

NATALIA PATIÑO CARDONA

**RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO UMA
METODOLOGIA MULTIPARTIDA**

Ilha Solteira
2016



NATALIA PATIÑO CARDONA

**RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO UMA
METODOLOGIA MULTIPARTIDA**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia Elétrica do Câmpus de Ilha
Solteira - UNESP como parte dos requi-
sitos exigidos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.
Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro
Orientador

Ilha Solteira
2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P298r Patião Cardona, Natalia.
Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando uma metodologia multipartida / Natalia Patiño Cardona. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
96 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2016

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro
Inclui bibliografia

1. Metodologia multipartida. 2. Algoritmo de Prim. 3. Reconfiguração de sistemas de distribuição. 4. Fluxo de potência radial. 5. Busca local.

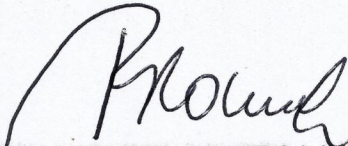
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando uma metodologia multipartida.

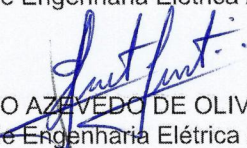
AUTORA: NATALIA PATINO CARDONA

ORIENTADOR: RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

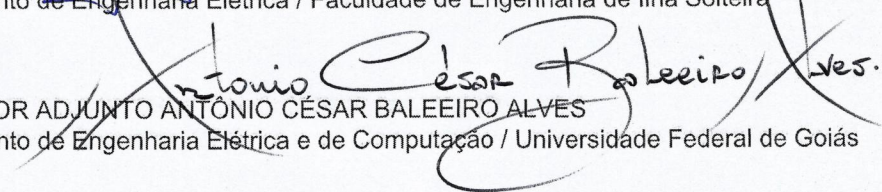
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. SERGIO AZEVEDO DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



PROFESSOR ADJUNTO ANTÔNIO CÉSAR BALEEIRO ALVES
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Universidade Federal de Goiás

Ilha Solteira, 16 de fevereiro de 2016

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta baseada na metodologia multipartida para a resolução do Problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, de natureza combinatória e modelado como um problema de Programação Não Linear Inteiro Misto. O objetivo principal deste trabalho é encontrar a topologia radial ótima para minimizar as perdas ativas dos sistemas de distribuição, e para isso é preciso, primeiramente, a resolução de um problema de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados onde é calculada a potência aparente do sistema, a qual vai ser utilizada pelo algoritmo de Prim como o peso para a geração das soluções iniciais radiais de boa qualidade. Para implementar a metodologia proposta deve-se desenvolver também um algoritmo de fluxo de potência radial, utilizado para calcular tanto as perdas ativas do sistema (função objetivo do problema), como para verificar a factibilidade das propostas de solução. Nesta primeira etapa é feita uma variação aleatória dos pesos dos ramos, e são resolvidos tantos problemas de fluxo de potência radial quanto soluções aleatórias obtidas, para encontrar soluções de boa qualidade próximas ao ótimo. Finalmente, é feita uma busca local através da troca de ramos como tentativa para encontrar a solução ótima. As soluções obtidas pela metodologia proposta são obtidas através da programação de algoritmos implementados em linguagem C++. Os resultados obtidos mostram a eficiência da aplicação da metodologia, estes resultados foram comparados com os existentes na literatura e os obtidos pela resolução de um modelo de otimização resolvido com o *solver* comercial CPLEX.

Palavras-chave: Multipartida. Algoritmo de Prim. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Fluxo de potência radial. Busca local.

ABSTRACT

This work presents a proposal based on multi-start methodology for the solution of the distribution network reconfiguration problem, of combinatorial nature and modeled as a mixed-integer nonlinear programming problem. The main objective of this work is to find the optimal radial topology to minimize active power losses in distribution systems. This requires, at first, the resolution of a power flow problem for weakly meshed systems where the apparent power of the system is calculated, which will be used by the Prim algorithm as the weight for generating the radial initial good quality solution. To implement the proposed methodology is also developed a radial power flow algorithm, used to calculate both the active system losses (objective function of the problem) and to verify the feasibility of the proposed solutions. In this first stage is made a random variation of the weights of branches, and there are solved as many radial power flows as random solutions obtained, to find good quality solutions close to optimal. Finally, a local search is made by doing an exchange of branches as an attempt to find the optimal solution. The solutions obtained by the proposed method are acquired by programming algorithms implemented in C ++ language. The results show the effectiveness of the application of the methodology. These results were compared with those in the literature and those obtained by solving an optimization model solved by the commercial solver CPLEX.

Keywords: Multi-start method. Prim algorithm. Distribution network reconfiguration problem. Radial power flow. Local search.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sistema de 14 barras.	18
Figura 2	Sistema radial de 14 barras antes da ordenação.	21
Figura 3	Sistema radial de 14 barras após a ordenação.	21
Figura 4	Sistema de duas barras de um sistema de distribuição radial.	22
Figura 5	Fluxo de potência de varredura para sistemas radiais.	25
Figura 6	Sistema fracamente malhado.	26
Figura 7	Sistema com injeções de corrente nos <i>breakpoints</i>	26
Figura 8	Fluxo de potência para sistemas fracamente malhados.	28
Figura 9	Procedimento multipartida.	36
Figura 10	Início do algoritmo de Prim.	40
Figura 11	Primeira iteração do algoritmo de Prim.	40
Figura 12	Segunda iteração do algoritmo de Prim.	41
Figura 13	Finalização do algoritmo de Prim.	41
Figura 14	Codificação da proposta de solução.	45
Figura 15	Sistema de 14 barras com identificação de laços.	46
Figura 16	Primeira iteração da busca local no primeiro laço.	47
Figura 17	Segunda iteração da busca local no primeiro laço.	47
Figura 18	Terceira iteração da busca local no primeiro laço.	48
Figura 19	Fluxograma da metodologia multipartida aplicada.	49
Figura 20	Sistema de distribuição radial de 33 barras.	51
Figura 21	Perfil de tensão inicial e final do sistema de 33 barras.	53
Figura 22	Sistema de distribuição radial de 84 barras.	54
Figura 23	Perfil de tensão inicial e final do sistema de 84 barras.	56

Figura 24	Sistema de distribuição de 136 barras.	57
Figura 25	Perfil de tensão inicial e final do sistema de 136 barras.	59
Figura 26	Perfil de tensão inicial e final do sistema de 417 barras.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Potência aparente em cada ramo para o sistema de 14 barras.	42
Tabela 2	Potência aparente normalizada em cada ramo para o sistema de 14 barras.	43
Tabela 3	Resultados comparativos para o sistema de 14 barras.	51
Tabela 4	Estado inicial e resultados do algoritmo de Prim para o sistema de 33 barras.	52
Tabela 5	Resultados da fase construtiva para o sistema de 33 barras.	52
Tabela 6	Resultados comparativos para o sistema de 33 barras.	53
Tabela 7	Estado inicial e os resultados do algoritmo de Prim para o sistema de 84 barras.	55
Tabela 8	Resultados da fase construtiva para o sistema de 84 barras.	55
Tabela 9	Resultados comparativos para o sistema de 84 barras.	56
Tabela 10	Estado inicial e resultados do algoritmo de Prim para o sistema de 136 barras.	57
Tabela 11	Resultados da fase construtiva para o sistema de 136 barras.	58
Tabela 12	Resultados comparativos para o sistema de 136 barras.	59
Tabela 13	Estado inicial e resultados do algoritmo de Prim para o sistema de 417 barras.	60
Tabela 14	Resultados da fase construtiva para o sistema de 417 barras.	61
Tabela 15	Resultados para o sistema de 417 barras.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BVNS	Basic Variable Neighborhood Search
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
GVNS	General Variable Neighborhood Search
MST	Minimum Spanning Tree
PCSOIM	Programação Cônica de Segunda Ordem Inteira Mista
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
RSDEE	Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
RVNS	Reduced Variable Neighborhood Search
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
VND	Variable Neighborhood Search

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω_b	Conjunto de barras
Ω_{b_i}	Conjunto de de barras conectadas à barra i
Ω_l	Conjunto de ramos
v	Função objetivo
G_{ij}	Condutância do ramo ij
B_{ij}	Susceptância do ramo ij
x_{ij}	Estado da chave do ramo ij
V_i	Módulo da tensão na barra i
θ_{ij}	Diferença angular entre as tensões das barras i e j
P_i^S	Potência ativa fornecida pela subestação na barra i
P_i^D	Demanda de potência ativa na barra i
P_{ij}	Fluxo de potência ativa pelo ramo ij
Q_i^S	Potência reativa fornecida pela subestação na barra i
Q_i^D	Demanda de potência reativa na barra i
Q_{ij}	Fluxo de potência reativa pelo ramo ij
\underline{V}	Limite inferior de tensão no sistema
\bar{V}	Limite superior de tensão no sistema
\bar{I}_{ij}	Fluxo máximo de corrente permitido no ramo ij
I_{rij}	Parte real do fluxo de corrente no ramo ij
I_{mij}	Parte imaginária do fluxo de corrente no ramo ij
nb	Número de barras do sistema
V_{ref}	Tensão nominal do sistema
V_{r_i}	Parte real do fasor tensão na barra i
V_{m_i}	Parte imaginária do fasor tensão na barra i
ΔP_a	Variação de perdas ativas entre duas iterações consecutivas do fluxo de potência
ε	Tolerância

S_i	Potência complexa demandada na barra i
P_i	Potência ativa demandada na barra i
Q_i	Potência reativa demandada na barra ij
\bar{I}_i	Fasor corrente absorvida pela carga na barra i
R_{ij}	Resistência do ramo ij
X_{ij}	Reatância do ramo ij
$P_{a_{ij}}$	Perdas ativas no ramo ij
$Q_{r_{ij}}$	Perdas reativas no ramo ij
P_a	Perdas ativas totais no sistema
Q_r	Perdas reativas totais no sistema
\mathbf{Z}_{th}	Matriz das impedâncias equivalentes de Thévenin vistas pelos <i>breakpoints</i>
\mathbf{I}	Vetor com as correntes injetadas nos <i>breakpoints</i>
$\Delta\mathbf{I}$	Vetor com a variação das correntes nos <i>breakpoints</i>
V	Tensão equivalente de Thévenin
v'	Função objetivo penalizada
μ_i	Variável de penalização de violação da tensão mínima na barra i
α_{ij}	Variável de penalização de violação de corrente máxima no ramo ij

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	14
2	RECONFIGURAÇÃO DE SDEE	16
2.1	O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SDEE	17
2.2	MODELO MATEMÁTICO	18
2.3	FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS RADIAIS E FRACAMENTE MALHADOS	20
2.3.1	Fluxo de potência em sistemas radiais	20
<i>2.3.1.1</i>	<i>Cálculo das correntes nos ramos</i>	<i>22</i>
<i>2.3.1.2</i>	<i>Cálculo das tensões nas barras</i>	<i>24</i>
<i>2.3.1.3</i>	<i>Cálculo das perdas</i>	<i>24</i>
2.3.2	Fluxo de potência em sistemas fracamente malhados	25
2.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.4.1	Heurísticas	29
2.4.2	Meta-heurísticas	30
2.4.3	Otimização clássica	31
3	META-HEURÍSTICAS E METODOLOGIA MULTIPARTIDA	33
3.1	INTRODUÇÃO ÀS META-HEURÍSTICAS	33
3.2	VISÃO GERAL DO MÉTODO MULTIPARTIDA	35
4	METODOLOGIA MULTIPARTIDA APLICADA AO PROBLEMA DE RS-DEE	38
4.1	OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO INICIAL	38

4.2	CÁLCULO DA FUNÇÃO OBJETIVO E VERIFICAÇÃO DE RESTRIÇÕES	44
4.3	CODIFICAÇÃO DO PROBLEMA	44
4.4	MELHORIA LOCAL	45
4.5	METODOLOGIA MULTIPARTIDA	49
5	TESTES E RESULTADOS	50
5.1	SISTEMA DE 14 BARRAS	50
5.2	SISTEMA DE 33 BARRAS	51
5.3	SISTEMA DE 84 BARRAS	54
5.4	SISTEMA DE 136 BARRAS	56
5.5	SISTEMA DE 417 BARRAS	60
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO TRABALHO	64
6.1	CONCLUSÕES	64
6.2	TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência são grandes sistemas de energia que compreendem a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A conexão, o atendimento e a entrega efetiva de energia elétrica ao consumidor final ocorrem por parte das distribuidoras de energia, porém, a energia medida por estas unidades consumidoras sempre é inferior à energia recebida dos agentes supridores devido às perdas que ocorrem no sistema. Estas perdas podem ser classificadas como:

- Perdas técnicas: inerentes ao transporte de energia elétrica na rede, entendidas como o consumo dos equipamentos responsáveis pela distribuição de energia;
- Perdas não técnicas: todas as demais perdas associadas à gestão comercial da distribuidora.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as perdas técnicas referentes à distribuição de energia elétrica tiveram uma média a nível nacional de 7,5% da energia gerada no ano 2014. Em países desenvolvidos, estas perdas chegam em torno de 6% e idealmente se considera que as perdas deveriam estar entre 3% e 6%, o que torna os sistemas de distribuição de energia elétrica em um dos setores que requer maior atenção.

Nos últimos anos têm sido realizadas consideráveis investigações na área de reconfiguração de sistemas de distribuição visando principalmente a minimização das perdas ativas dos sistemas. O problema de reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica (RSDEE) consiste em encontrar uma estrutura de operação radial com o propósito de melhorar as características operativas do sistema satisfazendo as restrições de operação e a topologia da rede, o que torna a reconfiguração, o método mais apropriado para resolver este problema, pois não requer nenhum equipamento adicional para se instalar no sistema, fazendo com que seja rentável.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) possuem uma configuração malhada, embora na maioria dos casos sua operação seja radial. A topologia radial é adotada pois a coordenação da sua proteção não é tão complexa e permite a redução das correntes de curto-circuito, diminuindo o custo de equipamentos de proteção que para redes malhadas são muito mais caros.

A reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica consiste em modificar a topologia de um sistema através da abertura ou fechamento das chaves de interconexões em pontos estratégicos. Através da realização de ações de comutação, pode-se alterar a topologia

da rede e obter a melhor configuração radial possível. Este procedimento é utilizado principalmente para o isolamento de faltas, o balanceamento de cargas entre alimentadores, para melhorar os níveis de tensão, para conservar a confiabilidade ou para a minimização das perdas ativas do sistema.

Apesar que no Brasil o setor de distribuição de energia elétrica ainda é pouco automatizado, o objetivo das empresas do setor elétrico é fazer que a reconfiguração das redes seja um procedimento mais automatizado, e, portanto, é necessária uma metodologia rápida e simples que permita mudar de maneira eficiente a topologia do sistema e proporcione uma configuração ótima para sua operação.

Este trabalho apresenta uma meta-heurística baseada na metodologia multipartida. Este método visa garantir e obter a diversificação através do reinício do procedimento de busca de uma nova solução depois que uma região já foi explorada. Assim, consegue-se sair de ótimos locais e explorar regiões que possam conter a solução global de maneira rápida e eficiente, garantindo a radialidade do sistema com a utilização do algoritmo de Prim e com uma melhoria local que permita achar uma melhor solução, baseada na troca de ramos.

1.1 OBJETIVOS

- Desenvolver um algoritmo simples, rápido e confiável que garanta a radialidade e a geração de soluções iniciais de boa qualidade dos sistemas de distribuição;
- Desenvolver um algoritmo eficiente para calcular a função objetivo e verificar as restrições do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica com esforço computacional baixo;
- Desenvolver uma metodologia multipartida eficiente para resolver e otimizar o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica com a capacidade de testar tanto sistemas elétricos pequenos como sistemas elétricos de grande porte;
- Desenvolver estratégias eficientes dentro da metodologia multipartida para alcançar as soluções encontradas na literatura, baseadas na variação aleatória dos pesos para a geração e análise de soluções iniciais; e em uma busca local com troca de ramos.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Além deste capítulo introdutório, este documento está organizado em seis capítulos, os quais são estruturados da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 apresenta-se uma visão geral dos sistemas de distribuição e da reconfiguração dos sistemas de distribuição de energia elétrica, seu modelo matemático, o problema de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados e o problema de fluxo de potência radial. Também é apresentada a revisão bibliográfica correspondente ao problema, onde são mencionadas as heurísticas, meta-heurísticas e métodos exatos utilizados na resolução do problema de RSDEE;
- No Capítulo 3 é apresentado o método multipartida. É feita uma introdução às meta-heurísticas assim como as suas características, para fornecer uma visão geral sobre os métodos multipartida e a sua classificação;
- No Capítulo 4 apresenta-se, em detalhes, a aplicação do método multipartida ao problema de RSDEE. São abordados, a geração da solução inicial do problema, o algoritmo utilizado para garantir a radialidade do sistema, a forma de codificação do problema, o cálculo das perdas ativas ou função objetivo, e a geração de uma estrutura de vizinhança ou busca local para melhorar a solução inicial. Por último, é apresentado um fluxograma, que explica de maneira geral a aplicação do método multipartida considerando cada um dos temas mencionados no capítulo;
- No Capítulo 5 apresenta-se os resultados obtidos pelo método proposto. Estes resultados são comparados com os disponíveis na literatura especializada obtidos por um modelo de otimização matemática linearizado;
- No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e os trabalhos futuros;
- No anexo A são apresentados os dados completos dos sistemas testados.

2 RECONFIGURAÇÃO DE SDEE

Os sistemas de distribuição de energia elétrica são uma parte essencial dos sistemas elétricos cuja finalidade consiste em transferir energia elétrica a partir de uma corrente alternada ou fonte de corrente contínua para um usuário final. Essa distribuição envolve um sistema interligado com a transmissão de energia e compreende toda uma cadeia que vai desde as fontes de energia até o consumidor final. No contexto dos subsistemas elétricos conforme mencionados anteriormente, Kagan, Barioni e Robba (2008) dividem os sistemas da seguinte maneira:

- Sistemas de subtransmissão, onde é feita a ligação entre transmissão e as subestações de distribuição;
- Subestações de distribuição, as quais recebem a energia desde uma ou mais linhas de transmissão ou subtransmissão e rebaixam a tensão com a utilização de transformadores;
- Alimentadores primários que alimentam diretamente ou por intermédio de seus ramais, os transformadores de distribuição;
- Transformadores de distribuição, os quais estão ligados a um circuito primário e rebaixam a tensão dos alimentadores para níveis de tensão secundária;
- Circuitos secundários onde são ligados os consumidores finais alimentados em baixa tensão.

Para tornar menos complexa a operação dos sistemas de distribuição, torna-se muito importante que os sistemas de distribuição sejam abordados por grupos ou tarefas especializadas. Existem quatro esquemas importantes dentro da operação dos SDEE:

- Controle de tensão e reativos;
- Restauração;
- Estimação de estado;
- Reconfiguração.

Este trabalho compreende o esquema de reconfiguração dos sistemas de distribuição de energia elétrica, o qual será abordado neste capítulo apresentando uma visão geral do tema, seu modelo matemático, o problema de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados para o cálculo das potências aparentes das linhas, e o problema de fluxo de potência radial para o cálculo das perdas ativas dos sistemas.

2.1 O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SDEE

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica tem como finalidade encontrar a configuração radial de um sistema de distribuição para alcançar um objetivo, geralmente relacionado com a minimização das perdas ativas de um sistema. Para isto, o sistema deve operar de maneira radial, sendo feita uma manobra das chaves de interconexões, trocando-se ramos não energizados por ramos energizados, levando a uma configuração diferente, de maneira que seja encontrada uma configuração radial entre todas as possíveis, que produza perdas mínimas de potência no sistema de distribuição.

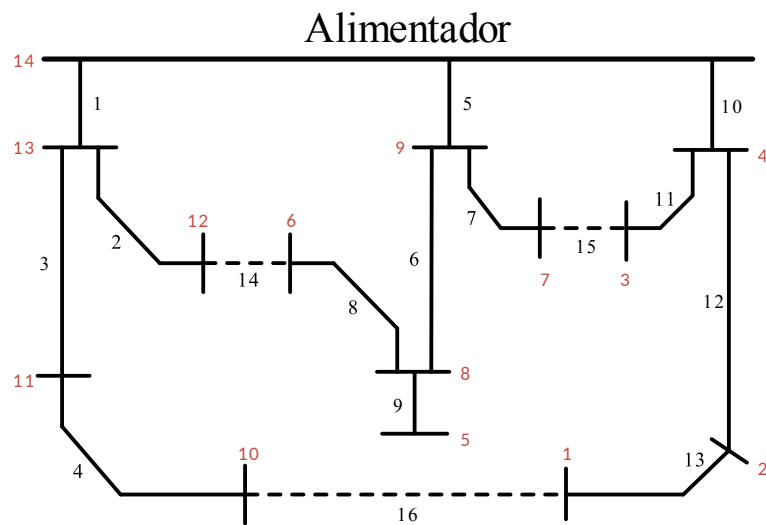
A troca adequada de ramos, ou também, abertura ou fechamento de chaves de interconexões para encontrar a configuração com perdas mínimas deve ser feita satisfazendo as seguintes restrições:

- Limites de tensão nas barras do sistema;
- Capacidade de corrente nos alimentadores;
- As leis de Kirchhoff;
- A configuração deve ser radial.

O problema de reconfiguração é de natureza combinatória e está sujeito a restrições de operação e radialidade, tornando-se um problema difícil de resolver e também um dos problemas mais pesquisados na área de sistemas elétricos de potência.

Neste trabalho, é apresentado o método multipartida para resolver o problema de RSDEE. O método é desenvolvido de maneira que a restrição de radialidade é sempre mantida, assim, quando aparecerem soluções infactíveis, estas serão do tipo operacional, por limite de tensão ou de corrente no sistema. Na Figura 1 é apresentado o sistema de distribuição de 14 barras originalmente apresentado em Civanlar et al. (1988).

Figura 1 - Sistema de 14 barras.



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

O sistema mostrado na Figura 1 é um sistema elétrico reduzido com 190 topologias radiais possíveis (HARRIS; HIRST; MOSSINGHOFF, 2008). A radialidade deste, e dos outros sistemas testados será garantida com o algoritmo de Prim, da teoria de grafos, que garante a obtenção da solução ótima do problema de árvore geradora mínima. A qualidade das soluções obtidas pelo algoritmo de Prim e o cumprimento das restrições operacionais do sistema são avaliadas através da resolução de um problema de fluxo de potência radial simples, rápido e confiável. Finalmente é feita uma melhoria local para alcançar a solução ótima para cada sistema testado.

2.2 MODELO MATEMÁTICO

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é de natureza combinatória, contendo variáveis inteiras e contínuas, o qual pode ser modelado como um problema de programação não linear inteiro misto ou PNLIM (MERLIN; BACK, 1975).

A dimensão do problema está relacionada com o número de chaves para resolver o problema. Dado um sistema com n chaves de interconexões, existem 2^n possíveis configurações que correspondem às chaves abertas e chaves fechadas no sistema. Algumas destas configurações não são permitidas por não cumprirem a restrição de radialidade ou uma das restrições operacionais (DELBEM, 2002).

O modelo matemático para o problema de RSDEE pode ser escrito da seguinte maneira segundo Lavorato et al. (2012):

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} G_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$P_i^S - P_i^D - \sum_{j \in \Omega_{bi}} (x_{ij} P_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$Q_i^S - Q_i^D - \sum_{j \in \Omega_{bi}} (x_{ij} Q_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3)$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4)$$

$$(I_{rij}^2 + I_{mij}^2) \leq x_{ij} (\bar{I}_{ij}^2) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (5)$$

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

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

A função objetivo é mostrada em (1), e representa as perdas de potência ativa do sistema, onde G_{ij} é a condutância do ramo ij , x_{ij} representa o estado da chave do ramo ij (aberto ou fechado), V_i é o módulo da tensão na barra i e θ_{ij} é a diferença angular entre as tensões das barras i e j .

As equações (2) e (3) representam as equações de balanço de potência ativa e reativa respectivamente, onde P_i^S e Q_i^S representam as potências ativa e reativa fornecidas pela subestação na barra i , P_i^D e Q_i^D representam as demandas ativa e reativa na barra i e P_{ij} e Q_{ij} representam os fluxos de potência ativa e reativa pelo ramo ij que são obtidas pelas leis de Kirchhoff, as quais assumem a seguinte forma:

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (8)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 B_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (9)$$

A equação (4) representa a restrição dos limites de tensão em cada barra do sistema, onde \underline{V} e \bar{V} representam os limites dos módulos de tensão inferior e superior nas barras.

Na equação (5), \bar{I}_{ij} representa o fluxo máximo de corrente permitido no ramo ij , e I_{rij} e I_{mij} representam as componentes real e imaginária de fluxo de corrente no ramo ij , calculadas como segue:

$$I_{rij} = G_{ij} (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) - B_{ij} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (10)$$

$$I_{mij} = G_{ij} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) + B_{ij} (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (11)$$

Em (8)-(11), B_{ij} é a susceptância do condutor entre as barras i e j . A equação (6) é uma condição necessária para a radialidade do sistema considerando uma subestação no SDEE, onde

nb é o número de barras do sistema.

A equação (7) representa a natureza binária da variável x_{ij} , a qual pode assumir dois estados. Um dos estados é quando o ramo está desligado, onde x_{ij} assume o valor de 0; e o outro estado quando o ramo está ligado, então a variável de decisão x_{ij} assume o valor de 1. As restrições (2) e (3), em conjunto com (6), garantem que uma solução factível do problema, seja radial.

Por último, Ω_b é o conjunto de barras do sistema de distribuição, Ω_{b_i} é o conjunto de barras conectadas à barra i e Ω_l é o conjunto de ramos do sistema.

2.3 FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS RADIAIS E FRACAMENTE MALHADOS

O cálculo de fluxo de potência fornece uma solução para a rede elétrica em regime permanente para uma dada condição de operação. Para resolver o problema de fluxo de potência de um sistema, são necessários alguns dados do sistema tais como: a potência fornecida ao sistema, as impedâncias dos ramos e as cargas nas barras. Com esses dados calculam-se as tensões nas barras e os fluxos de potência ativa e reativa nos elementos da rede.

O primeiro método computacional utilizado para a solução do problema de fluxo de potência foi apresentado por Ward e Hale (1956), e a partir deste foram desenvolvidos outros métodos que vêm sendo utilizados até os dias atuais. Neste trabalho, um algoritmo de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados será utilizado para o cálculo das potências aparentes ou pesos das arestas utilizadas no algoritmo de Prim, também será utilizado um algoritmo de fluxo de potência radial eficiente para o cálculo da função objetivo das propostas de solução e para a verificação das restrições operacionais.

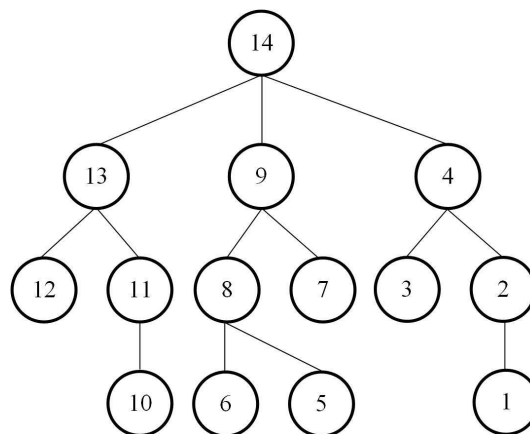
O problema de fluxo de potência pode ser modelado matematicamente como um sistema de equações algébricas não lineares, cuja solução pode ser obtida utilizando-se o método iterativo de Newton. Porém, será utilizado o fluxo de potência em sistemas radiais conhecido como método de varredura (SHIRMOHAMMADI et al., 1988), o qual é muito empregado por pesquisadores que trabalham com sistemas de distribuição por ser conceitualmente mais adequado para este tipo de sistema. Este método é conhecido como varredura porque tem um processo iterativo que faz um percurso das barras terminais em direção à barra de referência e vice-versa, além disso, é muito mais rápido e apresenta melhor convergência que o método de Newton quando aplicado a sistemas de distribuição de energia elétrica.

2.3.1 Fluxo de potência em sistemas radiais

O método utilizado neste trabalho para a solução do problema de fluxo de potência radial é o método de varredura, inspirado em Shirmohammadi et al., 1988. O primeiro passo do método de varredura é renumerar ou reordenar os ramos do sistema (ver Anexo A) de acordo com

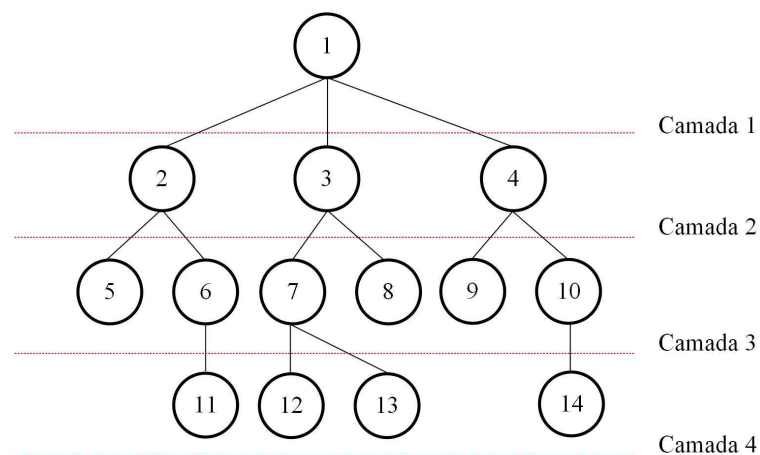
camadas, a fim de identificar o sentido dos fluxos de potência no sistema. Todos os ramos de uma camada são renumerados antes de começar a renumeração dos ramos da seguinte camada. A primeira camada corresponde aos ramos ligados à subestação. A próxima camada contém os ramos ligados à primeira camada e as outras são determinadas da mesma maneira. Na Figura 2 ilustra-se um sistema de distribuição radial de 14 barras com a numeração original dos ramos. Na Figura 3 é mostrado o mesmo sistema com os ramos renumerados utilizando a lógica de camadas.

Figura 2 - Sistema radial de 14 barras antes da ordenação.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 3 - Sistema radial de 14 barras após a ordenação.



Fonte: Elaboração do autor.

O processo de resolução deste algoritmo inicia-se escolhendo um valor para os módulos das tensões nas barras, que normalmente são iguais à tensão da subestação. Assume-se então, que para todas as barras, a tensão $V_{ref} = V_r + jV_m$, onde $V_{ref} = V_r + j0$ e portanto, no passo inicial V_{ref} é o módulo da tensão da subestação.

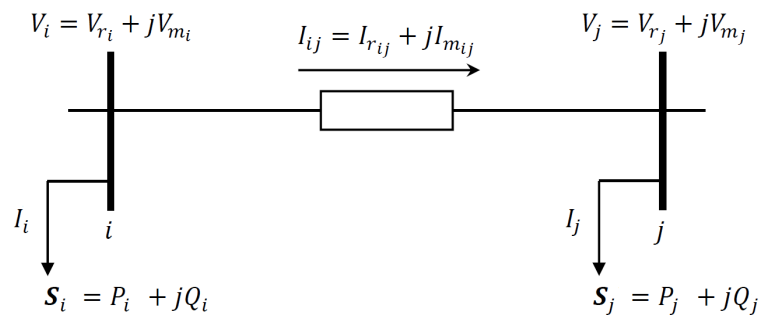
Com as tensões nas barras definidas, calcula-se a corrente de carga em todas as barras e as correntes em todos os ramos do sistema radial. Para encontrar as correntes nas barras, é realizada uma varredura das barras terminais até a barra de referência. Este processo é denominado *backward*. Com as correntes calculadas nos ramos é possível calcular as perdas do sistema de forma aproximada, e também é possível determinar a corrente que está saindo da subestação.

Utilizando-se os valores de correntes nos ramos calculadas no processo *backward* e partindo da subestação, calculam-se os novos valores das tensões em todas as barras do sistema. Este processo é conhecido como *forward*. Como foram obtidos novos valores de tensão de todas as barras, então novamente são calculados os valores de correntes de carga nas barras e as correntes em todos os ramos do sistema, e com esses novos valores de corrente nos ramos, calculam-se os valores das perdas ativas e reativas do sistema, assim como os novos valores de tensão nas barras.

Neste algoritmo, o critério de parada é a variação das perdas entre duas iterações consecutivas. Desta forma, o processo iterativo do algoritmo de fluxo de potência radial termina quando a variação das perdas ativas, expressas como $|\Delta P_a|$, é menor que uma tolerância especificada, isto é, $|\Delta P_a| \leq \varepsilon$.

Na Figura 4 representa-se um trecho de um sistema de distribuição radial com duas barras, a partir da qual são feitas as deduções apresentadas a seguir.

Figura 4 - Sistema de duas barras de um sistema de distribuição radial.



Fonte: Elaboração do autor.

2.3.1.1 Cálculo das correntes nos ramos

A potência e a tensão complexas na barra são definidas respectivamente por (12) e (13):

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (12)$$

$$\vec{V}_i = V_{r_i} + jV_{m_i} \quad (13)$$

Em que P_i e Q_i são a potência ativa e reativa demandadas pela barra i , respectivamente, e

V_{r_i} e V_{m_i} são as componentes real e imaginária da tensão da barra i , respectivamente. A corrente absorvida pela demanda da barra i no sistema, pode ser calculada como mostrado em (14).

$$\vec{I}_i = \left(\frac{S_i}{\vec{V}_i} \right)^* \quad (14)$$

Substituindo (12) e (13) em (14), obtém-se (15).

$$\vec{I}_i = \frac{(P_i V_{r_i} + Q_i V_{m_i}) + j(P_i V_{m_i} - Q_i V_{r_i})}{V_{r_i}^2 + V_{m_i}^2} \quad (15)$$

Separando a equação (15) em parte real e imaginária, têm-se (16) e (17), respectivamente.

$$I_{r_i} = \frac{P_i V_{r_i} + Q_i V_{m_i}}{V_{r_i}^2 + V_{m_i}^2} \quad (16)$$

$$I_{m_i} = \frac{P_i V_{m_i} - Q_i V_{r_i}}{V_{r_i}^2 + V_{m_i}^2} \quad (17)$$

Da mesma forma, pode-se encontrar a corrente requerida pela demanda da barra j :

$$I_{r_j} = \frac{P_j V_{r_j} + Q_j V_{m_j}}{V_{r_j}^2 + V_{m_j}^2} \quad (18)$$

$$I_{m_j} = \frac{P_j V_{m_j} - Q_j V_{r_j}}{V_{r_j}^2 + V_{m_j}^2} \quad (19)$$

Agora, vamos supor que a barra j é uma barra terminal. Nesse contexto, a corrente no ramo ij assume a seguinte forma:

$$\vec{I}_{ij} = I_{r_j} + jI_{m_j} = \vec{I}_j \quad (20)$$

Dessa forma, conhecendo as correntes de carga em cada barra e partindo das barras terminais, pode-se calcular facilmente as correntes elétricas em todos os ramos. Onde $I_{r_{ij}}$ e $I_{m_{ij}}$ são, respectivamente, a parte real e a parte imaginária da corrente no ramo ij . A maneira como se calculam as correntes nos ramos é dada pela equação (21).

$$\vec{I}_{ij} = \vec{I}_j + \sum_{j'l \in \Omega_l} \vec{I}_{j'l} \quad (21)$$

Sendo j a barra mais distante da subestação em cada ramo ij , e \vec{I}_j a corrente absorvida pela carga na barra j . O somatório corresponde aos fluxos de corrente nos ramos ligados à barra j que pertencem às camadas inferiores e Ω_l é o conjunto de ramos do sistema. A equação (21) é aplicada da última camada para a primeira, processo *backward*.

2.3.1.2 Cálculo das tensões nas barras

O seguinte passo para a resolução do método de varredura é calcular as tensões das barras do sistema de distribuição, realizando uma varredura da subestação, ou barra de referência, até a barra terminal, processo *forward*. Para calcular as tensões nas barras, é necessário conhecer o fluxo de corrente nos ramos do sistema, dado por (21).

As equações (22) e (23) mostram uma forma de obter a tensão na barra i a partir da tensão na barra j .

$$\vec{V}_i = V_{r_i} + jV_{m_i} = \vec{V}_j + (R_{ij} + jX_{ij})(I_{r_{ij}} + jI_{m_{ij}}) \quad (22)$$

$$V_{r_i} + jV_{m_i} = V_{r_j} + jV_{m_j} + (R_{ij}I_{r_{ij}} - X_{ij}I_{m_{ij}}) + j(R_{ij}I_{m_{ij}} + X_{ij}I_{r_{ij}}) \quad (23)$$

Que separadas em parte real e parte imaginária, obtêm-se (24) e (25).

$$V_{r_j} = V_{r_i} - R_{ij}I_{r_{ij}} + X_{ij}I_{m_{ij}} \quad (24)$$

$$V_{m_j} = V_{m_i} - R_{ij}I_{m_{ij}} - X_{ij}I_{r_{ij}} \quad (25)$$

Assim, supondo que a barra i está mais perto da subestação, então é possível calcular \vec{V}_j conhecendo \vec{V}_i e a corrente que passa pelo ramo ij . Dessa forma, pode-se calcular todas as tensões das barras partindo da subestação e percorrendo as barras na direção das barras terminais.

2.3.1.3 Cálculo das perdas

Calculadas as tensões e as correntes do sistema, é possível calcular as perdas ativas e reativas nos ramos e no sistema. As perdas em cada ramo do sistema podem ser calculadas com (26) e (27).

$$P_{a_{ij}} = R_{ij}(I_{ij})^2 \quad (26)$$

$$Q_{r_{ij}} = X_{ij}(I_{ij})^2 \quad (27)$$

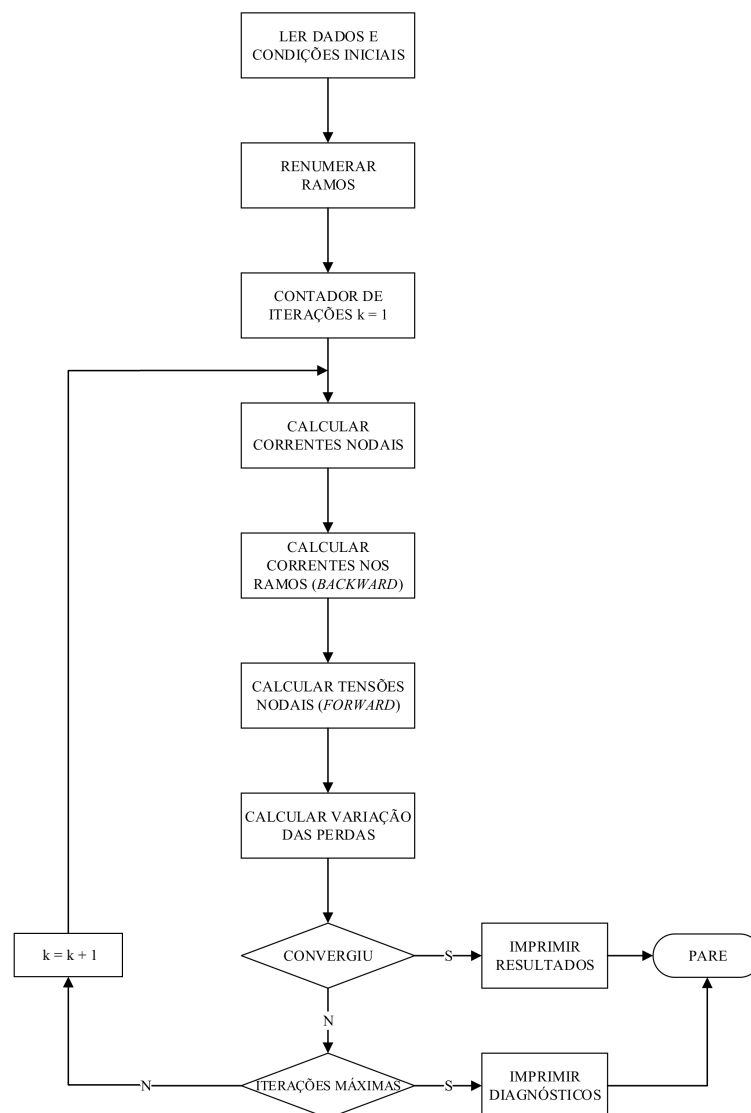
Com as expressões descritas anteriormente, pode-se calcular as perdas ativas e reativas totais do sistema elétrico conforme as equações (28) e (29).

$$P_a = \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij}(I_{ij})^2 \quad (28)$$

$$Q_r = \sum_{ij \in \Omega_l} X_{ij}(I_{ij})^2 \quad (29)$$

Na Figura 5 apresenta-se o fluxograma do algoritmo de fluxo de potência para sistemas radiais utilizando o método de varredura explicado anteriormente.

Figura 5 - Fluxo de potência de varredura para sistemas radiais.

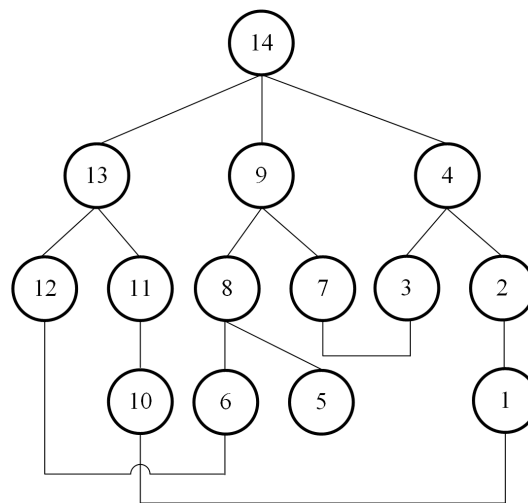


Fonte: Adaptado de Shirmohammadi et al. (1988).

2.3.2 Fluxo de potência em sistemas fracamente malhados

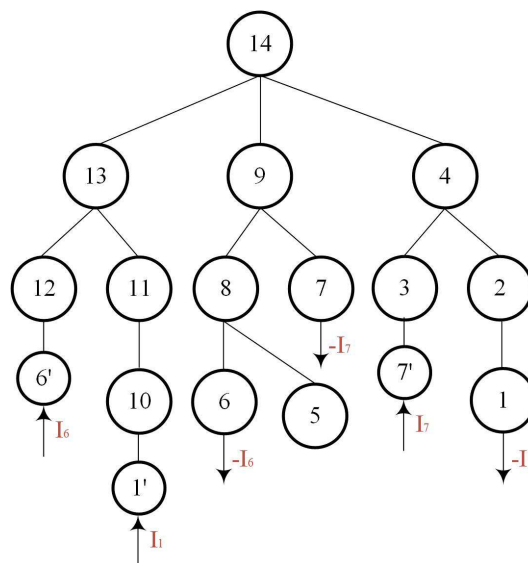
O primeiro passo para resolver um sistema fracamente malhado é transformá-lo em um sistema radial, abrindo uma das linhas que formam a malha em um nó. O procedimento de abertura deve ser realizado para cada uma das malhas nos lugares que se conhecem como *breakpoints*; desta forma, o número de nós fictícios criados será igual ao número de malhas que existam no sistema. O processo utilizado na solução é conhecido como compensação, baseado em Tinney (1972). Na Figura 6 é mostrado um sistema de distribuição fracamente malhado.

Figura 6 - Sistema fracamente malhado.



Fonte: Elaboração do autor.

Para que a rede radial seja equivalente à rede original, devem-se aplicar injeções de corrente nos *breakpoints*, de igual magnitude e com sinal oposto. Isto substitui a corrente que circularia pela linha que foi aberta na configuração original. Desta forma, é possível utilizar o método apresentado na seção anterior e a rede radial resultante pode então ser resolvida pela técnica de varredura. Na Figura 7 é mostrado um sistema de distribuição com as injeções de corrente nos *breakpoints*.

Figura 7 - Sistema com injeções de corrente nos *breakpoints*.

Fonte: Elaboração do autor.

Nos *breakpoints*, a matriz de impedâncias equivalentes é baseada nas seguintes suposições: as cargas e outros elementos de conexão não são representados na matriz, todas as tensões nos

nós são próximas a 1 p.u. e seus ângulos de fase próximos a 0. Na ausência de cargas, a solução do problema de fluxo de potência para redes radiais pode ser alcançada em uma única iteração. Cada uma das tensões nos *breakpoints* pode ser determinada subtraindo-se as tensões nos dois terminais de cada um deles. Este processo deve ser repetido para todos os *breakpoints*, até que todas as colunas da matriz de impedâncias vistas por eles estejam preenchidas (SHIRMOHAMMADI et al., 1988). A impedância equivalente de Thévenin é definida como (30).

$$V = Z_{th}I \quad (30)$$

O processo iterativo de compensação de (SHIRMOHAMMADI et al., 1988) para calcular as correntes nos *breakpoints* usando o circuito equivalente de Thévenin, é apresentado a seguir:

1. Calcular as impedâncias equivalentes de Thévenin Z_{th} (matriz de impedâncias dos *breakpoints* da rede radial), mantendo-a constante durante o processo de compensação;

2. Calcular a tensão equivalente de Thévenin (vetor de tensões nos *breakpoints*, V) da rede radial através dos processos de *backward* e *forward*, incluindo as correntes nos *breakpoints* calculadas na iteração anterior do processo de compensação. O valor inicial das correntes nos *breakpoints* é zero;

3. Calcular a mudança incremental nas correntes dos *breakpoints* usando o circuito equivalente de Thévenin. Na iteração m , a mudança incremental das correntes nos *breakpoints* é dada por (31).

$$\Delta I^{(m)} = Z_{th}^{-1}V^{(m)} \quad (31)$$

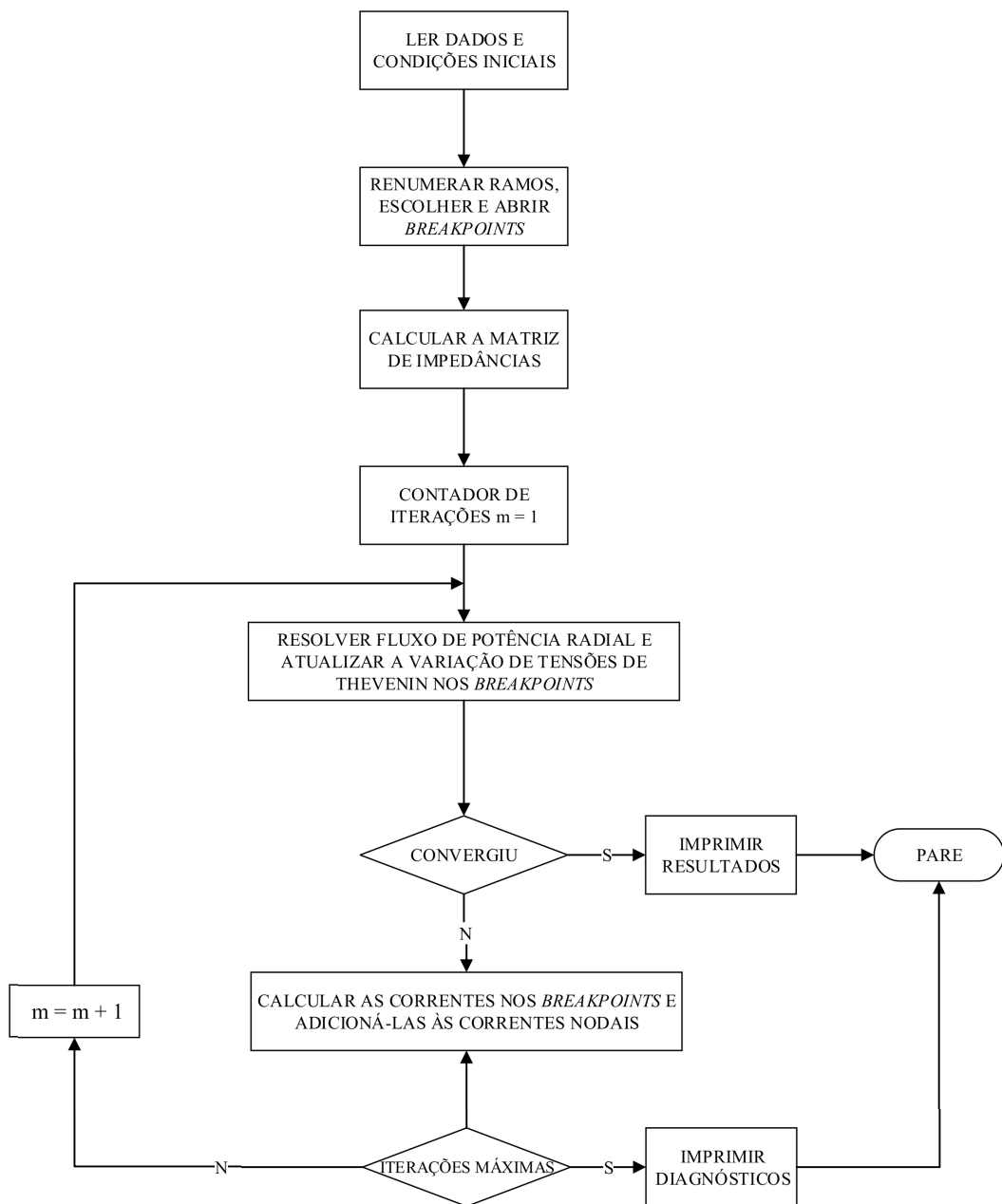
4. Atualizar as correntes nos *breakpoints*. Na iteração m , a atualização é dada por (32).

$$I^{(m)} = I^{(m-1)} + \Delta I^{(m)} \quad (32)$$

5. Repetir os passos 2, 3 e 4 até alcançar a convergência (a máxima tensão nos *breakpoints*, calculada no passo 2, deve estar dentro do limite especificado).

A Figura 8 mostra o fluxograma do método de cálculo do problema de fluxo de potência para redes fracamente malhadas.

Figura 8 - Fluxo de potência para sistemas fracamente malhados.



Fonte: Adaptado de Shirmohammadi et al. (1988).

2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vários métodos têm sido propostos para solucionar o problema de RSDEE, cada um com suas diferentes vantagens e desvantagens e, em sua maioria, focados na redução de perdas ativas do sistema. Eles diferem em relação ao tipo de estratégia utilizada na solução do problema, e, em geral, podem ser classificados como: heurísticas, meta-heurísticas e otimização clássica. Neste capítulo serão referidas as principais propostas existentes na literatura que tratam do

problema de RSDEE.

Inicialmente apresentam-se os trabalhos baseados em métodos heurísticos. Estes métodos apresentam a característica de obter soluções de boa qualidade em tempos muito baixos, porém, as soluções ficam presas no primeiro ótimo local encontrado.

Para contornar o problema em que ficam presas as heurísticas, foram propostos vários trabalhos baseados nas meta-heurísticas para resolver o problema de RSDEE. Os principais trabalhos que utilizam meta-heurísticas são apresentados em seguida.

Por último são apresentados os trabalhos que propõem modelos aproximados ou relaxados para o problema de RSDEE, os quais são resolvidos utilizando técnicas exatas.

2.4.1 Heurísticas

Uma das primeiras propostas documentadas para resolver o problema de reconfiguração surgiu com os investigadores Merlin e Back (1975), os quais utilizam duas metodologias: uma heurística construtiva e um algoritmo de otimização clássica. O método heurístico inicia com o fechamento de todas as chaves de interconexões existentes no sistema radial, fazendo-o malhado e, em seguida, resolve os fluxos de carga, calculando o fluxo de potência aparente em cada ramo. Aquele ramo com o menor fluxo de potência aparente torna-se candidato para manter sua chave de interconexão aberta e o processo é repetido até obter uma configuração radial. Os autores afirmam que, ao abrir a chave com o menor fluxo, o sistema é perturbado o mínimo possível e, assim, certo grau das perdas reduzidas de uma rede malhada pode ser mantido.

Civanlar et al. (1988) propuseram um método heurístico conhecido como troca de ramos. Ao contrário da proposta de Merlin e Back (1975), esta metodologia parte de uma configuração radial, alterando a configuração através da troca entre um ramo ligado e outro desligado, sempre apontando que a radialidade seja mantida. A variação das perdas é calculada utilizando uma expressão matemática que fornece a melhor chave de interconexão que deve ser fechada ou aberta na rede, diminuindo as perdas no sistema.

Pouco depois, Shirmohammadi e Hong (1989) modificaram o método proposto por Merlin e Back (1975) incluindo as restrições de limites de tensão e corrente, além de considerar no cálculo de fluxo de potência, as perdas reativas.

Goswami e Basu (1992) desenvolveram uma metodologia baseada na melhora do algoritmo proposto por Shirmohammadi e Hong (1989). Na metodologia, ao contrário de fechar todas as chaves de interconexões do sistema, só uma chave é fechada para formar um único laço, assim é calculado o fluxo de potência e é achado o ramo com o menor valor de fluxo de potência, o qual é retirado do sistema. Este procedimento é realizado até percorrer todos os laços do sistema. Os resultados obtidos foram melhores que os resultados de Shirmohammadi e Hong (1989).

Baran e Wu (1989) apresentaram uma metodologia baseada no algoritmo de Civanlar et al. (1988), nesta metodologia foi aprimorada a troca de ramos formulando dois métodos para o cálculo do fluxo de potência específico para redes radiais, e assim acelerar a busca da solução ótima com diferentes graus de precisão.

Gomes et al. (2005) apresentam uma heurística que consiste em duas etapas. Na primeira etapa, parte-se de uma configuração malhada, e as chaves de interconexões são abertas em cada passo até obter uma configuração radial. Na segunda etapa, procura-se reduzir as perdas do sistema através da troca de ramos.

2.4.2 Meta-heurísticas

Chiang e Jean-Jumeau (1990) apresentaram uma formulação multi-objetivo em que o número de operações de chaveamento foi colocado como restrição do problema de RSDEE para a redução de perdas e balanceamento de cargas. Para resolvê-lo, utilizaram a meta-heurística de *simulated annealing* e o método ε -restrição para otimização multi-objetivo.

Nara et al. (1992) propuseram o primeiro método baseado no algoritmo genético para resolver o problema de reconfiguração minimizando as perdas. A codificação é feita através de uma representação binária a qual permite a aparição de configurações não radiais.

Romero (2001) propôs uma modificação do algoritmo genético onde, utilizando uma nova codificação, evita a aparição de configurações malhadas.

Em Mendoza et al. (2006) é apresentada uma metodologia que melhora os algoritmos genéticos aplicados ao problema de RSDEE. Neste trabalho, a população inicial é factível, dessa maneira é reduzido o espaço de busca, e os indivíduos gerados pelo algoritmo são, em sua maioria, factíveis com relação à radialidade do sistema e às restrições de operação.

Em Guimarães (2005) desenvolveu-se um algoritmo de busca tabu com memória de curto prazo o qual depois foi melhorado com memória baseada em frequência, objetivando intensidade e diversidade. O algoritmo inicia com uma configuração factível gerada por Shirmohammadi e Hong (1989). O autor observou que quando era utilizada uma solução inicial gerada por um algoritmo heurístico, as configurações encontradas eram de melhor qualidade.

Zhang, Fu e Zhang (2007) utilizam um algoritmo de busca tabu com um operador de mutação que utiliza uma formulação similar à apresentada em (BARAN; WU, 1989), a qual reduz o espaço de busca.

Carreno, Romero e Padilha-Feltrin (2008) propõem um algoritmo genético de Chu-Beasley. O algoritmo utiliza um operador de recombinação eficiente que garante gerar só configurações factíveis, reduzindo o espaço de busca e, assim, são gerados bons resultados com tempo computacional reduzido também.

Em Oliveira (2011) é utilizada a meta-heurística GRASP para minimizar as perdas ativas do sistema de distribuição. Na proposta, todas as chaves de interconexões do sistema estão fechadas no início do processo e, em cada iteração da fase construtiva, se resolve um problema de fluxo de potência para calcular o ponto de operação do sistema. Um ramo é desligado por vez até encontrar uma configuração radial.

Franco et al. (2012) apresentam um algoritmo de busca tabu em que a solução inicial é gerada aleatoriamente com o algoritmo de Prim, e é utilizada a formulação de Baran e Wu (1989) para o cálculo da função objetivo. Somente é calculado o ponto de operação exato para a melhor vizinhança, fazendo com que esta metodologia seja muito rápida.

Em Souza (2013) apresenta-se uma metodologia para resolver o problema de RSDEE, onde é utilizada a meta-heurística GRASP especializada. O objetivo é a minimização de perdas ativas do sistema. Na metodologia proposta, todas as chaves de interconexão do sistema de distribuição estão abertas no início do processo, a cada passo um circuito é conectado no sistema e uma solução factível é construída. A cada iteração é resolvido um problema de programação não linear utilizando um *solver* comercial.

Em Eldurssi e O'Connell (2015) é apresentado um algoritmo genético com uma mutação guiada para o problema de RSDEE multi-objetivo, visando a minimização de perdas, a minimização de chaveamentos e a melhoria dos níveis de tensão.

Por último, em Possagnolo (2015) são apresentadas as meta-heurísticas de busca em vizinhança variável, que resolvem o problema de RSDEE considerando vários níveis de demanda, visando a minimização das perdas. Foram desenvolvidas quatro formas do algoritmo de busca em vizinhança variável: *Basic Variable Neighborhood Search* (BVNS), *Variable Neighborhood Descent* (VND), *Reduced Variable Neighborhood Search* (RVNS) e *General Variable Neighborhood Search* (GVNS), encontrando soluções iguais ou de melhor qualidade que as disponíveis na literatura.

2.4.3 Otimização clássica

Em Merlin e Back (1975) foi desenvolvida uma metodologia para a resolução do problema de RSDEE utilizando a técnica de programação linear inteira *branch and bound*, obtendo uma configuração de boa qualidade.

Em Glamocanin (1990) foi resolvido o problema de reconfiguração como um problema de transporte com custos quadráticos utilizando o método Simplex. A metodologia inicia com uma configuração inicial obtida através da linearização das perdas e, a partir daquela configuração, utiliza-se o método Simplex para melhorá-la.

Abur (1996) apresenta uma metodologia para o problema de RSDEE baseada em um al-

goritmo de programação linear. No trabalho do autor, o algoritmo de programação linear é modificado, ignorando os limites de capacidade dos ramos e resolvendo o problema com o método Simplex.

Jabr, Singh e Pal (2012) propuseram para resolver o problema de reconfiguração, dois modelos. Um dos modelos consiste em um Modelo Convexo de Segunda Ordem Inteiro Misto (PCSOIM) e o outro, um modelo de Programação Linear Inteiro Misto (PLIM). Os autores compararam os dois modelos e verificaram que o PCSOIM é mais rápido para encontrar uma solução factível e mais adequado para aplicações em tempo real, mas o PLIM encontra melhores soluções para sistemas de grande porte.

Finalmente, Borges, Franco e Rider (2014) desenvolveram um modelo de PLIM para resolver o problema de RSDEE que foi testado em sistemas de grande porte. As soluções encontradas com este modelo foram iguais ou de melhor qualidade que as disponíveis na literatura.

3 META-HEURÍSTICAS E METODOLOGIA MULTIPARTIDA

As heurísticas são procedimentos de busca que procuram uma solução global, e que para obtê-la, precisam de uma diversificação ao longo do seu processo para sair de ótimos locais e explorar regiões que possam conter a solução global.

Geralmente a implementação de métodos heurísticos é um processo que conjuga duas características: a intensificação no que se refere à exploração e aproveitamento do espaço de busca, e a diversificação vinculada ao esforço empregado na busca em regiões distantes do espaço. Para obter boas soluções em tempo computacional baixo, deve ser procurado o equilíbrio entre intensificação e diversificação (HERRERA, 2006).

3.1 INTRODUÇÃO ÀS META-HEURÍSTICAS

Quando são abordados problemas cujo espaço de possíveis soluções é fácil de conhecer, a busca se limita a encontrar um ótimo, máximo ou mínimo, que através de métodos exatos forneçam uma solução ao problema, cumprindo um conjunto de restrições. Porém, quando as dimensões e a complexidade matemática do problema são grandes, ocorre o fenômeno de explosão combinatória pela grande quantidade de soluções factíveis e infactíveis existentes, e os métodos exatos deixam de ser uma opção viável pois não é possível encontrar a solução ótima com esforços computacionais aceitáveis.

É para este tipo de problemas que as técnicas de otimização combinatória, heurísticas e meta-heurísticas, surgem como uma alternativa interessante, em que misturando distintos conceitos, exploram e aproveitam adequadamente o espaço de busca, proporcionando soluções de alta qualidade com um tempo computacional razoável.

Os procedimentos meta-heurísticos conceitualmente são superiores aos métodos heurísticos, combinando diferentes conceitos da inteligência artificial, evolução biológica e mecanismos estatísticos, e frequentemente se baseiam nos métodos heurísticos construtivos e de busca local (MARTÍ, 2003).

A grande vantagem das meta-heurísticas sobre a otimização clássica, além do fato que elas não necessariamente precisam de um modelo matemático, é que elas se adaptam mais facilmente a qualquer tipo de problema e os tempos computacionais são geralmente baixos. Porém, a vantagem da otimização clássica é que podem garantir a otimalidade da solução encontrada sempre que as hipóteses para a solução do modelo matemático sejam válidas, o que as meta-heurísticas não podem garantir.

Muitas das meta-heurísticas são estratégias especializadas de dois tipos de heurísticas: a heurística construtiva e a heurística de busca em vizinhança. No caso da heurística construtiva, é utilizada uma estratégia de passo-a-passo e um critério de desempenho. A estratégia de passo a passo consiste, geralmente, em ir adicionando um a um os componentes individuais da solução até encontrar uma solução de boa qualidade factível. No caso do critério de desempenho, este representa a medida relacionada com a variação da função objetivo devido a algumas variações nas grandezas do problema.

Por outro lado, na heurística de busca em vizinhança, o processo é iniciado a partir de uma solução inicial que é transformada na solução corrente. A partir dessa solução, são geradas soluções vizinhas utilizando uma definição de vizinhança. O algoritmo passa para a melhor solução vizinha desde que seja melhor que a solução corrente. O processo é repetido até que a melhor solução vizinha seja de pior qualidade que a solução corrente.

Na utilização das meta-heurísticas em geral deve ser especificado um conjunto de características relacionadas com sua aplicação na solução de um tipo de problema complexo. As características são as seguintes:

- Uma forma de representação ou codificação de uma proposta de solução que deve identificar de maneira adequada um elemento do espaço de busca;
- Uma maneira adequada de identificar a qualidade da solução encontrada;
- Uma maneira de identificar a viabilidade ou inviabilidade de uma proposta;
- Uma estratégia de decisão em relação às propostas de soluções infactíveis;
- Uma estratégia para encontrar a primeira proposta de solução (solução corrente);
- Uma forma de caracterização da vizinhança;
- Uma estratégia para escolher o melhor vizinho que vai se transformar na nova solução corrente.

A diferença fundamental entre as meta-heurísticas está na última característica (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003), mas de todas as características mencionadas a mais importante é a codificação dos elementos do espaço de busca, pois esta condiciona as outras características do problema e a qualidade da estratégia geral de otimização.

A codificação deve permitir encontrar o valor da função objetivo ou seu equivalente, assim como verificar se a proposta de solução é factível ou infactível. Também deve permitir especificar a estrutura de vizinhança para realizar as transições no espaço de busca do problema.

Neste ponto, a escolha do vizinho para realizar uma transição através do espaço de busca também é um aspecto crucial para a obtenção da melhor solução possível, pois dependendo da estratégia de vizinhança a meta-heurística terá a capacidade ou não de sair de ótimos locais e chegar à melhor solução.

3.2 VISÃO GERAL DO MÉTODO MULTIPARTIDA

Os métodos que provêm a origem do que agora é chamado de método multipartida consistem fundamentalmente na aplicação repetida de métodos construtivos. Entre os trabalhos que utilizam esse tipo de procedimentos podem ser encontrados: a programação heurística (MUTH; THOMPSON, 1963), o problema do caixeiro-viajante (HELD; KARP, 1970), e o problema da mochila com restrições individuais e múltiplas. (KOCHENBERGER; MCCARL; WYMAN, 1974; SENJU; TOYODA, 1968).

Nos primeiros trabalhos sobre as metodologias multipartidas, estas eram consideradas como metodologias de exploração local, baseadas na criação de soluções obtidas aleatoriamente. Neste contexto aparece o método Monte Carlo, onde se calculava a função objetivo em pontos gerados aleatoriamente e cuja probabilidade de sucesso melhorava de maneira proporcional ao tamanho da amostra.

Porém, os métodos de busca baseados em otimização local que aspiram encontrar ótimos globais requerem um tipo de diversificação, e uma maneira de encontrar a diversificação desejada é reiniciar a busca a partir de uma nova solução uma vez que a região tem sido explorada, tornando-se em uma estratégia multipartida a qual pode ser utilizada em muitos métodos de busca diferentes. É assim que os procedimentos multipartidas nascem como uma estratégia de diversificação em que é aproveitada uma busca local robusta do espaço de soluções mediante o reinício do procedimento de busca de uma nova solução depois que uma região já foi explorada.

Mais recentemente, depois de Glover (1977) fazer várias ligações à pesquisa multipartida por meio de uma estrutura em que a pesquisa multipartida inclui a busca local para melhorar as soluções iniciais, uma série de extensões desta estrutura foram dadas em Glover (1986), Glover (1989) e Glover (2000), onde são adicionadas estratégias de aleatoriedade controlada, estratégias de aprendizagem, decomposição induzida e processos com memória adaptativa, enfatizando na iteração entre diversificação e intensificação para a criação de processos mais eficientes.

Os primeiros métodos multipartidas eram baseados tipicamente na implementação do passo de reinício ao variar aleatoriamente a seleção da variável que entra na solução. Em problemas com contextos onde era possível mudar a construção completa de uma solução com mudanças onde se esperava que não fosse destruída a factibilidade, era aplicado o enfoque atualmente conhecido como busca local ou busca em vizinhança, em conjunto com o processo construtivo,

num esforço para melhorar as soluções geradas.

Atualmente, esta combinação de procedimentos de busca construtiva e local tornou-se a forma habitual de aplicar os métodos multipartidas. Um dos procedimentos multipartidas mais conhecidos e mencionados na literatura que aplica essa forma de executar o método, é a meta-heurística *Greedy Adaptive Search Procedure* (GRASP), introduzida por Feo e Resende (1995). Em cada iteração do algoritmo é construída uma solução e depois é realizada uma busca local para encontrar o ótimo local.

Os métodos multipartidas se dividem em duas fases: a primeira que consiste na geração da solução e a segunda na qual a solução é melhorada, como ilustrado na Figura 9. Desta maneira, cada iteração produz uma solução local e a melhor de todas as soluções geradas é a incumbente e, portanto, a melhor solução encontrada pelo algoritmo. A solução criada na primeira fase é tipicamente gerada por um algoritmo do tipo construtivo. A segunda fase pode ir desde uma estratégia simples até uma meta-heurística complexa, que pode ou não melhorar a solução.

Figura 9 - Procedimento multipartida.

```

Iniciar  $i = 1$ 
Enquanto (critério de parada não for satisfeito)
{
    Passo 1. (Geração)
        Construir solução  $x_i$ 
    Passo 2. (Busca)
        Aplicar método de busca para melhorar  $x_i$ 
        Fazer  $x'_i$  a solução obtida
        Se ( $x'_i$  melhora a incumbente)
            Atualizar a incumbente
     $i = i + 1$ 
}

```

Fonte: Adaptado de (MARTÍ, 2003).

As metodologias multipartidas modernas usualmente incorporam uma poderosa maneira de diversificação. Sem ela, tais métodos podem ficar restritos a uma pequena região do espaço de soluções, o que torna difícil ou quase impossível encontrar um ótimo global. Neste contexto, aparece o uso de estruturas de memória, que marca uma das diferenças mais relevantes e que constitui o núcleo de um grande número de métodos inteligentes. Foi a meta-heurística de busca tabu a qual lançou esta perspectiva (FLEURENT; GLOVER, 1999), descrevendo métodos que utilizam estruturas avançadas de memória (e, portanto, aprendizagem não-trivial) para guiar uma busca, contribuindo na melhora dos métodos multipartidas.

Em Martí (2003) se identificam algumas características e entre elas três elementos funda-

mentais que podem dar uma classificação aos métodos multipartida, que são memória, aleatoriedade e grau de reconstrução.

- A memória se refere aos elementos que são comuns para alguma solução prévia gerada, a qual fornece uma base para a aprendizagem, onde são orientadas ações que guiam até boas soluções ou, por outro lado, ações que diminuem a probabilidade de aparecer soluções de má qualidade. Isto faz com que, ao invés de recorrer a processos aleatórios de reinício nos quais as decisões atuais não se beneficiam do conhecimento acumulado durante as buscas anteriores, sejam identificadas informações específicas que permitem o aproveitamento do histórico de buscas. Pelo contrário, a não utilização de estruturas de memória é uma estratégia empregada em uma variedade de métodos onde a construção de soluções desligadas é vista como um meio para a amostragem estratégica do espaço de solução.
- A aleatoriedade é uma maneira muito simples de encontrar diversificação, mas sem controle sobre a diversidade obtida, pois em alguns casos pode fornecer resultados muito parecidos. As soluções iniciais podem ser geradas desta forma, ou contrária a ela, de maneira mais sistemática. Mecanismos mais sistemáticos são capazes de controlar as semelhanças entre as soluções geradas como uma maneira de produzir resultados que mostram uma gama útil de diferenças estruturais. Entre os extremos de geração aleatória de soluções e geração sistemática há um significativo número de possibilidades as quais podem ir desde impor controles determinísticos em um processo aleatório, até unir um processo aleatório com um processo sistemático através de várias maneiras de alternâncias.
- O grau de reconstrução é uma medida do número ou proporção de elementos que permanecem fixos de uma geração a outra. A maioria das aplicações constroem a solução de cada geração desde zero, mas algumas estratégias fixam alguns elementos durante o processo de construção que apareceram em soluções geradas previamente.

O mecanismo de reinício dos métodos multipartidas pode ser aplicado em muitos e diferentes métodos de pesquisa. Quando uma nova solução é gerada, várias opções podem ser empregadas para melhorá-la. Sobre estas estratégias, um aspecto a ser definido para o seu melhor desempenho, é decidir se é melhor implementar um método de melhora simples que permita um grande número de iterações globais ou se, ao contrário, é melhor aplicar uma rotina que melhore significativamente através de poucas soluções geradas. Um procedimento simples depende fortemente da solução inicial, mas um método mais elaborado implica mais esforço computacional e por isso pode ser aplicado só umas poucas vezes, reduzindo o espaço de busca.

No capítulo subsequente é apresentada a metodologia multipartida utilizada neste trabalho para resolver o problema de RSDEE, onde são explicadas, em detalhes, as fases da metodologia e as estratégias e algoritmos implementados para o desenvolvimento do método.

4 METODOLOGIA MULTIPARTIDA APLICADA AO PROBLEMA DE RSDEE

Neste capítulo apresenta-se a metodologia proposta neste trabalho, onde se aplica a meta-heurística multipartida na resolução do problema de RSDEE. Como foi mencionado anteriormente, os métodos multipartidas constam de duas fases: a primeira que consiste em gerar uma solução e a segunda que consiste em melhorá-la. Por conseguinte, inicialmente é abordado o procedimento que será utilizado para obter uma solução inicial de boa qualidade. Posteriormente, mostra-se como foi calculada a função objetivo e como foram consideradas as restrições de operação e de radialidade do problema e a forma de codificação da proposta de solução. Finalmente são discutidas as melhorias feitas no algoritmo para melhorar as soluções iniciais.

No algoritmo apresentado no Capítulo 3, o primeiro passo consiste em determinar uma solução inicial, que no caso do problema de RSDEE, pode ser uma topologia radial gerada aleatoriamente. Porém, ao obter uma solução inicial de boa qualidade, o desempenho da metodologia pode ser melhorado. O método utilizado para determinar a solução inicial é o algoritmo de Prim, o qual é discutido em seguida.

4.1 OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO INICIAL

O algoritmo de Prim é um algoritmo que pertence à teoria de grafos para encontrar uma árvore geradora mínima (MST) para um grafo completo, sem direção, e cujas arestas têm pesos, os quais são números reais conhecidos (positivos, negativos ou nulos).

Em outras palavras, o algoritmo encontra um subconjunto de arestas que formam uma árvore com todos os vértices, onde o peso total das arestas na árvore é o mínimo possível. O algoritmo foi proposto em 1930 pelo matemático Vojtech Jarník, e depois, de maneira independente foi desenvolvido por Robert C. Prim em 1957, de quem recebeu seu nome.

O algoritmo de Prim é uma técnica de otimização exata para o problema de árvore geradora mínima, isto é, o algoritmo de Prim sempre encontra a solução ótima do problema de árvore geradora mínima, onde a árvore geradora começa a partir de um vértice qualquer, e seu incremento é feito por meio de arestas, sempre mantendo a árvore acíclica e conexa. A aresta a ser introduzida deve ser a de menor peso, assim, uma a uma são incluídas as arestas, aumentando a arborescência inicial até que todos os nós ou vértices são incluídos.

Neste trabalho é utilizado o algoritmo de Prim para a geração da solução inicial do problema de RSDEE, onde os sistemas malhados correspondem aos grafos conexos mencionados anteriormente, e a árvore geradora mínima corresponde a uma topologia radial com perdas mí-

nimas. Apesar de o Prim ter sido proposto como uma árvore geradora mínima, para o problema de RSDEE é feita uma adaptação para que o algoritmo encontre um subconjunto de ramos em que estes sejam escolhidos de acordo com seu máximo peso possível. Em outras palavras, o problema pode ser considerado como um problema de árvore geradora máxima.

Para os valores dos pesos de cada aresta ou ramo dos sistemas é utilizada a potência aparente, calculada resolvendo um problema de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados. Em um sistema malhado, a potência aparente calculada seria a potência ideal, porém, os sistemas de distribuição de energia elétrica operam de forma radial, e, portanto, os ramos mais adequados para formar essa topologia radial seriam aqueles em que a potência aparente é maior. Considerando o exposto, o sistema sofrerá a menor perturbação possível, e o valor total das perdas que forneça o algoritmo será a mais aproximada ao ótimo global do sistema malhado.

Os passos para a geração da solução inicial através do algoritmo de Prim são os seguintes:

Etapa preliminar: São obtidas as potências aparentes de cada ramo com a resolução de um problema de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados;

Início: O algoritmo começa com todos os ramos abertos e com os pesos definidos a partir da potência aparente de cada ramo. Para iniciar o processo, é escolhido o nó da subestação, o qual deve ser marcado;

1. Identificar os ramos ligados aos nós marcados;
2. Verificar os nós terminais dos ramos identificados que não estejam marcados e que não gerem malha com os ramos já adicionados, e procurar pelo ramo com maior peso;
3. Incluir ao sistema o ramo com o maior peso e marcar seu nó terminal;

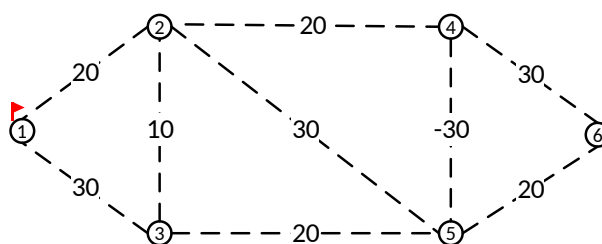
Voltar ao passo 1 e repetir até não tiver nenhum nó sem marcar;

Fim: Calcular a função objetivo para a topologia radial gerada resolvendo o problema de fluxo de potência radial.

No algoritmo mostrado anteriormente, é fechada uma chave do sistema em cada passo, considerando o peso do ramo correspondente à informação da potência aparente que circula pelas linhas do sistema. É de salientar que o algoritmo de Prim seria um algoritmo exato para o problema de RSDEE desde que os pesos das arestas sejam exatamente conhecidos, o qual depende de que os pesos nas suas arestas sejam os ideais para alcançar o ótimo global sempre que for implementado. Porém, no problema de RDSEE essa informação não se conhece, e o uso dos fluxos de potência aparente do sistema malhado como pesos fornece apenas uma solução inicial de boa qualidade com um esforço computacional insignificante. Portanto, pode ser gerada uma solução de boa qualidade usando os valores de fluxo de potência aparente do sistema malhado como se fossem os “pesos ideais” dos ramos.

Para explicar melhor o algoritmo, é apresentado o seguinte exemplo. Na Figura 10 é mostrado um grafo com 6 nós e 9 ramos, cada um deles com seu respectivo peso. Fazendo uma analogia com o problema de RSDEE, considera-se que o nó 1 seja o nó da subestação e os outros nós sejam de consumidores. Considera-se também que todos os ramos possuem chaves e que elas estão inicialmente abertas. Por último, considera-se que um caminho fechado em um grafo é denominado laço.

Figura 10 - Início do algoritmo de Prim.

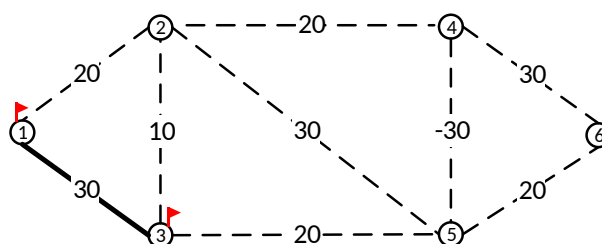


Fonte: Elaboração do autor.

O algoritmo de Prim começa escolhendo o nó da subestação, o qual dever ser marcado. Para o caso da Figura 10, é o nó 1. O seguinte passo é identificar os ramos ligados ao nó da subestação, sendo aqueles ramos com pesos de 20 e de 30 que conectam ao ramo 2 e 3 do sistema, respectivamente.

Como o algoritmo está na etapa inicial, nenhum ramo diferente da subestação foi marcado, portanto, a seleção de um deles não gerará laço. Continuando com o terceiro passo, é selecionado então, o ramo com o maior peso, que para esta primeira etapa seria o ramo com o peso de 30, e é marcado o nó número 3 que corresponde ao nó final ligado ao ramo escolhido. O procedimento descrito anteriormente é representado na Figura 11.

Figura 11 - Primeira iteração do algoritmo de Prim.

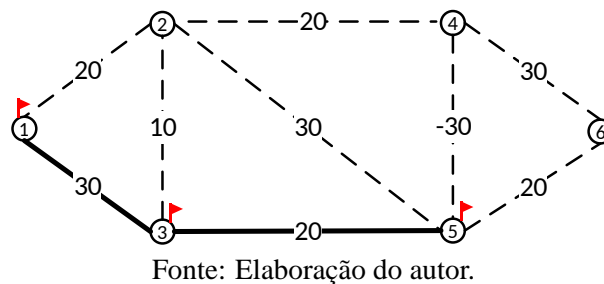


Fonte: Elaboração do autor.

Recomeçando o processo, desta vez são analisados os ramos conectados ao nó 1 e ao nó 3. Para o nó 1 tem-se a opção do ramo com peso 20 ligado ao nó 2. Para o caso do nó 3, têm-se os ramos com pesos 10 e 20 ligados ao nó 2 e ao nó 5, respectivamente. Para o problema de RSDEE deve ser escolhido aquele ramo com o maior peso e que mantenha a radialidade do sistema, porém, nesta iteração existem dois ramos que cumprem com ambas condições, e, portanto, é preciso definir um critério que determine a escolha do ramo quando esta situação

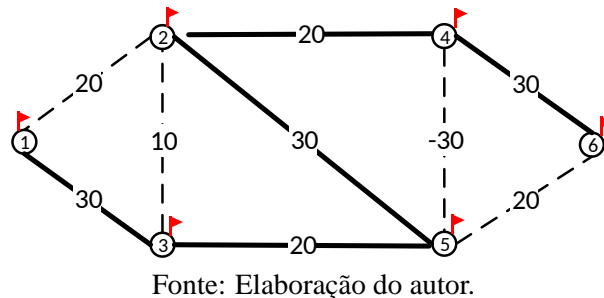
se presente. Para o algoritmo desenvolvido neste trabalho, esse critério consiste em escolher o ramo conectado ao último nó marcado e analisado. Para o exemplo apresentado, o último nó marcado e analisado é o nó 3, então se seleciona o ramo com peso 20 que conecta ao nó 5. A chave correspondente ao ramo é fechada, e o nó é marcado, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Segunda iteração do algoritmo de Prim.



O procedimento a cada iteração continua da mesma maneira, seguindo os passos descritos no algoritmo e explicados anteriormente. Na terceira iteração é selecionado o ramo com peso 30 que conecta o nó 5 ao nó 2, uma vez mais, sendo esse o ramo com o maior peso e que não gera nenhum laço no sistema. Da mesma forma, na quarta iteração é selecionado o ramo com peso 20 que conecta o nó 2 com o nó 4 e, posteriormente na última iteração, é selecionado o ramo com peso 30 que conecta o nó 4 com o nó 6. O sistema resultante é representado na Figura 13.

Figura 13 - Finalização do algoritmo de Prim.



Na quarta iteração, quando são analisados os nós 1, 3, 5 e 2, existem dois ramos com o peso maior, ambos ligados ao nó 2. Porém, a seleção de um desses ramos poderia levar à geração de um laço, que é o caso do ramo que conecta o nó 2 com o nó 1. Portanto, como o fechamento dessa chave não cumpre com a condição de radialidade, ela é descartada e é selecionado o outro ramo que cumpre com a restrição, ou seja, aquele que conecta o nó 2 com o nó 4.

O algoritmo de Prim apresentado para gerar somente soluções radiais possibilita que sejam obtidas todas as árvores geradoras (sistemas) possíveis, assim, qualquer solução da região factível do problema de RSDEE com relação à restrição de radialidade pode ser obtida.

Para gerar outras soluções de qualidade e, eventualmente, a solução ótima, pode-se realizar pequenas perturbações nos “pesos ideais” (valores de fluxo de potência aparente do sistema

malhado) e processar novamente o algoritmo de Prim. Este procedimento consiste em fazer uma variação aleatória dos pesos dos ramos, ou seja, dos fluxos de potência aparente em cada ramo, gerando múltiplos sistemas radiais diferentes, e resolvendo tantos fluxos de potências radiais quanto soluções aleatórias obtidas até chegar à melhor solução possível.

Na Tabela 1 apresenta-se os dados das potências aparentes em cada ramo para o sistema de 14 barras, calculadas com a resolução de um problema de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados, onde os ramos são ordenados do maior para o menor peso de cada ramo.

Tabela 1 - Potência aparente em cada ramo para o sistema de 14 barras.

Ramo	Nó origem	Nó destino	Peso [kVA]
5	14	9	11.177,598
1	14	13	11.050,432
10	14	4	7.605,066
6	9	8	7.324,979
2	13	12	5.893,250
9	8	5	4.819,208
12	4	2	3.905,061
13	2	1	2.947,928
14	12	6	2.852,675
3	13	11	2.804,986
11	4	3	2.514,548
8	8	6	2.285,190
15	7	3	1.977,198
4	11	10	1.256,467
16	10	1	796,400
7	9	7	632,285

Fonte: Elaboração do autor.

Novos pesos podem ser encontrados usando a relação: $S' = S \pm \%S$, com uma porcentagem de variação aleatória definida entre 0% e 10%.

A porcentagem entre 0% e 10% foi determinada depois de realizar vários testes com perturbações desde $\pm 5\%$ até $\pm 25\%$ e verificar que os melhores resultados para os sistemas foram encontrados com o valor percentual definido anteriormente.

Como pode-se observar na Tabela 1, alguns pesos estão muito distantes dos outros, e uma perturbação de 10% sobre esses valores poderia não afetar de maneira significativa e não ter o impacto desejado sobre o peso do ramo. Portanto, não há certeza de que o algoritmo selecione um determinado ramo ao invés de um outro para encontrar uma melhor solução.

Uma estratégia para evitar as diferenças tão grandes entre os pesos de cada ramo é a normalização dos valores das potências aparentes (pesos) dos ramos. A Tabela 2 mostra os dados para o sistema de 14 barras, onde os ramos são ordenados do maior para o menor peso normalizado de cada ramo.

Tabela 2 - Potência aparente normalizada em cada ramo para o sistema de 14 barras.

Ramo	Nó origem	Nó destino	Peso normalizado
5	14	9	35
1	14	13	34
10	14	4	33
6	9	8	32
2	13	12	31
9	8	5	30
12	4	2	29
13	2	1	28
14	12	6	27
3	13	11	26
11	4	3	25
8	8	6	24
15	7	3	23
4	11	10	22
16	10	1	21
7	9	7	20

Fonte: Elaboração do autor.

Para esses pesos foram realizados testes da mesma maneira que com os pesos não normalizados para determinar a porcentagem a ser utilizada na geração de valores aleatórios e para a obtenção de novas configurações ou soluções iniciais.

Os valores das porcentagens analisadas foram desde $\pm 5\%$ até 50% , fazendo uma ênfase maior em porcentagens entre $\pm 5\%$ e 10% , pois os valores normalizados dos pesos encontram-se muito mais próximos um do outro, e uma porcentagem pequena, a diferença dos pesos sem normalizar, poderia ter o impacto desejado no algoritmo para a geração de novas soluções iniciais. Uma vez efetuados os testes, verificou-se que os melhores resultados com os pesos normalizados foram encontrados com uma variação entre 0% e 5% .

4.2 CÁLCULO DA FUNÇÃO OBJETIVO E VERIFICAÇÃO DE RESTRIÇÕES

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessário aplicar um algoritmo de fluxo de potência rápido para sistemas de distribuição radiais, o qual calcula as tensões em todas as barras e as correntes em todos os ramos. Estes valores são utilizados para o cálculo das perdas do sistema (função objetivo do problema), e para a verificação de factibilidade das propostas de solução.

Portanto, dispondo dos valores das correntes nos ramos do sistema calculadas com o fluxo de potência para o sistema radial, e com os valores dados nos sistemas testes utilizados neste trabalho, o valor das perdas, para cada topologia radial gerada, pode ser calculada usando (33).

$$v = \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^2 \quad (33)$$

As restrições de balanço de potência (2) e (3) são satisfeitas pelo algoritmo de fluxo de potência radial e, portanto, não precisam ser analisadas. Porém, as restrições de tensão mínima nas barras e as restrições de correntes nos ramos, devem ser verificadas. Para isto, as restrições são penalizadas na função objetivo, assim, as soluções não factíveis assumem valores de função objetivo muito grandes e não são consideradas ou tidas em conta para a solução final obtida pelo algoritmo. A equação (34) mostra a função objetivo penalizada.

$$v' = v + FP \left(\sum_{i \in \Omega_b} \mu_i |(V - V_i)| + \sum_{ij \in \Omega_l} \alpha_{ij} |(I_{ij} - \bar{I}_{ij})| \right), \quad (34)$$

onde FP é o fator de penalização que dever ser grande. Neste trabalho, o FP é igual a 10^4 , μ representa um parâmetro que assume o valor de 0 se a tensão em uma barra i do sistema não estiver violando o limite inferior, e assume o valor de 1 em caso contrário. O parâmetro α análogo ao μ assume o valor de 0 se a corrente não estiver violando o limite superior, e assume o valor de 1 em caso contrário.

4.3 CODIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A proposta para a codificação da operação de ramos está baseada primeiramente na condição que a topologia ou configuração do sistema deve ser sempre uma topologia radial. O problema de RSDEE apresenta variáveis do tipo binário no que se refere à operação ou não operação dos ramos do sistema, portanto, uma proposta simples consiste em codificar o número do ramo que deve estar operando (chave de interconexão fechada) ou que deve estar fora de operação (chave de interconexão aberta).

Para analisar a proposta obtida dos ramos que devem fazer parte do sistema radial, é necessário primeiro considerar que existem configurações radiais que devem ser descartadas pela baixa qualidade da sua função objetivo devido a sua penalidade, as quais só podem ser conhecidas depois de resolver o fluxo de potência radial para calcular as perdas e verificar as restrições operacionais do problema. Como foi descrito anteriormente, o algoritmo de Prim fornece a informação da topologia radial obtida que pode ser vista como um arranjo vetorial em que são fixados um conjunto de $nb - 1$ variáveis cujo valor corresponde a $x_{ij} = 1$ e que representam uma topologia radial, e as restantes que tomam o valor de $x_{ij} = 0$, as quais representam os ramos fora de operação.

Considerando a informação fornecida pelo algoritmo de Prim, uma proposta de codificação pode ser feita através de um vetor C , em que as variáveis que tomam o valor de 0, ou seja, aquelas que correspondem às chaves abertas, estão contidas no vetor de codificação. Desta maneira, é cumprida sempre a restrição de radialidade (6), garantindo que as propostas de solução sejam sempre factíveis topologicamente. Assim, para o sistema de 14 barras mostrada na Figura 1, a topologia é codificada na forma mostrada na Figura 14.

Figura 14 - Codificação da proposta de solução.

C	14	15	16
---	----	----	----

Fonte: Elaboração do autor.

O vetor C sempre será do tamanho correspondente ao número de ramos abertos no sistema. Desta forma, o vetor de codificação será compacto e estará fornecendo simultaneamente a informação do número total de chaves abertas, o ramo correspondente a cada chave aberta, e também o número de laços existentes no sistema.

4.4 MELHORIA LOCAL

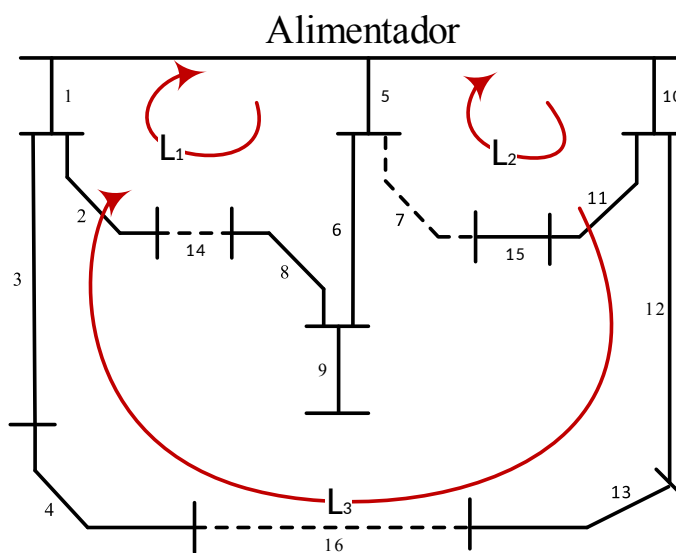
A melhoria local é a segunda fase do método multipartida. Esta fase tem como objetivo tentar melhorar a solução encontrada na fase construtiva para obter uma melhor função objetivo. A proposta consiste em fazer uma busca local através da troca de ramos.

Nesta etapa consideram-se os ramos que ficaram desligados do sistema na primeira fase (geração da solução inicial radial) e os laços aos quais pertenciam no sistema malhado. Desta forma, propõe-se fechar o ramo que se encontra aberto, enquanto um dos ramos adjacentes ou vizinhos dentro do laço correspondente é desligado, conservando a configuração radial. Isto é feito para cada vizinho adjacente.

Para apresentar esta estrutura de vizinhança, utiliza-se como exemplo o sistema da Figura

15. Neste sistema podem-se identificar três laços independentes. O primeiro laço L_1 formado pelos ramos 1, 2, 14, 8, 6 e 5; L_2 formado por 5, 7, 15, 11 e 10; e L_3 formado por: 1, 3, 4, 16, 13, 12 e 10. A proposta de busca local consiste então, em fechar o ramo de ligação de um laço, por exemplo, o ramo 14 do laço L_1 , e abrir um ramo deste laço (2 ou 8) para conservar a topologia radial. Assim, para a topologia radial mostrada existem 6 soluções vizinhas radiais.

Figura 15 - Sistema de 14 barras com identificação de laços.



Fonte: Elaboração do autor.

Desta maneira, a técnica para a melhoria local está constituída pelos seguintes passos:

1. Introduzir no sistema o ramo desligado na fase construtiva e identificar o laço formado por este ramo;
2. Retirar os ramos (um ramo por vez) que estão diretamente conectados ao ramo que foi introduzido no sistema no passo 1 (adjacentes ou vizinhos do lado esquerdo e direito);
3. Calcular as perdas de cada nova configuração e comparar com o valor da função objetivo inicial, chamada de solução corrente. Caso exista uma melhor função objetivo, atualizar a solução corrente, atualizar a configuração do sistema, atualizar os laços independentes, e ir ao passo 4. Caso contrário, passar ao seguinte laço e voltar ao passo 1;
4. Introduzir o ramo retirado no passo anterior (com melhor função objetivo), abrir os ramos adjacentes de ambos lados (um por vez) e voltar ao passo 3.

Repetir os passos até que todos os laços do sistema tenham sido analisados. Para calcular as perdas ativas do sistema (função objetivo) foi utilizado um fluxo de potência de varredura (SHIRMOHAMMADI et al., 1988) que foi mostrado no Capítulo 2.

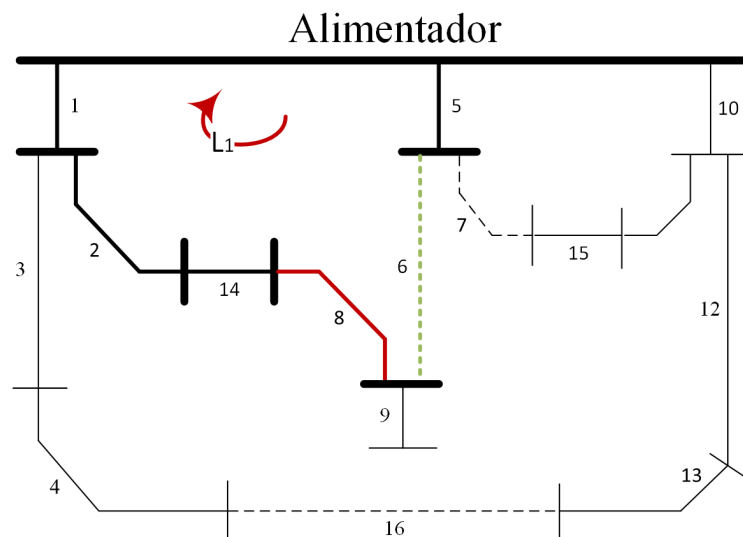
Para melhor compreensão, é apresentada a busca local no laço L_1 para o sistema teste de 14 barras mostrado na Figura 15, com perdas ativas de 483,86 kW. O primeiro passo consiste em introduzir ao sistema o ramo desligado, ramo 14. O seguinte passo consiste em retirar um dos

corrente, de maneira que a função objetivo calculada passa a ser a solução corrente para o sistema.

A busca local continua e é feita a partir desta configuração. Assim, tem-se que o ramo 8 deve ser o ramo introduzido no sistema, e seus ramos adjacentes ou vizinhos (14 e 6) devem ser retirados da configuração para calcular as perdas e compará-las com a nova solução corrente.

Como já é conhecida a função objetivo para a configuração com o ramo 14 fora do sistema, então é retirado o vizinho pelo lado direito, que corresponde ao ramo 6. A nova configuração é mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Terceira iteração da busca local no primeiro laço.



Fonte: Elaboração do autor.

A função objetivo que foi calculada com esta configuração é de 705,01 kW, piorando a solução atual e, portanto, não é considerada. Como o valor das perdas não melhora com a troca de ramos para os vizinhos do ramo 8, então a busca local é concluída no primeiro laço e deve-se começar a busca no laço seguinte.

No L_1 , a configuração incumbente fica com a chave aberta corresponde ao ramo 8, e com um valor de perdas de 466,127 kW. A melhoria local segue o mesmo procedimento explicado anteriormente para cada laço.

Para o sistema de grande porte de 136 barras e de 417 barras, foi feita uma pequena alteração na busca local. Esta nova busca também é realizada em cada laço, com os ramos vizinhos da chave aberta e verificando a função objetivo.

A diferença do procedimento consiste em que, ao invés de mudar de configuração em cada laço sempre que as perdas sejam menores, o algoritmo vai salvar a informação do ramo que poderia ser trocado e a informação da sua função objetivo. Desta maneira, a busca local vai ser sempre realizada comparando as perdas com a função objetivo inicial, assim, quando sejam

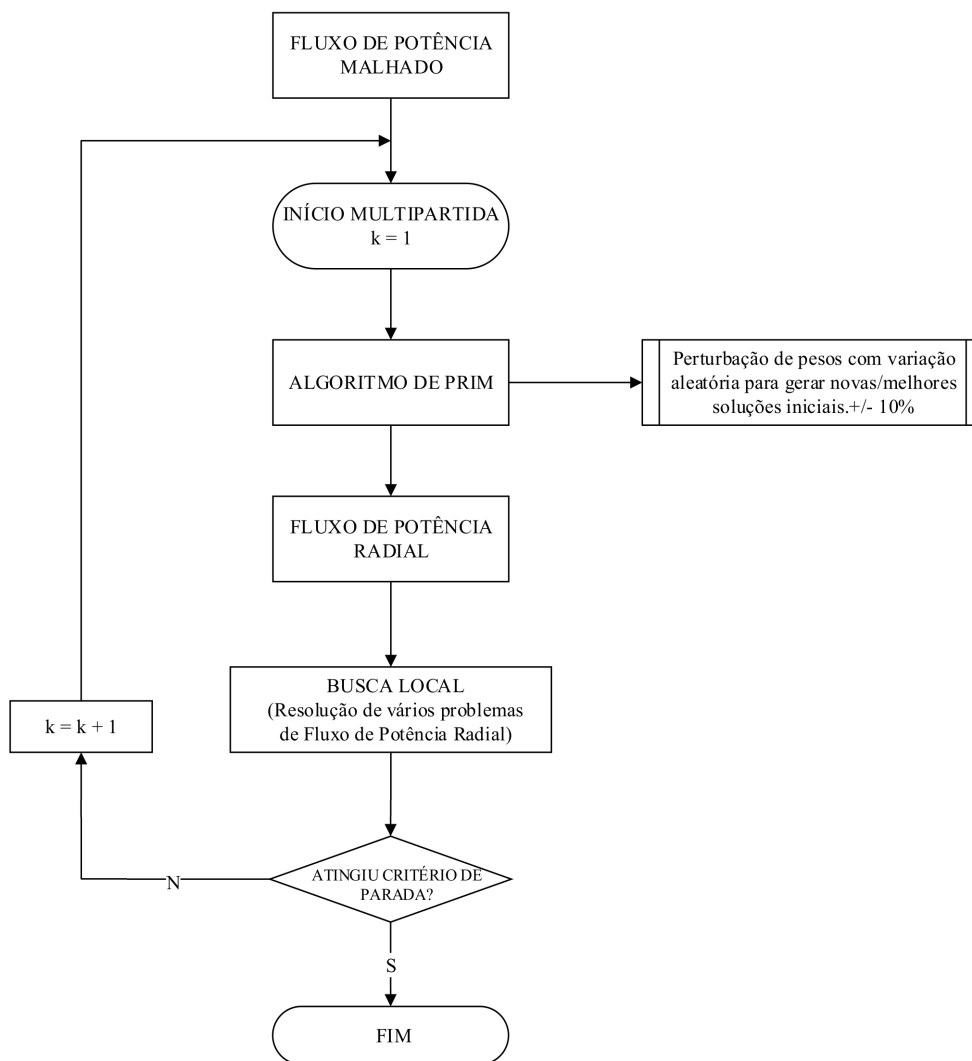
analisados todos os laços, só ao final da busca vai ser selecionado o ramo que ao ser fechado, tiver a melhor função objetivo global. A melhoria local para quando não for encontrada uma melhor solução.

4.5 METODOLOGIA MULTIPARTIDA

De forma geral, e considerando os procedimentos e algoritmos descritos anteriormente, um fluxograma para a metodologia multipartida é mostrado na Figura 19.

Foram definidos dois critérios de parada. O primeiro consiste em atingir 25 iterações. O segundo, quando a melhor solução não melhore após 5 iterações consecutivas. Em qualquer caso, o algoritmo converge, e a melhor solução é entregue pela metodologia multipartida.

Figura 19 - Fluxograma da metodologia multipartida aplicada.



Fonte: Elaboração do autor.

5 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos testes realizados utilizando a metodologia proposta no trabalho para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. A metodologia e os algoritmos desenvolvidos foram escritos em linguagem de programação C++ e todas os testes foram feitos utilizando um processador Intel Core i5 de 2,50 GHz e 4,27 GB de memória RAM. Os testes computacionais foram realizados utilizando-se quatro sistemas de distribuição disponíveis na literatura. Os quatro sistemas utilizados para validar as metodologias são: o sistema de 14 barras apresentado por Civanlar et al. (1988), sistema de 33 barras apresentado por Baran e Wu (1989), sistema de 84 barras apresentado por Chiou, Chang e Su (2005), o sistema de 136 barras apresentado por Mantovani, Casari e Romero (2000) e o sistema de 417 barras apresentado por Bernal-Agustín (1998). Para validar os resultados, estes são comparados com os obtidos por um modelo PLIM que foi implementado e resolvido com o *solver* comercial (CPLEX,2008) por Borges, Franco e Rider (2014). Os dados dos sistemas testados estão descritos no Anexo A. Assume-se como limite mínimo de tensão no sistema o valor de 0,93 pu.

5.1 SISTEMA DE 14 BARRAS

O sistema de 14 barras é um sistema de pequeno porte proposto por Civanlar et al. (1988) que possui 13 barras de cargas, 1 subestação e 16 ramos. A tensão na subestação é de 23 kV e as condições de carga total de potência ativa e reativa são 28.700 kW e 5.900 kVAr, respectivamente. Este sistema possui três ramos de interconexões, sendo os ramos 14, 15 e 16 aqueles que inicialmente se encontram abertos, ilustrados pelas linhas tracejadas na Figura 1.

A metodologia considera que todos os ramos possuem chaves de interconexões. Considerando que a metodologia proposta gera apenas soluções radiais, o espaço de busca fica restrito a 190 soluções radiais possíveis, como mencionado no Capítulo 2.

Na Tabela 3 é mostrado o estado inicial e o estado final do sistema após a aplicação do algoritmo de Prim para a geração da solução inicial radial.

Tabela 3 - Resultados comparativos para o sistema de 14 barras.

Configuração	Perdas [kW]	Chaves abertas	Tempo [s]
Inicial	511,430	14, 15, 16	-
Prim	466,127	7, 8, 16	< 0,001
CPLEX	466,127	7, 8, 16	0,380

Fonte: Elaboração do autor.

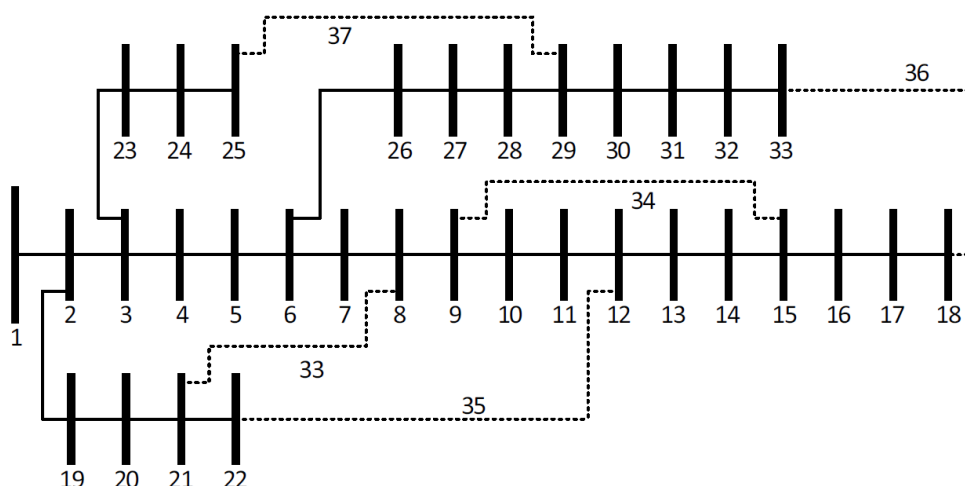
As chaves de interconexões abertas na configuração final e as perdas ativas desta configuração são iguais à solução encontrada na literatura para o sistema de 14 barras, onde o resultado do fluxo de potência radial para o sistema mostra que o valor das perdas é de 466,13 kW e a tensão mínima nas barras é de 0,9716 pu.

Portanto, pode-se verificar que o algoritmo proposto para encontrar a solução inicial foi suficientemente eficiente como para encontrar o ótimo global deste problema de pequeno porte sem realizar a busca local, reduzindo as perdas em 8,86%.

5.2 SISTEMA DE 33 BARRAS

O sistema de 33 barras é um sistema teste que possui 32 barras de carga, 1 subestação e 37 ramos. A tensão na subestação é de 12,66 kV e as condições de carga total de potência ativa e reativa são 3.715 kW e 2.315 kVAr, respectivamente. Este sistema possui cinco ramos de interligações. Inicialmente as chaves abertas são 33, 34, 35, 36 e 37 e estão representadas por linhas tracejadas na Figura 20. Os dados deste sistema são apresentados no Anexo A.

Figura 20 - Sistema de distribuição radial de 33 barras.



Fonte: (BARAN; WU, 1989).

Na Tabela 4 apresentam-se o estado inicial do sistema, os resultados obtidos com o algoritmo de Prim, e as configurações correspondentes de cada um.

Tabela 4 - Estado inicial e resultados do algoritmo de Prim para o sistema de 33 barras.

Configuração	Perdas [kW]	Chaves abertas	Tempo [s]
Inicial	202,677	33, 34, 35, 36, 37	-
Prim	140,706	7, 10, 14, 28, 32	< 0,001

Fonte: Elaboração do autor.

O algoritmo de Prim gera uma solução com perdas de 140,706 kW, o que representa uma redução de 30,576% em relação às perdas da configuração inicial, e tensão mínima nas barras de 0,9413 pu. A partir dessa solução inicial obtida com o algoritmo de Prim, foram modificados as potências aparentes (pesos) com porcentagens aleatórias entre 0% e 10%, e os pesos normalizados com porcentagens aleatórias entre 0% e 5%, para encontrar uma melhor solução ao problema. Os resultados obtidos com a perturbação dos pesos normalizados, foram piores do que a perturbação com os pesos normais (potências aparentes), portanto, esses resultados foram descartados.

Depois de 200 iterações do algoritmo, foram selecionados os resultados com valores de perdas menores ou iguais que o valor obtido pelo algoritmo de Prim. Na Tabela 5 são mostradas as melhores topologias encontradas na fase construtiva, incluída a configuração do Prim.

Tabela 5 - Resultados da fase construtiva para o sistema de 33 barras.

Pesos aleatórios	Perdas [kW]	Chaves abertas
Config. 1	139,551	7, 9, 14, 32, 37
Config. 2	139,978	7, 9, 14, 28, 32
Config. 3 (Prim)	140,706	7, 10, 14, 28, 32

Fonte: Elaboração do autor.

A melhor configuração obtida na fase construtiva com a variação aleatória dos pesos do Prim, o resultado obtido com a metodologia multipartida e o resultado encontrado na literatura são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados comparativos para o sistema de 33 barras.

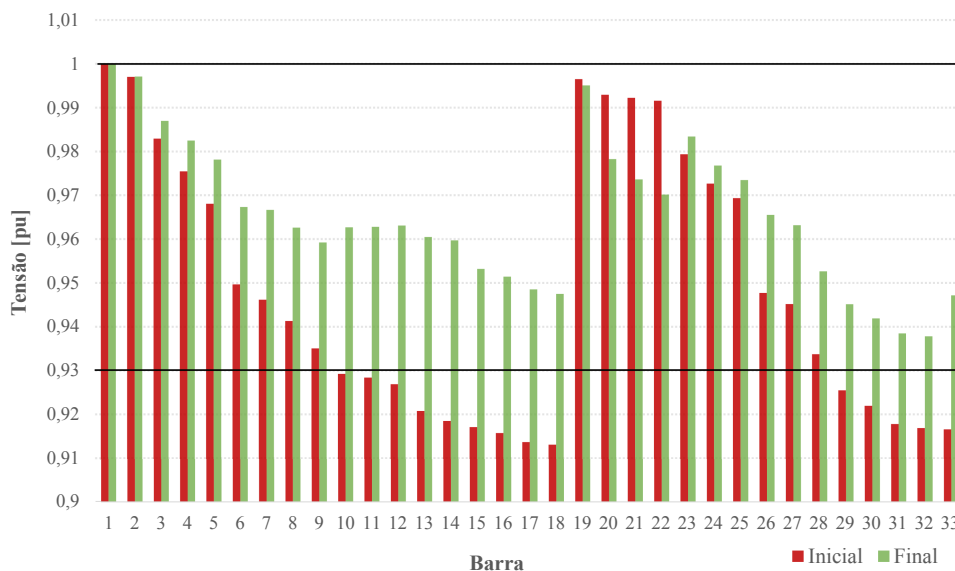
Configuração	Perdas [kW]	Chaves abertas	Tempo [s]
Fase construtiva	139,551	7, 9, 14, 32, 37	< 0,001
Multipartida	139,551	7, 9, 14, 32, 37	< 0,001
CPLEX	139,551	7, 9, 14, 32, 37	0,970

Fonte: Elaboração do autor.

As perdas mínimas obtidas na fase construtiva são de 139,551 kW, que representam uma melhoria de 31,146% em relação às perdas da configuração inicial, e 0,821% em relação à solução do algoritmo de Prim. Partindo da primeira configuração do Prim, é feita a busca local para completar a metodologia multipartida, onde é obtido o valor das perdas também de 139,551 kW. O resultado obtido pelo *solver* CPLEX para o modelo de PLIM foi o mesmo obtido pela metodologia multipartida, com um valor real de 139,551 kW.

Com a configuração obtida, a tensão mínima no sistema para a solução final é de 0,9378 pu. Na Figura 21 é mostrado o perfil de tensão inicial (antes da reconfiguração) e final (depois da reconfiguração) para o sistema de 33 barras.

Figura 21 - Perfil de tensão inicial e final do sistema de 33 barras.

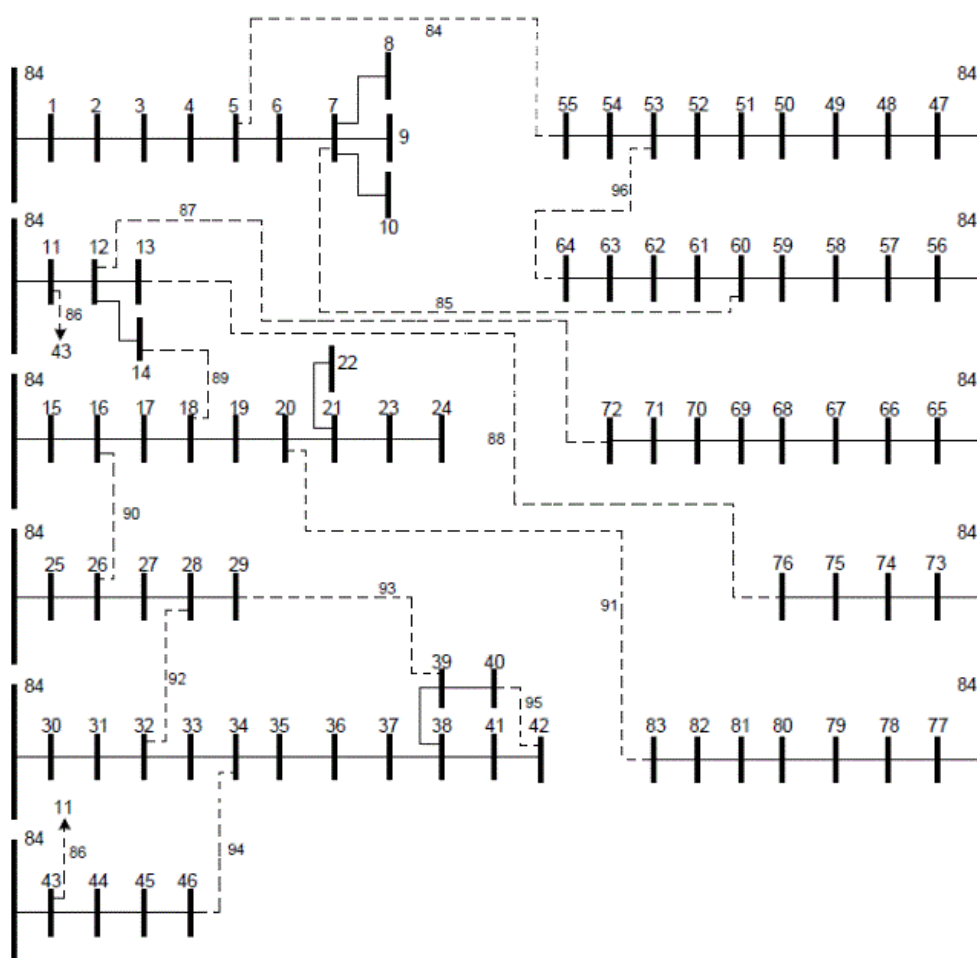


Fonte: Elaboração do autor.

5.3 SISTEMA DE 84 BARRAS

O sistema de 84 barras é um sistema real de grande porte, apresentado por Chiou, Chang e Su (2005). Este sistema possui 84 barras, 96 ramos e 1 subestação. A tensão na subestação é de 11,40 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são respectivamente 28.350 kW e 20.700 kVAr. Considera-se que o sistema possui 83 chaves de interconexões normalmente fechadas. As chaves abertas são no total 13, que correspondem ao ramos 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96. Os ramos abertos estão representados por linhas tracejadas na Figura 22.

Figura 22 - Sistema de distribuição radial de 84 barras.



Fonte: (CHIOU; CHANG; SU, 2005).

Na Tabela 7 apresenta-se o estado inicial do sistema, os resultados obtidos com o algoritmo de Prim, e as configurações correspondentes de cada um.

Tabela 7 - Estado inicial e os resultados do algoritmo de Prim para o sistema de 84 barras.

Configuração	Perdas[kW]	Chaves abertas	Tempo[s]
Inicial	531,998	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96	-
Prim	471,730	7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92	< 0,001

Fonte: Elaboração do autor.

O valor da função objetivo obtida com o algoritmo de Prim foi de 471,730 kW, o que representa uma redução de 11,329% em relação às perdas da configuração inicial, e uma tensão mínima nas barras de 0,9517 pu. A partir da solução inicial obtida pelo algoritmo de Prim, foram modificadas as potências aparentes (pesos) com porcentagens aleatórias entre 0% e 10%, e os pesos normalizados com porcentagens aleatórias entre 0% e 5% para encontrar uma melhor solução do problema. Os resultados obtidos com a perturbação dos pesos normalizados foram piores do que os resultados obtidos com a perturbação dos pesos normais (potências aparentes), portanto, esses resultados foram descartados.

Depois de 200 iterações, foram selecionados os resultados com valores de perdas menores ou iguais que o valor obtido pelo algoritmo de Prim. Na Tabela 8 são mostradas as melhores topologias encontradas na fase construtiva, incluída a configuração do Prim.

Tabela 8 - Resultados da fase construtiva para o sistema de 84 barras.

Pesos aleatórios	Perdas [kW]	Chaves abertas
Config. 1	470,863	7, 13, 33, 39, 42, 55, 63, 72, 83, 86, 89, 90, 92
Config. 2	470,891	7, 13, 33, 39, 42, 63, 72, 83, 84, 86, 89, 90, 92
Config. 3	471,350	7, 34, 39, 42, 62, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92
Config. 4	471,569	7, 33, 39, 40, 63, 72, 83, 84, 86, 88, 89, 90, 92
Config. 5	471,663	7, 13, 33, 37, 63, 72, 83, 84, 86, 89, 90, 92, 95
Config. 6	471,726	7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92
Config. 7 (Prim)	471,730	7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92

Fonte: Elaboração do autor.

A melhor configuração obtida na fase construtiva com a variação aleatória dos pesos do Prim, o resultado obtido com a metodologia multipartida, e o resultado encontrado na literatura são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados comparativos para o sistema de 84 barras.

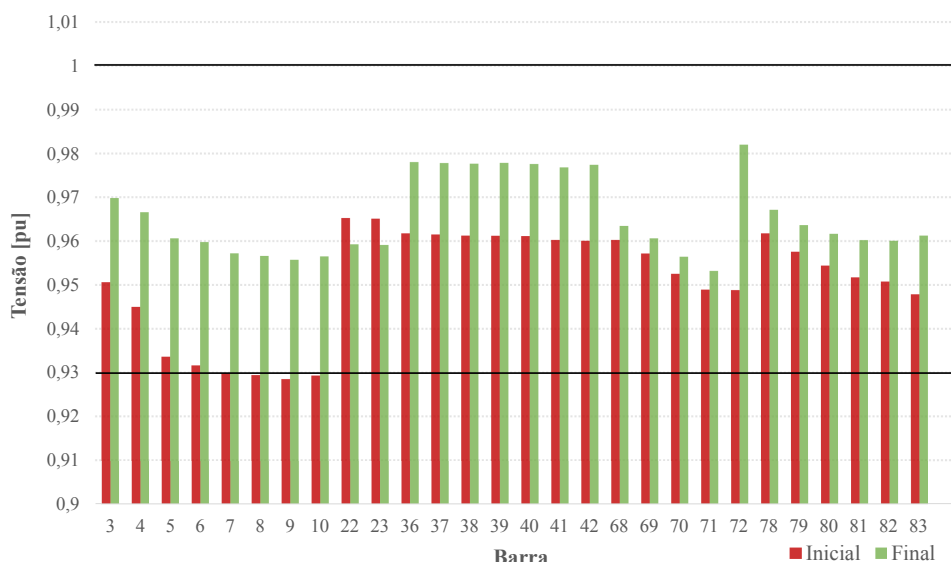
Configuração	Perdas [kW]	Chaves abertas	Tempo [s]
Fase construtiva	470,863	7, 13,33, 39, 42,55, 63, 72,83, 86, 89, 90, 92	< 0,001
Multipartida	469,880	7, 13,34, 39, 42,55, 62, 72,83, 86, 89, 90, 92	0,002
CPLEX	470,397	7, 34,39, 42, 63,72, 83, 84,86, 88, 89, 90, 92	1,980

Fonte: Elaboração do autor.

As perdas mínimas obtidas na fase construtiva são iguais a 470,863 kW, que representam uma melhoria de 11,486% em relação às perdas da configuração inicial, e 0,181% em relação à solução do algoritmo de Prim. As perdas obtidas com a metodologia multipartida foram de 469,880 kW, representando uma melhoria de 11,676% em relação às perdas da configuração inicial, e 0,392% em relação à solução do algoritmo de Prim.

Com a configuração obtida, a tensão mínima no sistema para a solução final é de 0,9532 pu. Na Figura 23 são mostrados os 30 perfis mais críticos de tensão inicial (antes da reconfiguração) e a tensão final deles (depois da reconfiguração) para o sistema de 84 barras.

Figura 23 - Perfil de tensão inicial e final do sistema de 84 barras.

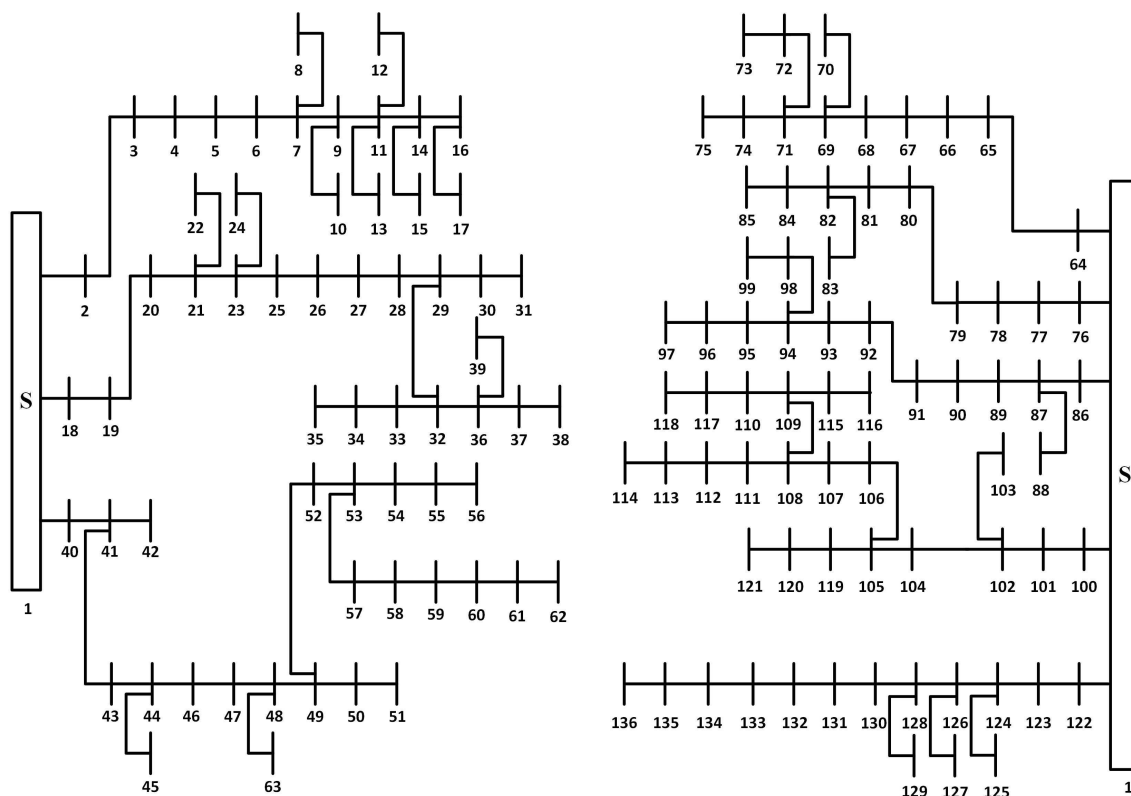


Fonte: Elaboração do autor.

5.4 SISTEMA DE 136 BARRAS

O sistema de 136 barras, mostrado na Figura 24, é apresentado por Mantovani, Casari e Romero (2000) e possui 135 barras, 156 ramos e 1 subestação.

Figura 24 - Sistema de distribuição de 136 barras.



Fonte: (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000).

A tensão na subestação é de 13,80 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são respectivamente 18.313,809 kW e 7.932,534 kVAR. A tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é 0,9307 pu. Este sistema possui 21 ramos de ligação, e as chaves 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156 encontram-se inicialmente abertas (ver Anexo A).

Na Tabela 10 apresentam-se o estado inicial do sistema, os resultados obtidos com o algoritmo de Prim e as configurações correspondentes de cada um.

Tabela 10 - Estado inicial e resultados do algoritmo de Prim para o sistema de 136 barras.

Configuração	Perdas [kW]	Chaves abertas	Tempo [s]
Inicial	320,364	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156	-
Prim	292,926	9, 35, 50, 51, 54, 84, 90, 96, 106, 126, 135, 136, 138, 143, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 155	< 0,001

Fonte: Elaboração do autor.

O valor da função objetivo obtida com o algoritmo de Prim foi de 292,926 kW, o que representa uma redução de 8,565% em relação às perdas da configuração inicial, e tensão mínima nas barras de 0,9489 pu. A partir da solução inicial obtida pelo algoritmo de Prim, foram modificadas as potências aparentes (pesos) com porcentagens aleatórias entre 0% e 10%, e os pesos normalizados com porcentagens aleatórias entre 0% e 5%, para encontrar uma melhor solução do problema. Os resultados obtidos com a perturbação dos pesos normalizados foram piores do que os obtidos com a perturbação dos pesos normais (potências aparentes), portanto, esses resultados foram descartados.

Depois de 200 iterações, foram selecionados os resultados com valores de perdas menores ou iguais que o valor obtido pelo algoritmo de Prim. Na Tabela 11 são mostradas as melhores topologias encontradas na fase construtiva, incluída a configuração do Prim.

Tabela 11 - Resultados da fase construtiva para o sistema de 136 barras.

Pesos aleatórios	Perdas [kW]	Chaves abertas
Config. 1	281,000	7, 38, 51, 54, 84, 90, 95, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151
Config. 2	284,942	9, 51, 54, 90, 96, 106, 126, 135, 136, 138, 139, 143, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 152, 155, 156,
Config. 3	285,398	38, 51, 54, 83, 90, 96, 106, 119, 126, 128, 135, 136, 137, 138, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 152
Config. 4	292,813	7, 9, 48, 50, 54, 96, 98, 107, 120, 126, 138, 139, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 155
Config. 5 (Prim)	292,922	9, 35, 50, 51, 54, 84, 90, 96, 106, 126, 135, 136, 138, 143, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 155

Fonte: Elaboração do autor.

A melhor configuração obtida na fase construtiva com a variação aleatória dos pesos do Prim, o resultado obtido com a metodologia multipartida e o resultado encontrado na literatura são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados comparativos para o sistema de 136 barras.

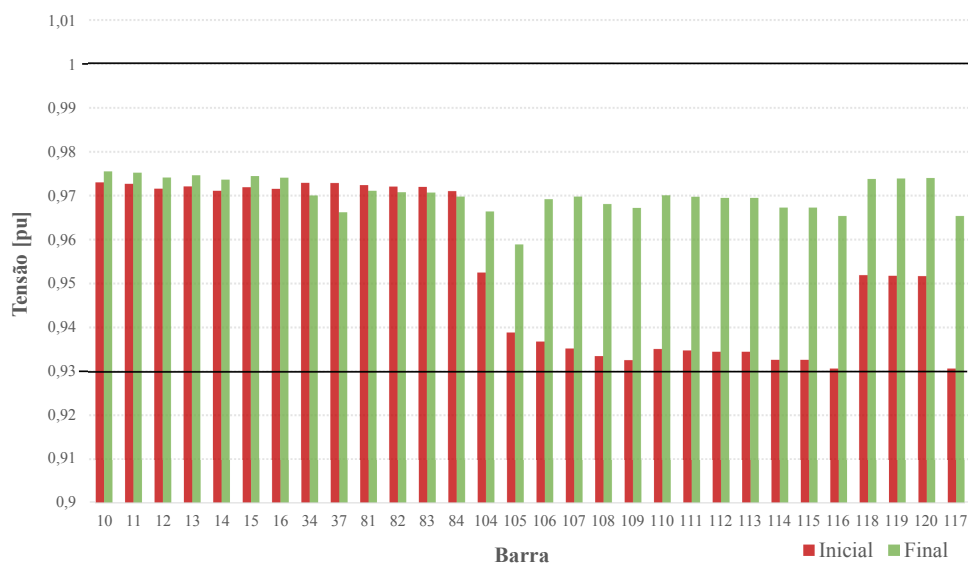
Configuração	Perdas [kW]	Chaves abertas	Tempo [s]
Fase construtiva	281,000	7, 38, 51, 54, 84, 90, 95, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151	0,297
Multipartida	280,193	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	0,062
CPLEX	280,337	7, 38, 51, 53, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 156	32,400

Fonte: Elaboração do autor.

As perdas mínimas obtidas na fase construtiva são de 281,000 kW, que representam uma melhoria de 12,287% em relação às perdas da configuração inicial, e 4,071% em relação à solução pelo algoritmo de Prim. As perdas obtidas com a metodologia multipartida foram de 280,193 kW, representando uma melhoria de 12,539% em relação às perdas da configuração inicial, e 4,347% em relação à solução do algoritmo de Prim.

Com a configuração obtida, a tensão mínima no sistema para a solução final é de 0,9589 pu. Na Figura 25 são mostrados os 30 perfis mais críticos de tensão inicial (antes da reconfiguração) e a tensão final deles (depois da reconfiguração) para o sistema de 136 barras.

Figura 25 - Perfil de tensão inicial e final do sistema de 136 barras.



Fonte: Elaboração do autor.

5.5 SISTEMA DE 417 BARRAS

O sistema de 417 barras é apresentado por Bernal-Agustín (1998). Este sistema possui 414 barras, 3 subestações e 473 ramos. A tensão na subestação é 10,00 kV e as condições de carga total ativa e reativa são respectivamente 27.372,4 kW e 13.237,0 kVAr. Possui 59 chaves de interconexões, e os ramos 1, 5, 15, 16, 26, 31, 53, 54, 55, 75, 82, 94, 96, 97, 106, 107, 119, 136, 138, 154, 155, 156, 168, 169, 177, 179, 194, 195, 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 e 449 estão inicialmente abertos.

Na Tabela 13 apresentam-se o estado inicial do sistema, os resultados obtidos com o algoritmo de Prim, e as configurações correspondentes de cada um.

Tabela 13 - Estado inicial e resultados do algoritmo de Prim para o sistema de 417 barras.

Configuração	Perdas [kW]	Chaves abertas	Tempo [s]
Inicial	708,942	1,5,15,16,26,31,53,54,55,75,82,94,96,97, 106,107,119,136,138,154,155,156,168,169, 177,179,194,195,201,207,211,214,219,241, 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	-
Prim	662,502	1,2,5,15,16,21,26,29,31,40,50,59,75,82, 94,96,97,110,111,119,136,142,154,155,156, ,163,168,169,179,194,201,209,211,214,229, 256,282,297,302,314,321,354,362,372,385, 392,395,396,403,404,423,424,426,431,436, 437,446,449,466	0,002

Fonte: Elaboração do autor.

O valor da função objetivo obtida com o algoritmo de Prim foi de 662,502 kW, o que representa uma redução de 6,551% em relação às perdas da configuração inicial, e tensão mínima nas barras de 0,9374 pu. A partir da solução inicial obtida pelo algoritmo de Prim, foram modificadas as potências aparentes (pesos) com porcentagens aleatórias entre 0% e 10%, e os pesos normalizados com porcentagens aleatórias entre 0% e 5%, para encontrar uma melhor solução do problema. Os resultados obtidos para a perturbação dos pesos normalizados foram piores do que os obtidos com a perturbação dos pesos normais (potências aparentes), portanto, esses resultados foram descartados.

Depois de 200 iterações do algoritmo, foram selecionados os resultados com valores de per-

das menores ou iguais que o valor obtido pelo algoritmo de Prim. Na Tabela 14 são apresentadas as melhores topologias encontradas na fase construtiva, incluída a configuração do Prim.

Tabela 14 - Resultados da fase construtiva para o sistema de 417 barras.

Pesos aleatórios	Perdas [kW]	Chaves abertas
Config. 1	635,445	1,4,5,12,15,26,29,31,43,44,54,57,74,94,96,106,111, 113,119,124,128,138,155,156,163,166,169,173,179, 183,186,195,201,209,211,230,256,267,286,302,309, 314,341,358,359,362,373,391,392,402,403,404,423, 424,431,436,437,446,449
Config. 2	642,346	2,5,8,15,26,31,41,50,52,55,73,94,96,101,106,111, 119,126,142,144,154,155,156,163,169,179,188,189, 201,209,214,215,229,230,256,267,282,301,302,309, 314,359,362,372,377,389,392,395,396,404,407,424, 426,431,432,449,462,471,472
Config. 3	649,441	3,4,5,16,22,31,53,54,56,59,73,80,82,94,103,106,125, 128,138,148,155,158,164,169,177,179,183,201,209,211, 214,256,263,267,282,302,314,317,325,348,358,366,372, 377,392,395,399,400,411,416,426,431,433,436,441,446, 449,466,468
Config. 4	649,857	1,2,3,16,26,28,31,43,53,54,61,75,86,94,96,99,106, 109,119,138,140,155,156,158,163,168,169,179,187, 191,194,201,203,209,214,215,256,282,301,302,314, 321,354,362,373,389,392,395,396,402,407,423,424, 431,436,437,449,462,466
Config. 5 (Prim)	662,502	1,2,5,15,16,21,26,29,31,40,50,59,75,82,94,96,97, 110,111,119,136,142,154,155,156,163,168,169,179, 194,201,209,211,214,229,256,282,297,302,314,321, 354,362,372,385,392,395,396,403,404,423,424,426, 431,436,437,446,449,466

Fonte: Elaboração do autor.

A melhor configuração obtida na fase construtiva com a variação aleatória dos pesos do Prim, o resultado obtido com a metodologia multipartida e o resultado encontrado na literatura, são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados para o sistema de 417 barras.

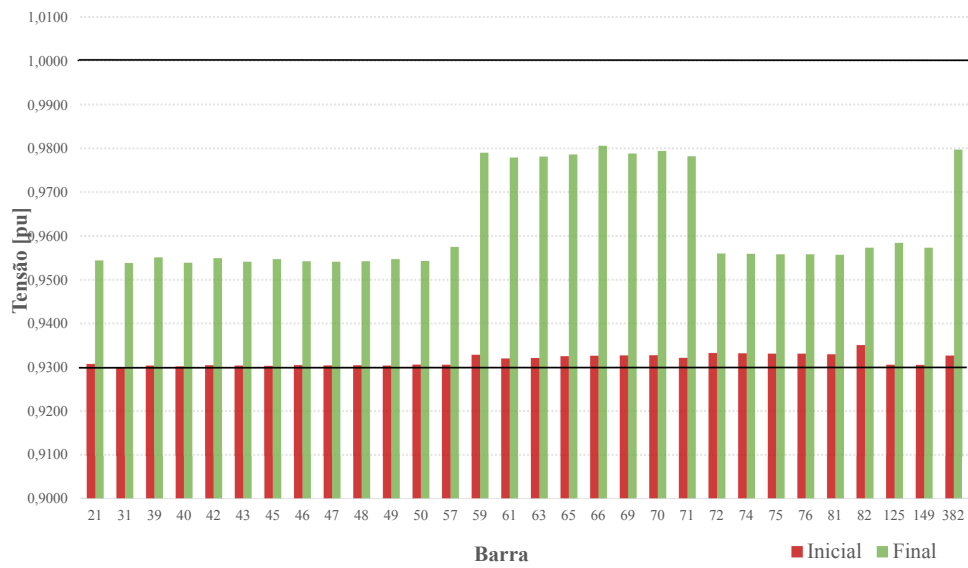
Configuração	Perdas [kW]	Chaves abertas	Tempo [s]
Fase construtiva	635,445	1,4,5,12,15,26,29,31,43,44,54,57,74,94, 96,106,111,113,119,124,128,138,155,156, 163,166,169,173,179,183,186,195,201,209, 211,230,256,267,286,302,309,314,341,358, 359,362,373,391,392,402,403,404,423,424, 431,436,437,446,449	1,547
Multipartida	581,931	5,13,15,16,21,26,31,54,57,59,60,73,82, 87,94,96,97,111,115,136,142,150,155,156, 158,163,165,168,169,178,179,191,195,199, 213,214,256,258,278,282,310,317,325,358, 362,373,392,395,403,404,416,423,426,431, 436,437,446,449,466	73,741
CPLEX	582,984	1,2,13,15,16,30,31,40,41,50,59,73,75,82, 94,96,97,111,115,136,142,150,155,156,158, 163,168,169,178, 179,191,195,209,214,230, 254,256,270,294,314,317,325,358,362,385, 389,392,395,403,404,423,424,426,436,437, 439,446,449,466	918,800

Fonte: Elaboração do autor.

As perdas mínimas obtidas na fase construtiva são de 635,445 kW, que representam uma melhoria de 10,367% em relação às perdas da configuração inicial, e 4,084% em relação à solução do algoritmo de Prim. As perdas obtidas com a metodologia multipartida foram de 581,931 kW, representando uma melhoria de 17,916% em relação às perdas da configuração inicial, e 12,162% em relação à solução do algoritmo de Prim.

Com a configuração obtida, a tensão mínima no sistema para a solução final é de 0,9538 pu. Na Figura 26 são mostrados os 30 perfis mais críticos de tensão inicial (antes da reconfiguração) e a tensão final deles (depois da reconfiguração) para o sistema de 417 barras.

Figura 26 - Perfil de tensão inicial e final do sistema de 417 barras.



Fonte: Elaboração do autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO TRABALHO

6.1 CONCLUSÕES

A simplicidade do algoritmo de Prim, a sua capacidade para gerar soluções iniciais de boa qualidade e a sua capacidade para garantir a radialidade dos sistemas de distribuição, representam grandes vantagens na sua aplicação na resolução do problema de RSDEE.

A perturbação aleatória do valor dos pesos dos ramos, a qual é feita durante a fase construtiva da metodologia multipartida, consegue gerar topologias radiais com uma probabilidade muito alta de alcançar soluções factíveis e de melhor qualidade que as configurações anteriores, facilitando a busca local em cada um dos sistemas testados, principalmente nos sistemas de grande porte, como é o sistema de 417 barras.

Tanto o algoritmo de Prim, como o algoritmo de fluxo de potência radial utilizado para o cálculo da função objetivo e verificação de restrições, apresentam um bom desempenho nos sistemas testados de pequeno e de grande porte, com esforços computacionais muito baixos, tornando-os algoritmos muito eficientes para a resolução do problema de RSDEE.

A metodologia apresentada para resolver o problema de RSDEE visando a minimização das perdas ativas é muito eficiente, pois as estratégias propostas oferecem vantagens com respeito à geração somente de soluções radiais e, além disso, são usados poucos parâmetros, o que facilita a sua implementação.

Com os resultados obtidos, verifica-se que o desempenho da metodologia multipartida para resolver o problema de RSDEE é muito bom e mostra excelentes resultados, encontrando as soluções disponíveis na literatura em tempos extremamente baixos, para sistemas tanto de pequeno como de grande porte. Essas soluções foram obtidas com um número relativamente baixo de iterações, devido principalmente à estratégia adotada na fase construtiva para gerar soluções iniciais de boa qualidade, onde as topologias encontradas ficam mais perto das configurações desejadas, o que torna a troca de ramos mais eficiente.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode se estender considerando outros aspectos do problema de RSDEE, ou considerando a melhora dos algoritmos utilizados na metodologia, os quais podem incluir:

- Estender a metodologia proposta a todos os sistemas utilizados neste trabalho, conside-

rando vários níveis de demanda.

- Utilizar equações de estimação da redução das perdas, definir outros níveis de vizinhança, e implementar o uso de memória na metodologia para melhorar o desempenho do algoritmo.
- Considerar incertezas na demanda, o que leva a um problema de otimização estocástica.
- Estender a proposta para o problema de reconfiguração considerando o modelo de carga trifásica desequilibrada.

REFERÊNCIAS

- ABUR, A. Determining the optimal radial network topology within the line flow constraints. In: **CIRCUITS AND SYSTEMS, CONNECTING THE WORLD, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON**, 1996, Atlanta. **Proceedings...** Amsterdam: IEEE, 1996. p. 673-676.
- BARAN, M.; WU, 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.
- BERNAL-AGUSTÍN, J. **Application of genetic algorithms to the optimal design of power distribution systems**. 1998. 346 f. Thesis (Ph. D. in Electrical Engineering) - Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1998.
- 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.
- CARREÑO, E.; 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. ii. Solution algorithms and numerical results. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 5, n. 3, p. 1568–1574, 1990.
- CHIOU, J.-P.; CHANG, C.-F.; SU, C.-T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 20, n. 2, p. 668–674, 2005.
- CIVANLAR, S.; GRAINGER, J. J.; YIN, H.; LEE, S. S. H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988.
- CPLEX Optimization subroutine library guide and reference: version 11.0**. [S.l.]: CPLEX Division, ILOG Inc, 2008.
- DELBEM, A. C. B. **Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição por algoritmo evolucionário associado a cadeias de grafos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- ELDURSSI, A.; O'CONNELL, R. A fast nondominated sorting guided genetic algorithm for multi-objective power distribution system reconfiguration problem. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 30, n. 2, p. 593–601, 2015.
- FEO, T.; RESENDE, M. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, Berlin, v. 6, n. 2, p. 109–133, 1995.

FLEURENT, C.; GLOVER, F. Improved constructive multistart strategies for the quadratic assignment problem using adaptive memory. **Journal on Computing**, Berlin, v. 11, n. 2, p. 198–204, 1999.

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**, New York, v. 5, n. 3, p. 774–782, 1990.

GLOVER, F. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. **Decision Sciences**, Michigan, v. 8, n. 1, p. 156–166, 1977.

GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 13, n. 5, p. 533–549, 1986.

GLOVER, F. Tabu search-part i. **Operations Research Society of America Journal on computing**, Catonsville, v. 1, n. 3, p. 190–206, 1989.

GLOVER, F. Multi-start and strategic oscillation methods: principles to exploit adaptive memory. In: LAGUNA, M.; GONZALES-VELARDE, J.L. (Ed.). **Computing Tools for Modeling, Optimization and Simulation**. London, Springer, 2000. Cap. 1, p. 1-24.

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. 570 p.

GOMES, F.; CARNEIRO S., J.; PEREIRA, J.; VINAGRE, M.; GARCIA, P.; ARAUJO, L. A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 20, n. 3, p. 1373–1378, 2005.

GOSWAMI, S.; BASU, S. 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.

GUIMARÃES, M. **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.

HARRIS, J. M.; HIRST, J. L.; MOSSINGHOFF, M. J. **Combinatorics and graph theory**. 2. ed. New York: Springer, 2008. 381 p.

HELD, M.; KARP, R. M. The traveling-salesman problem and minimum spanning trees. **Operations Research**, Catonsville, v. 18, n. 6, p. 1138–1162, 1970.

HERRERA, F. **Introducción a los algoritmos metaheurísticos**. [S.l.]: Ciencias de la Computación e IA, 2006.

IEEE. **Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems**. New York: IEEE, 2003.

- JABR, R.; SINGH, R.; PAL, B. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 27, n. 2, p. 1106–1115, 2012.
- KAGAN, N.; BARIONI, C.; ROBBA, E. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Edgard Blucher, 2008.
- KOCHENBERGER, G. A.; MCCARL, B. A.; WYMAN, F. P. A heuristic for general integer Programming. **Decision Sciences**, Hoboken, v. 5, n. 1, p. 36–44, 1974.
- LAVORATO, M.; FRANCO, J.; RIDER, M.; ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 27, n. 1, p. 172–180, 2012.
- MANTOVANI, J. R.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **SBA Controle & Automação**, Heidelberg, v. 11, n.3, p.150–159, 2000.
- MARTÍ, R. **Procedimientos meta-heurísticos en optimización combinatoria**. [S.l.]: Matemáticas, 2003.
- MARTÍ, R. **Multi-start methods**. [S.l.]: Springer, 2003.
- MENDOZA, J.; MORALES, D.; LOPEZ, R.; LOPEZ, E.; VANNIER, J. C.; COELLO, C. Multiobjective location of automatic voltage regulators in a radial distribution network using a micro genetic algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 22, n. 1, p. 404–412, 2007.
- MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: POWER SYSTEMS COMPUTER CONFERENCE, 5, 1975, Cambridge. **Proceedings...** Zurich: PSCC, 1975. p. 1-18.
- MUTH, J. F.; THOMPSON, G. L. **Industrial scheduling**. Upper Saddle River, Prentice-Hall, 1963.
- NARA, K.; SHIOSE, A.; KITAGAWA, M.; ISHIHARA, T. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 7, n. 3, p.1044–1051, 1992.
- OLIVEIRA, M. **Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a meta-heurística GRASP**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.
- 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**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.
- ROMERO, R. Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição de energia elétrica usando um algoritmo genético modificado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2001, Campos do Jordão. **Proceedings...** Campos do Jordão: SBPO, 2001. p. 551-560.

- SENJU, S.; TOYODA, Y. An approach to linear programming with 0-1 variables. **Management Science**, Catonsville, v. 15, n. 4, p. B196–B207, 1968.
- SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 2, p. 1492–1498, 1989.
- SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988.
- SOUZA, S. S. F. d. **Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.
- TINNEY, W. F. Compensation methods for network solutions by optimally ordered triangular factorization. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-91, n. 1, p. 123–127, 1972.
- WARD, J.; HALE, H. Digital computer solution of power-flow problems. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: **Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 75, n. 3, 1956.
- 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, n. 5-6, p. 685-694, 2007.

ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS

Neste anexo mostram-se os dados dos sistemas de distribuição de 14, 33, 84, 136 e 417 barras que foram utilizados neste trabalho para a aplicação da metodologia multipartida proposta.

A.1 SISTEMA DE 14 BARRAS

Barra ou nó da subestação: 14.

Tensão na subestação (base de tensão): 23,00 kV.

Base de potência aparente: 100.000,00 kVA.

Tabela 16 - Dados do sistema de 14 barras.

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [%]	X [%]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	14	13	7,50	10,00	14	0,00	0,00
2	13	12	8,00	11,00	13	2.000,00	1.600,00
3	13	11	9,00	18,00	12	3.000,00	400,00
4	11	10	4,00	4,00	11	2.000,00	-400,00
5	14	9	11,00	11,00	10	1.500,00	1.200,00
6	9	8	8,00	11,00	9	4.000,00	2.700,00
7	9	7	11,00	11,00	8	5.000,00	1.800,00
8	8	6	11,00	11,00	7	1.000,00	900,00
9	8	5	8,00	11,00	6	600,00	-500,00
10	14	4	11,00	11,00	5	4.500,00	-1.700,00
11	4	3	9,00	12,00	4	1.000,00	900,00
12	4	2	8,00	11,00	3	1.000,00	-1.100,00
13	2	1	4,00	4,00	2	1.000,00	900,00
14	12	6	4,00	4,00	1	2.100,00	-800,00
15	7	3	4,00	4,00	-	-	-
16	10	1	9,00	12,00	-	-	-

Fonte: (CIVANLAR et al., 1988).

A.2 SISTEMA DE 33 BARRAS

Barra ou nó da subestação: 1.

Tensão na subestação: 12,66 kV.

Base de potência aparente: 1.000,00 kVA.

Tabela 17 - Dados do sistema de 33 barras.

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	1	2	0,09	0,05	1	0,00	0,00
2	2	3	0,49	0,25	2	100,00	60,00
3	3	4	0,37	0,19	3	90,00	40,00
4	4	5	0,38	0,19	4	120,00	80,00
5	5	6	0,82	0,71	5	60,00	30,00
6	6	7	0,19	0,62	6	60,00	20,00
7	7	8	0,71	0,24	7	200,00	100,00
8	8	9	1,03	0,74	8	200,00	100,00
9	9	10	1,04	0,74	9	60,00	20,00
10	10	11	0,20	0,07	10	60,00	20,00
11	11	12	0,37	0,12	11	45,00	30,00
12	12	13	1,47	1,16	12	60,00	35,00
13	13	14	0,54	0,71	13	60,00	35,00
14	14	15	0,59	0,53	14	120,00	80,00
15	15	16	0,75	0,55	15	60,00	10,00
16	16	17	1,29	1,72	16	60,00	20,00
17	17	18	0,73	0,57	17	60,00	20,00
18	2	19	0,16	0,16	18	90,00	40,00
19	19	20	1,50	1,36	19	90,00	40,00
20	20	21	0,41	0,48	20	90,00	40,00
21	21	22	0,71	0,94	21	90,00	40,00
22	3	23	0,45	0,31	22	90,00	40,00
23	23	24	0,90	0,71	23	90,00	50,00
25	24	25	0,90	0,70	25	420,00	200,00
24	6	26	0,20	0,10	24	420,00	200,00
26	27	28	1,06	0,93	26	60,00	25,00

Tabela 17 - Dados do sistema de 33 barras (conclusão).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
27	26	27	0,28	0,14			
28	28	29	0,80	0,70	27	60,00	25,00
29	29	30	0,51	0,26	28	60,00	20,00
30	30	31	0,97	0,96	29	120,00	70,00
31	31	32	0,31	0,36	30	200,00	600,00
32	32	33	0,34	0,53	31	150,00	70,00
33	8	21	2,00	2,00	32	210,00	100,00
34	9	15	2,00	2,00	33	60,00	40,00
35	12	22	2,00	2,00	-	-	-
36	18	33	0,50	0,50	-	-	-
37	25	29	0,50	0,50	-	-	-

Fonte: (BARAN; WU, 1989).

A.3 SISTEMA DE 84 BARRAS

Barra ou nó da subestação: 84.

Tensão na subestação: 11,40 kV.

Base de potência aparente: 10.000,00 kVA.

Tabela 18 - Dados do sistema de 84 barras.

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	1	84	0,1944	0,6624	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	7	8	0,1048	0,2152	7	400,00	320,00
8	7	9	0,2358	0,4842	8	300,00	200,00
9	6	7	0,0405	0,1380	9	300,00	230,00
10	7	10	0,1048	0,2152	10	300,00	260,00

Tabela 18 - Dados do sistema de 84 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
11	11	84	0,0786	0,1614			
12	11	12	0,3406	0,6944	11	0,00	0,00
13	12	13	0,0262	0,0538	12	1.200,00	800,00
14	12	14	0,0786	0,1614	13	800,00	600,00
15	15	84	0,1134	0,3864	14	700,00	500,00
16	15	16	0,0524	0,1076	15	0,00	0,00
17	16	17	0,0524	0,1076	16	300,00	150,00
18	17	18	0,1572	0,3228	17	500,00	350,00
19	18	19	0,0393	0,0807	18	700,00	400,00
20	19	20	0,1703	0,3497	19	1.200,00	1.000,00
21	20	21	0,2358	0,4842	20	300,00	300,00
22	21	22	0,1572	0,3228	21	400,00	350,00
23	21	23	0,1965	0,4035	22	50,00	20,00
24	23	24	0,1310	0,2690	23	50,00	20,00
25	25	84	0,0567	0,1932	24	50,00	10,00
26	25	26	0,1048	0,2152	25	50,00	30,00
27	26	27	0,2489	0,5111	26	100,00	60,00
28	27	28	0,0486	0,1656	27	100,00	70,00
29	28	29	0,1310	0,2690	28	1.800,00	1.300,00
30	30	84	0,1965	0,3960	29	200,00	120,00
31	30	31	0,1310	0,2690	30	0,00	0,00
32	31	32	0,1310	0,2690	31	1.800,00	1.600,00
33	32	33	0,0262	0,0538	32	200,00	150,00
34	33	34	0,1703	0,3497	33	200,00	100,00
35	34	35	0,0524	0,1076	34	800,00	600,00
36	35	36	0,4978	1,0222	35	100,00	60,00
37	36	37	0,0393	0,0807	36	100,00	60,00
38	37	38	0,0393	0,0807	37	20,00	10,00
39	39	40	0,2096	0,4304	38	20,00	10,00
40	38	39	0,0786	0,1614	39	20,00	10,00
41	38	41	0,1965	0,4035	40	20,00	10,00
42	41	42	0,2096	0,4304	41	200,00	160,00
43	43	84	0,0486	0,1656	42	50,00	30,00
44	43	44	0,0393	0,0807	43	0,00	0,00
45	45	46	0,2358	0,4842	44	30,00	20,00

Tabela 18 - Dados do sistema de 84 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
46	44	45	0,1310	0,2690			
47	47	84	0,2430	0,8280	45	800,00	700,00
48	47	48	0,0655	0,1345	46	200,00	150,00
49	48	49	0,0655	0,1345	47	0,00	0,00
50	49	50	0,0393	0,0807	48	0,00	0,00
51	50	51	0,0786	0,1614	49	0,00	0,00
52	51	52	0,0393	0,0807	50	200,00	160,00
53	52	53	0,0786	0,1614	51	800,00	600,00
54	53	54	0,0524	0,1076	52	500,00	300,00
55	54	55	0,1310	0,2690	53	500,00	350,00
56	56	84	0,2268	0,7728	54	500,00	300,00
57	56	57	0,5371	1,1029	55	200,00	80,00
58	57	58	0,0524	0,1076	56	0,00	0,00
59	58	59	0,0405	0,1380	57	30,00	20,00
60	59	60	0,0393	0,0807	58	600,00	420,00
61	60	61	0,0262	0,0538	59	0,00	0,00
62	61	62	0,1048	0,2152	60	20,00	10,00
63	62	63	0,2358	0,4842	61	20,00	10,00
64	63	64	0,0243	0,0828	62	200,00	130,00
65	65	84	0,0486	0,1656	63	300,00	240,00
66	65	66	0,1703	0,3497	64	300,00	200,00
67	66	67	0,1215	0,4140	65	0,00	0,00
68	67	68	0,2187	0,7452	66	50,00	30,00
69	68	69	0,0486	0,1656	67	0,00	0,00
70	69	70	0,0729	0,2484	68	400,00	360,00
71	70	71	0,0567	0,1932	69	0,00	0,00
72	71	72	0,0262	0,0528	70	0,00	0,00
73	73	84	0,3240	1,1040	71	2.000,00	1.500,00
74	73	74	0,0324	0,1104	72	200,00	150,00
75	74	75	0,0567	0,1932	73	0,00	0,00
76	75	76	0,0486	0,1656	74	0,00	0,00
77	77	84	0,2511	0,8556	75	1.200,00	950,00
78	77	78	0,1296	0,4416	76	300,00	180,00
79	78	79	0,0486	0,1656	77	0,00	0,00
80	79	80	0,1310	0,2640	78	400,00	360,00

Tabela 18 - Dados do sistema de 84 barras (conclusão).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
81	80	81	0,1310	0,2640	79	2.000,00	1.300,00
82	81	82	0,0917	0,1883	80	200,00	140,00
83	82	83	0,3144	0,6456	81	500,00	360,00
84	5	55	0,1310	0,2690	82	100,00	30,00
85	7	60	0,1310	0,2690	83	400,00	360,00
86	11	43	0,1310	0,2690	84	0,00	0,00
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; CHANG; SU, 2005).

A.4 SISTEMA DE 136 BARRAS

Barra ou nó da subestação: 136.

Tensão na subestação: 13,80 kV.

Base de potência aparente: 100.000,00 kVA.

Tabela 19 - Dados do sistema de 136 barras.

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. 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			

Tabela 19 - Dados do sistema de 136 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
6	5	6	0,16321	0,37677			
7	6	7	0,11444	0,26417	5	311,310	123,855
8	6	8	0,05675	0,05666	6	148,869	59,228
9	8	9	0,52124	0,27418	7	238,672	94,956
10	8	10	0,10877	0,10860	8	62,299	24,786
11	10	11	0,39803	0,20937	9	124,598	49,571
12	10	12	0,91744	0,31469	10	140,175	55,768
13	10	13	0,11823	0,11805	11	116,813	46,474
14	13	14	0,50228	0,26421	12	249,203	99,145
15	13	15	0,05675	0,05666	13	291,447	115,952
16	15	16	0,29379	0,15454	14	303,720	120,835
17	136	17	0,33205	0,76653	15	215,396	85,695
18	17	18	0,00188	0,00433	16	198,586	79,007
19	18	19	0,22324	0,51535	17	0,000	0,000
20	19	20	0,10881	0,25118	18	0,000	0,000
21	20	21	0,71078	0,37388	19	0,000	0,000
22	20	22	0,18197	0,42008	20	30,127	14,729
23	22	23	0,30326	0,15952	21	230,972	112,920
24	22	24	0,02439	0,05630	22	60,256	29,458
25	24	25	0,04502	0,10394	23	230,972	112,920
26	25	26	0,01876	0,04331	24	120,507	58,915
27	26	27	0,11823	0,11805	25	0,000	0,000
28	27	28	0,02365	0,02361	26	56,981	27,857
29	28	29	0,18954	0,09970	27	364,665	178,281
30	29	30	0,39803	0,20937	28	0,000	0,000
31	28	31	0,05675	0,05666	29	124,647	60,939
32	31	32	0,09477	0,04985	30	56,981	27,857
33	32	33	0,41699	0,21934	31	0,000	0,000
34	33	34	0,11372	0,05982	32	85,473	41,787
35	31	35	0,07566	0,07555	33	0,000	0,000
36	35	36	0,36960	0,19442	34	396,735	193,960
37	36	37	0,26536	0,13958	35	0,000	0,000
38	35	38	0,05675	0,05666	36	181,152	88,563
39	136	39	0,33205	0,76653	37	242,172	118,395
40	39	40	0,11819	0,27283	38	75,316	36,821

Tabela 19 - Dados do sistema de 136 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
41	40	41	2,96288	1,01628			
42	40	42	0,00188	0,00433	39	0,000	0,000
43	42	43	0,06941	0,16024	40	1,254	0,531
44	43	44	0,81502	0,42872	41	6,274	2,660
45	43	45	0,06378	0,14724	42	0,000	0,000
46	45	46	0,13132	0,30315	43	117,880	49,971
47	46	47	0,06191	0,14291	44	62,668	26,566
48	47	48	0,11444	0,26417	45	172,285	73,034
49	48	49	0,28374	0,28331	46	458,556	194,388
50	49	50	0,28374	0,28331	47	262,962	111,473
51	48	51	0,04502	0,10394	48	235,761	99,942
52	51	52	0,02626	0,06063	49	0,000	0,000
53	52	53	0,06003	0,13858	50	109,215	46,298
54	53	54	0,03002	0,06929	51	0,000	0,000
55	54	55	0,02064	0,04764	52	72,809	30,865
56	52	56	0,10881	0,25118	53	258,473	109,570
57	56	57	0,25588	0,13460	54	69,169	29,322
58	57	58	0,41699	0,21934	55	21,843	9,260
59	58	59	0,50228	0,26421	56	0,000	0,000
60	59	60	0,33170	0,17448	57	20,527	8,702
61	60	61	0,20849	0,10967	58	150,548	63,819
62	47	62	0,13882	0,32047	59	220,687	93,552
63	136	63	0,00750	0,01732	60	92,384	39,163
64	63	64	0,27014	0,62362	61	0,000	0,000
65	64	65	0,38270	0,88346	62	226,693	96,098
66	65	66	0,33018	0,76220	63	0,000	0,000
67	66	67	0,32830	0,75787	64	294,016	116,974
68	67	68	0,17072	0,39409	65	83,015	33,028
69	68	69	0,55914	0,29412	66	83,015	33,028
70	68	70	0,05816	0,13425	67	103,770	41,285
71	70	71	0,70130	0,36890	68	176,408	70,184
72	71	72	1,02352	0,53839	69	83,015	33,028
73	70	73	0,06754	0,15591	70	217,917	86,698
74	73	74	1,32352	0,45397	71	23,294	9,267
75	136	75	0,01126	0,02598	72	5,075	2,019

Tabela 19 - Dados do sistema de 136 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
76	75	76	0,72976	1,68464			
77	76	77	0,22512	0,51968	73	72,638	28,899
78	77	78	0,20824	0,48071	74	405,990	161,524
79	78	79	0,04690	0,10827	75	0,000	0,000
80	79	80	0,61950	0,61857	76	100,182	42,468
81	80	81	0,34049	0,33998	77	142,523	60,417
82	81	82	0,56862	0,29911	78	96,042	40,713
83	81	83	0,10877	0,10860	79	300,454	127,366
84	83	84	0,56862	0,29911	80	141,238	59,873
85	136	85	0,01126	0,02598	81	279,847	118,631
86	85	86	0,41835	0,96575	82	87,312	37,013
87	86	87	0,10499	0,13641	83	243,849	103,371
88	86	88	0,43898	1,01338	84	247,750	105,025
89	88	89	0,07520	0,02579	85	0,000	0,000
90	89	90	0,07692	0,17756	86	89,878	38,101
91	90	91	0,33205	0,76653	87	1.137,280	482,180
92	91	92	0,08442	0,19488	88	458,339	194,296
93	92	93	0,13320	0,30748	89	385,197	163,290
94	93	94	0,29320	0,29276	90	0,000	0,000
95	94	95	0,21753	0,21721	91	79,608	33,747
96	95	96	0,26482	0,26443	92	87,312	37,013
97	93	97	0,10318	0,23819	93	0,000	0,000
98	97	98	0,13507	0,31181	94	74,001	31,370
99	136	99	0,00938	0,02165	95	232,050	98,369
100	99	100	0,16884	0,38976	96	141,819	60,119
101	100	101	0,11819	0,27283	97	0,000	0,000
102	101	102	2,28608	0,78414	98	76,449	32,408
103	101	103	0,45587	1,05236	99	0,000	0,000
104	103	104	0,69600	1,60669	100	51,322	21,756
105	104	105	0,45774	1,05669	101	59,874	25,381
106	105	106	0,20298	0,26373	102	9,065	3,843
107	106	107	0,21348	0,27737	103	2,092	0,887
108	107	108	0,54967	0,28914	104	16,735	7,094
109	108	109	0,54019	0,28415	105	1.506,522	638,630
110	107	110	0,04550	0,05911	106	313,023	132,694

Tabela 19 - Dados do sistema de 136 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
111	110	111	0,47385	0,24926			
112	111	112	0,86241	0,45364	107	79,831	33,842
113	112	113	0,56862	0,29911	108	51,322	21,756
114	108	114	0,77711	0,40878	109	0,000	0,000
115	114	115	1,08038	0,56830	110	202,435	85,815
116	109	116	1,09933	0,57827	111	60,823	25,784
117	116	117	0,47385	0,24926	112	45,618	19,338
118	104	118	0,32267	0,74488	113	0,000	0,000
119	118	119	0,14633	0,33779	114	157,070	66,584
120	119	120	0,12382	0,28583	115	0,000	0,000
121	121	122	0,64910	1,49842	116	250,148	106,041
122	122	123	0,04502	0,10394	117	0,000	0,000
123	123	124	0,52640	0,18056	118	69,809	29,593
124	123	125	0,02064	0,04764	119	32,072	13,596
125	125	126	0,53071	0,27917	120	61,084	25,894
126	125	127	0,09755	0,22520	121	0,000	0,000
127	127	128	0,11819	0,27283	122	94,622	46,260
128	127	129	0,13882	0,32047	123	49,858	24,375
129	129	130	0,04315	0,09961	124	123,164	60,214
130	130	131	0,09192	0,21220	125	78,350	38,304
131	131	132	0,16134	0,37244	126	145,475	71,121
132	132	133	0,37832	0,37775	127	21,369	10,447
133	133	134	0,39724	0,39664	128	74,789	36,564
134	134	135	0,29320	0,29276	129	227,926	111,431
135	7	73	0,13132	0,30315	130	35,614	17,411
136	9	24	0,26536	0,13958	131	249,295	121,877
137	15	83	0,14187	0,14166	132	316,722	154,842
138	38	135	0,08512	0,08499	133	333,817	163,199
139	25	51	0,04502	0,10394	134	249,295	121,877
140	50	96	0,14187	0,14166	135	0,000	0,000
141	55	98	0,14187	0,14166	136	0,000	0,000
142	62	120	0,03940	0,09094	-	-	-
143	66	79	0,12944	0,29882	-	-	-
144	79	131	0,01688	0,03898	-	-	-
145	84	135	0,33170	0,17448	-	-	-

Tabela 19 - Dados do sistema de 136 barras (conclusão).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
146	91	104	0,14187	0,14166	-	-	-
147	90	129	0,07692	0,17756	-	-	-
148	90	103	0,07692	0,17756	-	-	-
149	92	104	0,07692	0,17756	-	-	-
150	92	132	0,07692	0,17756	-	-	-
151	96	120	0,26482	0,26443	-	-	-
152	110	47	0,49696	0,64567	-	-	-
153	126	76	0,17059	0,08973	-	-	-
154	128	77	0,05253	0,12126	-	-	-
155	135	98	0,29320	0,29276	-	-	-
156	136	121	0,01126	0,02598	-	-	-

Fonte: (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000).

A.5 SISTEMA DE 417 BARRAS

Barra ou nó da subestação: 1.

Tensão na subestação (base de tensão): 10,00 kV.

Base de potência aparente: 100.000,00 kVA.

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras.

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	384	68	0,0311	0,0214	-	-	-
2	89	67	0,1078	0,0743	1	0,10	0
3	225	224	0,0694	0,0479	2	0,10	0
4	21	72	0,1937	0,1336	3	122,00	59
5	66	384	0,0347	0,0239	4	0,10	0
6	3	20	0,6104	0,4208	5	0,10	0
7	224	222	0,0694	0,0479	6	114,00	55
8	72	74	0,0219	0,0151	7	51,00	25
9	70	382	0,0311	0,0214	8	83,00	40
10	20	51	0,0877	0,0605	9	0,10	0

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
11	222	221	0,0877	0,0605			
12	76	72	0,0548	0,0378	10	122,00	59
13	382	66	0,0329	0,0227	11	122,00	59
14	51	52	0,0694	0,0479	12	77,00	37
15	221	220	0,0841	0,0580	13	0,10	0
16	75	81	0,0841	0,0580	14	68,00	33
17	59	70	0,0537	0,0370	15	71,00	34
18	52	56	0,1170	0,0806	16	0,10	0
19	1	273	0,0143	0,0098	17	0,10	0
20	81	76	0,0530	0,0365	18	77,00	37
21	68	85	0,0292	0,0202	19	30,00	14
22	56	27	0,0950	0,0655	20	13,00	6
23	1	274	0,1155	0,0796	21	1,00	0
24	74	75	0,1060	0,0731	22	194,00	94
25	68	93	0,0841	0,0580	23	77,00	37
26	27	31	0,1023	0,0706	24	77,00	37
27	274	275	0,0837	0,0577	25	77,00	37
28	72	73	0,0987	0,0680	26	122,00	59
29	60	58	0,0110	0,0076	27	104,00	51
30	31	40	0,1060	0,0731	28	0,10	0
31	275	209	0,1396	0,0963	29	77,00	37
32	73	80	0,0731	0,0504	30	243,00	118
33	65	71	0,0713	0,0491	31	77,00	37
34	40	47	0,0914	0,0630	32	77,00	37
35	275	276	0,1159	0,0799	33	0,10	0
36	73	77	0,0768	0,0529	34	121,00	58
37	69	65	0,0311	0,0214	35	194,00	94
38	51	54	0,0548	0,0378	36	122,00	59
39	276	264	0,1151	0,0794	37	77,00	37
40	77	78	0,0512	0,0353	38	0,10	0
41	59	69	0,0212	0,0146	39	0,10	0
42	54	24	0,0731	0,0504	40	96,00	47
43	263	264	0,0687	0,0474	41	122,00	59
44	79	83	0,2412	0,1663	42	70,00	34

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
45	262	263	0,0631	0,0533			
46	63	61	0,1097	0,0756	43	58,00	28
47	24	29	0,0950	0,0655	44	0,10	0
48	82	80	0,0731	0,0504	45	122,00	59
49	71	63	0,0227	0,0156	46	122,00	59
50	29	34	0,1151	0,0794	47	122,00	59
51	261	262	0,0380	0,0321	48	86,00	42
52	78	79	0,0219	0,0151	49	77,00	37
53	61	60	0,0439	0,0302	50	0,10	0
54	34	47	0,1736	0,1197	51	122,00	59
55	259	261	0,0511	0,0432	52	122,00	59
56	83	90	0,1210	0,0834	53	122,00	59
57	58	62	0,1294	0,0892	54	0,10	0
58	47	21	0,0841	0,0580	55	42,00	20
59	257	259	0,0687	0,0474	56	122,00	59
60	77	59	0,3874	0,2671	57	13,00	6
61	64	67	0,0450	0,0310	58	77,00	37
62	20	44	0,0146	0,0101	59	50,00	24
63	372	239	0,0266	0,0224	60	0,10	0
64	123	1	0,0135	0,0160	61	60,00	29
65	67	68	0,0863	0,0595	62	71,00	34
66	44	25	0,1279	0,0882	63	122,00	59
67	264	265	0,0724	0,0499	64	77,00	37
68	120	94	0,2538	0,2585	65	95,00	46
69	62	64	0,0603	0,0416	66	121,00	58
70	25	35	0,1279	0,0882	67	77,00	37
71	369	347	0,1316	0,0907	68	103,00	50
72	120	123	0,2949	0,3003	69	52,00	25
73	58	20	0,5921	0,4082	70	57,00	27
74	35	38	0,0804	0,0554	71	171,00	83
75	369	370	0,2083	0,1436	72	121,00	58
76	114	115	0,0475	0,0328	73	39,00	19
77	1	92	0,3889	0,2681	74	119,00	58
78	38	41	0,1042	0,0718	75	49,00	24

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
79	370	348	0,1188	0,0819			
80	115	112	0,0402	0,0277	76	0,10	0
81	92	2	0,3410	0,2351	77	50,00	24
82	41	43	0,1170	0,0806	78	44,00	21
83	383	251	0,0110	0,0076	79	82,00	40
84	94	113	0,0329	0,0227	80	132,00	64
85	92	87	0,0129	0,0109	81	194,00	94
86	43	48	0,0804	0,0554	82	0,10	0
87	383	370	0,0183	0,0126	83	122,00	59
88	113	114	0,0768	0,0529	84	3,00	1
89	2	17	0,0877	0,0605	85	52,00	25
90	48	50	0,0731	0,0504	86	103,00	50
91	208	277	0,0673	0,0464	87	21,00	10
92	106	95	0,0841	0,0580	88	21,00	10
93	6	7	0,0402	0,0277	89	21,00	10
94	20	33	0,0658	0,0454	90	5,00	3
95	277	278	0,0329	0,0227	91	0,10	0
96	95	112	0,0329	0,0227	92	0,10	0
97	7	3	0,0519	0,0358	93	21,00	10
98	84	33	0,0420	0,0290	94	18,00	9
99	277	279	0,0482	0,0333	95	122,00	59
100	94	111	0,0658	0,0454	96	116,00	56
101	18	5	0,1224	0,0844	97	7,00	3
102	28	36	0,0914	0,0630	98	64,00	31
103	279	280	0,0344	0,0237	99	49,00	24
104	111	106	0,0658	0,0454	100	16,00	8
105	5	6	0,0493	0,0340	101	77,00	37
106	36	45	0,1316	0,0907	102	119,00	58
107	280	281	0,0621	0,0428	103	71,00	34
108	119	121	0,0102	0,0086	104	77,00	37
109	17	18	0,1170	0,0806	105	194,00	94
110	49	45	0,0439	0,0302	106	122,00	59
111	281	235	0,0493	0,0340	107	55,00	27
112	94	119	0,0560	0,0661	108	38,00	18

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
113	2	14	0,0164	0,0113			
114	55	23	0,0768	0,0529	109	22,00	10
115	281	282	0,0537	0,0370	110	0,10	0
116	118	84	0,0402	0,0277	111	77,00	37
117	8	9	0,0950	0,0655	112	122,00	59
118	23	28	0,0694	0,0479	113	38,00	18
119	235	234	0,0833	0,0575	114	122,00	59
120	119	122	0,0512	0,0353	115	27,00	13
121	9	3	0,0146	0,0101	116	64,00	31
122	33	55	0,0439	0,0302	117	0,10	0
123	235	236	0,0420	0,0290	118	0,10	0
124	122	118	0,2010	0,1386	119	0,10	0
125	16	19	0,1572	0,1084	120	0,10	0
126	21	50	0,0366	0,0252	121	79,00	38
127	208	236	0,0768	0,0529	122	247,00	119
128	104	105	0,0497	0,0419	123	0,10	0
129	19	8	0,0219	0,0151	124	0,10	0
130	32	44	0,2559	0,1764	125	0,10	0
131	232	349	0,0759	0,0641	126	0,10	0
132	84	104	0,0731	0,0504	127	0,10	0
133	14	16	0,0987	0,0680	128	0,10	0
134	37	32	0,1060	0,0731	129	77,00	37
135	349	207	0,0321	0,0271	130	122,00	59
136	105	108	0,0658	0,0454	131	62,00	30
137	2	13	0,0321	0,0271	132	105,00	51
138	42	37	0,0676	0,0466	133	122,00	59
139	380	229	0,0412	0,0348	134	77,00	37
140	109	108	0,0497	0,0419	135	77,00	37
141	4	12	0,0672	0,0567	136	0,10	0
142	46	42	0,0256	0,0176	137	85,00	41
143	229	228	0,0631	0,0533	138	8,00	4
144	84	109	0,0475	0,0328	139	122,00	59
145	12	15	0,1052	0,0888	140	35,00	17
146	46	50	0,0366	0,0252	141	55,00	27

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
147	232	231	0,0969	0,0668			
148	110	84	0,0439	0,0302	142	153,00	74
149	15	11	0,1329	0,1122	143	316,00	153
150	21	49	0,1352	0,0932	144	105,00	51
151	232	293	0,0749	0,0517	145	20,00	10
152	103	110	0,0768	0,0529	146	95,00	46
153	13	4	0,0453	0,0382	147	38,00	18
154	39	30	0,1170	0,0806	148	83,00	40
155	293	236	0,0694	0,0479	149	50,00	24
156	107	103	0,0548	0,0378	150	77,00	37
157	11	86	0,0351	0,0296	151	122,00	59
158	49	39	0,0877	0,0605	152	102,00	49
159	221	344	0,0292	0,0202	153	60,00	29
160	84	107	0,0658	0,0454	154	77,00	37
161	86	91	0,0950	0,0655	155	194,00	94
162	53	22	0,0402	0,0277	156	56,00	27
163	304	306	0,0694	0,0479	157	122,00	59
164	97	116	0,0439	0,0302	158	0,10	0
165	10	11	0,0467	0,0395	159	3,00	1
166	30	26	0,0548	0,0378	160	1,00	0
167	378	377	0,1115	0,0769	161	52,00	25
168	84	99	0,1316	0,0907	162	194,00	94
169	3	10	0,1078	0,0743	163	10,00	5
170	26	53	0,1005	0,0693	164	128,00	62
171	304	378	0,0588	0,0406	165	16,00	8
172	101	96	0,1060	0,0731	166	37,00	18
173	10	88	0,1095	0,0925	167	154,00	75
174	22	33	0,0439	0,0302	168	0,10	0
175	309	307	0,0987	0,0680	169	0,10	0
176	100	101	0,0585	0,0403	170	78,00	38
177	88	89	0,0804	0,0554	171	0,10	0
178	21	57	0,2156	0,1487	172	27,00	13
179	314	317	0,0815	0,0562	173	103,00	50
180	102	100	0,0548	0,0378	174	122,00	59

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
181	99	102	0,0512	0,0353			
182	187	167	0,0847	0,0715	175	72,00	35
183	314	318	0,0724	0,0499	176	0,10	0
184	138	194	0,0128	0,0088	177	122,00	59
185	96	117	0,0786	0,0542	178	194,00	94
186	167	175	0,0906	0,0764	179	0,10	0
187	301	305	0,0439	0,0302	180	77,00	37
188	155	151	0,0694	0,0479	181	82,00	40
189	117	97	0,0402	0,0277	182	53,00	26
190	175	181	0,0847	0,0715	183	122,00	59
191	310	315	0,0614	0,0423	184	64,00	31
192	126	124	0,0292	0,0202	185	86,00	42
193	98	94	0,0402	0,0277	186	82,00	40
194	160	180	0,0439	0,0302	187	0,10	0
195	310	305	0,0826	0,0570	188	167,00	81
196	1	351	0,2266	0,1562	189	0,10	0
197	116	98	0,0621	0,0428	190	0,10	0
198	180	177	0,0548	0,0378	191	131,00	64
199	129	346	0,2617	0,1804	192	21,00	10
200	1	350	0,2266	0,1562	193	21,00	10
201	57	147	0,1572	0,1084	194	21,00	10
202	169	162	0,0768	0,0529	195	21,00	10
203	90	370	0,1579	0,1089	196	0,10	0
204	350	203	0,0234	0,0161	197	0,10	0
205	153	141	0,0730	0,0617	198	0,10	0
206	162	183	0,0841	0,0580	199	0,10	0
207	382	383	0,1502	0,1036	200	0,10	0
208	351	379	0,0234	0,0161	201	52,00	25
209	147	142	0,1060	0,0731	202	202,00	98
210	183	182	0,0329	0,0227	203	202,00	98
211	66	252	0,1930	0,1331	204	73,00	35
212	203	204	0,0511	0,0432	205	81,00	39
213	142	136	0,0804	0,0554	206	115,00	56
214	160	181	0,0914	0,0630	207	118,00	57

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
215	384	243	0,2273	0,1567			
216	204	205	0,0621	0,0428	208	318,00	154
217	132	153	0,0877	0,0605	209	161,00	78
218	181	178	0,0585	0,0403	210	126,00	61
219	85	244	0,1400	0,0965	211	59,00	29
220	203	206	0,1034	0,0873	212	24,00	12
221	136	132	0,1499	0,1033	213	24,00	12
222	171	163	0,0643	0,0543	214	5,00	2
223	352	414	0,0705	0,0486	215	126,00	61
224	379	380	0,1034	0,0873	216	56,00	27
225	57	149	0,0694	0,0479	217	62,00	30
226	163	184	0,0759	0,0641	218	0,10	0
227	414	385	0,0720	0,0496	219	32,00	15
228	206	207	0,0599	0,0506	220	158,00	77
229	57	125	0,0914	0,0630	221	126,00	61
230	160	129	0,2278	0,1923	222	202,00	98
231	414	401	0,0727	0,0501	223	41,00	20
232	1	375	0,0110	0,0076	224	81,00	39
233	127	124	0,0292	0,0202	225	126,00	61
234	129	141	0,0321	0,0271	226	202,00	98
235	401	386	0,0592	0,0408	227	18,00	9
236	208	209	0,0384	0,0265	228	202,00	98
237	128	127	0,2705	0,1865	229	106,00	51
238	131	157	0,0366	0,0252	230	175,00	85
239	401	402	0,0709	0,0489	231	174,00	84
240	209	210	0,1170	0,0806	232	113,00	55
241	125	128	0,0219	0,0151	233	202,00	98
242	130	131	0,0548	0,0378	234	0,10	0
243	402	387	0,0567	0,0391	235	202,00	98
244	209	211	0,0559	0,0386	236	403,00	195
245	200	119	0,0768	0,0529	237	202,00	98
246	141	130	0,0467	0,0395	238	126,00	61
247	402	403	0,0596	0,0411	239	0,10	0
248	211	1	0,0563	0,0388	240	29,00	14

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
249	200	201	0,0073	0,0050			
250	157	133	0,1133	0,0781	241	9,00	4
251	403	388	0,0833	0,0575	242	5,00	2
252	375	202	0,1499	0,1033	243	0,10	0
253	158	200	0,0219	0,0151	244	18,00	9
254	133	140	0,1060	0,0731	245	45,00	22
255	403	404	0,0683	0,0471	246	32,00	16
256	202	1	0,4825	0,3326	247	61,00	30
257	124	158	0,1023	0,0706	248	81,00	39
258	140	147	0,1535	0,1058	249	126,00	61
259	368	345	0,1151	0,0794	250	23,00	11
260	373	352	0,1042	0,0718	251	14,00	7
261	199	192	0,0146	0,0101	252	18,00	9
262	129	154	0,0351	0,0296	253	126,00	61
263	345	346	0,0585	0,0403	254	5,00	3
264	352	212	0,1137	0,0784	255	26,00	13
265	199	197	0,0694	0,0479	256	18,00	9
266	137	144	0,0950	0,0655	257	126,00	61
267	345	369	0,0530	0,0365	258	81,00	39
268	352	353	0,2138	0,1474	259	0,10	0
269	159	199	0,2705	0,1865	260	126,00	61
270	144	148	0,0950	0,0655	261	41,00	20
271	400	404	0,0475	0,0328	262	0,10	0
272	353	213	0,2010	0,1386	263	28,00	14
273	197	191	0,0110	0,0076	264	30,00	14
274	154	156	0,0321	0,0271	265	81,00	39
275	404	405	0,0402	0,0277	266	202,00	98
276	353	214	0,0501	0,0345	267	318,00	154
277	159	190	0,2359	0,2402	268	176,00	85
278	156	137	0,0841	0,0580	269	126,00	61
279	405	389	0,0588	0,0406	270	6,00	3
280	1	215	0,3476	0,2397	271	31,00	15
281	159	161	0,0841	0,0580	272	60,00	29
282	143	150	0,0987	0,0680	273	56,00	27

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
283	405	406	0,0716	0,0494			
284	215	216	0,1060	0,0731	274	126,00	61
285	161	172	0,0877	0,0605	275	118,00	57
286	150	148	0,0219	0,0151	276	126,00	61
287	406	390	0,0453	0,0312	277	202,00	98
288	216	217	0,0993	0,0838	278	10,00	5
289	172	188	0,0914	0,0630	279	126,00	61
290	134	139	0,1198	0,1011	280	202,00	98
291	406	391	0,0731	0,0504	281	318,00	154
292	216	218	0,0658	0,0454	282	82,00	40
293	188	168	0,0914	0,0630	283	126,00	61
294	139	143	0,0621	0,0428	284	22,00	10
295	404	407	0,0833	0,0575	285	13,00	6
296	218	219	0,0029	0,0020	286	71,00	34
297	176	179	0,0658	0,0454	287	101,00	49
298	154	134	0,0789	0,0666	288	113,00	54
299	407	392	0,0786	0,0542	289	126,00	61
300	219	220	0,0804	0,0554	290	0,10	0
301	168	176	0,1133	0,0781	291	34,00	17
302	148	57	0,1462	0,1008	292	83,00	40
303	407	408	0,0490	0,0338	293	59,00	29
304	220	223	0,0710	0,0599	294	126,00	61
305	161	185	0,1316	0,0907	295	145,00	70
306	129	151	0,0329	0,0227	296	202,00	98
307	408	409	0,0669	0,0461	297	50,00	24
308	223	237	0,0818	0,0690	298	41,00	20
309	185	164	0,0914	0,0630	299	202,00	98
310	145	146	0,0329	0,0227	300	77,00	37
311	409	393	0,0738	0,0509	301	161,00	78
312	237	238	0,0622	0,0525	302	477,00	231
313	164	165	0,0329	0,0227	303	68,00	33
314	146	149	0,0548	0,0378	304	14,00	7
315	409	394	0,0691	0,0476	305	4,00	2
316	237	372	0,0537	0,0454	306	0,10	0

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
317	165	173	0,1389	0,0958			
318	152	135	0,0768	0,0529	307	66,00	32
319	408	410	0,0552	0,0381	308	0,10	0
320	239	240	0,0058	0,0049	309	60,00	29
321	173	179	0,1133	0,0781	310	95,00	46
322	135	145	0,1425	0,0983	311	0,10	0
323	410	415	0,0658	0,0454	312	19,00	9
324	239	243	0,0835	0,0705	313	67,00	32
325	179	160	0,0694	0,0479	314	18,00	9
326	135	195	0,0091	0,0063	315	33,00	16
327	410	411	0,0643	0,0444	316	21,00	10
328	243	355	0,0055	0,0038	317	33,00	16
329	159	182	0,0541	0,0638	318	42,00	20
330	151	152	0,0548	0,0378	319	52,00	25
331	411	395	0,0596	0,0411	320	43,00	21
332	355	354	0,1279	0,0882	321	126,00	61
333	182	186	0,0483	0,0570	322	107,00	52
334	1	190	0,1415	0,1441	323	202,00	98
335	411	412	0,0676	0,0466	324	126,00	61
336	354	242	0,0183	0,0126	325	24,00	12
337	186	166	0,0377	0,0384	326	101,00	49
338	190	189	0,0731	0,0504	327	81,00	39
339	412	399	0,0567	0,0391	328	155,00	75
340	354	241	0,0731	0,0504	329	23,00	11
341	166	170	0,0377	0,0384	330	31,00	15
342	189	198	0,1097	0,0756	331	126,00	61
343	412	398	0,0716	0,0494	332	13,00	6
344	243	356	0,0091	0,0063	333	56,00	27
345	170	174	0,0292	0,0247	334	120,00	58
346	198	196	0,0366	0,0252	335	126,00	61
347	412	413	0,0874	0,0602	336	403,00	195
348	356	357	0,0512	0,0353	337	81,00	39
349	174	180	0,0637	0,0649	338	177,00	86
350	189	193	0,0234	0,0161	339	151,00	73

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
351	413	397	0,0705	0,0486			
352	357	244	0,0128	0,0088	340	9,00	4
353	159	184	0,2266	0,1562	341	29,00	14
354	149	138	0,1279	0,0882	342	14,00	7
355	413	396	0,0694	0,0479	343	23,00	11
356	357	245	0,0055	0,0038	344	45,00	22
357	184	187	0,0351	0,0296	345	0,10	0
358	138	155	0,1060	0,0731	346	36,00	17
359	290	289	0,0629	0,0433	347	5,00	2
360	243	246	0,0365	0,0308	348	9,00	4
361	246	247	0,0526	0,0363	349	80,00	39
362	265	266	0,1078	0,0743	350	0,10	0
363	289	288	0,0468	0,0323	351	0,10	0
364	306	310	0,1265	0,0872	352	0,10	0
365	247	248	0,0727	0,0501	353	0,10	0
366	266	267	0,0994	0,0685	354	0,10	0
367	288	300	0,1868	0,1288	355	0,10	0
368	310	320	0,0128	0,0088	356	0,10	0
369	243	249	0,0488	0,0412	357	0,10	0
370	267	268	0,1564	0,1079	358	0,10	0
371	300	286	0,1097	0,0756	359	0,10	0
372	310	314	0,0724	0,0499	360	0,10	0
373	249	358	0,0431	0,0297	361	0,10	0
374	268	269	0,0550	0,0560	362	0,10	0
375	1	373	0,0278	0,0192	363	0,10	0
376	314	309	0,0698	0,0481	364	0,10	0
377	358	359	0,0055	0,0038	365	0,10	0
378	269	365	0,0708	0,0721	366	0,10	0
379	300	285	0,0811	0,0559	367	0,10	0
380	309	313	0,0786	0,0542	368	0,10	0
381	359	250	0,0201	0,0139	369	0,10	0
382	365	366	0,0256	0,0176	370	0,10	0
383	300	301	0,0932	0,0643	371	0,10	0
384	313	317	0,0683	0,0471	372	0,10	0

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
385	359	251	0,1407	0,0970			
386	366	270	0,1005	0,0693	373	0,10	0
387	301	302	0,0556	0,0383	374	0,10	0
388	317	319	0,1235	0,0852	375	0,10	0
389	251	252	0,1882	0,1298	376	0,10	0
390	366	271	0,0164	0,0113	377	86,00	41
391	302	303	0,0453	0,0312	378	86,00	41
392	319	318	0,0665	0,0459	379	0,10	0
393	251	360	0,0987	0,0680	380	0,10	0
394	365	363	0,0484	0,0492	381	0,10	0
395	303	304	0,1952	0,1346	382	0,10	0
396	318	315	0,0694	0,0479	383	0,10	0
397	360	253	0,0497	0,0343	384	0,10	0
398	363	362	0,0189	0,0192	385	68,00	33
399	304	305	0,2083	0,1436	386	15,00	7
400	315	311	0,0833	0,0575	387	56,00	27
401	253	254	0,0459	0,0387	388	12,00	6
402	363	381	0,2632	0,1814	389	50,00	24
403	305	308	0,0504	0,0348	390	115,00	56
404	311	304	0,1053	0,0726	391	14,00	7
405	254	361	0,0588	0,0406	392	5,00	2
406	362	272	0,0164	0,0113	393	19,00	9
407	308	316	0,2219	0,1530	394	34,00	17
408	296	260	0,0479	0,0330	395	10,00	5
409	361	256	0,0402	0,0277	396	40,00	19
410	362	1	0,0242	0,0285	397	28,00	14
411	316	312	0,1053	0,0726	398	14,00	7
412	260	287	0,0358	0,0247	399	17,00	8
413	254	255	0,0274	0,0189	400	41,00	20
414	1	364	0,2851	0,1966	401	0,10	0
415	312	307	0,0724	0,0499	402	0,10	0
416	260	324	0,1078	0,0743	403	0,10	0
417	254	257	0,0789	0,0666	404	0,10	0
418	364	284	0,1042	0,0718	405	0,10	0

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (continuação).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
419	307	300	0,0782	0,0539			
420	324	326	0,0055	0,0038	406	0,10	0
421	257	258	0,1060	0,0731	407	0,10	0
422	364	285	0,0585	0,0403	408	0,10	0
423	334	336	0,0713	0,0491	409	0,10	0
424	324	266	0,1038	0,0716	410	0,10	0
425	257	283	0,0537	0,0454	411	0,10	0
426	381	268	0,3096	0,2134	412	0,10	0
427	336	323	0,0548	0,0378	413	0,10	0
428	324	325	0,0482	0,0333	414	0,10	0
429	283	282	0,0663	0,0560	415	19,00	9
430	268	327	0,0384	0,0265	-	-	-
431	336	337	0,0647	0,0446	-	-	-
432	324	323	0,0877	0,0605	-	-	-
433	282	234	0,0555	0,0469	-	-	-
434	327	328	0,0548	0,0378	-	-	-
435	337	338	0,0292	0,0202	-	-	-
436	323	322	0,0676	0,0466	-	-	-
437	234	233	0,0277	0,0234	-	-	-
438	268	297	0,0504	0,0348	-	-	-
439	338	339	0,0420	0,0290	-	-	-
440	322	321	0,0950	0,0655	-	-	-
441	233	376	0,0117	0,0099	-	-	-
442	297	296	0,0504	0,0348	-	-	-
443	339	265	0,0680	0,0469	-	-	-
444	321	299	0,0702	0,0484	-	-	-
445	230	231	0,0456	0,0385	-	-	-
446	296	295	0,0742	0,0512	-	-	-
447	265	367	0,0088	0,0060	-	-	-
448	299	296	0,0380	0,0262	-	-	-
449	230	228	0,0263	0,0222	-	-	-
450	296	298	0,0376	0,0260	-	-	-

Tabela 20 - Dados do sistema de 417 barras (conclusão).

No. ramo	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]	No. Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
451	367	340	0,0011	0,0008	-	-	-
452	322	329	0,0314	0,0217	-	-	-
453	228	371	0,0467	0,0395	-	-	-
454	295	294	0,0227	0,0156	-	-	-
455	340	341	0,0274	0,0189	-	-	-
456	329	330	0,0267	0,0184	-	-	-
457	371	374	0,0394	0,0333	-	-	-
458	294	292	0,0917	0,0633	-	-	-
459	341	342	0,1133	0,0781	-	-	-
460	330	331	0,0417	0,0287	-	-	-
461	374	227	0,0037	0,0025	-	-	-
462	268	292	0,0987	0,0680	-	-	-
463	334	335	0,0559	0,0386	-	-	-
464	331	332	0,0274	0,0189	-	-	-
465	374	226	0,0023	0,0020	-	-	-
466	292	290	0,0168	0,0116	-	-	-
467	341	368	0,1791	0,1235	-	-	-
468	329	333	0,0585	0,0403	-	-	-
469	226	225	0,0274	0,0189	-	-	-
470	290	291	0,0055	0,0038	-	-	-
471	376	230	0,0277	0,0234	-	-	-
472	333	334	0,0417	0,0287	-	-	-
473	368	343	0,0091	0,0063	-	-	-

Fonte: (BERNAL-AGUSTÍN, 1998).