57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

Meta-heurística Busca Tabu Especializada para o Problema de Sequenciamento Ótimo de Manobras de Chaves na Reconfiguração de Sistemas de Distribuição

Thiago L. Vitoriano, Rafael Y. Yamamoto, Rubén Romero
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia
Av. Brasil, 56, Centro, Ilha Solteira, 15385-007, São Paulo, Brasil
thiago.lombarde@unesp.br, rafael.yuki@unesp.br,
ruben.romero@unesp.br

Leonardo H. Macedo
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências
Av. dos Barrageiros, 1881, Centro, Rosana, 19272-100, São Paulo, Brasil
leohfmp@ieee.org

RESUMO

Este trabalho propõe um algoritmo meta-heurístico especializado, baseado em busca tabu, para resolver o problema de sequenciamento de operações de chaveamento (SOC) na reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica. O objetivo central é conduzir a topologia inicial radial até uma configuração radial ótima, minimizando a energia não suprida durante o processo de transição. A cada etapa, manobras em chaves geram topologias intermediárias que devem satisfazer duas condições: (i) a parte energizada da rede deve permanecer radial e (ii) as restrições operacionais devem ser rigorosamente atendidas. Em razão da elevada complexidade do SOC, adotou-se a busca tabu especializada com estratégias de diversificação e intensificação, para explorar eficientemente o espaço de soluções e impedir a ciclagem. Testes computacionais foram realizados em sistemas de diferentes tamanhos conhecidos na literatura. Os resultados demonstraram que o método alcança soluções de alta qualidade em tempos computacionais compatíveis com aplicações reais.

PALAVRAS CHAVE. Busca tabu. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Sequenciamento de operações de chaveamento.

EN&OG – PO na Área de Energia, Óleo e Gás

ABSTRACT

This paper proposes a specialized metaheuristic algorithm, based on tabu search, to solve the optimal switching operations sequencing (SOS) problem in the reconfiguration of electric power distribution networks. The primary objective is to transition the initial radial topology to an optimal radial configuration, minimizing the amount of energy not supplied throughout the switching process. At each step, switch operations generate intermediate topologies that must satisfy two conditions: (i) the energized portion of the network must remain radial, and (ii) all operational constraints are strictly maintained. Due to the high complexity of the SOS problem, a specialized tabu search, enhanced with diversification and intensification strategies, is employed to efficiently explore the solution space and prevent cycling. Computational tests were carried out using systems of different sizes from the literature. The results showed that the method achieves high-quality solutions in a computational time compatible with real applications.

KEYWORDS. Reconfiguration of electric power distribution systems. Switching operations sequencing. Tabu search.

EN&OG – OR in the Area of Energy, Oil, and Gas

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

1. Introdução

O sistema elétrico de potência é composto pelos subsistemas de geração, transmissão e distribuição, sendo este último responsável pela maior parcela das perdas de energia elétrica. Essas perdas dividem-se em técnicas e não técnicas. As perdas técnicas ocorrem em razão da conversão de energia elétrica em energia térmica ao longo do processo de distribuição: como a energia é transmitida em nível de tensão inferior ao da transmissão, as correntes na rede de distribuição aumentam, elevando a dissipação de energia [Juma et al., 2018]. Além dos condutores, os transformadores e reguladores de tensão que também contribuem para essas perdas, uma vez que apresentam impedâncias que geram aquecimento durante a condução da corrente. Já as perdas não técnicas decorrem de furtos de energia, fraudes e erros de medição. No Brasil, as perdas totais no sistema de distribuição correspondem a 14,1% da energia injetada, sendo 7,4% atribuídas à dissipação de energia [ANEEL, 2024].

Nesse contexto, torna-se essencial desenvolver estratégias de planejamento da operação que visem à minimização dessas perdas no sistema de distribuição, como no problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE), cujo objetivo é reduzir as perdas de potência ativa. Embora a RSDEE já tenha sido amplamente estudada, a maioria das propostas não contempla o sequenciamento de operações de chaveamento (SOC) com o objetivo de minimizar a energia não suprida (ENS) e manter a operação factível ao longo do período de transição entre a topologia operacional atual e a topologia ótima. Assim, a resolução do problema de RSDEE pode ser dividida em duas etapas claramente definidas:

1. Determinar a topologia radial ótima de operação, identificando quais ramos estarão conectados e quais estarão desligados na configuração final;

2. Executar o SOC para converter a topologia atual na topologia ótima, minimizando a ENS durante todo o processo.

Enquanto a primeira etapa já conta com vasta literatura, há escassez de estudos dedicados à segunda etapa, especialmente no que tange à minimização da ENS durante o sequenciamento enquanto mantém-se a operação factível. Este trabalho concentra-se justamente nessa segunda etapa, propondo um método que minimiza a ENS ao longo das topologias intermediárias, garantindo sua viabilidade operacional.

2. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica

A RSDEE é um desafio central na operação das redes elétricas. Embora a topologia física das redes de distribuição seja malhada, elas operam sob condições normais de forma radial, isto é, com apenas um caminho entre cada barra de carga e a subestação, característica que permite reconfigurações com diferentes objetivos operacionais, como a redução de perdas técnicas [Oliveira, 2021].

Em cada configuração, distinguem-se dois subconjuntos de circuitos: os energizados, que formam uma estrutura radial (ou árvore geradora, do ponto de vista da teoria de grafos), e os desenergizados, denominados ramos de ligação. A troca adequada entre um ramo energizado e um ramo de ligação gera uma nova configuração radial [Possagnolo, 2015].

Portanto, o problema de RSDEE visa identificar, dentre todas as topologias radiais viáveis, aquela que minimiza as perdas de potência ativa no sistema de distribuição. A resolução desse problema requer a avaliação de um grande número de configurações radiais possíveis.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

3. O problema de SOC na reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica

O problema de SOC na RSDEE consiste em determinar a sequência ótima de manobras de chaveamento que, partindo de uma configuração inicial conhecida, leva a uma configuração radial final definida pela reconfiguração. A partir das topologias inicial e final predefinidas, o desafio reside em identificar as topologias intermediárias factíveis que assegurem a transição, minimizando a ENS ao longo de todo o processo.

As chaves de interconexão, situadas nos ramos entre barras, podem apresentar-se em dois estados: normalmente fechado (NF) ou normalmente aberto (NA). Quando uma chave se encontra em estado NA, a operação de fechamento deve preservar a radialidade da rede; por outro lado, a abertura de uma chave pode isolar temporariamente determinadas barras, causando um incremento da ENS durante o processo.

Minimizar interrupções do fornecimento de energia é essencial, pois elas impactam negativamente consumidores industriais, comerciais e residenciais, ocasionando prejuízos financeiros e riscos a equipamentos elétricos devido a picos de tensão no restabelecimento.

O problema apresenta elevada complexidade combinatória, envolvendo dois conjuntos de chaves que devem ser operadas (NA e NF). O número total de sequências possíveis corresponde às permutações simples da união desses conjuntos, crescentes de forma explosiva para redes de médio e grande porte. Assim, em sistemas de grande porte, não é viável gerar todas as permutações e, em seguida, filtrar as factíveis e do conjunto das factíveis aquelas de menor ENS.

A função objetivo do problema visa minimizar a ENS acumulada durante o período de transição entre topologias, sujeita aos requisitos topológicos e restrições operacionais da rede. No modelo adaptado [Ferreira, 2024] a potência não suprida (PNS) na etapa k, a soma das PNSs ao longo de n etapas e a ENS total são definidas por (1)–(3):

$$\text{PNS}_k = \sum_{i=1}^{N} P_i \left(1 - x_i^k\right) \tag{1}$$

$$\text{PNS}_{\text{total}} = \sum_{k=1}^{n} \text{PNS}_k = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{N} P_i \left(1 - x_i^k\right) \tag{2}$$

$$\text{ENS} = \sum_{k=1}^{n} \text{PNS}_k \cdot \Delta t = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{N} P_i \cdot \left(1 - x_i^k\right) \cdot \Delta t \tag{3}$$

A seguir, apresenta-se a formulação da função objetivo por meio de (4) e as restrições representadas por meio das condições (i)–(v):

$$\text{minimizar} \quad \text{ENS} = \sum_{k=1}^{n} \text{PNS}_k \cdot \Delta t \tag{4}$$

Sujeito às seguintes condições:

(i) Satisfazer as duas leis de Kirchhoff no sistema elétrico em cada sequência gerada;

(ii) Manter as tensões das barras dentro de seus limites em cada sequência gerada;

(iii) Manter as correntes dos ramos dentro de seus limites em cada sequência gerada;

(iv) Satisfazer a capacidade de fornecimento das subestações em cada sequência gerada;

(v) Garantir que todas as configurações topológicas intermediárias energizadas sejam radiais.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

A potência demandada na barra i é representada por P_i; x_i^k representa uma variável binária que assume valor 1 quando a barra i está energizada na etapa k, e 0 caso contrário. O número total de barras da rede é dado por N; n representa o número total de etapas ao longo do processo de transição. O índice k representa a etapa do processo em questão. A variável PNS_k indica a PNS na etapa k, e $\text{PNS}_{\text{total}}$ representa a soma das PNSs ao longo das n etapas. Já a ENS acumulada durante toda a transição é dada por ENS, calculada a partir da PNS durante o intervalo de tempo Δt, que define a duração de cada etapa.

3.1. Proposta de busca tabu especializada

O método de solução proposto consiste em um algoritmo de BT especializado para resolver o problema de SOC na RSDEE. Na abordagem convencional de BT, inicia-se de modo semelhante a uma busca local, mas com a possibilidade de efetuar movimentos que melhorem ou até que piorem a FO, como descrito em Glover [1995]. Simultaneamente, mantém-se uma lista tabu (LT), onde se armazenam atributos proibidos das soluções visitadas a fim de evitar ciclagem e, assim, tentar impedir que a busca fique presa em ciclos redundantes. Adicionalmente, utiliza-se o critério de aspiração, por exemplo, em relação ao valor da FO, ou seja, se uma solução que compartilha de um atributo proibido, entretanto apresenta uma qualidade superior, o critério de aspiração faz com que a solução seja considerada.

Já na proposta especializada, adota-se uma abordagem baseada na BT tradicional, entretanto, faz-se uma combinação de técnicas de reinicialização e estruturas de vizinhanças eficientes. A BT especializada começa o processo partindo de uma solução inicial que será exemplificada na Seção 3.4, e, após ser melhorada, é considerada como a solução incumbente (SI), isto é, a melhor solução conhecida até o momento e, a cada iteração, explora-se soluções vizinhas com o intuito de encontrar soluções de melhor qualidade.

Ao longo da busca, a ciclagem é evitada por meio de uma LT que faz o armazenamento não de atributos, mas sim de todas as soluções já visitadas durante o processo e seus respectivos valores de FO, permitindo descartar vizinhos já explorados. Além disso, mecanismos de reinicialização para a incumbente são empregados quando a busca local não apresenta uma melhoria em c_e iterações consecutivas. Essa combinação visa acelerar a convergência para soluções de qualidade, mantendo um bom equilíbrio entre diversificação e intensificação.

3.2. Etapa de reinicialização da busca tabu

Para evitar a estagnação, ou seja, várias iterações sem melhoria na FO, utiliza-se a estratégia de reinicialização *(restart)* [Yamamoto et al., 2024], em que um contador de estagnação (c_e) aciona o reinício ao atingir um limite pré-definido, retornando à SI. Um segundo contador (c_1) registra o número de reinicializações e, ao alcançar um valor máximo (c_2), o algoritmo é encerrado por falta de progresso significativo.

3.3. Descrição geral do processo e fluxograma

O método aqui descrito não apenas incorpora as características usuais de um algoritmo de BT, com movimentos que podem piorar temporariamente a FO e o uso de uma LT para impedir repetições, mas também integra reinicializações e o armazenamento das soluções completas na lista, fortalecendo a capacidade de exploração do espaço de busca. Em termos práticos, esse conjunto de técnicas reduz o risco de a busca permanecer presa em ótimos locais. Assim, a abordagem se revela eficiente ao equilibrar a intensificação (na procura de boas soluções em torno da incumbente) e a diversificação (por meio de reinicializações e da própria estrutura tabu), aprimorando o desempenho final do algoritmo. Ademais, o critério de parada utilizado na implementação baseia-se na interrupção do processo de busca quando é atingido um número predefinido de reinicializações ou quando todas as vizinhanças possíveis já tiverem sido exploradas, o que ocorrer primeiro.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

Além disso, no fluxograma mostrado na Figura 1, o contador c acompanha o número de iterações consecutivas sem melhoria e é reinicializado sempre que se encontra uma solução superior e é limitador por c_e, já o número máximo de reinicializações é limitador por c_2, sendo que tais contadores, valem, respectivamente, 50 e 2. Em relação a SC, ela representa a solução corrente, ou seja, a solução que está sendo explorada em cada ciclo e ela passa a integrar a LT após cada reinicialização para impedir retornos imediatos à mesma solução.

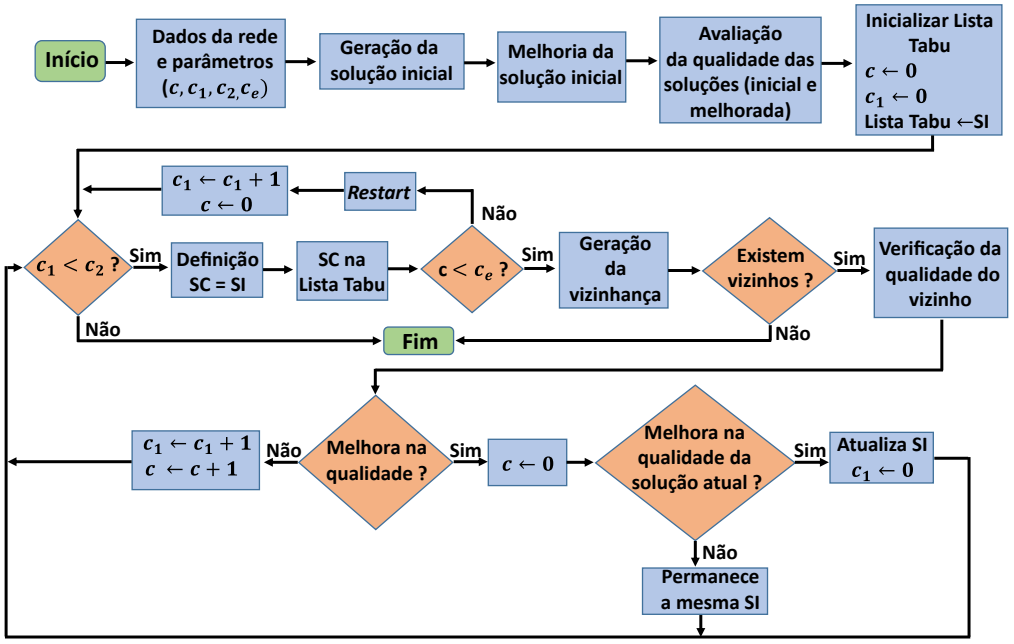

Figura 1: Fluxograma representativo do processo de busca do algoritmo de busca tabu especializada.

3.4. Proposta de solução inicial da meta-heurística

A proposta de solução inicial da meta-heurística é representada por meio de um vetor de tamanho n_c (número de chaves a serem manobradas), construído da seguinte maneira: na primeira parte aparecem todas as chaves que estão inicialmente fechadas que devem ser abertas; em seguida, todas as chaves que estão abertas que devem ser fechadas. Na Figura 2, pode-se visualizar a solução inicial. Adicionalmente, para melhorar a qualidade da solução, aplicou-se, uma estrutura de vizinhança, por meio da troca de duas posições de chaves, de modo análogo ao que será mostrado na Seção 3.6. Após isso, selecionou-se o vizinho com melhor qualidade, tornando-o a solução inicial melhorada mostrada na Figura 3.

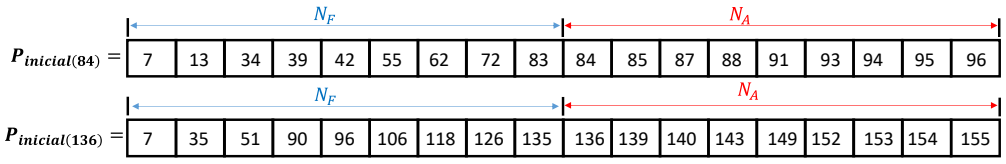

Figura 2: Representação da proposta de solução inicial para os sistemas de 84 e 136 barras.

3.5. Verificação da qualidade e factibilidade da função objetivo

A meta-heurística deve ser capaz de avaliar tanto a qualidade da proposta quanto sua viabilidade, considerando se ela é factível ou infactível. No caso em análise, a FO consiste em

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

$P_{melhorada(84)}$ =

39	42	55	72	83	13	62	34	7	85	94	88	96	91	84	87	93	95

$P_{melhorada(136)}$ =

135	96	126	118	7	35	90	51	106	153	140	149	156	139	136	143	154	152

Figura 3: Representação da proposta de solução melhorada para os sistemas de 84 e 136 barras.

minimizar a ENS durante o período de transição entre as topologias. Assim, a qualidade da solução será considerada maior conforme a ENS diminui. Ademais, deve-se verificar se a proposta de solução cumpre tanto os requisitos topológicos quanto operacionais; quanto aos requisitos topológicos, a proposta apresentada não pode, ao realizar uma manobra que envolva o fechamento de uma chave, gerar um laço na rede. Caso isso ocorra, a mesma deve ser descartada imediatamente, uma vez que é necessário preservar a radialidade em todas as topologias intermediárias. Já para a verificação adequada da operação de uma solução intermediária, deve-se calcular um fluxo de potência, e, para isso, será utilizado o MATPOWER.

Além disso, caso a solução seja factível do ponto de vista topológico, ou seja, radialmente, será calculada a ENS na parte do sistema que estiver ilhada, ou seja, desconectada da rede principal e, posteriormente a isso, calcula-se um fluxo de potência, entretanto, é importante destacar que tais cálculos devem ser realizados, no máximo, $\left(\frac{n_c}{2} - 1\right)$ vezes, uma vez que a última manobra resultará na mesma topologia obtida pela proposta de reconfiguração, a qual é factível.

3.6. Idealização da estrutura de vizinhança

Para implementar a BT é necessário idealizar uma estrutura de vizinhança, sendo que nessa a lógica utilizada neste trabalho é: a partir da topologia corrente, serão gerados vizinhos por meio da troca de dois elementos no vetor que representa a proposta de solução. Para obter o número de vizinhos, calcula-se o número de combinações de possíveis trocas de posição de dois elementos no vetor que representa a proposta de solução, conforme mostrado em (5). Para os sistemas de 84 e 136 barras n_c é igual a 18 e, portanto, o número de vizinhos a serem analisados é igual a 153.

$$C_{n_c,2} = \frac{n_c!}{2!(n_c-2)!} = \frac{n_c(n_c-1)(n_c-2)!}{2!(n_c-2)!} = \frac{n_c(n_c-1)}{2} \tag{5}$$

4. TESTES E RESULTADOS

A meta-heurística de BT especializada foi testada em vários sistemas de distribuição. Entretanto, serão apresentadas apenas as discussões completas para os sistemas de 84 e 136 barras, que melhor representam o desempenho do método frente a sistemas de maior porte. O principal objetivo dos testes foi efetuar uma avaliação tanto da robustez quanto da eficiência do método proposto, com ênfase na otimização do SOC, o qual possui um caráter combinatório. Para a realização dos testes, utilizou-se de um computador com processador Intel® Core™ i7-1260P de 12ª geração, 2,10 GHz, 16,0 GB de RAM. Adicionalmente, desenvolveu-se o trabalho utilizando o MATLAB® na versão 9.14 (R2023a) juntamente com o pacote MATPOWER na versão 8.0.

As operações de chaveamento propostas para a obtenção da solução seguem as seguintes condições: (1) apenas uma chave deve ser manobrada por vez e cada etapa; (2) após ser efetuada a manobra, a chave não pode ser manobrada novamente; (3) após a manobra de uma chave, a nova topologia intermediária opera por 20 minutos, antes de ser realizada uma nova manobra; (4) considerou-se os limites de tensão na faixa de 0,93 pu a 1,05 pu [ANEEL, 2021].

O cálculo do fluxo de potência foi realizado apenas após manobras de fechamento intermediárias. Isso é devido a dois fatores: (1) nas manobras de abertura, há apenas a remoção de um ramo da rede, o que pode resultar na desconexão de determinadas cargas, o que reduz a carga e,

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

respectivamente, as correntes, levando a tensões mais próximas das nominais na parte energizada. Além disso, aberturas nunca introduzem laços, dispensando a verificação da radialidade; e (2) a última operação de fechamento resulta na topologia ótima conhecida e factível.

4.1. Resultados para o sistema de 84 barras

O sistema de 84 barras é constituído de 96 ramos, 83 barras de carga e uma barra da subestação (barra 84) [Chiou et al., 2005] e tem uma tensão de 11,40 kV na subestação. Na sua topologia inicial as chaves 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96 estão abertas e, após o processo de reconfiguração, a topologia ótima tem como chaves abertas: 7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90 e 92. Assim, o SOC deve ser efetuado fechando nove chaves (84, 85, 87, 88, 91, 93, 94, 95 e 96) e abrindo nove chaves (7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72 e 83). A Figura 4 mostra a evolução da FO da solução incumbente durante o processo de busca para o sistema de 84 barras enquanto na Figura 5 visualiza-se a evolução da ENS para todas as soluções factíveis avaliadas durante o processo.

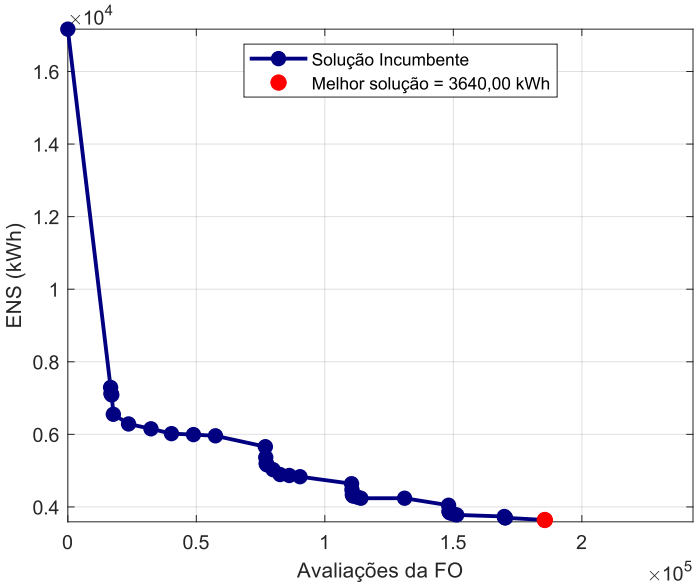

Figura 4: Evolução da incumbente para o sistema de 84 barras.

Observa-se, na solução atual, que o valor da ENS pode variar (aumentando ou diminuindo) de uma iteração para outra. Essas variações mostram que o algoritmo está efetuando uma exploração em diferentes regiões do espaço de busca, o que demonstra a aplicação tanto da intensificação quanto da diversificação e, principalmente, um equilíbrio entre elas, o que é fundamental para prevenir a estagnação em ótimos locais, permitindo que o algoritmo escape de regiões subótimas e continue avançando rumo a soluções de melhor qualidade. Na Tabela 1, pode-se visualizar os resultados obtidos para o sistema em questão enquanto na Figura 6, pode-se visualizar o perfil de tensão nas barras do sistema para a sequência obtida.

Tabela 2 apresenta os valores de tensão mínima e máxima no sistema para cada uma das manobras intermediárias de fechamento realizadas na solução ótima do sistema de 84 barras.

4.2. Resultados para o sistema de 136 barras

O sistema apresentado em [Mantovani et al., 2000] possui 136 barras, sendo 135 barras de carga, e 156 ramos. A subestação (barra 136), apresenta uma tensão de 13,80 kV. O sistema apresenta, na sua topologia inicial, as chaves 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146,

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

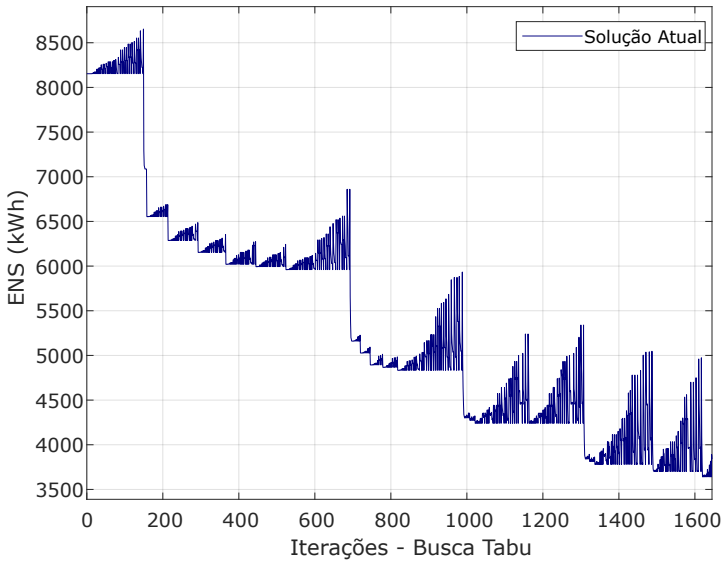

Figura 5: ENS ao longo das iterações da BT especializada para o sistema de 84 barras.

Tabela 1: Resultados obtidos para o SOC aplicado ao sistema de 84 barras

	Inicial	**Melhorada**	**Obtida pela BT**
Solução	7 ○, 13 ○, 34 ○, 39 ○ 42 ○, 55 ○, 62 ○, 72 ○ 83 ○, 84 ●, 85 ●, 87 ● 88 ●, 91 ●, 93 ●, 94 ● 95 ●, 96 ●	39 ○, 42 ○, 55 ○, 72 ○ 83 ○, 13 ○, 62 ○, 34 ○ 7 ○, 85 ●, 94 ●, 88 ● 96 ●, 91 ●, 84 ●, 87 ● 93 ●, 95 ●	62 ○, 7 ○, 34 ○, 94 ● 85 ●, 96 ●, 39 ○, 93 ● 42 ○, 95 ●, 55 ○, 84 ● 72 ○, 87 ●, 13 ○, 88 ● 83 ○, 91 ●
ENS (kWh)	17.167, 00	8.153,33	3.640,00
	Dados de simulação para a BT		
	Até o ótimo	**Total**	
Nº de FP	699.897	910.145	
Iterações realizadas	1.257	1.646	
Avaliações da FO	185.586	243.244	
Tempo (s)	1.111,87	1.434,66	
Legenda: ○ = Abrir chave, ● = Fechar chave, FP = Fluxo de potência			

147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156 abertas. Após efetuar a reconfiguração, apresenta como abertas as seguintes chaves: 7, 35, 51, 90, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151 e 155. Para a obtenção da configuração ótima, necessita-se de efetuar o fechamento de nove chaves (136, 139, 140, 143, 149, 152, 153, 154 e 156) e a abertura de nove chaves (7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126 e 135) para que seja minimizada a ENS e que a sequência seja factível. A Figura 7 mostra a evolução da FO da solução incumbente no processo de busca.

Na Figura 8, visualiza-se a evolução da ENS para todas as soluções factíveis avaliadas. Na Tabela 3, visualiza-se os resultados obtidos. Nas primeiras iterações, percebe-se uma exploração o espaço de busca, resultando em uma queda da ENS. Posteriormente, atinge-se uma estabilização, indicando que o algoritmo está se aproximando de uma região com ótimos locais de boa qualidade, com variações mínimas nos valores obtidos. Na sequência, ocorre um aumento na ENS, consequência direta da exploração de outras regiões do espaço de soluções. Esse pico temporário é seguido por um novo direcionamento do algoritmo, que retoma a convergência em busca da minimização da ENS para melhores soluções.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

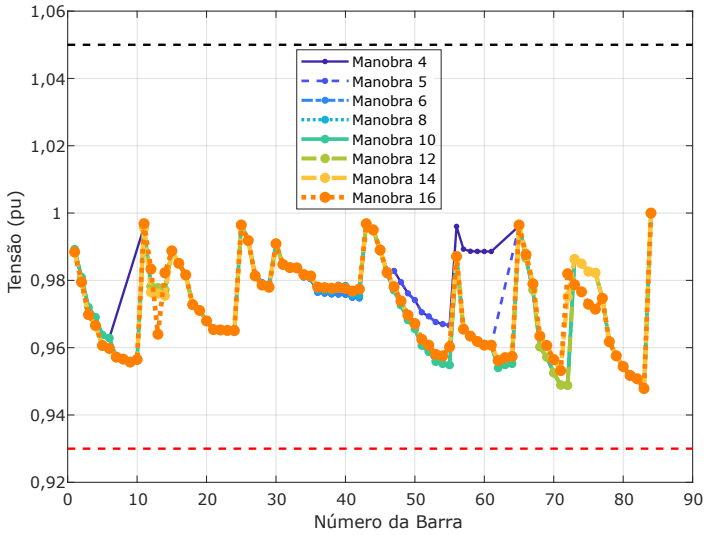

Figura 6: Perfil de tensão nas barras do sistema de 84 barras durante o sequenciamento de manobras de chaves.

Tabela 2: Tensões mínimas e máximas no sistema de 84 barras em cada manobra analisada

Manobra	Tensão mínima (pu)	Barra	Tensão máxima (pu)	Barra
4	0,948	83	1,000	84
5	0,948	83	1,000	84
6	0,948	83	1,000	84
8	0,948	83	1,000	84
10	0,948	83	1,000	84
12	0,948	83	1,000	84
14	0,948	83	1,000	84
16	0,948	83	1,000	84

Tabela 3: Resultados obtidos para o SOC aplicado ao sistema de 136 barras

	Inicial	Melhorada	Obtida pela BT
Sequência	7 ○, 35 ○, 51 ○, 90 ○, 96 ○, 106 ○, 118 ○, 126 ○, 135 ○, 136 ●, 139 ●, 140 ●, 143 ●, 149 ●, 152 ●, 153 ●, 154 ●, 156 ●	135 ○, 96 ○, 126 ○, 118 ○, 7 ○, 35 ○, 90 ○, 51 ○, 106 ○, 153 ●, 140 ●, 149 ●, 156 ●, 139 ●, 136 ●, 143 ●, 154 ●, 152 ●	135 ○, 106 ○, 153 ●, 126 ○, 154 ●, 118 ○, 143 ●, 96 ○, 152 ●, 7 ○, 136 ●, 90 ○, 149 ●, 51 ○, 140 ●, 156 ●, 35 ○, 139 ●
ENS (kWh)	13.076, 00	6.421, 24	1.267, 89
Dados de simulação para a BT			
	Até o ótimo		**Total**
Nº de FP	555.037		709.947
Iterações realizadas	919		1.194
Avaliações da FO	136.850		177.332
Tempo (s)	1.835,91		2.377,54

Legenda: ○ = Abrir chave, ● = Fechar chave, FP = Fluxo de potência

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

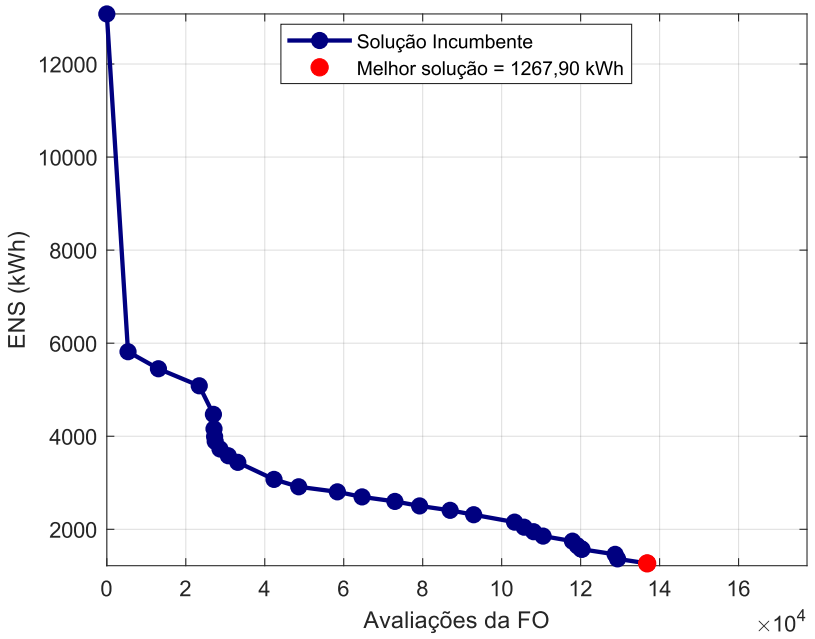

Figura 7: Evolução da incumbente para o sistema de 136 barras.

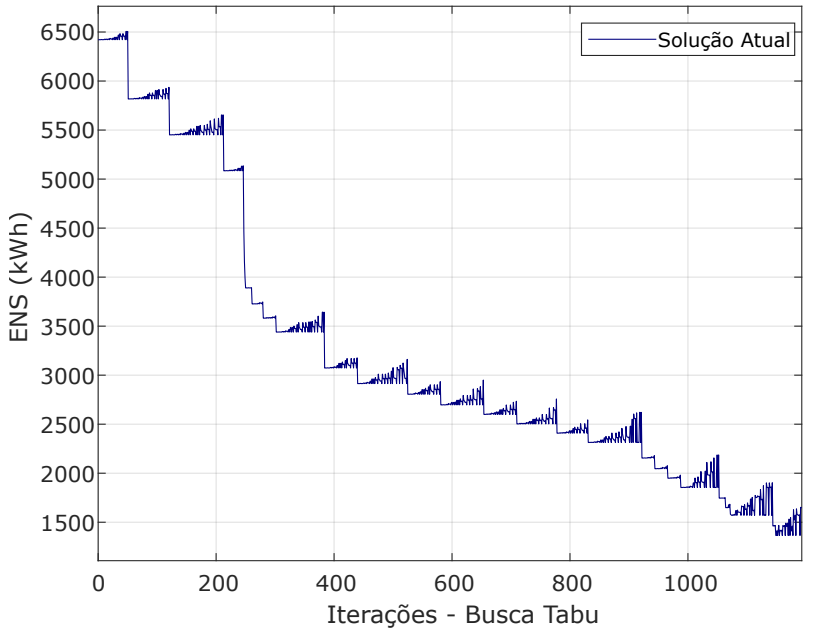

Figura 8: ENS ao longo das iterações da BT especializada para o sistema de 136 barras.

A Figura 9 mostra o perfil de tensão nas barras do sistema para as manobras de fechamento intermediárias da solução obtida enquanto na Tabela 4 pode-se visualizar os valores de tensão mínima e máxima no sistema observadas em cada manobra analisada, como as respectivas barras. As tensões mínimas repetem-se na barra 116 para as manobras de 3 a 13, enquanto nas manobras 15 e 16, a menor ocorre na barra 60.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

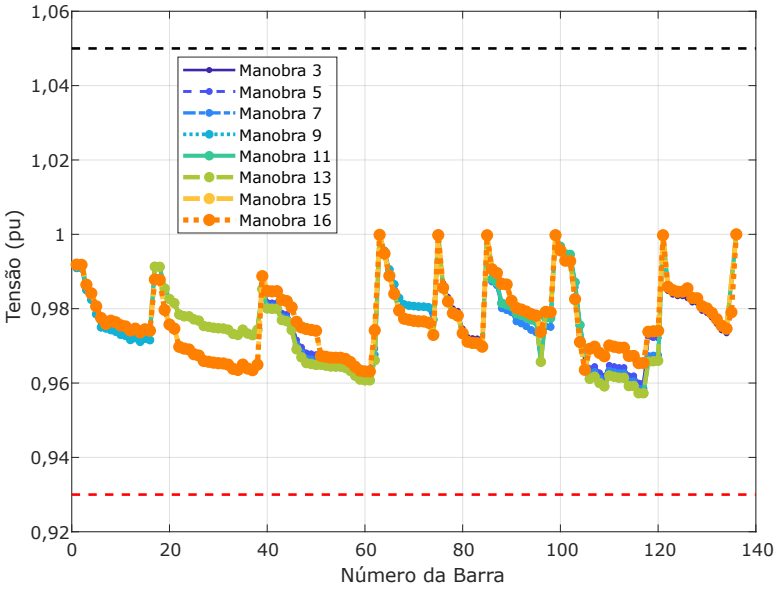

Figura 9: Perfil de tensão nas barras do sistema de 136 barras durante o sequenciamento de manobras de chaves.

Tabela 4: Tensões mínimas e máximas no sistema de 136 barras em cada manobra analisada

Manobra	Tensão mínima (pu)	Barra	Tensão máxima (pu)	Barra
3	0,960	116	1,000	136
5	0,960	116	1,000	136
7	0,959	116	1,000	136
9	0,957	116	1,000	136
11	0,957	116	1,000	136
13	0,957	116	1,000	136
15	0,963	60	1,000	136
16	0,963	60	1,000	136

5. Conclusão

O trabalho abordou uma análise teórica e computacional para a resolução do problema de SOC aplicado à RSDEE. O objetivo foi a determinação da sequência de manobras de chaves para a transição da topologia radial inicial para a configuração radial ótima final. Deve-se observar que as topologias inicial e final são conhecidas após resolver o problema da reconfiguração. Dessa forma, este trabalho aborda a segunda parte do processo de otimização, isto é, encontrar a sequência ótima de manobra de chaves para realizar a transição da topologia inicial para a topologia final e minimizando a ENS. O desafio está relacionado a natureza combinatória do SOC, o que reforça o uso de uma técnica meta-heurística eficiente para a resolução dentro de um tempo aceitável. Nesse contexto, foi proposta uma meta-heurística de BT especializada aplicada ao problema. Ela incorpora as características usuais de uma BT, mas também integra reinicializações e uma estrutura de vizinhança adequada. Para iniciar a proposta de otimização usando a BT foi encontrada uma proposta de solução inicial de boa qualidade. Entretanto, usando uma melhoria inicial essas propostas iniciais foram melhoradas. A abordagem permitiu alcançar a configuração final desejada, minimizando os impactos negativos sobre as barras desconectadas e obtendo-se, respectivamente, os seguintes valores de redução de ENS: 52,51% e 50,89% para os sistemas de 84 e 136 barras. O tempo total de processamento do algoritmo foi, respectivamente, de 1.434,66 s e 2.377,54 s para os sistemas de 84 e 136 barras. Embora ambos os sistemas possuam 18 chaves a serem manobradas, o de 136 barras

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br

apresentou maior tempo de execução devido à sua maior complexidade topológica e total de barras de carga, o que eleva o custo computacional por iteração, especialmente no fluxo de potência.

6. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos 409062/2023-5 e 311430/2025-2.

Referências

ANEEL (2021). Resolução normativa ANEEL nº 956, de 7 de dezembro de 2021. Brasília: Ministério de Minas e Energia. Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.

ANEEL (2024). Perdas de Energia Elétrica na Distribuição: 2024. Relatório (16 p.), il. Disponível em: `https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/242969`. Acesso em: 10 fev. 2025.

Chiou, J.-P., Chang, C.-F., e Su, C.-T. (2005). Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2):668–674.

Ferreira, M. A. (2024). Sequenciamento de operações de chaveamento para restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica usando busca tabu e busca em vizinhança variável. Dissertação (mestrado), Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Ilha Solteira.

Glover, F. (1995). Tabu search fundamentals and uses. Technical report, University of Colorado. Disponível em: `https://www.researchgate.net/publication/249776329`. Acesso em: 01 fev. 2025.

Juma, S. A., Muriithi, C. M., e Ngoo, L. M. (2018). Optimal switching sequence using a metaheuristic algorithm for feeder reconfiguration. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 11(8):1329–1346. ISSN 0974-3154.

Mantovani, J. R., Casari, F., e Romero, R. (2000). Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *Controle and Automação*, p. 150–159.

Oliveira, I. M. R. (2021). Algoritmo em estrutura branch and bound aplicado ao problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Dissertação (mestrado), Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Ilha Solteira. 98 p.

Possagnolo, L. H. F. M. (2015). Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável. Dissertação (mestrado), Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Ilha Solteira. 179 p.

Yamamoto, R. Y., Pinto, T., Romero, R., e Macedo, L. H. (2024). Specialized tabu search algorithm applied to the reconfiguration of radial distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 162:110258.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212179
https://proceedings.science/p/212179?lang=pt-br