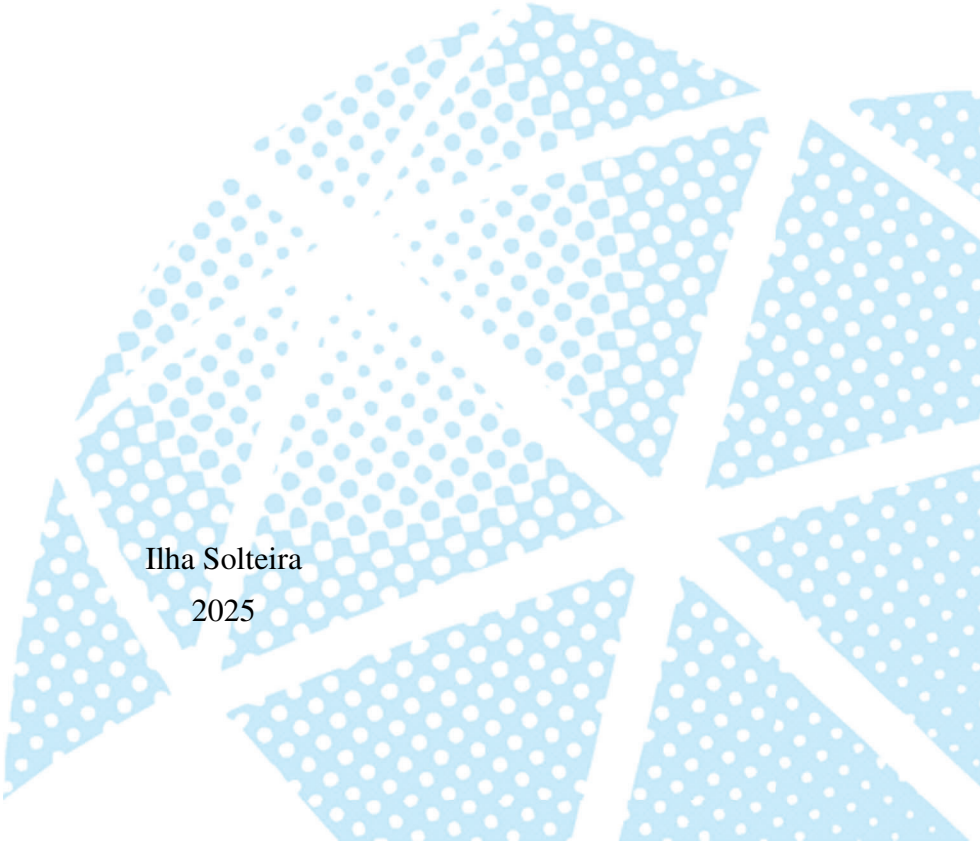
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira - SP

THIAGO LOMBARDE VITORIANO

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



Ilha Solteira
2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira - SP

THIAGO LOMBARDE VITORIANO

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

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro
Orientador
Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
Coorientador

Ilha Solteira
2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

Vitoriano, Thiago Lombarde.
V845m Meta-heurística busca tabu especializada para o problema de sequenciamento ótimo de manobras de chaves na reconfiguração de sistemas de distribuição / Thiago Lombarde Vitoriano. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
75 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2025

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro
Coorientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
Inclui bibliografia

1. Busca tabu. 2. Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica. 3. Sequenciamento ótimo de operações de chaveamento.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O problema da reconfiguração ótima de sistemas de distribuição tem sido amplamente estudado com o objetivo de reduzir as perdas de potência ativa nos alimentadores. No entanto, durante esse processo, ocorre uma transição entre a topologia atual e a topologia otimizada. Apesar disso, poucas pesquisas se dedicam à análise das etapas intermediárias da reconfiguração, ou seja, à definição da sequência ótima de chaveamento que possibilite a transição com o mínimo de Energia Não Suprida (ENS). Em um contexto regulatório cada vez mais rigoroso e competitivo, reduzir esses impactos torna-se essencial para melhorar os níveis de continuidade e qualidade no serviço prestado.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The problem of optimal reconfiguration of distribution systems has been widely studied with the aim of reducing active power losses in feeders. However, during this process, a transition occurs between the current topology and the optimized topology. Despite this, few studies have been dedicated to analyzing the intermediate stages of the reconfiguration, i.e., defining the optimal switching sequence that enables the transition with the minimum Unsupplied Energy (ENS). In an increasingly strict and competitive regulatory context, reducing these impacts becomes essential to improve the levels of continuity and quality of the service provided.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: META-HEURÍSTICA BUSCA TABU ESPECIALIZADA PARA O PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO ÓTIMO DE MANOBRAS DE CHAVES NA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

AUTOR: THIAGO LOMBARDE VITORIANO
ORIENTADOR: RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
COORIENTADOR: LEONARDO HENRIQUE FARIA MACEDO POSSAGNOLO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LEONARDO HENRIQUE FARIA MACEDO POSSAGNOLO (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia de Energia / Faculdade de Engenharia e Ciencias - UNESP

Prof. Dr. JOHN FREDY FRANCO BAQUERO (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Dr. RENZO AMILCAR VARGAS PERALTA (Participaçao Virtual)
Instituto de Energia e Ambiente / Universidade de São Paulo - USP

Ilha Solteira, 12 de maio de 2025

Dedico este trabalho aos meus pais Rita e Vandemberg.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda a força, saúde e suporte durante todo esse período de desenvolvimento e elaboração da pesquisa e por sempre atender às minhas orações nos momentos mais difíceis para mim.

Agradeço imensamente aos meus pais, Rita Lombarde Vilela Vitoriano e Vandemberg Vilela Vitoriano, por todo o apoio, paciência e confiança ao longo desta jornada. Sou profundamente grato pelo esforço incansável de ambos, que, muitas vezes, trabalharam em dobro e fizeram renúncias pessoais para que eu pudesse seguir em frente sem que nada me faltasse. Sendo assim, tal trabalho é fruto do comprometimento, dedicação e amor que sempre demonstraram.

Aos meus colegas do LaPSEE – Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – pelo apoio e ajuda durante o desenvolvimento do trabalho, principalmente, ao Rafael Yuki pela ajuda e paciência em todos os momentos em que precisei.

Agradeço também ao meu amigo Wilson Enrique Chumbi Quito por todo o apoio, ajuda e valiosas dicas durante a elaboração desta pesquisa. Sou grato pelas contribuições e pelo suporte prestado nos momentos de dificuldade ao longo das disciplinas cursadas, além de toda a conversa e descontração durante todo esse período.

Agradeço também à minha amiga Caroline Silva Bonfim pelas conversas, incentivos e apoio durante esse período de desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao Professor Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo por toda a ajuda, de modo sempre muito paciente, incentivos, confiança e amizade durante todo o trabalho.

Agradeço também ao Professor Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro por todo apoio, ajuda de modo muito paciente, conselhos em todas as vezes em que precisei e amizade durante esse processo.

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), processo 409062/2023-5.

"Os grandes feitos são conseguidos não pela força,
mas pela perseverança"

Samuel Johnson

RESUMO

O problema da reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica consiste em encontrar uma topologia radial que minimize as perdas técnicas do sistema, por meio da abertura e fechamento de chaves. Nesse processo, alguns circuitos permanecem energizados enquanto outros são desligados, permitindo modificar a estrutura da rede de acordo com objetivos operacionais específicos. Durante a reconfiguração, ocorre uma transição da topologia radial corrente para uma topologia radial ótima. Nesse contexto, este trabalho busca a sequência de chaveamentos ótima que minimize a ENS durante as topologias intermediárias, além de garantir que elas respeitem tanto os requisitos físicos quanto os operacionais ao longo de toda a sequência de manobras, de tal modo que promova uma maior continuidade do serviço, eficiência operacional e melhoria nos índices regulatórios. Entretanto, a solução, torna-se complexa devido à natureza combinatória do problema, pois o número de possíveis sequências de manobras cresce rapidamente com o tamanho da rede, uma vez que essas possibilidades resultam da permutação simples entre as chaves a serem operadas. Isso dificulta o uso de abordagens exatas, tornando necessária a adoção de técnicas heurísticas. Nesse contexto, o trabalho propõe uma abordagem baseada em meta-heurísticas, utilizando especificamente um algoritmo de Busca Tabu especializada para resolver o problema do sequenciamento ótimo das operações de chaveamento. A proposta assume que tanto a topologia inicial quanto a topologia radial ótima são previamente conhecidas. O objetivo, então, é encontrar a melhor sequência de manobras que realize a transição entre essas topologias, minimizando a ENS e respeitando as restrições operacionais da rede para um determinado perfil de demanda. Para avaliar a eficiência e robustez da estratégia proposta, foram realizados experimentos em quatro sistemas de distribuição distintos compostos por 14, 33, 84 e 136 barras. Os resultados mostram que o algoritmo é capaz de encontrar sequências eficientes de chaveamento, com significativa redução da ENS durante as transições topológicas. Os testes em redes maiores, 84 e 136, evidenciam ainda a existência de múltiplas soluções ótimas ou subótimas alternativas.

Palavras-chave: busca tabu; reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica; sequenciamento ótimo de operações de chaveamento.

ABSTRACT

The problem of optimal reconfiguration of electrical distribution systems consists of finding a radial topology that minimizes the technical losses of the system, through the opening and closing of switches. In this process, some circuits remain energized while others are turned off, allowing the network structure to be modified according to specific operational objectives. During the reconfiguration, a transition occurs from the current radial topology to an optimal radial topology. In this context, this work seeks the optimal switching sequence that minimizes the ENS during the intermediate topologies, in addition to ensuring that they respect both the physical and operational requirements throughout the entire sequence of maneuvers, in such a way as to promote greater service continuity, operational efficiency and improvement in regulatory indices. However, the solution becomes complex due to the combinatorial nature of the problem, since the number of possible maneuver sequences grows rapidly with the size of the network, since these possibilities result from the simple permutation between the switches to be operated. This makes it difficult to use exact approaches, making it necessary to adopt heuristic techniques. In this context, the work proposes an approach based on meta-heuristics, specifically using a specialized Tabu Search algorithm to solve the problem of optimal sequencing of switching operations. The proposal assumes that both the initial topology and the optimal radial topology are previously known. The objective, then, is to find the best sequence of maneuvers that performs the transition between these topologies, minimizing the ENS and respecting the operational constraints of the network for a given demand profile. To evaluate the efficiency and robustness of the proposed strategy, experiments were carried out in four different distribution systems composed of 14, 33, 84 and 136 buses. The results show that the algorithm is capable of finding efficient switching sequences, with a significant reduction in the ENS during topological transitions. Tests in larger networks, 84 and 136, also evidence the existence of multiple alternative optimal or suboptimal solutions.

Keywords: optimal reconfiguration of electric power distribution systems; optimal sequencing of switching operations; tabu search.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representação do sistema elétrico de potência 17
Figura 2 Representação do SDEE utilizando barras e ramos 18
Figura 3 Exemplo de atributo e de critério de aspiração 29
Figura 4 Pseudo-código Busca Tabu básico 29
Figura 5 Representação do processo de busca do busca tabu 30
Figura 6 Fluxograma representativo do processo de busca do busca tabu especializado 32
Figura 7 Representação de uma proposta de solução 32
Figura 8 Representação topológica do sistema de 33 barras juntamente com as chaves que serão manobradas 33
Figura 9 Proposta de solução inicial para os sistemas testes utilizados 34
Figura 10 Proposta de solução inicial otimizada para os sistemas testes utilizados . 35
Figura 11 Exemplificação de uma manobra infactível do ponto de vista topológico para o sistema de 33 barras juntamente com sua representação vetorial . 36
Figura 12 Sistema de 14 barras com a representação das chaves a serem manobradas 39
Figura 13 Evolução da ENS após cada manobra realizada para o sistema de 14 barras 40
Figura 14 Perfil de tensão nas barras para o sistema de 14 barras durante a sequência de manobra de chaves 41
Figura 15 Sistema de 33 barras com a representação das chaves a serem manobradas 42
Figura 16 Quantidade de avaliações da FO para o sistema de 33 barras 43
Figura 17 ENS ao longo das iterações do BT para o sistema de 33 barras 44
Figura 18 Evolução da ENS após cada manobra realizada para o sistema de 33 barras 45
Figura 19 Perfil de tensão nas barras para o sistema de 33 barras durante a sequência de manobra de chaves 45
Figura 20 Sistema de 84 barras com a representação das chaves a serem manobradas. 46
Figura 21 Quantidade de avaliações da FO para o sistema de 84 barras 47
Figura 22 ENS ao longo das iterações do BT para o sistema de 84 barras 48
Figura 23 Evolução da ENS após cada manobra realizada para o sistema de 84 barras 49

Figura 24 Perfil de tensão nas barras para o sistema de 84 barras durante a sequência de manobra de chaves 49
Figura 25 Sistema de 136 barras com a representação das chaves a serem manobradas 51
Figura 26 Quantidade de avaliações da FO para o sistema de 136 barras 52
Figura 27 ENS ao longo das iterações do BT para o sistema de 136 barras 55
Figura 28 Evolução da ENS após cada manobra realizada para o sistema de 136 barras 55
Figura 29 Perfil de tensão nas barras para o sistema de 136 barras durante a sequência de manobra de chaves 56
Figura 30 Trecho de um sistema de distribuição radial com duas barras 62
Figura 31 Fluxograma para o método de Newton-Raphson 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Crescimento do número de possibilidades em relação ao aumento do número de chaves para os sistemas testados 25
Tabela 2 Soluções factíveis obtidas para o sistema de 14 barras 40
Tabela 3 Tensões mínima e máxima na única manobra do sistema de 14 barras . 41
Tabela 4 Resultados obtidos para o SOC aplicado no sistema de 33 barras 43
Tabela 5 Tensões mínimas e máximas no sistema de 33 barras em cada manobra. 44
Tabela 6 Resultados obtidos para o SOC aplicado ao sistema de 84 barras 48
Tabela 7 Tensões mínimas e máximas no sistema com 84 barras em cada manobra 50
Tabela 8 Sequências equivalentes obtidas para o sistema de 84 barras 50
Tabela 9 Resultados obtidos para o SOC aplicado ao sistema de 136 barras . . . 53
Tabela 10 Sequências equivalentes obtidas para o sistema de 136 barras 53
Tabela 11 Tensões mínimas e máximas no sistema com 136 barras em cada manobra 56

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SIGLAS

AG	Algoritmo genético
BT	Busca tabu
DEC	Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora
FO	Função objetivo
FC	Fluxo de carga
GD	Geração distribuída
ENS	Energia não suprida
PNS	Potência não suprida
PCSOIM	Programação cônica de segunda ordem inteira mista
PLIM	Programação linear inteira mista
PNLIM	Programação não linear inteira mista
RSDEE	Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica
SDEE	Sistema de distribuição de energia elétrica
SEP	Sistema elétrico de potência
SOC	Sequenciamento ótimo de operações de chaveamento

LISTA DE SÍMBOLOS

Capítulo 2

Δt	Duração do intervalo de cada etapa de manobra
k	Índice da etapa do processo
N	Número total de barras do sistema
n	Número total de etapas do processo
P_i	Potência ativa associada à barra i
x_i^k	Variável binária que indica se a barra i está energizada na etapa k

Capítulo 3

N_1	Vizinhança com valores que melhoram a função objetivo
N_2	Vizinhança com valores que pioram a função objetivo
N_A	Chave normalmente aberta
n_c	Número total de chaves a serem manobradas
N_F	Chave normalmente fechada

Anexo A

A, B, C, D	Submatrizes da matriz Jacobiana do fluxo de carga
B_{ab}	Parte imaginária da admitância do ramo ab
ΔP_b	Resíduos das potências ativa e reativa da barra b
ΔQ_b	Resíduos das potências ativa e reativa da barra b
ΔV_b	Correções das variáveis do método de Newton-Raphson
$\Delta \theta_b$	Correções das variáveis do método de Newton-Raphson
ε	Tolerância utilizada como critério de convergência
G_{ab}	Parte real da admitância do ramo ab
i_{ab}	Corrente no ramo entre as barras a e b
J	Matriz Jacobiana do sistema de equações não lineares
P_a, P_b	Potência ativa nas barras a e b, respectivamente
Q_a, Q_b	Potência reativa nas barras a e b, respectivamente
R_{ab}	Resistência do ramo de conexão entre as barras a e b, respectivamente
θ_a, θ_b	Ângulos de fase das tensões nas barras a e b, respectivamente
V_a, V_b	Módulo da tensão nas barras a e b, respectivamente
Y_{ab}	Admitância do ramo de conexão entre as barras a e b
Z_{ab}	Impedância do ramo entre as barras a e b

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Importância do tema 13
1.2 Motivação do trabalho 14
1.3 Objetivos 14
1.4 Estrutura do trabalho 15

2 O PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO ÓTIMO DE CHAVES NA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 16
2.1 Sistemas de distribuição de energia elétrica 16
2.2 Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica 18
2.3 Revisão bibliográfica de trabalhos que abordam o SOC 19
2.4 Modelo matemático para o problema de SOC na RSDEE 24

3 META-HEURÍSTICA ESPECIALIZADA PARA O SOC APLICADO AO PROBLEMA DA RSDEE 27
3.1 Meta-heurísticas 27
3.2 Busca tabu 28
3.2.1 Proposta de busca tabu especializada 30
3.2.2 Etapa de Reinicialização da Busca Tabu 31
3.2.3 Descrição geral do processo e fluxograma 31
3.3 Algoritmo de busca tabu proposto para o problema de SOC 32
3.3.1 Representação de uma proposta de solução 32
3.3.2 Proposta de solução inicial da meta-heurística 34
3.3.3 Nova proposta de solução inicial da meta-heurística 34
3.3.4 Verificação da qualidade e factibilidade da função objetivo 35
3.3.5 Lógica utilizada para a geração da vizinhança 36
3.3.6 Critério de parada da Meta-heurística 37

4 TESTES E RESULTADOS 38
4.1 Resultados para o sistema de 14 barras 39
4.2 Resultados para o sistema de 33 barras 41

4.3 Resultados para o sistema de 84 barras 46
4.4 Resultados para o sistema de 136 barras 51

5 CONCLUSÕES 57

REFERÊNCIAS 59

ANEXO A - FLUXO DE CARGA 62

ANEXO B - DADOS DOS SISTEMAS UTILIZADOS PARA TESTE 66

1 INTRODUÇÃO

O problema de Sequenciamento Ótimo de Operações (SOC) aplicado ao problema da Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE) consiste em determinar, por meio da análise das topologias inicial e reconfigurada, a sequência de comutações que possibilite reduzir a ENS durante as transições.

Para resolver de forma adequada o problema de sequenciamento ótimo de manobra de chaves no sistema de distribuição, foi proposta uma meta-heurística baseada na Busca Tabu (BT) especializada que lida de forma eficiente e eficaz com à natureza combinatória do SOC. Para a validação da abordagem, foram realizados testes usando os dados de quatro sistemas: o sistema de 14 barras, o de 33 barras, o de 84 barras e o de 136 barras, nos quais os sistemas de distribuição operam com uma demanda conhecida.

1.1 Importância do tema

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é formado pelos subsistemas de geração, transmissão e distribuição. Este último é responsável pela maior parte das perdas de energia elétrica. Essas perdas podem ser especificadas como sendo do tipo técnicas e não técnicas. As perdas técnicas ocorrem, por exemplo, devido à conversão de energia elétrica em energia térmica durante o processo de distribuição, uma vez que a energia é transmitida em uma faixa de tensão inferior à utilizada na transmissão, o que provoca níveis elevados de corrente na distribuição, resultando em maior dissipação de energia (Juma; Muriithi; Ngoo, 2018).

Por outro lado, as perdas não técnicas estão associadas a fatores como furtos de energia, fraudes e erros de medição. No Brasil, as perdas totais sobre a energia injetada no sistema de distribuição são de 14,1%, das quais 7,4% são atribuídas à dissipação de energia (STR/ANEEL (coord.), 2024).

Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de estratégias de planejamento voltadas para a minimização das perdas no sistema de distribuição, como é o caso do problema de reconfiguração ótima de sistemas de distribuição, cuja Função Objetivo (FO) é a redução de perdas de potência ativa na rede.

Embora uma reconfiguração ótima já tenha sido abordada na literatura, a maioria dos estudos não explora a questão do cálculo da ENS durante o período de transição entre a topologia corrente de operação e a topologia ótima.

Dessa forma, a resolução do problema de RSDEE apresenta duas partes claramente diferenciadas:

1. Encontrar a topologia radial ótima de operação, identificando os ramos de operação e os ramos desligados na topologia ótima;

2. Realizar o sequenciamento ótimo de manobra de chaves para transformar a topologia corrente de operação na topologia ótima de operação.

Existem muitas publicações relacionadas com a primeira parte. Por outro lado, quase não existem publicações sobre a segunda parte para o problema da reconfiguração para minimizar as perdas. Este trabalho aborda a segunda parte onde deve-se otimizar a ENS pelo sistema de distribuição no processo de transição através de topologias intermediárias que devem ser factíveis. Portanto, essa proposta deve minimizar a energia não suprida, promovendo uma melhor qualidade e confiabilidade do serviço, melhora dos índices regulatórios, a saber: a Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC) e a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC), e otimizando o processo do ponto de vista econômico e operacional. Desta forma, a rede se tornará mais eficiente e preparada para futuras expansões.

1.2 Motivação do trabalho

A crescente demanda do setor elétrico gera a necessidade de estudos relacionados ao planejamento do sistema de distribuição, tanto para melhorar a qualidade da energia entregue, quanto para gerar um alívio no sistema. Nesse contexto, o problema da reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica tem sido amplamente estudado como uma solução eficiente para a minimização das perdas técnicas de potência ativa nos alimentadores. No entanto, é muito pouco abordada a questão da otimização das operações em que as chaves devem ser manobradas durante o processo de transição, ou seja, entre a topologia inicial e a obtida pela reconfiguração. Dessa forma, este trabalho visa contribuir para a operação eficiente dos sistemas de distribuição ao integrar a otimização da sequência de chaveamentos à reconfiguração.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma abordagem baseada na meta-heurística busca tabu especializada, visando otimizar as comutações entre as topologias durante o processo de reconfiguração do sistema. Essa abordagem visa reduzir a ENS e aprimorar a eficiência operacional da rede, contribuindo para uma distribuição de energia mais confiável e economicamente viável. Dessa forma, para tal, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Contribuir para o avanço das técnicas de reconfiguração e operação de sistemas de distribuição de energia, promovendo soluções que garantam a operação de redes mais seguras, resilientes e preparadas para os desafios do setor elétrico.

- Desenvolver e implementar uma estratégia baseada na busca tabu especializada que permita explorar eficientemente o espaço de soluções, identificando a sequência ótima de operações de chaveamento que minimize a ENS durante as transições.
- Realizar estudos de caso e simulações em sistemas de diferentes tamanhos, a saber: 14, 33, 84 e 136 barras com o intuito de verificar o desempenho da abordagem proposta considerando um cenário com demanda fixa no sistema de distribuição.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, a saber:

- No **Capítulo 1**, aborda-se uma introdução do problema juntamente com uma motivação para seu desenvolvimento além dos objetivos em questão.
- No **Capítulo 2**, discute-se sobre o problema de SOC em RSDEE sendo que aborda-se uma introdução sobre o conceito de sistemas de distribuição de energia elétrica; reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica; uma revisão bibliográfica de trabalhos que trazem uma abordagem do SOC.
- No **Capítulo 3**, faz-se uma introdução geral sobre meta-heurísticas e uma análise da meta-heurística abordada nesta pesquisa, ou seja, a BT. Adicionalmente é explicado o passo a passo de como foi efetuada a proposta especializada para a resolução do SOC em RSDEE.
- No **Capítulo 4**, são apresentados os resultados para os quatro sistemas testados além de uma discussão de tais resultados obtidos.
- No **Capítulo 5**, apresenta-se uma conclusão além de melhorias, tanto melhorias possíveis para trabalhos futuros quanto sobre a adição de novos sistemas testes.

Por fim, o trabalho conta com dois anexos, a saber: os Anexos A e o B. No primeiro é efetuada uma explicação e desenvolvimento do método utilizado para a verificação da factibilidade das soluções. Já no segundo, são apresentados os dados dos ramos e das barras para os quatro sistemas testes utilizados no trabalho.

2 O PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO ÓTIMO DE CHAVES NA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica tem como objetivo principal a redução das perdas técnicas durante a operação do sistema. Esse processo é realizado por meio da troca de um circuito energizado com um ramo de ligação, o que provoca alterações topológicas na rede. Durante essas operações e mudanças topológicas é relevante a minimização da ENS. Essa abordagem busca garantir uma maior qualidade no fornecimento de energia aos consumidores, além de proporcionar uma economia adicional ao sistema, decorrente da redução das perdas energéticas ao longo da operação. Neste capítulo, será apresentada uma introdução aos SDEE, uma discussão do problema de RSDEE e, por fim, a modelagem do SOC e a sua aplicação integrada à otimização do processo.

2.1 Sistemas de distribuição de energia elétrica

O sistema de distribuição de energia elétrica corresponde à etapa final do SEP, sendo responsável por conduzir a energia elétrica até os consumidores. Essa energia é convertida, no sistema de geração, a partir de diversas fontes primárias, como usinas termelétricas, hidrelétricas e eólicas (Silva, 2019). Sendo que na geração, máquinas síncronas atuam como geradores. Nas hidrelétricas, a energia potencial movimenta turbinas hidráulicas; nas termelétricas, o vapor resultante da queima de combustíveis fósseis aciona turbinas a vapor e, por fim, nas usinas eólicas, é devido a movimentação dos aerogeradores. Em todos os casos exemplificados, a energia mecânica é convertida em energia elétrica, por meio da indução eletromagnética, uma vez que o rotor está girando dentro de um campo magnético (Timoteo; Faesarella, 2017).

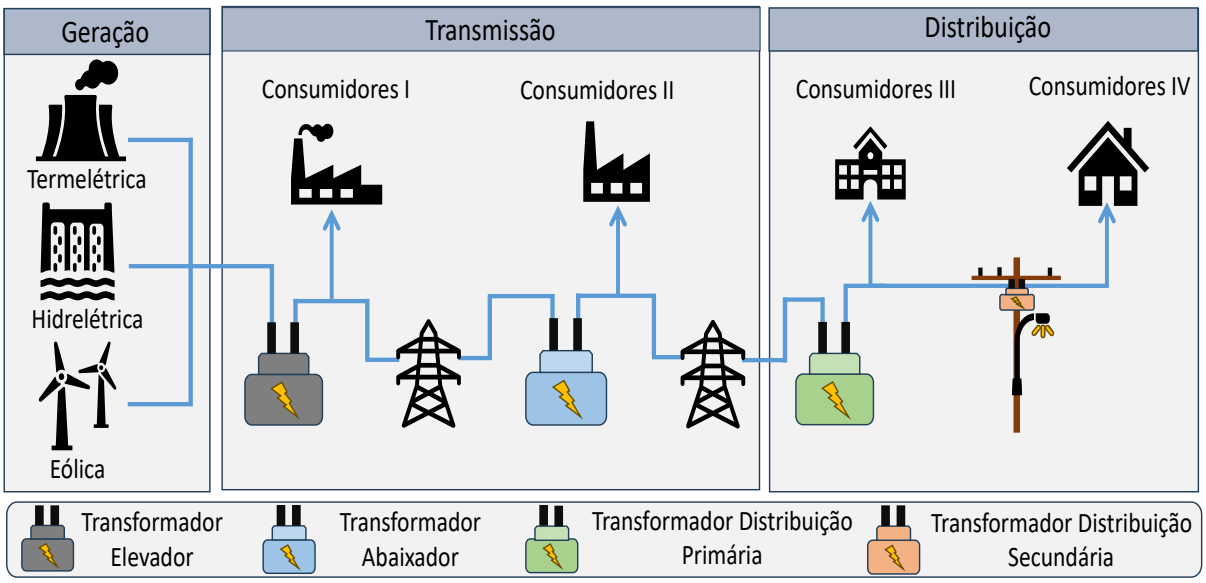
Adicionalmente, após a geração, é iniciado um novo estágio onde a eletricidade passa por uma subestação elevadora, onde transformadores elevadores aumentam a tensão para níveis adequados à transmissão, o que possibilita o transporte eficiente por longas distâncias, com uma menor dissipação. Nesse estágio, grandes consumidores industriais (Consumidores I) podem ser atendidos diretamente. Em seguida, a energia elétrica chega em uma subestação abaixadora, onde transformadores abaixadores reduzem a tensão para níveis de subtransmissão, permitindo o fornecimento a consumidores que operam nessa faixa, como indústrias de médio porte (Consumidores II).

A partir dai, ela é injetada no sistema de distribuição, passando por subestações de distribuição, onde transformadores de distribuição primária ajustam a tensão para níveis apropriados ao atendimento de comércios e pequenas indústrias (Consumidores III). Finalmente, a energia chega aos transformadores de distribuição secundária, normalmente instalados em redes aéreas

próximas a áreas residenciais, que reduzem a tensão para níveis compatíveis com os equipamentos dos consumidores finais (Consumidores IV) (Oliveira; Kagan; Robba, 2012).

Assim sendo, por meio desses estágios, ou seja, desde a geração até a distribuição é possível que a energia chegue dentro dos padrões de qualidade e segurança às residências, comerciantes e industrias. A estrutura geral simplificada do SEP pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Representação do sistema elétrico de potência

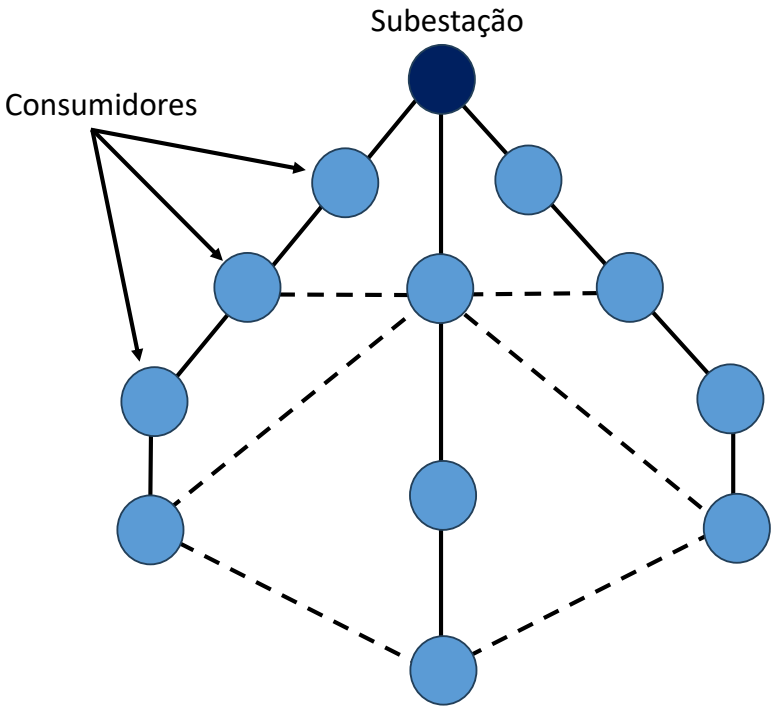


Fonte: Elaborado pelo autor.

Adicionalmente, os sistemas de distribuição operam normalmente de modo radial, embora sua topologia seja composta por diversas interconexões, formando uma topologia malhada. Essa característica é devida às chaves de interligação normalmente abertas, que asseguram a radialidade durante a operação normal, ao mesmo tempo em que oferecem flexibilidade para manobras e contingências.

Nesse contexto, o sistema pode ser modelado por meio de uma representação composta por barras (vértices) e ramos (arestas), em que as barras correspondem às subestações e pontos de demanda, enquanto que os ramos representam os circuitos de conexão e interconexão entre essas barras. Assim, permite-se a aplicação da teoria dos grafos o que facilita a identificação de interconexões críticas, e a identificação de rotas alternativas de fornecimento, contribuindo à otimização dos processos operacionais e de manutenções programadas. A Figura 2 representa essa abordagem.

Figura 2 - Representação do SDEE utilizando barras e ramos



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica

A reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica é um desafio relevante na operação de redes de distribuição. Como mencionado, essas redes possuem estrutura fisicamente malhada, mas operam, em condições normais, de forma radial. Essa característica permite realizar reconfigurações com objetivos operacionais diversos, como a redução de perdas técnicas (Oliveira, 2021).

Para cada configuração, há dois subconjuntos de circuitos: os energizados, que formam uma estrutura radial (ou árvore, segundo a teoria dos grafos), e os desenergizados, denominados ramos de ligação. Assim sendo, a troca entre um ramo energizado e um ramo de ligação gera uma nova configuração radial (Possagnolo, 2015).

Portanto, o problema de reconfiguração ótima tem como objetivo identificar, dentre todas as configurações radialmente viáveis, aquela que minimiza as perdas de potência ativa no sistema de distribuição. Resolver esse problema exige a avaliação de múltiplas topologias radiais possíveis.

Do ponto de vista matemático, trata-se de um problema de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), com natureza combinatória, o que o torna complexo e amplamente estudado na área de otimização de sistemas elétricos. Sua formulação genérica pode ser visualizada na

sequência:

Minimizar as perdas de potência ativa no sistema de distribuição

Sujeita às seguintes condições:

(i) Satisfazer as duas Leis de Kirchhoff no sistema elétrico de distribuição.

(ii) Satisfazer os limites de tensão nas barras e as correntes nos ramos.

(iii) Garantir que a topologia resultante seja radial.

2.3 Revisão bibliográfica de trabalhos que abordam o SOC

Carvalho, Ferreira e Barruncho (2007) abordaram o problema de restauração de falhas em redes de distribuição de energia elétrica em duas etapas, o que permite uma maior eficiência e segurança operacional. Inicialmente, o método baseia-se em técnicas evolutivas, utilizando-se de um Algoritmo Genético (AG) adaptado para este tipo de problema que ao invés de utilizar representações tradicionais baseadas em sequências de bits, adota uma modelagem baseada em relações de precedência entre os nós da rede, o que preserva as propriedades topológicas, por exemplo, a conectividade e a radialidade. Essa representação possibilita a recombinação de soluções de maneira que "blocos" estruturais sejam mantidos, reduzindo a ocorrência de soluções infactíveis e acelerando a convergência para a configuração pós-falta de menor custo.

Adicionalmente, após a resolução da primeira etapa, o estudo direciona para a definição do sequenciamento das operações de comutação. Para isso, utiliza-se programação dinâmica, o que garante que, em cada transição, a rede mantenha sua factibilidade elétrica, minimizando os riscos e evitando novas falhas durante o processo de restauração. Além disso, contribui para maximizar a satisfação dos clientes, uma vez que permite uma recuperação gradual do fornecimento, mesmo sob condições operacionais restritivas.

Os autores realizaram testes em um sistema de distribuição de 663 nós, em um contexto envolvendo uma falha em um alimentador e, por consequência, a interrupção do fornecimento a 62 transformadores. Os resultados mostraram uma rápida convergência do AG, que atingiu a solução ideal em 36 gerações com uma população de 50 soluções candidatas, evidenciando ainda a existência de alternativas multiobjetivas. Por exemplo, soluções que garantem a total viabilidade podem demandar 11 operações de comutação, enquanto uma leve sobrecarga de 13% permite a restauração com apenas 5 operações.

Arcanjo (2014) propõe um método multiestágio utilizando algoritmos bio-inspirados para a resolução do problema de restabelecimento de sistemas elétricos de distribuição. A abordagem faz uso de três técnicas distintas, a saber: algoritmos genéticos, o método de eco-localização

de morcegos e o método de reprodução dos pássaros cuco e o processo é dividido em dois estágios. O primeiro estágio consiste na formulação e solução de um problema de otimização multiobjetivo para a determinação da configuração final das chaves após o isolamento dos ramos afetados. Entre os critérios considerados, destacam-se a minimização da carga não suprida (com priorização de consumidores críticos), a redução das perdas de energia e a minimização do número de operações de chaveamento, sempre respeitando as restrições operacionais, como os limites de tensão, correntes e a manutenção da topologia radial da rede.

No segundo estágio, é determinada a sequência ótima de chaveamento que permite a transição segura da topologia inicial para a configuração ideal obtida no primeiro estágio. Essa sequência considera o tempo de manobra dos dispositivos e, quando necessário, a aplicação de cortes mínimos de carga para garantir o atendimento às restrições operacionais e à continuidade do fornecimento de energia.

A estratégia foi testada em dois sistemas teste (16 e 33 barras), utilizando-se do ambiente MATLAB® para a realização das simulações. Os resultados obtidos mostraram a eficiência da abordagem proposta, com destaque para a robustez na identificação de configurações viáveis e eficientes, além da capacidade de encontrar sequências de chaveamento que proporcionam menor ENS, maior agilidade no restabelecimento e melhor desempenho operacional em comparação com métodos convencionais.

Badran *et al.* (2017) propõem uma abordagem para a reconfiguração de redes de distribuição que busca tanto a configuração topológica ideal como também a sequência ótima de operações de chaveamento que leva a configuração inicial da rede na configuração ótima. O método proposto considera de forma integrada a reconfiguração da rede e a otimização da potência gerada por diferentes tipos de Geração Distribuída (GD), com o objetivo de tanto à redução das perdas energéticas quanto a melhoria do perfil de tensão do sistema.

A metodologia apresentada é dividida em duas etapas. Na primeira, realiza-se a otimização tanto da configuração da rede quanto da operação dos GDs, considerando-se uma função de *fitness* composta pela razão entre as perdas antes e depois da reconfiguração e por um índice de estabilidade de tensão. Isso permite que o sistema mantenha os níveis de tensão dentro dos limites operacionais, ao mesmo tempo em que minimiza as perdas diárias.

Além disso, para contornar a complexabilidade combinatória do problema, os autores utilizaram o algoritmo bioinspirado *Firefly* (FA), o qual é eficiente em problemas com múltiplas restrições, como a manutenção da topologia radial, o equilíbrio de potência e os limites operacionais dos GDs. Já a segunda etapa, está relacionada à determinação da sequência ideal de comutação, buscando minimizar as perdas e evitar uma violações nos limites de tensão durante o processo de transição entre topologias sendo que o método impõe restrições, por exemplo, evitar que um mesmo interruptor seja operado mais de uma vez ou que haja interrupções no fornecimento de carga.

Os testes foram realizados em um sistema de 33 barras e os resultados mostraram uma redução significativa das perdas diárias de energia, além de uma melhora no perfil de tensão. Além disso, o desempenho do algoritmo FA foi comparado com outros métodos, isto é, o *Gravitational Search Algorithm* (GSA) e o *Imperialist Competitive Algorithm* (ICA), mostrando-se superior tanto na minimização das perdas quanto na manutenção da estabilidade do sistema. Dessa forma, o trabalho apresentada uma metodologia que considera não apenas a configuração final da rede, mas também os aspectos operacionais presentes no processo de reconfiguração, com destaque para a inclusão da GD e a definição de um caminho ótimo de chaveamento.

Juma, Muriithi e Ngoo (2018) propõem um método voltado à redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica que é baseado na determinação da sequência ótima de comutação dos dispositivos de chaveamento durante a reconfiguração dos alimentadores. Para isso, foi utilizado um algoritmo metaheurístico *Modified Shark Smell Optimization* (MSSO), que é inspirado na capacidade dos tubarões de detectar odores no ambiente marinho. Os testes foram realizados em um sistema IEEE (33 barras) e os resultados indicaram que a aplicação do método proporcionou uma redução de 33,35% nas perdas de energia, além de promover uma melhora significativa no perfil de tensão.

A proposta se destaca por apresentar uma solução para a otimização da topologia da rede com base em critérios de operação reais. Observa-se, também, a utilização do MSSO foi superior não apenas pelos resultados obtidos em relação à eficiência energética, mas também pela redução no tempo de convergência nas simulações, o que reforça seu potencial para aplicações em tempo real.

Além disso, ao fazer uma comparação com outras abordagens utilizadas, como algoritmos genéticos ou PSO, o MSSO, demonstrou-se um desempenho superior tanto na minimização de perdas quanto na melhoria do perfil de tensão. Adicionalmente, ao não exigir alterações físicas na infraestrutura da rede, a solução proposta se mostra economicamente atrativa e tecnicamente viável, especialmente em contextos que demandam decisões rápidas e confiáveis para a operação de redes inteligentes.

Souza (2018) apresenta um modelo matemático de programação cônica de segunda ordem inteira mista (PCSOIM) para o problema de SOC em redes de distribuição. No modelo proposto, o objetivo é a determinação da sequência ótima para a transição entre a topologia inicial e a proposta pela reconfiguração. Adicionalmente, tal modelo pode ser utilizado tanto em RSDEE quanto em uma reconfiguração do ponto de vista restaurativo da rede. Para os testes, foi utilizado um sistema de 53 barras e o modelo matemático foi resolvido utilizando o AMPL (*A Mathematical Programming Language*) e o CPLEX (*Complex Linear Programming Expert*).

A análise dos métodos propostos para a resolução do Problema de Restauração em Sistemas de Distribuição (PRSD) e do SOC mostram a importância de uma abordagem integrada que combine modelagem matemática com estratégias flexíveis para reconfiguração e restauração de

redes elétricas. Diversos trabalhos têm contribuído para este campo, apresentando soluções que vão desde modelos matemáticos completos até métodos que priorizam a eficiência computacional em aplicações de grande porte.

Observa-se que as propostas apresentadas se dividem basicamente entre duas abordagens. A primeira utiliza modelos matemáticos como problemas de PCSOIM, sendo que Esses modelos são capazes de representar com exatidão as restrições topológicas, como a manutenção da topologia radial dos sistemas elétricos, bem como as restrições operacionais impostas pelos limites de tensão e o balanço de carga em sistemas trifásicos equilibrados.

Essas características possibilitam que as soluções obtidas não só minimizem as perdas de energia, mas também garantam a segurança e a estabilidade da operação. Já em relação a segunda abordagem, tem-se modelos relaxados, baseados em Programação Linear Inteira Mista (PLIM), que, ao flexibilizar algumas restrições operacionais, conseguem reduzir o tempo computacional necessário para a obtenção de soluções. Essa estratégia é fundamental para aplicações em sistemas de grande porte e em cenários que demandam respostas em tempo real.

Adicionalmente, o sequenciamento das operações de chaveamento foi abordado de modo complementar, permitindo, portanto, a determinação da sequência ótima para a transição entre a topologia inicial e a proposta pela reconfiguração. Essa separação, observada em pesquisas mais recentes, torna possível aplicar os métodos tanto de forma conjunta quanto de maneira independente, ampliando a flexibilidade das estratégias de resolução e possibilitando a minimização da energia não suprida durante a transição topológica.

Os resultados obtidos nos testes mostram os benefícios das abordagens integradas, sendo que dentre os resultados mais significativos, destacam-se a redução das perdas elétricas além de uma melhoria do perfil de tensão o que mantêm a operação dentro dos limites operacionais ideais e uma eficiência computacional demonstrada por tempos de processamento reduzidos.

Mubarak *et al.* (2022) propõem métodos com objetivo tanto reduzir os custos operacionais quanto de efetuar a otimização da operação de redes de distribuição durante a transição para uma operação sustentável. O trabalho tem como objetivo principal de efetuar uma redução das perdas energéticas e controlar os desvios de tensão, de modo a alcançar uma operação que seja eficiente e confiável. Para isso, foi utilizada uma modelagem matemática baseada em PCSOIM, que permite determinar a configuração ótima da rede e a sequência de operações de chaveamento que resultam na menor perda de potência durante a transição entre as configurações e a proposta foi dividida em dois estágios.

No primeiro estágio, a reconfiguração da rede é otimizada, visando minimizar as perdas de energia e os desvios de tensão sendo fundamentais para reduzir os custos operacionais e garantir a sustentabilidade da operação. Já no segundo estágio, foi definida uma sequência de chaveamento ideal, que promove a transição da configuração inicial para a configuração final,

mantendo a rede em condições de operação segura e minimizando a perda de energia ao longo do processo. Uma característica do trabalho é a utilização de um conjunto de dados baseado na distância de *Hamming* para a redução do espaço de busca das possíveis sequências, restringindo a análise apenas às combinações viáveis que preservam a topologia radial da rede. Isso permite que o problema, que tem uma alta complexidade computacional, seja solucionado de forma mais eficiente e com menor tempo de convergência.

Os testes foram realizados em dois sistemas distintos: um sistema IEEE composto por 33 barras e um sistema prático real de 71 barras, instalado na Malásia. Nos experimentos, observou-se uma redução significativa das perdas de energia e uma melhoria no perfil de tensão da rede, fatores que contribuem diretamente para a redução dos custos operacionais. Os resultados demonstram que a abordagem integrada (combinando a otimização exata por PCSOIM com a redução do espaço de busca via dados de *Hamming*) é capaz de gerar uma solução robusta, que permite a operação sustentável da rede inclusive em situações dinâmicas de comutação.

Ferreira (2024) analisa o problema de restauração em sistemas de distribuição de energia elétrica. Tal problema foi abordado de forma análoga ao problema do SOC cujo objetivo foi o de minimizar a energia não suprida durante o processo de restauração da rede. Adicionalmente, o método foi a apresentação de meta-heurísticas especializadas de BT em vizinhança variável básica, as quais foram capazes de determinar as sequências factíveis de restauração. Além disso, os testes foram efetuados utilizando um sistema de 53 barras.

Lima (2024) desenvolve um novo método para a análise de problemas relacionados à restauração de sistemas de distribuição de energia. Uma abordagem que faz a utilização de um algoritmo genético em um algoritmo de sequência de chaveamento (ASC). Esse método é capaz de determinar a ordem de chaveamentos que leva à topologia ideal do sistema após uma falta na rede. Adicionalmente, foram utilizados para testes dois sistemas, a saber: um sistema de 34 barras e um de 123 barras.

O trabalho propõe uma integração entre o AG e o ASC, na qual o AG é empregado inicialmente para identificar a configuração pós-falta mais adequada, respeitando as restrições operacionais, como limites de tensão, correntes e a manutenção da topologia radial. A partir dessa configuração ótima, o ASC é aplicado para definir uma sequência segura e eficiente de operações de chaveamento, de tal modo que ocorra uma transição gradual do sistema para a nova topologia, minimizando a ENS e os custos operacionais.

Os testes foram realizados por meio do software OpenDSS com controle em Python e mostraram a robustez e aplicabilidade da metodologia. Aleém disso, nos dois sistemas de teste, ou seja, sistemas de 34 e 123 barras, os resultados demonstraram significativa redução na ENS, uma manutenção da estabilidade da rede e a viabilidade prática das sequências de chaveamento propostas. A abordagem, portanto, mostrou-se especialmente eficaz em sistemas de maior porte, sinalizando seu potencial de aplicação em ambientes reais de operação.

Além disso, destaca-se a importância da consideração das características dos dispositivos de chaveamento no processo de restauração, fator que contribui diretamente para a segurança das operações. A integração de técnicas evolutivas com estratégias operacionais torna o método proposto uma contribuição relevante tanto do ponto de vista técnico quanto estratégico, apresentando-se como uma alternativa promissora para a modernização dos processos de restauração em redes de distribuição.

2.4 Modelo matemático para o problema de SOC na RSDEE

O problema do SOC no RSDEE consiste em determinar a sequência ótima de operações de chaveamento possível para, partindo de uma configuração inicial conhecida, alcançar uma configuração final idêntica definida pela reconfiguração. Dessa forma, por meio das topologias iniciais e finais previamente previstas, o desafio está, portanto, na identificação das topologias intermediárias até encontrar a topologia final que garantem uma transição através de topologias factíveis e minimizando a ENS durante todo esse processo de transições.

Além disso, as chaves de interconexão, presentes nos ramos que conectam as barras, podem estar em dois estados: normalmente fechado (NF) ou normalmente aberto (NA). Quando uma chave se apresenta em estado NA deve ser fechada, e a manobra realizada deve preservar a topologia radial da rede. Por outro lado, se a operação implicar na abertura de uma chave, é possível que determinadas barras permaneçam temporariamente isoladas, gerando um aumento na ENS durante o processo.

É de fundamental importância que uma interrupção de energia seja minimizada, uma vez que interrupções podem gerar impactos negativos para os consumidores industriais, comerciais e residenciais. Interrupções podem ocasionar prejuízos financeiros devido à paralisação de atividades e, ainda, causar danos a equipamentos elétricos por conta dos picos de energia durante o restabelecimento.

Nesse contexto, o problema apresenta uma complexidade combinatória, pois envolve dois conjuntos de chaves, ou seja, NA e NF e o número total de operações possíveis é determinado pela permutação simples do número de elementos gerados pela união desses conjuntos, o que, mesmo com um pequeno aumento no número de chaves, resulta em um crescimento explosivo das combinações. Essa característica torna a resolução do problema um desafio significativo, exigindo abordagens inovadoras e eficientes para encontrar soluções viáveis em tempo hábil.

Por meio da Tabela 1, pode-se visualizar esse aumento para os sistemas testados que foram utilizados durante o desenvolvimento do trabalho. Dessa forma, o número de sequências tem uma natureza combinatória, assim sendo, para sistemas de grande porte não é viável gerar todas as permutações possíveis para que, posteriormente a isso, elas sejam testadas com o objetivo de se obter as factíveis e, do conjunto das factíveis, as que apresentem uma menor ENS durante

o processo. Portanto, foi desenvolvida uma meta-heurística especializada para a resolução do presente problema, pois, por meio dela, é possível diminuir drasticamente o número de sequências geradas e, consequentemente, uma redução do número de problemas de fluxo de carga que devem ser resolvidos para verificar a factibilidade.

Tabela 1 - Crescimento do número de possibilidades em relação ao aumento do número de chaves para os sistemas testados

Sistemas testados	Número de chaves para manobra	Número de possibilidades de sequências
Sistema de 14 barras	4	24
Sistema de 33 barras	8	40.320
Sistema de 84 barras	18	$6,4024 \times 10^{15}$
Sistema de 136 barras	18	$6,4024 \times 10^{15}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, o problema em questão tem como função objetivo a minimização da ENS acumulada durante o período de transição entre as topologias, sujeita tanto aos requisitos topológicos quanto às restrições operacionais da rede, além disso modelo mostrado na sequência foi adaptado de Ferreira (2024). O cálculo da Potência Não Suprida (PNS) na etapa k, a soma da PNS ao longo das n etapas e a ENS acumulada ao longo de todas as etapas são obtidos, respectivamente, por meio de (1)–(3):

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

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

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

A seguir, apresenta-se a formulação da função-objetivo em (4) e suas respectivas condições:

$$\min \quad \mathrm{ENS} \; = \sum_{k=1}^{n} \mathrm{PNS}_k \, \Delta t \tag{4}$$

Sujeita 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.

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

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

Além disso, a potência demandada no nó 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 nós 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 potência não suprida na etapa k, e $\text{PNS}_{\text{total}}$ representa a soma das potências não supridas ao longo das n etapas. Já a energia não suprida 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 META-HEURÍSTICA ESPECIALIZADA PARA O SOC APLICADO AO PROBLEMA DA RSDEE

A resolução do SOC aplicado à RSDEE demanda uma estratégia capaz de lidar com sua característica combinatória. As meta-heurísticas são técnicas amplamente utilizadas nessas situações, uma vez que permitem encontrar soluções de boa qualidade em um tempo computacional viável. Este capítulo apresenta uma introdução ao conceito de meta-heurísticas, destacando suas características gerais e, de modo específico, o funcionamento da busca tabu.

Adicionalmente, será apresentada uma versão especializada da BT, desenvolvida para atender às especificidades do SOC em RSDEE. Essa versão utiliza uma estratégia de reinicialização, que busca ampliar a diversidade e evitar a estagnação da busca e uma estrutura de vizinhança. Por fim, será descrito o algoritmo completo, incluindo a representação das soluções, os critérios de avaliação da FO, a factibilidade das sequencias obtidas, a lógica para geração da vizinhança e o critério de parada adotado pela meta-heurística.

3.1 Meta-heurísticas

Nos problemas de otimização matemática, existem três elementos fundamentais para a resolução dos problemas, isto é, a FO, as variáveis de decisão e as restrições que têm como intuito fazer a limitação dos valores de tais variáveis. O objetivo principal desses problemas é minimizar ou maximizar a FO a qual pode envolver um único objetivo ou múltiplos objetivos, em que todos estão sujeitos ao mesmo conjunto de restrições e variáveis de decisão. Entretanto, com o avanço do desenvolvimento tecnológico em diversos setores da sociedade, surgem diversos novos problemas e desafios, sendo que, em alguns, o modelo matemático ainda não foi obtido ou, caso tenha sido encontrado, pode ser resolvido apenas em pequenas instâncias por meio da utilização dos métodos exatos de otimização, ou seja, métodos que garantem a solução ótima, fazendo a utilização de todo o espaço de busca.

Neste cenário, foram efetuadas pesquisas que visavam contornar esse problema, ou seja, o desenvolvimento de métodos capazes de gerar uma resolução rápida e eficaz em um tempo computacional razoável e tais métodos podem ser classificados como técnicas heurísticas e meta-heurísticas (Abdel-Basset; Abdel-Fatah; Sangaiah, 2018). Sendo que as técnicas heurísticas são estratégias utilizadas para encontrar soluções boas locais sem garantia de ser a ótima global, porém de maneira rápida para problemas complexos. Em outras palavras, um problema com um caráter combinatório, gerando um enorme espaço de busca ou em um problema em que é muito complicado fazer sua representação matemática. Já as meta-heurísticas, como o próprio nome diz, devido ao seu prefixo *meta*, o qual significa mais abrangente (Zapelini, 2009).

Assim sendo, técnicas meta-heurísticas fazem uma combinação de técnicas heurísticas com técnicas especializadas com o intuito de se obter uma solução mais próxima do ótimo global e, portanto, elas têm uma maior complexidade na sua confecção, porém uma melhor garantia de chegar próximo ou até à solução ótima. Além do mais, para que a meta-heurística tenha sucesso é necessário representar de uma forma eficiente a proposta de solução, sendo que tal representação deve permitir que seja possível obter uma solução inicial factível para o problema que pode ser, por exemplo, a solução trivial; permitir que seja verificado tanto a qualidade quanto a sua factibilidade, e permitir que seja efetuado tanto uma estruturação da vizinhança quanto uma busca pelo espaço de busca.

3.2 Busca tabu

A meta-heurística BT é uma técnica de otimização desenvolvida por Glover e tem como objetivo encontrar uma solução ótima ou próxima da ótima por meio de uma estratégia de busca eficaz e seletiva. Isso é possível devido tanto à característica atributiva de sua memória quanto à de sua vizinhança com características de alteração durante o processo de busca. Sua memória faz o armazenamento de informações e atributos das soluções anteriores encontradas e as classifica em uma lista tabu; isso é efetuado com o intuito de que a busca não retorne às soluções já visitadas, possibilitando a exploração de uma nova vizinhança (Glover, 1995).

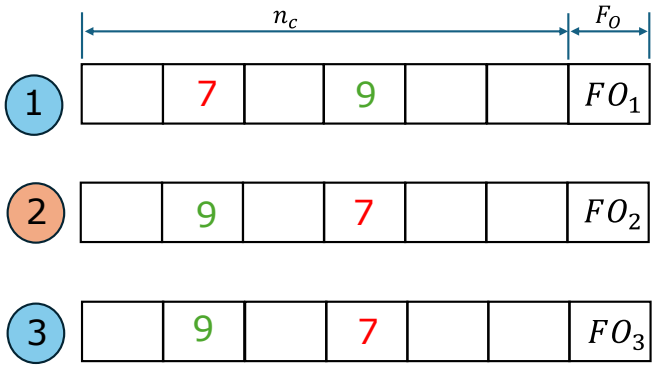
Adicionalmente, existem dois tipos de memória em busca tabu: a memória de curta duração e a de longa duração, sendo que cada memória é acompanhada por suas estratégias. A memória de curta duração tem como estratégia um controle dos atributos que mudaram recentemente e, portanto, é conhecida como memória baseada em recência. Esse tipo de memória designa os atributos visitados anteriormente para a lista Tabu, impedindo, portanto, a busca por soluções já visitadas recentemente (Glover, 1995).

Além disso, quando um atributo é adicionado à lista tabu, o objetivo é evitar que uma solução correspondente seja revisitada. No entanto, um tabu está condicionado a um contexto específico e, portanto, pode ser contornado, caso seja justificado. Para isso, existem os critérios de aspiração, que têm a função de flexibilizar a aplicação da restrição de tabu. Ou seja, se uma solução já visitada tem um atributo compartilhado com uma solução vizinha de ótima qualidade, ela pode ser considerada novamente. Um exemplo típico de aspiração está relacionado ao valor da FO. Nesse caso, um movimento que conduza a uma solução com um valor de FO melhor do que as soluções anteriormente visitadas podem ser aceitas, pois isso resultaria em uma melhoria no desempenho da busca na nova vizinhança (Glover, 1995).

Na Figura 3, pode-se visualizar um exemplo de atributo e de critério de aspiração em que, tem-se três sequências juntamente com seus respectivos valores de FO e na exemplificação, o problema é de minimização. Na sequência 1, tem-se o par de chaves (7, 9), que foi recen-

temente trocado para gerar essa solução. Por consequência, esse par foi registrado como um atributo tabu, impedindo que a troca inversa (9, 7) seja realizada nas próximas iterações. Na sequência 2, observa-se a tentativa de aplicar o movimento tabu (9,7). Entretanto, tal movimento está proibido e, portanto, essa sequência será descartada. Porém, na terceira sequência, o mesmo movimento tabu é considerado novamente, mas, como nessa sequência, o valor da função objetivo é menor do que a da primeira. Isso aciona o critério de aspiração, permitindo que o movimento seja aceito devido à qualidade significativamente superior da solução obtida.

Figura 3 - Exemplo de atributo e de critério de aspiração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a memória de longa duração tem um armazenamento maior, o que permite registrar um histórico mais extenso e, por consequência, mais informações obtidas durante a busca, o que é melhor para o seu direcionamento em rumo à otimalidade global (Carvalho *et al.*, 2008). Sua estratégia é baseada em frequência, ou seja, a operação ocorre tanto por penalidades quanto por incentivos, os quais são determinados pelo tempo em que os atributos pertencem às soluções visitadas (Glover, 1995). Por meio do pseudo-código, representado na Figura 4, pode-se visualizar um algoritmo genérico para o busca tabu básico.

Figura 4 - Pseudo-código Busca Tabu básico

Inicialização: Encontre uma solução inicial, que será a solução corrente.
Repetir:

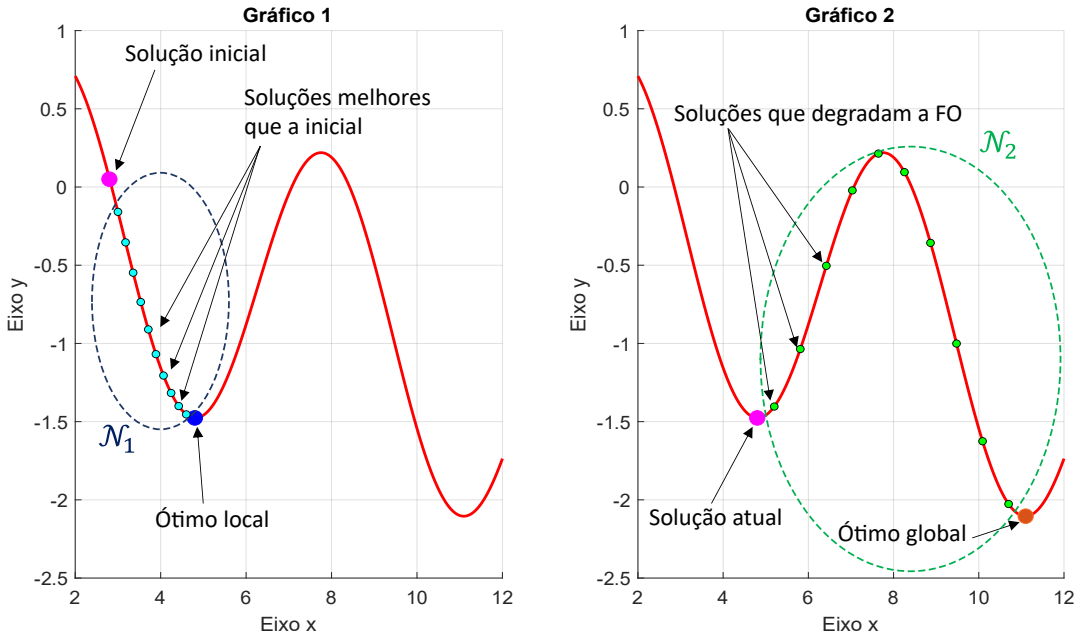
1. Identifique e ordene todas as soluções vizinhas da solução corrente por qualidade, colocando a melhor solução em primeiro lugar.
2. Transite para a melhor solução vizinha que não tenha sido visitada anteriormente.
3. Atualize a solução corrente e a incumbente.

Até: O critério de parada ser alcançado.

Fonte: (Glover; Laguna, 1997).

Além disso, ela utiliza uma modalidade de vizinhança que muda constantemente, ou seja, após explorar uma vizinhança, por exemplo, N_1, o BT permite uma movimentação para que uma nova seja explorada, N_2, mesmo que essa resulte em uma piora do valor obtido da FO anteriormente. Isso aumenta a chance de sucesso na resolução do problema. Na Figura 5, pode-se visualizar um exemplo representativo da busca tanto na vizinhança que contribui com a melhora da FO quanto naquelas que degradam o seu valor.

Figura 5 - Representação do processo de busca do busca tabu



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Gomes (2008).

Ademais, essa meta-heurística utiliza uma abordagem que é baseada em uma combinação estratégica da intensificação e da diversificação durante o processo de busca. A intensificação é baseada em uma modificação nos parâmetros de escolha com o intuito de novas combinações entre os movimentos que historicamente são bons, e a diversificação busca a incorporação de atributos que não foram incluídos nas soluções anteriores. Dessa forma, tal combinação permite tanto que a busca não fique estagnada em soluções locais quanto que consiga até mesmo obter a ótima global (Glover; Laguna, 1997).

3.2.1 Proposta de busca tabu especializada

O método proposto consiste em um algoritmo BT adaptado para resolver o problema de SOC aplicado na RSDEE. Na abordagem convencional de busca tabu, 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, onde se armazenam os atributos das soluções visitadas a fim de evitar revisitações

e, assim, impedir que a busca fique presa em ciclos redundantes.

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 otimizadas. A BT começa o processo partindo de uma solução inicial que, após ser melhorada, é considerada como a solução incumbente (SI), isto é, a melhor solução conhecida até o momento e, a cada iteração, explora soluções vizinhas com o intuito de encontrar soluções mais eficientes, além disso, a cada iteração a solução corrente (SC) é defenda como sendo a SI.

Ao longo da busca, são evitadas repetições por meio de uma Lista Tabu com memória de curta duração que armazena as soluções visitadas e seus valores de FO, permitindo descartar vizinhos já explorados. Além disso, mecanismos de reinicialização são empregados quando a exploração local não apresenta uma melhoria. Essa combinação visa acelerar a convergência para soluções de qualidade, mantendo um bom equilíbrio entre exploração e intensificação.

3.2.2 Etapa de Reinicialização da Busca Tabu

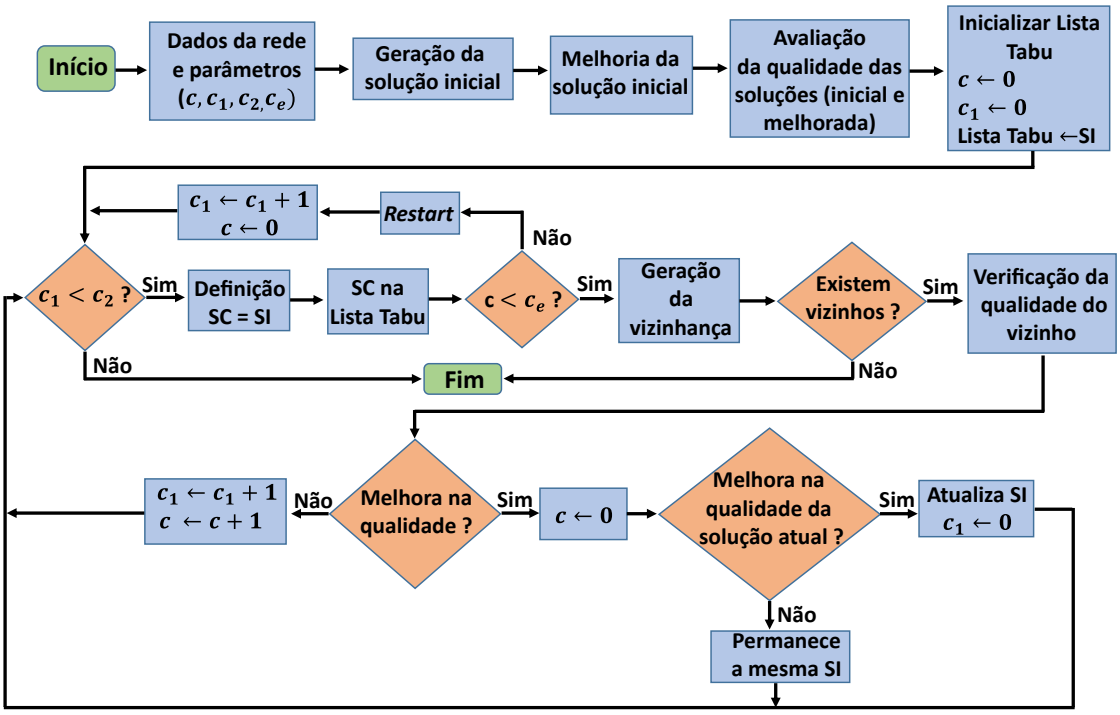
Para evitar a estagnação, ou seja, várias iterações sem melhoria na FO, utiliza-se a estratégia de *restart* (Yamamoto *et al.*, 2024). Em que um contador de estagnação (c) aciona o reinício ao atingir um limite pré-definido, ou seja, (c_e), retornando à solução incumbente. Além disso, um segundo contador,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

3.2.3 Descrição geral do processo e fluxograma

Dessa forma, o método aqui descrito não apenas incorpora as características usuais de uma BT, com movimentos que podem piorar temporariamente a FO e o uso de uma lista tabu para impedir repetições, mas também integra reinicializações e um armazenamento seletivo das soluções na lista, fortalecendo a capacidade de exploração do espaço de busca. Em termos práticos, esse conjunto de técnicas minimiza o risco de a busca permanecer presa em ótimos locais sem chance de melhora, sobretudo em problemas combinatórios complexos como o SOC em RS-DEE.

Dessa forma, a abordagem se revela eficiente ao equilibrar a intensificação (na procura de boas soluções em torno da incumbente) e a diversificação (por meio de *restarts* e da própria estrutura tabu), aprimorando o desempenho final do algoritmo. Na Figura 6, pode-se visualizar o fluxograma completo para a estratégia especializada.

Figura 6 - Fluxograma representativo do processo de busca do busca tabu especializado



Fonte: Elaborado pelo autor.

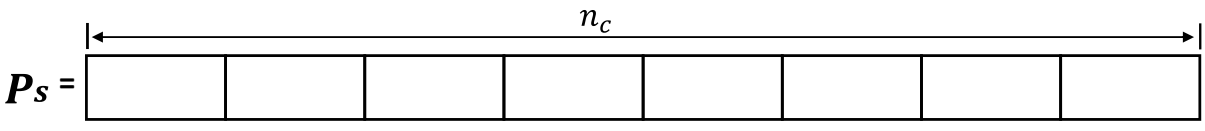
3.3 Algoritmo de busca tabu proposto para o problema de SOC

Nessa seção, são discutidos os detalhes do algoritmo de BT proposto para a resolução do problema de SOC em RSDEE.

3.3.1 Representação de uma proposta de solução

O problema de SOC é um problema com natureza combinatória e, portanto, é muito difícil a sua resolução para um alto número de manobras. Desse modo, como abordado anteriormente, foi desenvolvida uma meta-heurística para que seja possível solucioná-lo de modo mais eficiente. Ademais, a maioria das meta-heurísticas necessita de uma forma adequada e eficiente de se representar a proposta de solução. Usando a Figura 7, pode-se visualizar tal representação para o problema de SOC.

Figura 7 - Representação de uma proposta de solução



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo n_c o número total de chaves a serem manobradas, esse valor pode ser obtido a partir da união dos conjuntos de chaves normalmente abertas e fechadas, conforme mostrado em (5):

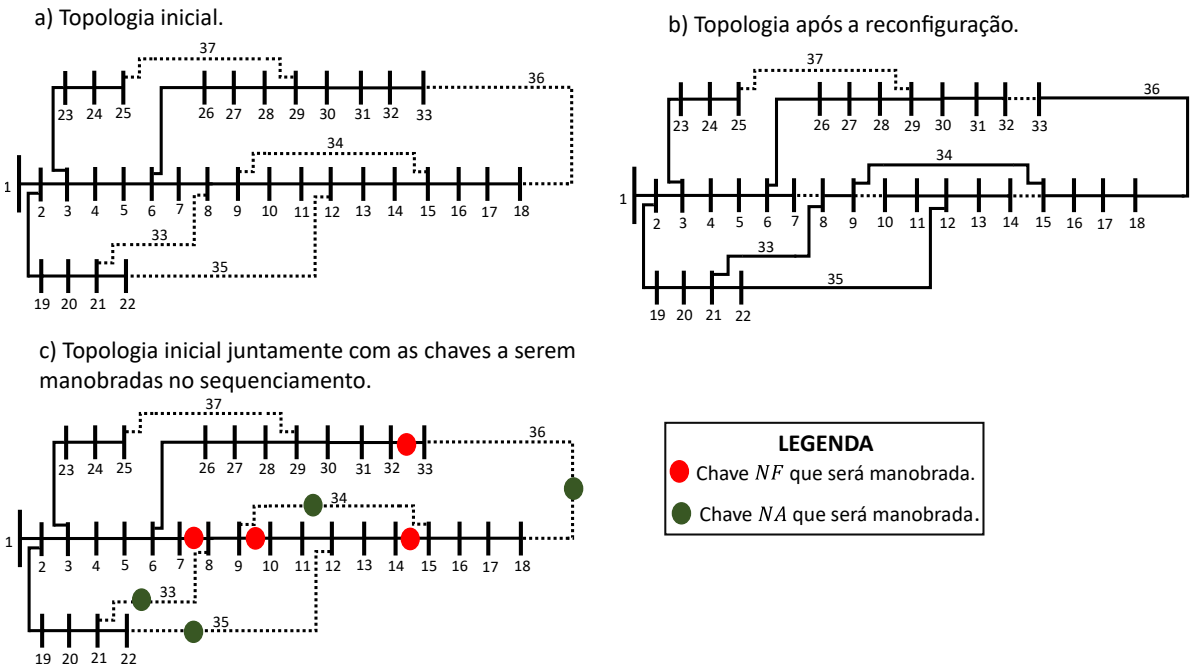
$$n_c = |N_A \cup N_F| \tag{5}$$

Em que:

- N_A representa o conjunto de chaves normalmente abertas;
- N_F representa o conjunto de chaves normalmente fechadas.

Assim sendo, o conjunto n_c pode ser obtido ao efetuar uma análise da topologia inicial e a obtida por meio da proposta de reconfiguração. Adicionalmente, a quantidade de possibilidades de sequências geradas é dada pela permutação simples dos elementos de n_c e, portanto, é $n_c!$. A Figura 8 fornece uma representação da topologia final e inicial para o sistema de 33 barras, juntamente com as chaves a serem manobradas. Desse modo, como pode ser visualizado, os elementos pertencentes ao conjunto N_A são as seguintes chaves: 33, 34, 35, 36 e, em relação ao conjunto N_F, tem-se: 7, 9, 14, 32.

Figura 8 - Representação topológica do sistema de 33 barras juntamente com as chaves que serão manobradas



Fonte: Elaborado pelo autor.

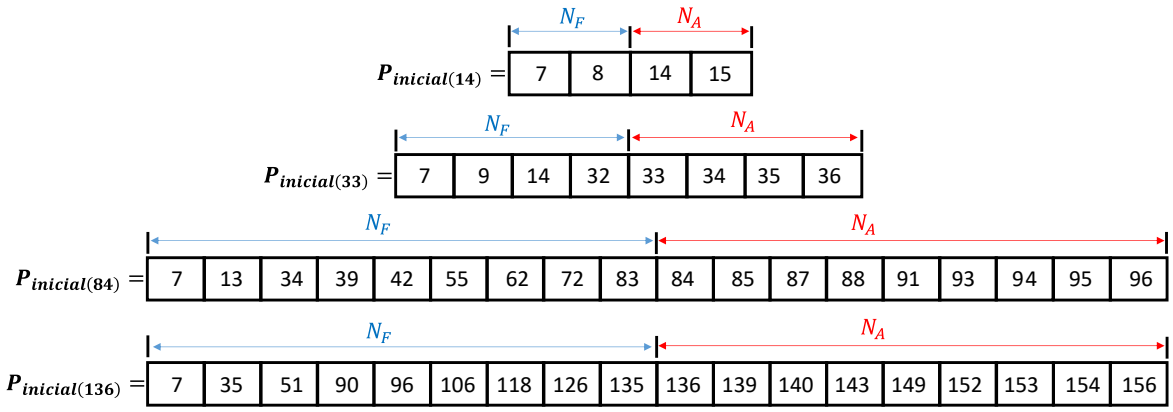
Portanto, os elementos de n_c são 8, o que resulta, por consequência, em 40.320 possibilidades de sequências diferentes ou propostas de solução diferentes. Adicionalmente, para avaliar a

qualidade e a factibilidade de cada proposta de solução, deve-se resolver 8 problemas de fluxo de carga radial. Dessa forma, a estratégia de busca exaustiva exige resolver 322.560 problemas de fluxo de carga radial. Entretanto, através de estratégias simples, esse número pode ser reduzido, mas pode continuar elevado. Todavia, somente uma parcela desse conjunto de possibilidades é factível, isto é, satisfaz tanto os requisitos topológicos quanto os operacionais.

3.3.2 Proposta de solução inicial da meta-heurística

Após definir uma forma adequada para representar uma proposta de solução, essa representação deve permitir a obtenção de uma proposta inicial, ou seja, o ponto de partida para a aplicação da meta-heurística. No caso do problema de SOC, a proposta inicial será construída da seguinte maneira: primeiramente, todas as chaves que estão inicialmente fechadas serão abertas; em seguida, todas as chaves que estão abertas serão fechadas. Essa solução é considerada como trivial para o problema e, para os quatro sistemas testados, pode ser visualizada na sequência por meio da Figura 9.

Figura 9 - Proposta de solução inicial para os sistemas testes utilizados

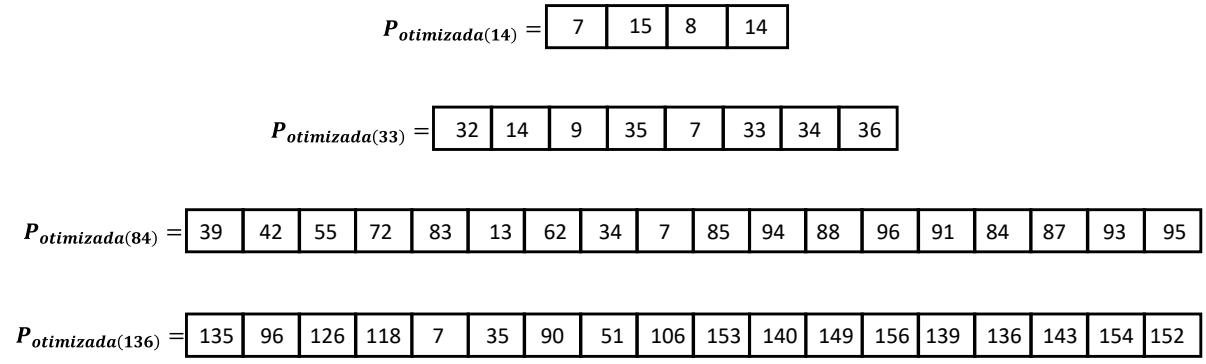


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Nova proposta de solução inicial da meta-heurística

Para melhorar a qualidade da solução inicial, utilizou-se a abordagem original (onde todas as chaves são abertas e, em seguida, fechadas) para gerar uma vizinhança por meio da troca de duas posições de chaves. Em seguida, selecionou-se o melhor vizinho, que passou a representar a nova proposta de solução, ou seja, a solução otimizada da meta-heurísitca. Na seção 3.3.5, mostra-se a quantidade de vizinhos gerados por meio dessa técnica e o desenvolvimento matemático. Na Figura 10, pode-se visualizar as novas soluções iniciais para cada sistema teste.

Figura 10 - Proposta de solução inicial otimizada para os sistemas testes utilizados



Fonte: Elaborado pelo autor.

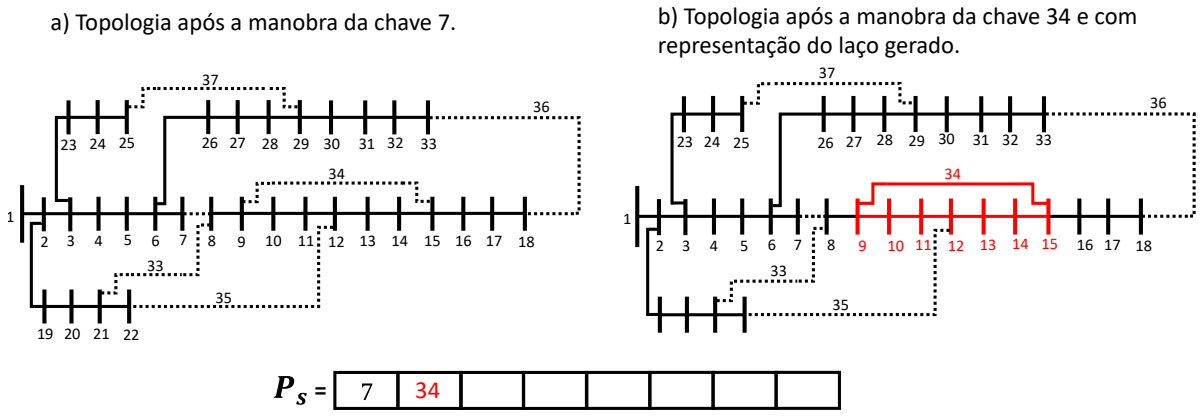
3.3.4 Verificação da qualidade e factibilidade da função objetivo

Após a idealização de uma forma para representar uma proposta de solução e a obtenção da solução inicial, 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 função objetivo consiste em minimizar a ENS durante o período de transição entre as topologias. Assim, a qualidade da solução será medida pela menor ENS obtida. Contudo, após uma análise da radialidade ou seja, o requisito topológico, calcula-se as respectivas ENSs e, posteriormente a isso, verifica-se o cumprimento dos requisitos operacionais.

Quanto ao requisito topológico, 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 proposta deve ser descartada imediatamente, uma vez que é necessário preservar a radialidade em todas as topologias intermediárias. Para essa detecção da radialidade, sera utilizado um algoritmo de Prim. Inicialmente, faz-se uma energização das barras relacionadas às subestações e é efetuado o armazenamento dos circuitos utilizados durante a construção da rede, posteriormente a isso, a cada iteração, procura-se um circuito que faz a conexão entre uma barra energizada e uma que ainda não está. Assim, ao identificar, esse circuito é marcado como utilizado e a barras é energizada. Na sequência, verifica-se a existência de laços, para isso, verifica-se se existem circuitos que conectam duas barras energizadas sem terem sido utilizados durante o processo, caso existem, então um laço foi encontrado e a solução é descartada.

Por exemplo, no sistema de 33 barras, foi gerada uma proposta em que, na segunda manobra, ocorreu a formação de um laço. Como resultado, essa proposta foi prontamente descartada, tornando desnecessária a execução das demais seis manobras previstas para a completa representação do vetor de solução, conforme pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 - Exemplificação de uma manobra infactível do ponto de vista topológico para o sistema de 33 barras juntamente com sua representação vetorial



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, após verificar a factibilidade sob a ótica da configuração topológica, é necessário realizar a análise do ponto de vista operacional. Assim, para uma verificação adequada da topologia intermediária, deve-se calcular um Fluxo de Carga (FC) e, para isso, será utilizado o *MATPOWER*.

É importante destacar que tais análises devem ser realizadas, no máximo, $\left(\frac{n_c}{2} - 1\right)$ vezes, uma vez que a última manobra resultará na topologia obtida pela proposta de reconfiguração, que já atende a todos os requisitos necessários para ser considerada factível.

3.3.5 Lógica utilizada para a geração da vizinhança

Na etapa de busca local do algoritmo BT proposto, é necessário definir o mecanismo de vizinhança. Para isso, considerou-se que, a partir da melhor proposta de solução obtida nas etapas anteriores, são geradas soluções vizinhas por meio da troca de dois elementos nas operações de chaveamento.

Como a proposta de solução é representada por um vetor com n_c elementos distintos, que correspondem a operações específicas de chaveamento, a geração de um vizinho consiste em selecionar dois elementos (por exemplo, i e j) e trocar suas posições no vetor. Esse processo representa uma nova sequência de manobras de chave.

Adicionalmente, para calcular o número de vizinhos diferentes que têm a proposta de solução corrente, deve-se efetuar o cálculo da combinação de n elementos agrupados em p elementos (a troca de posição de dois elementos no vetor que representa a proposta de solução),

representada por (6).

$$C_{n,p} = \frac{n!}{p!(n-p)!} \tag{6}$$

Assim sendo, no caso em questão, p é igual a 2 e n é igual a n_c. Desse modo, (6) torna-se (7)

$$C_{n_c,2} = \frac{n_c!}{2!(n_c-2)!} = \frac{n_c(n_c-1)(n_c-2)!}{2!(n_c-2)!} = \frac{n_c(n_c-1)}{2} \tag{7}$$

Portanto, para os sistemas de 14, 33, 84 e 136 barras, tem-se n_c como 4, 8, 18, 18, respectivamente. Sendo assim, para a quantidade de vizinhos, tem-se que:

- Quantidade de vizinhos para o sistema de 14 barras: $C_{4,2}$ = 6 vizinhos.
- Quantidade de vizinhos para o sistema de 33 barras: $C_{8,2}$ = 28 vizinhos.
- Quantidade de vizinhos para o sistema de 84 barras: $C_{18,2}$ = 153 vizinhos.
- Quantidade de vizinhos para o sistema de 136 barras: $C_{18,2}$ = 153 vizinhos.

3.3.6 Critério de parada da Meta-heurística

O critério de parada utilizado na implementação computacional baseia-se na interrupção do processo de busca quando é atingido um número predefinido de reinicializações *(restart)* ou quando todas as vizinhanças possíveis já tiverem sido exploradas, o que ocorrer primeiro. Tal estratégia tem como objetivo evitar execuções prolongadas e impedir que o algoritmo fique preso em ciclos intermináveis.

Além disso, o número máximo de reinicializações foi definido de modo único para os sistemas e foi de 50 reinicializações. Dessa forma, busca-se uma exploração eficiente do espaço de busca, otimizando tanto o tempo de execução quanto o uso dos recursos computacionais.

4 TESTES E RESULTADOS

A meta-heurística BT especializada foi testada em quatro sistemas distintos, a saber: sistema de 14, 33, 84 e de 136 barras. O principal objetivo desse teste foi efetuar uma avaliação do desempenho do método proposto, com ênfase na otimização do sequenciamento de chaves, o qual possui um caráter combinatório. Adicionalmente, para todos os sistemas testes, o contador de estagnação, c_e, tem um valor de 2 enquanto que o contador limitante de reinicializações, c_2, apresenta um valor de 50. Os testes foram realizados em um computador com processador Intel(R) Core(TM) i7-1260P de 12ª geração, com frequência de 2,10 GHz, 16,0 GB de memória RAM instalada e sistema operacional Windows 64 bits. Adicionalmente, desenvolveu-se o trabalho utilizando o *MATLAB*® na versão 9.14 (R2023a) juntamente com o pacote *MATPOWER* na versão 8.0.

Além disso, as operações de chaveamento propostas para a obtenção da solução seguem as seguintes condições: (1) Cada chave deve ser manobrada por vez e a operação pode ser tanto de fechamento quanto de abertura; (2) após ser efetuada a manobra, a chave não pode ser manobrada novamente; (3) foi definido para cada operação de manobra de chaveamento um tempo arbitrário e fixo de 20 minutos durante o qual o sistema permanece com a topologia intermediária; (4) os limites de tensão considerados foram de 0,93 pu a 1,05 pu, que é a faixa adequada às subestações utilizadas nos testes (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021).

O cálculo do fluxo de carga 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, mas não introduz novas correntes e tensões. Além disso, aberturas nunca introduzem laços dispensando a verificação da radialidade; e (2) a última operação de fechamento resulta na topologia ótima de operação que é previamente conhecida e factível. Dessa forma, a avaliação do fluxo foi concentrada nas etapas que modificam a topologia corrente, otimizando o desempenho computacional. Nos testes são apresentadas as sequências de manobra das chaves identificando topologias intermediárias factíveis e minimizando a ENS durante a transição da topologia corrente para a topologia ótima.

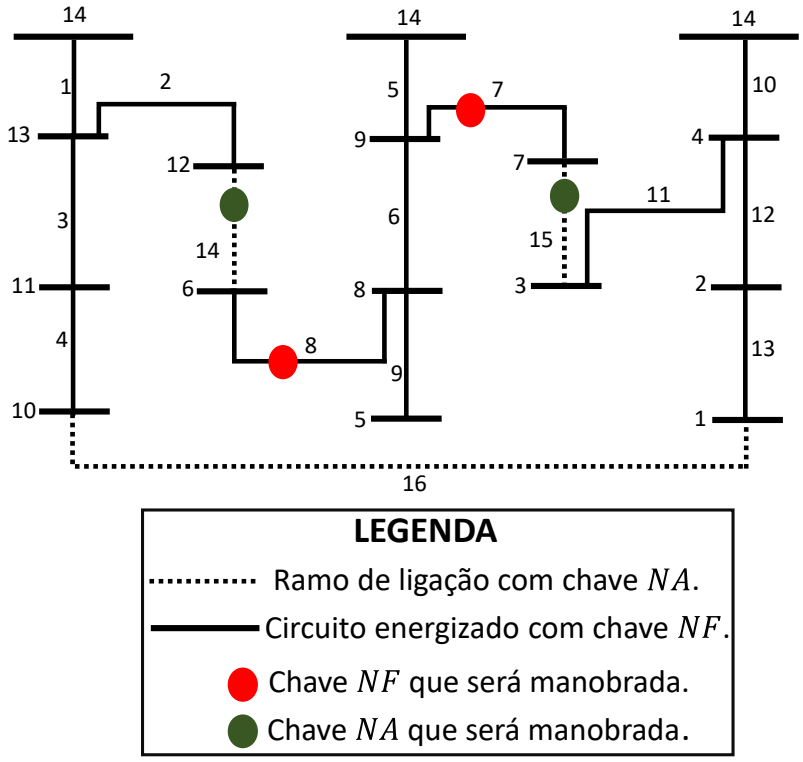
Adicionalmente, os dados das configurações reconfiguradas para os sistemas testados podem ser visualizados em Possagnolo (2015). No anexo A pode ser visualizado tanto um estudo teórico sobre cálculo de fluxo de potência utilizando o método de Newton, como nos anexos B1 até B4 é possível visualizar os dados de resistência, reatância, capacidade de corrente de cada ramo.

4.1 Resultados para o sistema de 14 barras

O sistema de 14 barras é composto por 13 barras que representam barras de demanda e uma barra que simboliza a subestação (barra 14) que opera a uma tensão de 23,00 kV e adota uma potência base de 100.000 kVA. Sua topologia é formada por 16 ramos, conforme apresentado em Civanlar *et al.* (1988). Inicialmente, as chaves 14, 15 e 16 encontram-se abertas. Entretanto, após a reconfiguração ótima, as chaves que permanecem abertas são: 7, 8 e 16, de tal modo que seja reduzido as perdas de potência no sistema.

A Figura 12 destaca as operações de chaveamento necessárias para que a topologia ótima seja atingida a partir da inicial. Portanto, é necessário realizar o fechamento das chaves 14 e 15 e a abertura das chaves 7 e 8, enquanto a chave 16 permanece aberta em ambas as configurações. O sequenciamento dessas manobras deve ser definido de forma a garantir que todas as topologias intermediárias sejam factíveis e que promovam a minimização ENS durante o processo.

Figura 12 - Sistema de 14 barras com a representação das chaves a serem manobradas



Fonte: Adaptado de Civanlar *et al.* (1988).

Como são 4 operações de chaveamento necessárias, resulta-se, portanto, em 24 possibilidades de sequências. Porém, por se tratar de um sistema de pequeno porte, a busca pela sequencia ótima foi obtida ainda na fase de melhoria da solução inicial. Na Tabela 2 pode ser visualizada as seis sequencias factíveis obtidas na melhoria inicial juntamente com suas respectivas ENS.

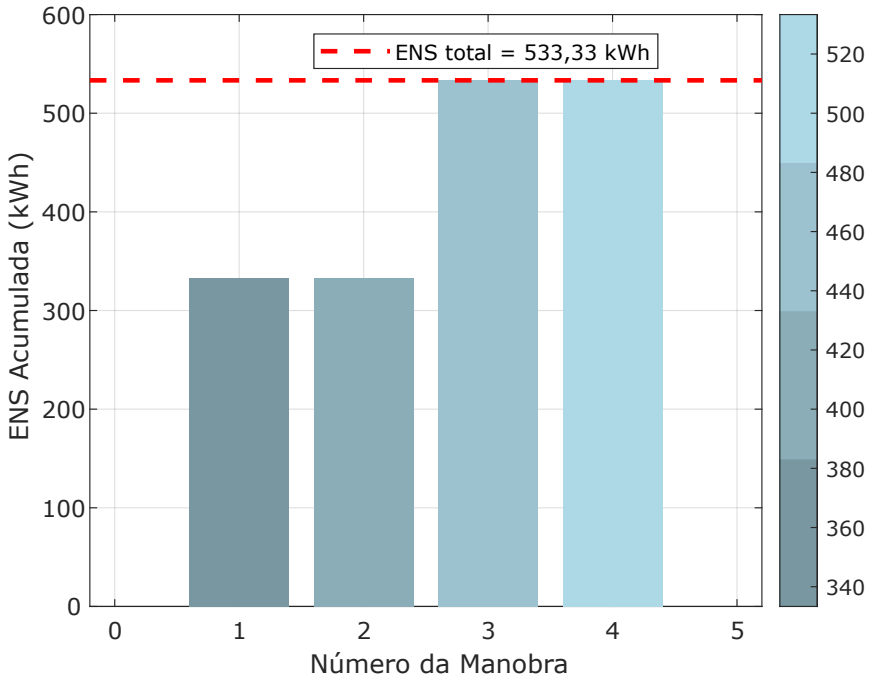
Tabela 2 - Soluções factíveis obtidas para o sistema de 14 barras

Sequência	**1ª Chave**	**2ª Chave**	**3ª Chave**	**4ª Chave**	**ENS (kWh)**
Sequência 1	8○	14●	7○	15●	533,33
Sequência 2	8○	7○	15●	14●	933,33
Sequência 3	8○	7○	14●	15●	1.066,67
Sequência 4	7○	15●	8○	14●	533,33
Sequência 5	7○	8○	15●	14●	1.066,67
Sequência 6	7○	8○	14●	15●	1.200,00
Legenda: ○ = Chave aberta, ● = Chave fechada					

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, como pode-se perceber, as sequências 1 e 4 são as duas com melhor valor de FO e, desse modo, são os ótimos para o problema. Adicionalmente, na Figura 13, pode-se visualizar a evolução da ENS após cada uma das quatro manobras realizadas pela sequência de número 4.

Figura 13 - Evolução da ENS após cada manobra realizada para o sistema de 14 barras

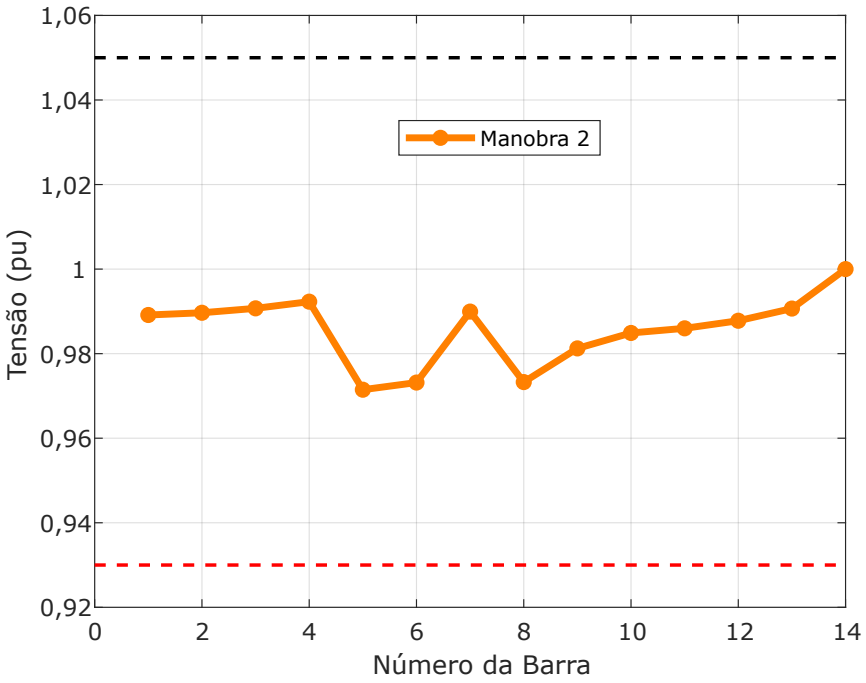


Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro ponto a ser analisado é o perfil de tensão nas barras durante a sequência de chaveamentos realizadas. Para o sistema de 14 barras, tem-se quatro chaves por sequência, entretanto, como explicado no capitulo 4, o calculo do FC é efetuado somente nas manobras intermediárias de fechamento, assim, para o caso do sistema de 14 barras, ocorre na segunda manobra tanto para a primeira sequência quanto para a quarta. Na Fiigura 14, visualiza-se o perfil de tensão

para a segunda manobra relacionada a sequência de número 4 apresentada na Tabela 2.

Figura 14 - Perfil de tensão nas barras para o sistema de 14 barras durante a sequência de manobra de chaves



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 3, visualiza-se a tensão mínima e máxima e a respectiva barra durante a manobra para o sistema de 14 barras.

Tabela 3 - Tensões mínima e máxima na única manobra do sistema de 14 barras

Manobra	**Tensão Mínima (pu)**	**Barra**	**Tensão Máxima (pu)**	**Barra**
2	0,971	5	1,000	14

Fonte: Elaborado pelo autor.

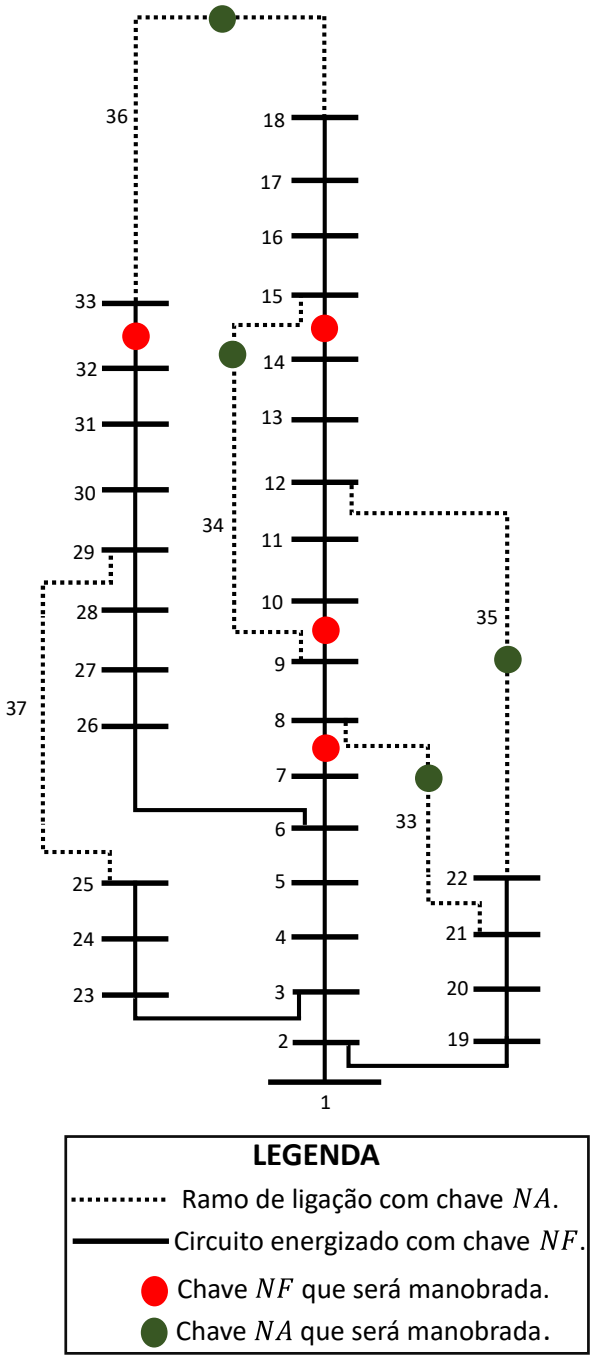
4.2 Resultados para o sistema de 33 barras

O sistema apresentado em Baran e Wu (1989) contém 33 barras, sendo que 32 são barras de demanda e 1 barra é a da subestação (barra 1), a qual opera com uma tensão de 12,66 kV e apresenta uma potência base de 1000 kVA. O sistema também conta com 37 ramos. Ademais, sua topologia inicial apresenta as chaves 33, 34, 35, 36 e 37 como abertas e, ao efetuar a reconfiguração topológica, as chaves abertas são: 7, 9, 14, 32 e 37.

Na Figura 15, pode-se visualizar a topologia inicial para o sistema juntamente com as chaves a serem manobradas para que seja obtida a topologia reconfigurada. Para isso, necessita-se

de efetuar o fechamento de 4 chaves (33, 34, 35 e 36) e a abertura de quatro chaves (7, 9, 14, 32) de tal modo que seja garantido os requisitos topológicos e os operacionais da rede.

Figura 15 - Sistema de 33 barras com a representação das chaves a serem manobradas

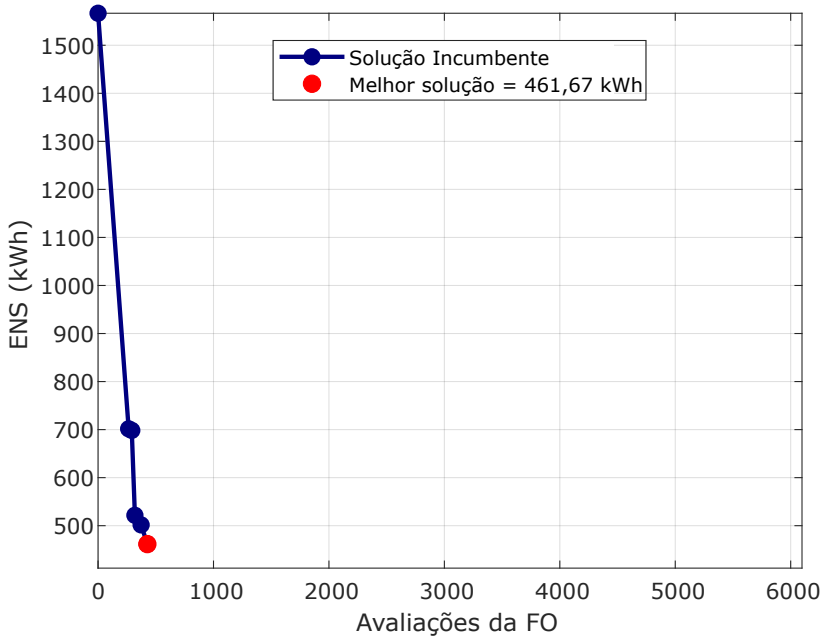


Fonte: (Baran; Wu, 1989).

A Figura 16, apresenta a evolução da FO em relação a ENS ao longo das avaliações realizadas para o sistema de 33 barras. Percebe-se que a solução inicial apresenta uma ENS de 1.566,67 kWh. O algoritmo, ao realizar uma busca eficiente, consegue melhorar significativamente desempenho do sistema. Sendo que, após 16 iterações, a melhor ENS (ENS = 461,67

kWh), é obtida.

Figura 16 - Quantidade de avaliações da FO para o sistema de 33 barras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, na Tabela 4, visualiza-se os resultados obtidos para o sistema em questão.

Tabela 4 - Resultados obtidos para o SOC aplicado no sistema de 33 barras

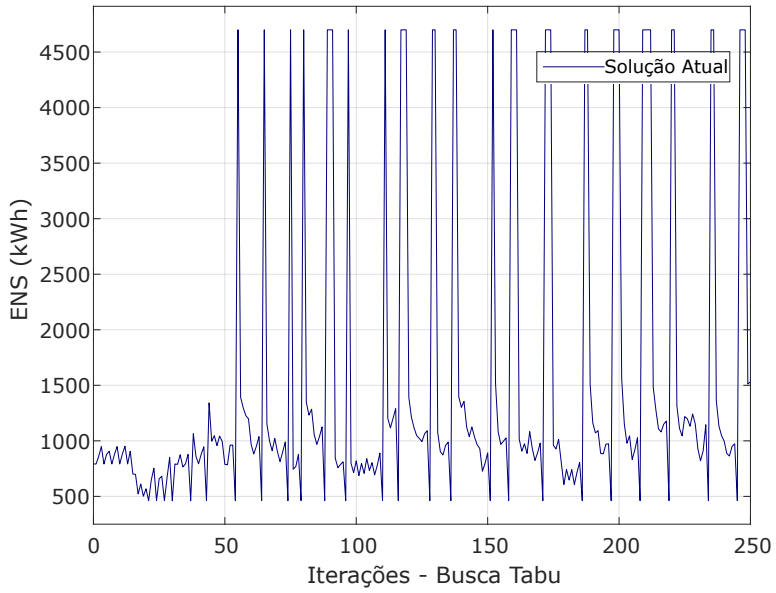
	Inicial	**Otimizada**	**Obtida pelo BT**
Solução	7○, 9○, 14○, 32○, 33●, 34●, 35●, 36●	32○, 14○, 9○, 35●, 7○, 33●, 34●, 36●	32○, 9○, 35●, 36●, 7○, 33●, 14○, 34●
ENS [kWh]	1.566,67	791,67	461,67
Dados de Simulação para o BT			
	Até o ótimo	**Total**	
N° de FC	787	8.412	
Iterações realizadas	16	251	
Avaliações da FO	427	6.099	
Tempo [s]	2,04	20,71	

Legenda: ○ = Chave aberta, ● = Chave fechada, FC = Fluxo de Carga

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 17, pode-se visualizar uma evolução da ENS durante o processo de busca. Percebe-se que inicialmente a ENS apresenta uma redução, resultado da busca intensiva por soluções mais promissoras. Em seguida, observa-se um período de estabilização no valor da FO, intercalado com oscilações de maior amplitude. Esse comportamento demostra o equilíbrio entre as estratégias de intensificação (por meio do refinamento local das soluções) e diversificação, que permite a exploração de novas regiões do espaço de busca.

Figura 17 - ENS ao longo das iterações do BT para o sistema de 33 barras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, percebe-se o funcionamento da estratégia de reinicialização, a qual é aplicada para evitar iterações sem melhoria no valor da FO. Tal técnica gera o retorno da solução atual para a melhor solução já encontrada até o momento, reiniciando a busca a partir dela e promovendo uma nova fase de intensificação.

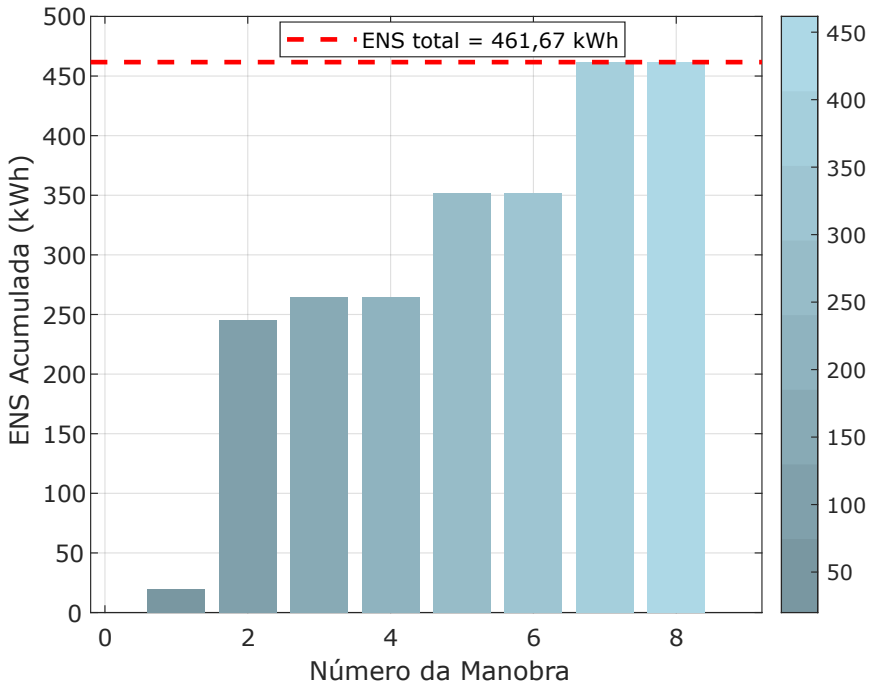
Além disso, na Tabela 4, mostra-se que a melhor solução é obtida após 16 iterações, entretanto, graficamente, encontra-se na vigésima primeira iteração, isso é devido ao comportamento do gráfico, uma vez que é mostrado a trajetória da solução corrente e não da incumbente. Durante o sequenciamento, foi calculado o valor da ENS acumulada a cada manobra da solução obtida pelo BT e, para essa sequência, efetuou-se o cálculo do FCR para cada etapa de fechamento intermediária da manobra. As Figuras 18 e 19 mostram, respectivamente, tais informações. Em complemento à Figura 19, tem-se a Tabela 5, que mostra os valores máximos e mínimos de tensão, juntamente com a respectiva barra, em cada manobra.

Tabela 5 - Tensões mínimas e máximas no sistema de 33 barras em cada manobra.

Manobra	**Tensão Mínima (pu)**	**Barra**	**Tensão Máxima (pu)**	**Barra**
3	0,933	32	1,000	1
4	0,933	32	1,000	1
6	0,937	33	1,000	1

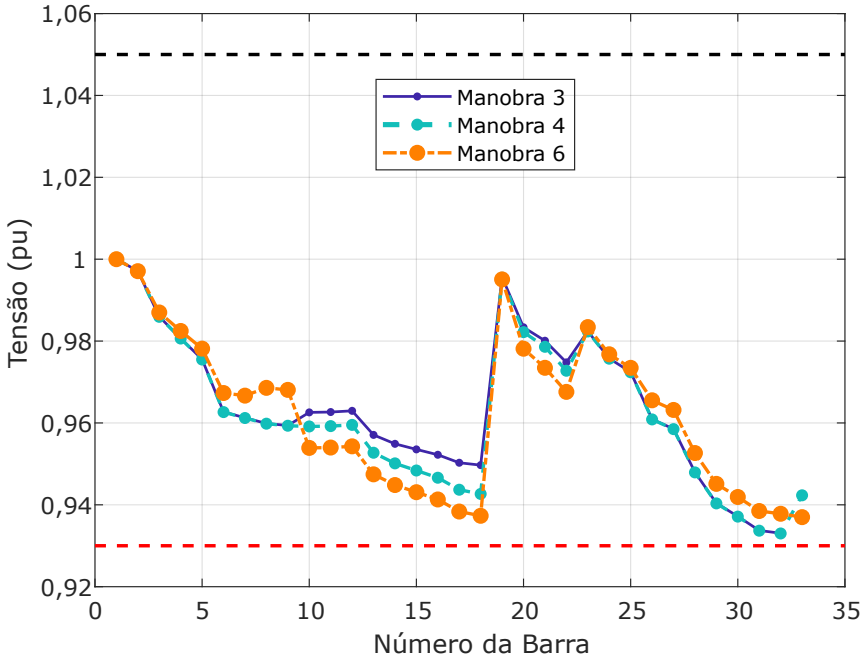
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Evolução da ENS após cada manobra realizada para o sistema de 33 barras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Perfil de tensão nas barras para o sistema de 33 barras durante a sequência de manobra de chaves

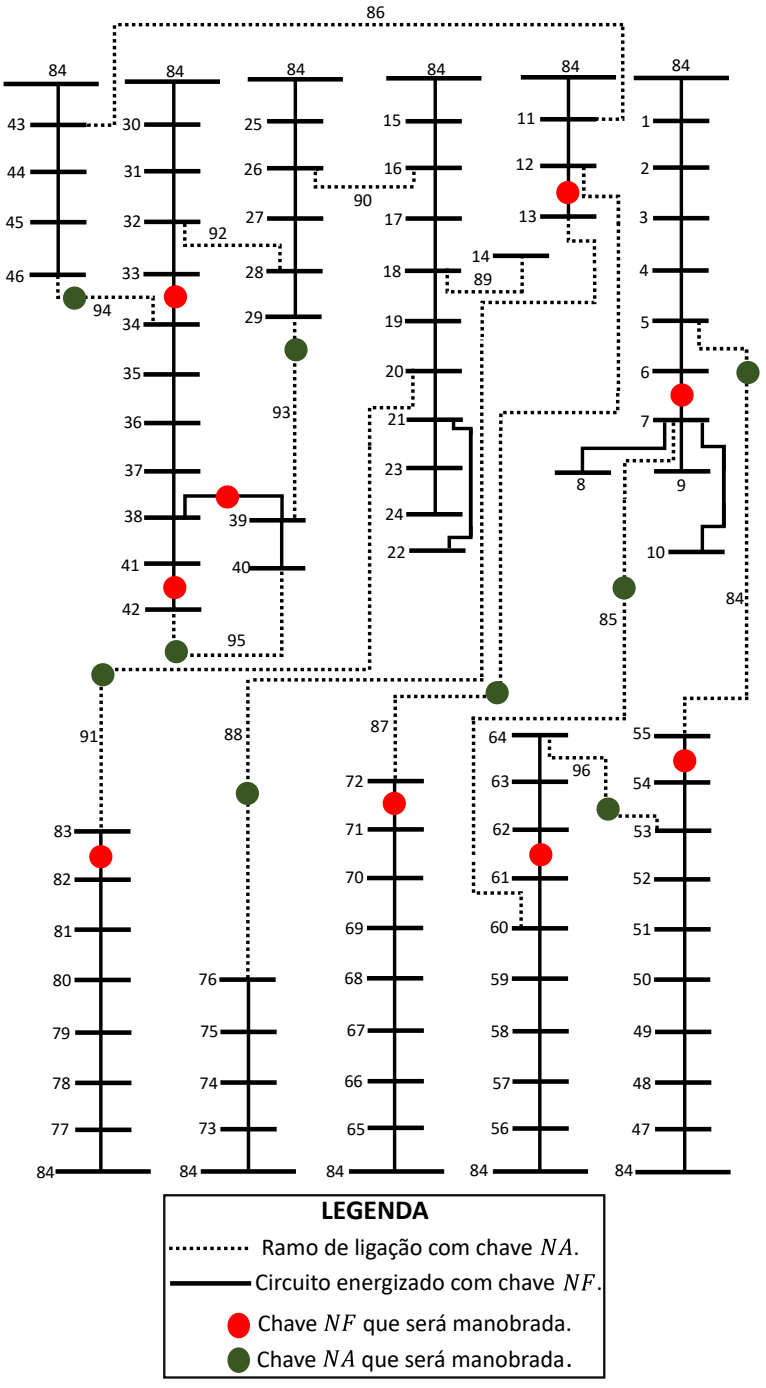


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 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). Sua configuração inicial apresenta em Chiou, Chang e Su (2005) tem uma tensão e potência base de, respectivamente, 11,40 kV e 10.000 kVA. Figura 20 mostra a topologia inicial do sistema com as chaves a serem manobradas durante o sequenciamento.

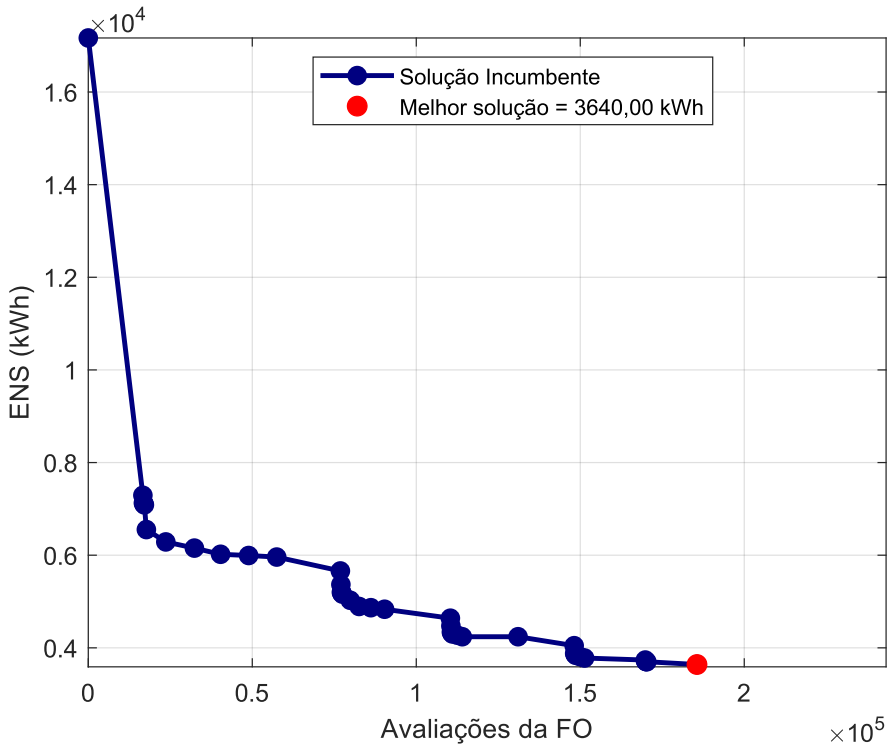
Figura 20 - Sistema de 84 barras com a representação das chaves a serem manobradas.



Fonte: (Chiou; Chang; Su, 2005).

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, 83). A Figura 21, mostra número de avaliações da FO durante o processo de busca para o sistema de 84 barras.

Figura 21 - Quantidade de avaliações da FO para o sistema de 84 barras

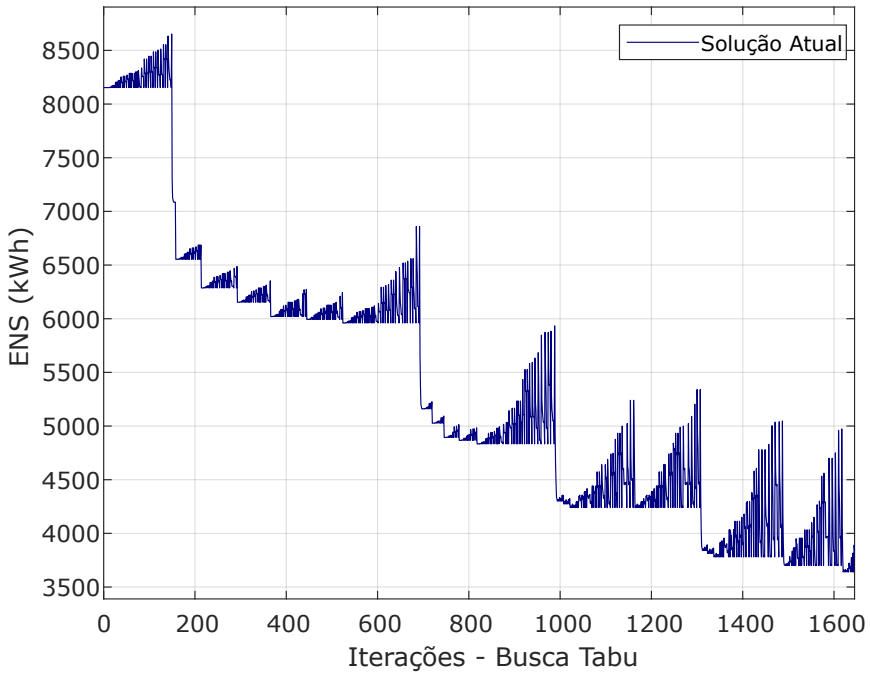


Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se, também, que a solução inicial apresenta uma ENS de 17.167,00 kWh. O algoritmo, ao realizar uma busca eficiente, consegue melhorar significativamente o desempenho do sistema. Adicionalmente, por meio da Figura 22 , pode-se visualizar uma evolução da ENS durante o processo. Sendo que, observa-se que há algumas variações nesse valor, que inicialmente podem piorá-lo.

Essas variações mostram que o algoritmo está efetuando uma exploração em diferentes regiões do espaço de busca (regiões promissoras e não promissoras), o que mostra 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. Além disso, por meio da Tabela 6, pode-se visualizar os resultados obtidos para o sistema em questão.

Figura 22 - ENS ao longo das iterações do BT para o sistema de 84 barras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Resultados obtidos para o SOC aplicado ao sistema de 84 barras

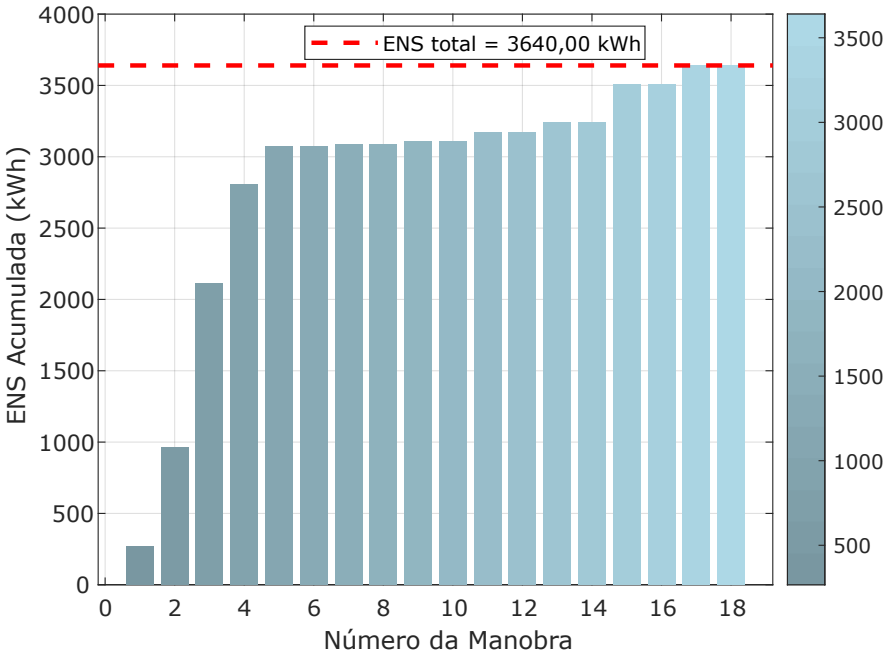
	Inicial	**Melhorada**	**Obtida pelo BT**
Solução	7 ○, 13 ○, 34 ○, 39 ○ 42 ○, 55 ○, 62 ○, 72 ○ 83 ○, 84 ●, 85 ●, 87 ● 88 ●, 91 ●, 93 ●, 94 ● 95 ●, 96 ●	39 ○, 42 ○, 55 ○, 72 ○ 83 ○, 13 ○, 62 ○, 34 ○ 7 ○, 85 ●, 94 ●, 88 ● 96 ●, 91 ●, 84 ●, 87 ● 93 ●, 95 ●	62 ○, 7 ○, 34 ○, 94 ● 85 ●, 96 ●, 39 ○, 93 ● 42 ○, 95 ●, 55 ○, 84 ● 72 ○, 87 ●, 13 ○, 88 ● 83 ○, 91 ●
ENS [kWh]	17.167,00	8.153,33	3.640,00
Dados de Simulação para o BT			
	Até o ótimo	**Total**	
N° de FC	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: ○ = Chave aberta, ● = Chave fechada, FC = Fluxo de Carga

Fonte: Elaborado pelo autor.

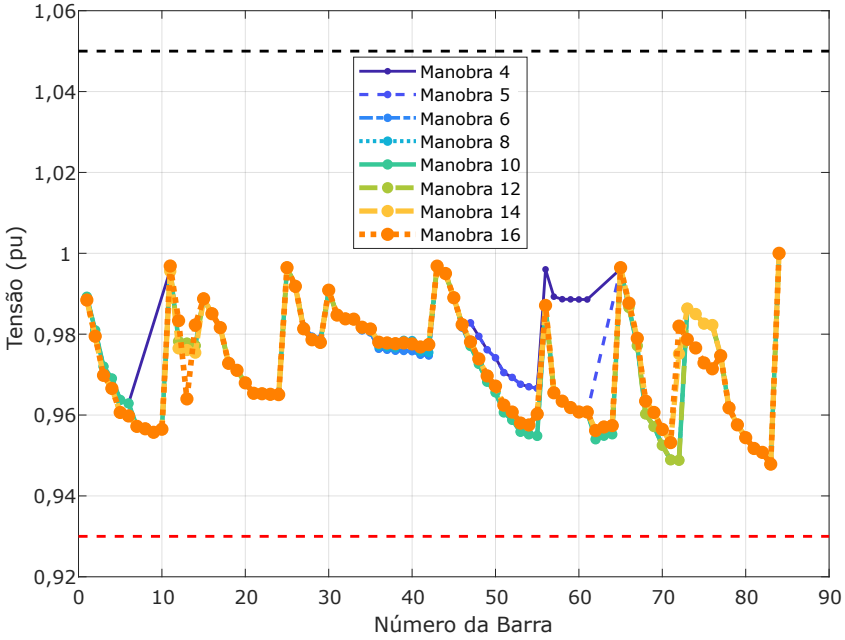
Já na Figura 23, pode-se visualizar a evolução da ENS após cada uma das 18 manobras realizadas durante o SOC e na Figura 24, pode-se visualizar o perfil de tensão nas barras do sistema para a sequência obtida, sendo que a Tabela 7 apresenta os valores de tensão (mínima e máxima) para cada uma das manobras intermediárias realizadas durante as manobras analisadas no sistema de 84 barras.

Figura 23 - Evolução da ENS após cada manobra realizada para o sistema de 84 barras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Perfil de tensão nas barras para o sistema de 84 barras durante a sequência de manobra de chaves



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Tensões mínimas e máximas no sistema com 84 barras em cada manobra

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

Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, esse valor não foi o único obtido pelo BT sendo que, obteve-se mais dez sequências equivalentes ($ENS = 3.640,00\ kWh$) de chaveamento, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 - Sequências equivalentes obtidas para o sistema de 84 barras

	Sequências Equivalentes								
1°	62○	7○	34○	94●	85●	96●	39○	93●	42○
	95●	55○	84●	72○	87●	13○	88●	83○	91●
2°	62○	7○	34○	94●	85●	96●	39○	93●	72○
	87●	55○	84●	42○	95●	13○	88●	83○	91●
3°	62○	7●	34○	94●	85●	96●	39○	93●	42○
	95●	55○	84●	83○	91●	13○	88●	72○	87●
4°	62○	7●	34○	94●	85●	96●	39○	93●	42○
	95●	83○	91●	72○	87●	13○	88●	55○	84●
5°	62○	7●	34○	94●	85●	96●	39○	93●	42○
	95●	13○	88●	72○	87●	55○	84●	83○	91●
6°	62○	7●	34○	94●	85●	96●	39○	93●	83○
	91●	55○	84●	72○	87●	13○	88●	42○	95●
7°	62○	7●	34○	94●	85●	96●	55○	84●	39○
	93●	42○	95●	72○	87●	13○	88●	83○	91●
8°	62○	7●	34○	94●	85●	96●	72○	87●	39○
	93●	55○	84●	42○	95●	13○	88●	83○	91●
9°	62○	7●	34○	94●	85●	96●	83○	91●	39○
	93●	55○	84●	72○	87●	13○	88●	42○	95●
10°	62○	7●	34○	94●	85●	96●	13○	88●	39○
	93●	55○	84●	72○	87●	42○	95●	83○	91●

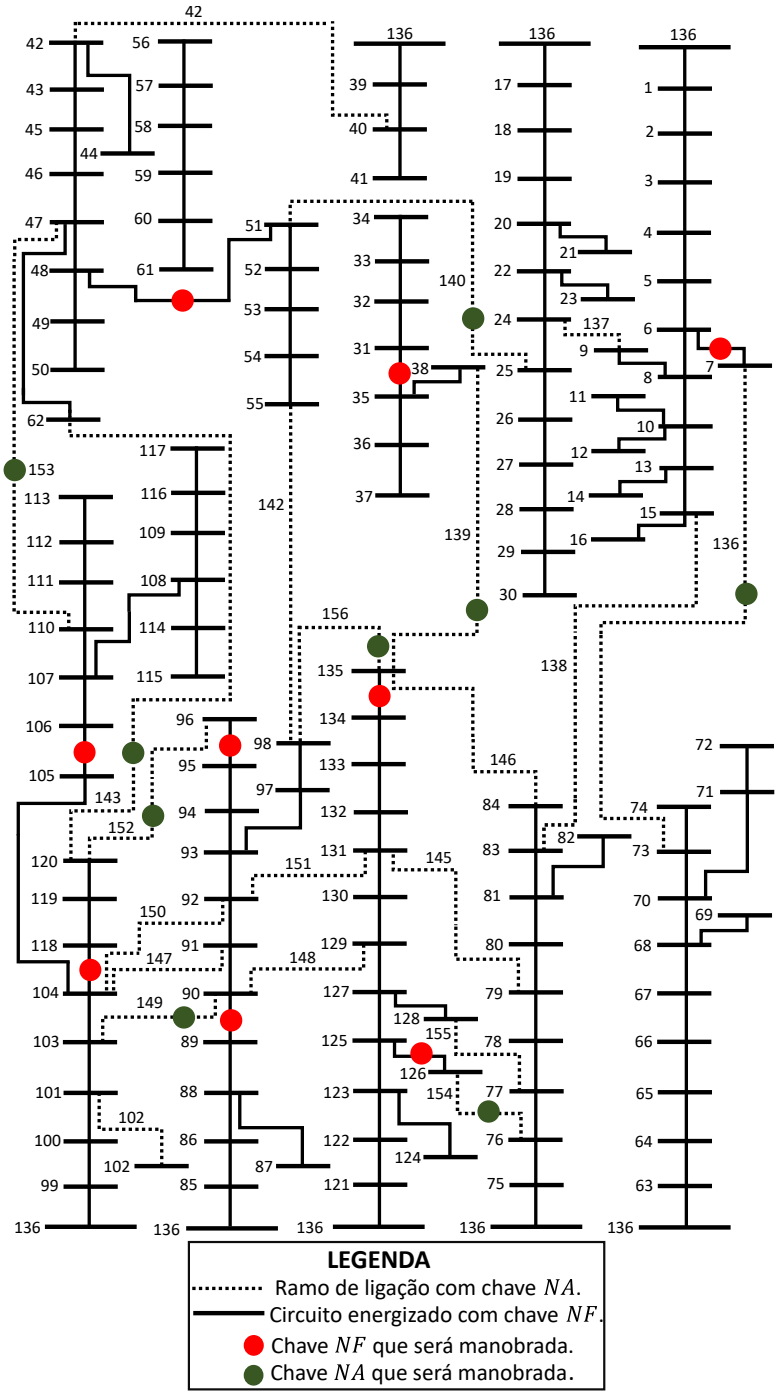
Legenda: ○ = Chave aberta, ● = Chave fechada

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Resultados para o sistema de 136 barras

Na Figura25, pode-se visualizar o sistema de 136 barras que é apresentado em Mantovani, Casari e Romero (2000), juntamente com as chaves indicadas para o sequenciamento. Ele é constituído por 136 barras, sendo 135 barras de carga e 156 ramos.

Figura 25 - Sistema de 136 barras com a representação das chaves a serem manobradas

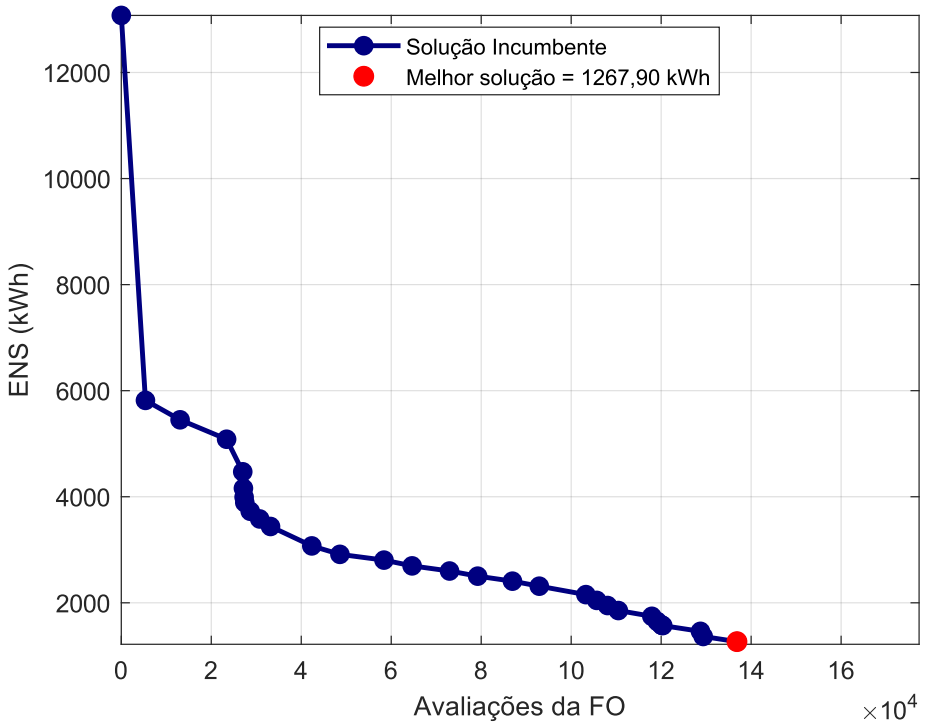


Fonte: (Mantovani; Casari; Romero, 2000).

Além disso, a subestação é representada pela barra 136, apresenta uma tensão de 13,80 kV e uma potência base de 100.000 kVA. Ademais, apresenta-se, na sua topologia inicial, as chaves 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156 como abertas e, após efetuar a reconfiguração, apresenta-se como abertas as seguintes chaves: 7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155.

Além disso, visualiza-se a topologia inicial do sistema juntamente com as chaves a serem manobradas para a obtenção da configuração ótima. Para isso, necessita-se de efetuar o fechamento de nove chaves (136, 139, 140, 143, 149, 152, 153, 154, 156) e a abertura de nove chaves (7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135) de tal modo que seja minimizado a ENS e respeitado tanto os requisitos relacionados a radialidade quanto aos operacionais da rede. A Figura 26, mostra a evolução da ENS ao longo das avaliações da FO durante a busca.

Figura 26 - Quantidade de avaliações da FO para o sistema de 136 barras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se uma queda na ENS, indicando que o algoritmo rapidamente encontra soluções com desempenho superior à solução inicial. Na sequência, visualiza-se melhorias graduais, com reduções na ENS ao longo das avaliações da FO. Isso indica fases de melhorias local alternadas com a descoberta de soluções com melhores qualidades, o que mostra a eficácia da estratégia utilizada. Na Tabela 9, visualiza-se os resultados obtidos.

Tabela 9 - Resultados obtidos para o SOC aplicado ao sistema de 136 barras

	Inicial	**Otimizada**	**Obtida pelo 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 o BT			
	Até o ótimo		**Total**
N° de FC	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: ○ = Chave aberta, ● = Chave fechada, FC = Fluxo de Carga

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ademais, esse valor não foi o único obtido pelo BT sendo que foram obtidas mais dezesseis sequências equivalentes (ENS = 1.267,89 kWh) de chaveamento, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Sequências equivalentes obtidas para o sistema de 136 barras

	Sequências equivalentes (1º a 6º)								
1°	135○	106●	153●	126○	154●	118○	143●	96○	152●
	7○	136●	90○	149●	51○	140●	156●	35○	139●
2°	135○	106○	153●	126○	154●	118○	143●	96○	152●
	7○	136●	90○	149●	51○	140●	139●	35○	156●
3°	135○	106○	153●	126○	154●	118○	143●	96○	152●
	7○	136●	90○	149●	156●	51○	140●	35○	139●
4°	135○	106○	153●	126○	154●	118○	143●	96○	152●
	7○	136●	90○	149●	139●	51○	140●	35○	156●
5°	106○	153●	135○	126○	154●	118○	143●	96○	152●
	7○	136●	90○	149●	51○	140●	156●	35○	139●
6°	106○	153●	135○	126○	154●	118○	143●	96○	152●
	7○	136●	90○	149●	51○	140●	139●	35○	156●

Continua na próxima página

Tabela 10 – Continuação da página anterior

Sequências equivalentes (7º a 16º)									
7°	135○	106○	153●	126○	154●	118○	143●	7○	136●
	96○	152●	90○	149●	51○	140●	156●	35○	139●
8°	135○	106○	153●	126○	154●	118○	143●	7○	136●
	96○	152●	90○	149●	51○	140●	139●	35○	156●
9°	135○	106○	153●	126○	154●	118○	143●	96○	152●
	7○	136●	51○	140●	90○	149●	156●	35○	139●
10°	135○	106○	153●	126○	154●	118○	143●	96○	152●
	7○	136●	51○	140●	90○	149●	139●	35○	156●
11°	135○	106○	153●	126○	154●	118○	143●	96○	152●
	51○	140●	90○	149●	7○	136●	156●	35○	139●
12°	135○	106○	153●	126○	154●	118○	143●	96○	152●
	51○	140●	90○	149●	7○	136●	139●	35○	156●
13°	135○	106○	153●	51○	140●	118○	143●	96○	152●
	7○	136●	90○	149●	126○	154●	156●	35○	139●
14°	135○	106○	153●	51○	140●	118○	143●	96○	152●
	7○	136●	90○	149●	126○	154●	139●	35○	156●
15°	106○	153●	7○	136●	135○	118○	143●	96○	152●
	126○	154●	90○	149●	51○	140●	156●	35○	139●
16°	106○	153●	7○	136●	135○	118○	143●	96○	152●
	126○	154●	90○	149●	51○	140●	139●	35○	156●

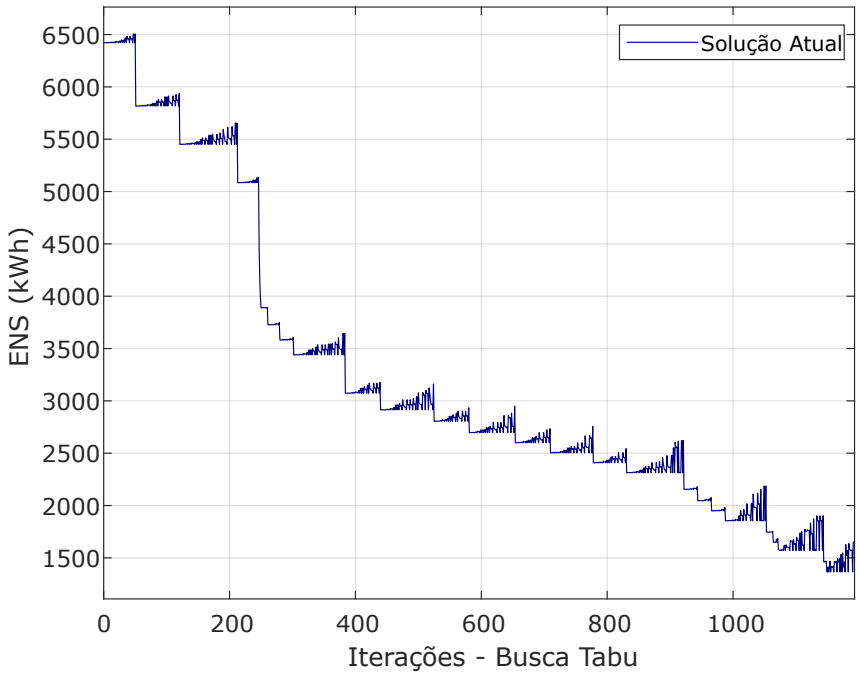
Legenda: ○ = Chave aberta, ● = Chave fechada

Fonte: Elaborado pelo autor.

Adicionalmente, na Figura 27, visualiza-se a evolução da ENS durante o processo. Sendo que, observa-se que há algumas variações que mostram que o algoritmo está efetuando uma exploração em diferentes regiões do espaço de busca o que, consequentemente, permite que a busca não fique estagnada em um ótimo local com soluções subótimas, assim, avançando rumo a soluções de melhor qualidade.

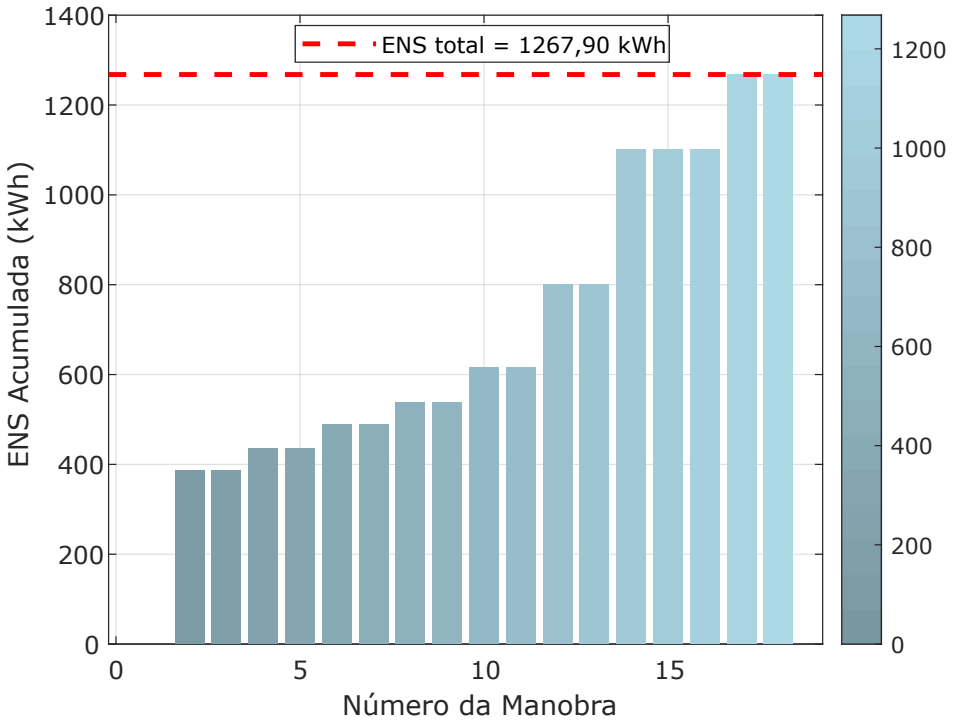
Já na Figura 28, pode-se visualizar a evolução da ENS após cada uma das 18 manobras realizadas durante o SOC e na Figura 29, pode-se visualiza o perfil de tensão nas barras do sistema para as manobras de fechamento intermediárias na solução obtida.

Figura 27 - ENS ao longo das iterações do BT para o sistema de 136 barras



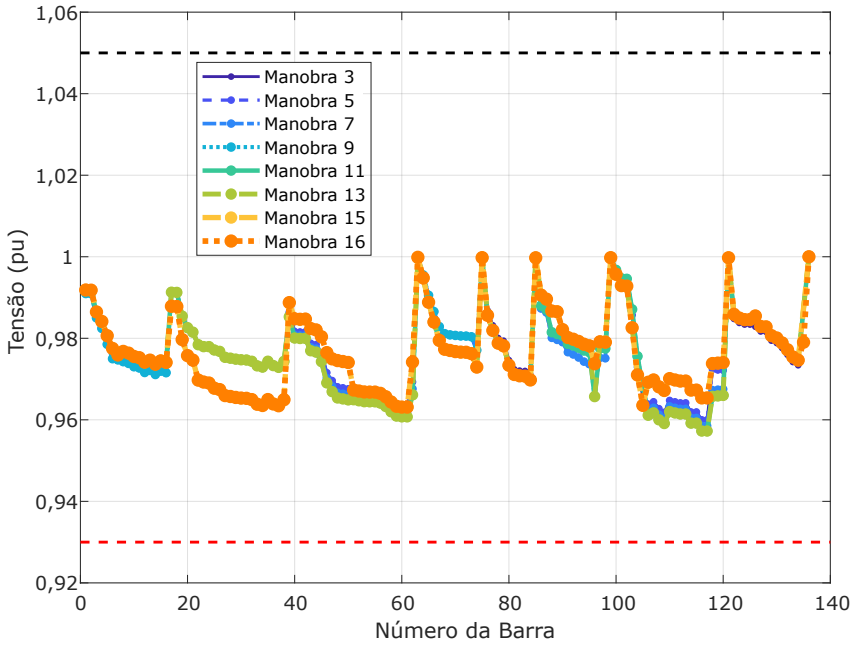
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Evolução da ENS após cada manobra realizada para o sistema de 136 barras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Perfil de tensão nas barras para o sistema de 136 barras durante a sequência de manobra de chaves



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 11 mostra os valores de tensão (mínima e máxima) observados em cada manobra analisada, bem como as respectivas barras. Pode-se observar que as tensões mínimas repetem-se frequentemente na barra 116 para as manobras de 3 a 13, enquanto nas manobras 15 e 16, a menor tensão ocorre na barra 60. Em todas as manobras, o valor máximo de tensão ocorre na barra 136.

Tabela 11 - Tensões mínimas e máximas no sistema com 136 barras em cada manobra

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

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou uma análise teórica quanto computacional para a resolução do problema de sequenciamento ótimo de operações de chaveamentos, aplicado à reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica. O problema SOC tem como objetivo a determinação das operações de chaveamento que, partindo de uma topologia radial inicial, seja obtida a configuração radial ótima final, a qual é idêntica à proposta pela reconfiguração ótima. Ademais, tal problema apresenta uma natureza combinatória, o que reforça a necessidade do uso de uma técnica meta-heurística eficiente para encontrar soluções que satisfaçam tanto os requisitos físicos quanto os operacionais e que minimizem a ENS dentro de um tempo computacional aceitável.

Assim sendo, para avaliar a qualidade e eficiência do método proposto, foram realizados experimentos em quatro sistemas de teste distintos, ou seja, para os sistemas de 14, 33, 84 e 136 barras, e para a implementação do algoritmo utilizou-se do MATLAB® sendo que para a verificação da radialidade das soluções, utilizou-se de um algoritmo de Prim e para o calculo do fluxo de carga, utilizou-se do MATPOWER.

Para sistemas de pequeno porte, como o de 14 barras, a solução foi obtida na etapa de melhoria local. Já para os sistemas de 33, 84 e 136 barras, o tempo total de excussão do algoritmo foi, respectivamente, 20,71 s, 1.434,66 s e 2.377,54 s

Adicionalmente, embora os sistemas de 84 e 136 barras possuam o mesmo número de chaves a serem manobradas, isto é, 18 chaves, entretanto, observou-se uma diferença significativa no tempo de execução entre eles. Essa diferença está relacionada a maior complexidade topológica do sistema de 136 que possui mais elementos e maior número de cargas o que, por consequência, eleva o processamento computacional de cada iteração, especialmente nas análises de fluxo de carga, resultando em maior tempo total de processamento. Adicionalmente, obteve-se, também, um número diferente de soluções equivalentes sendo que para os sistemas de 84 e 136 barras foram encontradas, respectivamente, 10 e 16 soluções equivalentes, assim sendo, esse conjunto de soluções encontradas e apresentadas no documento representam soluções ótimas ou sub-ótimas alternativas.

Assim, a maior complexidade topológica do sistema de 136 barras contribui também para um aumento do número de soluções equivalentes, já que o sistema têm um aumento no número de barras e conexões o que amplia o espaço de busca de soluções, possibilitando, portanto, que o algoritmo BT explore diferentes configurações de manobras de chaves sem alterar o desempenho e a factibilidade das sequencias o que resulta em várias soluções que sejam igualmente boas em termos de ENS.

Além disso, para trabalhos futuros, melhorias podem ser efetuadas em relação a:

1. À proposta de solução inicial. Atualmente, a estratégia adotada consiste em abrir todas as chaves e, posteriormente, fechá-las, sendo que, após isso, efetua-se uma melhora por meio da geração de uma vizinhança. Entretanto, mesmo com essa melhoria, para sistemas de grande porte, o tempo de convergência ainda é elevado, apesar de ser uma abordagem funcional e factível;

2. À realização de testes em sistemas de maiores portes, como os de 417 e 10.477 barras;

3. Ao desenvolvimento de outras técnicas meta-heurísticas para permitir uma comparação entre diferentes estratégias aplicadas ao mesmo problema.

REFERENCIAS

ABDEL-BASSET, M.; ABDEL-FATAH, L.; SANGAIAH, A. K. Metaheuristic algorithms: a comprehensive review. In: SANGAIAH, A. K.; SHENG, M.; ZHANG, Z. (ed.) *Intelligent Data-Centric Systems*. [*S. l.: s. n.*], 2018. p. 185-231, DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813314-9.00010-4.

ARCANJO, D. N. *Metodologia multi-estágio para restabelecimento de sistemas elétricos de distribuição utilizando algoritmos bio-inspirados*. 2014. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Juiz de Fora, 2014.

BADRAN, O.; MEKHILEF, S.; MOKHLIS, H.; DAHALAN, W. Optimal switching sequence path for distribution network reconfiguration considering different types of distributed generation. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Hoboken, v. 12, n. 6, p. 874–882, jul. 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/tee.22478.

BARAN, M. E.; WU, F. F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. *IEEE Transactions on power Delivery*, Piscataway, v. 4, n. 1, p. 725–734, 1989. DOI: https://doi.org/10.1109/61.19265.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Resolução Normativa ANEEL nº 956, de 7 de dezembro de 2021*. Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2021.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Superintendência de Gestão Tarifária e Regulação Econômica. *Perdas de energia elétrica na distribuição*: 2024. Brasília, DF: ANEEL, 2024. 16 p. Disponível em: https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/242969. Acesso em: 10 fev. 2025.

CARVALHO, A. B. d.; BARRIVEIRA, R.; TAVARES, C.; RODRIGUES, K.; LOSCO, F. Relatório técnico: Busca Tabu aplicada ao problema do Caixeiro Viajante. Curitiba, 2008. Disponível em: https://www.inf.ufpr.br/aurora/disciplinas/topicosia2/downloads/trabalhos/BuscaTabuTSP.pdf. Acesso em: 10 mar. 2025.

CARVALHO, P. M. S.; FERREIRA, L. A. F. M.; BARRUNCHO, L. M. F. Optimization approach to dynamic restoration of distribution systems. *Electrical Power and Energy Systems*, London, v. 29, n. 3, p. 222-229, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.07.004

CHIOU, J.-P.; CHANG, C.-F.; SU, C.-T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 668–674, 2005. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846096.

CIVANLAR, S.; GRAINGER, J.; YIN, H.; LEE, S. Distribution feeder reconfiguration for lossreduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988. DOI: https://doi.org/10.1109/61.193906.

FERREIRA, M. A. *Sequenciamento de operações de chaveamento para restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica usando busca tabu e busca em vizinhança variável*. 2024. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Ilha Solteira, 2024.

GLOVER, F. *Tabu search fundamentals and uses*. Boulder: University of Colorado, 1995. Disponível em: https://leeds-faculty.colorado.edu/glover/Publications/TS%20Fundamentals%26Uses.pdf. Acesso em: 10 mar. 2025.

GLOVER, F.; LAGUNA, M. *Tabu search*. New York: Springer, 1997. 401 p. ISBN 978-0-7923-8187-7. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-6089-0. Acesso em: 10 mar. 2025.

GOMES, A. *Uma introdução à busca tabu*. São Paulo: Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 2008. Disponível em: https://www.ime.usp.br/~gold/cursos/2009/mac5758/AndreBuscaTabu.pdf. Acesso em: 10 mar. 2025.

JUMA, S.; MURIITHI, C. M.; NGOO, L. Optimal switching sequence using a metaheuristic algorithm for feeder reconfiguration. *International Journal of Engineering Research and Technology*, New Delhi, v. 11, n. 8, p. 1329-1346, 2018.

LIMA, W. B. A. *Restauração ótima de sistemas de distribuição considerando a sequência de chaveamento*. 2024. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2024.

MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *SBA Controle & Automação*, São Paulo, v. 11, n. 3, p. 150–159, 2000.

MELO, I. D. de. *Fluxo de potência*: teoria e implementação de códigos computacionais. São Paulo: Edgard Blücher, 2023.

MUBARAK, H.; MUHAMMAD, M. A.; MANSOR, N. N.; MOKHLIS, H.; AHMAD, S.; AHMED, T.; SUFYAN, M. Operational cost minimization of electrical distribution network during switching for sustainable operation. *Sustainability*, Basel, v. 14, n. 7, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/su14074196. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/14/7/4196. Acesso em: 10 mar. 2025.

OLIVEIRA, C. C. B. d.; KAGAN, N.; ROBBA, E. J. *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012. ISBN 978-85-212-0539-5.

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

PONTES, R. de P. *Nova metodologia full newton para consideração dos limites de geração de potência reativa no problema de fluxo de potência*. 2018. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Juiz de Fora, 2018.

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

SILVA, R. S. d. *Sistemas elétricos de potência I*. Londrina: Educacional, 2019. ISBN 978-85-522-1460-1.

SOUZA, E. S. *Novas modelagens matemáticas para otimização do problema de restauração em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais*. 2018. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Ilha Solteira, 2018.

TIMOTEO, S. de P. M.; FAESARELLA, A. *Conversão eletromecânica de energia*. Londrina: Educacional, 2017. ISBN 978-85-8482-826-5.

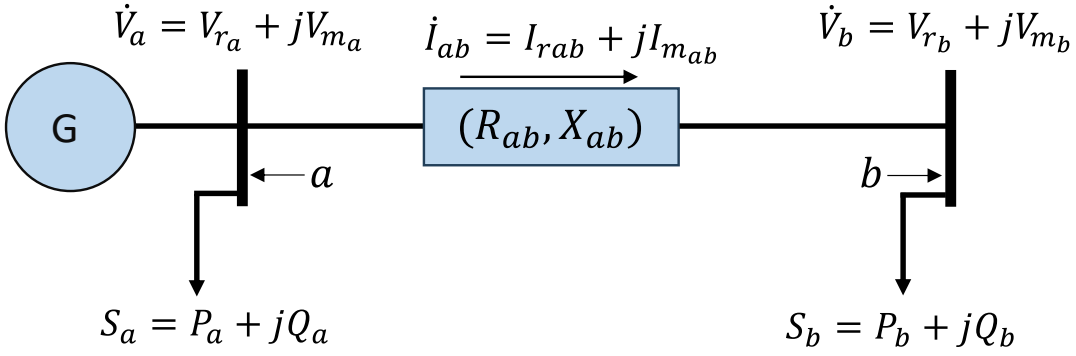
YAMAMOTO, R. Y.; PINTO, T.; ROMERO, R.; MACEDO, L. H. Specialized tabu search algorithm applied to the reconfiguration of radial distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Amsterdam, v. 162, p. 110258, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110258.

ZAPELINI, C. Z. *Um estudo abrangente sobre metaheurística, incluindo um histórico*. São Paulo: USP, 2009. 23 p. Disponível em: https://www.ime.usp.br/%7Egold/cursos/2009/mac5758-/ChristianeHeuristicas.pdf. Acesso em: 10 mar. 2025.

ANEXO A - FLUXO DE CARGA

No problema de SOC em RSDEE todas as topologias são radiais, portanto, utiliza-se um FC para efetuar a verificação da factibilidade. Para isso, utilizou-se o software MATPOWER que efetuou para a análise o método de Newton-Raphson, o qual será discutido na sequência e é mostrado em Melo (2023). Primeiramente, na Figura 30, representa-se um trecho de um sistema de distribuição radial.

Figura 30 - Trecho de um sistema de distribuição radial com duas barras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em que R_{ab} e X_{ab} são, de modo respectivo, a resistência e a reatância do ramo de conexão entre as barras a e b. Além disso, P_a, P_b, Q_a e Q_b são, respectivamente, as demandas de potência ativa e reativa das barras a e b. Dessa forma, a impedância do ramo de ligação pode ser representada por meio de (8).

$$Z_{ab} = R_{ab} + jX_{ab} \tag{8}$$

As tensões nas barras são representadas na forma polar e podem ser visualizadas por meio de (9) e (10).

$$\dot{V}_a = V_a \angle \theta_a \tag{9}$$

$$\dot{V}_b = V_b \angle \theta_b \tag{10}$$

A corrente no ramo de conexão de a para b, i_{ab} é determinada pela admitância, Y_{ab}. Tais parâmetros podem ser visualizados, respectivamente, por meio de (11) e (12).

$$\dot{i}_{ab} = Y_{ab}(\dot{V}_a - \dot{V}_b) \tag{11}$$

onde:

$$Y_{ab} = \frac{1}{Z_{ab}} = G_{ab} + jB_{ab} \tag{12}$$

A potência ativa e reativa demandadas na barra a, podem ser visualizadas, respectivamente, por meio de (13) e (14):

$$P_a = V_a V_b \left[G_{ab}\cos(\theta_a - \theta_b) + B_{ab}\sin(\theta_a - \theta_b)\right] \tag{13}$$

$$Q_a = V_a V_b \left[G_{ab}\sin(\theta_a - \theta_b) - B_{ab}\cos(\theta_a - \theta_b)\right] \tag{14}$$

Adicionalmente, para a barra b, tem-se que a potência ativa é dada por (15) e a reativa por (16):

$$P_b = V_b V_a \left[G_{ab}\cos(\theta_b - \theta_a) + B_{ab}\sin(\theta_b - \theta_a)\right] \tag{15}$$

$$Q_b = V_b V_a \left[G_{ab}\sin(\theta_b - \theta_a) - B_{ab}\cos(\theta_b - \theta_a)\right] \tag{16}$$

O método de Newton-Raphson resolve iterativamente um sistema não linear utilizando a matriz Jacobiana, que pode ser visualizada em (17).

$$J = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \tag{17}$$

onde:

$$A = \frac{\partial P_b}{\partial \theta_b} \tag{18}$$

$$B = \frac{\partial P_b}{\partial V_b} \tag{19}$$

$$C = \frac{\partial Q_b}{\partial \theta_b} \tag{20}$$

$$D = \frac{\partial Q_b}{\partial V_b} \tag{21}$$

As derivadas das equações (27)-(30), podem ser visualizadas pelas por meio de (22)-(25):

$$\frac{\partial P_b}{\partial \theta_b} = -V_a V_b \left[G_{ab}\sin(\theta_b - \theta_a) - B_{ab}\cos(\theta_b - \theta_a)\right] \tag{22}$$

$$\frac{\partial P_b}{\partial V_b} = V_a \left[G_{ab}\cos(\theta_b - \theta_a) + B_{ab}\sin(\theta_b - \theta_a)\right] \tag{23}$$

$$\frac{\partial Q_b}{\partial \theta_b} = -V_a V_b \left[G_{ab}\cos(\theta_b - \theta_a) + B_{ab}\sin(\theta_b - \theta_a)\right] \tag{24}$$

$$\frac{\partial Q_b}{\partial V_b} = V_a \left[G_{ab}\sin(\theta_b - \theta_a) - B_{ab}\cos(\theta_b - \theta_a)\right] \tag{25}$$

O método de Newton-Raphson segue os seguintes passos:

1. Definir uma estimativa inicial para $V_b^{(0)}$ e $\theta_b^{(0)}$.

2. Calcular as potências ativas e reativas usando as equações do fluxo de potência.

3. Calcular os resíduos entre os valores esperados e os valores calculados:

$$\Delta P_b = P_b^{\text{ref}} - P_b(V_b, \theta_b) \tag{26}$$

$$\Delta Q_b = Q_b^{\text{ref}} - Q_b(V_b, \theta_b) \tag{27}$$

4. Calcular a matriz Jacobiana J e resolver o sistema linear:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_b \\ \Delta V_b \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_b \\ \Delta Q_b \end{bmatrix} \tag{28}$$

5. Atualizar os valores das variáveis:

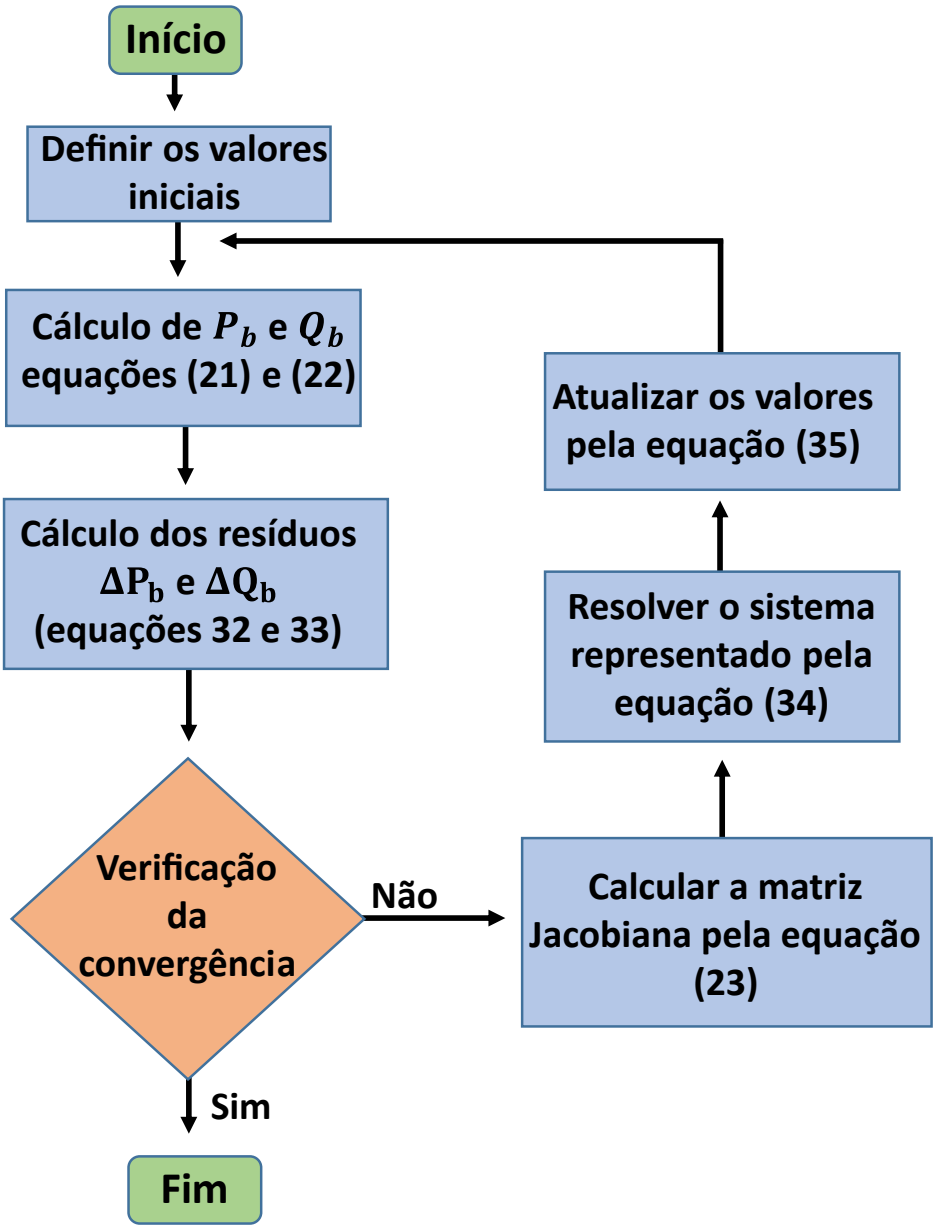
$$\theta_b^{(i+1)} = \theta_b^{(i)} + \Delta\theta_b \tag{29}$$

$$V_b^{(i+1)} = V_b^{(i)} + \Delta V_b \tag{30}$$

6. Verificar critério de convergência: Se $|\Delta P_b| < \varepsilon$ e $|\Delta Q_b| < \varepsilon$, considera-se que o sistema está factível. Caso contrário, repete-se o processo.

Por meio da Figura 31, pode-se ver uma representação do fluxograma para a descrição do método utilizado para a consideração da factibilidade.

Figura 31 - Fluxograma para o método de Newton-Raphson



Fonte: Adaptado de Pontes (2018).

ANEXO B - DADOS DOS SISTEMAS UTILIZADOS PARA TESTE

B.1 Dados para o sistema de 14 barras

Para o sistema teste de 14 barras, têm-se os dados, na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados para o sistema de 14 barras

DADOS DOS RAMOS						DADOS DAS BARRAS		
Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [%]	Reatância [%]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	14	13	7,5000	10,0000	550	1	2100,00	-800,00
2	13	12	8,0000	11,0000	300	2	1000,00	900,00
3	13	11	9,0000	18,0000	200	3	1000,00	-1100,00
4	11	10	4,0000	4,0000	100	4	1000,00	900,00
5	14	9	11,0000	11,0000	650	5	4500,00	-1700,00
6	9	8	8,0000	11,0000	450	6	600,00	-500,00
7	9	7	11,0000	11,0000	50	7	1000,00	900,00
8	8	6	11,0000	11,0000	150	8	5000,00	1800,00
9	8	5	8,0000	11,0000	250	9	4000,00	2700,00
10	14	4	11,0000	11,0000	350	10	1500,00	1200,00
11	4	3	9,0000	12,0000	150	11	2000,00	-400,00
12	4	2	8,0000	11,0000	200	12	3000,00	400,00
13	2	1	4,0000	4,0000	150	13	2000,00	1600,00
14	12	6	4,0000	4,0000	150	14	0,00	0,00
15	7	3	4,0000	4,0000	100			
16	10	1	9,0000	12,0000	50			

Fonte: Adaptado de Civanlar *et al.* (1988).

B.2 Dados para o sistema de 33 barras

Para o sistema teste de 33 barras, têm-se os seguintes dados, na Tabela 13.

Tabela 13 - Dados para o sistema de 33 barras

DADOS DOS RAMOS						DADOS DAS BARRAS		
Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	1	2	0,0922	0,0470	400	1	0	0
2	2	3	0,4930	0,2511	250	2	100	60
3	3	4	0,3660	0,1864	150	3	90	40
4	4	5	0,3811	0,1941	150	4	120	80
5	5	6	0,8190	0,7070	150	5	60	30
6	6	7	0,1872	0,6188	50	6	60	20
7	7	8	0,7114	0,2351	50	7	200	100
8	8	9	1,0300	0,7400	50	8	200	100
9	9	10	1,0440	0,7400	50	9	60	20
10	10	11	0,1966	0,0650	50	10	60	20
11	11	12	0,3744	0,1238	50	11	45	30
12	12	13	1,4680	1,1550	50	12	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	50	13	60	35
14	14	15	0,5910	0,5260	50	14	120	80
15	15	16	0,7463	0,5450	50	15	60	10
16	16	17	1,2890	1,7210	50	16	60	20
17	17	18	0,7320	0,5740	50	17	60	20
18	2	19	0,1640	0,1565	150	18	90	40
19	19	20	1,5042	1,3554	150	19	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	150	20	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	50	21	90	40
22	3	23	0,4512	0,3083	150	22	90	40
23	23	24	0,8980	0,7091	150	23	90	50
24	24	25	0,8960	0,7011	100	24	420	200
25	6	26	0,2030	0,1034	150	25	420	200
26	26	27	0,2842	0,1447	150	26	60	25
27	27	28	1,0590	0,9337	100	27	60	25
28	28	29	0,8042	0,7006	100	28	60	20
29	29	30	0,5075	0,2585	100	29	120	70
30	30	31	0,9744	0,9630	50	30	200	600
31	31	32	0,3105	0,3619	50	31	150	70
32	32	33	0,3410	0,5302	50	32	210	100
33	8	21	2,0000	2,0000	100	33	60	40
34	9	15	2,0000	2,0000	50			

Continua na próxima página

Tabela 13 – Continuação da página anterior

Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
35	12	22	2,0000	2,0000	50			
36	18	33	0,5000	0,5000	50			
37	25	29	0,5000	0,5000	50			

Fonte: Adaptado de Baran e Wu (1989).

B.3 Dados para o sistema de 84 barras

Para o sistema teste de 84 barras, têm-se os seguintes dados, na Tabela 14.

Tabela 14 - Dados para o sistema de 84 barras

DADOS DOS RAMOS						DADOS DAS BARRAS		
Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	1	84	0,1944	0,6624	300	1	0,0	0,0
2	1	2	0,2096	0,4304	300	2	100,0	50,0
3	2	3	0,2358	0,4842	250	3	300,0	200,0
4	3	4	0,0917	0,1883	250	4	350,0	250,0
5	4	5	0,2096	0,4304	200	5	220,0	100,0
6	5	6	0,0393	0,0807	150	6	1100,0	800,0
7	6	7	0,0405	0,1380	50	7	400,0	320,0
8	7	8	0,1048	0,2152	50	8	300,0	200,0
9	7	9	0,2358	0,4842	50	9	300,0	230,0
10	7	10	0,1048	0,2152	50	10	300,0	260,0
11	11	84	0,0786	0,1614	350	11	0,9	0,0
12	11	12	0,3406	0,6944	400	12	1200,0	800,0
13	12	13	0,0262	0,0538	100	13	800,0	600,0
14	12	14	0,0786	0,1614	100	14	700,0	500,0
15	15	84	0,1134	0,3864	450	15	0,0	0,0
16	15	16	0,0524	0,1076	450	16	300,0	150,0
17	16	17	0,0524	0,1076	450	17	500,0	350,0
18	17	18	0,1572	0,3228	400	18	700,0	400,0

Continua na próxima página

Tabela 14 – Continuação da página anterior

Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
19	18	19	0,0393	0,0807	350	19	1200,0	1000,0
20	19	20	0,1703	0,3497	200	20	300,0	300,0
21	20	21	0,2358	0,4842	100	21	400,0	350,0
22	21	22	0,1572	0,3228	50	22	50,0	20,0
23	21	23	0,1965	0,4035	50	23	50,0	20,0
24	23	24	0,1310	0,2690	50	24	50,0	10,0
25	25	84	0,0567	0,1932	400	25	50,0	30,0
26	25	26	0,1048	0,2152	400	26	100,0	60,0
27	26	27	0,2489	0,5111	250	27	100,0	70,0
28	27	28	0,0486	0,1656	250	28	1800,0	1300,0
29	28	29	0,1310	0,2690	100	29	200,0	120,0
30	30	84	0,1965	0,3960	350	30	0,0	0,0
31	30	31	0,1310	0,2690	350	31	1800,0	1600,0
32	31	32	0,1310	0,2690	150	32	200,0	150,0
33	32	33	0,0262	0,0538	50	33	200,0	100,0
34	33	34	0,1703	0,3497	50	34	800,0	600,0
35	34	35	0,0524	0,1076	100	35	100,0	60,0
36	35	36	0,4978	1,0222	50	36	100,0	60,0
37	36	37	0,0393	0,0807	50	37	20,0	10,0
38	37	38	0,0393	0,0807	50	38	20,0	10,0
39	38	39	0,0786	0,1614	50	39	20,0	10,0
40	39	40	0,2096	0,4304	50	40	20,0	10,0
41	38	41	0,1965	0,4035	50	41	200,0	160,0
42	41	42	0,2096	0,4304	50	42	50,0	30,0
43	43	84	0,0486	0,1656	300	43	0,0	0,0
44	43	44	0,0393	0,0807	300	44	30,0	20,0
45	44	45	0,1310	0,2690	300	45	800,0	700,0
46	45	46	0,2358	0,4842	200	46	200,0	150,0
47	47	84	0,2430	0,8280	400	47	0,0	0,0
48	47	48	0,0655	0,1345	400	48	0,0	0,0
49	48	49	0,0655	0,1345	400	49	0,0	0,0
50	49	50	0,0393	0,0807	400	50	200,0	160,0
51	50	51	0,0786	0,1614	350	51	800,0	600,0
52	51	52	0,0393	0,0807	300	52	500,0	300,0
53	52	53	0,0786	0,1614	200	53	500,0	350,0
54	53	54	0,0524	0,1076	100	54	500,0	300,0

Continua na próxima página

Tabela 14 – Continuação da página anterior

Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
55	54	55	0,1310	0,2690	50	55	200,0	80,0
56	56	84	0,2268	0,7728	250	56	0,0	0,0
57	56	57	0,5371	1,1029	250	57	30,0	20,0
58	57	58	0,0524	0,1076	250	58	600,0	420,0
59	58	59	0,0405	0,1380	200	59	0,0	0,0
60	59	60	0,0393	0,0807	200	60	20,0	10,0
61	60	61	0,0262	0,0538	50	61	20,0	10,0
62	61	62	0,1048	0,2152	50	62	200,0	130,0
63	62	63	0,2358	0,4842	50	63	300,0	240,0
64	63	64	0,0243	0,0828	100	64	300,0	200,0
65	65	84	0,0486	0,1656	300	65	0,0	0,0
66	65	66	0,1703	0,3497	300	66	50,0	30,0
67	66	67	0,1215	0,4140	300	67	0,0	0,0
68	67	68	0,2187	0,7452	300	68	400,0	360,0
69	68	69	0,0486	0,1656	250	69	0,0	0,0
70	69	70	0,0729	0,2484	250	70	0,0	0,0
71	70	71	0,0567	0,1932	250	71	2000,0	1500,0
72	71	72	0,0262	0,0528	100	72	200,0	150,0
73	73	84	0,3240	1,1040	300	73	0,0	0,0
74	73	74	0,0324	0,1104	300	74	0,0	0,0
75	74	75	0,0567	0,1932	300	75	1200,0	950,0
76	75	76	0,0486	0,1656	150	76	300,0	180,0
77	77	84	0,2511	0,8556	400	77	0,0	0,0
78	77	78	0,1296	0,4416	400	78	400,0	360,0
79	78	79	0,0486	0,1656	350	79	2000,0	1300,0
80	79	80	0,1310	0,2640	100	80	200,0	140,0
81	80	81	0,1310	0,2640	100	81	500,0	360,0
82	81	82	0,0917	0,1883	50	82	100,0	30,0
83	82	83	0,3144	0,6456	50	83	400,0	360,0
84	5	55	0,1310	0,2690	50	84	0,0	0,0
85	7	60	0,1310	0,2690	200			
86	11	43	0,1310	0,2690	50			
87	12	72	0,3406	0,6994	150			
88	13	76	0,4585	0,9415	100			
89	14	18	0,5371	1,0824	50			
90	16	26	0,0917	0,1883	150			

Continua na próxima página

Tabela 14 – Continuação da página anterior

Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
91	20	83	0,0786	0,1614	100			
92	28	32	0,0524	0,1076	100			
93	29	39	0,0786	0,1614	50			
94	34	46	0,0262	0,0538	150			
95	40	42	0,1965	0,4035	50			
96	53	64	0,0393	0,0807	100			

Fonte: Adaptado de Chiou, Chang e Su (2005).

B.4 Dados para o sistema de 136 barras

Para o sistema teste de 136 barras, têm-se os seguintes dados, na Tabela 15.

Tabela 15 - Dados para o sistema de 136 barras

DADOS DOS RAMOS						DADOS DAS BARRAS		
Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	136	1	0,33205	0,76653	200	1	0,0	0,0
2	1	2	0,00188	0,00433	200	2	47,780	19,009
3	2	3	0,22324	0,51535	200	3	42,551	16,929
4	3	4	0,09943	0,22953	200	4	87,022	34,622
5	4	5	0,15571	0,35945	200	5	311,310	123,855
6	5	6	0,16321	0,37677	200	6	148,869	59,228
7	6	7	0,11444	0,26417	50	7	238,672	94,956
8	6	8	0,05675	0,05666	150	8	62,299	24,786
9	8	9	0,52124	0,27418	50	9	124,598	49,571
10	8	10	0,10877	0,10860	150	10	140,175	55,768
11	10	11	0,39803	0,20937	50	11	116,813	46,474
12	10	12	0,91744	0,31469	50	12	249,203	99,145
13	10	13	0,11823	0,11805	100	13	291,447	115,952
14	13	14	0,50228	0,26421	50	14	303,720	120,835
15	13	15	0,05675	0,05666	50	15	215,396	85,695

Continua na próxima página

Tabela 15 – Continuação da página anterior

Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
16	15	16	0,29379	0,15454	50	16	198,586	79,007
17	136	17	0,33205	0,76653	250	17	0,0	0,0
18	17	18	0,00188	0,00433	250	18	0,0	0,0
19	18	19	0,22324	0,51535	250	19	0,0	0,0
20	19	20	0,10881	0,25118	250	20	30,127	14,729
21	20	21	0,71078	0,37388	50	21	230,972	112,920
22	20	22	0,18197	0,42008	250	22	60,256	29,458
23	22	23	0,30326	0,15952	50	23	230,972	112,920
24	22	24	0,02439	0,05630	200	24	120,507	58,915
25	24	25	0,04502	0,10394	200	25	0,0	0,0
26	25	26	0,01876	0,04331	150	26	56,981	27,857
27	26	27	0,11823	0,11805	150	27	364,665	178,281
28	27	28	0,02365	0,02361	100	28	0,0	0,0
29	28	29	0,18954	0,09970	50	29	124,647	60,939
30	29	30	0,39803	0,20937	50	30	56,981	27,857
31	28	31	0,05675	0,05666	100	31	0,0	0,0
32	31	32	0,09477	0,04985	50	32	85,473	41,787
33	32	33	0,41699	0,21934	50	33	0,0	0,0
34	33	34	0,11372	0,05982	50	34	396,735	193,960
35	31	35	0,07566	0,07555	50	35	0,0	0,0
36	35	36	0,36960	0,19442	50	36	181,152	88,563
37	36	37	0,26536	0,13958	50	37	242,172	118,395
38	35	38	0,05675	0,05666	50	38	75,316	36,821
39	136	39	0,33205	0,76653	300	39	0,0	0,0
40	39	40	0,11819	0,27283	300	40	1,254	0,531
41	40	41	2,96288	1,01628	50	41	6,274	2,660
42	40	42	0,00188	0,00433	300	42	0,0	0,0
43	42	43	0,06941	0,16024	300	43	117,880	49,971
44	43	44	0,81502	0,42872	50	44	62,668	26,566
45	43	45	0,06378	0,14724	250	45	172,285	73,034
46	45	46	0,13132	0,30315	250	46	458,556	194,388
47	46	47	0,06191	0,14291	200	47	262,962	111,473
48	47	48	0,11444	0,26417	100	48	235,761	99,942
49	48	49	0,28374	0,28331	50	49	0,0	0,0
50	49	50	0,28374	0,28331	50	50	109,215	46,298
51	48	51	0,04502	0,10394	50	51	0,0	0,0

Continua na próxima página

Tabela 15 – Continuação da página anterior

Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
52	51	52	0,02626	0,06063	100	52	72,809	30,865
53	52	53	0,06003	0,13858	50	53	258,473	109,570
54	53	54	0,03002	0,06929	50	54	69,169	29,322
55	54	55	0,02064	0,04764	50	55	21,843	9,260
56	52	56	0,10881	0,25118	50	56	0,0	0,0
57	56	57	0,25588	0,13460	50	57	20,527	8,702
58	57	58	0,41699	0,21934	50	58	150,548	63,819
59	58	59	0,50228	0,26421	50	59	220,687	93,552
60	59	60	0,33170	0,17448	50	60	92,384	39,163
61	60	61	0,20849	0,10967	50	61	0,0	0,0
62	47	62	0,13882	0,32047	100	62	226,693	96,098
63	136	63	0,00750	0,01732	200	63	0,0	0,0
64	63	64	0,27014	0,62362	200	64	294,016	116,974
65	64	65	0,38270	0,88346	150	65	83,015	33,028
66	65	66	0,33018	0,76220	150	66	83,015	33,028
67	66	67	0,32830	0,75787	150	67	103,770	41,285
68	67	68	0,17072	0,39409	100	68	176,408	70,184
69	68	69	0,55914	0,29412	50	69	83,015	33,028
70	68	70	0,05816	0,13425	100	70	217,917	86,698
71	70	71	0,70130	0,36890	50	71	23,294	9,267
72	71	72	1,02352	0,53839	50	72	5,075	2,019
73	70	73	0,06754	0,15591	100	73	72,638	28,899
74	73	74	1,32352	0,45397	50	74	405,990	161,5235
75	136	75	0,01126	0,02598	150	75	0,0	0,0
76	75	76	0,72976	1,68464	150	76	100,182	42,468
77	76	77	0,22512	0,51968	150	77	142,523	60,417
78	77	78	0,20824	0,48071	150	78	96,042	40,713
79	78	79	0,04690	0,10827	100	79	300,454	127,366
80	79	80	0,61950	0,61857	100	80	141,238	59,873
81	80	81	0,34049	0,33998	100	81	279,847	118,631
82	81	82	0,56862	0,29911	50	82	87,312	37,013
83	81	83	0,10877	0,10860	50	83	243,849	103,371
84	83	84	0,56862	0,29911	50	84	247,750	105,025
85	136	85	0,01126	0,02598	250	85	0,0	0,0
86	85	86	0,41835	0,96575	250	86	89,878	38,101
87	86	87	0,10499	0,13641	100	87	1137,28	482,108

Continua na próxima página

Tabela 15 – Continuação da página anterior

Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
88	86	88	0,43898	1,01338	150	88	458,339	194,296
89	88	89	0,07520	0,02579	100	89	385,197	163,290
90	89	90	0,07692	0,17756	50	90	0,0	0,0
91	90	91	0,33205	0,76653	150	91	79,608	33,747
92	91	92	0,08442	0,19488	150	92	87,312	37,013
93	92	93	0,13320	0,30748	100	93	0,0	0,0
94	93	94	0,29320	0,29276	50	94	74,001	31,370
95	94	95	0,21753	0,21721	50	95	232,050	98,369
96	95	96	0,26482	0,26443	50	96	141,819	60,119
97	93	97	0,10318	0,23819	100	97	0,0	0,0
98	97	98	0,13507	0,31181	100	98	76,449	32,408
99	136	99	0,00938	0,02165	250	99	0,0	0,0
100	99	100	0,16884	0,38976	250	100	51,322	21,756
101	100	101	0,11819	0,27283	250	101	59,874	25,381
102	101	102	2,28608	0,78414	50	102	9,065	3,843
103	101	103	0,45587	1,05236	200	103	2,092	0,887
104	103	104	0,69600	1,60669	150	104	16,735	7,094
105	104	105	0,45774	1,05669	150	105	1506,522	638,634
106	105	106	0,20298	0,26373	50	106	313,023	132,694
107	106	107	0,21348	0,27737	50	107	79,831	33,842
108	107	108	0,54967	0,28914	50	108	51,322	21,756
109	108	109	0,54019	0,28415	50	109	0,0	0,0
110	107	110	0,04550	0,05911	100	110	202,435	85,815
111	110	111	0,47385	0,24926	50	111	60,823	25,784
112	111	112	0,86241	0,45364	50	112	45,618	19,338
113	112	113	0,56862	0,29911	50	113	0,0	0,0
114	108	114	0,77711	0,40878	50	114	157,070	66,584
115	114	115	1,08038	0,56830	50	115	0,0	0,0
116	109	116	1,09933	0,57827	50	116	250,148	106,041
117	116	117	0,47385	0,24926	50	117	0,0	0,0
118	104	118	0,32267	0,74488	50	118	69,809	29,593
119	118	119	0,14633	0,33779	50	119	32,072	13,596
120	119	120	0,12382	0,28583	50	120	61,084	25,894
121	136	121	0,01126	0,02598	200	121	0,0	0,0
122	121	122	0,64910	1,49842	200	122	94,622	46,260
123	122	123	0,04502	0,10394	200	123	49,858	24,375

Continua na próxima página

Tabela 15 – Continuação da página anterior

Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Capacidade de corrente dos ramos [A]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
124	123	124	0,52640	0,18056	50	124	123,164	60,214
125	123	125	0,02064	0,04764	200	125	78,350	38,304
126	125	126	0,53071	0,27917	50	126	145,475	71,121
127	125	127	0,09755	0,22520	150	127	21,369	10,447
128	127	128	0,11819	0,27283	50	128	74,789	36,564
129	127	129	0,13882	0,32047	150	129	227,926	111,431
130	129	130	0,04315	0,09961	150	130	35,614	17,411
131	130	131	0,09192	0,21220	150	131	249,295	121,877
132	131	132	0,16134	0,37244	150	132	316,722	154,842
133	132	133	0,37832	0,37775	100	133	333,817	163,199
134	133	134	0,39724	0,39664	50	134	249,295	121,877
135	134	135	0,29320	0,29276	50	135	0,0	0,0
136	7	73	0,13132	0,30315	50	136	0,0	0,0
137	9	24	0,26536	0,13958	50			
138	15	83	0,14187	0,14166	50			
139	38	135	0,08512	0,08499	50			
140	25	51	0,04502	0,10394	100			
141	50	96	0,14187	0,14166	50			
142	55	98	0,14187	0,14166	50			
143	62	120	0,03940	0,09094	50			
144	66	79	0,12944	0,29882	100			
145	79	131	0,01688	0,03898	100			
146	84	135	0,33170	0,17448	50			
147	91	104	0,14187	0,14166	100			
148	90	129	0,07692	0,17756	50			
149	90	103	0,07692	0,17756	100			
150	92	104	0,07692	0,17756	50			
151	92	132	0,07692	0,17756	100			
152	96	120	0,26482	0,26443	50			
153	110	47	0,49696	0,64567	150			
154	126	76	0,17059	0,08973	50			
155	128	77	0,05253	0,12126	50			
156	135	98	0,29320	0,29276	100			

Fonte: Adaptado de Mantovani, Casari e Romero (2000).