

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

CESAR AUGUSTO ROMERO REYNOSO

**OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE
ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO CONTROLE DA
TOPOLOGIA DA REDE DE TRANSMISSÃO**

CESAR AUGUSTO ROMERO REYNOSO

OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO CONTROLE DA TOPOLOGIA DA REDE DE TRANSMISSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R466o Reynoso, César Augusto Romero.
Otimização da operação de sistemas de energia elétrica através do controle da topologia da rede de transmissão / César Augusto Romero Reynoso. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
52 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

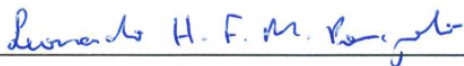
Orientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo

Inclui bibliografia

1. Desmembramento ótimo de barras. 2. Meta-heurística busca tabu. 3. Mudança de topologia da rede de transmissão. 4. Otimização da operação de sistemas elétricos.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

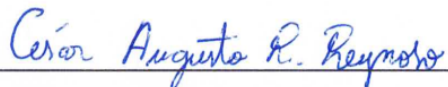
Aos onze dias do mês de abril do ano de dois mil e vinte e três, o discente **Cesar Augusto Romero Reynoso**, matriculado sob o nº 202052231 tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo, Dr. Renzo Amilcar Vargas Peralta e o Dr. Mario Andres Mejia Alzate, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Otimização da operação de sistemas de energia elétrica através do controle da topologia da rede de transmissão", obtendo a nota 10,0 (dez vírgula zero) e conceito aprovado.



Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo

Possagnolo

- Orientador -



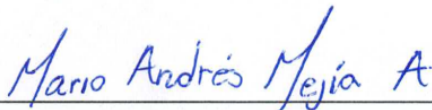
Cesar Augusto Romero Reynoso

- Discente -



Dr. Renzo Amilcar Vargas Peralta

- Membro da Banca -



Dr. Mario Andres Mejia Alzate

- Membro da Banca -

Dedico
À minha mãe, Lucila.

AGRADECIMENTOS

À banca examinadora, pela leitura, correção e arguição do meu trabalho.

A todos os funcionários e professores da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Ao meu orientador Professor Doutor Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo pela orientação, paciência e o tempo dedicado a minha orientação.

À todos os meus colegas do LAPSEE, que proporcionaram um ambiente confortável e agradável para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos Lucas Yamaguti e Victor Molieri pela constante ajuda nos últimos anos, tanto acadêmica quanto pessoal.

Aos meus pais Rubén e Lucila, que tanto me ajudaram e apoiaram ao longo da minha vida. Simplesmente não seria possível chegar até aqui sem eles.

“Viva como se fosse morrer amanhã. Aprenda como se fosse viver para sempre”.
Mahatma Gandhi.

Resumo

O presente trabalho considera a análise teórica e a implementação computacional de uma meta-heurística busca tabu especializada para encontrar a topologia ótima de um sistema de transmissão com a finalidade de otimizar o custo de operação horária de um sistema elétrico. A minimização dos custos de operação pode ser encontrada mudando a topologia da rede de transmissão. Na literatura especializada, a estratégia mais conhecida é mudar a topologia do sistema de transmissão desligando algumas linhas do sistema de transmissão. Neste trabalho de pesquisa, a proposta consiste em mudar a topologia do sistema de transmissão realizando desmembramento de barras. Na pesquisa desenvolvida, é provada que a estratégia sugerida é uma generalização da proposta de desligar linhas de transmissão, isto é, a mudança topológica é maior e o desligamento de linhas de transmissão é apenas um subconjunto da proposta de desmembramento de barras. Essa proposta não é nova, já que foi usada no passado para otimizar algum aspecto da operação de um sistema de transmissão, mas nunca foi usada para melhorar os custos de operação do sistema elétrico. Essa formulação deve ser resolvida usando um algoritmo de busca tabu especializado. São apresentados testes para verificar o desempenho da proposta usando os dados do sistema sul brasileiro.

Palavras chave: Desmembramento ótimo de barras, meta-heurística busca tabu, mudança de topologia da rede de transmissão, otimização da operação de sistemas elétricos.

Abstract

The present work considers the theoretical analysis and the computational implementation of a specialized tabu search metaheuristic to find the optimal topology of a transmission system in order to optimize the hourly operating cost of an electrical system. Minimizing operating costs can be performed by changing the topology of the transmission network. In the specialized literature, the best-known strategy is to change the topology of the transmission system by switching some lines of the transmission system. In this research work, the proposal consists of changing the topology of the transmission system by dismembering buses. In the developed research, it is proved that the suggested strategy is a generalization of the proposal of switching transmission lines, that is, the topological change is greater and the switch of transmission lines is just a subset of the proposal of dismembering buses. This proposal is not new, as it has been used in the past to optimize the operation of a transmission system, but it was never used to improve the operating costs of the electrical system. This formulation must be solved using a specialized tabu search algorithm. Tests are presented to verify the performance of the proposal using data from the Southern Brazilian System.

Keywords: Metaheuristic tabu search, optimal dismembering of buses, optimization of electrical systems operation, topology change of transmission network.

Sumário

1. Introdução Geral	11
2. Problema de Desligamento de Linhas no Sistema de Energia Elétrica	17
2.1 Introdução	17
3. Problema de Desmembramento de Barras no Sistema de Energia Elétrica	20
3.1 Introdução	20
3.2 Modelagem Matemática do Problema de Desmembramento de Barras	24
4. A Meta-heurística Tabu Search	26
4.1 Introdução	26
4.2 Terminologia Usada nas Heurísticas e nas Meta-heurísticas	27
4.3 Heurísticas	28
4.4 A Meta-heurística Tabu Search	32
4.5 Estratégia Tabu Search para o Problema de Desmembramento de Barras na Opera- ção Ótima de um Sistema Elétrico	35
5. Testes e Resultados	40
5.1 Teste Usando o Sistema Sul Brasileiro	40
5.2 Conclusões Parciais sobre os Testes	46
6. Conclusões	47
Referências	49
A. Dados do Sistema Usado nos Testes	51

Capítulo 1

Introdução Geral

Existem duas formas distintas de mudar a topologia de um sistema elétrico. A primeira consiste em desligar uma linha de transmissão e a segunda em desmembrar uma barra em duas ou mais barras. Deve-se observar que, fisicamente, uma barra está formada por vários barramentos que, quando conectados, formam apenas uma barra, mas quando separados podem representar barras distintas do ponto de vista elétrico. De 1970 a 2008, surgiram várias pesquisas cujo tema era mudar a topologia de uma rede de transmissão como forma de controlar a operação do sistema elétrico, da mesma forma como era feito com o desligamento ou ligamento de um banco de capacitores ou com a mudança do *tap* de um transformador. As principais propostas desse tipo de otimização podem ser encontradas em: Bacher e Glavitsch (1986); Bacher e Glavitsch (1988); Bakirtzis e Meliopoulos (1987); Glavitsch (1985); Mazi, Wollenberg e Hesse (1986); Schnyder e Glavitsch (1988); Schnyder e Glavitsch (1990) e Rolim e Machado (1999). Nesses trabalhos citados, a conclusão final era que o desligamento de uma linha de transmissão pode produzir os seguintes efeitos: (i) mudança dos fluxos de potência nas linhas de transmissão restantes, onde algumas linhas podem ter os fluxos aumentados e outras podem ter os fluxos diminuídos, podendo até ocorrer a reversão do sentido do fluxo de potência; (ii) as perdas podem aumentar ou diminuir; (iii) os módulos de tensão nas barras podem aumentar ou diminuir e (iv) as correntes de curto-circuito em alguns pontos do sistema elétrico podem aumentar ou diminuir. Contudo, algumas dessas observações não parecem muito verídicas e alguns desses tópicos são abordados neste trabalho.

Em Bacher e Glavitsch (1988), é apresentada uma proposta de mudança da topologia de uma rede de transmissão com o objetivo de reduzir as perdas do sistema. Nessa proposta, é possível ligar ou desligar linhas de transmissão e juntar ou desmembrar uma barra. Essa é a primeira proposta na literatura onde se sugere desmembrar uma barra em várias barras, o que representa uma mudança topológica muito maior que a de desligar uma linha. Nesse trabalho, os autores apresentam testes cujas propostas de solução diminuem as perdas em 9,8 MW e a topologia encontrada desmembra 4 barras do sistema elétrico e não desliga nenhuma linha de transmissão.

Em Rolim e Machado (1999), é realizada uma revisão bibliográfica das diferentes propostas de mudança na topologia de uma rede de transmissão com o objetivo de realizar ações de controle no sistema de transmissão. A parte que interessa nessa revisão é a mudança da topologia do sistema

de transmissão manobrando linhas de transmissão ou manobrando chaves de acoplamento dos barramentos de uma barra (*bus coupler switching*) do sistema. Geralmente, uma barra do sistema de transmissão é fisicamente formada por duas ou mais barras metálicas que são conectadas por uma chave, de forma a representar apenas uma barra do ponto de vista elétrico. Da mesma forma que são conectadas, essas barras metálicas podem ser separadas eletricamente pela mesma chave de conexão, abrindo assim um laço no sistema elétrico. Essa manobra é considerada uma estratégia de controle do sistema. Nesse trabalho, a revisão mais relevante está relacionada com a manobra de chaves de acoplamento das barras físicas de uma barra elétrica.

Em Mazi, Wollenberg e Hesse (1986), é apresentada uma proposta de controle corretivo da operação de um sistema de transmissão através de manobra em linhas de transmissão e manobra em chaves de acoplamento de uma barra. O artigo analisa apenas as ações corretivas para eliminar sobrecargas em linhas de transmissão, mas é importante ressaltar que os autores sugerem o desligamento de linhas de transmissão e a manobra de chaves para separar uma barra em duas barras independentes como sendo duas estratégias diferentes para resolver esse problema.

Em Bakirtzis e Meliopoulos (1987), é apresentada uma formulação formal do problema de controle da operação de um sistema elétrico usando terminologia de otimização matemática. Nessa proposta, resolve-se o problema de controle corretivo da operação de um sistema elétrico através da manobra de bancos de capacitores, de bancos de reatores e do desligamento de linhas de transmissão. É importante ressaltar nesse trabalho que as decisões incorporadas devem ser discretas. Portanto, na modelagem matemática, os controles são discretos e o único tipo de problema abordado é a eliminação de sobrecargas em linhas de transmissão. O corte de carga é adotado como último recurso para eliminar as sobrecargas em linhas de transmissão.

Em Fisher, O'Neill e Ferris (2008), aparece a primeira publicação que sugere o desligamento ótimo de linhas de transmissão com o propósito de melhorar a operação de um sistema de energia elétrica, em outras palavras, com o objetivo de minimizar os custos de operação devido aos custos diferentes de geração em cada barra geradora. Outras publicações sobre o tema podem ser encontradas em: Fuller, Ramasra e Cha (2012); Hedman et al. (2008); Hedman et al. (2009); Kocuk, Dey e Sun (2014); Ostrowski, Wang e Liu (2012) e Ruiz et al. (2012). Inclusive, uma tese de doutorado sobre o tema foi desenvolvida no Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LAPSEE) da FEIS em Flores (2018). Desde a publicação de Fisher, O'Neill e Ferris (2008), onde se sugere apenas desligar linhas de transmissão, surgiram várias publicações seguindo essa linha de pesquisa, enquanto que as pesquisas sobre mudança topológica da rede de transmissão como mecanismo de controle do sistema elétrico foram praticamente abandonadas. Da mesma forma, pesquisas sobre mudança topológica que separem barras do sistema elétrico também foram deixadas de lado. Não há um motivo explícito para tal comportamento. No entanto, o fato é que a proposta de mudar a topologia do sistema elétrico para otimizar os custos de operação acabou se tornando dominante nas atividades de pesquisa em detrimento da proposta de mudar a topologia do sistema como um mecanismo de controle.

Neste trabalho, é abordado o problema de desmembramento ótimo de barras do sistema de transmissão, chamado de forma resumida de problema DOB, para otimizar os custos horários de geração do sistema de energia elétrica. Deve ser mencionado que o problema DOB é uma generalização do problema de desligamento ótimo de linhas de transmissão, chamado de problema

OTS (*Optimal Transmission Switching*), para otimizar os custos de operação de um sistema de energia elétrica. Assim, o objetivo é minimizar os custos de operação da geração para atender a um perfil de demanda específico. Para realizar tal proposta, deve-se identificar as barras que devem ser desmembradas para minimizar os custos de geração de um sistema de energia elétrica. Ao realizar o desmembramento das barras, é possível mudar o perfil da distribuição dos fluxos de potência através das linhas de transmissão, o que permite aumentar a geração em barras geradoras com custos de operação menores. É importante observar que o problema DOB para diminuir os custos de operação é um tipo de problema de uma família de problemas mais geral de mudança de topologia do sistema de transmissão.

Na década de 60, foi observado um fenômeno que parece estar em conflito com o senso comum de um engenheiro eletricista. De forma intuitiva, seria lógico pensar que a adição de uma nova linha de transmissão deveria melhorar o desempenho de um sistema de energia elétrica, pois uma linha adicional deveria melhorar a distribuição dos fluxos de potência, permitindo que o sistema de energia elétrica opere de forma mais folgada e que muitas grandezas apresentem melhores desempenhos. As perdas elétricas, por exemplo, deveriam diminuir pelo princípio do mínimo esforço. Assim, desligar uma linha de transmissão deveria, em tese, piorar o desempenho de um sistema de energia elétrica. Contudo, desde a década de 60 foi observado experimentalmente que, quando uma linha de transmissão é desligada, alguns indicadores de desempenho podem melhorar. Em determinados casos, um sistema de transmissão que opera violando limites de capacidade de transmissão pode operar sem violar nenhum dos limites após o desligamento de uma ou várias linhas. Esse fenômeno atípico do comportamento de um sistema de energia elétrica é conhecido como paradoxo de Braess e é mencionado em Ruiz et al. (2012) e Blumsack, Lave e Ilic (2007). Após essas observações experimentais, começaram a aparecer pesquisas de diversos tipos que propõem o desligamento de linhas de transmissão com o objetivo de melhorar o desempenho de algum aspecto da operação de um sistema de energia elétrica, tais como: melhorar o perfil de tensão; diminuir as perdas do sistema de energia elétrica; redirecionar fluxos de potência; eliminar congestionamento em determinadas linhas de transmissão; melhorar a operação econômica de um sistema de energia elétrica diminuindo os custos de geração ao despachar geradores com custos de geração mais baratos; programação da operação, entre outros. É curioso observar que, entre todas as pesquisas revisadas, praticamente nenhuma se preocupa em entender, do ponto de vista conceitual, o paradoxo de Braess. Portanto, uma compreensão completa do chamado paradoxo de Braess ainda não foi concluída e apenas se pode afirmar que não existe interesse em entender o paradoxo e se, realmente, esse fenômeno pode ser considerado um paradoxo. Uma tentativa inicial de explicar o paradoxo de Braes é realizada em Flores (2018).

No problema de desligamento ótimo de linhas de transmissão para melhorar a operação econômica para um perfil de demanda específico, assim como no problema DOB, os dados estão representados da seguinte forma: pela demanda conhecida em cada barra de demanda; pelos limites mínimo e máximo de geração em cada barra geradora; pelo custo de operação dos geradores de cada barra geradora dados em US\$/MWh; pelas linhas existentes na topologia base e que se encontram em operação com seus respectivos parâmetros elétricos (reatância e capacidade de transmissão). Assim, a otimização do problema OTS identifica as linhas de transmissão que devem ser desligadas, preservando a operação adequada do restante do sistema e fornecendo o valor da diminuição dos custos de operação horária. De forma análoga, no problema DOB o processo de otimização identifica as barras que devem ser desmembradas. O trabalho que pode ser considerado pioneiro no problema OTS para a operação econômica do sistema de energia

elétrica foi apresentado por Fisher, O'Neill e Ferris (2008). A partir desse trabalho pioneiro, foram desenvolvidos diversos outros relacionados com o problema OTS.

Em Flores (2018), são abordados alguns problemas importantes do problema OTS considerando apenas o modelo de rede DC (linear disjuntivo) e para um perfil de demanda fixo, que é o tópico de pesquisa abordado neste trabalho. Os tópicos abordados são os seguintes:

1. O modelo de rede:

O modelo de rede usado desde a proposta de Fisher, O'Neill e Ferris (2008) é o modelo DC, mas também pode ser usado o modelo linear disjuntivo porque ambos os modelos apresentam a mesma solução ótima. O modelo linear disjuntivo foi sendo mais utilizado conforme os *solvers* de otimização para resolver problemas de programação linear inteira mista se tornaram mais eficientes. Apesar do modelo de rede linear disjuntivo ainda ser muito usado, estão aparecendo publicações usando modelos mais exatos como o modelo de rede AC. No modelo linear disjuntivo, é considerada apenas a potência ativa no sistema elétrico e todos os módulos de tensão nas barras do sistema são constantes e iguais a 1 p.u.

2. O número elevado de desligamento de linhas de transmissão sugerido pelo modelo básico:

Um dos problemas do modelo básico apresentado em Fisher, O'Neill e Ferris (2008) é que o otimizador sugere o desligamento de um número muito elevado de linhas de transmissão. Em Fisher et al. (2008), é resolvido o problema OTS para o sistema IEEE de 118 barras (um sistema com pouco nível de estressamento, o que significa que uma grande parcela de linhas de transmissão está com o carregamento distante dos limites) e o otimizador sugere retirar em torno de 40 linhas de transmissão (mais de 20 %). Claramente essa proposta é inviável de ser implementada na prática. Também foi observado, desde as pesquisas iniciais, que existem poucas linhas cujo desligamento produz uma redução significativa dos custos de operação, enquanto que existe um grande número de linhas cujo desligamento produz uma redução insignificante dos custos de operação ou nenhuma redução, podendo permanecer ligadas ou desligadas sem prejuízos significantes. Em função disso, apareceram algumas propostas para reduzir o número de linhas de transmissão que devem ser desligadas. Em Flores (2018), são apresentadas propostas para reduzir o número de linhas desligadas.

3. O tempo de processamento muito elevado para resolver o modelo básico:

É importante ressaltar que, em Fisher, O'Neill e Ferris (2008), os autores não conseguiram resolver o modelo básico para o sistema IEEE de 118 barras em 2008 para um gap igual a zero. Mesmo após 24 horas de processamento o gap ainda era inaceitável. O mesmo grupo de pesquisa não conseguiu resolver o mesmo sistema quando foi considerada confiabilidade (N-1) após 143 horas de processamento e com um gap inaceitável. Com o passar do tempo, esses tempos de processamento foram diminuindo com o aparecimento de computadores mais rápidos e *solvers* muito mais eficientes. Em 2018, usando a última versão do solver CPLEX, o sistema IEEE de 118 barras para o modelo básico pôde ser resolvido em tempos de processamento de 10 a 20 segundos. Porém, para sistemas de grande porte e estressados, os tempos de processamento ainda podem ser proibitivos. Como o problema OTS pode ser considerado um problema de planejamento de curto prazo, então os tempos de processamento não podem ser muito elevados. Em razão disso, apareceram muitos trabalhos de

pesquisa com propostas para mudar o modelo básico com o objetivo de acelerar o processo de solução do problema OTS.

4. O problema de aparecimento de sistemas ilhados no modelo básico:

Foi observado em várias pesquisas que o modelo básico pode fornecer uma solução ótima formada por vários sistemas ilhados, ou seja, o otimizador do problema OTS pode sugerir o desligamento de linhas de transmissão que transforma um sistema conexo em um sistema não conexo e formado por vários sistemas ilhados funcionando independentemente. Obviamente esse tipo de solução é inaceitável na prática. Nos testes realizados em Flores (2018), foi verificado que existem linhas que podem ser chamadas de indiferentes, pois elas estarem ligadas ou desligadas não alteram a solução ótima do problema. É claro que do ponto de vista prático é melhor não desligar essas linhas. Em função disso, na literatura existem várias propostas que buscam evitar que a solução final seja não conexa ou ainda evitar que as soluções parciais sejam também não conexas. Em Flores (2018), é apresentada uma proposta muito simples para eliminar esses problemas, que é mudar a função objetivo ligeiramente dando um custo adicional insignificante para desligar uma linha de transmissão. Assim, as linhas indiferentes não são desligadas e o sistema resultante é sempre conexo.

5. Proposta para a redução de linhas que podem ser desligadas:

A proposta de reduzir o número de linhas candidatas a desligamento também se torna mais atrativa quando se pensa em reduzir o tempo de processamento, afinal um número menor de linhas candidatas resulta em um espaço de busca menor. Essa técnica é chamada de redução do espaço de busca. Dessa forma, podem ser consideradas linhas candidatas a desligamento apenas um grupo reduzido das linhas existentes. Existem diversas técnicas para montar esse conjunto reduzido de linhas candidatas a desligamento, porém é preciso ressaltar que geralmente o ótimo do problema considerando apenas um conjunto reduzido de linhas candidatas não é igual ao ótimo do problema considerando todas as linhas existentes como candidatas ao desligamento. Portanto, essas técnicas são apenas aproximações do problema original. Em Flores (2018), foi idealizada uma proposta interessante que consiste em resolver, na fase de pré-processamento, um problema de programação linear que aloca defasadores artificiais no sistema elétrico para encontrar a operação econômica ótima do sistema de energia elétrica. Dessa forma, os caminhos em que são alocados os defasadores podem identificar os laços e as linhas de transmissão que podem representar o conjunto de linhas candidatas a desligamento.

6. Uma explicação científica para o paradoxo de Braess:

Em Flores (2018), aparece a primeira proposta para explicar o paradoxo de Braess, onde se busca explicar de forma consistente os motivos pelo qual o desligamento de uma linha de transmissão pode melhorar a operação de um sistema elétrico. Neste trabalho, este problema não é abordado.

Neste trabalho, é abordado o problema DOB para otimizar os custos de geração horária de um sistema de energia elétrica. Inicialmente, é analisado o problema OTS na formulação apresentada em Flores (2018) e depois é apresentada a formulação do problema DOB, onde se verifica que o problema OTS é apenas um caso especial do problema DOB. Em outras palavras, o problema DOB tem um espaço de busca ou região factível maior e, portanto, uma solução ótima de melhor

qualidade que o problema OTS. O problema DOB é resolvido usando a meta-heurística busca tabu.

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. No Capítulo 1, faz-se uma introdução geral onde se define o problema de desmembramento de barras para otimizar os custos de operação horária do sistema elétrico, chamado de problema DOB, além de explicar a relação do problema DOB com o problema OTS. No Capítulo 2, é apresentado o modelo matemático idealizado para o problema OTS proposto em Flores (2018) e também são discutidas as vantagens e as limitações do método. No Capítulo 3, é analisado o problema DOB e é mostrado porque esse problema é uma generalização do problema OTS. No Capítulo 4, é apresentada a meta-heurística busca tabu e a idealização de uma estratégia busca tabu para o problema DOB. No Capítulo 5, são apresentados os testes para o problema DOB e no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões para o problema DOB. No Apêndice A, são mostrados os dados do sistema usado nos testes.

Capítulo 2

Problema de Desligamento de Linhas no Sistema de Energia Elétrica

2.1. Introdução

Os grandes sistemas elétricos de potência geralmente operam com a topologia do sistema de transmissão de forma estática, isto é, todas as linhas de transmissão geralmente se encontram fechadas e operando, independentemente dos níveis de demanda e de operação existentes no sistema elétrico. Nesse contexto, nos sistemas verticalizados, os operadores do sistema usam o sistema de transmissão estático para minimizar os custos de operação horária. Por outro lado, nos mercados elétricos desregulados, as empresas geradoras usam o sistema de transmissão como uma estrutura na qual acontece a competição entre elas.

É importante ressaltar que é a segunda lei de Kirchhoff, a que relaciona a tensão em um laço do sistema elétrico, que permite que o desligamento de uma linha de transmissão melhore os custos de geração. Esse comportamento já é conhecido, de forma empírica, pelos operadores do sistema, que geralmente abrem as chaves para desativar uma linha de transmissão em operação normal para diminuir os custos de geração de um sistema elétrico. Quando ocorre uma emergência, eles reconectam rapidamente a linha, pois nessa condição a linha de transmissão ajuda na confiabilidade do sistema.

Dessa forma, o problema de manobra ótima de chaves para abrir ou fechar linhas de transmissão de um sistema elétrico de potência é um problema de planejamento da operação de curto prazo. Nesse problema, é preciso assumir a demanda conhecida com muita precisão, pois a única mudança topológica efetuada no sistema é pela manobra de chaves para ativar ou desativar linhas de transmissão para melhorar os custos de geração.

Neste trabalho, apresenta-se o modelo matemático do problema OTS desenvolvido em Flores (2018), que é uma proposta de modelagem mais elaborada que a proposta inicial apresentada por Fisher, O'Neill e Ferris (2008), onde aparece claramente a ideia de desligar uma linha de

transmissão. O modelo matemático apresentado em Flores (2018) assume a seguinte forma:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{i \in \Omega_g} c_i g_i + c_s \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{y \in Y_{ij}} (1 - \omega_{ij,y}) \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in \Omega_l} \sum_{y \in Y_{ij}} f_{ji,y} - \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{y \in Y_{ij}} f_{ij,y} + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$|x_{ij} f_{ij,y} - (\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - \omega_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_l; \quad \forall y \in Y_{ij} \quad (3)$$

$$|f_{ij,y}| \leq \omega_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l; \quad \forall y \in Y_{ij} \quad (4)$$

$$\underline{g}_i \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_g \quad (5)$$

$$\omega_{ij,y} \leq \omega_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_l; \quad \forall y \in Y_{ij}; \quad y > 1 \quad (6)$$

$$\omega_{ij,y} \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in \Omega_l; \quad \forall y \in Y_{ij} \quad (7)$$

No modelo de PLIM apresentado, v é a função objetivo dos custos de operação horária na geração do sistema elétrico, a qual se pretende minimizar. Os parâmetros do problema são os seguintes: c_i é o custo de geração dado em US\$/MWh da geradora na barra i ; d_i é a demanda na barra i ; $\underline{g}_i$ e $\bar{g}_i$ são os limites inferior e superior da geração na barra i ; x_{ij} é a reatância de uma linha de transmissão no caminho ij e $\bar{f}_{ij}$ é o fluxo máximo de potência em uma linha no caminho ij em MW. Adicionalmente, M é um parâmetro grande que deve ser escolhido e é decorrente da transformação do modelo DC no modelo linear disjuntivo. A seguir, são apresentadas as variáveis de decisão relacionadas com a operação que são não inteiras: g_i é a geração na barra i dada em MW; $f_{ij,y}$ é o fluxo de potência em MW na linha y pelo caminho ij e θ_i é o ângulo de fase da tensão na barra i . A variável de decisão mais importante do modelo é $\omega_{ij,y}$, que é binária. Assim, se $\omega_{ij,y} = 1$, então a linha de transmissão y no caminho ij se encontra ligada e, se $\omega_{ij,y} = 0$, então a linha de transmissão y no caminho ij se encontra desligada. Os conjuntos são os seguintes: Ω_g é o conjunto de barras de geração; Ω_b é o conjunto de barras do sistema elétrico; Ω_l é o conjunto de caminhos em que existem linhas de transmissão e Y_{ij} é o conjunto de linhas de transmissão que existem em cada caminho ij .

A relação (1) representa a função objetivo. A primeira parcela representa o custo de operação horária na geração de energia elétrica. A segunda parcela foi sugerida em Flores (2018) como uma estratégia para que as linhas de transmissão indiferentes (linhas que ligadas ou desligadas não alteram a solução ótima do problema) sejam mantidas ligadas no processo de otimização. Para isso, c_s precisa apenas ser pequeno, ligeiramente maior que zero. No entanto, é preciso observar que, em alguns testes, o processo de otimização pode desligar muitas linhas de transmissão e o desligamento dessas linhas pode produzir uma redução de custos muito baixa como, por exemplo, 5 dólares/hora. Dessa forma, pode ser interessante desligar linhas que produzam uma redução de custos de valor mais significativo. Nesse caso, é interessante escolher um valor mais elevado para c_s como, por exemplo, $c_s = 100$. Assim, são desligadas apenas linhas que produzam uma redução de custo de operação de pelo menos $c_s = 100$ dólares/hora. No sistema IEEE de

118 barras usado originalmente por Fisher, O'Neill e Ferris (2008), o teste sem desligamento de linhas (operação tradicional) gera um valor de $v = 2054$ US\$/hora. Enquanto isso, o teste com $c_s = 100$ desliga 3 linhas de transmissão, produzindo um valor de $v = 1646$ US\$/hora (redução de 408 dólares/hora). Finalmente, o teste com $c_s = 0$ (a proposta de Fisher) desliga 38 linhas de transmissão, produzindo um valor de $v = 1543$ US\$/hora (apenas 103 dólares/hora menor comparado com o desligamento de 3 linhas de transmissão). Portanto, em alguns casos pode ser interessante trabalhar com um valor de c_s maior quando ocorre o desligamento de muitas linhas que pouco reduzem os custos de operação.

A restrição (2) representa o balanço de potência ativa em cada barra do sistema elétrico (a lei das correntes de Kirchhoff), enquanto que a restrição (3) representa a aplicação da lei das tensões de Kirchhoff em cada laço fundamental do sistema elétrico. Em (3), se $\omega_{ij,y} = 1$ (linha ligada), então deve-se cumprir a lei das tensões de Kirchhoff no laço fundamental e se $\omega_{ij,y} = 0$ (linha desligada), então essa restrição não está ativa e fica limitada pelo parâmetro M (não existe a necessidade de cumprir a lei das tensões de Kirchhoff no laço que não existe). A restrição (4) limita o fluxo de potência de uma linha de transmissão ao máximo permitido. A restrição (5) limita a capacidade de geração de uma barra geradora aos limites mínimo e máximo permitidos. A restrição (6) é considerada uma restrição substituta (*surrogate constraint*) e apenas exige que as linhas de transmissão existentes em um certo caminho ij sejam ligadas de forma sequencial. É importante observar que essa restrição não se encontra presente na formulação original apresentada por Fisher, O'Neill e Ferris (2008) e foi incorporada levando em conta a semelhança existente entre o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão com o problema OTS. A restrição (7) exige que a variável de decisão $\omega_{ij,y}$ seja binária. Por último, deve-se observar que a transformação do modelo DC no modelo linear disjuntivo exige que cada linha de transmissão de um caminho seja tratada separadamente. Assim, se entre as barras i e j existem 3 linhas de transmissão, então existem três variáveis de decisão nesse caminho, ou seja, $\omega_{i-j,1}$, $\omega_{i-j,2}$ e $\omega_{i-j,3}$.

Capítulo 3

Problema de Desmembramento de Barras no Sistema de Energia Elétrica

3.1. Introdução

Neste capítulo, é abordado o problema de desmembramento de barras no sistema de energia elétrica para otimizar os custos de operação horária da geração do sistema. O problema de otimizar os custos de geração de um sistema de energia elétrica é um problema tradicional de otimização da operação do sistema de energia elétrica. No entanto, existe um problema mais complexo que consiste em mudar a topologia do sistema de transmissão para otimizar a sua operação e que encontra custos de operação menores que no caso tradicional sem mudança da topologia do sistema. Esse tipo de problema é abordado neste trabalho.

Desde 1970, os operadores do sistema de energia elétrica verificaram que, ao desligar uma linha de transmissão, alguns indicadores de operação do sistema elétrico podem melhorar. Os indicadores mais evidentes foram: a diminuição das perdas do sistema, melhoria do perfil de tensão, diminuição ou eliminação de congestionamento, entre outros. Também foi observado que o desmembramento de uma barra em duas ou mais barras pode produzir o mesmo efeito. Na época, esses fenômenos foram considerados atípicos e alguns pesquisadores chamaram esse comportamento de paradoxo de Braess. A conclusão foi que a mudança topológica muda o comportamento de um sistema de energia elétrica e, em alguns casos, essa mudança melhora a operação do sistema, mesmo desligando linhas de transmissão. Seguindo essa descoberta, apareceram várias publicações a partir de 1980 com o objetivo de encontrar a mudança topológica ideal para otimizar algum aspecto da operação do sistema elétrico. No período de 1980-2008, a grande maioria das propostas de mudança topológica consideravam apenas o desligamento de linhas de transmissão, mas ainda existiam algumas publicações que consideravam adicionalmente o desmembramento de barras do sistema elétrico. Contudo, a publicação do trabalho de Fisher, O'Neill e Ferris (2008) mudou o direcionamento das pesquisas relacionadas a esse tipo de problema, pois nesse trabalho aparece apenas a proposta de desligamento de linhas de transmissão como estratégia para otimizar os custos de operação devido a geração no sistema de energia elétrica. Dessa forma, propostas de mudança topológica usando desmembramento de

barras foram praticamente deixadas de lado, assim como outros objetivos, tais como: mudança topológica para melhorar o perfil de tensão, o congestionamento, entre outros.

Neste trabalho, pretende-se provar que o problema de otimização da geração de um sistema elétrico usando a mudança topológica de desmembramento de barras é uma estratégia mais geral que a proposta de mudança topológica desligando linhas. Em outras palavras, a região factível do problema de desligamento de linhas de transmissão é um subconjunto da região factível do problema de mudança topológica que usa desmembramento de barras.

Uma barra de um sistema de transmissão não é um simples ponto de conexão das linhas de transmissão que chegam nessa barra. Na realidade, cada linha de transmissão existente em um mesmo caminho está associada a uma barra diferente e todas essas barras são ligadas em operação normal, formando, do ponto de vista elétrico, uma única barra. Contudo, uma linha de transmissão pode ser desligada daquela barra do sistema por diferentes motivos como, por exemplo, para realizar uma manutenção.

A Figura 1 apresenta um sistema ilustrativo formado por 4 barras na forma tradicional de operação. Do ponto de vista construtivo e operacional, a barra s pode ser representada de forma simplificada como aparece na Figura 2.

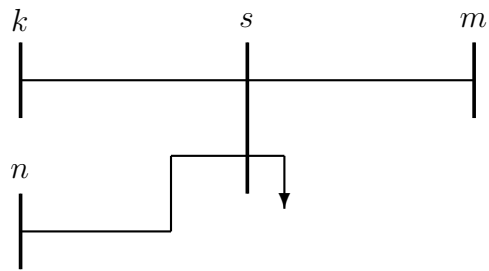
Analisando a Figura 2, pode-se observar que a barra s pode ser desmembrada e existem 4 alternativas de desmembramento:

- Abrir $ch1$ e $ch2$, o que desacopla a barra s em duas barras, a barra s_1 e a barra $s_2 = s_3$. Dessa forma, a linha $k - s$ se desacopla das linhas $n - s$ e $m - s$, que permanecem ligadas.
- Abrir $ch1$ e $ch3$, o que desacopla a barra s em duas barras, a barra s_2 e a barra $s_1 = s_3$. Dessa forma, a linha $m - s$ se desacopla das linhas $k - s$ e $n - s$, que permanecem ligadas.
- Abrir $ch2$ e $ch3$, o que desacopla a barra s em duas barras, a barra s_3 e a barra $s_1 = s_2$. Dessa forma, a linha $n - s$ se desacopla das linhas $k - s$ e $m - s$, que permanecem ligadas.
- Abrir as três chaves, o que faz com que a barra s seja substituída por 3 barras independentes e não existe mais conexão direta entre as linhas $k - s$, $m - s$ e $n - s$.
- Não abrir nenhuma das chaves, o que faz com que o sistema continue operando normalmente.

Outro aspecto importante é que a demanda da barra s deve ser ligada a uma das barras no processo de desmembramento. Dessa forma, vamos supor que a demanda da barra s pode ser ligada, através de uma chave, para cada barra s_1 , s_2 e s_3 no circuito da Figura 2. Portanto, dependendo da barra (ou grupo de barras) escolhida para ligar a demanda aparece uma topologia diferente. Levando em conta as observações realizadas, a possibilidade de desmembramento da barra s gera 10 topologias diferentes que são mostradas na Figura 3.

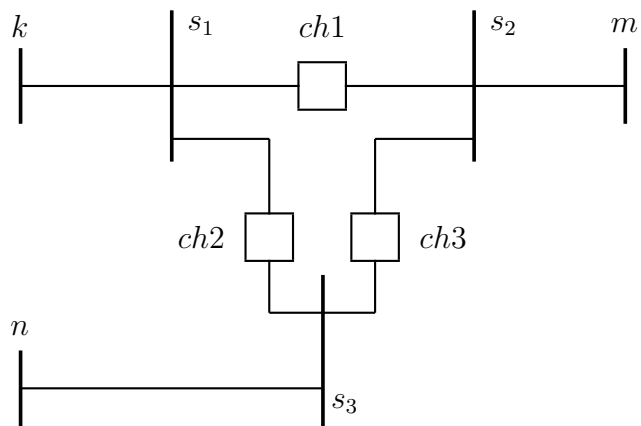
Em relação à Figura 3, deve-se realizar as seguintes observações:

Figura 1: Sistema de 4 barras.



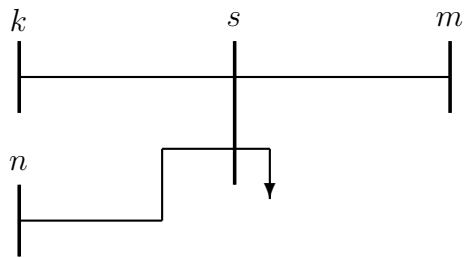
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2: Representação detalhada da barra s .

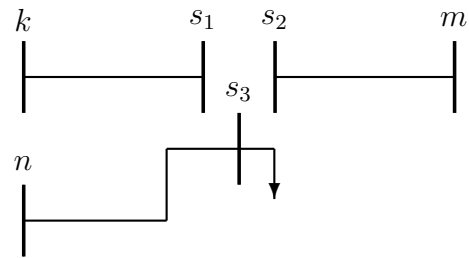


Fonte: Elaborado pelo autor.

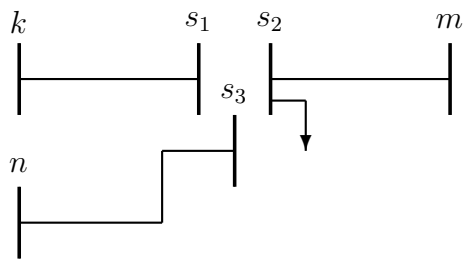
Figura 3: Topologias encontradas desmembrando a barra s .



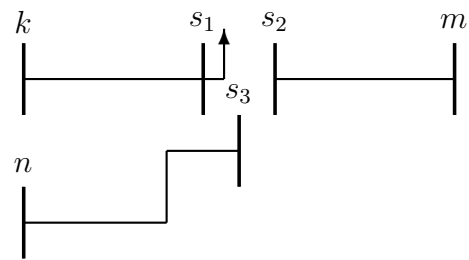
(a) Barra original



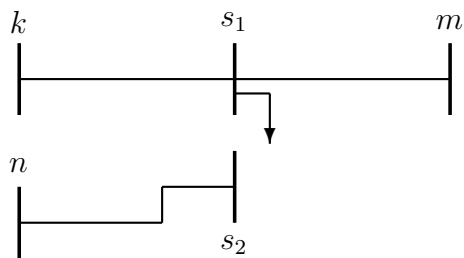
(b) Duas linhas inativas.



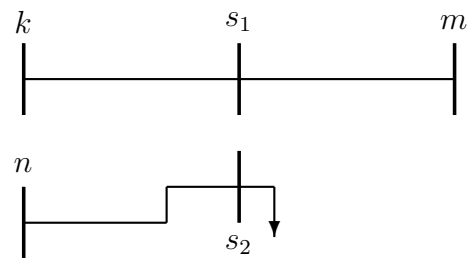
(c) Duas linhas inativas.



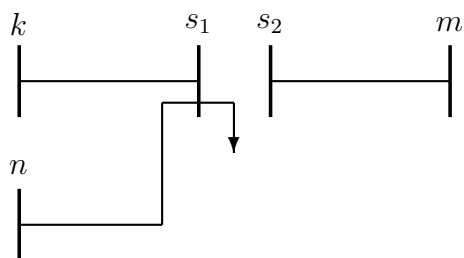
(d) Duas linhas inativas.



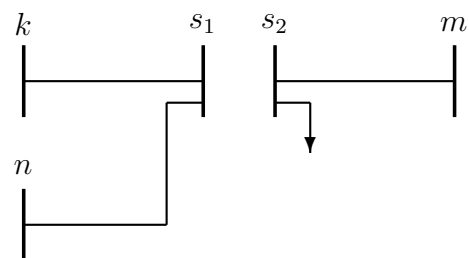
(e) Linha $n - s$ inativa.



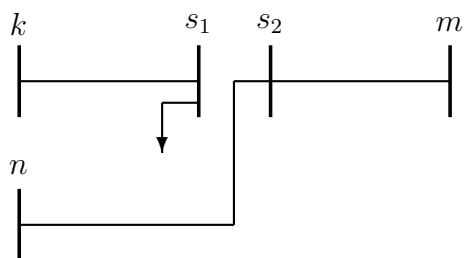
(f) Nenhuma linha inativa.



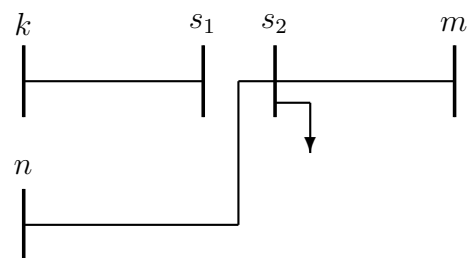
(g) Linha $m - s$ inativa.



(h) Nenhuma linha inativa.



(i) Nenhuma linha inativa.



(j) Linha $k - s$ inativa.

- A Figura 3(a) representa o sistema sem desligamento de linhas (operação tradicional).
- As Figuras 3(b), 3(c) e 3(d) representam a topologia do sistema com o desligamento de duas linhas, enquanto que as Figuras 3(e), 3(g) e 3(j) representam a topologia do sistema com o desligamento de apenas uma linha. Assim, essas 6 topologias representam todas as possibilidades de desligamento de linhas na proposta de desligamento ótimo de linhas de transmissão para melhorar a operação de um sistema elétrico.
- Da mesma forma, as Figuras 3(f), 3(h) e 3(i) representam propostas topológicas que não aparecem na proposta de desligamento ótimo de linhas de transmissão para melhorar a operação de um sistema elétrico, pois em nenhuma delas ocorre o desligamento de uma linha.
- Portanto, pode-se verificar que a proposta de desmembramento ótimo de barras para melhorar a operação de um sistema elétrico é uma generalização do problema de desligamento ótimo de linhas de transmissão para melhorar a operação de um sistema elétrico. Em outras palavras, o espaço de busca do problema de desligamento ótimo de linhas de transmissão para melhorar a operação de um sistema elétrico é um subconjunto do espaço de busca do problema de desmembramento ótimo de barras para melhorar a operação de um sistema elétrico.

As observações anteriores sugerem que o problema de desmembramento ótimo de barras para melhorar a operação de um sistema elétrico tem capacidade de encontrar topologias de menor custo que as do problema de desligamento ótimo de linhas de transmissão para melhorar a operação de um sistema elétrico.

3.2. Modelagem Matemática do Problema de Desmembramento de Barras

Neste trabalho, pretende-se implementar uma meta-heurística para resolver o problema de desmembramento ótimo de barras de um sistema de transmissão e, assim, encontrar a topologia ótima do sistema de energia elétrica que minimiza o custo de operação horária do sistema elétrico. Portanto, não é necessário mostrar o modelo matemático tradicional usado na otimização clássica. Por esse motivo, o problema é apresentado na forma genérica da seguinte forma:

Minimizar os custos de operação horária

s.a.

Restrições da primeira lei de Kirchhoff em cada barra do sistema

Restrições da segunda lei de Kirchhoff em cada laço fundamental do sistema

Restrições de limite de potência em cada linha de transmissão do sistema

Restrições de limite de tensão em cada barra do sistema

Pode-se separar uma barra em várias barras

O sistema deve permanecer conexo

É importante destacar que ainda não existe na literatura especializada um modelo matemático completo para esse tipo de problema. Assim, neste trabalho é usado de forma implícita o modelo DC para representar a operação da rede.

A estratégia para resolver o problema usando uma meta-heurística e que também justifica a falta de necessidade de dispor do modelo matemático explícito pode ser descrita da seguinte forma:

1. A meta-heurística gera uma proposta de solução com uma proposta de desmembramento de cada barra do sistema elétrico e que permita gerar a topologia conexa de operação, cumprindo assim com os dois últimos conjuntos de restrições do modelo genérico.
2. Resolve-se um problema de fluxo de potência ótimo relacionado com a minimização de custos de operação do sistema elétrico para a topologia gerada pela meta-heurística. Esse problema deve obedecer os primeiros quatro conjuntos de restrições do modelo genérico.

Os dados de um problema desse tipo estão representados da seguinte forma: pela topologia da rede (dados das linhas de transmissão), a demanda em cada barra, os custos de geração em cada barra geradora e suas capacidades mínimas e máximas, entre outros. A solução do problema fornece o custo horário de operação e o nível de geração em cada barra geradora do sistema elétrico e outras informações secundárias, tais como o módulo de tensão em cada barra do sistema elétrico e o fluxo de potência em cada linha de transmissão. A topologia de operação é fornecida pela meta-heurística.

Capítulo 4

A Meta-heurística Tabu Search

4.1. Introdução

As heurísticas e as meta-heurísticas representam técnicas de otimização alternativas às técnicas clássicas de otimização matemática. Neste trabalho, é usada a meta-heurística Tabu Search (TS) para resolver o problema de otimização da operação horária de um sistema de energia elétrica usando a estratégia de desmembramento de barras do sistema de transmissão. Assim, são apresentadas as principais características das heurísticas e das meta-heurísticas de forma resumida e, em sequência, são apresentadas as principais características da meta-heurística TS e a forma de aplicação no problema abordado.

As heurísticas são técnicas de otimização que geralmente encontram soluções de boa qualidade de problemas complexos. É importante destacar que, entre as décadas de 1960 e 1970, as heurísticas foram as técnicas de otimização mais utilizadas e com maior êxito para resolver problemas complexos do campo da otimização matemática, especialmente para aqueles problemas não lineares, discretos e não convexos. A maioria das heurísticas são simples de entender e de implementar computacionalmente, encontrando soluções de boa qualidade de problemas altamente complexos em tempos computacionais relativamente rápidos. No entanto, as técnicas heurísticas abdicam, pelo menos do ponto de vista teórico, de encontrar a solução ótima global de um problema complexo e, portanto, raramente encontram as soluções ótimas em problemas de grande porte e complexos. Uma técnica heurística pode ser muito simples como, por exemplo, o uso do bom senso de um especialista ou pode ser muito sofisticada e envolver a solução de modelos matemáticos relaxados em relação ao modelo original.

Existem vários tipos de heurísticas, porém duas delas são muito importantes, pois de alguma forma foram incorporadas ou generalizadas em meta-heurísticas sofisticadas. Por esse motivo, as heurísticas mais importantes são: o algoritmo heurístico construtivo e o algoritmo heurístico de busca através da vizinhança.

As meta-heurísticas são estratégias de otimização que encontram soluções de excelente qua-

lidade percorrendo o espaço de busca de um problema complexo. As principais meta-heurísticas, principalmente aquelas inspiradas em conceitos existentes na otimização clássica, representam estratégias que, de alguma forma, incorporam o algoritmo heurístico construtivo e a heurística de busca através da vizinhança, além de algumas estratégias existentes na teoria de programação inteira e de grande porte.

4.2. Terminologia Usada nas Heurísticas e nas Meta-heurísticas

A seguir, são apresentados os principais conceitos usados nas heurísticas e nas meta-heurísticas, além de algumas comparações com os conceitos e as estratégias existentes na otimização clássica. Um detalhe fundamental é que na otimização clássica se usa necessariamente uma modelagem matemática para resolver um problema de otimização. Assim, ao abordar um problema, a primeira decisão na otimização clássica consiste em encontrar o modelo matemático desse problema para, depois, resolvê-lo usando uma técnica de otimização clássica. Para encontrar o modelo matemático, a decisão mais importante é a escolha das variáveis de decisão. A estratégia usada por uma técnica de otimização clássica consiste em resolver o modelo matemático do problema a partir de um ponto inicial (que pode ser factível ou infactível), o que implica em escolher valores específicos para as variáveis de decisão. A partir desse ponto inicial, gera-se uma sequência de outros pontos (factíveis ou infactíveis) até atingir a convergência para um ponto factível e ótimo (local ou global). Nesse tipo de análise, o conceito de região factível é fundamental.

Nas heurísticas e meta-heurísticas, a estratégia fundamental consiste em gerar uma proposta de solução do problema que se pretende resolver. O próximo passo consiste em avaliar a qualidade e a factibilidade da proposta de solução gerada pela meta-heurística. Esse processo de avaliação pode ser realizada de forma muito simples, sem modelo matemático e usando apenas os dados do problema ou pode ser realizado resolvendo um subproblema de otimização. Portanto, geralmente não é necessário conhecer o modelo matemático do problema abordado. Assim, o tópico mais importante é encontrar uma forma adequada e eficiente de representar uma proposta de solução. Por esse motivo, idealizar uma forma de representar uma proposta de solução nas meta-heurísticas é equivalente a idealizar a forma das variáveis de decisão do modelo matemático.

A **representação de uma proposta de solução** de um problema complexo representa a estratégia fundamental para entender o funcionamento das heurísticas e das meta-heurísticas. A forma de representar uma proposta de solução e as estratégias usadas para encontrar novas propostas de solução definem a forma em que as meta-heurísticas percorrem o espaço de busca do problema. O espaço de busca é formado por todas as propostas de solução que podem ser identificadas usando a forma idealizada para representar uma proposta de solução para um determinado problema de otimização e usando as estratégias de vizinhança utilizadas para resolver o problema. É importante destacar que um aspecto crucial na otimização clássica é a escolha adequada das variáveis de decisão, enquanto que nas meta-heurísticas o aspecto crucial e fundamental é a escolha de uma proposta de solução eficiente.

A forma escolhida para representar uma proposta de solução está adequadamente idealizada quando, a partir dessa informação, é possível implementar as seguintes tarefas:

- Gerar propostas de solução iniciais para implementar o processo de busca.
- Calcular o valor da função objetivo ou seu equivalente.
- Verificar a factibilidade ou a infactibilidade do problema.
- Gerar novas propostas de solução vizinhas da proposta de solução corrente. Em outras palavras, a representação de uma proposta de solução deve permitir percorrer o espaço de busca usando a estratégia de cada meta-heurística.

Uma forma de representar uma proposta de solução está eficientemente idealizada se essa proposta realiza de forma eficiente as tarefas citadas anteriores quando comparada com outras propostas de representar uma proposta de solução do mesmo problema. Deve-se observar que podem existir formas diferentes de representar uma proposta de solução. Em resumo, a forma de representar uma proposta de solução para resolver um problema complexo usando heurísticas e meta-heurísticas deve possuir as seguintes qualidades: permitir identificar de maneira única um elemento do espaço de busca, permitir encontrar o valor da função objetivo ou equivalente e permitir verificar se a proposta de solução é factível ou infactível. Além disso, a proposta deve permitir definir e implementar de forma adequada as estruturas de vizinhança e/ou implementar de forma eficiente os operadores existentes na meta-heurística.

O **espaço de busca** está estritamente relacionado com a forma que foi idealizada a representação de uma proposta de solução e na forma em que se realiza a transição de uma proposta de solução a outra ou de um conjunto de propostas de solução a outro conjunto. Os elementos do espaço de busca são todas as propostas de solução que podem ser encontradas implementando as estruturas de vizinhança ou os operadores existentes na meta-heurística para a proposta de solução adotada. O espaço de busca pode compreender apenas uma parcela da região factível, exatamente a região factível ou parcelas da região factível e infactível do problema que está sendo resolvido. Os elementos do espaço de busca estão implicitamente especificados quando se escolhe uma forma de representar uma proposta de solução e a forma de realizar as transições a partir de uma solução inicial (ou conjunto de soluções iniciais). Assim, as estruturas de vizinhança ou operadores da meta-heurística junto com a forma de representar uma proposta de solução definem os elementos do espaço de busca.

4.3. Heurísticas

Existem várias heurísticas na literatura, mas apenas duas são analisadas neste trabalho: o algoritmo heurístico construtivo (AHC) e algoritmo de busca através da vizinhança (SDH) (do inglês *Steepest Descent Heuristic*).

O algoritmo heurístico construtivo é uma das técnicas heurísticas de otimização mais usadas para resolver problemas complexos e ainda é muito utilizado isoladamente ou integrado a meta-heurísticas mais sofisticadas. O motivo do AHC ser tão usado para resolver problemas complexos se deve ao fato de ser uma técnica de otimização que, em um processo passo a passo, é capaz de produzir uma solução geralmente de boa qualidade do problema analisado. Em cada passo, o AHC escolhe um elemento ou componente da solução que está sendo construída e no último passo termina de gerar uma solução factível. O elemento ou componente da solução que é escolhido em cada passo do AHC é identificado usando um indicador de sensibilidade, que identifica o componente mais interessante a ser incorporado na solução em construção. Portanto, a diferença fundamental entre os AHCs utilizados para resolver um mesmo problema está no indicador de sensibilidade usado. O algoritmo heurístico construtivo mais popular é o do tipo guloso (greedy).

A estratégia fundamental da heurística AHC pode ser resumida da seguinte forma:

1. Os dados do problema são armazenados e é escolhido o indicador de sensibilidade a ser utilizado. Então, escolhe-se os componentes que podem ser incorporados na solução em construção (geralmente o processo é iniciado sem componentes).
2. Verifica-se se a solução em construção já representa uma solução factível. Caso seja factível ou se o critério de parada adicional for satisfeito, então o processo termina, pois foi encontrada a solução desejada ou não foi possível encontrar uma solução factível. Em caso contrário, ir ao passo 3.
3. Usando a solução em construção, resolve-se o problema que permite identificar o indicador de sensibilidade de todos os componentes do problema que ainda não foram incorporados na solução em construção.
4. Usando a informação dos indicadores de sensibilidade encontrados no passo anterior, identifica-se o componente que deve ser incorporado na solução em construção. Adicionar o componente identificado na solução em construção e voltar ao passo 2.

Em resumo, os algoritmos heurísticos construtivos do tipo guloso apresentam as seguintes características:

- É um processo iterativo onde, em cada passo, escolhe-se um componente da solução em construção. O indicador de sensibilidade pode ser muito simples ou muito sofisticado.
- Apenas no último passo se encontra uma solução factível e em algumas aplicações complexas o AHC pode não encontrar uma solução factível.

O algoritmo heurístico de busca através da vizinhança é muito diferente do algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso. No AHC, gera-se apenas uma solução factível através de uma sequência de passos e usando um indicador de sensibilidade. No algoritmo heurístico de busca através de vizinhança, chamado de SDH para o problema de minimização, o processo é geralmente iniciado a partir de uma solução factível e na sequência são encontradas novas soluções factíveis percorrendo o espaço de busca e passando sempre para a melhor solução vizinha.

A estratégia fundamental da heurística SDH pode ser resumida da seguinte forma:

- O processo de otimização é iniciado através de uma solução inicial (factível ou infactível) que passa a ser chamada de solução corrente.
- Deve-se definir uma estrutura de vizinhança. Portanto, deve existir uma forma de identificar as soluções que são consideradas vizinhas da solução corrente. As soluções vizinhas podem ser factíveis ou infactíveis.
- Na heurística SDH, passa-se da solução corrente para a melhor solução vizinha.
- O processo termina quando todas as soluções vizinhas são de pior qualidade que a solução corrente.

A heurística SDH realiza a busca através da vizinhança a partir da solução corrente, passando assim para a melhor solução vizinha encontrada. Por esse motivo, é essencial definir a vizinhança da solução corrente.

Seja p_k a proposta de solução corrente de um problema complexo que está sendo resolvido pela heurística SDH. Uma solução vizinha de p_k é qualquer proposta de solução que pode ser encontrada com a implementação de um mecanismo de perturbação da solução corrente. As soluções vizinhas são armazenadas no conjunto $N_k(p)$. O número de soluções vizinhas de p_k é conhecido como a cardinalidade de $N_k(p)$ e denotada através da notação $|N_k(p)|$. Assim, para definir a vizinhança da solução corrente apenas é preciso definir o mecanismo de perturbação. Em princípio, uma proposta de solução vizinha deve ser próxima, em composição, da proposta de solução corrente.

Supor que se encontra disponível a proposta de solução corrente p_k e se conhece o mecanismo de perturbação para encontrar os elementos de $N_k(p)$. Nesse contexto, os elementos de $N_k(p)$ podem representar soluções factíveis ou infactíveis para o problema que está sendo resolvido, porém o ideal seria que os elementos de $N_k(p)$ fossem todos factíveis. Assim, na medida do possível devem ser usadas estruturas de vizinhança em que os elementos de $N_k(p)$ sejam apenas propostas de solução factíveis. Contudo, esse tipo de proposta nem sempre é possível e depende de muitos fatores, tais como: a forma de representar uma proposta de solução, o tipo de problema que está sendo resolvido e a forma de definição da vizinhança. Quando não existe a possibilidade de gerar apenas soluções vizinhas factíveis, então a heurística SDH deve decidir a forma de tratamento das soluções vizinhas infactíveis. Na maioria das aplicações, as propostas de solução infactíveis são descartadas, mas em outras aplicações podem ser consideradas para análise e avaliadas considerando, por exemplo, uma penalização dessas soluções na função objetivo. Em resumo, as diferentes formas de definir a vizinhança da solução corrente diferem apenas no mecanismo de perturbação usado.

Para cada tipo de problema, é possível definir vários tipos de vizinhança. Assim, a definição da vizinhança junto com a forma em que se representa uma proposta de solução são tópicos essenciais na formulação de uma heurística SDH eficiente. A forma genérica da heurística SDH assume a seguinte forma:

1. Montar os dados do problema e escolher uma forma de representar uma proposta de solução denominada de p . Então, identifica-se uma forma de avaliar a qualidade da função objetivo ou equivalente e denominada de $f(p)$. Em seguida, define-se a estrutura de vizinhança a ser usada, o que caracteriza o espaço de busca.
2. Encontrar uma solução inicial p_o que se transforma na solução corrente p_c .
3. Identificar e avaliar todas as soluções vizinhas da solução corrente p_c e identificar a melhor solução vizinha p^{best} .
4. Se $f(p^{best}) < f(p)$, então a melhor solução vizinha é melhor que a solução corrente e, portanto, fazer $p_c = p^{best}$ e voltar ao passo 3. Em caso contrário, parar o processo e a solução encontrada pela heurística SDH é p_c (geralmente um ótimo local).

Em relação à heurística SDH, é importante realizar as seguintes observações:

- O passo 1 é o passo mais importante de todos, pois uma forma eficiente de representar uma proposta de solução é crucial para a obtenção da solução ótima do problema, assim como a caracterização da estrutura de vizinhança. Nesse passo, também deve ser decidido como devem ser tratadas as propostas de solução vizinhas que são inactíveis. Assim, é de responsabilidade do pesquisador escolher ou definir a forma de representação de uma proposta de solução a ser usada, o tipo de vizinhança e a forma de tratar as soluções vizinhas inactíveis.
- No passo 2, a heurística SDH exige apenas uma solução inicial. Assim, essa solução inicial pode ser encontrada de forma trivial escolhendo uma solução gerada de forma aleatória ou pode ser gerada de forma sofisticada usando, por exemplo, um AHC conhecido e eficiente para o tipo de problema analisado (um ótimo local). É importante ressaltar que em muitos problemas pode ser muito difícil encontrar uma solução inicial factível. Portanto, a solução inicial p_o pode ser factível ou inactível. Caso seja inactível, então deve-se mudar a estratégia de qualidade para avaliar as soluções vizinhas. A estratégia mais popular consiste em penalizar a função objetivo das propostas de solução inactíveis.
- No passo 3, a heurística SDH exige avaliar a qualidade de todas as soluções vizinhas e identificar a melhor solução vizinha. Esse passo pode exigir muito tempo de processamento, principalmente em determinados problemas em que avaliar a qualidade de uma solução vizinha pode exigir resolver um problema relativamente complexo como, por exemplo, um problema de programação linear ou não linear. No problema abordado neste trabalho, deve-se resolver um problema de fluxo de potência ótimo.
- No passo 4, a heurística SDH termina o processo se a melhor solução vizinha for de pior qualidade que a solução corrente. Assim, se a vizinhança for definida de forma inadequada, então a heurística SDH pode terminar encontrando uma solução ótima local de pobre qualidade. Além disso, deve-se observar que, quando a heurística SDH converge, então a solução corrente é também a incumbente. Essa característica não acontece na maioria das meta-heurísticas, exceto na meta-heurística de busca em vizinhança variável (VNS, do inglês *Variable Neighborhood Search*), que na verdade é uma generalização do algoritmo SDH.

O algoritmo heurístico construtivo e a heurística SDH foram analisados com certo detalhe porque a estrutura básica da maioria das meta-heurísticas pode ser interpretada apenas como uma generalização de um AHC, uma generalização de um SDH ou uma generalização conjunta do AHC e do SDH.

4.4. A Meta-heurística Tabu Search

Segundo Glover e Kochenberger (2003), a definição de uma meta-heurística é a seguinte: Meta-heurísticas são técnicas de solução que gerenciam uma interação entre as estratégias de busca local e as estratégias de nível superior para criar um processo de otimização com capacidade de sair de soluções ótimas locais e realizar uma busca robusta através do espaço de busca. Assim, pode-se definir uma meta-heurística como sendo um processo de otimização que percorre o espaço de busca de um problema na tentativa de encontrar a solução ótima global ou soluções excelentes de um problema de otimização complexo. As versões básicas das meta-heurísticas mais importantes podem ser interpretadas como sendo uma generalização e/ou integração do algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso e a heurística de busca através da vizinhança, de forma que seja possível encontrar soluções de qualidade percorrendo de forma eficiente o espaço de busca. Em resumo, uma meta-heurística pode ser interpretada como uma generalização e/ou integração do AHC e da heurística SDH mostrados na seção anterior. Neste trabalho, é analisada apenas a meta-heurística Tabu Search (TS).

TS é uma meta-heurística inventada por Fred Glover e apresentada em Glover e Kochenberger (2003). Ao contrário da maioria das meta-heurísticas que usaram comportamentos ou características existentes em ramos do conhecimento distantes da otimização matemática, Glover usou apenas conhecimento existente no campo da otimização matemática. Antes de inventar o TS, Glover já era um pesquisador reconhecido na área da otimização clássica, especialmente nas técnicas de otimização de problemas de programação inteira.

O objetivo de Glover era mostrar que é possível criar uma estratégia de busca inteligente percorrendo o espaço de busca de forma eficiente e seletiva. Para isso, é fundamental integrar no processo de busca às estratégias de intensificação e de diversificação. Nesse contexto, intensificar significa realizar uma busca mais intensa em torno da solução corrente como, por exemplo, aumentar o tamanho da vizinhança ou melhorar a qualidade da vizinhança. Por outro lado, diversificar significa sair de uma região do espaço de busca e, de forma proposital, atingir uma região distante para novamente realizar algum processo de intensificação.

A formulação básica de TS, que está inspirada fundamentalmente no uso da estratégia de intensificação, assume a seguinte forma:

1. Montar os dados do problema e escolher uma forma de representar uma proposta de solução denominada de p . Identificar uma forma de avaliar a qualidade da função objetivo ou equivalente e denominada de $f(p)$. Definir a estrutura de vizinhança a ser usada, o que caracteriza o espaço de busca. Identificar os atributos que devem ser proibidos e o critério

de aspiração. Escolher os parâmetros do algoritmo, tais como a duração da lista tabu. Escolher o critério de parada.

2. Encontrar uma solução inicial p_o que se transforma na solução corrente p_c .
3. Identificar e avaliar todas as soluções vizinhas da solução corrente p_c , ordenar essas soluções vizinhas por qualidade sendo que a primeira da lista é a melhor solução vizinha p^{best} .
4. Realizar a transição para a solução vizinha melhor classificada que não tem o atributo proibido ou, se tem o atributo proibido, então satisfaz o critério de aspiração. Seja p_e a melhor solução vizinha escolhida, então fazer $p_c = p_e$.
5. Atualizar a incumbente e a lista de atributos proibidos. Se o critério de parada for satisfeito, então pare. Em caso contrário, voltar ao passo 3.

O TS apresentado anteriormente é chamado de algoritmo TS básico, que essencialmente usa memória de curto prazo, uma lista de atributos proibidos e um critério de aspiração, ou seja, é uma estratégia de otimização que prioriza a intensificação.

Técnicas de otimização tipo TS mais complexas podem ser implementadas com o TS básico funcionando como um módulo de otimização integrado em uma estrutura TS mais complexa. Essas estruturas mais complexas podem ser idealizadas usando outros operadores existentes em TS, tais como: a diversificação, a memória baseada em frequência, a lista de soluções de elite, o path relinking, entre outros. Para uma análise detalhada sobre a teoria e aplicação de TS, ver Glover e Kochenberger (2003).

Em relação ao TS básico apresentado anteriormente, é importante fazer as seguintes observações:

- A única diferença do algoritmo TS básico em relação à heurística SDH é que o TS realiza a transição para a melhor solução vizinha que não tem o atributo proibido ou, se tem o atributo proibido, então cumpre com o critério de aspiração. Em outras palavras, se todas as soluções vizinhas da solução corrente são piores que ela, então o algoritmo TS passa para a menos pior, porém montando uma estratégia para tentar evitar de retornar a uma solução já visitada.
- Como o algoritmo TS pode passar para uma solução de pior qualidade e ao mesmo tempo apresenta uma estratégia gulosa, então deve existir uma estratégia para evitar de retornar a uma solução já visitada. Essa estratégia pode ser montada de forma explícita armazenando todas as soluções já visitadas (ou um conjunto menor representado pelas últimas soluções já visitadas) e verificando se a solução vizinha candidata a ser escolhida já foi visitada anteriormente. Ou então, pode ser armazenada de forma implícita armazenando apenas uma característica da solução visitada e chamada de atributo.
- O algoritmo TS básico não recomenda o armazenamento de soluções explícitas devido aos problemas de memória para armazenamento da informação e pelo tempo de processamento necessário para verificar se uma solução vizinha já foi visitada anteriormente e, portanto, se encontra armazenada. Contudo, essa justificativa, que era muito válida na década de

1980, pode não ter a mesma validade atualmente devido ao aumento elevado da memória disponível nos computadores modernos e também ao aumento da velocidade de processamento desses computadores. Assim, para determinadas aplicações pode ser interessante avaliar a possibilidade do uso da memória explícita, como acontece no problema abordado neste trabalho.

- Na estratégia implícita, é usado o conceito de atributo, que basicamente é algum tipo de informação relacionado com uma proposta de solução e que permite identificar alguma característica dessa mesma proposta. O tipo de atributo mais usado é o próprio mecanismo usado na transição e na especificação da vizinhança e que também permite a identificação de uma solução vizinha da solução corrente.
- A proibição através de atributos tenta evitar de voltar a uma solução já visitada. No entanto, como essa proibição termina após k_p transições previamente especificadas, é possível no futuro voltar a uma solução já visitada e, nesse caso, acontece o fenômeno chamado de ciclagem. Uma forma de atenuar esse problema é aumentar o valor de k_p , porém, se o valor de k_p for muito grande, podem existir muitas soluções vizinhas que não poderiam ser visitadas porque compartilham os mesmos atributos proibidos das soluções já visitadas e que ainda se encontram proibidas devido ao aumento de k_p . Por esse motivo, o valor de k_p não pode ser muito grande. Além disso, muitas soluções vizinhas que compartilham atributos proibidos com soluções já visitadas podem ser de excelente qualidade e, eventualmente, a própria solução ótima global pode estar proibida. Para contornar esse problema, foi inventada a estratégia de critério de aspiração.
- O objetivo do critério de aspiração é eliminar a proibição do atributo de uma solução vizinha de excelente qualidade que compartilha o mesmo atributo de uma solução já visitada. Assim, se uma solução vizinha satisfaz um critério de qualidade que permite suspeitar que seja uma solução ainda não visitada, elimina-se a proibição e se realiza a transição para essa solução vizinha. Esse critério de qualidade está relacionado com o valor da função objetivo. Um critério extremo, por exemplo, consiste em especificar que uma solução vizinha cumpre com o critério de aspiração se for melhor que a incumbente. Nesse caso, existe a certeza absoluta de que essa solução vizinha nunca foi visitada anteriormente, mas apresenta a desvantagem de que raras vezes pode ser acionada, o que pode ser quase equivalente a não ter nenhum critério de aspiração. Geralmente, pode ser mais interessante escolher um critério de aspiração menos exigente. Uma proposta de critério de aspiração pode ser a seguinte: se a solução vizinha é melhor que as soluções visitadas nas últimas k_{ul} iterações, então cumpre com o critério de aspiração.

Na estratégia de TS para a minimização dos custos de operação horária de um sistema elétrico através do desmembramento das barras do sistema elétrico proposto neste trabalho, não se usa lista de atributos proibidos nem critério de aspiração. A estratégia armazena todas as soluções já visitadas durante processo de transição e verifica se a solução vizinha candidata a ser escolhida já foi visitada anteriormente.

4.5. Estratégia Tabu Search para o Problema de Desmembramento de Barras na Operação Ótima de um Sistema Elétrico

Nesta seção, é apresentada a proposta de TS idealizada e implementada para resolver o problema de minimização dos custos de operação horária de um sistema elétrico através do desmembramento de barras do sistema elétrico. Portanto, deve-se mostrar a estrutura geral proposta e a forma de implementação de cada etapa da estrutura geral.

A estrutura geral do TS assume a seguinte forma:

1. Idealizar uma técnica de redução do espaço de busca para evitar a explosão da cardinalidade da vizinhança proposta. Montar os dados do problema DOB e escolher uma forma de representar uma proposta de solução denominada de p . Identificar uma forma de avaliar a qualidade da função objetivo $f(p)$. Definir a estrutura de vizinhança a ser usada, o que caracteriza o espaço de busca. Escolher o critério de parada.
2. Encontrar uma solução inicial p^o que se transforma na solução corrente p^c .
3. Identificar e avaliar todas as soluções vizinhas da solução corrente p^c , ordenar essas soluções vizinhas por qualidade sendo que a primeira da lista é a melhor solução vizinha p^{best} .
4. Realizar a transição para a solução vizinha melhor classificada e que ainda não foi visitada. Seja p^e a melhor solução vizinha escolhida, então fazer $p^c = p^e$.
5. Atualizar a incumbente se possível. Se o critério de parada for satisfeito, então pare. Em caso contrário, voltar ao passo 3.

Os passos de 1 a 3 da estrutura do TS proposto são detalhados de forma separada.

No passo 1 da estrutura do TS idealizado, são realizadas as seguintes tarefas:

- Os dados do problema são os mesmos do problema tradicional de minimização dos custos de operação horária de um sistema de energia elétrica. O modelo de representação da rede é o modelo DC.
- Considera-se que a melhor estratégia de representar uma proposta de solução é um vetor de tamanho n_{bc} , onde n_{bc} são todas as barras que formam laços. Assim, uma proposta de solução é representada por um vetor de tamanho n_{bc} que tem a estrutura apresentada na Figura 4.

Cada elemento do vetor da Figura 4 indica uma proposta de desmembramento. Para exemplificar melhor os elementos do vetor p^k , supõe-se que cada barra do sistema elétrico analisado

Figura 4: Representação de uma proposta de solução.

	1	2	3	...	n_{bc}	
$p^k =$	2	0	7	...	4	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

possui 3 linhas de transmissão ligadas à ela, como ocorre na Figura 3. Então, como existem 10 possibilidades de topologias diferentes (conforme visto no Capítulo 3), um elemento do vetor p^k pode assumir 10 valores diferentes. Cada número identifica um tipo de desmembramento. Assim, para as diferentes possibilidades de desmembramento mostradas na Figura 3, pode-se associar cada número da seguinte forma:

1. O número 0 indica que a barra não foi desmembrada.
2. O número 1 indica que não existe linha desligada, mas a linha $n - s$ é desacoplada e fica com a carga da barra s (Figura 3f).
3. O número 2 indica que não existe linha desligada, mas a linha $m - s$ é desacoplada e fica com a carga da barra s (Figura 3h).
4. O número 3 indica que não existe linha desligada, mas a linha $k - s$ é desacoplada e fica com a carga da barra s (Figura 3i).
5. O número 4 indica que a linha $n - s$ está desligada (Figura 3e).
6. O número 5 indica que a linha $m - s$ está desligada (Figura 3g).
7. O número 6 indica que a linha $k - s$ está desligada (Figura 3j).
8. O número 7 indica que as linhas $m - s$ e $k - s$ estão desligadas (Figura 3b).
9. O número 8 indica que as linhas $k - s$ e $n - s$ estão desligadas (Figura 3c).
10. O número 9 indica que as linhas $m - s$ e $n - s$ estão desligadas (Figura 3d).

A numeração anterior obedece à lógica de vizinhança adequada, ou seja, a passagem da topologia tipo 0 (sem desligamento de linha de transmissão e sem desmembramento) para uma topologia 1, 2 ou 3 é a mais próxima possível em relação à topologia original (não existe desligamento de linha de transmissão, existe apenas desmembramento de uma barra e, portanto, o desaparecimento de um laço não fundamental). As topologias mais distantes correspondem a aquelas identificadas como 7, 8 e 9 (existe o desligamento de duas linhas de transmissão).

Além dessa forma de representação de uma proposta de solução, deve-se montar na fase de pré-processamento uma matriz estática de n_{bc} linhas, onde são armazenadas todas as formas de desmembramento de cada barra do sistema. Adicionalmente, cada proposta de solução deve ser

revisada para verificar se representa uma topologia conexa. Caso contrário, deve-se transformar a topologia não conexa em conexa, simplesmente fechando a linha de transmissão que conecta os dois subsistemas.

Após verificar que a proposta de solução p^k é conexa, deve-se calcular o valor da função objetivo resolvendo o seguinte problema:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{i \in \Omega_g} c_i g_i + \sum_{i \in \Omega_d} p_i r_i \quad (15)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in \Omega_l} f_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} f_{ij} + g_i + r_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (16)$$

$$f_{ij} = \gamma_{ij} n_{ij}^p (\theta_i - \theta_j) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (17)$$

$$|f_{ij}| \leq n_{ij}^p \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (18)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_g \quad (19)$$

$$0 \leq r_i \leq \bar{d}_i \quad \forall i \in \Omega_d \quad (20)$$

$$\theta_{ref} = 0 \quad (21)$$

Na formulação anterior, n_{ij}^p representa as linhas fechadas na proposta de solução corrente. O modelo mostrado anteriormente é um problema de programação linear que minimiza os custos de operação horária de um sistema de energia elétrica para a proposta topológica n_{ij}^p . Consequentemente, avaliar a qualidade de uma proposta de solução significa resolver um problema de fluxo de potência ótimo.

No modelo anterior, as grandezas assumem a seguinte forma:

- Conjuntos:

Ω_g é o conjunto de barras de geração; Ω_d é o conjunto de barras que possuem demanda; Ω_b é o conjunto de barras da configuração topológica do sistema e tem cardinalidade variável para cada proposta de solução (proposta topológica) fornecida pela busca tabu devido ao desmembramento das barras correspondente a cada proposta de solução e Ω_l representa o conjunto de linhas de transmissão.

- Parâmetros:

c_i é o custo de geração horária da energia elétrica gerada na barra geradora i ; p_i é o custo de geração artificial na barra de demanda i ; d_i é a demanda na barra i ; γ_{ij} é a susceptância de uma linha no caminho ij ; n_{ij}^p é número de linhas fechadas no caminho ij (todas as linhas em paralelo são do mesmo tipo); $\bar{f}_{ij}$ é a capacidade máxima de transmissão de uma linha no caminho ij ; $\bar{d}_i$ é a demanda máxima da barra i e $\bar{g}_i$ é a capacidade máxima de geração na barra geradora i .

■ Variáveis:

g_i é o nível de geração horária da energia elétrica na barra geradora i ; r_i é a potência ativa artificial gerada na barra de demanda i ; f_{ij} é o fluxo total através de todas as linhas de transmissão no caminho ij e v é o custo de operação horária do sistema de energia elétrica.

É importante destacar que a segunda parcela da restrição (15) representa a alocação de geradores artificiais nas barras de demanda, que foram incorporados apenas para evitar a geração de soluções infactíveis. Além disso, o valor de p_i deve ser muito maior que o de c_i (pelo menos 5 vezes maior que o maior valor de c_i), caso contrário os geradores artificiais estarão sempre ligados, o que não é desejável. A restrição (16) é apenas a aplicação da Lei das Correntes de Kirchhoff (LCK), sendo uma restrição para cada barra do sistema. A restrição (17) é a aplicação aproximada da Lei das Tensões de Kirchhoff (LTK), sendo uma restrição para cada laço fundamental. A restrição (18) controla o limite máximo através das linhas de transmissão em cada caminho ij . A restrição (19) controla a geração aos limites permitidos, enquanto que a restrição (20) limita a geração artificial r_i à demanda $\bar{d}_i$ da barra i . Por último, a restrição (21) fixa apenas a barra de referência. Dessa forma, o sistema (15)-(21) é um problema de fluxo de potência ótimo que neste trabalho foi resolvido usando o software MATPOWER.

A vizinhança proposta é relativamente simples justamente para evitar a explosão da cardinalidade da vizinhança. Em razão disso, a proposta de vizinhança implementada é a seguinte:

1. Uma proposta de solução vizinha da topologia corrente p^k é uma alteração topológica em uma barra do sistema.
2. Se uma barra tem a identificação 0 na proposta de solução corrente, então é possível gerar 3 propostas de solução vizinhas, ou seja, pode-se trocar o valor corrente de 0 (zero) para 1, 2 ou 3.
3. Se uma barra tem a identificação 1 na proposta de solução corrente, então é possível gerar 6 propostas de solução vizinhas, ou seja, pode-se trocar o valor corrente de 1 para 0, 2, 3, 4, 5 ou 6.
4. Se uma barra tem a identificação 2 na proposta de solução corrente, então é possível gerar 6 propostas de solução vizinhas, ou seja, pode-se trocar o valor corrente de 2 para 0, 1, 3, 4, 5 ou 6.
5. Se uma barra tem a identificação 3 na proposta de solução corrente, então é possível gerar 6 propostas de solução vizinhas, ou seja, pode-se trocar o valor corrente de 3 para 0, 1, 2, 4, 5 ou 6.
6. Se uma barra tem a identificação 4 na proposta de solução corrente, então é possível gerar 8 propostas de solução vizinhas, ou seja, pode-se trocar o valor corrente de 4 para 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 ou 9.
7. Se uma barra tem a identificação 5 na proposta de solução corrente, então é possível gerar 8 propostas de solução vizinhas, ou seja, pode-se trocar o valor corrente de 5 para 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 ou 9.

8. Se uma barra tem a identificação 6 na proposta de solução corrente, então é possível gerar 8 propostas de solução vizinhas, ou seja, pode-se trocar o valor corrente de 6 para 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8 ou 9.
9. Se uma barra tem a identificação 7 na proposta de solução corrente, então é possível gerar 5 propostas de solução vizinhas, ou seja, pode-se trocar o valor corrente de 7 para 4, 5, 6, 8 ou 9.
10. Se uma barra tem a identificação 8 na proposta de solução corrente, então é possível gerar 5 propostas de solução vizinhas, ou seja, pode-se trocar o valor corrente de 8 para 4, 5, 6, 7 ou 9.
11. Se uma barra tem a identificação 9 na proposta de solução corrente, então é possível gerar 5 propostas de solução vizinhas, ou seja, pode-se trocar o valor corrente de 9 para 4, 5, 6, 7 ou 8.

É evidente que a proposta de vizinhança sugerida gera uma explosão da cardinalidade da vizinhança (o número de vizinhos da topologia corrente). Em função disso, é conveniente uma redução do espaço de busca sem comprometer, de forma significativa, a busca em regiões promissoras do espaço de busca original.

A proposta de redução de vizinhança (e do espaço de busca) sugerida consiste em identificar um subconjunto das barras do sistema candidatas a desmembramento. Assim, na fase de pré-processamento, resolve-se o problema de minimização dos custos de operação horária do sistema elétrico com todas as linhas e barras ligadas (problema de operação tradicional). Esse tipo de problema é um PL com a mesma estrutura do problema (15)-(21) onde $n_{ij}^p = n_{ij}^o$, ou seja, todas as linhas de transmissão do sistema estão ligadas e Ω_b é o conjunto de barras do sistema. Após calcular os fluxos de potência em cada caminho, considera-se uma barra candidata a desmembramento se alguma linha ligada a essa barra apresenta um fluxo de potência superior em 50 % da capacidade da linha de transmissão. Dessa forma, barras ligadas a linhas com baixo fluxo de potência para a topologia original (com todas as linhas e barras ligadas) não são candidatas a desmembramento. Obviamente, as barras ligadas a linhas de transmissão que não formam laços também não são consideradas candidatas a desmembramento.

Finalmente, o critério de parada deve ser o número máximo de problemas de fluxo de potência ótimo resolvidos durante o processamento do TS.

No passo 2 da estrutura do TS, deve-se escolher uma proposta de solução inicial para iniciar o processo de otimização. Neste caso, a proposta de solução inicial p^o é a topologia original de operação do sistema elétrico, ou seja, a topologia com todas as barras ligadas (sem desmembramento) e todas as linhas de transmissão ligadas.

No passo 3, cada proposta de solução vizinha é avaliada resolvendo um problema de fluxo de potência ótimo, ou seja, um problema do tipo (15)-(21). Portanto, esse passo produz um esforço de processamento elevado.

Os demais passos da estrutura do TS são triviais e dispensam uma explicação mais elaborada.

Capítulo 5

Testes e Resultados

5.1. Teste Usando o Sistema Sul Brasileiro

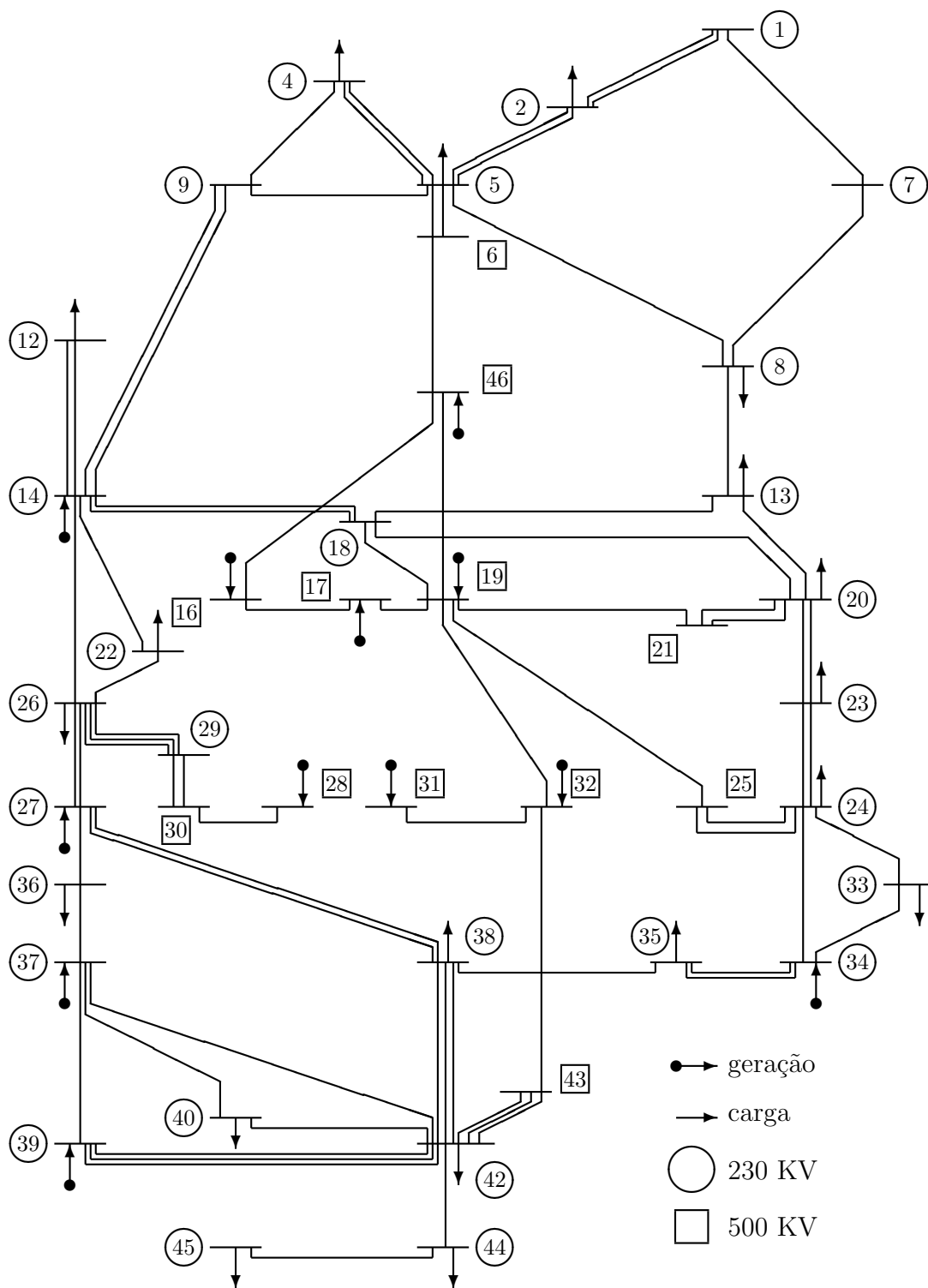
Para realizar os testes deste trabalho, foi utilizado o sistema sul brasileiro modificado apresentado em Flores (2018). Esse sistema possui 41 barras, 55 caminhos em que existem linhas de transmissão e 78 linhas de transmissão. A topologia base do sistema é representada pela Figura 5, com uma demanda de 6880 MW e geração máxima disponível de 10545 MW. Em Flores (2018), foram realizados testes com esse sistema para o problema de minimização de custo horário de operação de um sistema elétrico através do desligamento ótimo de linhas de transmissão. Os dados completos do sistema sul brasileiro modificado se encontram no Apêndice deste trabalho.

Os resultados obtidos para esse sistema e apresentados em Flores (2018) são os seguintes:

1. Custo de operação sem mudança de topologia do sistema de transmissão: $v = 185.111,80$ US\$/hora (operação tradicional).
2. Modelagem original de Fisher, O'Neill e Ferris (2008) e cuja topologia final é mostrada na Figura 6:
 - Custo de operação com desligamento de linhas de transmissão: $v = 184.063,00$ US\$/hora
 - Linhas de transmissão desligadas: 4 – 5, 20 – 23, 33 – 34, 37 – 39, 40 – 42, 38 – 42 (3 linhas), 42 – 43.
3. Modelagem proposta em Flores (2018) e cuja topologia final é mostrada na Figura 7:
 - Custo de operação com desligamento de linhas de transmissão: $v = 184.063,00$ US\$/hora
 - Linhas de transmissão desligadas : 33 – 34, 37 – 39, 38 – 42 (3 linhas).

A estratégia proposta neste trabalho encontra várias topologias interessantes, sendo uma delas a topologia encontrada em Flores (2018). Contudo, a melhor topologia encontrada usando

Figura 5: Sistema Sul Brasileiro Modificado - Topologia Base.



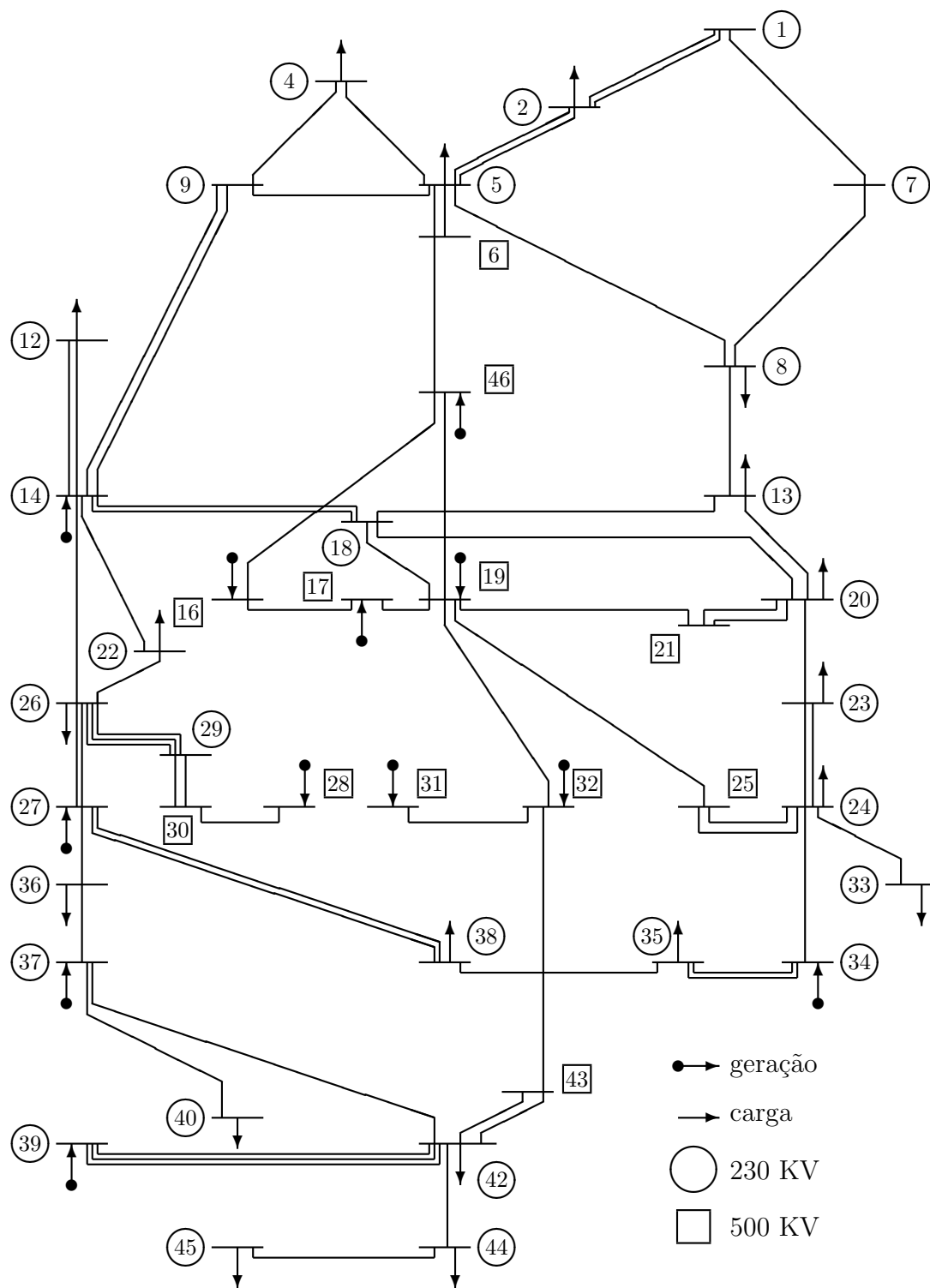
Fonte: Adaptado de Flores (2018).

a proposta de desmembramento de barras é mostrada na Figura 8. Os resultados relevantes são apresentados a seguir:

- Custo de operação com desmembramento de barras: $v = 184.063$ US\$/hora
- Duas linhas de transmissão desligadas: 37 – 39 e 38 – 42.
- As seguintes barras são desmembradas:
 1. Uma das 2 linhas restantes no caminho 42 – 38 se torna independente com o desmembramento da barra 38, o que faz aparecer uma nova barra, a barra 47. Dessa forma, uma linha de transmissão que estava no caminho 42 – 38 é separada da barra 38 e aparece a linha ligando as barras 42 – 47. Assim, a demanda de 216 MW que estava na barra 38 é transferida para a nova barra 47.
 2. A linha no caminho 9 – 5 se torna independente com o desmembramento da barra 5. O que faz aparecer uma nova barra, a barra 48. Dessa forma, a linha de transmissão que estava no caminho 9 – 5 passa a formar parte do caminho 9 – 48 e a demanda de 238 MW que estava na barra 5 é transferida para a nova barra 48.
 3. A linha no caminho 18 – 13 se torna independente com o desmembramento da barra 13, o que faz aparecer uma nova barra, a barra 49. Dessa forma a linha de transmissão que estava no caminho 18 – 13 passa a formar parte do caminho 18 – 49 e a demanda de 185,8 MW que estava na barra 13 é transferida para a nova barra 49.
 4. Uma das 2 linhas no caminho 34 – 35 se torna independente com o desmembramento da barra 35, o que faz aparecer uma nova barra, a barra 50. Dessa forma, uma linha de transmissão que estava no caminho 34 – 35 é separada da barra 35 e aparece a linha ligando as barras 34 – 50. Assim, a demanda de 216 MW que estava na barra 35 é transferida para a nova barra 50.
 5. A linha no caminho 24 – 33 se torna independente com o desmembramento da barra 33, o que faz aparecer uma nova barra, a barra 51. Dessa forma, a linha de transmissão que estava no caminho 24 – 33 passa a formar parte do caminho 24 – 51 e a demanda de 229,1 MW que estava na barra 33 é transferida para a nova barra 51. Neste caso em particular, pode-se verificar que a barra 33 fica sem demanda e a linha de transmissão 34 – 33 permanece ligada, porém inativa. Portanto, a linha de transmissão 34 – 33, na prática, pode ser considerada como uma linha desligada.
 6. A linha no caminho 7 – 8 se torna independente com o desmembramento da barra 8, o que faz aparecer uma nova barra, a barra 52. Dessa forma, a linha de transmissão que estava no caminho 7 – 8 passa a formar parte do caminho 7 – 52 e a demanda de 72,2 MW que estava na barra 8 é transferida para a nova barra 52.

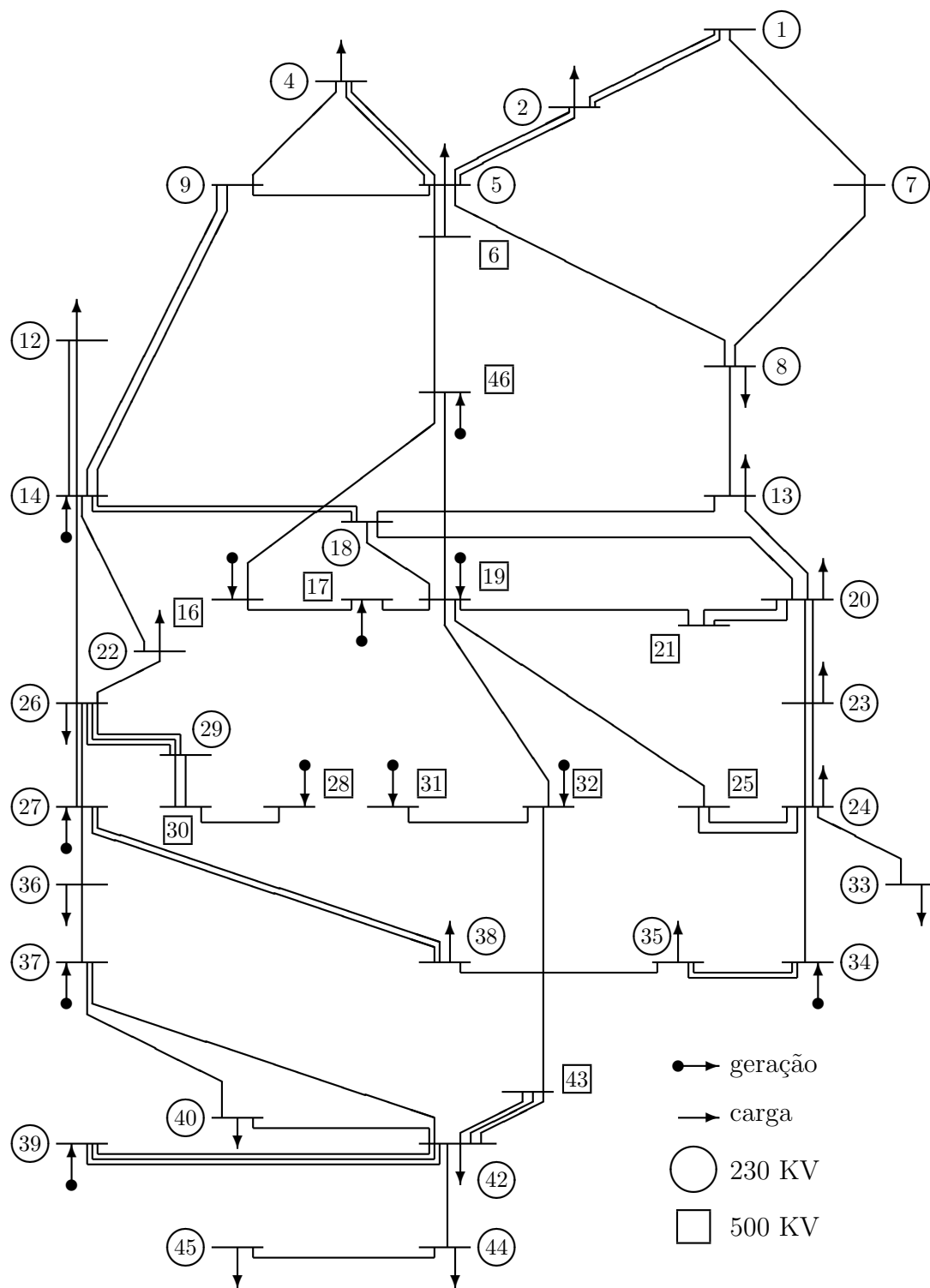
A Figura 8 mostra a melhor topologia de operação encontrada com a proposta de modelagem matemática desenvolvida neste trabalho. A proposta de otimização foi programada no ambiente MATLAB e cada proposta de solução fornecida pela meta-heurística foi resolvida pelo MATPOWER, que resolve um problema de fluxo de potência ótimo DC para cada caso. O tempo de processamento foi de aproximadamente 50 segundos e foram resolvidos 6586 problemas de fluxo de potência ótimo.

Figura 6: Sistema Sul Brasileiro Modificado - Topologia encontrada em Fisher, O'Neill e Ferris (2008).



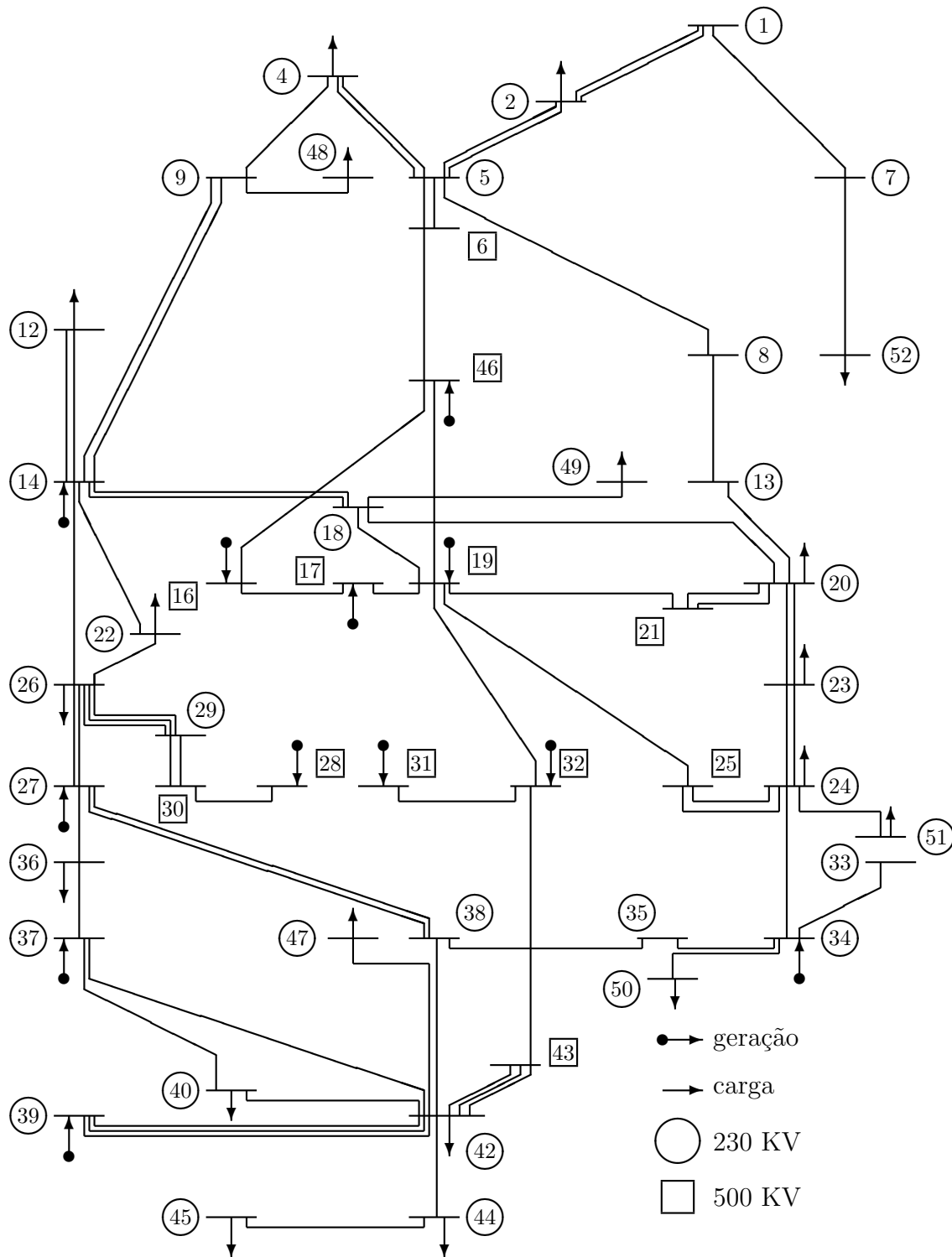
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7: Sistema Sul Brasileiro Modificado - Topologia encontrada com a proposta de Flores (2018).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8: Sistema Sul Brasileiro Modificado - Topologia encontrada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2. Conclusões Parciais sobre os Testes

A partir dos testes obtidos utilizando o sistema sul brasileiro, é possível realizar as seguintes conclusões parciais:

- A função objetivo que representa os custos horários de operação é a mesma para as topologias encontradas a partir das propostas de modelagem matemática apresentadas em Fisher, O'Neill e Ferris (2008), Flores (2018) e neste trabalho. Esse fato pode ser explicado porque a função objetivo encontrada é ótima para o problema de minimização de custos horários de operação. Em outras palavras, de acordo com os argumentos apresentados em Flores (2018), de diferentes formas alternativas, foi eliminada a interferência da necessidade de cumprir a Lei de Tensões de Kirchhoff nos laços do sistema elétrico.
- A proposta de solução encontrada desliga 3 linhas de transmissão (37–39, 38–42 e 33–34) e realiza o desmembramento de cinco barras (as barras 35, 38, 8, 13 e 5).
- As três soluções apresentadas são soluções ótimas alternativas. Entretanto, acredita-se que a topologia apresentada neste trabalho seja menos vulnerável pelo fato de desligar apenas 3 linhas de transmissão.
- Trabalhos futuros com testes usando dados de sistemas de elevada complexidade podem verificar a vantagem da proposta apresentada, já que a região factível da modelagem matemática com desmembramento de barras é maior que a modelagem matemática com desligamento de linhas de transmissão.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho, foi abordado o problema de desmembramento de barras do sistema de transmissão de energia elétrica para otimizar os custos de operação horária de um sistema de energia elétrica. Assim, pode-se despachar preferencialmente os geradores com custos de operação mais baratos. Esse tipo de problema é de difícil solução porque se trata de um problema de programação linear inteira mista de grande porte quando usado o modelo linear disjuntivo.

A modelagem matemática que considera o desmembramento de barras do sistema de energia elétrica como uma alternativa para melhorar algum aspecto da operação do sistema não é nova. Entretanto, na literatura especializada não aparecem propostas de modelagem matemática utilizando o desmembramento de barras para otimizar a operação horária de um sistema de energia elétrica. Portanto, a proposta apresentada pode ser considerada de alguma forma como inédita.

A proposta de otimização implementada neste trabalho considera as principais contribuições apresentadas em Flores (2018), especialmente a justificativa que explica os motivos pelos quais a mudança topológica de um sistema de energia elétrica pode melhorar a operação do sistema.

As principais conclusões que podem ser mencionadas são as seguintes:

- Foi mostrado que a proposta de modelagem matemática considerando o desmembramento de barras do sistema elétrico é uma generalização da modelagem que considera o desligamento de linhas de transmissão. Em outras palavras, a modelagem com desmembramento de barras já incorpora todas as topologias com desligamento de linhas de transmissão e outras alternativas adicionais. Assim, a região factível do problema de desligamento de linhas de transmissão é menor e está dentro da região factível do problema de desmembramento de barras do sistema elétrico.
- A conclusão do item anterior implica que não faz sentido sugerir um modelo matemático integrado onde existe a possibilidade de desmembrar barras do sistema elétrico e desligar linhas de transmissão do sistema.
- Aparentemente, as topologias encontradas a partir da proposta de modelagem com des-

membramento de barras são mais interessantes em termos de confiabilidade quando comparadas às topologias obtidas considerando o desligamento de linhas de transmissão. No teste com o sistema sul brasileiro essa observação parece adequada. Contudo, é necessário a realização de novas pesquisas para provar a consistência dessa conclusão feita com base na análise de apenas um sistema elétrico.

Referências

- Bacher, R.; Glavitsch, H. **Network topology optimization with security constraints**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 1, n. 4, p. 103-111, 1986.
- Bacher, R.; Glavitsch, H. **Loss reduction by network switching**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 3, n. 2, p. 447-454, 1988.
- Bakirtzis, A. G.; Meliopoulos, A. P. S. **Incorporation of switching operation in power system corrective control computations**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 2, n. 3, p. 669-675, 1987.
- Glavitsch, H. **Switching as means of control in the power system**, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 7, n. 2, p. 92-100, 1985.
- Mazi, A. A.; Wollenberg, B. F.; Hesse, M. H. **Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 1, n. 3, p. 258-264, 1986.
- Schnyder, G.; Glavitsch, H. **Integrated security control using an optimal power flow in switching concepts**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 3, n. 2, p. 782-790, 1988.
- Schnyder, G.; Glavitsch, H. **Security enhancement using an optimal switching power flow**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 5, n. 2, p. 674-681, 1990.
- Rolim, J. G.; Machado, J. J. B. **A study of the use of corrective switching in transmission systems**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 14, n. 1, p. 336-341, 1999.
- Fisher, E. B.; O'Neill, R. P.; Ferris, M. C. **Optimal transmission switching**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 23, n. 3, p. 1346-1355, 2008.
- Fuller, J. D.; Ramasra, R.; Cha, A. **Fast heuristic for transmission-line switching**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 27, n. 3, p. 1377-1386, 2012.
- Hedman, K. W. et al. **Optimal transmission switching: Sensitivity analysis and extensions**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 23, n. 3, p. 1469-1479, 2008.
- Hedman, K. W. et al. **Optimal transmission switching with contingency analysis**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 24, n. 3, p. 1577-1586, 2009.
- Kocuk, B.; Dey, S. S.; Sun, X. A. **New formulations and strong MISOCP relaxations for AC optimal transmission switching problem**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 32, n. 6, p. 4161-4170, 2014.
- Ostrowski, J.; Wang, J.; Liu, C. **Exploiting symmetry in transmission lines for transmission switching**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 27, n. 3, p. 1708-1709, 2012.
- Ruiz, P. A. et al. **Tractable transmission topology control using sensitivity analysis**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 27, n. 3, p. 1550-1559, 2012.

- Flores, M. A. **Uma contribuição ao problema de desligamento ótimo de linhas de transmissão para otimização da operação de um sistema de energia elétrica.** 2018. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira, UNESP, Ilha Solteira, 2018.
- Glover, F.; Kochenberger, G. **Handbook of metaheuristics**, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Blumsack, S.; Lave, L. B.; Ilic, M. **A quantitative analysis of the relationship between congestion and reliability in electric power networks**, Energy Journal, Toronto, v. 28, n. 4, p. 73-100, 2007.

Apêndice A

Dados do Sistema Usado nos Testes

Neste apêndice, apresentam-se os dados do sistema sul brasileiro modificado usado nos testes.

Tabela 1: Sistema Sul Brasileiro Modificado: Dados das Barras

Barra	Geração MW	Demanda MW	Custo de geração US\$/MWh
1	0,00	0,00	
2	0,00	443,10	
4	0,00	300,70	
5	0,00	238,00	
6	0,00	0,00	
7	0,00	0,00	
8	0,00	72,20	
9	0,00	0,00	
12	0,00	511,90	
13	0,00	185,80	
14	1257,00	0,00	33,0
16	2000,00	0,00	22,0
17	1050,00	0,00	34,0
18	0,00	0,00	
19	1670,00	0,00	38,0
20	0,00	1091,20	
21	0,00	0,00	
22	0,00	81,90	
23	0,00	458,10	
24	0,00	478,20	
25	0,00	0,00	
26	0,00	231,90	
27	220,00	0,00	29,0
28	800,00	0,00	24,0
29	0,00	0,00	
30	0,00	0,00	
31	700,00	0,00	25,0
32	500,00	0,00	27,0
33	0,00	229,10	
34	748,00	0,00	39,0
35	0,00	216,00	
36	0,00	90,10	
37	300,00	0,00	31,0
38	0,00	216,00	
39	600,00	0,00	26,0
40	0,00	262,10	
42	0,00	1607,90	
43	0,00	0,00	
44	0,00	79,10	
45	0,00	86,70	
46	700,00	0,00	35,0

Fonte: Adaptado de Flores (2018).

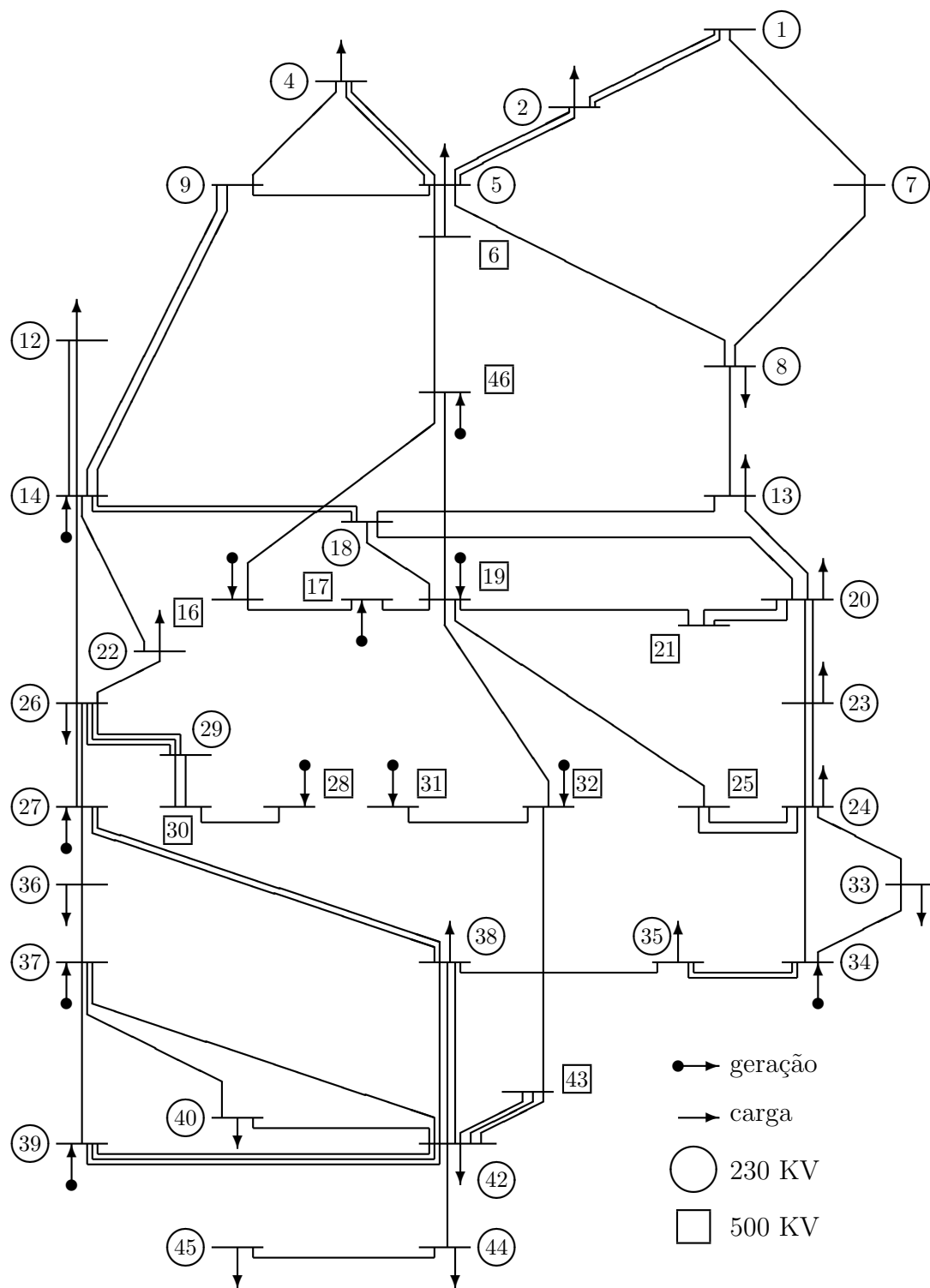
Observação: Sistema com 41 barras e 55 caminhos com linhas de transmissão.

Tabela 2: Sistema Sul Brasileiro Modificado: Dados das Linhas

Barra inicial	Barra final	Número de linhas	Reatância p.u.	Capacidade de transmissão (MW)
1	7	1	0,0616	270
1	2	2	0,1065	270
4	9	1	0,0924	270
5	9	1	0,1173	270
5	8	1	0,1132	270
7	8	1	0,1023	270
4	5	2	0,0566	270
2	5	2	0,0324	270
8	13	1	0,1348	240
9	14	2	0,1756	220
12	14	2	0,0740	270
14	18	2	0,1514	240
13	18	1	0,1805	220
13	20	1	0,1073	270
18	20	1	0,1997	200
19	21	1	0,0278	1500
16	17	1	0,0078	2000
17	19	1	0,0061	2000
14	26	1	0,1614	220
14	22	1	0,0840	270
22	26	1	0,0790	270
20	23	2	0,0932	270
23	24	2	0,0774	270
26	27	2	0,0832	270
24	34	1	0,1647	220
24	33	1	0,1448	240
33	34	1	0,1265	270
27	36	1	0,0915	270
27	38	2	0,2080	200
36	37	1	0,1057	270
34	35	2	0,0491	270
35	38	1	0,1980	200
37	39	1	0,0283	270
37	40	1	0,1281	270
37	42	1	0,2105	200
39	42	3	0,2030	200
40	42	1	0,0932	270
38	42	3	0,0907	270
32	43	1	0,0309	1400
42	44	1	0,1206	270
44	45	1	0,1864	200
19	32	1	0,0195	1800
46	19	1	0,0222	1800
46	16	1	0,0203	1800
18	19	1	0,0125	600
20	21	2	0,0125	600
42	43	3	0,0125	600
46	6	1	0,0128	2000
19	25	1	0,0325	1400
31	32	1	0,0046	2000
28	30	1	0,0058	2000
26	29	3	0,0541	270
24	25	2	0,0125	600
29	30	2	0,0125	600
5	6	2	0,0125	600

Fonte: Adaptado de Flores (2018).

Figura 9: Sistema Sul Brasileiro Modificado - Topologia Base.



Fonte: Adaptado de Flores (2018).