

Estudo de um Algoritmo de Busca Tabu para Redução das Perdas de Potência e Energia em Sistemas de Distribuição

Matheus Dantas de Lucena* Felipe Barros Dantas*

* Pós-Graduando, Laboratório de Sistemas de Potência - LSP,
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, PB
(e-mail: matheus.lucena@ee.ufcg.edu.br, felipe.dantas@ee.ufcg.edu.br)

Abstract: A Tabu Search algorithm was applied to determine the optimal locations for installation of photovoltaic generators in distribution systems. The applicability of the algorithm was evaluated in two test systems (13 and 36 bus) and the installation of the generators resulted in a significant reduction in power and annual energy losses, which were calculated using the sum of powers method. A preliminary study of the results for the power losses allowed to replicate the characteristics observed for the energy losses, reducing the computational effort. A thorough analysis of the results showed that the algorithm was able to estimate the optimal locations for the installation of photovoltaic generators and the parameters found for power losses could be reproduced for annual energy losses.

Resumo: Um algoritmo de Busca Tabu foi aplicado para determinar os locais ótimos de instalação de geradores fotovoltaicos em sistemas de distribuição. A aplicabilidade do algoritmo foi avaliada em dois sistemas-teste (13 e 36 barras) e a instalação dos geradores resultou em uma significativa redução das perdas de potência e anuais de energia, que foram calculadas pelo método da soma de potências. Um estudo preliminar dos resultados para as perdas de potência permitiu replicar as características observadas para as perdas de energia, reduzindo o esforço computacional. Uma análise minuciosa dos resultados mostrou que o algoritmo proposto conseguiu estimar os ótimos locais para instalação dos geradores fotovoltaicos e os parâmetros encontrados para as perdas de potência puderam ser reproduzidos para as perdas anuais de energia.

Keywords: distribution systems; energy losses; photovoltaic generators; power losses; power sum method; taboo search.

Palavras-chaves: busca tabu; sistemas de distribuição; geradores fotovoltaicos; método da soma de potências; perdas de energia; perdas de potência.

1. INTRODUÇÃO

A Geração Distribuída (GD), definida como sendo a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) (BRASIL, 2004), é decorrente do aumento da demanda por energia elétrica associado aos avanços tecnológicos, provocando mudanças expressivas no setor elétrico. Destacam-se, dentre suas vantagens, a possibilidade de postergar investimentos em infraestrutura, suprir o crescimento da carga, reduzir as perdas técnicas e melhorar o perfil de tensão do sistema e aumentar o índice de confiabilidade e operação econômica (KUFFEL, 1984).

Neste contexto, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) vem estimulando a implantação da GD no Brasil e como consequência, a matriz energética brasileira vem se modificando. Dentre as diversas modalidades de GD, tais como, cogeneradores, geradores de emergência, pequenas centrais hidrelétricas e aerogeradores, destaca-se aqui a GD fotovoltaica. De fato, os geradores fotovoltaicos (GFV)

são geradores de potência ativa que, quando instalados, podem reduzir as perdas de potência do sistema.

Nesse contexto, surgiu a motivação deste trabalho: pesquisar o melhor posicionamento dos GFV no sistema de potência, visando a redução das perdas de potência e energia elétrica. Dentre as várias formas de resolver esse tipo de problema, uma das mais promissoras atualmente, são as metaheurísticas, que são métodos de solução que coordenam procedimentos de busca locais. Destaca-se aqui o método da Busca Tabu (BT), o qual se diferencia de outros métodos pelo fato de reduzir a frequência com que as soluções ficam retidas em um espaço de sub-ótimos (GOMES, 2009).

Portanto, este artigo objetiva determinar a localização ótima de GFV em sistemas radiais de distribuição de energia elétrica utilizando um algoritmo baseado na BT. O artigo foi dividido em 6 seções: na seção 1 tem-se a introdução, na seção 2 tem-se a fundamentação teórica, na seção 3 a metodologia, na seção 4 o algoritmo proposto, na seção 5 a análise dos resultados, e, por fim, na seção 6 são apresentadas as conclusões.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresentam-se a seguir os principais fundamentos teóricos requeridos para compreensão do algoritmo proposto.

2.1 Energia Solar Fotovoltaica

Os estudos relacionados com a energia FV requerem a construção de um modelo da célula FV na forma de circuitos elétricos equivalentes. Dentre os diversos modelos disponíveis na literatura especializada, selecionou-se o modelo utilizado por de Melo (2018), o qual é apresentado na Figura 1.

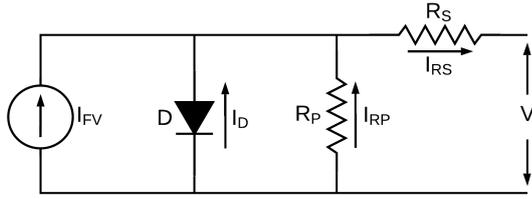


Figura 1. Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

A corrente de saída, I , é expressa do seguinte modo:

$$I = I_{FV} - I_D \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{N_s A k T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_P}, \quad (1)$$

sendo: I_{FV} a corrente fotogerada; I_D a corrente que passa pelo diodo; R_P a resistência em paralelo com o diodo, R_S a resistência em série; V a tensão de saída; N_s o número de células em série que constituem o módulo; A o fator de idealidade do diodo; T a temperatura do módulo; k a constante de Boltzmann e q é a carga elementar do elétron.

Neste trabalho, empregou-se o modelo simplificado do GFV proposto por Yao et al. (2014), segundo o qual, a potência de saída do painel, P_{fv} , é expressa por:

$$P_{fv} = P_{nom} (1 + k_p (T_{fv} - T_{amb})) \frac{S_m}{S_{nom}}, \quad (2)$$

sendo: P_{fv} a potência gerada (W), P_{nom} a potência nominal do painel (W); k_p o coeficiente de temperatura ($0,004^\circ\text{C}^{-1}$); T_{fv} a temperatura medida do painel e T_{amb} a temperatura ambiente (ambas em $^\circ\text{C}$); S_m a irradiação medida (W/m^2); S_{nom} a irradiação nominal (W/m^2).

2.2 Método da Soma de Potências

O Método da Soma das Potências (MSP) é um método de varredura do tipo *Backward-Forward*, foi proposto por Cespedes (1990) e baseia-se na eliminação do ângulo de fase das equações do fluxo de potência para simplificar a resolução do problema. O MSP foi formulado com base no modelo de trecho do alimentador apresentado na Figura 2 (SOUZA, 1997), o qual considera:

- Sistema representado por seu equivalente monofásico;
- Linhas de distribuição representadas por suas resistência e reatância série;
- Todas as cargas são do tipo potência constante;
- Alimentador primário dividido em vários ramos.

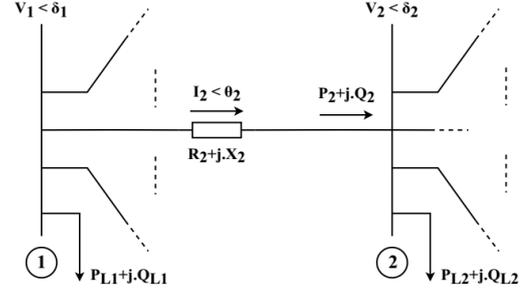


Figura 2. Modelo do alimentador.

Para o seu uso, são requeridas: a configuração do alimentador, sua topologia, a amplitude da tensão na barra da subestação e uma estimativa inicial das perdas de potência em cada trecho.

O algoritmo de solução é resumido a seguir.

- (1) Considerar as perdas inicialmente nulas;
- (2) Calcular os fluxos em cada trecho utilizando as equações (3) e (4) e seguindo a direção das barras terminais para a subestação.

$$P_i = P_{Lj} + \sum_{k \in \Omega_j} (P_k + \Delta P_k) - P_{fv_i}, \quad (3)$$

$$Q_i = Q_{Lj} + \sum_{k \in \Omega_j} (Q_k + \Delta Q_k), \quad (4)$$

- (3) Calcular a tensão em cada trecho empregando as equações (5) a (7), seguindo o de potência:

$$V_i^4 - 2AV_i^2 + B = 0. \quad (5)$$

$$A = \frac{1}{2}v^2 - RP - XQ, \quad (6)$$

$$B = (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2), \quad (7)$$

- (4) Calcular as perdas ativa e reativa em cada trecho empregando as equações (8) e (9):

$$\Delta P = R \frac{P^2 + Q^2}{V^2}, \quad (8)$$

$$\Delta Q = X \frac{P^2 + Q^2}{V^2} = \frac{X}{R} \Delta P. \quad (9)$$

- (5) Repetir os passos 2 a 4 enquanto houver o resultado não convergir.

sendo: $P_i(Q_i)$ o fluxo de potência ativa (reativa) no fim do trecho i ; $P_{Lj}(Q_{Lj})$ a carga ativa (reativa) instalada na barra j ; ΔP_k (ΔQ_k) as perdas de potência ativa (reativa) no trecho k .

2.3 Busca Tabu - BT

O método da Busca Tabu (BT) foi proposto formalmente por Glover (1986) e é baseado em uma busca local para resolver problemas complexos de otimização combinatória. De maneira genérica, a BT começa com uma solução inicial viável x e seleciona uma solução de melhor qualidade na vizinhança $N(x)$ obtida por movimentos aplicados à x em sua vizinhança. Um movimento pode ser caracterizado como a operação aplicada a uma solução x na vizinhança da solução atual, gerando um vizinho x' . É importante destacar que esta solução vizinha não melhora, necessariamente, o valor da função objetivo (LUCENA, 2020).

A - Vizinhaça $N(x)$

A vizinhaça é o conjunto de todos os movimentos possíveis ou soluções de teste, x' , na vizinhaça $N(x)$ de x . A solução atual só é atualizada se o valor da nova solução for melhor do que o da solução anterior. Esse procedimento pode implicar em um processo considerado "viciado", para o qual introduz-se uma Lista Tabu (LT), a fim de identificar movimentos que devem levar a "vícios".

B - Lista Tabu

A operação de proibição ocorre por meio do armazenamento dos atributos dos movimentos já realizados em uma LT, a qual é consultada cada vez que se realiza um novo movimento. Segundo Leite (2006), caso os atributos deste movimento estejam presentes na LT, este movimento é proibido de ser executado. O risco a ser evitado é o de seguir um caminho improdutivo, reduzindo a probabilidade de se encontrar o ótimo global (GOMES, 2009).

C - Critério de Aspiração e de Parada

O Critério de Aspiração é uma regra que substitui os movimentos proibidos pela LT, podendo torná-los permitidos. Considerou-se permitir uma movimentação, se ela produzir uma solução que tenha uma função objetivo melhor do que a obtida anteriormente com a mesma movimentação. Já o Critério de Parada é a condição sob a qual o processo de pesquisa será encerrado.

3. ALGORITMO PROPOSTO

Neste trabalho, o problema foi formulado com o objetivo de estimar a localização ótima dos GFV para que as perdas de potência e de energia na rede sejam mínimas, considerando que um GFV não pode ser instalado na subestação; e o número máximo de iterações do algoritmo, o erro permitido, a quantidade e a capacidade dos GFV são informações fornecidas.

Um dos objetivos deste artigo foi estudar minuciosamente o método, seus parâmetros característicos e o seu desempenho quando a dimensão do sistema cresce, visando minimizar o empirismo na escolha dos seus principais parâmetros.

A primeira função objetivo foi elaborada conforme a equação (10) e visa minimização das perdas de potência ativa no alimentador, ΔP :

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i. \quad (10)$$

sendo: n o número de trechos e ΔP_i as perdas de potência ativa do trecho i , que termina na barra i .

A redução das perdas de potência quantifica os efeitos da instalação de GFV, pelo benefício intrínseco e pelos vários outros correlacionados, tais como: melhoramento do perfil de tensão, aumento da confiabilidade e operação econômica (ALENCAR et al., 2018).

A segunda função objetivo visa a minimização das perdas de energia na rede de distribuição, ΔE , cujo desenvolvimento é decorrente do cálculo da primeira função objetivo. No entanto, os geradores só funcionam uma fração α da duração da carga em qualquer dos níveis, ou seja, a fração $1 - \alpha$ não é uma função das variáveis de controle e pode

ser desconsiderada para efeito da otimização, de modo que a expressão que a define fica melhor escrita conforme a equação (11) (ALENCAR, 2018):

$$\Delta E(h_1, \dots, h_g) = \alpha \sum_{i=1}^m T_j \sum_{k=1}^n \Delta \hat{P}_{jk}(h_1, \dots, h_g). \quad (11)$$

sendo: \hat{P}_{jk} e \check{P}_{jk} as perdas ativas no trecho k ao nível de carga j com e sem geração fotovoltaica respectivamente e α a fração do dia em que há a radiação solar.

Para resolver esse problema, propôs-se o algoritmo resumido na Figura 3 e detalhado a seguir.

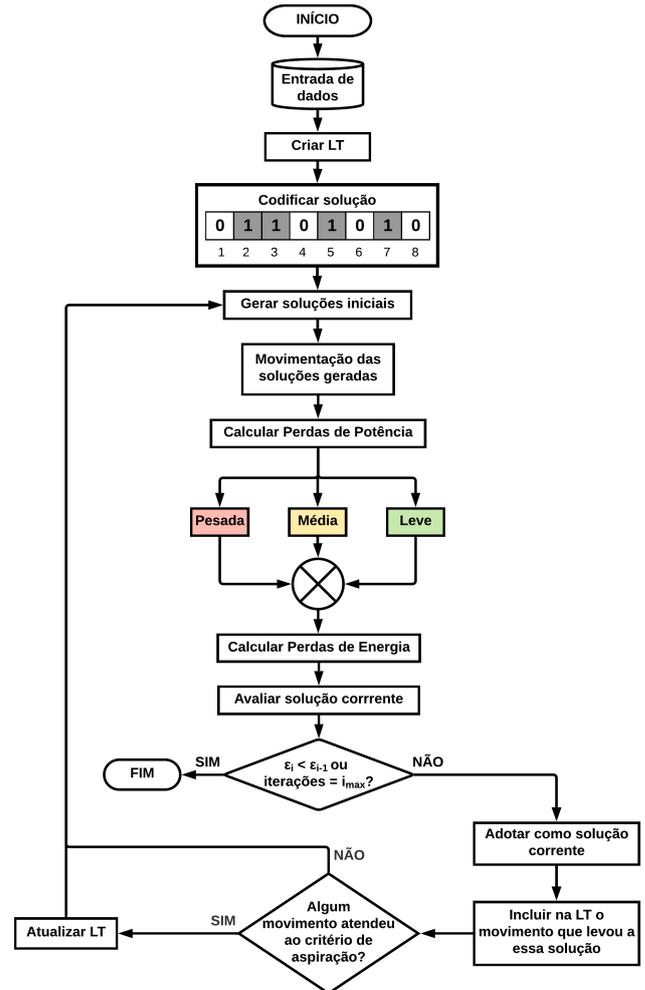


Figura 3. Fluxograma do Algoritmo Proposto.

- (1) Leitura dos dados dos sistemas;
- (2) Cálculo das perdas iniciais;
- (3) Criação de um conjunto de indivíduos, os quais são resultantes da seleção de posições aleatórias dentro dos vetores binários. Um conjunto de soluções para o problema é apresentado na Figura 4.
- (4) Cálculo das perdas de cada indivíduo, tomando a melhor delas para comparação com a solução atual;
- (5) Criação da vizinhaça, deslocando os bits de cada vetor em unidades pré-determinadas;
- (6) Cálculo das perdas dos indivíduos da vizinhaça;
- (7) Preenchimento da LT, até o momento em que um critério de aspiração venha a ocorrer;

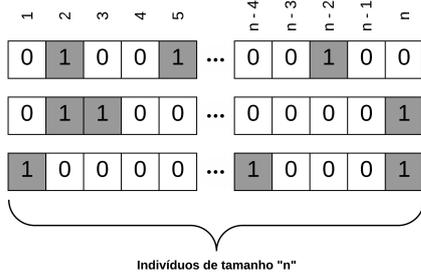


Figura 4. Codificação da solução.

- (8) Geração aleatória de novos indivíduos enquanto o processo não violar os critérios de parada;
- (9) Determinar $\Delta \hat{P}_j$;
- (10) Calcular o valor da *fitness* ξ , usando a equação (11).

Os dois primeiros passos do algoritmo constituem um estágio preliminar que é necessário apenas a primeira vez que se for calcular a *fitness*. Os passos restantes são executados nas demais vezes, de (3) a (9) no cálculo das perdas de potência e de (3) a (10) nas perdas de energia.

4. METODOLOGIA

O problema a ser resolvido consistiu em estimar a localização ótima de GFV em SDEE, de modo que as perdas de potência e de energia fossem mínimas.

A BT foi a metaheurística escolhida neste trabalho por ser apropriada para resolver problemas de otimização combinatória. Para o cálculo das perdas anuais de energia, utilizou-se o MSP. Para o desenvolvimento do algoritmo, adotou-se a metodologia descrita na Figura 5.

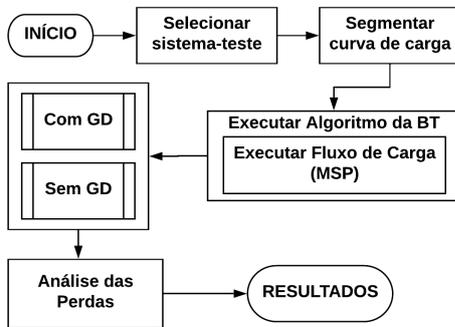


Figura 5. Metodologia utilizada.

O primeiro passo da metodologia consistiu em selecionar os sistemas-teste. O sistema-teste de 13 barras, Figura 6, possui tensão nominal de 4,16 kV e baseou-se no proposto por Kersting (1991, 2000).

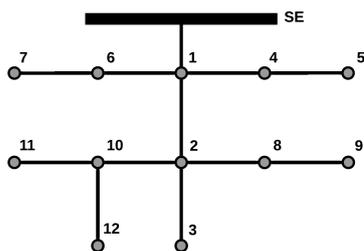


Figura 6. Sistema-teste 13 Barras.

O segundo sistema-teste é apresentado na Figura 7, o qual baseou-se no sistema-teste proposto por Souza et al. (2006) constituído por um alimentador de distribuição radial com 36 barras e tensão nominal de 4,8 kV.

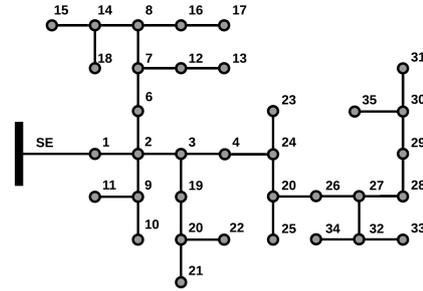


Figura 7. Sistema-teste 36 Barras.

Na Tabela 1 são apresentados os sistemas utilizados e as potências, total ativa e de cada GFV instalado.

Tabela 1. Potência dos GFV para cada sistema.

Sistema	Potência Ativa Total (kW)	Potência de cada GFV (kW)
13	727,67	40
36	3545,30	140

Adotou-se a recomendação usual utilizar uma penetração de 20%, a qual foi adotada como sendo o valor máximo de potência a ser instalada no sistema. Além disso, foi considerado que apenas cinco GFV estavam disponíveis para instalação em cada um dos sistemas analisados.

A BT foi programada considerando as suas propriedades. Programou-se um algoritmo do MSP, o qual foi executado, considerando um erro de 10^{-4} e um número máximo de 100 iterações. Os dados dos sistemas-teste utilizados foram retirados conforme os dados encontrados nas respectivas referências no fim deste documento.

5. RESULTADOS

Os GFV podem ser instalados em quaisquer barras do alimentador, exceto na barra da subestação porque não teria efeito na redução de perdas. Para todos os casos, foi tomado o critério de aspiração leve, o qual proíbe, a cada iteração, 25% dos movimentos possíveis.

I - Perdas de Potência

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de perdas de potência para os sistemas-teste.

Tabela 2. Perdas de Potência.

Sistema	População Inicial	Iterações	Converge	% da quantidade de soluções	Mínimo (kW)
13	2	20	72%	57,95%	3,55
36	10	300	77%	10,50%	65,33

Analisando a Tabela 2 pode-se perceber que o tamanho da população inicial cresce de maneira menos acentuada, quando comparada com a quantidade de iterações do método.

No sistema de 13 barras, a solução ótima foi instalar os GFV nas barras com maior resistência e, consequentemente, maiores perdas ôhmicas (barras 6, 9, 10, 11 e 12). Já no sistema de 36 barras, os geradores foram instalados em barras contíguas no final do caminho mais longo, com maior densidade de carga (barras 27, 29, 30, 32 e 35).

A partir dos resultados obtidos da análise das perdas de potência ativa, foi feito um estudo de viabilidade do uso das características observadas no método que resultaram no melhores resultados para cada um dos sistemas utilizados para o problema de perdas de energia.

II - Perdas de Energia

O levantamento da curva de carga foi realizado mediante dados de uma subestação da distribuidora de energia local. A identificação de cada nível de carga, as respectivas durações e demandas média e máxima são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Níveis de Carga do Alimentador.

Carga	Duração (dias)	Demanda (kW)		Demanda (kvar)	
		Média	Máxima	Média	Máxima
Pico	131,79	2.934,14	5.888,40	1.140,20	2.728,32
Média	130,58	2.535,63	2.688,00	953,62	1.036,56
Leve	102,62	2.105,03	2.378,88	697,84	863,52

As perdas de energia do alimentador de 13 barras, sem GFV, são iguais a 431,64 MWh/ano. Foram utilizados como parâmetros os valores de população inicial e iterações iguais a 2 e 20, respectivamente, para os quais houve convergência em 70% dos casos. As soluções apresentadas na Tabela 4 correspondem a indivíduos típicos a que se chegou no final de cada execução. O algoritmo foi executado 100 vezes, para o qual os resultados estão resumidos na Tabela 4.

A solução ótima global do problema, encontrada a partir do método da busca exaustiva, é instalar os GFV nas barras 6, 7, 9, 11 e 12. Com isso, as perdas de energia são reduzidas a 409,78 MWh/ano (redução de 5,06%).

Tabela 4. Resultados do Sistema 13 barras.

Frequência	Diferença para o Ótimo Global (MWh/ano)	Barras				
		6	7	9	11	12
70%	0	6	7	9	11	12
29%	$\Delta E < 0,50$	6	8	9	11	12
1%	$\Delta E > 0,50$	5	9	10	11	12

As perdas de energia do alimentador de 36 barras, sem GFV, são iguais a 563,99 MWh/ano. Foram utilizados como parâmetros os valores de população inicial e iterações iguais a 10 e 300, respectivamente, para os quais houve convergência em 67% dos casos. As soluções apresentadas na Tabela 5 correspondem a indivíduos típicos a que se chegou no final de cada execução.

A provável solução ótima global do problema encontrada foi instalar os GFV nas barras 27, 29, 30, 32 e 35. Com

isso, as perdas de energia são reduzidas a 379,92 MWh/ano (redução de 32,64%).

Tabela 5. Resultados do Sistema 36 barras.

Frequência	Diferença para o ótimo global (MWh/ano)	Barras				
		27	29	30	32	35
67%	0	27	29	30	32	35
30%	1,62	27	30	32	33	35
3%	2,17	29	30	32	33	35

Um resumo dos resultados obtidos para os sistemas-teste de 13 e 36 barras é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Resumo dos Resultados.

Sistema	Convergência (%)	Perdas Iniciais (MWh/ano)	Redução (%)	Perdas (MWh/ano)
13	70	431,64	5,06	409,78
36	67	563,99	32,64	379,92

Percebe-se que, em todos os sistemas-teste, houve redução das perdas anuais de energia, com destaque para o sistema-teste 36 barras, no qual as perdas foram reduzidas em mais de 30%.

6. CONCLUSÕES

Um algoritmo de localização ótima de geradores fotovoltaicos foi proposto, para o qual, o método da Busca Tabu foi escolhido para solucionar o problema de otimização, que consistia em minimizar as perdas de potência e de energia de sistemas de distribuição de energia elétrica. A metodologia elaborada foi aplicada aos dois sistemas-teste, nos quais cinco geradores fotovoltaicos foram posicionados no alimentador.

O algoritmo proposto mostrou-se eficaz na resolução do problema, de modo que foi possível calcular a porcentagem do espaço de busca total que seria necessária para encontrar a solução ótima do problema para cada sistema. A porcentagem encontrada para o cálculo das perdas de potência foi replicada no cálculo das perdas de energia. De forma a reduzir o espaço de busca da solução, conhecimentos específicos do problema foram incorporados ao algoritmo da Busca Tabu, melhorando o desempenho dos processos desenvolvidos no Critério de Aspiração e no processo de Criação de Vizinhança.

Buscando uma melhoria do algoritmo proposto, é possível realizar um estudo de novas estratégias para os critérios e propriedades da Busca Tabu a serem incorporados, avaliando formas mais eficientes para o aumento da população e de seleção de indivíduos. Assim, testes em outros sistemas, maiores e com configurações diferentes, seriam menos onerosas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro concedido pelo CNPq por meio da bolsa de estudos e à Universidade Federal de Campina Grande pela disponibilização da estrutura para a realização das pesquisas.

REFERÊNCIAS

- Alencar, M., Souza, J., Souza, B., and Neves, W. (2018). Optimal allocation of photovoltaic panels in distribution network applying genetic algorithm. In *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 1–6. IEEE.
- Brasil (2004). Decreto nº5.163, de 30 de junho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica. *Diário Oficial da União*.
- Cespedes, R. (1990). New method for the analysis of distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(1), 391–396.
- de Alencar, M.R.B. (2018). *Um Método de Estimação de Instalação Ótima de Painéis Fotovoltaicos em Redes de Distribuição*. Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- de Lucena, M.D. (2020). *Um algoritmo baseado na Busca Tabu para localização ótima de geradores fotovoltaicos*. Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- de Melo, L.S. (2018). *Análise Comparativa de Modelos de Fontes Fotovoltaicas no Contexto da Geração Distribuída*. Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- de Souza, B.A. (1997). *Distribuição de Energia Elétrica*. UFPB, Campina Grande.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5), 533–549.
- Gomes, A. (2009). Uma Introdução à Busca Tabu. URL <http://www.ime.usp.br/~gold/cursos/2009/mac5758/AndreBuscaTabu.pdf>.
- Kersting, W.H. (1991). Radial distribution test feeders. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(3), 975–985.
- Kersting, W.H. (2000). Radial distribution test feeders distribution system analysis subcommittee report. In *Proc. 2001 IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting*, 908–912.
- Kuffel, E. (1984). *W. S. Zaengl high voltage engineering*.
- Leite, MARCIO e Arroyo, J.E.C. (2006). Algoritmo busca tabu para a minimização do tempo de processamento e atrasos de entrega em sistemas de produção flowshop permutacional. *XXVI ENEGEP-Fortaleza, CE, Brasil*, 9.
- Souza, B., Braz, H., Albuquerque, J., and Gutterres, J. (2006). Fluxo de carga em sistemas de distribuição radiais com geração distribuída: Método da soma de potência modificado. *IEEE Latin America Transactions*, 4(3).
- Yao, T., Tang, Y., and Ayyanar, R. (2014). High resolution output power estimation of large-scale distributed pv systems. In *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 4620–4627. IEEE.