LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO BUSCA TABU

Matheus Augusto Paiva Luz[1]
André Luís Shiguemoto[2]
Gabriela Helena Bauab Shiguemoto[3]
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR
Av. Alberto Carazzai, 1640 – Centro - 86300-000 - Cornélio Procópio – PR.
[1]matheusluz@alunos.utfpr.edu.br, [2]shiguemoto@utfpr.edu.br e [3]gshiguemoto@utfpr.edu.br

RESUMO

Devido o aumento do consumo de energia elétrica pela população e o crescimento da economia do País, o planejamento da expansão de sistemas de distribuição torna-se cada dia mais importante para atendimento do fornecimento de energia para todos os consumidores. Para tratar desse problema, neste trabalho apresenta-se um modelo matemático com o objetivo de minimizar a soma dos custos de investimento para a construção de novos circuitos e dos custos anuais referentes às perdas de potência. Implementa-se uma metaheurística de Busca Tabu em que os critérios de operação da nova configuração da rede são verificados através do cálculo do fluxo de potência, utilizando a técnica *Backward and Forward Sweep*. Os resultados computacionais são comparados com outros métodos propostos na literatura e demonstraram a relevância da metaheurística proposta, uma vez que a solução encontrada apresenta redução em relação às soluções apresentadas em outros trabalhos e um desvio do 0,0198% em relação à solução ótima.

PALAVRAS CHAVE. Fluxo de carga, Metaheurística, Sistemas elétricos de potência.

EN&PG – PO na Área de Energia, Petróleo e Gás; MH – Metaheurísticas;

ABSTRACT

Due to the increase in electricity consumption by the population and the growth of the country's economy, planning for the expansion of distribution systems becomes increasingly important to meet the energy supply for all consumers. To address this problem, this work presents a mathematical model with the objective of minimizing the sum of investment costs for the construction of new circuits and the annual costs related to power losses. A Tabu Search metaheuristic is implemented in which the operating criteria of the new network configuration are verified by calculating the power flow, using the Backward and Forward Sweep technique. The computational results are compared with other methods proposed in the literature and demonstrate the relevance of the proposed metaheuristic, since the solution found presents a reduction in relation to the solutions presented in other works and a deviation of 0.0198% in relation to the optimal solution.

KEYWORDS. Power flow. Metaheuristc. Electrical power systems

EN&PG – PO in the Energy, Oil and Gas Area; MH – Metaheuristics;

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

1. Introdução

Uma rede de distribuição de energia elétrica é definida como o conjunto de equipamentos que tem a função, juntamente com a transmissão, de transportar a energia gerada por meio de usinas, até os centros consumidores, realizando um papel importante em um sistema elétrico de potência, pois faz o intermédio entre fornecedor de energia e seus clientes.

Para disponibilizar energia elétrica a todos os seus consumidores, o sistema elétrico de potência precisa se expandir de forma proporcional a sua demanda. Embora esta expansão seja vista com bons olhos pela sociedade, para a regulação é importante que a expansão cumpra com critérios e indicadores de qualidade estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (REN 956/2021).

Atualmente, é difícil imaginar que o desenvolvimento de um país não esteja intimamente ligado ao crescimento do seu setor elétrico. É natural o surgimento de novas empresas e instalação de novas indústrias em países em desenvolvimento, aumentando assim, sua demanda de energia. Comparando os dados de desenvolvimento do Produto Interno Bruto (PIB) apresentado pelo [International Monetary Fund 2024] com os dados de consumos de energia elétrica disponíveis no [Global Energy Statistical Yearbook 2024], nota-se que dos doze países que obtiveram os maiores PIB's em 2022, oito deles estão entre os doze países que mais consumiram energia no mesmo período, o que demonstra uma forte relação de desenvolvimento econômico e consumo de energia.

No Brasil não é diferente, o País está em constante desenvolvimento aquecendo cada vez mais o setor elétrico. De acordo com o Balanço Energético Nacional 2023, feito pela Empresa de Pesquisa Energética [EPE 2023], o Brasil teve um consumo médio de 586,1TWh em 2022, tendo projeção de consumo para 2032 de 814 TWh o que representa um aumento de 38% da carga [PDE 2032]. A capacidade instalada de geração de energia elétrica também acompanha esse crescimento, passando de 189.127 MW em 2022 para 228.896 MW em 2032, apresentando crescimento de 21%. Ainda segundo [EPE 2023], a participação das energias renováveis, que são energias que são naturalmente abastecidas, na matriz energética brasileira foi de 87,9% em 2022, numa crescente adequação nas emissões de carbono acordado aos compromissos assumidos pelo Brasil durante a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas em 2023.

Devido a este crescimento constante, e levando em consideração que a cada ano, a preocupação com relação à alocação ótima de recursos financeiros aumenta, diversos estudos são conduzidos para encontrar soluções para o planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica. Na literatura, há diversas propostas para solucionar este problema utilizando métodos clássicos, heurísticas e metaheurísticas. Dentre os autores que utilizam os métodos clássicos de otimização podemos citar os trabalhos de [Hincapie et al. 2019] e [Oliveira 2010]. Esta é uma técnica robusta e capaz de fornecer soluções ótimas, porém, dependendo da complexidade do planejamento e da magnitude do sistema em questão, o desempenho computacional fica prejudicado.

Dentre as técnicas heurísticas, pode-se citar a aplicada em [Lavorato et al. 2009], na qual foi elaborado um algoritmo heurístico construtivo (AHC) que, através de uma função quadrática, aproxima as perdas de potência ativa do sistema, e em [Oliveira 2010], um AHC com uma fase de melhoria local foi utilizado.

Outros autores utilizam metaheurísticas para lidar com este tema, tais como o algoritmo genético presente em [Hou et al. 2023], a colônia de formigas utilizada por [Gómez et al. 2004], o *Simulated Annealing* exibido em [Nahman e Peric 2008] e o GRASP proposto por [Hadano et al. 2017].

Neste trabalho, apresenta-se uma metaheurística de Busca Tabu, para minimizar os custos com o planejamento de sistemas de distribuição, utilizando o método *Backward and Forward Sweep*.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

2. Sistemas elétricos de potência

Um sistema elétrico de potência (SEP) compreende o conjunto de subsistemas e equipamentos que tem como objetivo fornecer energia elétrica para todos os seus consumidores, sendo constituídos basicamente por quatro seguimentos, a geração, transmissão, distribuição e comercialização.

A geração é a parte do SEP que é responsável por transformar uma fonte primária de energia em eletricidade, sendo composta pelas centrais geradoras, que são classificadas de acordo com a fonte que utilizam na produção de energia elétrica. Estas centrais são escolhidas de acordo com a geografia do local, visando um melhor funcionamento e maior rentabilidade [EPE 2023].

Atualmente, o Brasil, segundo a [ANEEL 2024], possui aproximadamente 24 mil empreendimentos em operação, sendo 53,88% da energia gerada de origem hídrica, 15,09% de origem eólica, 14,81% de origem fóssil e o restante de outras origens, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Matriz energética por origem de combustível.



Fonte: [ANEEL 2024].

As tensões geradas por meio das grandes usinas estão, normalmente, entre 6 a 25 kV e são ampliadas por transformadores elevadores. No Brasil os níveis de tensões para as transmissões variam entre 230kV a 765 kV [ANEEL 2022]. Essa elevação ocorre para viabilizar as transmissões de médias e longas distâncias, diminuindo a espessura dos condutores, as perdas por efeito joule e queda de tensão ao longo das linhas.

O vasto território brasileiro que conta com 8.515.767,049 km² [IBGE 2022] e abundância em recursos naturais justificam sua complexa rede de transmissão, com cerca de 171.640 km de extensão, considerada uma das maiores do mundo [ONS SINtegre 2024]. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pela operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). O Mapa do sistema de transmissão brasileiro é visto na Figura 2.

Figura 2 – Sistema de transmissão brasileiro.



Fonte: [ONS 2024].

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

A entrega da energia é feita até as redes de distribuição que alimentam os consumidores industriais de médio e pequeno porte, consumidores comerciais e de serviços e consumidores residenciais e agropecuária [EPE 2023]. O atendimento é realizado com diferentes níveis de tensão, de acordo com o consumidor e as categorias, classificadas no documento intitulado "Procedimentos de Distribuição" – PRODIST [ANEEL 2021].

O Brasil conta, em 2024, com mais de 88,5 milhões de unidades consumidoras, que corresponde ao conjunto de equipamentos e instalações elétricas que recebem energia elétrica em um só ponto de entrega, segundo a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica [ABRADEE 2024]. Ainda segundo a ABRADEE o setor de distribuição brasileiro é considerado um dos mais regulados e fiscalizados do setor elétrico, a distribuição é regida pela ANEEL, a própria agência define as normas de funcionamento, definições, restrições e penalidades, as regulamentações do setor de distribuição são encontradas no PRODIST e na Resolução Normativa ANEEL Nº 956/2021 [ANEEL, 2021].

Durante a elaboração de um plano de expansão de um determinado sistema de distribuição, são levados em consideração diversos fatores, que variam de acordo com os interesses de cada distribuidora. Segundo [ANEEL 2021], com relação às partes, alguns aspectos a serem considerados são: técnica, econômica e social.

A criação deste plano pode ser feito a partir de duas abordagens, uma estática e outra, dinâmica [Sousa 2013]. O planejamento dinâmico busca atender diferentes níveis de demandas para um determinado período de tempo. Caso seja um planejamento com um horizonte longo, este período varia normalmente de 5 a 20 anos. Por outro lado, caso vise um período de curto prazo, a janela de tempo varia de 1 a 4 anos. Já a visão estática, os períodos de tempo não são levados em consideração, pois apenas a demanda de um determinado momento é considerada.

Com relação à parte econômica do planejamento, pode-se, ainda, subdividir este tópico dependendo dos objetivos da empresa que o realiza e quais pontos esta leva em consideração durante a fase de elaboração da expansão de um circuito.

Ainda de acordo com [Sousa 2013], muitas distribuidoras dão ênfase em buscar o maior lucro possível, ou então à minimização dos custos de investimento e de manutenção do SEP em questão.

Outro fator que afeta diretamente a execução do planejamento diz respeito às variáveis que serão levadas em conta. As variáveis terão impacto direto na função objetivo estabelecida, modificando-se de acordo com o horizonte que o plano procurar atender e, normalmente, são dados financeiros, como o custo de instalação de novos equipamentos, a taxa de uso de equipamentos e as perdas no circuito.

3. Modelo matemático

Segundo [Figueiredo et al. 2011], este é um problema de otimização combinatória que possui restrições tanto físicas como orçamentárias. Não há um modelo matemático universal para este problema, porém, de forma geral, pode-se estabelecer como a minimização dos custos de planejamento e operação, sujeito às restrições de aumento de demanda, mantendo um determinado grau de qualidade e confiabilidade. Nesse trabalho, o problema está modelado pelas equações (1) à (12), o mesmo modelo matemático proposto por [Oliveira 2010], e seus parâmetros e variáveis são descritos a seguir.

A função objetivo é dada pela equação (1) e representa a minimização dos custos de investimento e operação do sistema baseado em [Bernal-Agustín 1998], na qual o primeiro termo se refere aos custos de investimento para a construção de circuitos e segundo termo representa os custos anuais referentes às perdas do circuito.

$$\min f = k_l \sum_{(i,j)\in\Omega_l} \sum_{a\in\Omega_a} (c_{ij,a} n_{ij,a} l_{ij}) + \delta_l \sum_{(i,j)\in\Omega_l} \sum_{a\in\Omega_a} g_{ij,a} \hat{n}_{ij,a} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j cos\theta_{ij})) \quad (1)$$

Assim, o custo de investimento é calculado pela multiplicação da taxa de recuperação de capital da construção ou recondutoramento de circuitos k_l pelo custo de construção da rota $i-j$,

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

em que $c_{ij,a}$ representa o custo de construção da rota $i-j$ utilizando o condutor a, $n_{ij,a}$ representa o circuito do tipo a que pode ser adicionado a rota $i-j$ e l_{ij} o comprimento da rota $i-j$. O segundo termo é a multiplicação do fator de perdas dos circuitos δ_l pelo somatório da perda de potência ativa no condutor, onde $g_{ij,a}$ é a condutância do circuito $i-j$ do tipo a, $\hat{n}_{ij,a}$ é o número total de circuitos no ramo $i-j$ do tipo a, V_i a magnitude da tensão presente no nó i e θ_{ij} a diferença angular entre as barras i e j.

As restrições (2) e (3) limitam os balanços de potência ativa e reativa no sistema, sendo os elementos P_{S_i} e P_{D_i}, a potência ativa proveniente pela subestação da barra i e potência ativa demandada pelo nó i, respectivamente, e os elementos P_i (potência ativa calculada no nó i) e Q_i (potência reativa calculada no nó i) destas equações são calculados pelas equações (4) e (5).

$$P_i - P_{S_i} + P_{D_i} = 0 \; \forall i \in \Omega_b \tag{2}$$

$$Q_i - Q_{S_i} + Q_{D_i} = 0 \; \forall i \in \Omega_b \tag{3}$$

Nas equações (4) e (5), as variáveis V_i, G_{ij} e B_{ij} representam a tensão sobre a barra i, o elemento da matriz de condutância nodal e o elemento da matriz de susceptância nodal, respectivamente.

$$P_i = V_i \sum_{j \in \Omega_b} V_j \left[G_{ij}(\hat{n}_{ij,a}) cos\theta_{ij} + B_{ij}(\hat{n}_{ij,a}) sen\theta_{ij} \right] \tag{4}$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in \Omega_b} V_j \left[G_{ij}(\hat{n}_{ij,a}) sen\theta_{ij} - B_{ij}(\hat{n}_{ij,a}) cos\theta_{ij} \right] \tag{5}$$

A equação (6) restringe a magnitude da tensão nos nós do SEP para que não haja a violação dos limites pré-estabelecidos, enquanto a equação (7) trata da capacidade máxima de transformação da energia da subestação i.

$$1 - \frac{\Delta V}{100} \leq \frac{V_i}{V_{nom}} \leq 1 + \frac{\Delta V}{100} \; \forall i \in \Omega_b \tag{6}$$

$$P_{S_i}^2 + Q_{S_i}^2 \leq \left(\bar{S}_i^0 + m_i \bar{S}_i \right)^2 \; \forall i \in \Omega_{b_s} \tag{7}$$

Nessas equações, ΔV representa o desvio de tensão, V_{nom}a tensão nominal, Q_{S_i} a potência reativa proveniente da subestação da barra i, $\bar{S}_i^0$ o limite máximo de potência aparente existente na subestação no nó i, m_i a subestação que pode ser construída na barra i e $\bar{S}_i$ a máxima potência aparente que pode ser construída/aumentada no nó i.

As equações (8) garantem que os limites do condutor a não sejam violados pelas potencias ativa e reativa que fluem pelo ramo $i-j$. Em conjunto, as equações (9) não permitem que ocorra duplicidade entre os circuitos existentes e o proposto. Nessas equações $P_{ij,a}$ e $Q_{ij,a}$, representam a potência ativa e reativa que sai do nó i para o j com o condutor a, respectivamente e $\bar{S}_{ij,a}$ a máxima potência aparente permitida na rota $i-j$ utilizando o condutor tipo a.

$$P_{ij,a}^2 + Q_{ij,a}^2 \leq \left(\hat{n}_{ij,a} \bar{S}_{ij,a} \right)^2 \; \forall (ij) \in \Omega_f, \forall a \in \Omega_a \tag{8}$$

$$\sum_{a \in \Omega_a} \hat{n}_{ij,a} \leq 1 \; \forall (ij) \in \Omega_l \tag{9}$$

A equação (10) determina a tomada de decisão da construção de uma nova rota para o sistema. A variável $n_{ij,a}$ assume valor 1 (um) se o circuito do tipo a for adicionado a rota $i-j$ e 0 (zero) caso contrário.

$$n_{ij,a} \in [0,1] \; \forall (ij) \in \Omega_l, \forall a \in \Omega_a \tag{10}$$

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

As equações (11) e (12) garantem a radialidade do sistema e em conjunto com as equações de balanço de carga (2) e (3), resultam em um sistema totalmente conectado e com topologia radial.

$$\sum_{(ij)\in\Omega_l}\sum_{a\in\Omega_a}\hat{n}_{ij,a} = n_b - n_{b_s} \tag{11}$$

$$\hat{n}_{ij,a} = n^0_{ij,a} + n_{ij,a}\ \forall(ij)\in\Omega_l, \forall a\in\Omega_a \tag{12}$$

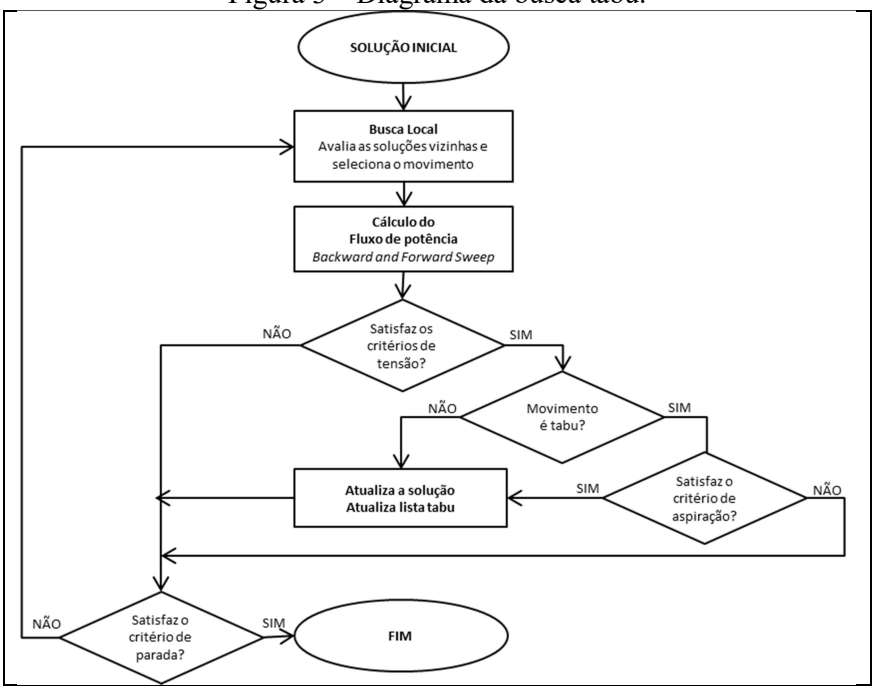
3. Busca Tabu aplicada ao planejamento de sistemas de distribuição

Para este trabalho propõe-se a utilização da metaheurística de Busca Tabu a fim de encontrar a melhor configuração de expansão da rede de distribuição em um intervalo tempo. Originalmente, apresentada por [Glover 1986], a Busca Tabu é uma metaheurística que guia um algoritmo de busca local na exploração do espaço de soluções, utilizando estruturas de memórias para armazenar as soluções geradas, o que possibilita encontrar soluções de alta qualidade em problemas complexos.

O conceito central é realizar buscas no espaço de soluções enquanto se mantém armazenados na memória movimentos já realizados. Essa memória, conhecida como "lista tabu", impede temporariamente que a busca revisite soluções previamente exploradas ou realize movimentos cíclicos. Assim, a lista tabu armazena informações sobre os movimentos recentes, como por exemplo, quais ramos foram incluídos ou retirados da rede, permitindo que o algoritmo explore diferentes partes do espaço de busca de forma mais eficiente, ajudando-o a escapar de ótimos locais e a convergir para soluções de melhor qualidade.

Na Figura 3 apresenta-se o diagrama da metaheurística de Busca Tabu aplicada ao problema. No primeiro passo, realiza-se a construção da solução inicial, iterativamente, de maneira gulosa selecionando a partir do nó de geração, o ramo que implique no menor custo com a construção de condutores, que mantenha a rede radial, que atenda todas as cargas, que cumpra com os critérios de tensão previamente estabelecidos e cumpra com o critério de corrente máxima no condutor.

Figura 3 – Diagrama da busca tabu.



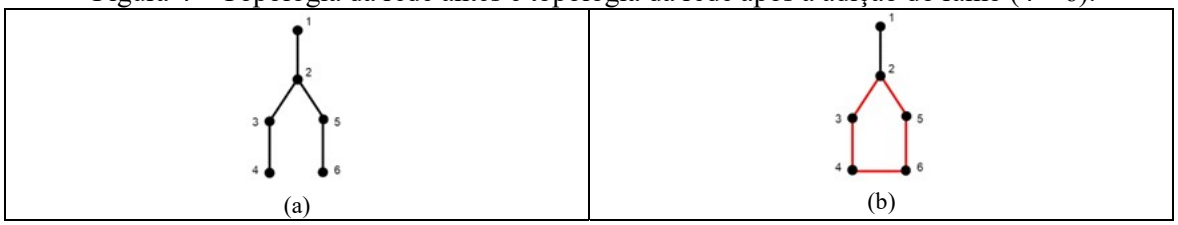
Fonte: Autoria própria (2024)

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

Ao término da construção da solução, inicia-se a fase de busca local, com o objetivo de minimizar a função objetivo, equação (1). Nesta fase, avaliam-se as possíveis soluções vizinhas através de substituição de trechos, realizadas para atender o critério de radialidade determinado na equação (11).

A modificação do trecho no circuito é realizada em duas etapas: inclusão e exclusão de ramos. Na Figura 4, apresenta-se um exemplo de inclusão de ramo, onde a subfigura 4(a) indica um segmento da rede, sem problemas de radialidade e a subfigura 4(b) indica a mesma rede com a adição do ramo (4 – 6), formando uma malha. Para essa adição, consideram-se trechos que ainda não estejam no circuito e aqueles de menor extensão e consequentemente menor impedância.

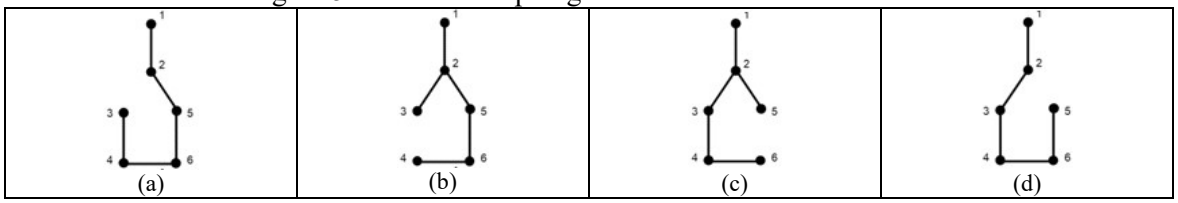
Figura 4 – Topologia da rede antes e topologia da rede após a adição do ramo (4 – 6).



Fonte: Autoria própria (2024).

Na segunda etapa, a de exclusão, a busca local identifica os ramos que compõem essa malha, Figura 4(b), e retira um desses ramos para que a substituição seja feita, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Possíveis topologias da rede ao retirar um ramo.



Fonte: Autoria própria (2024).

Na subfigura 5(a) apresenta-se um exemplo de exclusão do ramo (3 – 2) tornando novamente o segmento da rede radial. De forma análoga, nas subfiguras 5(b), 5(c) e 5(d) apresentam-se a exclusão dos ramos (4 – 3), (5 – 6) e (2 – 5), respectivamente, transformando a topologia em radial.

Nessa fase, para cada simulação de exclusão, os custos de investimento da nova rede e os custos das perdas ativas são calculados e comparados para a escolha do movimento que implicará em menor custo.

Após a seleção do movimento pela busca local, realiza-se o cálculo do fluxo de potência através do método *Backward and Foward Sweep,* para verificar se as possíveis alterações satisfazem os critérios de tensão do sistema. Caso os critérios de tensão sejam satisfeitos, verifica-se se o movimento está contido na lista tabu. Se o movimento não estiver na lista ou cumprir o critério de aspiração, o movimento é realizado, a solução corrente e a lista tabu são atualizadas. Em seguida, verifica-se o critério de parada. Caso o critério de parada não seja satisfeito, o procedimento é repetido.

Para os casos em que os critérios de tensão ou aspiração não são satisfeitos, verifica-se imediatamente o critério de parada. Se o critério de parada não for satisfeito, retorna-se para a fase de busca local, caso contrário, encerra-se a busca tabu.

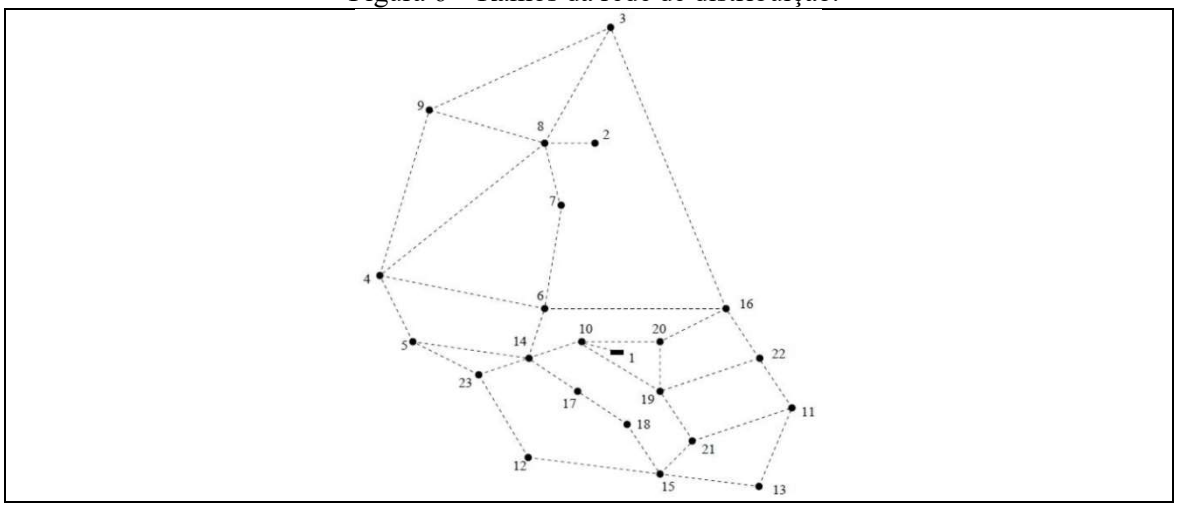
DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

4. Experimentos computacionais

Testes computacionais foram realizados em um computador com processador Intel (R) Core (TM) i7-8550U CPU @ 1.80GHz 1.99GHz, 16GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 (64 bits). Utilizou-se o *solver* LINGO, versão 20.0.18, da empresa Lindo Systems Inc.©, para resolver as instâncias testes.

O sistema teste utilizado neste trabalho é o apresentado em [Nahman e Peric, 2008], onde se considera uma rede de distribuição de 34,5 kV, que é alimentada por uma subestação de 10 MVA, que alimenta uma área de produção de óleo com 23 barras, sendo 21 de carga. Os ramos viáveis são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Ramos da rede de distribuição.

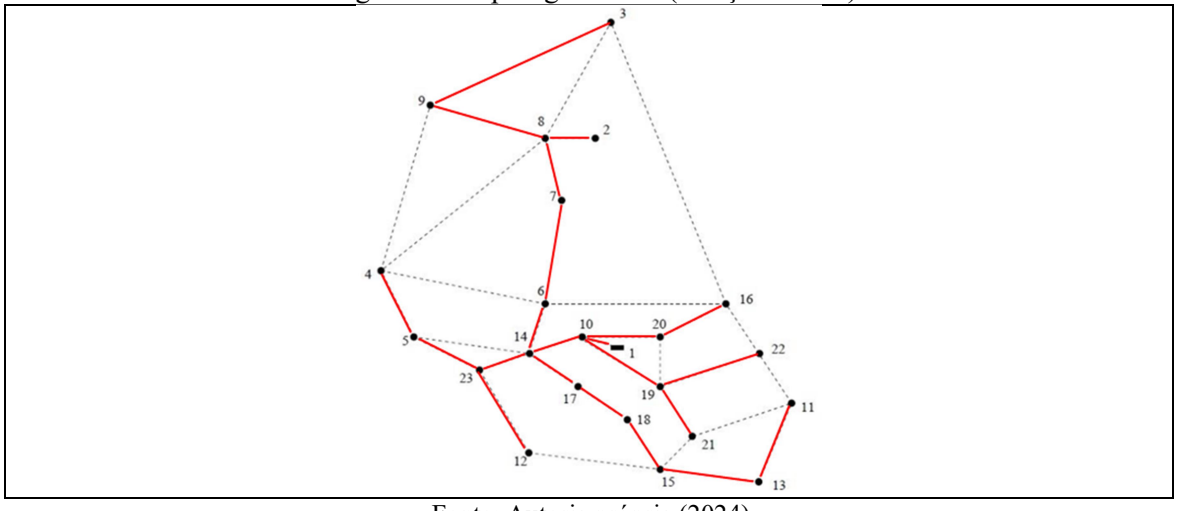


Fonte: Oliveira (2010).

Para os testes realizados considera-se a construção de novos circuitos, com desvio máximo de tensão de 3%, fator de potência médio igual a 0,9, custo de perdas de energia de 0,05 US$/kWh, fator de perdas de 0,35, taxa de juros de 0,1 com o período de planejamento sendo de 20 anos e erro para o fluxo de potência de 0,001.

Na Figura 7 apresenta-se a topologia da rede utilizada como solução inicial. Nessa solução, a partir do nó de geração, iterativamente são selecionados os demais nós.

Figura 7 – Topologia inicial (solução inicial)



Fonte: Autoria própria (2024).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

Para a solução inicial, no Quadro 1 apresenta-se os dados da rede inicial já existente e os custos de perda, construção e total.

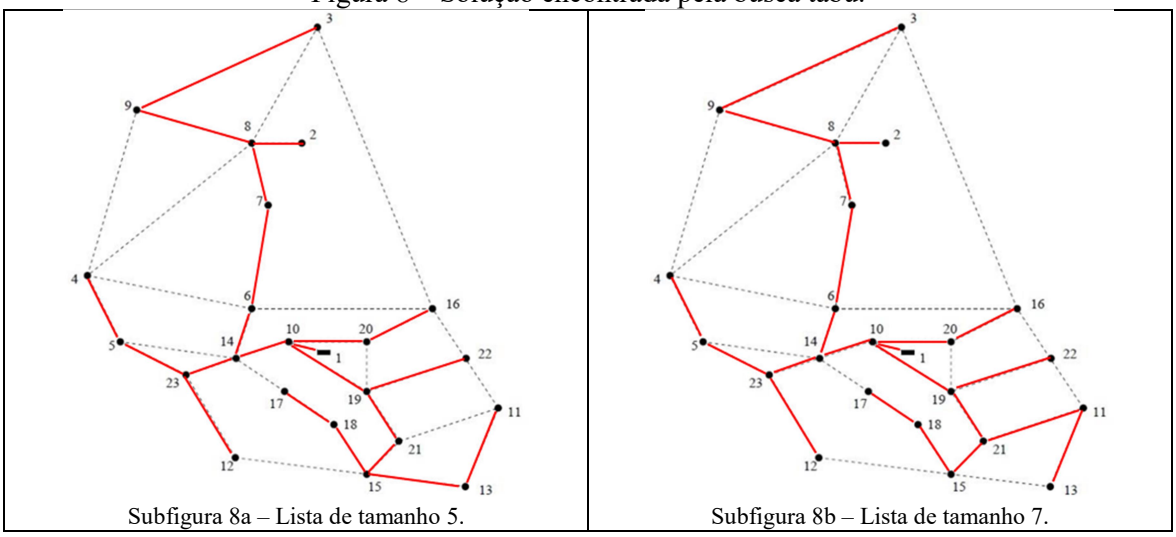
Quadro 1 – Parâmetros da configuração inicial da rede.

Barra com a menor tensão na rede	0,9948 pu
Trecho com a maior corrente	0,705 pu = 204,52 A
Custo de perdas em 20 anos	US$ 21.429
Custo de construção dos circuitos	US$ 151.892
Custo total	US$ 173.321

Fonte: Autoria própria (2024).

A partir da construção da solução inicial, foram realizados diversos experimentos computacionais variando os parâmetros da busca tabu, tais como o tamanho das listas tabu e a quantidade de iterações da busca. Na Figura 8 apresentam-se as topologias das soluções encontradas pela busca tabu. A subfigura 8a é a solução encontrada considerando 100 iterações e lita tabu de tamanho 5 e a subfigura 8b considerando 100 iterações e lista tabu de tamanho 7.

Figura 8 – Solução encontrada pela busca tabu.



Subfigura 8a – Lista de tamanho 5. Subfigura 8b – Lista de tamanho 7.

Fonte: Autoria própria (2024)

No Quadro 2 apresentam-se os valores da barra com menor tensão na rede, do trecho com a maior corrente, os custos de perdas em 20 anos e de construção dos circuitos, e o custo total das soluções encontradas pela busca tabu.

Quadro 2 – Parâmetros das soluções encontradas

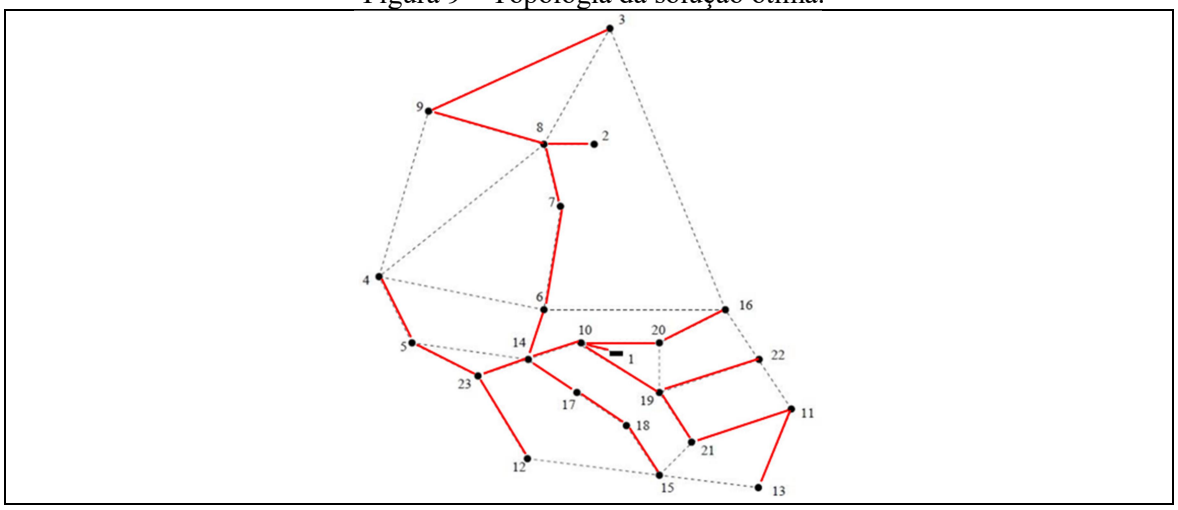
	Lista de tamanho 5	**Lista de tamanho 7**
Barra com a menor tensão na rede	0,9950 pu	0,9951 pu
Trecho com a maior corrente	0,6410 pu = 185,80 A	0,6093 pu = 176,61 A
Custo de perdas em 20 anos	US$ 19.560	US$ 18.674
Custo de construção dos circuitos	US$ 153.314	US$ 153.479
Custo total	US$ 172.874	US$ 172.153

Fonte: Autoria própria (2024).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

Na Figura 9 mostra-se a topologia que representa a solução ótima obtida por [Oliveira 2010]. Os autores encontraram a solução ótima do problema resolvendo o modelo matemático através do algoritmo de *Branch and Bound,* escrito na linguagem de modelagem AMPL. Em cada nó encontrado, o *solver* comercial KNITRO foi utilizado para resolver o problema.

Figura 9 – Topologia da solução ótima.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2010).

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados dos estudos de outros autores que aplicaram diferentes métodos de otimização neste mesmo sistema. A solução ótima é apresentada na primeira linha com US$ 172.119 de custos totais.

Na segunda linha, [Oliveira 2010] resolve o problema através de um algoritmo heurístico construtivo especializado - AHC e apresenta uma solução com custo total igual à solução ótima.

Nas demais linhas, [Gómez et al. 2004], [Nahman e Peric 2008], Popovic et al. 2014] e [Hadano et al. 2017, apresentam os resultados encontrados através da aplicação de diversas metaheurísticas, tais como colônia de formigas, *simulated annealing* e *grasp*. Por fim, na última linha, apresenta-se o custo total de US$ 172.153 encontrado pela busca tabu proposta, com desvio percentual de 0,0198% da solução ótima.

Tabela 1 – Estudos e resultados realizados para o problema de 23 barras.

Método	**Custo total (US$)**	**Tempo (s)**
Branch and bound (Oliveira, 2010)	172.119	1.705
AHC final (Oliveira, 2010)	172.119	28.98
Colônia de formigas (Gómez et al., 2004)	172.913	-
Simulated Annealing (Nahman e Peric, 2008)	172.899	4.578
SA-MILP (Popovic et al., 2014)	173.142	12.40
GRASP com best-improving (Hadano, 2017)	175.962	364.33
Busca Tabu	172.153	5.04

Fonte: Autoria própria (2024).

4. Conclusões e perspectivas futuras

Neste trabalho abordou-se o problema da expansão de sistemas de distribuição com o objetivo de minimizar os custos de investimento e operação dos sistemas.

Considerou-se um sistema teste apresentado em [Nahman e Peric, 2008], de 23 barras, sendo uma alimentadora, uma barra de passagem e as demais barras de carga.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

Um modelo matemático para o problema é discutido e é proposta a utilização da metaheurística de busca tabu para encontrar soluções para o problema.

Testes computacionais foram realizados com diferentes tamanhos de lista tabu e critérios de parada, e as soluções obtidas permitiram a comparação com as soluções apresentadas por diversos autores em diferentes trabalhos. Nessa comparação, o resultado obtido apresenta uma redução média de 1,1098% em relação às soluções apresentadas em outros trabalhos e um desvio do 0,0198% em relação à solução ótima.

Diante dos resultados obtidos é possível constatar um desempenho bem sucedido, embora haja pontos que possam ser aprimorados, tais como a utilização de memória de longo prazo, listas tabus de tamanho dinâmicos e diferentes critérios de parada.

Pesquisas futuras envolvem a implementação de outras metaheurísticas e utilização de outros sistemas testes de modo a validar a utilização de metaheurísticas para solução do problema.

Referências

ABRADEE 2024. Associação Brasileira de Distribuidores de energia elétrica. Distribuição em números, web page: https://abradee.org.br/distribuicao-em-numeros/, Acessado em 2024-05-15.

ANEEL (2021).Agência Nacional de energia elétrica: Resolução normativa ANEEL nº 956/2021, web page: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html. Acessado em: 2024-05-15.

ANEEL (2022). Agência Nacional de energia elétrica: Resolução normativa ANEEL nº 1001/2022: módulo 2 – classificação das instalações, web page: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren20221001_2_1.pdf. Acessado em: 2024-05-15.

ANEEL (2024). Agência Nacional de Energia Elétrica, Sistema de Informações de Geração. Web page. https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9. Acessado: 2024-05-07.

Bernal-Agustín, J. L. (1998). Aplicación de algoritmos genéticos al diseño optimo de sistemas de distrubuición de energía eléctrica. Tese (doutorado em engenharia elétrica) Departamento de Engenharia Elétrica, Universidad de Zaragoza, Espanha.

EPE (2023). Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022, Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro, Web page: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023. Acessado em: 2024-05-14.

Figueiredo, R. M. V., Silva, P. H. G. e Poss, M. (2011). Uma meta-heurística GRASP para o problema de planejamento de expansão de redes de transmissão com redimensionamento. In *Anais do XXVIII SBPO*, p. 851–861, Ubatuba.

Global Energy Statistical Yearbook. (2022). web page: https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html. Acessado: 2024-05-07.

Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13:5, 533-549.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br

Gómez, J. F., Khodr, H. M., Oliveira, P. M., Ocque, L., Yusta, J. M., Villasana, R. e Urdaneta, A. J. (2004). Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2):996–1004.

Hadano, F.S., Shiguemoto, G.H.B e Shiguemoto, A.L. (2021). Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica por meio de uma metaheurística GRASP. *In Gestão da Produção em Foco, vol. 46*, Rafael Alves Pedrosa, Editora Poison, Belo Horizonte – MG.

Hincapie, R.A.I., Ramon A, Gallego R., Mantovani, J.R.S. (2019). A decomposition approach for integrated planning of primary and secondary distribution networks considering distributed generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 106,146-157.

Hou, Y., Feng, C., Aer, Y., Xue, S., Zhou, Y., Wang, H. (2023). Application of Improved Genetic Algorithm in Distribution Network Planning with Distributed Generation. In: Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1044. Springer, Singapore.

IBGE 2022, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Censo 2022. Web page: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal, Acessado em 2024-05-15.

International Monetary Fund, (2024). web page: https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPD@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD Acessado em 2024-05-13.

Lavorato, M., Rider, M.J., Garcia, A.V. e Romero R. (2009). Distribution network planning using a constructive heuristic algorithm. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Calgary, AB, Canada, 1-6.

Nahman, J.M. e Peric, D.M. (2008). Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2):790–795.

Oliveira, M.L. de. (2010). Planejamento integrado da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Tese (doutorado em engenharia elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ONS 2024, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Mapas, web page: https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas. Acessado em 2024-05-15.

ONS SINtegre 2024, Operador Nacional do Sistema Elétrico. O sistema em números, Web page: https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros, Acessado em 2024-05-15.

PDE 2032, Plano decenal de expansão de energia 2032: demanda de eletricidade, Web page: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Demanda%20de%20Eletricidade%20-%20PDE%202032.pdf, outubro de 2022. Acessado em: 2024-05-14.

Popovic, Z.N., Kerleta, V. Dj. E Popovic, D.S. (2014). Hybrid simulated annealing and mixed integer linear programming algorithm for optimal planning of radial distribution networks with distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 108:211-222.

Sousa, J. (2013). Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica através de um modelo de programação linear inteiro misto (plim). Tese (doutorado em engenharia elétrica). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193856
https://proceedings.science/p/193856?lang=pt-br