

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

**Thiago Lombarde Vitoriano**

**Estratégia Multipartida Aplicada na Reconfiguração Ótima de Sistemas de  
Distribuição Radiais**

Ilha Solteira  
2024

**Thiago Lombarde Vitoriano**

**Estratégia Multipartida Aplicada na Reconfiguração Ótima de Sistemas de  
Distribuição Radiais**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade  
de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira –  
UNESP como parte dos requisitos para obtenção  
do grau de Engenheiro Eletricista.

**Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo  
Possagnolo**  
Orientador

Ilha Solteira  
2024

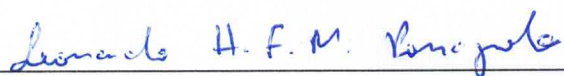
#### FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- V845e Vitoriano, Thiago Lombarde.  
Estratégia multipartida aplicada na reconfiguração ótima de sistemas de distribuição radiais / Thiago Lombarde Vitoriano. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024  
54 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,  
2024
- Orientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
- Inclui bibliografia
1. Fluxo de carga radial. 2. Meta-heurística multipartida. 3. Otimização de sistemas elétricos.. 4. Reconfiguração de alimentadores.

**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

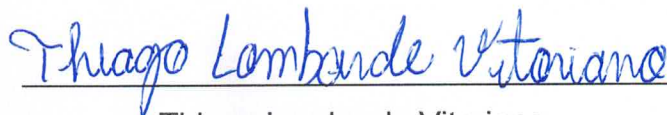
Aos vinte e quatro dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente **Thiago Lombarde Vitoriano**, matriculado sob o nº 182055272, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo, a Doutoranda Ines Celsa Dominguez Castillo e o Mestrando Jordan Mauricio Rincon Contreras, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Estratégia Multi Partida Aplicada na Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição Radiais**", obtendo a nota 10,0 ( dez vírgula zero ) e conceito aprovado.



Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo

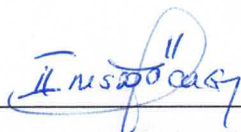
Possagnolo

- Orientador -



Thiago Lombarde Vitoriano

- Discente -



Doutoranda Ines Celsa Dominguez Castillo

- Membro da Banca -



Mestrando Jordan Mauricio Rincon Contreras

- Membro da Banca -

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por todo suporte fornecido durante esse período de graduação e na minha vida.

Aos meus pais Rita Lombarde Vilela Vitoriano e Vandemberg Vilela Vitoriano e a minha irmã Maria Rita Lombarde Vitoriano por toda ajuda, paciência, confiança e apoio durante a graduação.

Ao professor Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo pela paciência, confiança e toda ajuda fornecida durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos Vitor Kamikihara de Souza, Thalles Nathan Bezerra de França, Amanda Meira Ishicava Bortoloci, Sophie Assunção Carraro e Caroline Silva Bonfim pela amizade e companheirismo durante a graduação.

Aos meus amigos do LaPSEE - Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica pelo apoio.

## RESUMO

O presente Trabalho de Graduação considera a análise teórica e a implementação computacional de um algoritmo de tipo multipartida aplicado ao problema da reconfiguração de alimentadores primários em sistemas de distribuição de energia elétrica. Assim, pretende-se desenvolver um algoritmo de tipo multipartida com capacidade de gerar topologias radiais de qualidade na fase construtiva e, na sequência, melhorar a qualidade dessas topologias radiais através de um algoritmo de busca através de vizinhança. Como parte do trabalho, implementou-se também um algoritmo especializado de fluxo de carga radial para encontrar as perdas de cada proposta de solução escolhida pela meta-heurística e também para verificar se a proposta de solução é factível do ponto de vista operacional, isto é, se não existem violações de limites de corrente nos alimentadores ou limites de tensão nas barras do sistema. Com o algoritmo desenvolvido foram realizados testes com sistemas existentes na literatura especializada.

**Palavras-chave:** Fluxo de carga radial, meta-heurística multipartida, otimização de sistemas elétricos, reconfiguração de alimentadores.

## ABSTRACT

This work considers the theoretical analysis and computational implementation of a multi-start algorithm applied to the problem of reconfiguring primary feeders in electrical energy distribution systems. Thus, the aim is to develop a multi-start algorithm with the capacity to generate high-quality radial topologies in the construction phase and, subsequently, improve the quality of these radial topologies through a neighborhood search algorithm. As part of the work, a specialized radial load flow algorithm was also implemented to find the losses of each solution proposal chosen by the metaheuristic and also to verify whether the solution proposal is feasible from an operational point of view, i.e., if there are no violations of current limits on the feeders or voltage limits on the system buses. With the developed algorithm, tests were carried out with existing systems available in the specialized literature.

**Keywords:** Feeder reconfiguration, multi-start metaheuristic, power system optimization, radial load flow.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Representação de uma proposta de solução.....                                       | 20 |
| Figura 2: Proposta alternativa de representação de uma proposta de solução. ....              | 21 |
| Figura 3: Fluxograma ilustrativo do algoritmo de Prim. ....                                   | 21 |
| Figura 4: Processo de busca pela vizinhança N1 e N2. ....                                     | 22 |
| Figura 5 : Sistema de 14 barras. ....                                                         | 24 |
| Figura 6: Evolução da MMS para o sistema de 14 barras.....                                    | 25 |
| Figura 7: Perfis de tensão no sistema de 14 barras antes e depois da<br>reconfiguração.....   | 26 |
| Figura 8: Sistema de 33 barras. ....                                                          | 26 |
| Figura 9: Perfis de tensão no sistema de 33 barras antes e depois da<br>reconfiguração.....   | 27 |
| Figura 10: Evolução da MMS para o sistema de 33 barras.....                                   | 28 |
| Figura 11: Sistema de 84 barras. ....                                                         | 29 |
| Figura 12: Perfis de tensão no sistema de 84 barras antes e depois da<br>reconfiguração.....  | 30 |
| Figura 13: Evolução da MMS para o sistema de 84 barras.....                                   | 30 |
| Figura 14: Sistema de 136 barras. ....                                                        | 31 |
| Figura 15: Perfis de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da<br>reconfiguração..... | 33 |
| Figura 16: Evolução da MMS para o sistema de 136 barras.....                                  | 33 |
| Figura 17: Perfis de tensão no sistema de 415 barras antes e depois da<br>reconfiguração..... | 35 |
| Figura 18: Evolução da MMS para o sistema de 415 barras.....                                  | 36 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Resultados obtidos pelas heurísticas para o sistema de 14 barras considerando a demanda fixa.....   | 25 |
| Tabela 2: Resultados obtidos pelas heurísticas para o sistema de 33 barras considerando a demanda fixa.....   | 27 |
| Tabela 3: Resultados obtidos pelas heurísticas para o sistema de 84 barras considerando a demanda fixa.....   | 29 |
| Tabela 4 : Resultados obtidos pelas heurísticas para o sistema de 136 barras considerando a demanda fixa..... | 32 |
| Tabela 5 : Resultados obtidos pelas heurísticas para o sistema de 415 barras considerando a demanda fixa..... | 34 |
| Tabela 6: Dados para o sistema de 14 barras.....                                                              | 42 |
| Tabela 7: Dados para o sistema de 33 barras.....                                                              | 43 |
| Tabela 8: Dados para o sistema de 84 barras.....                                                              | 44 |
| Tabela 9: Dados para o sistema de 136 barras.....                                                             | 48 |

# SUMÁRIO

|                                                                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                   | <b>9</b>  |
| 1.1 Importância do tema .....                                                                                | 9         |
| 1.2 Objetivos .....                                                                                          | 10        |
| <b>2. O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>                 | <b>11</b> |
| 2.1 Visão geral do problema .....                                                                            | 11        |
| 2.2 Formulação matemática.....                                                                               | 12        |
| 2.3 Revisão bibliográfica .....                                                                              | 14        |
| 2.3.1 Métodos heurísticos .....                                                                              | 15        |
| 2.3.2 Meta-heurísticas.....                                                                                  | 17        |
| 2.3.2 Métodos exatos.....                                                                                    | 19        |
| <b>3. META-HEURÍSTICA DE MULTIPARTIDA PARA O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....</b> | <b>20</b> |
| <b>4. TESTES E RESULTADOS .....</b>                                                                          | <b>24</b> |
| 4.1 Implementação do algoritmo e sistemas testes .....                                                       | 24        |
| 4.2 Resultados para o sistema de 14 barras.....                                                              | 24        |
| 4.3 Resultados para o sistema de 33 barras.....                                                              | 26        |
| 4.4 Resultados para o sistema de 84 barras.....                                                              | 28        |
| 4.5 Resultados para o sistema de 136 barras.....                                                             | 30        |
| 4.5 Resultados para o sistema de 415 barras.....                                                             | 34        |
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>                                                                                   | <b>37</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                   | <b>39</b> |
| <b>7. ANEXO A- DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS .....</b>                                                         | <b>42</b> |
| A.1 Dados para o sistema de 14 barras.....                                                                   | 42        |
| A.2 Dados para o sistema de 33 barras.....                                                                   | 42        |
| A.3 Resultados para o sistema de 84 barras .....                                                             | 44        |
| A.4 Resultados para o Sistema de 136 barras.....                                                             | 48        |

## 1. INTRODUÇÃO

O problema da reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE) consiste em encontrar uma topologia radial do sistema, com alguns alimentadores operando e outros fora de operação, de forma que seja otimizado um objetivo, tipicamente a redução das perdas do sistema para um dado perfil de carga.

Neste trabalho, foi proposto uma meta-heurística especializada a qual é denominada de MMS (metaheuristic Multi-Start), para a resolução de forma eficiente do problema de RSDEE operando com demandas fixas e com o objetivo da minimização de perdas. Ademais, foram efetuados os testes em cinco sistemas distintos: o sistema de 14 barras, o de 33 barras, o de 84 barras, o de 136 barras e o de 415 barras.

Adicionalmente, para a proposta de solução fornecida pela MMS, foi resolvido um problema de fluxo de carga para encontrar as perdas ativas dessa proposta de solução e, desse modo, para verificar possíveis infactibilidades.

### 1.1 Importância do tema

A redução das perdas no sistema elétrico de distribuição traz diversos benefícios importantes. Primeiramente, um alívio no sistema, o que resulta em uma maior vida útil dos equipamentos, uma capacidade de fornecimento aumentada e um perfil de tensão melhorado. Além disso, essa redução das perdas diminui os fluxos de potência nos condutores, reduzindo a necessidade de reforços na rede e, consequentemente, diminuindo investimentos para a expansão do sistema de distribuição. A qualidade da energia também é aprimorada, já que a reconfiguração do sistema melhora o perfil de tensão.

Outro benefício significativo é o adiamento da ampliação da capacidade de transmissão. A RSDEE pode reduzir o carregamento das linhas de transmissão durante os horários de pico, aumentando efetivamente a capacidade de transmissão. Por fim, a necessidade de ampliação da capacidade de geração é adiada, pois a menor demanda durante os horários de pico significa que menos unidades de geração precisam operar.

## **1.2 Objetivos**

São objetivos deste trabalho:

- 1) Desenvolver uma meta-heurística MMS para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.
- 2) Desenvolver um programa computacional com capacidade de testar sistemas elétricos de grande porte.

## **2. O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

### **2.1 Visão geral do problema**

O problema da reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE) é um desafio importante na operação de redes de distribuição de energia. O objetivo é determinar a configuração ideal da rede, mantendo-a em uma topologia radial, onde certos alimentadores são ativados enquanto outros são desativados. Essa configuração deve ser otimizada para atingir um objetivo específico, minimizando as perdas de energia no sistema para um determinado perfil de carga. O estado normal de operação de um sistema de distribuição é em configuração radial. Assim, em uma determinada configuração, o sistema tem um conjunto de circuitos que estão energizados e estes circuitos formam a configuração radial chamada de árvore do ponto de vista de grafos. Por outro lado, os circuitos que não estão energizados são chamados de ramos de ligação. Uma troca adequada de um ramo de ligação com um ramo da árvore leva a outra configuração radial. Portanto, o problema de reconfiguração ótima de um sistema de distribuição consiste em encontrar aquela configuração radial, do espaço de configurações possíveis, que produz as perdas mínimas de potência ativa no sistema de distribuição. Este processo de busca ótima implica analisar, implícita ou explicitamente, todas as configurações radiais possíveis. Uma outra forma equivalente de caracterizar o problema de reconfiguração de redes de distribuição é a seguinte: dado um grafo, encontrar uma árvore geradora que minimize uma função objetivo, como as perdas, satisfazendo as seguintes restrições:

- 1) Os limites de tensão nas barras do sistema.
- 2) A capacidade de corrente nos alimentadores.
- 3) As duas leis de Kirchhoff, representadas pelo problema de fluxo de carga.
- 4) A configuração deve ser radial.

Adicionalmente, na teoria de grafos existem métodos que garantem encontrar uma árvore geradora mínima (para grafos conexo e com pesos constantes), por exemplo, utilizando o algoritmo de Prim e de Kruskal. Todavia, quando é falado do

RSDEE, os valores dos pesos dos ramos são as perdas, as quais dependem da topologia e, portanto, para cada topologia do sistema, os pesos dos ramos são alterados e, conseqüentemente, os algoritmos de Prim ou de Kruskal não conseguem obter uma solução ótima para o problema, mas sim uma subótima, considerando valores estimados para os pesos.

Quando se trata de sistemas de distribuição, a operação é, normalmente, radial. A mesma é utilizada com o propósito de efetuar uma redução das correntes de curto-circuito, o que, por sua vez, reduz os custos com os equipamentos, por exemplo, os relés de proteção contra sobrecorrente, que para redes malhadas são muito mais caros. Ademais, é muito mais complexo efetuar a coordenação da proteção para um sistema malhado. Além disso, considera-se o sistema como sendo simétrico e equilibrado, isto é, um sistema que opera com tensões simétricas e com condutores e cargas iguais para cada fase do mesmo.

Neste trabalho, foi efetuada uma implementação computacional de um algoritmo multipartida aplicado ao problema de RSDEE e, na implementação do mesmo, foi desenvolvido um algoritmo multipartida com a capacidade de gerar topologias radiais na fase construtiva e, de modo sequencial, melhorar a qualidade dessas topologias por meio de um algoritmo de busca através da vizinhança. Este algoritmo foi desenvolvido de tal modo que seja evitada a análise de muitas soluções.

Assim sendo, deve-se observar que um dos principais problemas das meta-heurísticas aplicadas ao problema abordado em tal trabalho é a caracterização do espaço de busca, uma vez que elas necessitam de uma forma de codificação, ou seja, uma forma de se representar a proposta de solução. Efetuando essa representação, é possível calcular o valor da função objetivo de uma determinada proposta de solução resolvendo-se um fluxo de carga para sistemas radiais, que também permite verificar se ela é factível.

## **2.2 Formulação matemática**

Além disso, a formulação matemática do problema de RSDEE, com o objetivo de minimizar o custo das perdas de energia, levando em consideração vários níveis de demanda, configuração radial única e sistema simétrico e equilibrado, assume a seguinte forma:

$$v = \sum_{d \in \Omega_d} \sum_{ij \in \Omega_l} c_D^{ls} \Delta_d [G_{ij} x_{ij} (V_{i,d}^2 + V_{j,d}^2 - 2V_{i,d} V_{j,d} \cos \theta_{ij,d})] \quad (1)$$

Além disso, a função objetivo  $v$ , a qual representa o custo total das perdas ativas de energia no período de operação está sujeita às seguintes restrições, as quais podem ser representadas pelas equações de (2) a (7) e podem ser visualizadas na sequência.

$$P_{i,d}^S - P_{i,d}^D - \sum_{j \in \Omega_b} x_{ij} P_{ij,d} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (2)$$

$$Q_{i,d}^S - Q_{i,d}^D - \sum_{j \in \Omega_b} x_{ij} Q_{ij,d} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (3)$$

$$\underline{V} \leq V_{i,d} \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (4)$$

$$I_{r_{ij,d}}^2 + I_{m_{ij,d}}^2 < x_{ij} \bar{I}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (5)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} x_{ij} = nb - 1 \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (7)$$

Ademais, a seguir, pode-se visualizar o significado dos símbolos utilizados de (1) a (7).

Sendo que  $C_d^{ls}$  é o custo das perdas no nível de demanda  $d$ ,  $\Delta_d$  é o período de duração do nível de demanda  $d$ ,  $G_{ij}$  é a condutância do ramo  $ij$ ,  $x_{ij}$  representa o estado da chave do ramo  $ij$  e vale 1 se a chave estiver fechada e 0 em caso contrário,  $V_{i,d}$  é o módulo da tensão na barra  $i$ , no nível de demanda  $d$ ,  $\theta_{ij,d}$  é a diferença angular entre as tensões das barras  $i$  e  $j$ , no nível de demanda  $d$ ,  $P_{i,d}^S$  e  $Q_{i,d}^S$  representam as potências ativa e reativa fornecidas pela subestação na barra  $i$ , no nível de demanda  $d$ ,  $P_{i,d}^D$  e  $Q_{i,d}^D$  representam as demandas ativa e reativa na barra  $i$ , no nível de demanda  $d$ ,  $P_{ij,d}$  e  $Q_{ij,d}$  representam os fluxos de potência ativa e reativa pelo ramo  $ij$ , no nível de demanda  $d$ ,  $\underline{V}$  e  $\bar{V}$  representam os limites dos módulos de tensão inferior e superior nas barras do sistema elétrico,  $I_{r_{ij,d}}$  e  $I_{m_{ij,d}}$  representam as partes real e imaginária da corrente no ramo  $ij$ , no nível de demanda  $d$ ,  $\bar{I}_{ij}$  representa a corrente permitida no ramo  $ij$ ,  $nb$  é o número de barras do sistema de distribuição,  $\Omega_b$  é o conjunto de barras

do sistema de distribuição,  $\Omega_{b_i}$  é o conjunto de barras conectadas à barra  $i$ ,  $\Omega_l$  o conjunto de ramos do sistema e  $\Omega_d$  é o conjunto de níveis de demanda.

Adicionalmente, às restrições (2) e (3) correspondem ao balanço de potência ativa e reativa, respectivamente. Já a restrição (4) representa os limites de módulo de tensão nas barras e, para a restrição (5), a mesma corresponde à máxima corrente nos ramos. A restrição (6) é uma condição necessária para a radialidade do sistema e (7) indica a natureza binária da variável de decisão  $x_{ij}$ . Em relação a  $P_{ij,d}$ ,  $Q_{ij,d}$ ,  $I_{r_{ij,d}}$  e  $I_{m_{ij,d}}$ , pode-se calcular tais variáveis por meio das equações de (8) a (11) e que podem ser visualizadas a seguir:

$$P_{ij,d} = V_{i,d}^2 G_{ij} - V_{i,d} V_{j,d} (G_{ij} \cos \theta_{ij,d} + B_{ij} \sin \theta_{ij,d}) \quad (8)$$

$$Q_{ij,d} = -V_{i,d}^2 B_{ij} - V_{i,d} V_{j,d} (G_{ij} \sin \theta_{ij,d} - B_{ij} \cos \theta_{ij,d}) \quad (9)$$

$$I_{r_{ij,d}} = G_{ij} (V_{i,d} \cos \theta_{i,d} - V_{j,d} \cos \theta_{j,d}) - B_{ij} (V_{i,d} \sin \theta_{i,d} - V_{j,d} \sin \theta_{j,d}) \quad (10)$$

$$I_{m_{ij,d}} = G_{ij} (V_{i,d} \sin \theta_{i,d} - V_{j,d} \sin \theta_{j,d}) + B_{ij} (V_{i,d} \cos \theta_{i,d} - V_{j,d} \cos \theta_{j,d}) \quad (11)$$

Em relação a formulação do problema de RSDEE, o qual foi formulado por meio das equações de (1) até (11) é um modelo de programação não linear inteira mista, de difícil solução e com característica de apresentar uma explosão combinatória e um comportamento multimodal. Finalmente, um ponto que merece destaque neste problema é que, como a rede que deseja reconfigurar já está operando, a restrição (5) deve ser atendida pela topologia corrente

### 2.3 Revisão bibliográfica

Neste tópico será abordada uma visão geral dos principais trabalhos que abordam o problema de RSDEE. Adicionalmente, de um modo geral, a função objetivo dos mesmos é a redução de perdas, contudo, também existem trabalhos que têm como objetivo, por exemplo, a otimização do balanceamento de cargas. Na sequência, serão apresentados os métodos que foram utilizadas para a resolução do problema, a saber: os métodos heurísticos, as heurísticas modernas, isto é, as meta-heurísticas e, por fim, os métodos exatos.

### 2.3.1 Métodos heurísticos

Merlin e Back (1975) propuseram pela primeira vez, a alteração da topologia de uma rede de distribuição de tal forma que seja obtida uma configuração com redução de perdas no sistema de distribuição de energia elétrica. Nesse trabalho foi utilizado um modelo linearizado do fluxo de carga (FC) - modelo DC - e dois métodos para efetuar a redução das perdas. Para a primeira, tem-se um algoritmo heurístico construtivo (AHC) e, à segunda, tem-se um algoritmo de otimização clássica. O primeiro método consiste em fechar todas as chaves do sistema, tornando-o malhado e, na sequência, resolver um problema de fluxo de carga cujo objetivo é obter o fluxo de potência em cada ramo. Assim sendo, o ramo que apresenta menor fluxo de potência é o escolhido para ter a sua chave de interconexão aberta, pois segundo os autores, este ramo apresenta a menor mudança na distribuição de fluxo em relação a topologia malhada. Tal procedimento é efetuado até que um sistema radial seja encontrado.

Civanlar et al. (1988), propuseram um método de troca de ramos ou *branch exchange* para a RSDEE considerando a redução das perdas. O mesmo, partindo de uma configuração radial, efetua trocas entre um ramo conectado e um que está desconectado de tal forma que sempre seja mantida a radialidade, sendo que a variação das perdas resultantes da transferência de um grupo de cargas de um alimentador para o outro é estimada utilizando-se uma fórmula aproximada. Ademais, foi observado pelos autores que uma redução das perdas pode ser obtida somente se existe uma queda de tensão significativa sobre um ramo cuja chave está aberta e se a carga no lado com maior queda de tensão é transferida para o outro lado.

Shirmohammadi e Hong (1989), propuseram, para o problema de RSDEE com o objetivo de redução das perdas, um AHC que, ao partir de uma rede malhada, em cada etapa efetua o cálculo do padrão de fluxo ótimo, e, para isso, utilizou-se um fluxo de carga para redes fracamente malhadas e abrindo a chave do ramo cuja corrente seja mínima, e que mantém a rede conexa. Adicionalmente, o método também considera as restrições de nível de tensão nas barras e de correntes nos ramos, ou seja, se a abertura de uma chave leva a uma configuração em que ocorre uma violação do limite de tensão em uma barra ou da corrente em um ramo, esta chave deve ser fechada e a chave cujo ramo conduz o menor valor seguinte de corrente é aberta. Tal processo deve ser efetuado até que não exista mais violação das

restrições.

Goswami e Basu (1992) desenvolveram um AHC visando uma melhoria do trabalho dos autores Shirmohammadi e Hong, considerando a minimização de perdas, pois esta parte de uma rede malhada e em cada passo abre a chave de um ramo do sistema até que seja obtido um sistema radial. Assim, a proposta de Goswami e Basu, inicia-se com uma rede radial e fecha a chave de um ramo aberto, introduzindo uma malha no sistema, o qual volta para a configuração radial ao abrir a chave da malha que deixa a configuração da rede com perda mínima. Esse procedimento é realizado para todos os laços do sistema.

Gomes et al. (2006) modelaram a operação das chaves do sistema como funções contínuas e propuseram um fluxo de potência ótimo para a minimização de perdas. As chaves em todos os ramos estão, de modo inicial, fechadas e, a partir do resultado do fluxo de potência ótimo, uma técnica heurística é utilizada para determinar a próxima chave que será aberta e tal procedimento é repetido até que seja obtido um sistema radial.

Raju e Bijwe (2008), apresentaram uma abordagem de dois estágios para a minimização de perdas em sistemas de distribuição através da reconfiguração. O modelo proposto pelos autores utiliza sensibilidades no primeiro estágio, que parte de uma configuração malhada e em cada passo abre uma chave e, um procedimento de *branch exchange* no segundo estágio, para que seja melhorada a solução encontrada no primeiro estágio.

Ababei e Kavasserie (2011) apresentaram um algoritmo heurístico eficiente para o problema de RSDEE considerando uma redução das perdas com a utilização de um procedimento de *branch exchange*, baseado em problemas de fluxo máximo a custo mínimo. Ademais, é proposto um método para estimar as perdas em sistemas de distribuição radiais, o qual é baseado em uma técnica de caminhos aleatórios (*random walks*). Tal método é testado em vários sistemas, inclusive de grande porte e a performance da técnica é comparada com a do algoritmo de Baran e Wu, obtendo soluções melhores ou iguais e com um tempo de processamento menor.

Raut e Mishra (2017) apresentaram um algoritmo heurístico simples de troca de ramos com o objetivo de reduzir perdas e melhorar os perfis de tensão dos sistemas, sendo que em tal estratégia, é realizada, passo a passo, uma troca de *status*

dos ramos de um mesmo laço independente de um tal modo que seja direcionado para a melhor solução radial.

Jakus et al. (2020), efetuaram uma combinação dos algoritmos heurísticos de troca de ramos e o algoritmo de Kruskal para que seja gerada uma solução inicial eficiente e, na sequência, um algoritmo genético para buscar a melhor solução para o problema.

Assim sendo, pode-se concluir que a maioria dos trabalhos que utilizam heurísticas para resolver o problema de RSDEE se baseiam na técnica de *branch exchange*.

### 2.3.2 Meta-heurísticas

Chiang e Jean-Jumeau (1990) abordaram a reconfiguração de redes elétricas considerando tanto a redução de perdas quanto o balanceamento de cargas. Na formulação do problema, o número de operações de chaveamento é tratado como uma restrição. Para solucionar o problema, os autores utilizaram um método em dois estágios, baseado na meta-heurística de *simulated annealing* e no método  $\epsilon$ -restrição para otimização multiobjetivo. Além disso, dois métodos de cálculo de fluxo de carga foram empregados: o método de varredura e o rápido desacoplado.

Guimarães (2005) desenvolveu um algoritmo de busca tabu para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE), com os objetivos de aumentar a margem de segurança da rede em relação à estabilidade de tensão e minimizar as perdas. O método começa com uma configuração inicial viável ou uma configuração de boa qualidade obtida através do algoritmo de Shirmohammadi e Hong (1989). Observou-se que a utilização de uma solução inicial gerada pelo método heurístico resulta em soluções de melhor qualidade.

Zvietcovich (2006) desenvolveu dois algoritmos de busca em vizinhança variável: um VNS (variable neighborhood search) e um VND (variable neighborhood descent), visando a redução das perdas ativas no sistema. O processo de solução inicia-se com uma solução radial e explora a vizinhança das soluções utilizando estratégias de busca local baseadas em variações na configuração.

Zhang et al. (2007) propuseram um algoritmo de busca tabu melhorado com

operador de mutação do algoritmo genético para a minimização das perdas. O método utiliza uma equação de variação de perdas semelhante à proposta por Baran e Wu para reduzir o espaço de busca.

Carreño, Romero e Padilha-Feltrin (2008) propuseram um algoritmo genético de Chu-Beasley, que contém um operador de recombinação que garante a geração de apenas topologias radiais para o problema de minimização de perdas.

Wu e Tsai (2011) apresentaram uma técnica baseada na meta-heurística de otimização por enxame de partículas (PSO) com codificação inteira, para o problema de minimização das perdas através da reconfiguração.

Franco et al. (2012) apresentaram um algoritmo de busca tabu para redução de perdas no sistema. Essa implementação apresenta uma solução inicial gerada de modo aleatório utilizando o algoritmo de Prim. A função objetivo das soluções vizinhas da solução corrente, na busca tabu, é considerada utilizando a fórmula aproximada de Baran e Wu. Adicionalmente, é calculado o ponto de operação exato apenas para a melhor solução de uma vizinhança, tornando o método rápido.

Souza (2013) desenvolveu uma meta-heurística GRASP (*greedy randomized adaptive search procedures*) especializada, cujo objetivo é a redução de perdas ativas no sistema. Nesta proposta, inicialmente todas as chaves de interconexão do sistema de distribuição estão abertas e, a cada passo, é efetuado o fechamento de uma chave. A escolha da chave a ser fechada é feita de acordo com um índice de sensibilidade.

Possagnolo (2015) desenvolveu algoritmos baseados na meta-heurística de busca em vizinhança variável, considerando tanto uma demanda fixa quanto uma demanda variável, onde a função objetivo é a mitigação de perdas no sistema de distribuição. O autor desenvolveu quatro versões de heurísticas modernas: BVNS (*basic variable neighborhood search*), VND (*variable neighborhood descent*), RVNS (*reduced variable neighborhood search*) e GVNS (*general variable neighborhood search*).

Além disso, no próximo tópico será discutida a abordagem para a RSDEE utilizando métodos exatos para a resolução de um modelo aproximado ou relaxado do problema.

### 2.3.2 Métodos exatos

Em Glamocanin (1990), o problema de RSDEE é resolvido como um problema de transporte com custos quadráticos utilizando o método simplex. O objetivo é o de minimizar as perdas do sistema. Tal método obtém, de modo inicial, uma configuração radial por meio da linearização de perdas e efetua uma melhoria da solução utilizando o algoritmo citado.

Cabezas (2007) apresenta duas formulações para o problema de RDSEE, sendo que a primeira considera as cargas com um fator de potência individual e, na segunda, é efetuada uma compensação reativa nas barras que tiverem um valor de tensão menor que a estabelecida e, para melhorar o perfil de tensão nas barras, utiliza-se capacitores. Em tal método são desenvolvidos dois tipos de algoritmos, a saber: um algoritmo de busca em profundidade e um algoritmo em estrutura *branch and bound*.

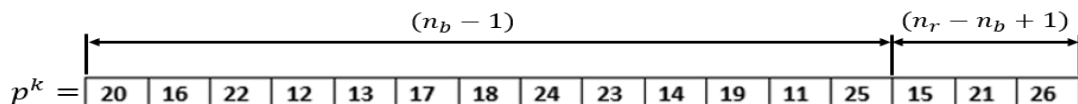
Borges, Franco e Rider (2013) apresentaram um modelo de PLIM (programação linear inteira mista) com restrições de cerca para o problema de RSDEE com objetivo de minimização de perdas. O método foi testado em sistemas de grande porte.

### 3. META-HEURÍSTICA DE MULTIPARTIDA PARA O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A meta-heurística multi-start (MMS) é uma abordagem robusta e eficiente para resolver problemas complexos de otimização. No trabalho, utilizou-se a mesma, sendo que ela tem a seguinte estratégia fundamental, ou seja, a mesma, de modo inicial, efetua uma fase de pré-processamento do problema a ser otimizado. Posteriormente, numa segunda etapa, faz a utilização de uma estratégia construtiva generalizada para que seja gerada uma solução de qualidade e, posteriormente, faz uma melhora do passo anterior efetuando uma busca local e, finalmente, em uma quarta etapa, armazena a solução da terceira etapa se tal solução for considerada de elite. Se o critério de parada for satisfeito, então o processo de parada é satisfeito indicando a incumbente como sendo a melhor solução encontrada, porém, em caso contrário, volta-se ao segundo passo.

Para que seja desenvolvido um algoritmo multi-partida para o problema de otimização da reconfiguração, deve-se primeiramente detalhar cada passo do algoritmo e idealizar uma proposta de solução. Por meio da Figura 1 pode-se visualizar a proposta de se representar uma proposta de solução do problema da reconfiguração para um sistema de  $n_r$  ramos e  $n_b$  barras. Além disso, os elementos desse vetor devem ser encontrados de forma construtiva. Deve-se observar na Figura 1 que os primeiros  $(n_b - 1)$  elementos fazem parte da topologia radial e os outros são desligados e, portanto, na proposta apresentada, os ramos 15, 21 e 26 estão desligados.

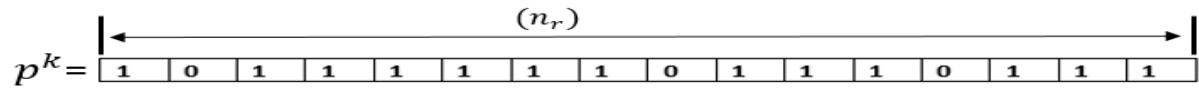
**Figura 1: Representação de uma proposta de solução.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Adicionalmente, existe uma outra forma de representação para a proposta de solução, isto é, é efetuado a representação em um vetor de tamanho  $n_r$ , conforme pode ser visualizado pela Figura 2. Nesta proposta, o elemento 1 indica que o ramo se encontra fechado e o elemento 0, indica que o mesmo está aberto.

**Figura 2: Proposta alternativa de representação de uma proposta de solução.**

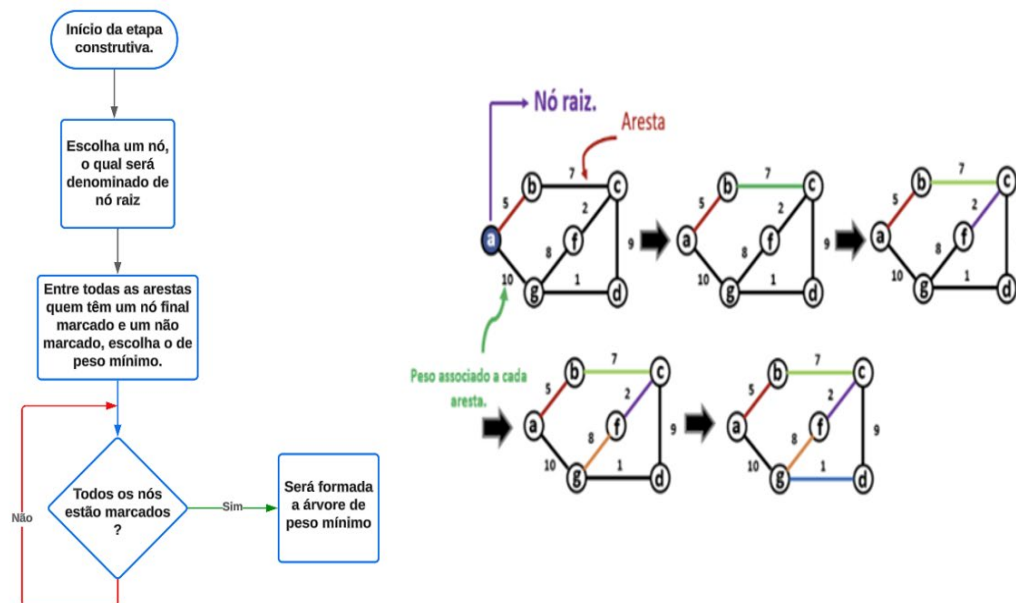


Fonte: Elaborado pelo autor.

No presente trabalho, o algoritmo MMS foi desenvolvido e a sua implementação consiste em três fases distintas, ou seja, a fase de pré-processamento, a fase construtiva e a fase de busca local. Na fase de pré-processamento, resolve-se o problema de fluxo de carga do sistema malhado e os valores de fluxo de potência aparente são utilizados para efetuar a classificação dos ramos sendo que para tal classificação existem três possibilidades, a saber: os ramos promissores, os ramos relevantes e os ramos não promissores.

Já na etapa construtiva, gera-se uma topologia radial de qualidade e cada topologia radial é gerada por meio da utilização do algoritmo de Prim. Conforme pode ser observado por meio da Figura 3.

**Figura 3: Fluxograma ilustrativo do algoritmo de Prim.**



Fonte: (Alves, 2019).

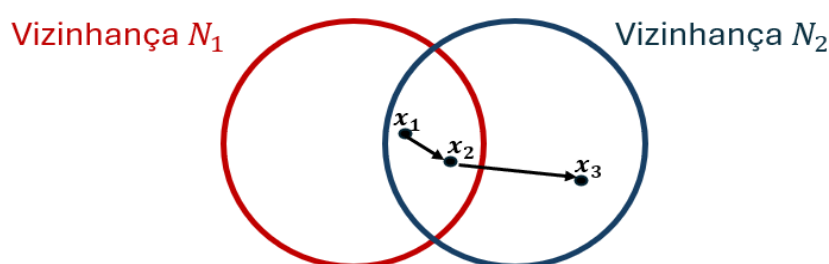
Os pesos para cada ramo são escolhidos de forma aleatória da seguinte forma: para os ramos considerados promissores o peso é escolhido no intervalo  $[1, 40]$ , para ramos relativamente promissores do intervalo de  $[30, 70]$  e para os ramos não promissores do intervalo de  $[60, 100]$ . Desta forma, o algoritmo de Prim gera uma topologia radial priorizando os ramos promissores. Adicionalmente, percebe-se que

ocorre uma sobreposição dos intervalos dos pesos e isso é uma estratégia a qual visa aumentar a flexibilidade e robustez da seleção de ramos o que, por consequência, garante uma topologia radial eficiente com menores perdas de potência. Ademais, tal estratégia permite que o algoritmo se adapte a diferentes condições e demandas da rede e até mesmo a possíveis falhas presentes na mesma e, desta forma, gera-se uma configuração diversificada e robusta a qual minimiza as perdas de energia e reduz a necessidade de operar múltiplas unidades de geração resultando em uma operação mais econômica

Após encontrar a topologia radial, resolve-se um problema de fluxo de carga radial para que sejam encontradas as perdas da topologia radial encontrada na fase construtiva.

Para a fase de busca local, foi implementada uma heurística de busca através de vizinhança simples, a qual apresenta uma vizinhança denominada de  $N_1$ , a qual fecha um ramo desligado e abre, em cada passo, um ramo que faz laço com o ramo desligado que foi fechado. Uma segunda vizinhança, a qual foi denominada  $N_2$ , abre e fecha dois ramos simultaneamente. Assim sendo, primeiro se encontra o melhor vizinho do tipo  $N_1$  e, posteriormente, o melhor do tipo  $N_2$  para que seja finalizada a fase de busca local. Tal procedimento pode ser visualizado pela Figura 4.

**Figura 4: Processo de busca pela vizinhança  $N_1$  e  $N_2$ .**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Adicionalmente, para cada proposta de solução fornecida pela meta-heurística MMS (ou seja, uma topologia radial), foi resolvido um problema de fluxo de carga para encontrar as perdas ativas dessa proposta de solução e verificar a factibilidade dela.

## 4. TESTES E RESULTADOS

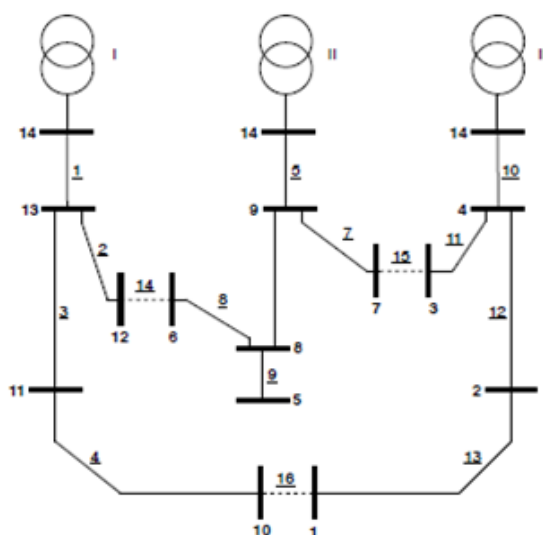
### 4.1 Implementação do algoritmo e sistemas testes

A MMS implementada foi testada em cinco sistemas diferentes: sistemas de 14, 33, 84, 136 e 415 barras. Esses testes visaram avaliar a eficácia e a robustez do método em sistemas de grande porte e tais resultados podem ser visualizados na sequência.

### 4.2 Resultados para o sistema de 14 barras

Primeiramente, para o sistema de 14 barras, o qual é apresentado em Civanlar et al. (1988), sabe-se que o mesmo apresenta uma subestação com uma tensão de 23,00 kV. Nele a barra 14 é a barra da subestação e as suas chaves 14, 15 e 16 encontram-se inicialmente abertas. Para representar a abertura das mesmas, elas são representadas por meio de linhas tracejadas, conforme pode ser visualizado por meio da Figura 5. Ademais, os dados complementares de tal sistema se encontram no Anexo A no subtópico A1.

**Figura 5 : Sistema de 14 barras.**



Fonte: Civanlar et al. (1988).

Assim, foi efetuada a simulação e, por meio da Tabela 1, pode-se visualizar os resultados obtidos, tanto para a configuração inicial, quanto para a obtida utilizando a MMS.

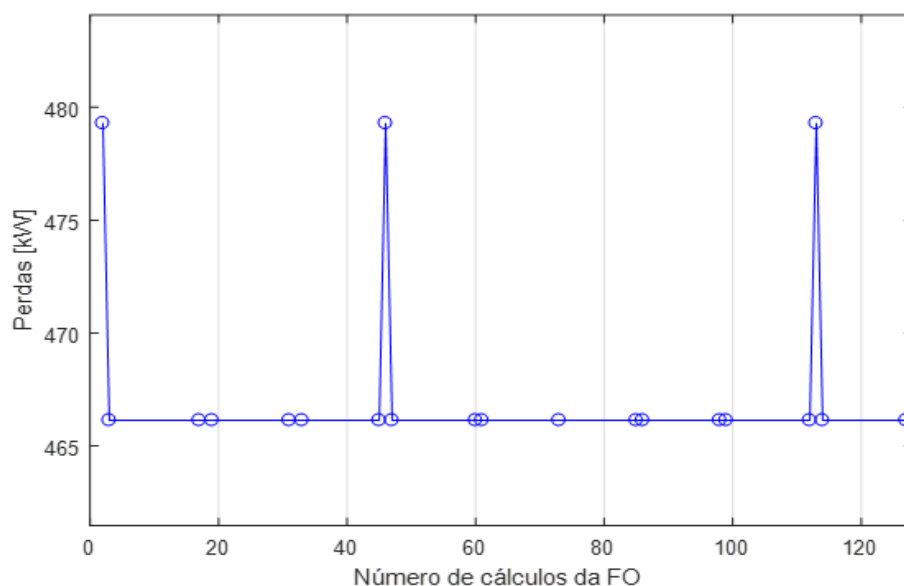
**Tabela 1: Resultados obtidos pelas heurísticas para o sistema de 14 barras considerando a demanda fixa.**

| Configuração | Circuitos abertos | Perdas [ kW] |
|--------------|-------------------|--------------|
| Inicial      | 14 15 16          | 511, 4356    |
| MMS          | 7 8 16            | 466.1267     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, na configuração inicial, foram registradas perdas de 511,4356 kW e uma tensão mínima de 0,9693 pu no sistema. Já na configuração fornecida pela MMS, as perdas foram reduzidas para 466,1267 kW, com uma tensão mínima de 0,9716 pu. Observe-se, portanto, que a variação da função objetivo em relação à configuração inicial foi de -8,8592%, indicando uma redução significativa de 8,8592. Além disso, a Figura 6 ilustra a evolução da MMS para o sistema de 14 barras, permitindo uma visualização clara das melhorias alcançadas.

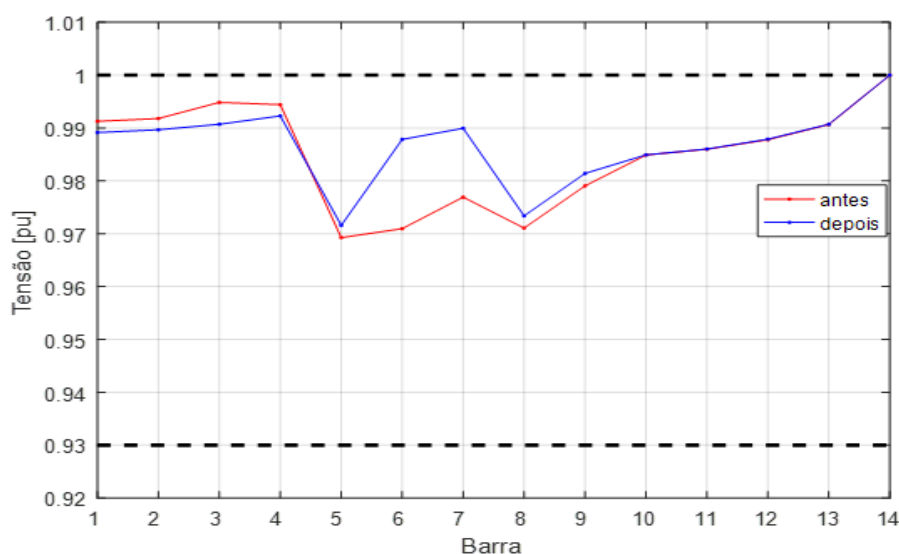
**Figura 6: Evolução da MMS para o sistema de 14 barras.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foi percebida uma melhora no perfil de tensão no sistema após a reconfiguração, conforme pode ser visualizado pela Figura 7.

**Figura 7: Perfis de tensão no sistema de 14 barras antes e depois da reconfiguração.**

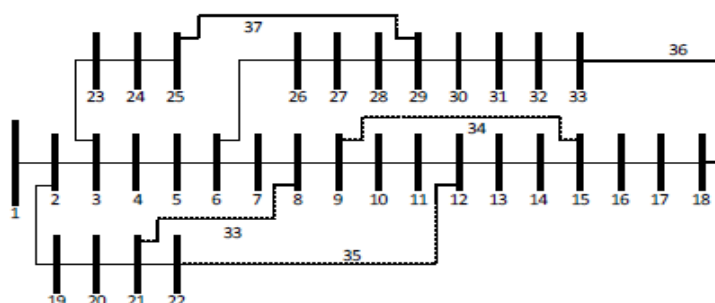


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Resultados para o sistema de 33 barras

O sistema de 33 barras, descrito no trabalho de Baran e Wu (1989), consiste em 32 barras de carga, uma subestação (barra 1) com tensão de 12,66 kV e 37 circuitos. Este sistema inclui 5 circuitos de ligação a saber: 33, 34, 35, 36 e 37, sendo que eles se encontram inicialmente abertos e são representados por linhas tracejadas. A configuração do sistema pode ser visualizada na Figura 8. Além disso, os dados complementares deste sistema estão disponíveis no Anexo A no subtópico A2.

**Figura 8: Sistema de 33 barras.**



Fonte: Baran e Wu (1989).

Assim, foi realizada a simulação e, por meio da Tabela 2, é possível visualizar os resultados obtidos tanto para a configuração inicial quanto para a configuração obtida utilizando a MMS.

**Tabela 2: Resultados obtidos pelas heurísticas para o sistema de 33 barras considerando a demanda fixa.**

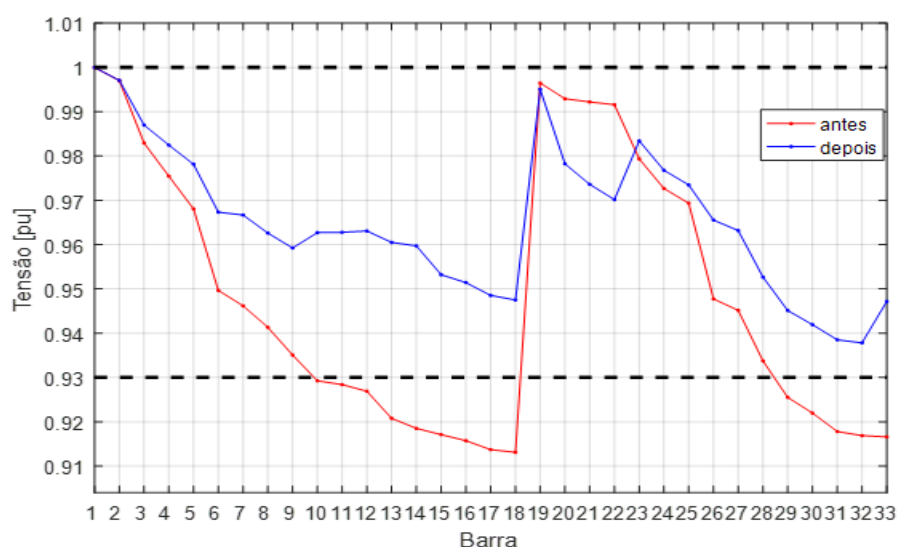
| Configuração | Circuitos abertos | Perdas [ kW] |
|--------------|-------------------|--------------|
| Inicial      | 33 34 35 36 37    | 202,6771     |
| MMS          | 7 9 14 32 37      | 139,5513     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, na configuração inicial, foram registradas perdas de 202,6771 kW e uma tensão mínima de 0,9131 pu no sistema. Com a configuração MMS, as perdas foram reduzidas para 139,5513 kW, com uma tensão mínima de 0,9378 pu. Observa-se, portanto, que a variação da função objetivo em relação à configuração inicial apresentou uma redução significativa de 31,1460%. Adicionalmente, as Figuras 9 e 10 permitem visualizar tanto a evolução da MMS para o sistema de 33 barras quanto os perfis de tensão nas barras, respectivamente.

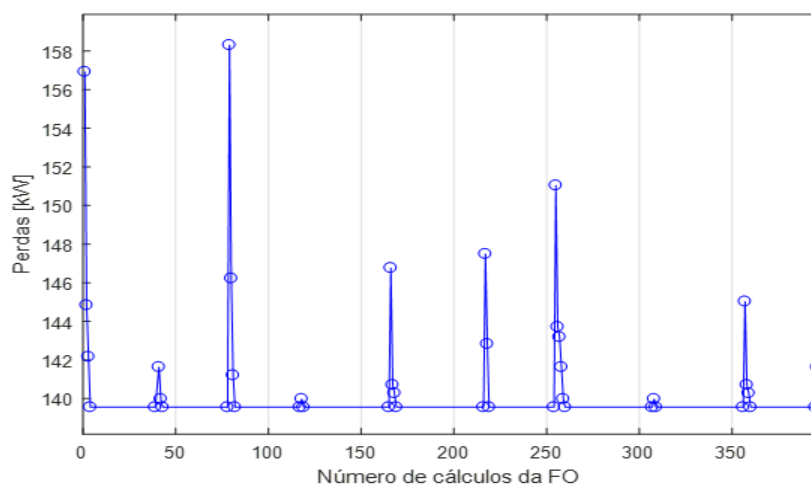
Além disso, antes da reconfiguração, estava ocorrendo uma violação do limite mínimo de tensão o que, após a reconfiguração, deixou de acontecer.

**Figura 9: Perfis de tensão no sistema de 33 barras antes e depois da reconfiguração.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 10: Evolução da MMS para o sistema de 33 barras.**

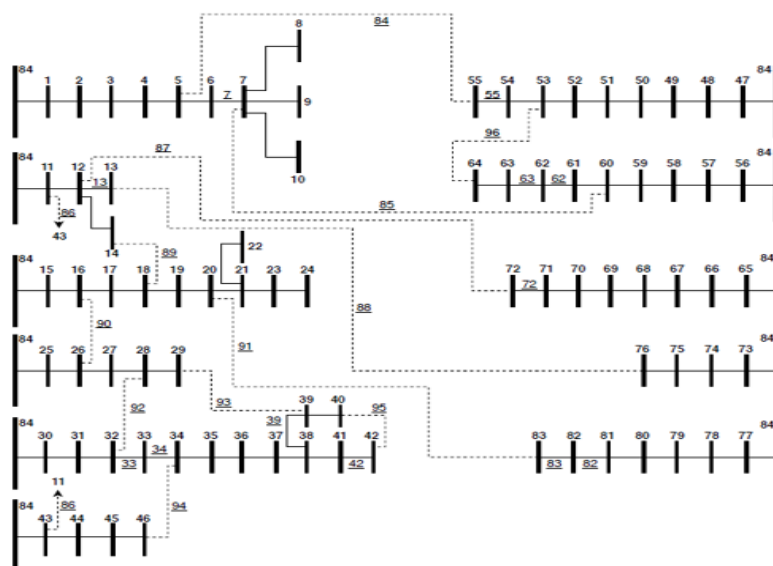


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Resultados para o sistema de 84 barras

O sistema de 84 barras é apresentado no trabalho de Chiou et al. (2005). O mesmo possui 83 barras de carga, uma subestação (sendo que sua tensão é de 11,40 kV e a barra da subestação é a 84) e 96 circuitos, além disso, o mesmo apresenta treze circuitos de ligação sendo que os circuitos 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96 se encontram inicialmente abertos e são representados por meio de linhas tracejadas. Tal sistema pode ser visualizado por meio da Figura 11. Ademais, os dados complementares de tal sistema se encontram no Anexo A no subtópico A3.

**Figura 11: Sistema de 84 barras.**



Fonte: Chiou et al (2005).

Assim, foi efetuada a simulação e, por meio da Tabela 3, pode-se visualizar os resultados obtidos tanto para a configuração inicial quanto para a obtida utilizando a MMS.

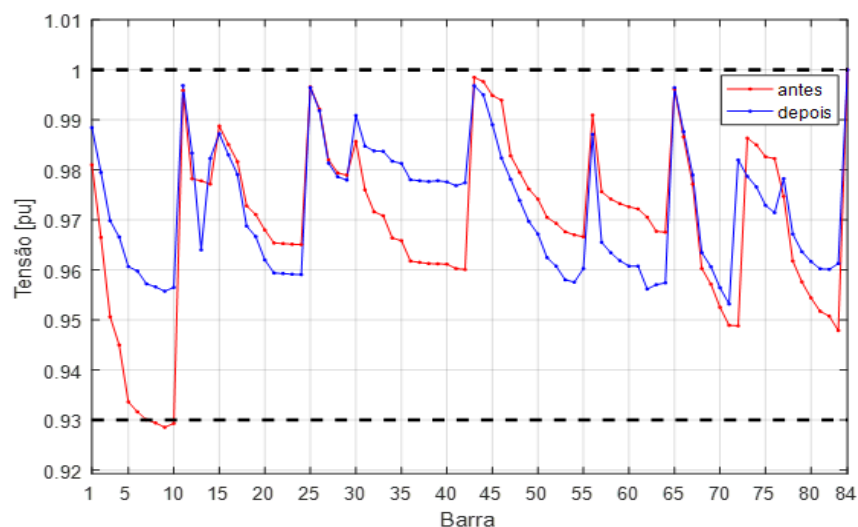
**Tabela 3: Resultados obtidos pelas heurísticas para o sistema de 84 barras considerando a demanda fixa.**

| Configuração | Circuitos abertos                         | Perdas [ kW] |
|--------------|-------------------------------------------|--------------|
| Inicial      | 84 85 86 87 88 89 90 91<br>92 93 94 95 96 | 531,9975     |
| MMS          | 7 13 34 39 42 55 62 72<br>83 86 89 90 92  | 469,8799     |

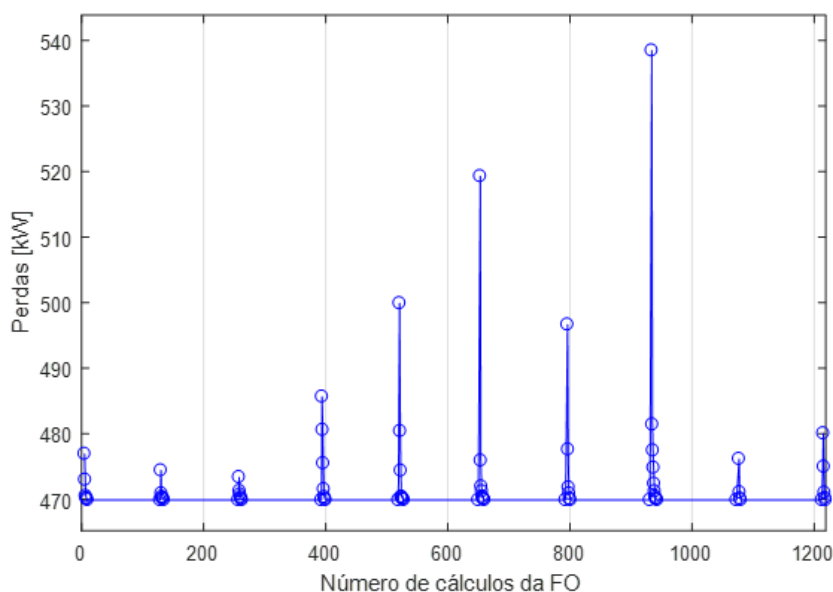
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim sendo, na configuração inicial, foram registradas perdas de 531,9975 kW e uma tensão mínima de 0,9285 pu no sistema. Com a configuração MMS, as perdas foram reduzidas para 469,8799 kW, e a tensão mínima aumentou para 0,9532 pu. Observa-se, portanto, que a variação da função objetivo em relação à configuração gerou uma redução de 11,6763%. Adicionalmente, as Figuras 12 e 13 permitem visualizar, respectivamente, a evolução da MMS para o sistema de 33 barras e os perfis de tensão nas barras.

**Figura 12: Perfis de tensão no sistema de 84 barras antes e depois da reconfiguração.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 13: Evolução da MMS para o sistema de 84 barras**

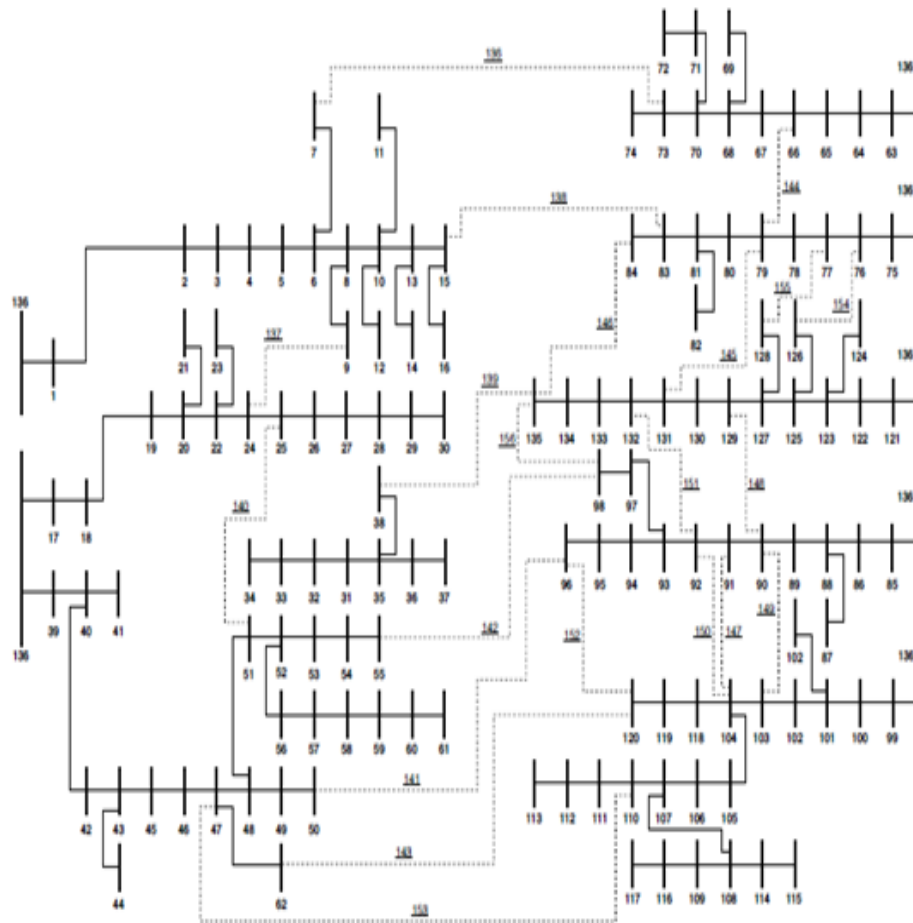
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 Resultados para o sistema de 136 barras

O sistema de 136 barras é apresentado em Mantovani et al. (2000). O mesmo possui 135 barras de carga, duas barras de subestação (cuja tensão é de 13,80 kV) e 156 circuitos. Além disso, o mesmo apresenta 21 circuitos de ligação sendo que os circuitos 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156 se encontram inicialmente abertos e são representados por meio de linhas tracejadas. Tal sistema pode ser visualizado por meio da Figura 14. Ademais, os dados complementares de tal sistema se encontram no Anexo A no subtópico A4. Assim, foi efetuada a simulação e, por meio da Tabela 4, pode-se visualizar os resultados obtidos tanto para a configuração inicial quanto para a obtida utilizando a MMS.

Assim sendo, na configuração inicial, foram registradas perdas de 320,3644 kW e uma tensão mínima de 0,9307 pu no sistema. Com a configuração MMS, as perdas foram reduzidas para 280,3776 kW, e a tensão mínima aumentou para 0,9599 pu. Observa-se, portanto, que houve variação da função objetivo em relação à configuração inicial, resultando em uma redução de 12,4817%. Adicionalmente, as Figuras 15 e 16 mostram, respectivamente, a evolução da MMS para o sistema de 136 barras e os perfis de tensão nas barras, permitindo uma visualização clara das melhorias alcançadas.

**Figura 14: Sistema de 136 barras.**



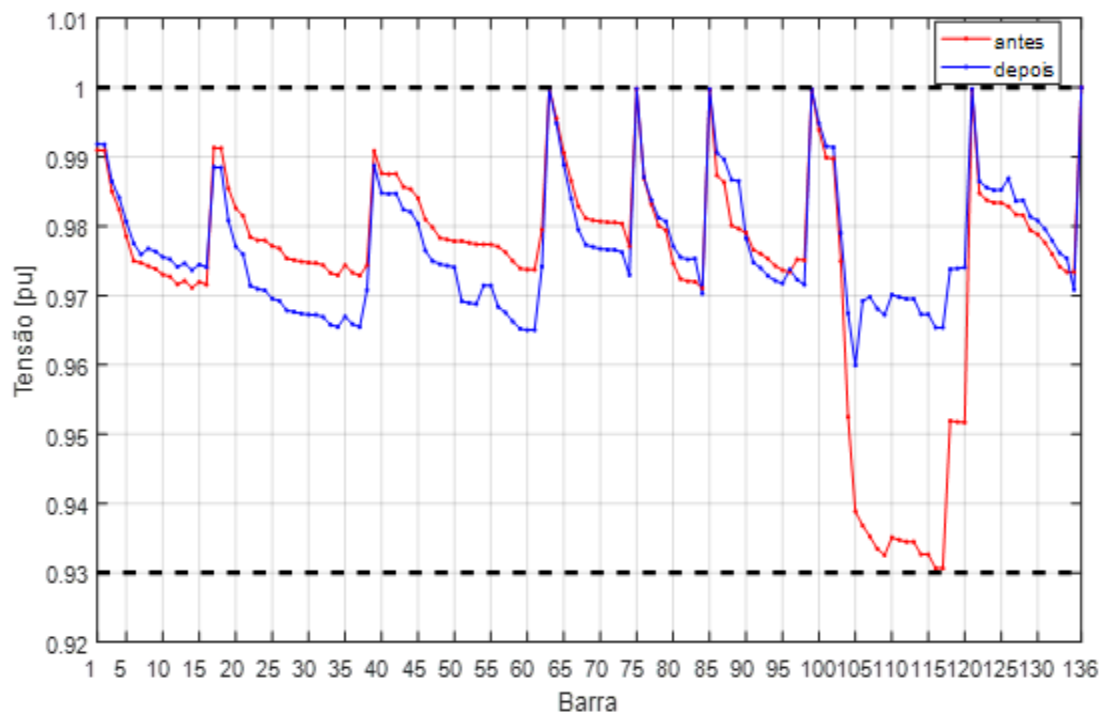
Fonte: Mantovani et al. (2000).

**Tabela 4: Resultados obtidos pelas heurísticas para o sistema de 136 barras considerando a demanda fixa.**

| <b>Configuração</b> | <b>Circuitos abertos</b>                                                                        | <b>Perdas [ kW]</b> |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Inicial</b>      | 136 137 138 139 140<br>141 142 143 144 145<br>146 147 148 149 150<br>151 152 153 154 155<br>156 | 320,3644            |
| <b>MMS</b>          | 7 38 51 54 84 90 96 106<br>118 126 137 138 141<br>144 145 146 147 148<br>150 151 155 156        | 280,3776            |

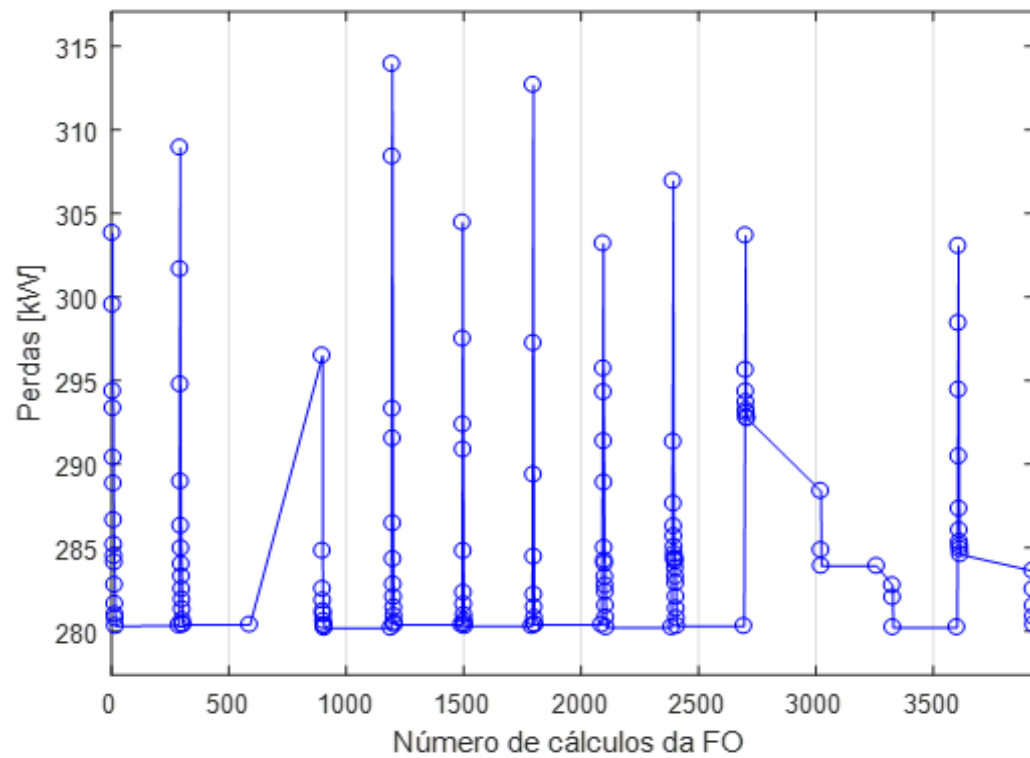
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 15: Perfis de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da reconfiguração.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 16: Evolução da MMS para o sistema de 136 barras**



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 Resultados para o sistema de 415 barras

O sistema de 415 é apresentado em Bernal-Agustín (1998). O mesmo possui 414 barras de carga, três barras de subestação (cuja tensão é de 10,00 kV) e 473 circuitos. Além disso, o mesmo apresenta 59 circuitos de ligação sendo que os circuitos 1, 5, 15, 16, 26, 31, 53, 54, 55, 75, 82, 94, 96, 97, 106, 107, 119, 136, 138, 154, 156, 168, 169, 177, 179, 194, 201, 207, 211, 214, 219, 241, 256, 258, 282, 297, 302, 314, 321, 354, 359, 362, 364, 385, 388, 395, 396, 404, 407, 423, 424, 426, 431, 436, 445, 446, 449, se encontram inicialmente abertos e são representados por meio de linhas tracejadas.

**Tabela 5 : Resultados obtidos pelas heurísticas para o sistema de 415 barras considerando a demanda fixa.**

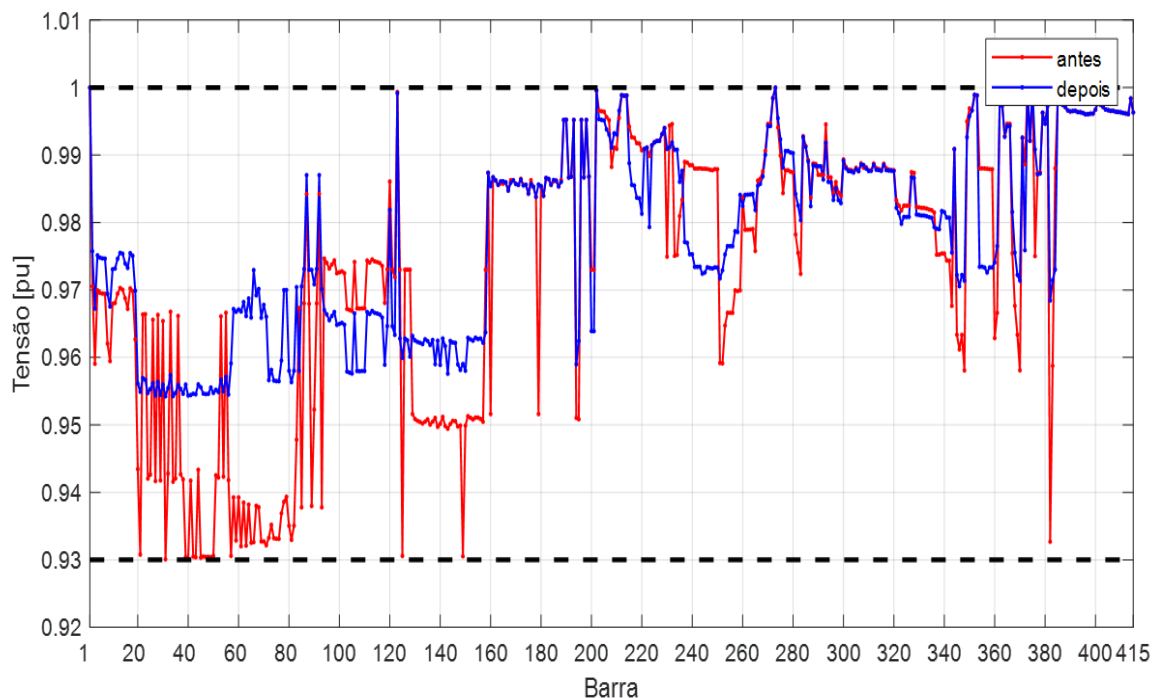
| <b>Configuração</b> | <b>Circuitos abertos</b>                                                                                                                                                                                                                               | <b>Perdas [ kW]</b> |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Inicial</b>      | 1 5 15 16 26 31 53<br>54 55 75 82 94 96 97 106<br>107 119 136 138 154<br>156 168 169 177 179<br>194 201 207 211 214<br>219 241 256 258 282<br>297 302 314 321 354<br>359 362 364 385 388<br>395 396 404 407 423<br>424 426 431 436 445<br>446 449      | 708,9417            |
| <b>MMS</b>          | 1 2 13 15 16 26 31 40<br>41 54 59 73 75 82 94 96<br>97 107 119 136 138 150<br>155 156 158 163 168<br>169 178 179 191 195<br>209 214 230 254 256<br>270 294 314 317 325<br>358 362 385 389 392<br>395 403 404 423 424<br>426 433 436 439 446<br>449 466 | 583,4754            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

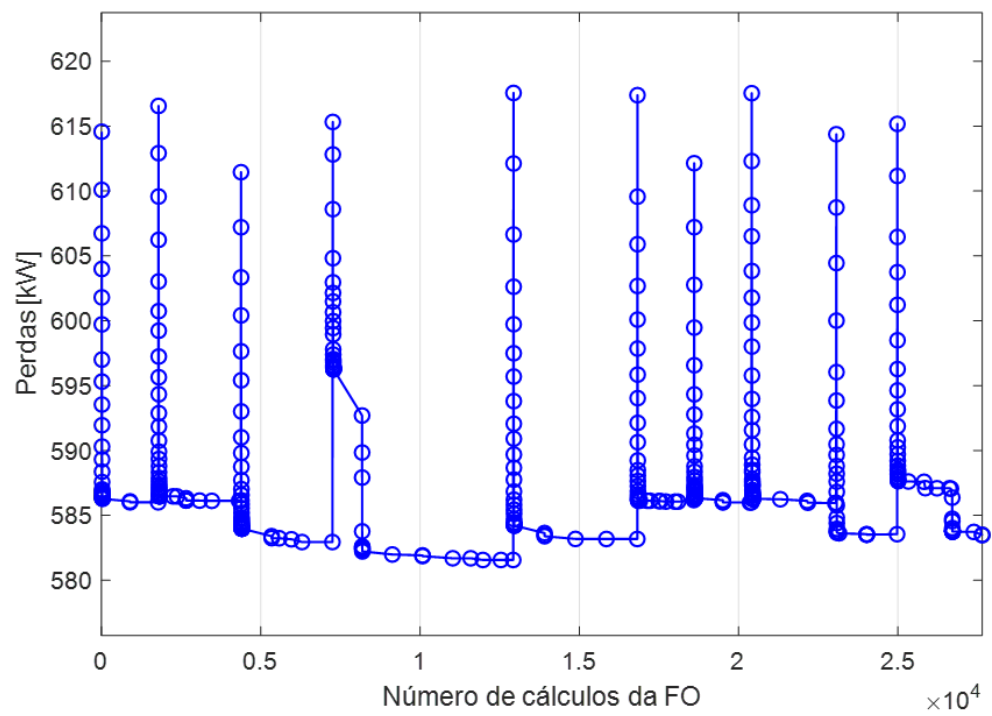
Ademais, os dados complementares de tal sistema se encontram em Bernal-Agustín (1998) Assim, foi efetuada a simulação e, por meio da Tabela 5, pode-se visualizar os resultados obtidos tanto para a configuração inicial quanto para a obtida utilizando a MMS.

Assim sendo, na configuração inicial, foram registradas perdas de 708,9417 kW e uma tensão mínima de 0,9301 pu no sistema. Com a configuração MMS, as perdas foram reduzidas para 583,4754 kW, e a tensão mínima aumentou para 0,9542 pu. Observa-se, portanto, que houve variação da função objetivo em relação à configuração inicial, resultando em uma redução de 17,6977 %. Adicionalmente, as Figuras 17 e 18 mostram, respectivamente, a evolução da MMS para o sistema de 415 barras e os perfis de tensão nas barras, permitindo uma visualização clara das melhorias alcançadas.

**Figura 17: Perfis de tensão no sistema de 415 barras antes e depois da reconfiguração.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 18: Evolução da MMS para o sistema de 415 barras**

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo, tanto a análise teórica quanto a implementação computacional de um algoritmo do tipo multipartida aplicado ao problema da reconfiguração de alimentadores primários em sistemas de distribuição de energia elétrica. Adicionalmente, efetuou-se testes computacionais para o algoritmo desenvolvido para cinco sistemas presentes na literatura especializada, ou seja, para os sistemas de 14, 33, 84, 136 e 415 barras.

Efetuiu-se os testes por meio da solução inicial e após a aplicação da MMS para cada um dos sistemas e, percebeu-se que ocorreu uma redução das perdas de potência do sistema.

Desta forma, para o sistema de 14 barras, na configuração inicial, ou seja, com os circuitos 14, 15 e 16 abertos, obteve-se perdas de 511,4356 kW e, na configuração fornecida pela MMS, com os circuitos 7, 8 e 16 abertos, obteve-se perdas de 466,1267 kW.

Já para o sistema de 33 barras, na configuração inicial, ou seja, com os circuitos 33, 34, 35, 36 e 37 abertos, obteve-se perdas de 202,6771 kW e, na configuração fornecida pelo MMS, com os circuitos 7, 9, 14, 32 e 37 abertos, obteve-se perdas de 139,5513 kW.

Já para o sistema de 84 barras, na configuração inicial, ou seja, com os circuitos 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96 abertos, obteve-se perdas de 531,9975 kW e, na configuração fornecida pelo MMS, com os circuitos 7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90 e 92 abertos, obteve-se perdas de 466,8799 kW.

Já para o sistema de 136 barras, na configuração inicial, ou seja, com os circuitos 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156 abertos, obteve-se perdas de 202,6771 kW e, na configuração fornecida pelo MMS, com os circuitos 7, 38, 51, 54, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155, 156 abertos, obteve-se perdas de 466,1267 kW.

Já para o sistema de 415 barras, na configuração inicial, ou seja, com os circuitos 1, 5, 15, 16, 26, 31, 53, 54, 55, 75, 82, 94, 96, 97, 106, 107, 119, 136, 138, 154, 156, 168, 169, 177, 179, 194, 201, 207, 211, 214, 219, 241, 256, 258, 282, 297, 302, 314, 321, 354, 359

362 364 385 388 395 396 404 407 423 424 426 431 436 445 446 449 abertos, obteve-se perdas de 708,9417 kW e, na configuração fornecida pelo MMS, com os circuitos 1 2 13 15 16 26 31 40 41 54 59 73 75 82 94 96 97 107 119 136 138 150 155 156 158 163 168 169 178 179 191 195 209 214 230 254 256 270 294 314 317 325 358 362 385 389 392 395 403 404 423 424 426 433 436 439 446 449 466 abertos, obteve-se perdas de 583,4754 kW.

Adicionalmente, a proposta deste trabalho pode ainda ser ampliada e testada para outros sistemas, por exemplo, para o sistema 10477 barras. Além disso, também podem ser desenvolvidas análises adicionais, as quais levam em conta demanda variável.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABABEI, C.; KAVASSERI, R. Efficient network reconfiguration using minimum cost maximum flow-based branch exchanges and random walks-based loss estimations. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 26, n. 1, p. 30-37, 2011.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 4, n. 2, p. 1401- 1407, 1989.
- BORGES, M. C. O; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J. Optimal reconfiguration of electrical distribution systems using mathematical programming. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Heidelberg, v. 1, n. 2, p. 1-9, 2013.
- BERNAL-AGUSTIN, J. L. Application of genetic algorithms to the optimal design of power distribution systems. 1998. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - University of Zaragoza, Zaragoza, 1998.
- BRUNA. P. Alves: Busca Tabu reformulada aplicada ao problema de operação de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais, dissertação de mestrado, UNESP, 2019.
- CARREÑO, E. M.; ROMERO, R.; PADILHA-FELTRIN, A. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 23, n. 4, p. 1542-1551, 2008.
- CHIANG, H.-D.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 1: a new formulation and a solution methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 5, n. 4, p. 1902-1909, 1990a.
- FRANCO, J.; LAVORATO, M.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. An efficient implementation of tabu search in feeder reconfiguration of distribution systems. In: *IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING*, 15., 2012, San Diego. Proceedings... San Diego: PESGM, 2012. p. 1-8.
- GLAMOCANIN, V. Optimal loss reduction of distributed networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 774–782, 1990.
- GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 7,

n. 3, p. 1484-1491, 1992.

GOMES, F. V.; CARNEIRO JÚNIOR, S.; PEREIRA, J. L. R.; VINAGRE, M. P.; GARCIA, P. A. N.; ARAUJO, L. R. A new distribution system reconfiguration approach using optimum power flow and sensitivity analysis for loss reduction. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 21, n. 4, p. 1616-1623, 2006.

GUIMARÃES, M. A. N. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de busca tabu. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO, R. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. SBA Controle e Automação, Heidelberg, v. 11, n. 3, p. 150-159, 2000.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, 5., 1975, Cambridge. Proceedings... Zurich: PSCC, 1975. p. 1-18.

POSSAGNOLO, L. H. F. M. Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015.

RAJU, G. K. V.; BIJWE, P. R. An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 23, n. 3, p. 1280-1287, 2008

SHIRMOHAMMADI, D.HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE, v. 4, n. 2, p. 1492–1498, 1989.

SOUZA, S. S. F. d. Algoritmo grasp especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2013.

WU, W.-C.TSAI, M.-S. Application of enhanced integer coded particle swarm optimization for distribution system feeder reconfiguration. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 26, n. 3, p. 1591-1599, 2011.

ZHANG, D.; FU, Z.; ZHANG, L. An improved TS algorithm for loss-minimum

reconfiguration in large-scale distribution systems. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 77, p. 685-694, 2007.

ZVIETCOVICH, W. G. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2006.

## 7. ANEXO A- DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS

### A.1 Dados para o sistema de 14 barras

Para o sistema de 14 barras, tem-se os seguintes dados, os quais podem ser visualizados na Tabela 6.

**Tabela 6: Dados para o sistema de 14 barras**

| Dados dos ramos |               |             |                 |               | Dados das barras |                    |                        |
|-----------------|---------------|-------------|-----------------|---------------|------------------|--------------------|------------------------|
| Número do ramo  | Barra inicial | Barra final | Resistência [%] | Reatância [%] | Número da barra  | Demanda Ativa [kW] | Demanda Reativa [kVAr] |
| 1               | 14            | 13          | 7,5000          | 10,0000       | 1                | 2100,00            | -800,00                |
| 2               | 13            | 12          | 8,0000          | 11,0000       | 2                | 1000,00            | 900,00                 |
| 3               | 13            | 11          | 9,0000          | 18,0000       | 3                | 1000,00            | -1100,00               |
| 4               | 11            | 10          | 4,0000          | 4,0000        | 4                | 1000,00            | 900,00                 |
| 5               | 14            | 9           | 11,0000         | 11,0000       | 5                | 4500,00            | -1700,00               |
| 6               | 9             | 8           | 8,0000          | 11,0000       | 6                | 600,00             | -500,00                |
| 7               | 9             | 7           | 11,0000         | 11,0000       | 7                | 1000,00            | 900,00                 |
| 8               | 8             | 6           | 11,0000         | 11,0000       | 8                | 5000,00            | 1800,00                |
| 9               | 8             | 5           | 8,0000          | 11,0000       | 9                | 4000,00            | 2700,00                |
| 10              | 14            | 4           | 11,0000         | 11,0000       | 10               | 1500,00            | 1200,00                |
| 11              | 4             | 3           | 9,0000          | 12,0000       | 11               | 2000,00            | -400,00                |
| 12              | 4             | 2           | 8,0000          | 11,0000       | 12               | 3000,00            | 400,00                 |
| 13              | 2             | 1           | 4,0000          | 4,0000        | 13               | 2000,00            | 1600,00                |
| 14              | 12            | 6           | 4,0000          | 4,0000        | 14               | 0,00               | 0,00                   |
| 15              | 7             | 3           | 4,0000          | 4,0000        |                  |                    |                        |
| 16              | 10            | 1           | 9,0000          | 12,0000       |                  |                    |                        |

Fonte: Civanlar et al. (1988).

### A.2 Dados para o sistema de 33 barras

Para o sistema de 33 barras, tem-se os seguintes dados, os quais podem ser visualizados na Tabela 7.

**Tabela 7: Dados para o sistema de 33 barras**

| Dados dos ramos |               |             |                          |                        | Dados das barras |                    |                        |
|-----------------|---------------|-------------|--------------------------|------------------------|------------------|--------------------|------------------------|
| Número do ramo  | Barra inicial | Barra final | Resistência [ $\Omega$ ] | Reatância [ $\Omega$ ] | Número da barra  | Demanda Ativa [kW] | Demanda Reativa [kVAr] |
| 1               | 1             | 2           | 0,0922                   | 0,0470                 | 1                | 0,00               | 0,00                   |
| 2               | 2             | 3           | 0,4930                   | 0,2511                 | 2                | 100,00             | 60,00                  |
| 3               | 3             | 4           | 0,3660                   | 0,1864                 | 3                | 90,00              | 40,00                  |
| 4               | 4             | 5           | 0,3811                   | 0,1941                 | 4                | 120,00             | 80,00                  |
| 5               | 5             | 6           | 0,8190                   | 0,7070                 | 5                | 60,00              | 30,00                  |
| 6               | 6             | 7           | 0,1872                   | 0,6188                 | 6                | 60,00              | 20,00                  |
| 7               | 7             | 8           | 0,7114                   | 0,2351                 | 7                | 200,00             | 100,00                 |
| 8               | 8             | 9           | 1,0300                   | 0,7400                 | 8                | 200,00             | 100,00                 |
| 9               | 9             | 10          | 1,0440                   | 0,7400                 | 9                | 60,00              | 20,00                  |
| 10              | 10            | 11          | 0,1966                   | 0,0650                 | 10               | 60,00              | 20,00                  |
| 11              | 11            | 12          | 0,3744                   | 0,1238                 | 11               | 45,00              | 30,00                  |
| 12              | 12            | 13          | 1,4680                   | 1,1550                 | 12               | 60,00              | 35,00                  |
| 13              | 13            | 14          | 0,5416                   | 0,7129                 | 13               | 60,00              | 35,00                  |
| 14              | 14            | 15          | 0,5910                   | 0,5260                 | 14               | 120,00             | 80,00                  |
| 15              | 15            | 16          | 0,7463                   | 0,5450                 | 15               | 60,00              | 10,00                  |
| 16              | 16            | 17          | 1,2890                   | 1,7210                 | 16               | 60,00              | 20,00                  |
| 17              | 17            | 18          | 0,7320                   | 0,5740                 | 17               | 60,00              | 20,00                  |
| 18              | 2             | 19          | 0,1640                   | 0,1565                 | 18               | 90,00              | 40,00                  |
| 19              | 19            | 20          | 1,5042                   | 1,3554                 | 19               | 90,00              | 40,00                  |
| 20              | 20            | 21          | 0,4095                   | 0,4784                 | 20               | 90,00              | 40,00                  |
| 21              | 21            | 22          | 0,7089                   | 0,9373                 | 21               | 90,00              | 40,00                  |
| 22              | 3             | 23          | 0,4512                   | 0,3083                 | 22               | 90,00              | 40,00                  |

|    |    |    |        |        |    |        |        |
|----|----|----|--------|--------|----|--------|--------|
| 23 | 23 | 24 | 0,8980 | 0,7091 | 23 | 90,00  | 50,00  |
| 24 | 24 | 25 | 0,8960 | 0,7011 | 24 | 420,00 | 200,00 |
| 25 | 6  | 26 | 0,2030 | 0,1034 | 25 | 420,00 | 200,00 |
| 26 | 26 | 27 | 0,2842 | 0,1447 | 26 | 60,00  | 25,00  |
| 27 | 27 | 28 | 1,0590 | 0,9337 | 27 | 60,00  | 25,00  |
| 28 | 28 | 29 | 0,8042 | 0,7006 | 28 | 60,00  | 20,00  |
| 29 | 29 | 30 | 0,5072 | 0,2585 | 29 | 120,00 | 70,00  |
| 30 | 30 | 31 | 0,9744 | 0,9630 | 30 | 200,00 | 600,00 |
| 31 | 31 | 32 | 0,3105 | 0,3619 | 31 | 150,00 | 70,00  |
| 32 | 32 | 33 | 0,3410 | 0,5302 | 32 | 210,00 | 100,00 |
| 33 | 8  | 21 | 2,0000 | 2,0000 | 33 | 60,00  | 40,00  |
| 34 | 9  | 15 | 2,0000 | 2,0000 |    |        |        |
| 35 | 12 | 22 | 2,0000 | 2,0000 |    |        |        |
| 36 | 18 | 33 | 0,5000 | 0,5000 |    |        |        |
| 37 | 25 | 29 | 0,5000 | 0,5000 |    |        |        |

Fonte: Baran e Wu (1989).

### A.3 Resultados para o sistema de 84 barras

Para o sistema de 84 barras, tem-se os seguintes dados, os quais podem ser visualizados na Tabela 8.

**Tabela 8: Dados para o sistema de 84 barras**

| Dados dos ramos |               |             |                          |                        | Dados das barras |                    |                        |
|-----------------|---------------|-------------|--------------------------|------------------------|------------------|--------------------|------------------------|
| Número do ramo  | Barra inicial | Barra final | Resistência [ $\Omega$ ] | Reatância [ $\Omega$ ] | Número da barra  | Demanda Ativa [kW] | Demanda Reativa [kVAr] |
| 1               | 1             | 84          | 0,1944                   | ,06624                 | 1                | 0,00               | 0,00                   |
| 2               | 1             | 2           | 0,2096                   | 0,4304                 | 2                | 100,00             | 50,00                  |
| 3               | 2             | 3           | 0,2358                   | 0,4842                 | 3                | 300,00             | 200,00                 |

|    |    |    |        |        |    |         |         |
|----|----|----|--------|--------|----|---------|---------|
| 4  | 3  | 4  | 0,0917 | 0,1883 | 4  | 350,00  | 250,00  |
| 5  | 4  | 5  | 0,2096 | 0,4304 | 5  | 220,00  | 100,00  |
| 6  | 5  | 6  | 0,0393 | 0,0807 | 6  | 1100,00 | 800,00  |
| 7  | 6  | 7  | 0,0405 | 0,1380 | 7  | 400,00  | 320,00  |
| 8  | 7  | 8  | 0,1048 | 0,2152 | 8  | 300,00  | 200,00  |
| 9  | 7  | 9  | 0,2358 | 0,4842 | 9  | 300,00  | 230,00  |
| 10 | 7  | 10 | 0,1048 | 0,2152 | 10 | 300,00  | 260,00  |
| 11 | 11 | 84 | 0,0786 | 0,1614 | 11 | 0,90    | 0,00    |
| 12 | 11 | 12 | 0,3406 | 0,6944 | 12 | 1200,00 | 800,00  |
| 13 | 12 | 13 | 0,0262 | 0,0538 | 13 | 800,00  | 600,00  |
| 14 | 12 | 14 | 0,0786 | 0,1614 | 14 | 700,00  | 500,00  |
| 15 | 15 | 84 | 0,1134 | 0,3864 | 15 | 0,00    | 0,00    |
| 16 | 15 | 16 | 0,0524 | 0,1076 | 16 | 300,00  | 150,00  |
| 17 | 16 | 17 | 0,0524 | 0,1076 | 17 | 500,00  | 350,00  |
| 18 | 17 | 18 | 0,1572 | 0,3228 | 18 | 700,00  | 400,00  |
| 19 | 18 | 19 | 0,0393 | 0,0807 | 19 | 1200,00 | 1000,00 |
| 20 | 19 | 20 | 0,1703 | 0,3497 | 20 | 300,00  | 300,00  |
| 21 | 20 | 21 | 0,2358 | 0,4842 | 21 | 400,00  | 350,00  |
| 22 | 21 | 22 | 0,1572 | 0,3228 | 22 | 50,00   | 20,00   |
| 23 | 21 | 23 | 0,1965 | 0,4035 | 23 | 50,00   | 20,00   |
| 24 | 23 | 24 | 0,1310 | 0,2690 | 24 | 50,00   | 10,00   |
| 25 | 25 | 84 | 0,0567 | 0,1932 | 25 | 50,00   | 30,00   |
| 26 | 25 | 26 | 0,1048 | 0,2152 | 26 | 100,00  | 60,00   |
| 27 | 26 | 27 | 0,2489 | 0,5111 | 27 | 100,00  | 70,00   |
| 28 | 27 | 28 | 0,0486 | 0,1656 | 28 | 1800,00 | 1300,00 |
| 29 | 28 | 29 | 0,1310 | 0,2690 | 29 | 200,00  | 120,00  |
| 30 | 30 | 84 | 0,1965 | 0,3960 | 30 | 0,00    | 0,00    |
| 31 | 30 | 31 | 0,1310 | 0,2690 | 31 | 1800,00 | 1600,00 |

|    |    |    |        |        |    |        |        |
|----|----|----|--------|--------|----|--------|--------|
| 32 | 31 | 32 | 0,1310 | 0,2690 | 32 | 200,00 | 150,00 |
| 33 | 32 | 33 | 0,0262 | 0,0538 | 33 | 200,00 | 100,00 |
| 34 | 33 | 34 | 0,1703 | 0,3497 | 34 | 800,00 | 600,00 |
| 35 | 34 | 35 | 0,0524 | 0,1076 | 35 | 100,00 | 60,00  |
| 36 | 35 | 36 | 0,4978 | 1,0222 | 36 | 100,00 | 60,00  |
| 37 | 36 | 37 | 0,0393 | 0,0807 | 37 | 20,00  | 10,00  |
| 38 | 37 | 38 | 0,0393 | 0,0807 | 38 | 20,00  | 10,00  |
| 39 | 38 | 39 | 0,0786 | 0,1614 | 39 | 20,00  | 10,00  |
| 40 | 39 | 40 | 0,2096 | 0,4304 | 40 | 20,00  | 10,00  |
| 41 | 38 | 41 | 0,1965 | 0,4035 | 41 | 200,00 | 160,00 |
| 42 | 41 | 42 | 0,2096 | 0,4304 | 42 | 50,00  | 30,00  |
| 43 | 43 | 84 | 0,0486 | 0,1656 | 43 | 0,00   | 0,00   |
| 44 | 43 | 44 | 0,0393 | 0,0807 | 44 | 30,00  | 20,00  |
| 45 | 44 | 45 | 0,1310 | 0,2690 | 45 | 800,00 | 700,00 |
| 46 | 45 | 46 | 0,2358 | 0,4842 | 46 | 200,00 | 150,00 |
| 47 | 47 | 84 | 0,2430 | 0,8280 | 47 | 0,00   | 0,00   |
| 48 | 47 | 48 | 0,0655 | 0,1345 | 48 | 0,00   | 0,00   |
| 49 | 48 | 49 | 0,0655 | 0,1345 | 49 | 0,00   | 0,00   |
| 50 | 49 | 50 | 0,0393 | 0,0807 | 50 | 200,00 | 160,00 |
| 51 | 50 | 51 | 0,0786 | 0,1614 | 51 | 800,00 | 600,00 |
| 52 | 51 | 52 | 0,0393 | 0,0807 | 52 | 500,00 | 300,00 |
| 53 | 52 | 53 | 0,0786 | 0,1614 | 53 | 500,00 | 350,00 |
| 54 | 53 | 54 | 0,0524 | 0,1076 | 54 | 500,00 | 300,00 |
| 55 | 54 | 55 | 0,1310 | 0,2690 | 55 | 200,00 | 80,00  |
| 56 | 56 | 84 | 0,2268 | 0,7728 | 56 | 0,00   | 0,00   |
| 57 | 56 | 57 | 0,5371 | 1,1029 | 57 | 30,00  | 20,00  |
| 58 | 57 | 58 | 0,0524 | 0,1076 | 58 | 600,00 | 420,00 |
| 59 | 58 | 59 | 0,0405 | 0,1380 | 59 | 0,00   | 0,00   |

|    |    |    |        |        |    |         |         |
|----|----|----|--------|--------|----|---------|---------|
| 60 | 59 | 60 | 0,0393 | 0,0807 | 60 | 20,00   | 10,00   |
| 61 | 60 | 61 | 0,0262 | 0,538  | 61 | 20,00   | 10,00   |
| 62 | 61 | 62 | 0,1048 | 0,2152 | 62 | 200,00  | 130,00  |
| 63 | 62 | 63 | 0,2358 | 0,4842 | 63 | 300,00  | 240,00  |
| 64 | 63 | 64 | 0,0243 | 0,0828 | 64 | 300,00  | 200,00  |
| 65 | 65 | 84 | 0,0486 | 0,1656 | 65 | 0,00    | 0,00    |
| 66 | 65 | 66 | 0,1703 | 0,3497 | 66 | 50,00   | 30,00   |
| 67 | 66 | 67 | 0,1215 | 0,4140 | 67 | 0,00    | 0,00    |
| 68 | 67 | 68 | 0,2187 | 0,7452 | 68 | 400,00  | 360,00  |
| 69 | 68 | 69 | 0,0486 | 0,1656 | 69 | 0,00    | 0,00    |
| 70 | 69 | 70 | 0,0729 | 0,2484 | 70 | 0,00    | 0,00    |
| 71 | 70 | 71 | 0,0567 | 0,1932 | 71 | 2000,00 | 1500,00 |
| 72 | 71 | 72 | 0,0262 | 0,0528 | 72 | 200,00  | 150,00  |
| 73 | 73 | 84 | 0,3240 | 1,1040 | 73 | 0,00    | 0,00    |
| 74 | 73 | 74 | 0,0324 | 0,1104 | 74 | 0,00    | 0,00    |
| 75 | 74 | 75 | 0,0567 | 0,1932 | 75 | 1200,00 | 950,00  |
| 76 | 75 | 76 | 0,0486 | 0,1656 | 76 | 300,00  | 180,00  |
| 77 | 77 | 84 | 0,2511 | 0,8556 | 77 | 0,00    | 0,00    |
| 78 | 77 | 78 | 0,1296 | 0,4416 | 78 | 400,00  | 360,00  |
| 79 | 78 | 79 | 0,0486 | 0,1656 | 79 | 2000,00 | 1300,00 |
| 80 | 79 | 80 | 0,1310 | 0,2640 | 80 | 200,00  | 140,00  |
| 81 | 80 | 81 | 0,1310 | 0,2640 | 81 | 500,00  | 360,00  |
| 82 | 81 | 82 | 0,0917 | 0,1883 | 82 | 100,00  | 30,00   |
| 83 | 82 | 83 | 0,3144 | 0,6456 | 83 | 400,00  | 360,00  |
| 84 | 5  | 55 | 0,1310 | 0,2690 | 84 | 0,00    | 0,00    |
| 85 | 7  | 60 | 0,1310 | 0,2690 |    |         |         |
| 86 | 11 | 43 | 0,1310 | 0,2690 |    |         |         |

|    |    |    |        |        |  |
|----|----|----|--------|--------|--|
| 87 | 12 | 72 | 0,3406 | 0,6994 |  |
| 88 | 13 | 76 | 0,4585 | 0,9415 |  |
| 89 | 14 | 18 | 0,5371 | 1,0824 |  |
| 90 | 16 | 26 | 0,0917 | 0,1883 |  |
| 91 | 20 | 83 | 0,0786 | 0,1614 |  |
| 92 | 28 | 32 | 0,0524 | 0,1076 |  |
| 93 | 29 | 39 | 0,0786 | 0,1614 |  |
| 94 | 34 | 46 | 0,0262 | 0,0538 |  |
| 95 | 40 | 42 | 0,1965 | 0,4035 |  |
| 96 | 53 | 64 | 0,0393 | 0,0807 |  |

Fonte: Chiou et al. (2005).

#### A.4 Resultados para o Sistema de 136 barras.

Para o sistema de 136 barras, tem-se os seguintes dados, os quais podem ser visualizados na Tabela 9.

**Tabela 9: Dados para o sistema de 136 barras.**

| Dados dos ramos |               |             |                          |                        | Dados das barras |                    |                        |
|-----------------|---------------|-------------|--------------------------|------------------------|------------------|--------------------|------------------------|
| Número do ramo  | Barra inicial | Barra final | Resistência [ $\Omega$ ] | Reatância [ $\Omega$ ] | Número da barra  | Demanda Ativa [kW] | Demanda Reativa [kVAr] |
| 1               | 136           | 1           | 0,33205                  | 0,76653                | 1                | 0,000              | 0,000                  |
| 2               | 1             | 2           | 0,00188                  | 0,00433                | 2                | 47,780             | 19,009                 |
| 3               | 2             | 3           | 0,22324                  | 0,51535                | 3                | 42,551             | 16,929                 |
| 4               | 3             | 4           | 0,09943                  | 0,22953                | 4                | 87,022             | 34,622                 |
| 5               | 4             | 5           | 0,15571                  | 0,35945                | 5                | 311,310            | 123,855                |
| 6               | 5             | 6           | 0,16321                  | 0,37677                | 6                | 148,869            | 59,288                 |

|    |     |    |         |         |    |         |         |
|----|-----|----|---------|---------|----|---------|---------|
| 7  | 6   | 7  | 0,11444 | 0,26417 | 7  | 238,672 | 94,956  |
| 8  | 6   | 8  | 0,05675 | 0,05666 | 8  | 62,299  | 24,786  |
| 9  | 8   | 9  | 0,52124 | 0,27418 | 9  | 124,598 | 49,571  |
| 10 | 8   | 10 | 0,10877 | 0,10860 | 10 | 140,175 | 55,768  |
| 11 | 10  | 11 | 0,39803 | 0,20937 | 11 | 116,813 | 46,474  |
| 12 | 10  | 12 | 0,91744 | 0,31469 | 12 | 249,203 | 99,145  |
| 13 | 10  | 13 | 0,11823 | 0,11805 | 13 | 291,447 | 115,952 |
| 14 | 13  | 14 | 0,50228 | 0,26421 | 14 | 303,720 | 120,835 |
| 15 | 13  | 15 | 0,05675 | 0,05666 | 15 | 215,396 | 85,695  |
| 16 | 15  | 16 | 0,29379 | 0,15454 | 16 | 198,586 | 79,007  |
| 17 | 136 | 17 | 0,33205 | 0,76653 | 17 | 0,000   | 0,000   |
| 18 | 17  | 18 | 0,00188 | 0,00433 | 18 | 0,000   | 0,000   |
| 19 | 18  | 19 | 0,22324 | 0,51535 | 19 | 0,000   | 0,000   |
| 20 | 19  | 20 | 0,10881 | 0,25188 | 20 | 30,127  | 14,729  |
| 21 | 20  | 21 | 0,71078 | 0,37388 | 21 | 230,972 | 112,920 |
| 22 | 20  | 22 | 0,18197 | 0,42008 | 22 | 60,256  | 29,458  |
| 23 | 22  | 23 | 0,30326 | 0,15952 | 23 | 230,972 | 112,920 |
| 24 | 22  | 24 | 0,02439 | 0,05630 | 24 | 120,507 | 58,915  |
| 25 | 24  | 25 | 0,04502 | 0,10394 | 25 | 0,000   | 0,000   |
| 26 | 25  | 26 | 0,01876 | 0,04331 | 26 | 56,981  | 27,857  |
| 27 | 26  | 27 | 0,11823 | 0,11805 | 27 | 364,665 | 178,281 |
| 28 | 27  | 28 | 0,02365 | 0,02361 | 28 | 0,000   | 0,000   |
| 29 | 28  | 29 | 0,18954 | 0,09970 | 29 | 124,647 | 60,939  |
| 30 | 29  | 30 | 0,39803 | 0,20937 | 30 | 56,981  | 27,857  |
| 31 | 28  | 31 | 0,05675 | 0,05666 | 31 | 0,000   | 0,000   |
| 32 | 31  | 32 | 0,09477 | 0,04985 | 32 | 85,473  | 41,787  |
| 33 | 32  | 33 | 0,41699 | 0,21934 | 33 | 0,000   | 0,000   |
| 34 | 33  | 34 | 0,11372 | 0,05982 | 34 | 396,735 | 193,960 |

|    |     |    |         |         |    |         |         |
|----|-----|----|---------|---------|----|---------|---------|
| 35 | 31  | 35 | 0,07566 | 0,07555 | 35 | 0,000   | 0,000   |
| 36 | 35  | 36 | 0,36960 | 0,19442 | 36 | 181,152 | 88,563  |
| 37 | 36  | 37 | 0,26536 | 0,13958 | 37 | 242,172 | 118,395 |
| 38 | 35  | 38 | 0,05675 | 0,05666 | 38 | 75,316  | 36,821  |
| 39 | 136 | 39 | 0,33205 | 0,76653 | 39 | 0,000   | 0,000   |
| 40 | 39  | 40 | 0,11819 | 0,27283 | 40 | 1,254   | 0,531   |
| 41 | 40  | 41 | 2,96288 | 1,01628 | 41 | 6,274   | 2,660   |
| 42 | 40  | 42 | 0,00188 | 0,00433 | 42 | 0,000   | 0,000   |
| 43 | 42  | 43 | 0,06378 | 0,16024 | 43 | 117,880 | 49,971  |
| 44 | 43  | 44 | 0,81502 | 0,42872 | 44 | 62,668  | 26,566  |
| 45 | 43  | 45 | 0,06378 | 0,14724 | 45 | 172,285 | 73,034  |
| 46 | 45  | 46 | 0,13132 | 0,30315 | 46 | 458,556 | 194,388 |
| 47 | 46  | 47 | 0,06191 | 0,14291 | 47 | 262,962 | 111,473 |
| 48 | 47  | 48 | 0,11444 | 0,26417 | 48 | 235,761 | 99,942  |
| 49 | 48  | 49 | 0,28374 | 0,28331 | 49 | 0,000   | 0,000   |
| 50 | 49  | 50 | 0,28374 | 0,28331 | 50 | 109,215 | 46,298  |
| 51 | 48  | 51 | 0,04502 | 0,10394 | 51 | 0,000   | 0,000   |
| 52 | 51  | 52 | 0,02626 | 0,06063 | 52 | 72,809  | 30,865  |
| 53 | 52  | 53 | 0,06003 | 0,13858 | 53 | 258,473 | 109,570 |
| 54 | 53  | 54 | 0,03002 | 0,06929 | 54 | 69,169  | 29,322  |
| 55 | 54  | 55 | 0,02064 | 0,04764 | 55 | 21,843  | 9,260   |
| 56 | 52  | 56 | 0,10881 | 0,25118 | 56 | 0,000   | 0,000   |
| 57 | 56  | 57 | 0,25588 | 0,13460 | 57 | 20,527  | 8,702   |
| 58 | 57  | 58 | 0,41699 | 0,21934 | 58 | 150,548 | 63,819  |
| 59 | 58  | 59 | 0,50228 | 0,26421 | 59 | 220,687 | 93,552  |
| 60 | 59  | 60 | 0,33170 | 0,17448 | 60 | 92,384  | 39,163  |
| 61 | 60  | 61 | 0,20849 | 0,10967 | 61 | 0,000   | 0,000   |
| 62 | 47  | 62 | 0,13882 | 0,32047 | 62 | 226,693 | 96,098  |

|    |     |    |         |         |    |          |         |
|----|-----|----|---------|---------|----|----------|---------|
| 63 | 136 | 63 | 0,00750 | 0,01732 | 63 | 0,000    | 0,000   |
| 64 | 63  | 64 | 0,27014 | 0,62362 | 64 | 294,016  | 116,974 |
| 65 | 64  | 65 | 0,38270 | 0,88346 | 65 | 83,015   | 33,028  |
| 66 | 65  | 66 | 0,33018 | 0,76220 | 66 | 83,015   | 33,028  |
| 67 | 66  | 67 | 0,32018 | 0,75787 | 67 | 103,770  | 41,285  |
| 68 | 67  | 68 | 0,17072 | 0,39409 | 68 | 176,408  | 70,184  |
| 69 | 68  | 69 | 0,55914 | 0,29412 | 69 | 83,015   | 33,028  |
| 70 | 68  | 70 | 0,05816 | 0,13425 | 70 | 217,917  | 86,698  |
| 71 | 70  | 71 | 0,70130 | 0,36890 | 71 | 23,294   | 9,267   |
| 72 | 71  | 72 | 1,02352 | 0,53839 | 72 | 5,075    | 2,019   |
| 73 | 70  | 73 | 0,06754 | 0,15591 | 73 | 72,638   | 28,899  |
| 74 | 73  | 74 | 1,32352 | 0,45397 | 74 | 405,990  | 161,524 |
| 75 | 136 | 75 | 0,00126 | 0,02598 | 75 | 0,000    | 0,000   |
| 76 | 75  | 76 | 0,72976 | 1,68464 | 76 | 100,182  | 42,468  |
| 77 | 76  | 77 | 0,22512 | 0,51968 | 77 | 142,523  | 60,417  |
| 78 | 77  | 78 | 0,20824 | 0,48071 | 78 | 96,042   | 40,713  |
| 79 | 78  | 79 | 0,04690 | 0,10827 | 79 | 300,454  | 127,366 |
| 80 | 79  | 80 | 0,61950 | 0,61857 | 80 | 141,238  | 59,873  |
| 81 | 80  | 81 | 0,34049 | 0,33998 | 81 | 279,847  | 118,631 |
| 82 | 81  | 82 | 0,56862 | 0,29911 | 82 | 87,312   | 37,013  |
| 83 | 81  | 83 | 0,10877 | 0,10860 | 83 | 243,849  | 103,371 |
| 84 | 83  | 84 | 0,56862 | 0,29911 | 84 | 247,750  | 105,025 |
| 85 | 136 | 85 | 0,01126 | 0,02598 | 85 | 0,000    | 0,000   |
| 86 | 85  | 86 | 0,41835 | 0,96575 | 86 | 89,878   | 38,101  |
| 87 | 86  | 87 | 0,10499 | 0,13641 | 87 | 1137,280 | 482,108 |
| 88 | 86  | 88 | 0,43898 | 1,01338 | 88 | 458,339  | 194,296 |
| 89 | 88  | 89 | 0,07520 | 0,02579 | 89 | 385,197  | 163,290 |
| 90 | 89  | 90 | 0,07692 | 0,17756 | 90 | 0,000    | 0,000   |

|     |     |     |         |         |     |          |         |
|-----|-----|-----|---------|---------|-----|----------|---------|
| 91  | 90  | 91  | 0,33205 | 0,76653 | 91  | 79,608   | 33,747  |
| 92  | 91  | 92  | 0,08442 | 0,19488 | 92  | 87,312   | 37,013  |
| 93  | 92  | 93  | 0,13320 | 0,30748 | 93  | 0,000    | 0,000   |
| 94  | 93  | 94  | 0,29320 | 0,29276 | 94  | 74,001   | 31,370  |
| 95  | 94  | 95  | 0,21753 | 0,21721 | 95  | 232,050  | 98,369  |
| 96  | 95  | 96  | 0,26482 | 0,26443 | 96  | 141,819  | 60,119  |
| 97  | 93  | 97  | 0,10318 | 0,23819 | 97  | 0,000    | 0,000   |
| 98  | 97  | 98  | 0,13507 | 0,31181 | 98  | 76,449   | 32,408  |
| 99  | 136 | 99  | 0,00938 | 0,02465 | 99  | 0,000    | 0,000   |
| 100 | 99  | 100 | 0,16884 | 0,38976 | 100 | 51,322   | 21,756  |
| 101 | 100 | 101 | 0,11819 | 0,27283 | 101 | 59,874   | 25,381  |
| 102 | 101 | 102 | 2,28608 | 0,78414 | 102 | 9,065    | 3,843   |
| 103 | 101 | 103 | 0,45587 | 1,05236 | 103 | 2,092    | 0,887   |
| 104 | 103 | 104 | 0,69600 | 1,60669 | 104 | 16,735   | 7,094   |
| 105 | 104 | 105 | 0,45774 | 1,05669 | 105 | 1506,522 | 638,634 |
| 106 | 105 | 106 | 0,20298 | 0,26373 | 106 | 313,023  | 132,694 |
| 107 | 106 | 107 | 0,21348 | 0,27737 | 107 | 79,831   | 33,842  |
| 108 | 107 | 108 | 0,54967 | 0,28914 | 108 | 51,322   | 21,756  |
| 109 | 108 | 109 | 0,54019 | 0,28415 | 109 | 0,000    | 0,000   |
| 110 | 107 | 110 | 0,04550 | 0,05911 | 110 | 202,435  | 85,815  |
| 111 | 110 | 111 | 0,47385 | 0,24926 | 111 | 60,823   | 25,784  |
| 112 | 111 | 112 | 0,86241 | 0,45364 | 112 | 45,618   | 19,338  |
| 113 | 112 | 113 | 0,56862 | 0,29911 | 113 | 0,000    | 0,000   |
| 114 | 108 | 114 | 0,77711 | 0,40878 | 114 | 157,070  | 66,584  |
| 115 | 114 | 115 | 1,08038 | 0,56830 | 115 | 0,000    | 0,000   |
| 116 | 109 | 116 | 1,09933 | 0,57827 | 116 | 250,148  | 106,041 |
| 117 | 116 | 117 | 0,47385 | 0,24926 | 117 | 0,000    | 0,000   |
| 118 | 104 | 118 | 0,32267 | 0,74488 | 118 | 69,809   | 29,593  |

|     |     |     |          |         |     |         |         |
|-----|-----|-----|----------|---------|-----|---------|---------|
| 119 | 118 | 119 | 0,14633  | 0,33779 | 119 | 32,072  | 13,596  |
| 120 | 119 | 120 | 0,12382  | 0,28583 | 120 | 61,084  | 25,894  |
| 121 | 136 | 121 | 0,001126 | 0,02598 | 121 | 0,000   | 0,000   |
| 122 | 121 | 122 | 0,64910  | 1,49842 | 122 | 94,622  | 46,260  |
| 123 | 122 | 123 | 0,04502  | 0,10394 | 123 | 49,858  | 24,375  |
| 124 | 123 | 124 | 0,52640  | 0,18056 | 124 | 123,164 | 60,214  |
| 125 | 123 | 125 | 0,02064  | 0,04764 | 125 | 78,350  | 38,304  |
| 126 | 125 | 126 | 0,53071  | 0,27917 | 126 | 145,475 | 71,121  |
| 127 | 125 | 127 | 0,09755  | 0,22520 | 127 | 21,369  | 10,447  |
| 128 | 127 | 128 | 0,11819  | 0,27283 | 128 | 74,789  | 36,564  |
| 129 | 127 | 129 | 0,13882  | 0,32047 | 129 | 227,926 | 111,431 |
| 130 | 129 | 130 | 0,04315  | 0,09961 | 130 | 35,614  | 17,411  |
| 131 | 130 | 131 | 0,09192  | 0,21220 | 131 | 249,295 | 121,877 |
| 132 | 131 | 132 | 0,16134  | 0,37244 | 132 | 316,722 | 154,842 |
| 133 | 132 | 133 | 0,37832  | 0,37775 | 133 | 333,817 | 163,199 |
| 134 | 133 | 134 | 0,39724  | 0,39664 | 134 | 249,295 | 121,877 |
| 135 | 134 | 135 | 0,29320  | 0,29276 | 135 | 0,000   | 0,000   |
| 136 | 7   | 73  | 0,13132  | 0,30315 | 136 | 0,000   | 0,000   |
| 137 | 9   | 24  | 0,26536  | 0,13958 |     |         |         |
| 138 | 15  | 83  | 0,14187  | 0,14166 |     |         |         |
| 139 | 38  | 135 | 0,08512  | 0,08499 |     |         |         |
| 140 | 25  | 51  | 0,04502  | 0,10394 |     |         |         |
| 141 | 50  | 96  | 0,14187  | 0,14166 |     |         |         |
| 142 | 55  | 98  | 0,14187  | 0,14166 |     |         |         |
| 143 | 62  | 120 | 0,03940  | 0,09094 |     |         |         |

|     |     |     |         |         |
|-----|-----|-----|---------|---------|
| 144 | 66  | 79  | 0,12944 | 0,29882 |
| 145 | 79  | 131 | 0,01688 | 0,03898 |
| 146 | 84  | 135 | 0,33170 | 0,17448 |
| 147 | 91  | 104 | 0,14187 | 0,14166 |
| 148 | 90  | 129 | 0,07692 | 0,17756 |
| 149 | 90  | 103 | 0,07962 | 0,17756 |
| 150 | 92  | 104 | 0,07692 | 0,17756 |
| 151 | 92  | 132 | 0,07692 | 0,17756 |
| 152 | 96  | 120 | 0,26482 | 0,26443 |
| 153 | 110 | 47  | 0,49696 | 0,64567 |
| 154 | 126 | 76  | 0,17059 | 0,08973 |
| 155 | 128 | 77  | 0,05253 | 0,12126 |
| 156 | 135 | 98  | 0,29320 | 0,29276 |

Fonte: Mantovani et al. (2000).