0	1000	11,30	
	BD	—	—	—	—	3,71	.19,77
	AG	380	72	0	308	4,76	

Fonte: elaborado pelos autores.

Conforme se aumenta a complexidade do sistema de análise, maior esforço computacional é empregado na geração das soluções. Há um grande número de radiais iguais geradas nos sistemas de 23 a 51 barras, fato que não acontece nos sistemas de 136 e 415 barras. Como o espaço de busca destes últimos é muito grande, a recorrência de topologias só aconteceu nas combinações com AG. Sendo que o número de árvores geradoras para os sistemas de 136 e 415 barras é de  $2,2686 \times 10^{18}$  e  $9,3045 \times 10^{51}$  possibilidades distintas (POSSAGNOLO, 2015).

Em relação às perdas ativas, a Tabela 2 apresenta o resultado do primeiro Prim e os melhores resultados da MP e do AG. Bem como o custo de construção do sistema, custo das perdas e custo total da melhor solução encontrada pelas técnicas empregadas. Cada sistema teste possui um tipo de impedância de linha ( $\Omega/\text{km}$ ) e custo de construção (US\$/km). Para as perdas, considerou-se um custo de US\$ 1291,72/kW.



Tabela 2 – Resultados de perdas ativas e custos obtidos.

Sistema	Perdas ativas (kW)			Custos da melhor solução (US\$)		
	Primeiro Prim	Melhor MP	Melhor AG	Custo de Construção	Custo das Perdas	Custo total
23 barras	12,1864	<b>12,1727</b>	12,2922	195656,39	15723,72	211380,11
33 barras	19,5990	<b>19,3248</b>	19,4042	450290,00	24962,23	4575252,23
49 barras	2,8827	2,8827	<b>2,6848</b>	123494,43	3468,01	126962,44
51 barras	0,9614	<b>0,8994</b>	0,9035	62804,00	1161,77	63965,77
136 barras	*	188,3502	<b>115,6773</b>	2652960,00	149422,68	2802382,68
415 barras	173,2498	168,9532	<b>168,0433</b>	375728,00	217064,89	592792,89

\* Não factível.

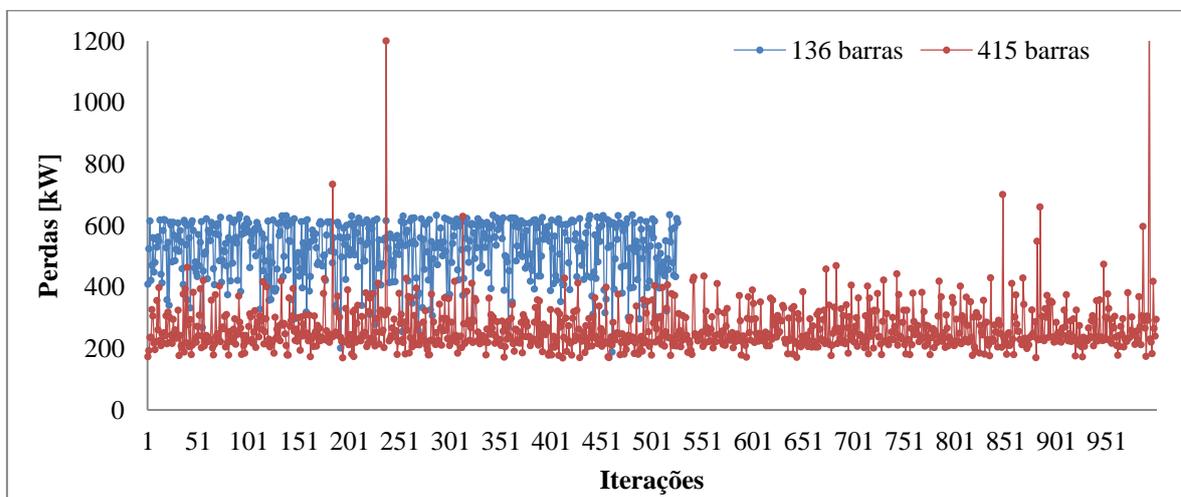
Fonte: elaborado pelos autores.

Nos sistemas de 23, 33 e 51 barras a MP resultou nas melhores soluções, visto que o espaço de busca é menor. Nos sistemas de 49, 136 e 415 barras, que representam redes de distribuição reais, sendo o de 49 barras parte do sistema de 136, o AG se saiu melhor.

As menores quedas de tensões registradas nos melhores sistemas de 23, 33, 49, 51, 136 e 415 barras foram 99,73%, 99,28%, 99,96%, 99,72%, 98,13% e 99,19% da tensão da subestação respectivamente.

Na Figura 6 é apresentada a evolução da Meta-heurística Multipartida no encontro das perdas elétricas ativas no sistema de 136 barras, com suas 526 radiais factíveis, e 415 barras, com 1000 radiais factíveis.

Figura 6 – Evolução da Meta-heurística Multipartida nos sistemas de 136 e 415 barras.

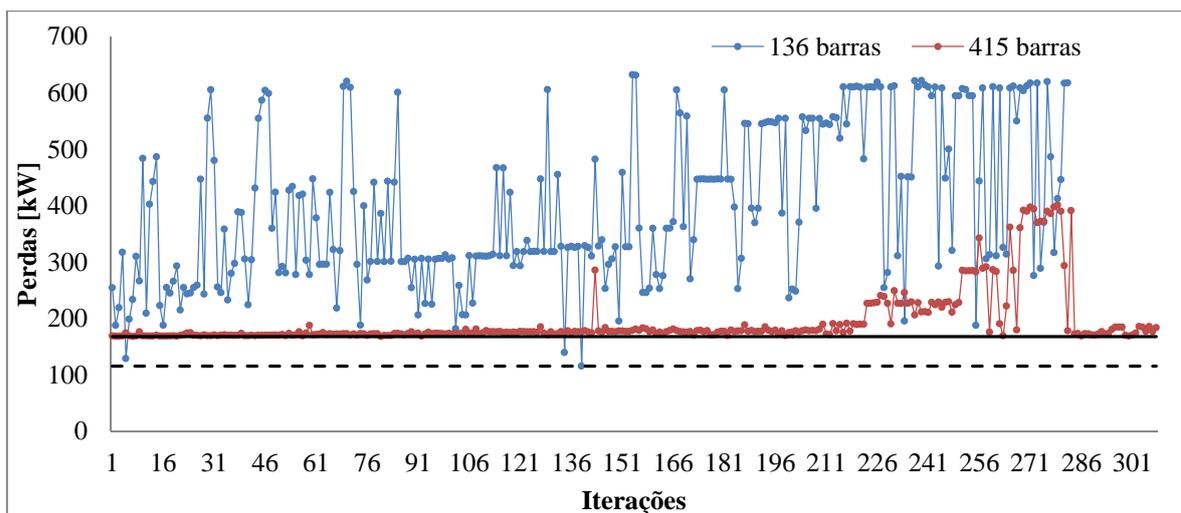


Fonte: elaborado pelos autores.



Da mesma forma, é apresentada a evolução do Algoritmo Genético na Figura 7, com 282 e 308 radiais factíveis para as redes de 136 e 415 barras. Ressaltando-se que, para estes sistemas, a melhor solução se deu no AG na iteração 139 para o sistema de 136 e na iteração 2 para o sistema de 415 barras.

Figura 7 – Evolução do Algoritmo Genético nos sistemas de 136 e 415 barras.



Fonte: elaborado pelos autores.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos sistemas mais complexos de 136 e 415 barras o Algoritmo Genético se demonstrou mais eficaz, encontrando topologias com perdas menores do que as obtidas pela técnica Multipartida. Por representarem redes de distribuição reais, destaca-se a aplicabilidade das soluções encontradas, em que, com um planejamento de operação inteligente, se obtém significativas reduções nas perdas elétricas.

A estratégia heurística híbrida utilizada apresentou-se como uma metodologia robusta na reconfiguração de sistemas de distribuição objetivando a otimização de perdas ativas. A programação dinâmica em linguagem C garantiu o bom desempenho dos algoritmos, aonde, em tempos relativamente curtos, foi possível encontrar soluções de boa qualidade para os sistemas analisados.

Para trabalhos futuros pretende-se realizar estudos sobre a alocação de banco de capacitores, expansão do sistema de distribuição e implementação de outras técnicas heurísticas.

## REFERÊNCIAS



ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Perdas de Energia Elétrica na Distribuição**: edição 01/2020. Brasília-DF: ANEEL, 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia+2019.pdf/6cb0bf36-4074-bbc3-d15d-ed370f44b34b>>. Acesso em: 16 nov. 2020.

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

BERNAL-AGUSTIN, J. L. **Application of genetic algorithms to the optimal design of power distribution systems**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - University of Zaragoza. Zaragoza: 1998.

BORNIOTI, F. B. **Algoritmo dinâmico PRIM aplicado ao planejamento da expansão de redes de distribuição aéreas de média tensão**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Foz do Iguaçu: 2018.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**: ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf)>. Acesso em: 16 nov. 2020.

LAVORATO, M.; RIDER, M. J.; GARCIA, A. V.; ROMERO, R. A. Constructive Heuristic Algorithm for Distribution System Planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 25, n. 3, p. 1734-1742, ago. 2010.

MANTOVANI, J.R.S.; CASARI, F.; ROMERO, R.A. (2000). Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **Revista Brasileira de Controle & Automação**, Campinas, v.11, n. 3, p. 150–159, set./nov. 2000.

MIRANDA, V.; RANITO, J. V.; PROENÇA, L. M. Genetic algorithm in optimal multistage distribution network planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 1927-1933, nov. 1994.

NAHMAN, J.; PERIC, D. Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 23, n. 2, p. 790-795, maio 2008.

POSSAGNOLO, L.H.F.M. **Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista - UNESP. Ilha Solteira: 2015.

PRIM, R. C. Shortest connection networks and some generalizations. **The Bell System Technical Journal**, v. 36, n. 6, p. 1389-1401, nov. 1957.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 3, n. 2, p. 753-762, maio 1988.