

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA COM APLICAÇÃO DO ALGORITMO DINÂMICO PRIM**

HAMILTON LUIZ MACHADO NUNES JUNIOR

FOZ DO IGUAÇU

2018

HAMILTON LUIZ MACHADO NUNES JUNIOR

**RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA COM APLICAÇÃO DO ALGORITMO DINÂMICO PRIM**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Professor Dr. Ricardo Luiz Barros de Freitas

Co-orientador: Professor Dr. Carlos Roberto Mendonça Da Rocha

FOZ DO IGUAÇU

2018

RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA COM A APLICAÇÃO DO ALGORITMO DINÂMICO PRIM

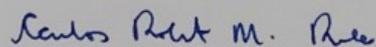
Hamilton Luiz Machado Nunes Junior

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora:

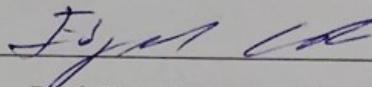
Data da defesa 14/09/2018.



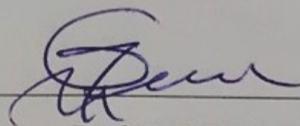
Prof. Dr. Ricardo Luiz Barros de Freitas – (Orientador)
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



Prof. Dr. Carlos Roberto Mendonça da Rocha – (Co-Orientador)
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



Prof. Dr. Edgar Manuel Carreño Franco
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



Prof. Dr.ª Gloria Patrícia López Sepúlveda
Faculdade de Ensino Superior de São Miguel do Iguaçu – UNIGUAÇU - FAESI

Resumo

O problema mundial de desperdício de energia elétrica no seu transporte antes da chegada ao consumidor pode ser diminuído com a reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, que consiste em encontrar uma boa topologia radial através da abertura ou fechamento de chaves seccionadoras localizadas em pontos estratégicos para o balanço de cargas no sistema para a minimização de perdas técnicas elétricas. Neste trabalho é apresentado um algoritmo com o objetivo de resolver o problema da reconfiguração de redes de distribuição e melhorar a eficiência do sistema levando em conta os níveis de tensão. O algoritmo foi implementado com listas duplamente encadeadas para garantir o bom desempenho dos processamentos e resultados. O programa foi baseado no Algoritmo PRIM, que possibilitou a geração de novas radiais com poucas iterações. Foram realizados testes computacionais em cinco sistemas 14, 33, 84, 136 e 415 barras, disponíveis na literatura especializada, para avaliar o desempenho do algoritmo. Os resultados obtidos com as simulações mostraram soluções de qualidade atestando a eficiência do novo algoritmo.

Palavras-chave: Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. PRIM. Heurística. Listas dinâmicas duplamente encadeadas. Redução das perdas.

Abstract

The worldwide problem of waste of electricity in its transport before its arrival to the consumer can be reduced by the reconfiguration of electricity distribution systems, which consists of finding a good radial topology by opening or closing the switchgear located at strategic points to the balance of loads in the system for the minimization of electrical losses. In this work an algorithm is presented with the objective of solving the problem of the reconfiguration of distribution networks and to improve the efficiency of the system taking into account the voltage levels. The algorithm was implemented with double-chained lists to ensure the good performance of the processing and results. The program was based on the PRIM algorithm, which allowed the generation of new radials with few iterations. Computational tests were performed in five systems 14, 33, 84, 136 and 415 bars, available in the specialized literature, to evaluate the performance of the algorithm. The results obtained with the simulations showed quality solutions attesting to the efficiency of the new algorithm.

Keywords: Reconfiguration of electricity distribution systems. PRIM. Heuristics. Double-chained dynamic lists. Loss reduction.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela saúde e pela vida maravilhosa que tem me proporcionado.

Aos meus pais que são meu porto seguro, meu exemplo de vida, sempre me apoiaram e me tornaram uma pessoa capaz de superar os desafios e aprender com meus erros, Agradeço também todo amor que sempre me deram incondicionalmente.

Ao meu orientador professor Dr. Ricardo Luiz Barros de Freitas, pela dedicação, ensinamentos, paciência, compreensão, cobranças, orientações, amizade e confiança durante toda realização deste trabalho.

A meu co-orientador professor Dr. Carlos Roberto Mendonça da Rocha pelas orientações, apoio e amizade durante esta orientação.

Aos demais professores do programa que de alguma forma contribuíram para elaboração do trabalho.

Ao meu irmão Fabiano Jelson Machado Nunes pelo amor, apoio e dedicação.

Ao meu colega de programa Felipe Bachini Bornioti pela amizade, horas de estudo compartilhadas e conversas.

Aos meus amigos e colegas de trabalho da UNILA.

Minha namorada Jessica Grandi por toda compreensão e amor durante todo esse tempo de ausência.

Aos meus amigos que sempre estiveram do meu lado.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Abreviações	xvii
Lista de Símbolos	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivo	2
1.1.1. Objetivos Específicos	3
1.2 Justificativa	3
1.3 Estrutura do Trabalho	4
2 Estado da Arte	5
2.1 Heurísticas	5
2.2 Metaheurísticas	6
2.3 Técnicas de Otimização Clássica.....	9
3 Sistema Elétrico de Potência	11
3.1 Sistema Elétrico de Distribuição.....	11
3.2 Problema de reconfiguração de redes de distribuição.....	12
4 Algoritmo PRIM	15
5 Programação Dinâmica	19
5.1 Listas dinâmicas duplamente encadeadas.....	20
6 Materiais e Métodos	23
6.1 Etapas de Construção do Algoritmo	25

6.1.1	Etapa Modelagem	25
6.1.2	Etapa PRIM.....	31
6.1.3	Etapa Fluxo de Carga.....	39
6.1.4	Etapa Melhoria.....	42
6.1.5	Etapa Arquivo dos resultados	43
6.2	Fluxograma do Algoritmo	44
7	Resultados.....	45
7.1	Sistema de 14 barras.....	46
7.2	Sistema de 33 barras.....	49
7.3	Sistema de 84 barras.....	51
7.4	Sistema de 136 barras.....	53
7.5	Sistema de 415 barras.....	56
7.6	Discussão.....	57
8	Conclusões.....	59
8.1	Trabalhos Futuros.....	59
	Referências.....	61
9	Apêndice A Publicação do Trabalho	65
	Anexo A – Dados dos Sistemas de Teste.....	76

Lista de Figuras

Figura 4.1 – Algoritmo PRIM	17
Figura 6.1: Sistema de 14 barras apresentado por Civanlar et al. (1988). Fonte: o próprio autor.	24
Figura 6.3 - Lista BARRAS com duplo encadeamento completa. Fonte: o próprio autor.....	27
Figura 6.2: Lista BARRAS com duplo encadeamento completa. Fonte: Próprio autor.....	27
Figura 6.4 – Teia que representa o sistema malhado completo.....	29
Figura 6.5 – Passo 1: formação da lista RADIAL e busca pelos ponteiros “barraramo” o com maior peso. Fonte: o próprio autor.	32
Figura 6.7 – Repetição do Passo 1, segunda interação. Fonte: o próprio autor.....	34
Figura 6.6 – Passo 2: escolha da barra 9 pelo ponteiro “bs”. Fonte: o próprio autor.	34
Figura 6.9 – Passo 1, terceira interação. Fonte: o próprio autor.....	35
Figura 6.8 – Passo 2, segunda interação. Fonte: o próprio autor.....	35
Figura 6.10 – Passo 2, terceira interação. Fonte: o próprio autor.....	36
Figura 6.11 – Teia que representa o sistema radial encontrado.....	37
Figura 6.12 – Configuração radial encontrada com a numeração original. Fonte: próprio do autor.....	39
Figura 6.13 - Configuração radial encontrada com renumeração. Fonte: próprio do autor.	40
Figura 6.14 – Configuração radial com as correntes indicadas. Fonte: próprio do autor.....	41
Figura 6.15 – Fluxograma do algoritmo proposto. Fonte: próprio do autor.....	44
Figura 7.1 - Sistema de 14 barras com as chaves representadas e numeradas. Fonte: própria do autor.....	46
Figura 7.2 – Sistema destacando as chaves abertas. Fonte: próprio do autor.....	48
Figura 7.3 – Sistema de 33 barras completo. Fonte: Baran e Wu (1989).....	50
Figura 7.4 – Sistema de 84 barras completo. Fonte: Chiou et al. (2005).	52
Figura 7.5 – Sistema com 136 barras completo. Fonte: Mantovani et al. (2000).....	54

Lista de Tabelas

Tabela 6.1: Dados do sistema de 14 barras.	24
Tabela 6.2: Dados dos ramos.....	24
Tabela 6.3 – Dados das Barras.	25
Tabela 6.4 – Informações contidas em cada nó da lista BARRAS	26
Tabela 6.5 - Informações contidas em cada nó da lista RAMOS.....	28
Tabela 7.1- Processo do PRIM passo a passo.	47
Tabela 7.2 – Compara radiais encontradas.....	48
Tabela 7.3 – Compara Perdas e queda de tensão.....	49
Tabela 7.4 - Compara radiais encontradas.....	50
Tabela 7.5 - Compara Perdas e queda de tensão.	51
Tabela 7.6 - Compara radiais encontradas.....	53
Tabela 7.7 - Compara Perdas e queda de tensão.	53
Tabela 7.8 - Compara radiais encontradas.....	55
Tabela 7.9 - Compara Perdas e queda de tensão.	55
Tabela 7.10 - Compara radiais encontradas.....	56
Tabela 7.11 - Compara Perdas e queda de tensão.	57

Lista de Abreviações

AC	colônias de formigas (<i>Ant Colony Optimization</i>),
AE	Algoritmo Evolutivo
AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CC	Curtos-Circuitos
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
DC	Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>)
EBC	Empresa Brasil de Comunicação
FC	Fluxo de Carga
GRASP	<i>General responsibility assignment software patterns</i>
PD	Progamação Dinâmica
PGEEC	Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação
PLIN	Programação Linear Inteira Mista
PNLIM	Programação Não Linear Inteiro Mista
RSDEE	Reconfiguração do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
RNA	Redes Neurais Artificiais
SA	Simulated Annealing
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TS	Busca Tabu (<i>Tabu Search</i>)

Lista de Simbolos

- ν perdas ativas.
- g_{ij} é a condutância do ramo ij .
- x_{ij} representa o circuito (ou ramo) que pode ser adicionado em ij (barra i e barra j) na topologia radial e vale 1 se o circuito faz parte da topologia radial e 0 em caso contrário.
- V_i tensão na barra i .
- V_j tensão na barra j .
- V_{ij} queda de tensão entre a barra i e a barra j .
- Θ_{ij} é a diferença angular entre as tensões das barras ij .
- P_{Si} representa a potência ativa fornecida pela subestação na barra i .
- P_{Di} representa a demanda ativa na barra i .
- Q_{Di} representa a demanda reativa na barra i .
- P_{ij} representa os fluxos de potência ativa através do ramo ij .
- Q_{ij} representa os fluxos de potência reativa através do ramo ij .
- \underline{V} limite do módulo de tensão inferior nas barras.
- \bar{V} limite do módulo de tensão superior nas barras.
- n_b é o número de barras do sistema de distribuição.
- Ω_i representa o conjunto de ramos do sistema elétrico.
- Ω_{bi} é o conjunto de barras conectadas com a barra i .
- Ω_b é o conjunto de barras do sistema de distribuição.
- I_j corrente da carga na barra j .
- I_{i-j} corrente que vai da barra i para a barra j .
- ξ tolerância para perda (utilizado como critério de parada no cálculo do Fluxo de carga).
- (R) componentes reais.
- (i) componentes imaginários.

Capítulo 1

Introdução

A energia elétrica é um dos pilares mais importantes da sociedade moderna. O aumento progressivo do consumo, provocado pela tendência do crescimento demográfico, urbanização e avanços tecnológicos, tem aumentado o problema energético mundial. No Brasil, com a afirmação do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) que o consumo total de energia elétrica no país voltou a crescer, com crescimento de 0,8%, em 2017 (EBC, 2018), fica comprovado que o país também está imerso nesta realidade e demonstra que aumento da demanda desenfreada está tendendo a um crescimento exponencial fazendo com que as concessionárias trabalhem próximo aos limites permissíveis, tornando a operação da rede mais complexa.

A possibilidade do consumo chegar, ou até mesmo ultrapassar, aos limites de geração tem levado pesquisadores em todo mundo a realizar trabalhos com objetivo de buscar novas fontes de energia e melhorar a eficiência do Sistema Elétrico de Potência (SEP).

O SEP é composto por 3 etapas: Geração, Transmissão e Distribuição. O ideal seria se todas as etapas obtivessem 100% de eficiência em suas atividades, ou seja, toda a energia que entrasse no sistema chegasse ao ponto final (consumidor), Porém, o sistema possui perdas em todas as suas etapas e para melhorar sua eficiência estudam-se continuamente soluções para que estas perdas sejam reduzidas ao máximo.

Neste trabalho, o foco das perdas na etapa do Sistema de Distribuição é tratado como principal tema desenvolvido. Para este sistema existem dois tipos de perdas que podem frequentemente ser especificadas em conformidade com sua origem: Perdas Técnicas e Perdas Não Técnicas.

As Perdas Técnicas são causadas no processo físico do transporte (condução e transformação) da energia elétrica, enquanto que as Perdas Não Técnicas são originadas de problemas no processo de medição, ocasionado por erros em medições por estimativa, fraudes e furtos de energia elétrica.

As Perdas Técnicas referentes ao sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil

estão atualmente na ordem de 7,5% da energia gerada (ANEEL, 2014), considerando que as perdas deveriam estar entre 3% e 6%, salienta-se que o sistema de distribuição é um dos setores que requer uma maior atenção para solução do problema energético, trazendo prejuízos para todo SEP, principalmente para as concessionárias de distribuição e o cliente final.

O sistema de distribuição operando com perdas reduzidas, aumenta sua confiabilidade e segurança. As ações mais efetivas para o aumento da sua eficiência são: o controle integrado da potência reativa e a reconfiguração da rede para mínimas perdas.

Este trabalho visa proporcionar um sistema que opere com mínimo de perdas técnicas pequenas (aceitáveis) na reconfiguração da rede, mais especificamente no Planejamento da Operação.

No planejamento da operação buscam-se configurações com o objetivo de obter uma estratégia aceitável (configuração com pequenas perdas), que se traduz em um atendimento da demanda diária com boa qualidade de serviço e redução dos custos de operação. Para isso pode ser utilizada a Reconfiguração do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE), que pode ser usada também no controle em tempo real durante a operação do sistema.

O problema de RDSEE foi concebido para encontrar a melhor configuração radial por meio da abertura e fechamento de chaves seccionadoras instaladas em pontos estratégicos para minimizar as perdas nos alimentadores e proporcionar um balanceamento satisfatório das cargas no sistema trifásico, levando em consideração os aspectos de confiabilidade da proteção e da qualidade de fornecimento de energia aos consumidores. Estas medidas são ações de baixo custo de investimento capazes de proporcionar maior oferta de energia ao consumidor final.

Diminuindo as perdas técnicas no sistema, possibilita-se um adiamento na necessidade de investimento em ampliação das redes de distribuição, proporcionando um alívio do sistema de distribuição, aumentando a qualidade da energia, melhorando o perfil de tensão, avançando assim a vida útil dos equipamentos.

Visando atender uma demanda real de mercado, este trabalho apresenta uma pesquisa de conhecimento teórico e prático sobre RSDEE com o objetivo de desenvolver um algoritmo utilizando programação com alocação dinâmicas de memória utilizando estruturas de dados avançadas para implementar um algoritmo baseado no algoritmo PRIM, aplicado para solução de um problema em redes de media tensão de distribuição com o propósito de estabelecer uma boa configuração radial com a minimização das perdas elétricas.

1.1 Objetivo

Desenvolver um algoritmo que construa um conjunto de soluções radiais diferentes para atender a necessidade de redução de perdas do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.

1.1.1. Objetivos Específicos

- Formulação e implementação computacional do modelo do sistema proposto a partir de dados extraídos da literatura consagrada;
- Formulação e implementação computacional de um algoritmo baseado na heurística de PRIM como uma estratégia eficiente que permita encontrar uma solução radial com mínimas perdas.
- Formulação e implementação computacional de um modelo para calcular o Fluxo de Carga (FC) da solução encontrada;
- Formulação e implementação computacional de uma estratégia que permita melhorar a qualidade da solução encontrada;
- Comprovar a eficiência do algoritmo com a utilização de listas duplamente encadeadas.
- Testar o algoritmo e compara-lo com a literatura especializada.

1.2 Justificativa

A relevância de pesquisas nesta área se dá pela sua importância operacional. Logo, a principal motivação para o trabalho proposto é a busca por uma solução eficiente do ponto de vista técnico, que satisfaça o problema da RSDEE usando como critério a minimização das perdas.

As Heurísticas se evidenciam como métodos eficientes e promissores para solução do problema. O aprimoramento e surgimento de métodos de otimização que resolvem problemas combinatórios cada vez maiores e complexos, encontrando soluções otimizadas de boa qualidade possibilitando a aplicação do planejamento de redes reais. Além disso, a maioria dos trabalhos utilizam algoritmos com alocação de memória estáticas, aumentando o número de iterações dos mesmos.

Neste trabalho, o algoritmo implementado foi baseado no método de PRIM com a utilização de conceitos de alocação de memória dinâmica e estruturas de dados avançadas. Fundamentado no uso adequado de ponteiros para alocação e liberação de memória, e o emprego efetivo desses conceitos para implementação de estruturas como listas duplamente encadeadas e árvores para formação de uma teia.

Suas principais vantagens são a melhor utilização dos recursos de memória, a facilidade no acesso da informação dos nós por meio dos ponteiros e o baixo tempo de processamento do algoritmo.

A implementação de listas através de encadeamento gera uma estrutura mais flexível, própria para aplicações onde listas são mutáveis, com grande número de inserções e de remoções de nós.

A reconfiguração é uma alternativa com baixo custo de operação para aumentar a

eficiência do sistema de distribuição, pois com a ação de abertura e fechamentos de algumas chaves é possível encontrar uma configuração com maior eficiência para o sistema, permitindo protelar investimentos no reforço de linhas, subestações entre outros (Pereira, 2010).

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 8 capítulos.

Neste capítulo foram apresentados a introdução do tema proposto, algumas contextualizações e informações sobre a área do planejamento de sistemas de energia elétrica. Ainda neste capítulo, definiu-se o problema a ser abordado assim como o objetivo geral e objetivos específicos.

No Capítulo 2 será apresentada a revisão bibliográfica sobre os modelos e métodos de otimização computacional aplicados para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição.

O Capítulo 3 mostra uma visão geral do SEP, enfatizando o sistema elétrico de distribuição, demonstra o problema da reconfiguração da rede de distribuição e apresenta o seu modelo matemático.

O Capítulo 4 discorre sobre o método de PRIM, apresentando seus conceitos e aplicações.

No Capítulo 5 será tratado da alocação dinâmica de memória e listas dinâmicas encadeadas, explicando seus conceitos, forma de implementação, aplicações, vantagens e desvantagens.

O Capítulo 6 descreve a implementação e funcionamento do algoritmo, apresentando suas etapas de construção e funcionamento.

No Capítulo 7 serão demonstrados os resultados dos testes do algoritmo para os cinco sistemas propostos, fazendo comparações de seus resultados com trabalhos da literatura.

Finalmente no Capítulo 8 estão as conclusões deste trabalho e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

O desenvolvimento de modelos matemáticos de otimização e de métodos de resolução, aliadas a técnicas computacionais, são de grande importância para o sistema de distribuição de energia. Possibilitando o atendimento das exigências técnicas impostas pelos órgãos reguladores, fornecendo energia elétrica aos consumidores com qualidade e confiabilidade com o menor custo possível.

Nesta seção é apresentada uma visão geral dos principais trabalhos desenvolvidos de alguns modelos matemáticos e metodologias utilizadas para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição encontrados na literatura especializada. O capítulo foi organizado de acordo com a ordem cronológica dos trabalhos e as técnicas aplicadas, sendo subdividido em métodos heurísticos, metaheurísticos e técnicas de otimização.

2.1 Heurísticas

As heurísticas são técnicas que utilizam um grau de aleatoriedade para tentar buscar soluções ótimas aceitáveis para problemas complexos. Através de sucessivas aproximações é encontrada uma metodologia direcionada a obtenção de um ponto ótimo. Logo, estes métodos costumam encontrar as boas soluções possíveis para problemas, e não soluções exatas, perfeitas, definitivas.

Os primeiros a apresentar o assunto da RSDEE com função objetivo de minimização das perdas técnicas foram Merlin & Back (1975). O problema, que tem natureza combinatória, pode ser modelado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM). No trabalho é utilizado um modelo linearizado do FC clássico (modelo DC), com aplicação das duas leis de Kirchhoff sem considerar as restrições de operação. Foram apresentados em seu trabalho duas técnicas para solução do problema:

- Um algoritmo heurístico construtivo (Abertura Sequencial de Chaves);
- Um algoritmo de otimização clássica (Branch and Bound).

Em Civanlar, Grainger, Yin, & Lee (1988) foi apresentada uma nova heurística para solução do problema, denominada troca de ramos (*Branch-exchange*), o método tem início com uma configuração radial do sistema e com abertura e fechamento de chaves de manobra busca melhores soluções sem perder a radialidade do sistema.

Um ano depois, Baran & Wu (1989) aperfeiçoaram o trabalho anterior, que não era capaz de encontrar uma solução ótima em problemas de grande porte, introduzindo duas aproximações para o FC. O método leva em consideração a redução de perdas e o balanceamento de cargas. Neste trabalho, o modelo é indicado como um problema de programação inteira.

Em Liu, Lee, & Vu (1989) produziram dois algoritmos heurísticos para a solução do problema com diferentes declarações para sua modelagem, o primeiro considera a carga uniformemente nas ligações da rede e o segundo considera a carga concentrada nas barras.

No mesmo ano, Shirmohammadi & Hong (1989) apresentaram uma técnica heurística baseada no método desenvolvido por Merlin & Back (1975), adicionando na modelagem do problema os limites de tensão nos barramentos e os limites de corrente nas linhas, e também modificaram o cálculo do problema de FC, considerando as perdas reativas em modelo de fluxo ótimo.

Goswami & Basu (1992) sugeriram uma melhoria no método de proposto por Shirmohammadi & Hong (1989) baseado no conceito de modelo de fluxo ótimo. O problema é resolvido fechando-se apenas um laço por vez, trocando os estados das chaves para manter a topologia radial, não levando em consideração a rede malhada.

Em Mantovani, Casari, & Romero (2000) foi apresentado um algoritmo heurístico que realiza a RSDEE para obtenção de um conjunto de configurações com as menores perdas ativas nos alimentadores, baseado no limite máximo de queda de tensão nos alimentadores. Foram testados quatro sistemas, entre eles um sistema real de 135 barras.

Gomes et al. (2005) apresentou uma heurística ramificada em duas etapas. Inicialmente o método encontra uma configuração radial a partir de uma topologia totalmente malhada com todas as chaves manobráveis do sistema inicialmente fechadas, em cada passo se abre uma chave levando em consideração aquela que proporciona o menor aumento da função objetivo. Estas chaves são abertas de maneira a eliminar os laços do sistema. A segunda etapa é um refinamento da primeira através do processo de troca de ramos (*Branch-exchange*).

2.2 Metaheurísticas

As meta-heurísticas também são técnicas que utilizam um grau de aleatoriedade para tentar buscar soluções ótimas para problemas. O método associa estratégias heurísticas de mais alto nível com técnicas de busca locais, para que o processo seja .qualificado a escapar de mínimos locais e processar uma busca robusta no espaço de soluções do problema (Fred Glover

Gary A. Kochenberger, 2003).

O Algoritmo Genético (AG) é a técnica que busca reproduzir sistemas aplicando o conceito da evolução da espécie, sobrevive o indivíduo geneticamente melhor adaptado para superar os problemas do meio ambiente (Holland, 1975). Apenas em Nara, Shiose, Kitagawa, & Ishihara (1992) apresentou o primeiro AG para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, foram testados dois sistemas de médio porte com ótimos resultados, porém após a recombinação, existe a possibilidade de o surgimento de configurações não radiais.

Redes Neurais Artificiais (RNA) são conceitos baseados na tentativa de imitar a capacidade do cérebro humano de reconhecer, associar e generalizar padrões, em Kim, Ko, & Jung (1993) foi proposto pela primeira vez o método, utilizando o tipo “multi-layer perceptron”, para a solução do problema da reconfiguração da rede de distribuição. O sistema de distribuição foi dividido em duas zonas de carga, exigindo a estruturação de dois grupos de redes neurais: a primeira utilizada para identificar o perfil de carga e a outra, baseada nas saídas obtidas pela anterior, constrói as topologias radiais para o sistema.

A Simulated Annealing (SA) é uma meta-heurística desenvolvida em um algoritmo que substitui a solução atual por uma solução próxima, escolhida de acordo com uma função objetivo e com uma variável de referência, esta variável estabelece uma componente aleatória para próxima solução. Conforme o algoritmo avança, o valor da variável diminui, fazendo o algoritmo convergir para uma solução ótima, necessariamente local. A analogia com a otimização combinatória foi introduzida por Kirkpatrick, Gelatt, & Vecchi (1983) e utilizada para solução do problema de RSDEE por Chang & Kuo (1994).

Sarma & Prakasa Rao (1995) propuseram o método SA para a minimização de perdas de um sistema. O método é baseado no somatório das perdas de todos os trechos do sistema, com a função desenvolvida apenas para utilizar variáveis binárias. Ele examina várias chaves a cada nova interação convergindo para a melhor configuração da rede.

Em Hayashi, Iwamoto, Furuya, & Liu (1996) foi proposto um método baseado em RNA do tipo Hopfield. Neste método foram aplicados conhecimentos técnicos da engenharia sobre a rede elétrica para que as topologias geradas pela rede neural sejam seguras, mesmo após alguma falta podendo operar dentro dos limites e evitando os mínimos locais. O método foi capaz de encontrar resultados de boa qualidade com pouco esforço computacional.

Ramirez-Rosado & Bernal-Agustin (1998) apresenta a aplicação de um novo AG para resolver o RSDEE, pode ser aplicado a projetos de distribuição de estágio único ou múltiplos estágios. O AG foi testado em sistemas de distribuição com tamanho real, sistema de 415 barras, obtendo bons resultados.

Em Romero (2001) propôs um AG modificado capaz de realizar a recombinação evitando que configurações não radiais fossem geradas.

Em Guimaraes, Lorenzetti, & Castro (2004) foi apresentado o algoritmo Busca Tabu (*Tabu Search* -TS) para a minimização das perdas ativas de potência. O método TS é baseado

em uma técnica que direciona e altera outras heurísticas para alcançar resultados melhores dos que seriam obtidos normalmente em uma busca local. O método se difere dos demais por dois aspectos: o processo de movimento, que indica o algoritmo permite uma degradação de qualidade, e o conjunto de vizinhança, permitindo a expansão do algoritmo para novas buscas no conjunto soluções do problema. Constatou-se que a utilização de uma heurística para gerar uma configuração inicial proporciona resultados de melhor qualidade.

Em Amasifen, Romero, & Mantovani (2005) é apresentada a formulação e implementação computacional de um Algoritmo Evolutivo (AE) para resolver o problema de RSDEE sob diferentes condições de carregamento. A população inicial é gerada aleatoriamente e através dos algoritmos de PRIM e Kruskal. São apresentados e analisados os resultados obtidos com dois sistemas reais, um de 135 e outro de 215 barras.

Em Mendoza et al. (2006) apresenta-se uma metodologia que melhora a eficiência do AG para resolver o problema de RSDEE, o conceito do trabalho é reduzir o espaço de busca do algoritmo.

Em Salazar, Gallego, & Romero (2006) foi proposto um algoritmo utilizando RNA do tipo “multi-layer perceptron”. Foram utilizadas técnicas de agrupamento, em conjunto com estratégias de validação para encontrar as melhores configurações no treinamento da rede neural. Assim, foi possível encontrar boas configurações com baixo custo computacional e aplicando exclusivamente uma rede neural para resolver o problema da reconfiguração da rede de distribuição. Este método obteve bons resultados quando empregado ao sistema de 14 barras proposto em Civanlar et al. (1988) e ao sistema teste 136 barras.

Em Zhang, Fu, & Zhang (2007) também foi proposto um algoritmo especializado para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. O trabalho apresentou um método TS melhorado com operador de mutação do AG para minimização das perdas e uma equação de variação das perdas para reduzir o espaço de busca, similar a formulação de Baran & Wu (1989).

Em Carreno, Romero, & Padilha-Feltrin (2008) propõem um AG com um eficiente operador de recombinação que assegura a geração de configurações factíveis. A restrição de radialidade é controlada de forma implícita dentro dos operadores genéticos, reduzindo o espaço de busca, e assim apresentando um desempenho melhor que as propostas por Mendoza et al. (2006) e Nara et al. (1992).

Em Pereira (2010) utilizou-se uma nova metodologia baseada no comportamento de colônias de formigas (*Ant Colony Optimization - ACO*), para solução do problema de reconfiguração do sistema de distribuição com mínimas perdas, com excelentes resultados.

Em Oliveira, Marina., & Rubén (2011) foi proposto a utilização do algoritmo de GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*) para a solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição para minimizar as perdas ativas. O algoritmo foi construído com os princípios construtivos do algoritmo tipo guloso e do algoritmo de busca

local, é dividido na fase construtiva e na fase de melhoria local. O método tem seu início com todas as chaves do sistema fechadas e a cada interação na fase construtiva ele resolve um FC, até encontrar uma topologia radial.

Em Franco, Lavorato, Rider, & Romero (2012) apresentam uma aplicação do algoritmo TS para o problema de RSDEE. Um algoritmo de PRIM gerou a solução inicial. A função objetivo das soluções vizinhas foi estimada utilizando aproximações da fórmula de Baran & Wu (1989).

Em Sousa, Lavorato, & Romero (2012) também foi utilizado a meta-heurística de GRASP para solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição minimizando as perdas ativas, porém em sua metodologia foi proposto um algoritmo heurístico construtivo com todas as chaves abertas, resolvendo um problema de programação não linear a cada interação, é escolhido uma chave para ser fechada conforme o índice de sensibilidade até que seja construída uma solução radial.

Em Fioravanti (2014) foi apresentado um AG de ChuBeasley especializado com um espaço de busca reduzido para solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição.

Em Possannolo (2015) foi apresentado uma metodologia baseada na meta-heurística de busca em vizinhança variável para resolver o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica considerando vários níveis de demanda e topologia fixa da rede, testando cinco sistemas de distribuição e apresentam um excelente desempenho, encontrando soluções iguais ou melhores que as disponíveis na literatura.

2.3 Técnicas de Otimização Clássica

Existem métodos de solução (Otimização Clássica) capazes de encontrar uma solução ótima global para problemas com modelo de programação linear inteira mista (PLIM), dentre eles destaca-se o Branch and Bound (Land & Doig, 1960), que apresenta tempo computacional elevado para problemas de grande porte.

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição pode ser representado pela teoria dos grafos, tem natureza “combinatorial”, por esta característica as técnicas de otimização clássica não são recomendadas para este tipo de problema. Desta maneira existem poucos exemplos na literatura.

Como citado anteriormente Merlin & Back (1975) apresentaram em seu trabalho um algoritmo de otimização clássica, um método aplicável em redes de pequeno porte, que utiliza a técnica de programação linear inteira, aplicando o algoritmo de “branch-and-bound” para encontrar uma solução ótima radial atendendo o critério de mínimas perdas.

Em Glamocanin (1990) foi apresentado algoritmo para solução do problema de

reconfiguração. A configuração inicial foi obtida com a aplicação da linearização das perdas e para melhorar a solução inicial foi utilizado o método Simplex para problemas quadráticos.

Em Abu, (1996a; 1996b) foi proposto um algoritmo de programação linear modificado, com esta modificação foi possível encontrar a topologia radial com menores perdas para o problema.

Em Lavorato, Franco, Rider, & Romero (2012) foi apresentado um algoritmo capaz de resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica resolvendo um problema de programação não linear a cada nó da árvore de Branch and Bound.

Capítulo 3

Sistema Elétrico de Potência

No SEP as unidades geradoras compreendem os equipamentos conectados ao sistema, capazes de transformar vários tipos de energia em energia elétrica. Geralmente, a geração está distante dos centros de consumo e é indispensável a interligação entre ambos. A energia elétrica gerada não pode ser armazenada e deve ser imediatamente transportada aos centros de demanda para sua distribuição e consumo. Esse processo é dividido em duas etapas importantes: a transmissão e a distribuição de energia elétrica. A transmissão é feita por redes de transmissão que ligam as subestações de geração com as subestações de distribuição. A subestação de geração eleva a tensão elétrica de geração, na ordem de centenas de volts (V), para uma tensão de transmissão na ordem de centenas de quilovolts (kV). Elevando a tensão para transportar a energia a longas distâncias, diminui-se a corrente que circula pelas linhas e também as perdas técnicas do sistema de transmissão, e assim, aumentando a eficiência do sistema.

A energia elétrica é transportada pelo sistema de transmissão até a subestação de distribuição, dando início ao sistema de distribuição. Neste capítulo será descrito detalhadamente o sistema de distribuição, que é o foco deste trabalho.

3.1 Sistema Elétrico de Distribuição

O sistema elétrico de distribuição muitas vezes se confunde com a topologia das cidades, se ramificando ao longo de ruas e avenidas para atender a demandas residenciais e comerciais.

O sistema tem início nas subestações de distribuição, que tem a função de rebaixar a tensão elétrica de centenas de kV para dezenas de kV. Os alimentadores (circuitos trifásicos) são conectados aos barramentos da subestação de distribuição através de disjuntores, dispositivos de proteção contra curtos-circuitos (CC) e algumas vezes reguladores de tensão dando início ao sistema de distribuição de energia.

O sistema opera linhas de média e baixa tensão, também chamadas de rede primária e secundária, respectivamente. A rede primária compreende do barramento de distribuição até o barramento primário do transformador de distribuição, que reduz o nível de tensão ao nível de

consumo comum. Consumidores comerciais e industriais de grande porte podem ter sua demanda atendida pela rede primária e o consumidor comum pela rede secundária. A energia é efetivamente entregue aos consumidores conectados à rede de distribuição elétrica, podendo ser rede de tipo aérea ou de tipo subterrânea.

As redes primárias são compostas por um ramal principal do qual são feitas derivações, que normalmente são protegidas por fusíveis. Possuem chaves seccionadoras, que operam na condição normal fechada, destinadas a isolar blocos de carga, permitindo sua manutenção corretiva ou preventiva. Também são instaladas em um mesmo circuito, ou entre circuitos distintos, chaves operando em aberto, que com seu fechamento possibilita manobras de transferência de carga para isolar partes da rede que necessitem manutenção com a máxima redução de consumidores afetados.

Durante a operação do sistema de distribuição devem ser consideradas as restrições de carga e restrições operacionais do sistema, a operação da rede de distribuição pode ser dividida em três estados distintos: Normal, Emergência e Restauração (Murphy & Wu, 1990).

O estado de emergência se caracteriza pela existência de falhas na rede, não atendendo os limites de tensão ou corrente, ou seja, desrespeitando as restrições operacionais deixando de estar no estado normal. Com o a identificação do defeito e isolamento da falha atinge-se o estado de restauração, porém o isolamento da falha gera desligamento de consumidores, o operador deve restabelecer o sistema com o menor tempo possível para garantir a qualidade do serviço e garantir que as restrições operacionais voltem a ser satisfeitas.

No Brasil a maioria dos sistemas de distribuição possui uma estrutura malhada, embora operem com configuração radial, isto é, tem apenas um caminho entre cada cliente e a subestação, ou seja, se houver uma interrupção no fluxo de energia resulta na perda completa de energia ao cliente. Porém as maiores vantagens da configuração do sistema radial, em adição ao seu baixo custo, são a simplicidade de análise e previsibilidade de desempenho. A topologia radial tem, também, o propósito da redução das correntes de curto-circuito.

Por conseguinte, o planejamento da operação visa arranjos com intuito de alcançar uma estratégia ótima de operação, sem curtos-circuitos, com minimização de perdas, atendimento da demanda diária com boa qualidade de serviço e redução dos custos de operação.

3.2 Problema de reconfiguração de redes de distribuição

O problema da RSDEE foi formulado para encontrar a topologia radial ideal através da abertura e fechamento de chaves seccionadoras posicionadas em pontos estratégicos para minimizar as perdas nos alimentadores e aumentar a qualidade de atendimento de energia aos consumidores. Ele foi tratado como um problema de programação não linear de grande porte com variáveis reais e inteiras. Assim, foi viável encontrar no espaço de configurações possíveis, a configuração que produza as perdas mínimas de potência no sistema de distribuição. Por

muito tempo a restrição de radialidade dificultou a modelagem matemática correta para o problema da reconfiguração por meio de relações algébricas relativamente simples. Este problema foi resolvido em Lavorato, Rider, Garcia, & Romero (2010).

O Problema tem natureza “combinatorial”, o número de soluções produzidas pela abertura ou fechamento das chaves cresce exponencialmente com o aumento da complexidade do sistema, denominado explosão “combinatorial”. Esta natureza combinatória tornou este problema difícil de resolver, sendo um dos problemas mais pesquisados entre os problemas de otimização da operação de sistemas elétricos de potência.

Diferentes modelos matemáticos foram propostos para resolver esse tipo de problema, inicialmente os modelos adotados sofreram muitas simplificações para convertê-los em um modelo compatível para solução com as técnicas de computação e os métodos de solução existentes. Atualmente modelos mais realistas e robustos vêm sendo adotados e empregados no planejamento da operação.

O modelo matemático ideal do problema de reconfiguração é uma árvore geradora que minimize uma função objetivo como as perdas, satisfazendo as restrições físicas (4) e operacionais (1, 2, 3) conforme a seguir:

1. Os limites de tensão nas barras do sistema;
2. A capacidade de corrente nos alimentadores;
3. As duas leis de Kirchhoff estruturadas através do FC;
4. A operação do sistema de distribuição deve ser uma configuração radial.

A formulação matemática para minimizar perdas ativas, considerando demanda fixa, configuração radial única e sistema simétrico e equilibrado, assume a forma mostrada em (Lavorato et al., 2012):

$$Min v = \sum_{(ij) \in \Omega_l} [g_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_{ij}))] \quad (1)$$

s.a

$$P_{Si} - P_{Di} - \sum_{j \in \Omega_{bi}} x_{ij} \cdot P_{ij} = 0 \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$Q_{Si} - Q_{Di} - \sum_{j \in \Omega_{bi}} x_{ij} \cdot Q_{ij} = 0 \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (3)$$

$$\underline{V} \leq V \leq \bar{V} \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (4)$$

$$x_{ij} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \leq S_{ij}^2 \quad \forall_{ij} \in \Omega_l \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (6)$$

$$\sum_{(ij) \in \Omega_l} x_{ij} = n_b - 1 \quad (7)$$

A equação (1) representa a função objetivo, que busca minimizar as perdas ativas do sistema de distribuição de energia elétrica. As restrições (2) e (3) representam o balanço de potência ativa e reativa, respectivamente. Em (4) está representada a restrição dos limites de magnitude de tensão para cada barra do sistema, sendo estes limites regidos e padronizados pelas normas reguladoras do sistema. A restrição (5) representa o cumprimento do limite para o fluxo de potência na linha ou circuito ij . Em (6) é apresentada a variável de decisão binária do problema. Ela pode assumir dois valores, representando dois estados de operação: se assumir o valor 1 significa chave para ij fechada (linha ij conectada ao sistema) e se assumir o valor 0 significa chave para ij aberta (linha ij desconectada do sistema). Em (7) é apresentada uma restrição relacionada com a determinação de uma topologia radial.

As restrições (2) e (3) garantem o cumprimento da primeira lei de Kirchhoff (lei das correntes). Nestas restrições, P_{ij} e Q_{ij} são determinados pelas equações apresentadas a seguir:

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos(\theta_{ij}) + b_{ij} \sin(\theta_{ij})) \quad (8)$$

$$Q_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \sin(\theta_{ij}) + b_{ij} \cos(\theta_{ij})) \quad (9)$$

Estas restrições (8) e (9) garantem o cumprimento da segunda lei de Kirchhoff (lei das tensões).

Para assegurar que um sistema de distribuição tenha uma topologia radial é necessário satisfazer as restrições (6) e (7), e assegurar que todas as barras com demanda de potência sejam atendidas, formando um grafo conexo. Isto foi um dos desafios implementados no algoritmo especializado dinâmico PRIM e assegurado na programação através de restrições, desta forma as restrições estabelecidas garantem que qualquer solução factível, assim como a solução ótima, seja radial.

O desenvolvimento de modelos matemáticos de otimização e de métodos de resolução, aliadas a técnicas computacionais, são de grande importância para o sistema de distribuição de energia. Possibilitando o atendimento das exigências técnicas impostas pelos órgãos reguladores, fornecendo energia elétrica aos consumidores com qualidade e confiabilidade com o menor custo possível.

Capítulo 4

Algoritmo PRIM

As técnicas heurísticas são realizadas por meio de aproximação a um determinado objetivo, assim, tem um tempo de execução do algoritmo sempre aceitável e encontra uma solução provavelmente boa ou até mesmo a solução ótima. Porém, não existe garantia para solução generalizada, todos os casos devem ser analisados individualmente.

O algoritmo PRIM inicialmente foi desenvolvido pelo matemático Vojtech Jamik (Jarník, 2004), no final da década de 60 o método foi implementado pelo cientista da computação Robert Clay Prim (Prim, 1957).

O método de PRIM é uma das técnicas heurísticas construtiva de otimização utilizada para identificar uma árvore geradora mínima para um grafo malhado, com pesos atribuídos aos ramos (linhas) e não direcionados. Este é um dos métodos mais utilizados para resolver problemas de grande complexidade, também é muito empregado integrado com técnicas de metaheurísticas mais sofisticadas aplicado em problemas de reconfiguração de redes de distribuição. Conforme constatado em Amasifen et al. (2005), Franco et al. (2012) e Possannolo (2015) o algoritmo de PRIM tem excelentes resultados para obter uma configuração radial para resolver RSDEE, depois desta análise, foi escolhido o método de PRIM para implementação de um algoritmo adaptado para encontrar os pesos máximos, potência ativa, da configuração radial desejada.

A modelagem do sistema foi realizada baseada em dados de modelos consagrados do referido tema, utilizando estas configurações de rede foi elaborado um algoritmo PRIM especializado que aplica conceitos de heurísticas construtivas para um processo passo a passo para construção de uma árvore geradora máxima, a qual é responsável por encontrar uma solução factível e geralmente de boa qualidade para o problema.

Para a aplicação do método é necessário conhecer detalhadamente a configuração escolhida, preliminarmente foi calculado o FC para o sistema. Próximo passo foi a abertura de todas as chaves nos ramos do sistema, é preciso que todos os ramos tenham os dados de potência ativa calculados para serem utilizados como um critério de desempenho e que seja identificada a barra conectada a geração de energia.

Com todas as condições iniciais atendidas, a partir da barra de geração investiga-se qual ramo conectado a ela tem maior potência ativa, é verificado se este ramo não fecha um laço (restrição de radialidade), atendendo esta restrição a chave do ramo é fechada e uma nova barra é ligada a barra de geração, formando um subgrafo.

No próximo passo é feita uma nova investigação considerando todos os ramos ligados ao subgrafo, repetindo a ação anterior encontrando o ramo com maior potência ativa. Este processo é repetido até que todas as barras do sistema estejam incluídas no subgrafo formando assim, uma árvore geradora desejada, atendendo a condição de factibilidade, ou seja, existindo um caminho apenas entre cada barra de demanda e a subestação, e que a solução deve ter o número de ramos igual ao número de barras menos um. Estas duas condições garantem que a solução deve ser radial.

Assim, o algoritmo tem a lógica apresentada a seguir:

1) Inicialização:

- Deve ser conhecida a configuração a ser aplicada;
- Todos os ramos do sistema malhado devem ter pesos atribuídos;
- Todos os ramos devem ter as chaves abertas ou desligadas;
- Identificação da barra de geração (árvore formada contém apenas esta barra).

2) Repita os passos a) e b) até que a árvore formada contenha todas as barras (número de ramos ligados é igual ao número de barras do sistema menos um).

- a) Escolha o ramo com maior potência ativa entre todos os ramos com chave aberta que estão ligadas à árvore formada.
- b) Este ramo liga uma nova barra à árvore formada?
 - Sim → Feche a chave do ramo acrescentando a barra à árvore formada.
 - Não → Este ramo não faz parte da radial volte para o passo a).

3) Encontrou a configuração radial desejada.

Esse procedimento demonstra que o algoritmo encontra um subgrafo do grafo original com todas as barras conectadas, no qual, depois de calculado o FC fracamente malhado para a configuração, a soma total das perdas em cada ramo é a minimização das perdas técnicas para o sistema.

A Figura 4.1 ilustra um exemplo da aplicação do algoritmo em um caso hipotético para um sistema com uma barra de subestação e 4 barras de consumo.

A Figura 4.1(a) ilustra o sistema inicial, com todos os ramos abertos (linhas pontilhadas) e com pesos atribuído.

Nas Figuras 4.1(b) até a Figura 4.1(d) é ilustrado o processo construtivo de fechamento (linha pintada), a árvore atual se expande da maneira gulosa, simplesmente anexando a barra com menor peso conforme descrito nos parágrafos anteriores.

A Figura 4.1(e) ilustra a escolha do ramo de peso 3. Um laço seria formado para o sistema, violando uma condição de restrição. Esta chave não é fechada e este ramo não é considerado para solução deste sistema.

A Figura 4.1(f) ilustra o fechamento da última chave, encontrando a configuração radial para o sistema (número de ramos $- 1 =$ número de barras).

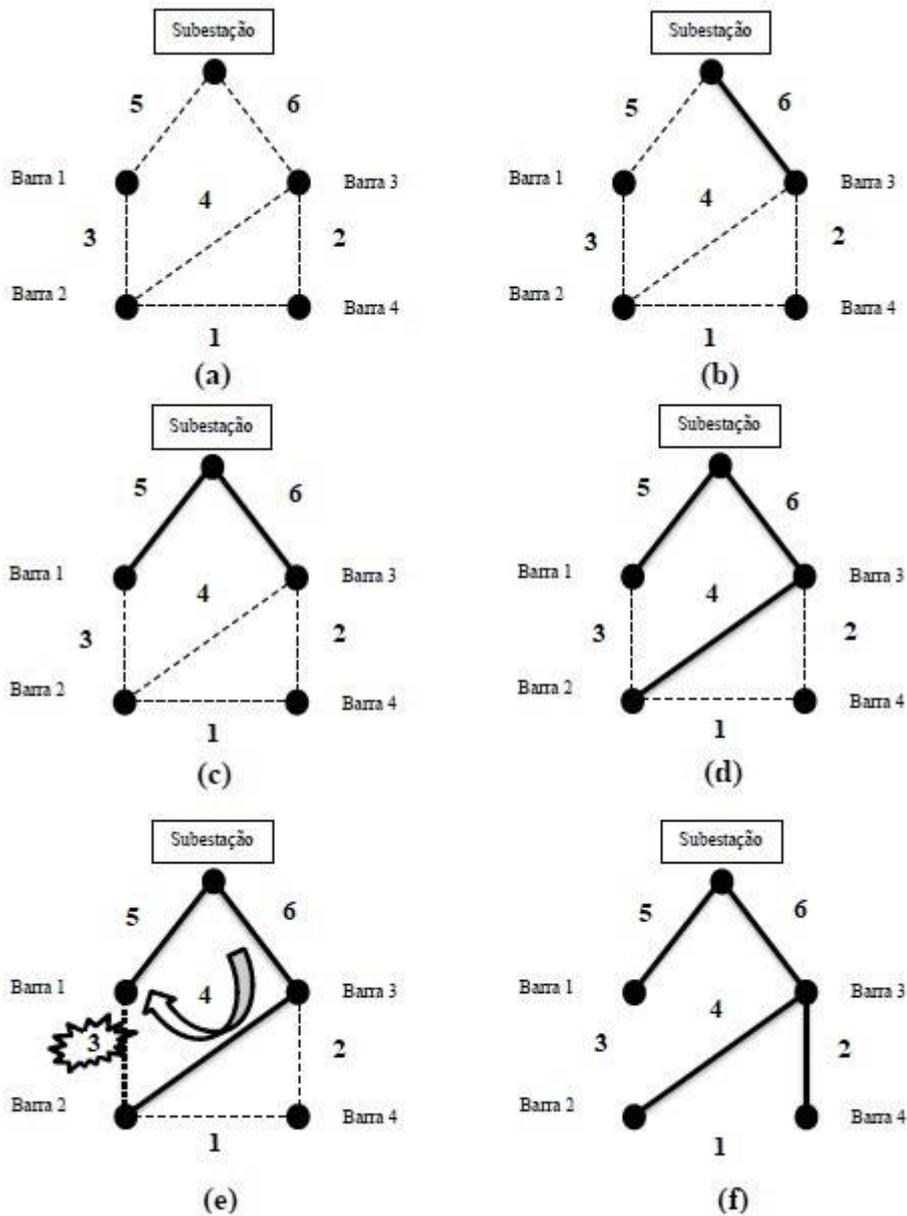


Figura 4.1 – Algoritmo PRIM

Fonte: Do próprio autor.

O algoritmo de PRIM tem características de um algoritmo guloso: para cada iteração é escolhida para ser fechada a chave do ramo com maior peso da árvore, sem se importar com o efeito global dessa escolha. Assim, o algoritmo de PRIM é utilizado somente para conseguir

uma solução sub-ótima, levando em conta valores estimados para os pesos. Um processo de busca ótima, portanto, implica analisar implícita ou explicitamente todas as configurações radiais possíveis.

Capítulo 5

Programação Dinâmica

Em todo algoritmo foi realizada a manipulação de dados. Mantê-los armazenados de forma estruturada foi extremamente necessário para o seu bom funcionamento de uma forma eficiente. Estruturas de dados avançadas são uma maneira interessante de memorizar os dados de forma organizada para o programa. As principais estruturas de dados avançadas são: pilhas, filas, listas e árvores.

Listas podem ser implementadas com alocação estática ou com alocação dinâmica. A alocação de memória estática acontece por meio de variável, vetor ou matriz e deve ser realizada antes que o programa seja executado, ou seja, o programador precisa conhecer muito bem o problema ou irá limitar a capacidade do programa. Caso o número de elementos armazenados for muito inferior ao dimensionado o algoritmo pode causar um desperdício de memória durante a implementação. Uma maneira de minimizar estes problemas seria a alocação dinâmica de memória (Celes, Cerqueira, & Rangél, 2016).

A alocação dinâmica de memória é um mecanismo utilizado para possibilitar que uma quantidade de memória seja utilizada durante o tempo de execução de uma aplicação, com isso não há necessidade de previsão do número de elementos para programação. Para este trabalho foram utilizadas listas duplamente encadeadas para alocação de memória dinâmica (Edelweiss & Livi, 2014).

A alocação é feita por meio de ponteiros, que são variáveis que indicam algum endereço de memória que pode armazenar um dado, o espaço alocado depende do tipo de dado apontado. A declaração de ponteiros, por si só, não aloca espaço de memória, só reserva um endereço. A alocação destes espaços deve ser feita em tempo de execução e de forma explícita (Celes et al., 2016).

Outra vantagem das listas é que os dados podem ser inseridos em qualquer posição, em função de uma estratégia qualquer facilitando o gerenciamento dos dados (Edelweiss & Livi, 2014).

Mas, a maior vantagem da alocação dinâmica é a redução das iterações, principalmente a redução de uso de condicionais nos algoritmos. Os dados apontam para seus tipos e outros tipos

na memória não necessitando de realizar buscas profundas. Ainda, a remoção e a inclusão de dados não necessitam dos movimentos os antigos, mesmo que sejam ordenados. O apontamento de ponteiros para endereços de memórias onde contêm os dados possibilita manter os dados nos seus devidos lugares, e os ponteiros que apontam para novos endereços.

5.1 Listas dinâmicas duplamente encadeadas

Em uma lista dinâmica duplamente encadeada a construção fundamenta-se em uma sequência encadeada de elementos, geralmente chamados de nós da lista.

A lista é representada por um ponteiro, ele não contém informações relacionadas aos dados da lista e nunca é removido. Inicialmente ele é apontado para NULL, que representa uma indicação de ausência de elemento ou vazio.

Para inclusão do primeiro elemento na lista, este ponteiro é apontado para um endereço de memória (nó) contendo todas as informações obtidas do arquivo e este nó possui um ponteiro que indica o nó anterior apontado par NULL e um ponteiro que indica próximo nó formando uma lista de nós também apontado para NULL, indicando que esta lista tem um apenas um elemento, ilustrados nas cores azul e vermelha respectivamente na Figura 5.1. Conforme são criados novos nós, que podem ser chamados de elementos, eles são incluídos na lista através dos ponteiros. Os nós da lista podem ser incluídos em ordem de inclusão, em ordem crescente ou decrescente de alguma informação ou de forma aleatória conforme o desejo do programador. Devido ao duplo encadeamento pode-se percorrer pelos ponteiros os elementos em ambas direções possibilitando acessar os elementos adjacentes: o próximo e o anterior conforme necessário. Os nós das extremidades tem um ponteiro apontado para NULL, sinalizando que não existe um próximo elemento, Conforme ilustrado na Figura 5.1.

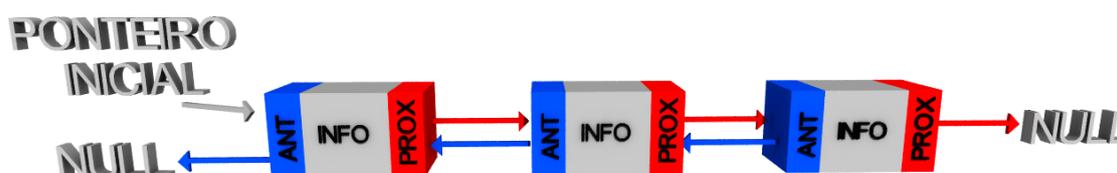


Figura 5.1 – Listas Duplamente Encadeada

Fonte: Do próprio autor.

Esta é uma estrutura auto referenciada, pois possui o campo que armazena as informações e possui um campo que é um ponteiro para uma próxima estrutura do mesmo tipo.

Nas listas duplamente encadeada implementadas o espaço total gasto pela estrutura é proporcional ao número de elementos nela armazenado, pois para cada novo elemento inserido na estrutura, reserva-se um espaço de memória. No entanto, não é garantido que os elementos

armazenados na lista ocuparão um espaço de memória contíguo, diferentemente de um vetor ou matriz (alocação estática), assim, com o duplo encadeamento é possível ter um melhor gerenciamento dos dados na lista possibilitando a busca dos elementos adjacentes por toda sua extensão.

Para melhor compreensão é apresentada uma analogia da memória do computador e um sistema de armazenamento de caixas. A memória seria o depósito onde existem uma quantidade 'n' de caixas iguais e vazias, onde podem ser guardadas um item em cada caixa.

Na alocação Estática o programador define o número de caixas que o programa poderá trabalhar, exemplificando:

- O programador escolhe 10 caixas para o algoritmo, estas caixas são retiradas de seus lugares no depósito e colocadas todas lado a lado em uma prateleira. Caso o algoritmo tenha 10 objetos distintos, cada elemento será colocado em uma caixa diferente, e para encontrar um certo objeto o algoritmo terá que procurar caixa por caixa, aumentando o esforço computacional.
- Caso o algoritmo tenha 4 objetos distintos, o algoritmo manterá as 10 caixas exclusivas para seu uso, ocasionando um desperdício de caixas.
- No caso do algoritmo ter 15 objetos distintos, o algoritmo não funcionará, pois não tem espaço suficiente para armazená-los.
- Quanto necessário a exclusão de um objeto ou mudança de ordem, é necessário movimentar todas as caixas na prateleira.

Na alocação dinâmica de memória, o algoritmo escolhe uma caixa qualquer e com um bilhete, que fica guardado dentro da caixa, indica o local em que a próxima caixa está dentro do depósito (encadeamento com ponteiro), e assim feito para quantas caixas forem necessárias para guardar os itens, assim sendo, evita-se o desperdício de espaço, pois utiliza-se o número de caixas (espaços da memória) de acordo com a necessidade do algoritmo.

Para aumentar a facilidade de busca pode ser deixado dois bilhetes dentro da caixa (duplo encadeamento), possibilitando uma maior possibilidade na busca dos itens. Caso necessário a exclusão ou mudança de ordem dos objetos é feita uma mudança nos bilhetes (ponteiros) indicando esta nova configuração. Este processo diminui o tempo de processamento do algoritmo.

Para o problema proposto foi elaborado uma modelagem do sistema que forma uma teia interligada representando a configuração do sistema proposto, seguindo esta analogia, seria como se em cada caixa fossem deixados vários bilhetes (Duplo Encadeamento) indicando as caixas relacionadas ao modelo do sistema para o algoritmo utilizado, assim a busca pelo objeto desejado é facilitada e feita com o menor tempo e esforço computacional.

Vantagens

- Não há necessidade de previsão do número de elementos da lista; o espaço necessário é alocado em tempo de execução;
- A inserção e remoção de elementos podem ser feitas sem deslocar os itens seguintes da lista na memória;
- Diminui o esforço computacional;
- Facilita o gerenciamento de várias listas.

Cuidados

- Devido ao acesso indireto aos elementos e a frequente manipulação dos ponteiros é necessário muito cuidado para não cometer erros de programação. Casos erros ocorram é possível o surgimento de algumas consequências mais graves como a perda de informações durante o processamento, lentidão e travamento do sistema.

Capítulo 6

Materiais e Métodos

Neste capítulo são mostrados os aspectos básicos da implementação do algoritmo dinâmico PRIM para resolver o problema de RSDEE para minimização das perdas. Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica do SEP, em paralelo foram feitas revisões bibliográficas fundamentadas em ferramentas e conhecimentos avançados de modelagem e análise de sistemas dinâmicos e energéticos, visando à otimização de recursos, de operação e de desempenho nesta classe de sistemas. Foram estudados alguns modelos matemáticos e técnicas de solução usados para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição encontrados na literatura especializada. Como forma de apresentar os modelos e algumas das diferentes técnicas de otimização utilizadas na literatura para resolver o problema são abordadas as técnicas de otimização para os modelos de programação linear e as técnicas de otimização para os modelos de programação não linear, com destaque para as meta-heurísticas. Com o entendimento aprofundado sobre o assunto foi realizada a implementação de um algoritmo para solução do problema RSDEE.

A modelagem do sistema foi realizada a partir dos dados referentes a bibliografia estudada e de modelos matemáticos consagrados do referido tema. Foram adotadas para os cálculos as seguintes configurações de sistema de distribuição: Sistema com 14 barras para configuração inicial de um sistema de distribuição conforme originalmente apresentado em Civanlar et al., (1988), sistemas de 33 barras apresentado em Baran & Wu (1989), 84 barras apresentado em Chiou, Chang, & Su (2005), 136 barras apresentado em (Mantovani et al., 2000) e 415 barras apresentado em Bernal-Agustin (1998).

Utilizando a ferramenta Dev-C++ foi desenvolvido um algoritmo que utiliza alocação dinâmica de memória listas duplamente encadeadas para a obtenção de uma programação inteligente. Foi implementado um algoritmo dinâmico construtivo rápido de árvores geradoras, algoritmo especializado PRIM, visando alcançar a melhor reconfiguração do sistema de distribuição com mínimas perdas.

Para explicação da metodologia utilizada no algoritmo foi utilizado como exemplo a configuração do sistema de 14 barras apresentado por Civanlar et al. (1988), sistema

amplamente utilizado para cálculos de otimização, conforme ilustrado na Figura 6.1.

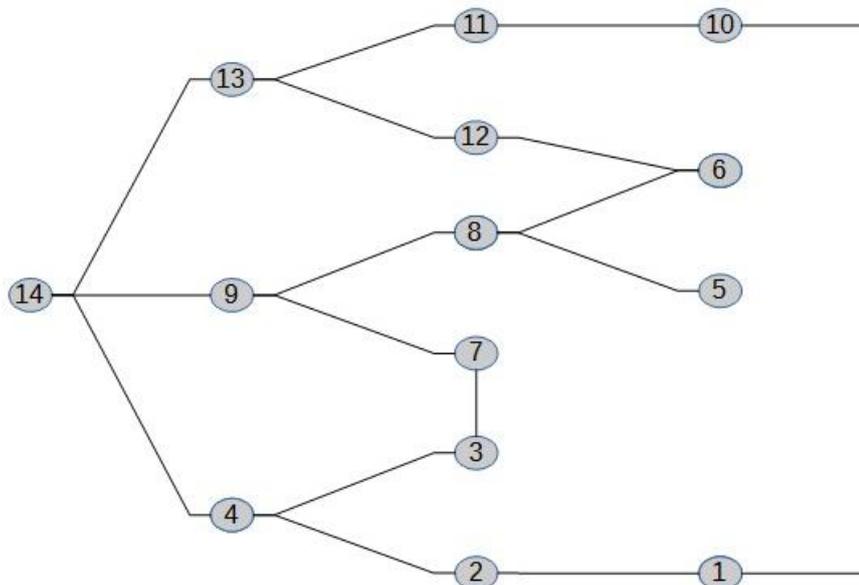


Figura 6.1: Sistema de 14 barras apresentado por Civanlar et al. (1988).

Fonte: o próprio autor.

Com os dados do sistema apresentados na Tabela 6.1, Tabela 6.2 e Tabela 6.3 foram elaborados em um arquivo para banco de dados e acesso do algoritmo para processamento dos cálculos.

Tabela 6.1: Dados do sistema de 14 barras.

Barra da Subestação	Barra 14
Tensão na Subestação (Base de Tensão)	23,00 kV
Base de Potência Ativa	100000 kVA

Fonte: Civanlar et al. (1988).

Tabela 6.2: Dados dos ramos

Nome do ramo	Barra de Entrada	Barra de Saida	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kVA)
1	14	9	11,0000	11,0000	11.177,60
2	14	13	7,5000	10,0000	11.050,43
3	14	4	11,0000	11,0000	7.605,07
4	9	8	8,0000	11,0000	7.324,98
5	13	12	8,0000	11,0000	5.893,25
6	8	5	8,0000	11,0000	4.819,21
7	4	2	8,0000	11,0000	3.905,06
8	2	1	4,0000	4,0000	2.947,93

9	12	6	4,0000	4,0000	2.852,68
10	13	11	9,0000	18,0000	2.804,99
11	4	3	9,0000	12,0000	2.514,55
12	8	6	11,0000	11,0000	2.285,19
13	7	3	4,0000	4,0000	1.977,20
14	11	10	4,0000	4,0000	1.256,47
15	10	1	9,0000	12,0000	796,40
16	9	7	11,0000	11,0000	632,29

Fonte: Civanlar et al. (1988).

Tabela 6.3 – Dados das Barras.

Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
1	2100,00	-800,00
2	1000,00	900,00
3	1000,00	-1100,00
4	1000,00	900,00
5	4500,00	-1700,00
6	600,00	-500,00
7	1000,00	900,00
8	5000,00	1800,00
9	4000,00	2700,00
10	1500,00	1200,00
11	2000,00	-400,00
12	3000,00	400,00
13	2000,00	1600,00
14	0,00	0,00

Fonte: Civanlar et al. (1988).

O algoritmo inicialmente solicita o número de barras do sistema, escolhido pelo operador, para identificar os arquivos com os dados relacionados, fazendo seu carregamento e dando início ao processamento.

6.1 Etapas de Construção do Algoritmo

Serão descritos neste tópico as etapas de construção e processamento do algoritmo PRIM especializado utilizado, o algoritmo foi subdividido em etapas para facilitar sua implementação e entendimento.

6.1.1 Etapa Modelagem

Os primeiros passos do algoritmo foram a modelagem do sistema escolhido, esta representação foi elaborada utilizando listas duplamente encadeadas buscando aumentar a

eficiência computacional e possibilitando percorrer os elementos da lista em ambas direções facilitando o acesso das informações durante a execução do programa.

Todos os nós da lista que representam as barras do sistema possui as seguintes informações descritas com suas respectivas variáveis conforme ilustrado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Informações contidas em cada nó da lista BARRAS

Lista BARRAS	
Variável	Descrição
barra	Nome da barra (n°).
Pd	Potência Ativa (kW).
Qd	Potência Indutiva (kVAr).
Qbc	Potência Capacitiva (kVAr).
V[2]	Tensão Real e Imaginária. (pu).
I[2]	Corrente Real e Imaginária (pu).
S[2]	Potência Aparente (kVA).
gramos	Quantidade de ramos ligadas nesta barra.
ant	Ponteiro que aponta para a barra anterior.
prox	Ponteiro que aponta para a próxima barra.
Barraramo[ponteiro]	Vetor de ponteiro que aponta para os ramos que contém a barra.

Fonte: o próprio autor.

Inicialmente foi criada uma lista identificada por um ponteiro chamado BARRAS e seu primeiro nó é a barra de subestação (barra 14). As demais barras são interligadas a Lista BARRAS duplamente encadeada na ordem em que estão dispostos no arquivo. Todas as barras do sistema são adicionadas a esta lista, o duplo encadeamento é construído com os ponteiros “ant” e “prox” que interligam todas as barras da lista conforme ilustrado na Figura 6.2.

Após a finalização da lista com todas as barras, é iniciada a construção da lista dos ramos.

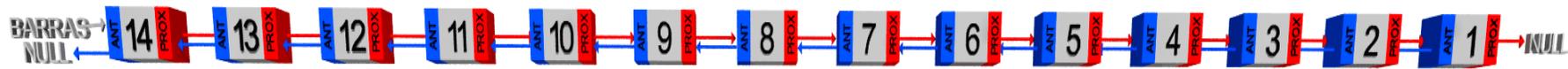


Figura 6.3: Lista BARRAS com duplo encadeamento completa.

Fonte: Próprio autor.

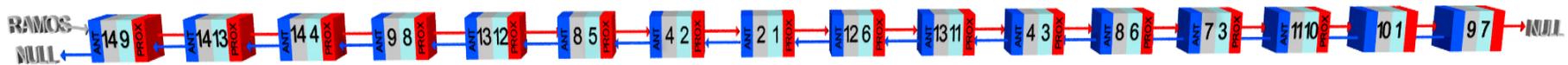


Figura 6.2 - Lista BARRAS com duplo encadeamento completa.

Fonte: o próprio autor.

Os nós que representam os ramos ou linhas do sistema possuem as informações descritas com suas respectivas variáveis conforme ilustrado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Informações contidas em cada nó da lista RAMOS

Lista Ramo	
Variável	Descrição
Ramo	Nome do ramo (n°).
S	Nome da barra de saída (n°).
E	Nome da barra de entrada (n°).
Radial	1 se estiver na lista radial; 0 se não estiver na lista radial. (Valor inicial)
P	Potência ativa no ramo (kW).
Pn	Peso de referência inversamente proporcional a potência ativa.
R	Resistência (Ω).
X	Reatância (Ω).
Z[2]	Impedância real e imaginária (Ω).
I[2]	Corrente real e imaginária (pu).
ant	Ponteiro que aponta para o ramo anterior.
prox	Ponteiro que aponta para o próximo ramo.
bs	Ponteiro que aponta para barra de saída.
be	Ponteiro que aponta para barra de entrada

Fonte: o próprio autor.

Identificada por um ponteiro denominado RAMOS, esta lista é criada com os ramos organizados em uma lista duplamente encadeada em ordem decrescente de potência ativa. Utilizando como referência a maior potência ativa para elemento inicial e a menor potência ativa para o elemento final está ilustrado na Figura 6.2 a lista com todos os ramos para o sistema proposto. Assim como o encadeamento da Lista BARRAS, para o processo de construção da Lista RAMOS, são utilizados os ponteiros “ant” e “prox” para interligação dos elementos da lista, cores azul e vermelha respectivamente.

Com as duas listas construídas separadas, foi necessário interligá-las para representação do respectivo modelo malhado proposto. Este processo foi feito por meio do ponteiro “barraramo”, que interligam os elementos da lista BARRAS com os elementos da lista RAMOS, e pelos ponteiros “bs” e “be”, que interligam os elementos da lista RAMOS com os elementos da lista BARRAS, construindo uma teia encadeada para modelar o sistema completo no algoritmo. O processo da teia completa é ilustrado Figura 6.4.

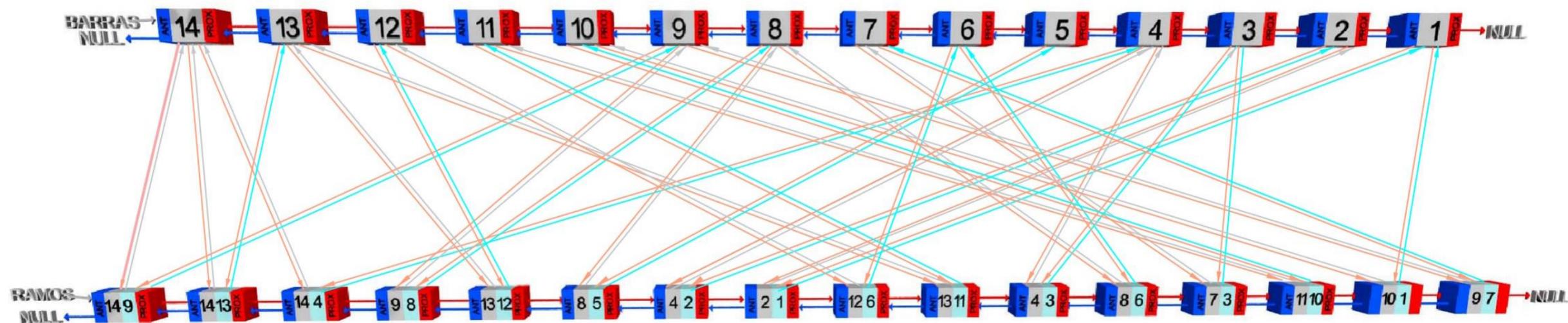


Figura 6.4 – Teia que representa o sistema malhado completo.

Fonte: próprio do autor

Na Figura 6.4 as linhas cor de rosa ilustram os ponteiros “barraramo”, e as linhas cinza ilustram o ponteiro “bs” e as linhas azul claro ilustram os ponteiros “be”.

Completando toda interligação da Lista das BARRAS com a Lista dos RAMOS o sistema proposto está modelado para o algoritmo conforme sistema apresentado por Civanlar et al. (1988). Para que o sistema modelado não seja perdido ou alterado durante o processamento do algoritmo, foi realizado um processo de clonagem (cópia de trabalho) do sistema completo mantendo o sistema original modelado intacto para que sempre possa ser feita uma nova cópia de trabalho para novos cálculos.

6.1.2 Etapa PRIM

Depois de modelar o sistema foi iniciada a etapa de busca da melhor configuração radial com o critério das mínimas perdas para o sistema proposto. Na etapa PRIM o algoritmo se beneficia da programação com alocação dinâmica de memória, facilitando a busca dos elementos durante o processamento para encontrar a melhor solução.

As condições iniciais para funcionamento do algoritmo são:

- Foi criada uma nova lista chamada lista RADIAL, lista das barras que serão incluídas na radial, apontada para NULL.
- Identificar o nó que representa a barra da subestação, barra 14. O nó da subestação foi excluído da lista BARRAS e incluído na lista RADIAL e mantendo-se ligado a teia.
- Todas os nós da lista RAMOS tem o valor da informação na variável “Radial” igual a zero.

Com as condições iniciais garantidas segue um descritivo dos passos para o algoritmo:

Passo 1:

- a) A partir da lista RADIAL, foi iniciada uma busca por meio dos ponteiros “barraramo”, linhas na cor amarela ilustradas na Figura 6.4, procurando o ramo com o maior peso, ou seja maior potência ativa e com a variável “Radial” igual a 0 (variável que indica participação na lista radial). Escolhendo o ramo que liga as barras 14-9, na primeira interação conforme ilustrado na Figura 6.5.
- b) Este ramo interliga uma barra que está na lista RADIAL? (Interliga uma barra que já foi adicionada à configuração escolhida, fecha laço?)
 - SIM → Altere o valor da informação da variável “Radial” no ramo para 2, incluindo e volte para o Passo 1.
 - NÃO → Altere o valor da informação na variável “Radial” para 1 e continue ao próximo passo (na Figura 6.5).

O processo completo da primeira interação do Passo 1 é ilustrado na Figura 6.5.

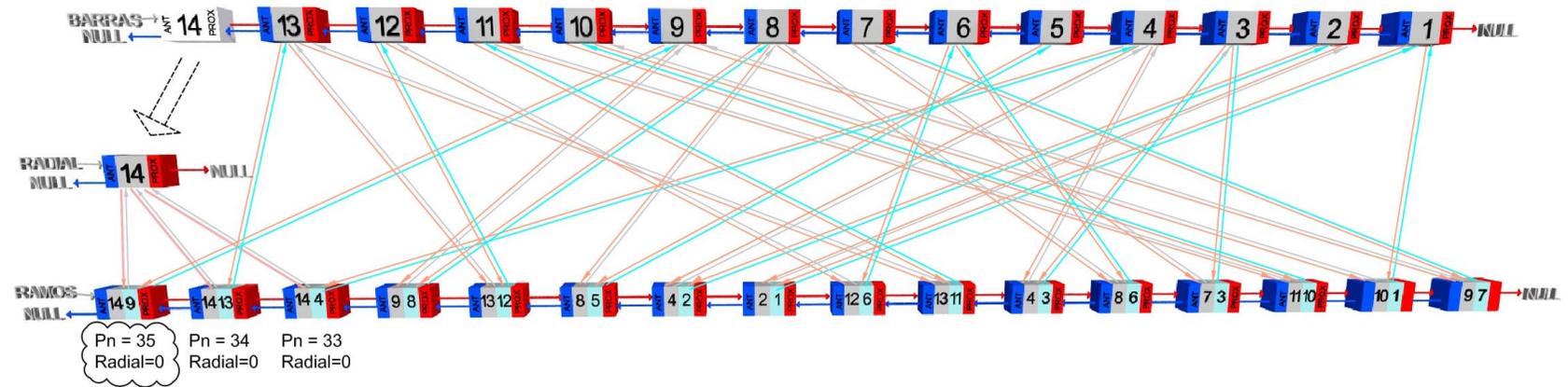


Figura 6.5 – Passo 1: formação da lista RADIAL e busca pelos ponteiros “barraramo” o com maior peso.
 Fonte: o próprio autor.

Passo 2:

O ramo escolhido, que liga as barras 14-9 na primeira interação, tem um ponteiro “bs”, ponteiro, na cor verde, que aponta para um novo nó da lista BARRA, barra 9 na primeira interação, conforme ilustrado na Figura 6.6, o algoritmo então retira este nó da lista BARRA e insere como último elemento na lista RADIAL, conforme ilustrado na Figura 6.6 e Figura 6.7.

As linhas pretas e as linhas verdes representam nas Figuras os ponteiros escolhidos para fazer parte da configuração radial da solução, ou seja conforme o sistema foi se desenvolvendo estas linhas foram surgindo na topologia formada nas Figuras.

A inclusão da barra 9 na lista RADIAL, Figura 6.7, finaliza a primeira interação do algoritmo, como todas as barras do sistema ainda não fazem parte da lista RADIAL, foi dado início a segunda interação.

Repete-se o Passo 1, buscando o ramo com o maior peso e a variável “Radial” igual a 0, as linhas em amarelo na Figura 6.5. Identificando o novo ramo foi feita a mudança do valor da variável “Radial” para 1, ramo 14-13 ilustrado na Figura 6.7 e Figura 6.8.

No Passo 2 o ramo 14-13 tem um ponteiro, linha verde, indicando uma nova barra para ser adicionada à Lista RADIAL, barra 13. Figura 6.8.

A segunda interação do algoritmo é terminada com a adição da barra 13 à lista RADIAL, Figura 6.9.

Todo o processo é repetido ilustrando a terceira interação nas Figuras 6.9 e 6.10 .

Estes passos são repetidos até que o número de barras do sistema radial, lista RADIAL, seja igual ao número de barras do sistema, número indicado pelo operador no início do algoritmo. Também é necessário que o número de ramos da radial encontrada seja igual ao número de barras do sistema menos um. Atendendo estas duas restrições fica garantida a condição de factibilidade para a configuração encontrada, ou seja, garantindo que exista apenas um caminho entre cada barra de carga e a subestação. Também é possível comprovar esta restrição verificando que o ponteiro Lista BARRAS clonado está apontando para NULL. Atendendo o critério de parada do algoritmo, a configuração radial pretendida foi encontrada e está ilustrada na Figura 6.11.

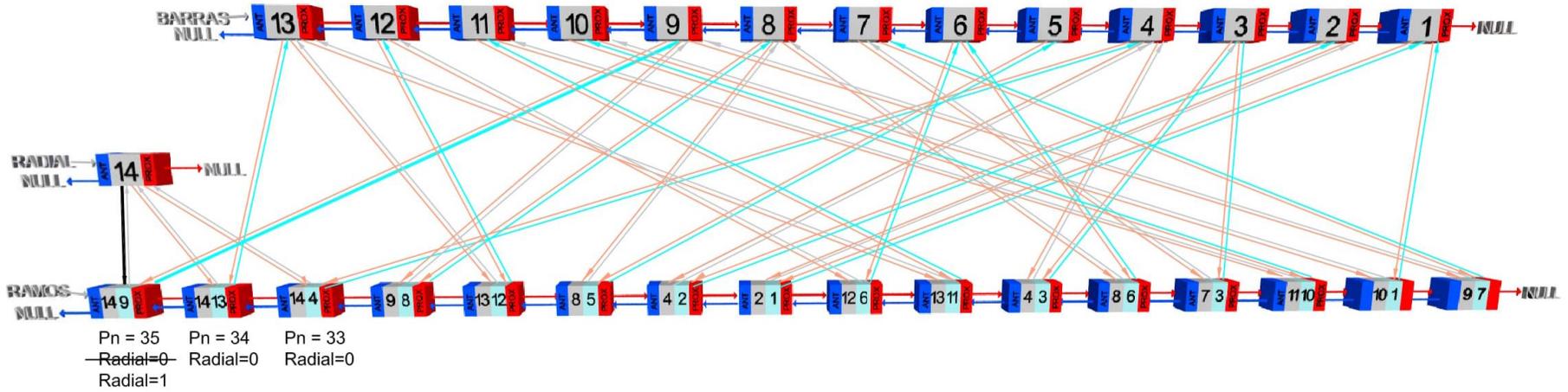


Figura 6.6 – Passo 2: escolha da barra 9 pelo ponteiro “bs”.

Fonte: o próprio autor.

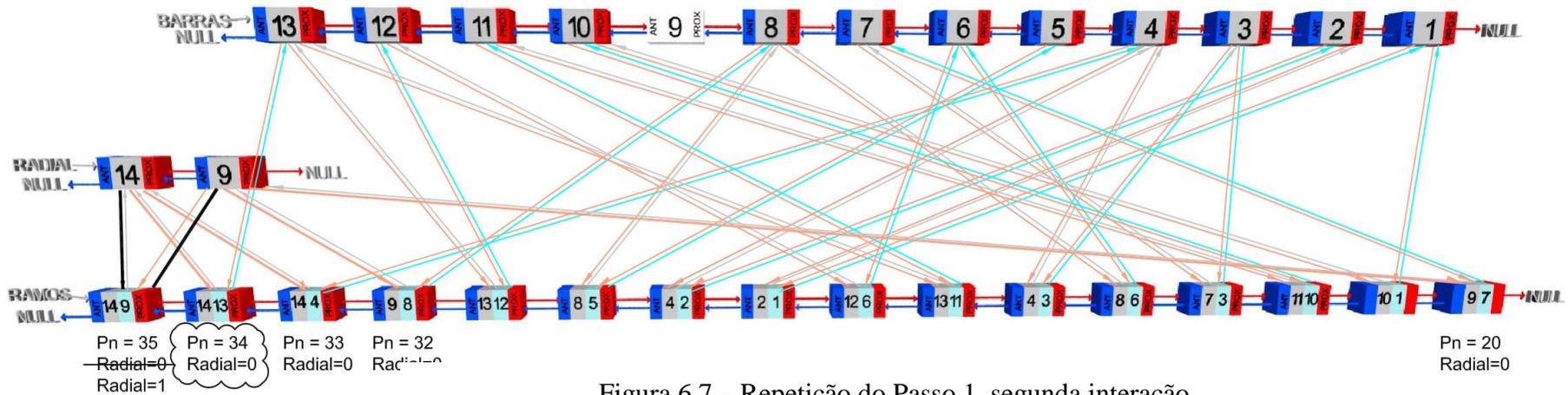


Figura 6.7 – Repetição do Passo 1, segunda interação.

Fonte: o próprio autor.

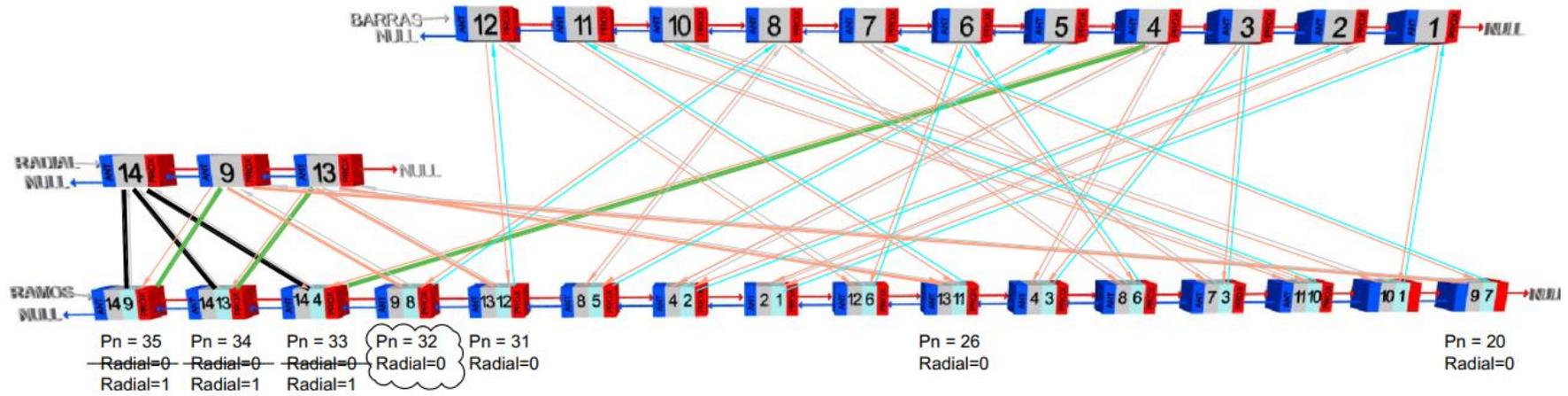


Figura 6.10 – Passo 2, terceira interação.

Fonte: o próprio autor.

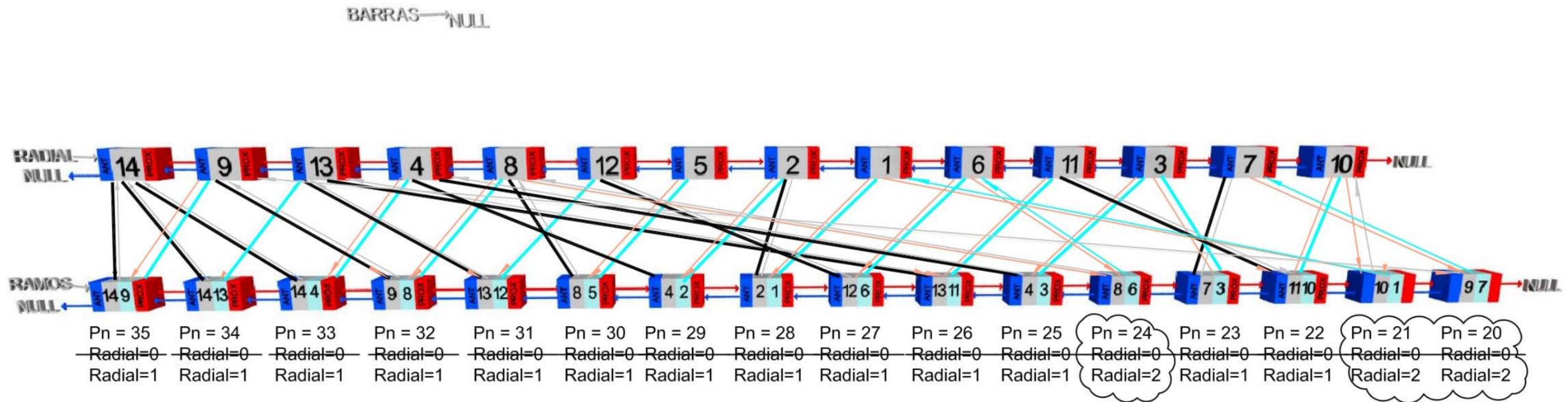


Figura 6.11 – Teia que representa o sistema radial encontrado.

Fonte: próprio do autor.

Finalizando a Etapa PRIM o algoritmo encontrou a configuração radial com mínimas perdas para o sistema proposto e na próxima etapa será calculado o Fluxo de Carda pelo método da varredura.

6.1.3 Etapa Fluxo de Carga

Com a configuração radial encontrada e clonada foi preciso realizar o cálculo do FC para encontrar os parâmetros do sistema até que o critério de parada escolhido seja atendido. O critério adotado foi um valor para variação das perdas entre duas iterações consecutivas. Foi escolhido o método do cálculo do FC de varredura apresentado por Shirmohammadi et al. (1988), como o próprio nome já diz, este método faz uma varredura saindo das barras terminais em direção as barras da subestação e vice-versa. Para iniciar a quinta etapa do algoritmo, método de varredura, é necessário fazer a renumeração do sistema.

Passo 1:

Deve ser feita a renumeração do sistema de acordo com as camadas em que se encontram, a primeira camada contem a barra da subestação e os ramos que ligam as próximas barras, estas barras compõe a segunda camada e os ramos ligados as próximas barras, assim sucessivamente até o final das barras. Todos os ramos de uma camada devem ser renumerados antes de começar a renumerar a camada seguinte. A Figura 6.10 ilustra a configuração radial com a numeração original e a Figura 6.11 ilustra a mesma configuração renumerado utilizando a lógica de camadas.

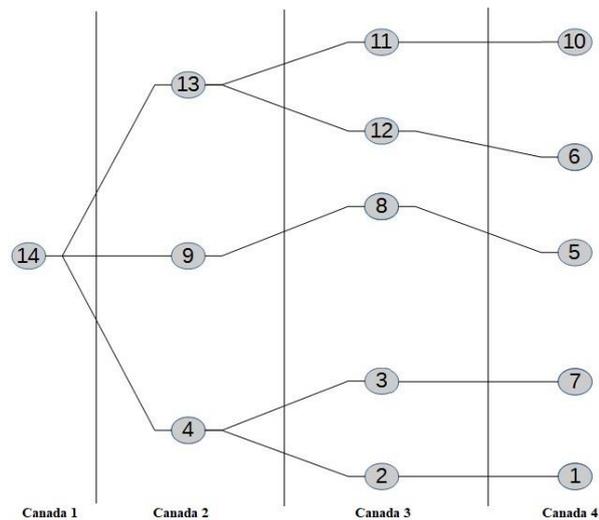


Figura 6.12 – Configuração radial encontrada com a numeração original.

Fonte: próprio do autor.

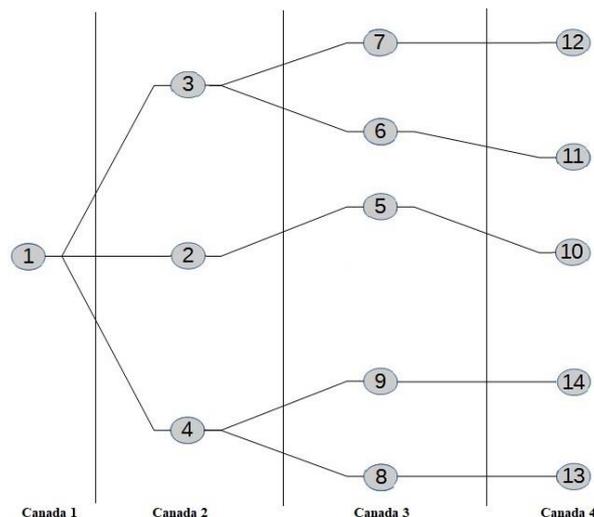


Figura 6.13 - Configuração radial encontrada com renumeração.

Fonte: próprio do autor.

Passo 2:

Concluindo a renumeração, foi determinado que o valor da tensão em todas as barras do sistema é igual ao valor da tensão da barra de subestação, 1 pu.

Passo 3:

Sabendo os valores das tensões em todas as barras, os valores das potência ativa e reativa constantes nos dados dos elementos das listas e utilizando as formulas (6.1) e (6.2) foram calculadas respectivamente as componentes reais (R) e imaginaria (i) da corrente de carga em cada a barra, onde j é a identificação para a barra calculada.

$$I_{j(R)} = \frac{P_{Dj}V_{j(R)} + Q_{Dj}V_{j(i)}}{V_{j(R)}^2 + V_{j(i)}^2} \quad (6.1)$$

$$I_{j(i)} = \frac{P_{Dj}V_{j(i)} + Q_{Dj}V_{j(R)}}{V_{j(R)}^2 + V_{j(i)}^2} \quad (6.2)$$

Passo 4:

Iniciando o processo nas barras da última camada, foi calculada a corrente nos ramos que ligam as barras da camada anterior, considerando a regra da somatória de todas as correntes que entram em uma barra é igual ao somatório das correntes que saem dela, conforme ilustrado na Figura 6.12. O processo foi repetido até serem calculadas as correntes em todos os ramos chegando na barra da subestação, este passo é conhecido como *Backward*.

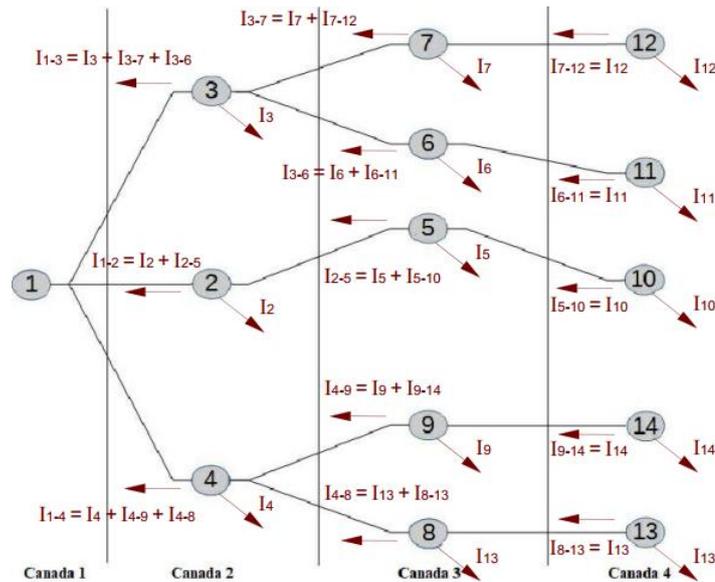


Figura 6.14 – Configuração radial com as correntes indicadas.

Fonte: próprio do autor.

Passo 5:

Desta vez iniciando o processo da barra de subestação para as barras de carga, foi calculado um novo valor para tensão de cada barra da configuração radial, levando em consideração a queda de tensão nos ramos que interligam as barras, este passo é conhecido como *forward*. A queda de tensão nos ramos foram calculadas com a aplicação das fórmulas (6.3) e (6.4) e a Tensão na barra seguinte foi calculada com a aplicação da fórmula (6.5).

$$V_{ij(R)} = r_{ij}I_{ij(R)} - xI_{ij(i)} \quad (6.3)$$

$$V_{ij(i)} = r_{ij}I_{ij(R)} + x_{ij}I_{ij(i)} \quad (6.4)$$

$$V_j = V_i - V_{ij} \quad (6.5)$$

Passo 6:

Depois de calculadas as correntes em todos os ramos, foram calculadas as perdas ativas e reativas para cada ramo (i-j), utilizando os dados da resistência (r) e reatância (x) contida nos elementos da lista e aplicando as formulas (6.6) e (6.7) respectivamente.

$$P_{ij} = r_{ij}I_{ij}^2 \quad (6.6)$$

$$Q_{ij} = x_{ij}I_{ij}^2 \quad (6.7)$$

A somatória das perdas de todas as linhas são as perdas respectivas do sistema proposto, conforme aplicação das fórmulas (6.8) e (6.9):

$$P = \sum_{(i,j) \in \Omega} r_{ij} I_{ij}^2 \quad (6.8)$$

$$Q = \sum_{(i,j) \in \Omega} x_{ij} I_{ij}^2 \quad (6.8)$$

Passo 7:

Verificação do atendimento do critério de, este critério foi especificado para o sistema e exige que a diferença entre as perdas calculadas nas duas últimas interações seja menor que a tolerância ξ . Conforme aplicação da fórmula (6.8).

$$\xi \geq P_{Atual-1} - P_{Atual}$$

Este processo foi repetido para o Passo 3 ao Passo 7 até que o valor calculado para tolerância seja menor que o valor estipulado pelo sistema.

Atendendo o critério de parada foi encontrada uma configuração radial com o valor das perdas calculadas.

O algoritmo armazena os dados para a configuração radial encontrada e inicia a etapa das soluções melhoradas.

6.1.4 Etapa Melhoria

Nesta etapa foi elaborada uma ação para gerar novas configurações radiais do sistema, e assim, comparar com melhores resultados no espaço de soluções possíveis para melhorar a eficiência do algoritmo, uma vez que, o algoritmo de PRIM não se importa com o efeito global de sua escolha.

Esse processo de busca ótima foi baseado na multiplicação de uma variável randômica que pode variar em quarenta por cento para mais ou cem por cento para menos os valores dos pesos atribuídos a potência ativa dos ramos do sistema (critério adotado pelo método de PRIM), assim foi possível variar a configuração do sistema.

O valor aplicado com a variável randômica foi escolhido após realização testes com variações de 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 80% e 100% sobre os pesos dos ramos. Foram elaborados 10 testes com cada amostra rodando o algoritmo, com seus resultados foi feita comparação entre as amostras e ficou constatado que a variação escolhida sobre os pesos permite cobrir todo o espaço das soluções possíveis para obtenção da solução ótima.

Inicialmente nesta etapa o algoritmo retorna a condição inicial do sistema malhado completo, obtendo o resultado da Etapa de Modelagem do sistema e logo após é aplicado a ação

de melhoria, conforme descrito detalhadamente nos passos a seguir:

Passo 1:

Utilizando a cópia de segurança do modelo do sistema foi aplicada uma variável randômica sobre os valores dos pesos “Pn” em todos os ramos. Esta variável randômica pode variar o peso em 40% para mais ou para menos, gerando assim variações na ordenação das escalas dos pesos podendo gerar novas configurações radiais para o sistema. (Foram testadas outros valores para este intervalo da variável randômica, concluindo que o valor escolhido atende as necessidades do algoritmo).

Passo 2:

Aplica a etapa do PRIM no sistema com os pesos variados em $\pm 40\%$.

Passo 3:

O algoritmo encontra uma configuração radial e faz uma comparação dos ramos que não fizeram parte desta configuração com os ramos que não fizeram parte da configuração radial armazenada, foram escolhidos estes ramos para comparação pois são em número muito menor que os ramos que fizeram parte da radial, diminuindo o processamento do algoritmo.

- a) Se os ramos forem iguais aos ramos que não fizeram parte da configuração radial armazenada o algoritmo retorna para o Passo 1.
- b) Se os ramos forem diferentes dos ramos que não fizeram parte da configuração radial armazenada o algoritmo vai para o Passo 4.

Passo 4:

O programa calcula o FC de varredura para esta nova configuração radial encontrada.

Passo 5:

A configuração radial foi armazenada de forma ordenada crescente em ordem das menores perdas, mantendo as configurações com menores perdas no início do arquivo, facilitando o apontamento das melhores soluções encontrada.

Passo 6:

Este procedimento é repetido até encontrar o número proposto pelo operador no início do algoritmo, com a condição de parada atendida o algoritmo finaliza esta etapa.

6.1.5 Etapa Arquivo dos resultados

O algoritmo gera um arquivo com todas as informações das configurações radiais encontradas organizadas de forma ordenada iniciando pelas melhores soluções com mínimas perdas encontradas.

6.2 Fluxograma do Algoritmo

A seguir foi ilustrado na Figura 6.13 para descrever passo a passo a natureza e o fluxo deste algoritmo. O propósito foi demonstrar de forma simplificada o fluxo das informações e elementos apresentando a sequência operacional que determina o algoritmo que foi executado.

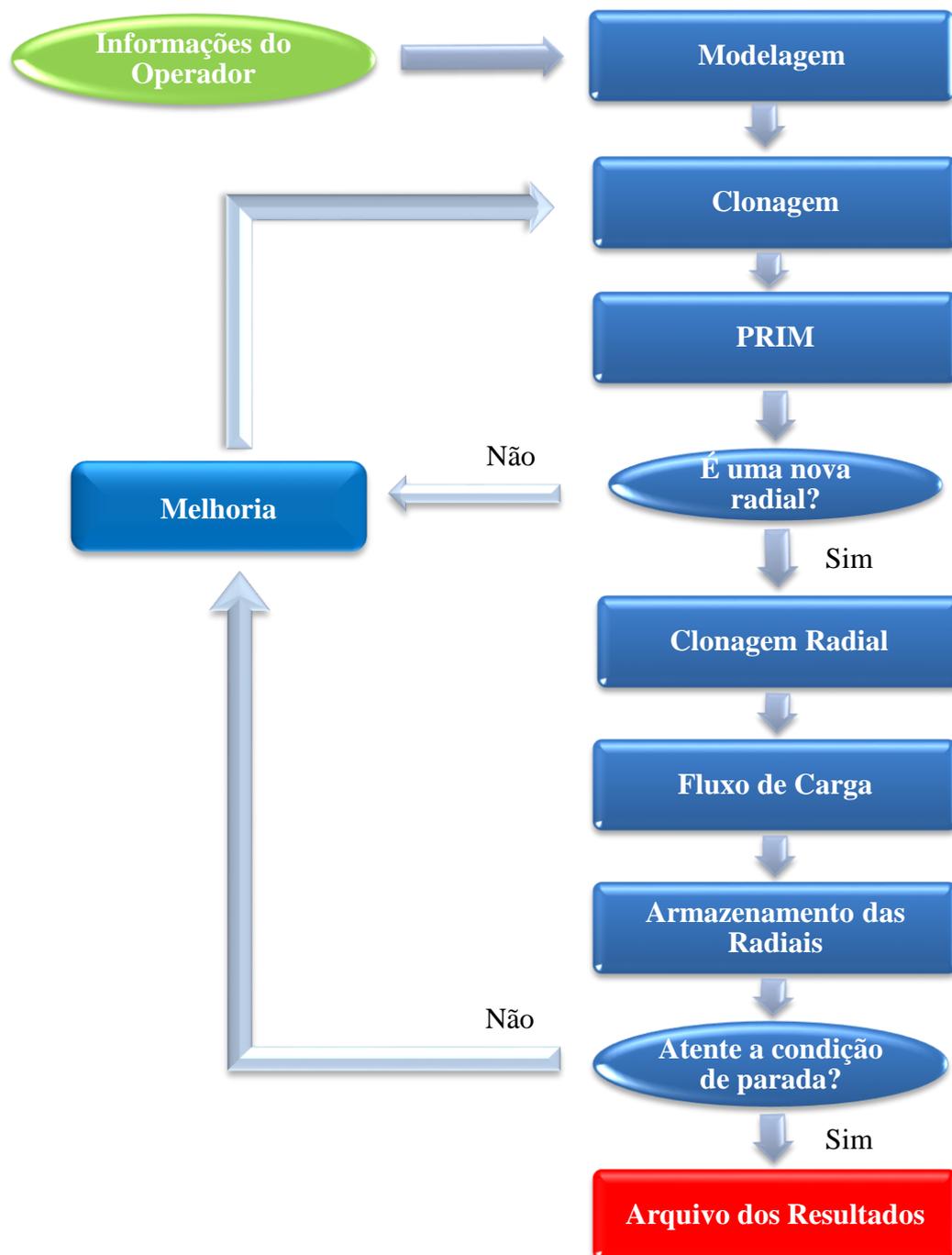


Figura 6.15 – Fluxograma do algoritmo proposto.

Fonte: próprio do autor.

Capítulo 7

Resultados

Neste Capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das simulações realizadas com a aplicação do algoritmo especializado PRIM para resolver o problema da RSDEE. O algoritmo foi implementado na linguagem C com a utilização da ferramenta de programação DEVC++ e todas as simulações foram feitas utilizando um processador Intel® Core i7-5500U 2.4 GHz e 2 GB de Memória RAM. Foram realizados testes em 5 configurações de sistemas de distribuições, conforme a seguir:

- 14 barras (Civanlar et al., 1988);
- 33 barras (Baran & Wu, 1989);
- 84 barras (Chiou et al., 2005);
- 136 barras (Mantovani et al., 2000);
- 415 barras (Ramirez-Rosado & Bernal-Agustin, 1998).

Foram testadas estas configurações, para comprovar que o programa computacional desenvolvido tem a capacidade de testar sistemas elétricos, inclusive os sistemas de grande porte. Todos os dados das configurações testadas estão no ANEXO A.

Nas simulações foram consideradas o estado crítico para os sistemas, considerando todas as demandas de potências como máximas, uma vez que esta condição é utilizada pela concessionária para dimensionar as redes. Foram adotados as mesmas condições de limites para as tensões nas barras dos sistemas dos trabalhos comparados: limite inferior 93% da tensão nominal, e limite superior 100% da tensão nominal.

Dos resultados das simulações foram extraídos dois produtos e tabulados para comparação. 1º Radial é o resultado da primeira interação do sistema proposto, interação com o PRIM considerando os valores dos pesos sem perturbação, e Após a última radial, que é o melhor resultado encontrado após o algoritmo encontrar o número de soluções proposta pelo operador. O resultados foram comparados com os trabalhos de Possannolo (2015) e Souza (2013), que aplicaram metaheurísticas avançadas para obtenção dos melhores resultados encontrados na literatura.

Nos próximos subcapítulos serão apresentados os sistemas testes utilizados na simulação, e seus respectivos resultados obtidos.

7.1 Sistema de 14 barras

Este é um sistema de pequeno porte, proposto por Civanlar et al. (1988). Possui 1 barra de subestação, 13 barras de carga e 16 ramos. As demandas totais de potência ativa e reativa (considerando o pico em cada barra) são, respectivamente, 28.700 kW e 5.900 kVAr. Todos os ramos possuem chaves, a barra da subestação é a barra 14 e tem tensão de 23 kV, utilizada como base de tensão para os cálculos. Foi utilizado a potência aparente de 100.000 kVA como potência base para os cálculos em pu.

A Figura 7.1 ilustra o sistema teste inicial com os ramos indicados com chaves abertas numeradas e a barra 14 é a barra da subestação.

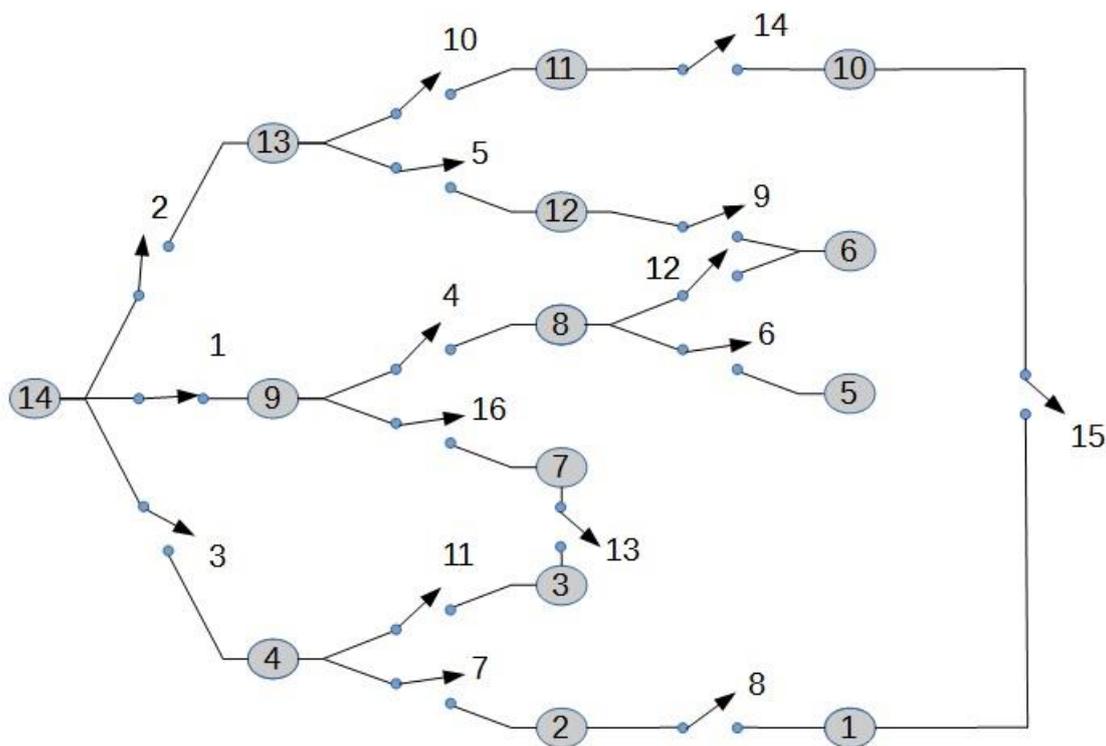


Figura 7.1 - Sistema de 14 barras com as chaves representadas e numeradas.

Fonte: própria do autor.

Em Possannolo (2015) foi demonstrado que esta configuração pode ter 560 candidatas a configurações radiais, considerando que três chaves sempre devem permanecer abertas. Porém, foi provado que o sistema possui apenas 190 configurações radiais. Este número foi utilizado como critério de parada caso o operador escolha uma opção com número maior de configurações radiais.

Esta é uma configuração de pequeno porte com um universo pequeno de busca, consequentemente o algoritmo encontrou a solução ótima na primeira interação do PRIM, assim, todas as demais interações buscadas no processo melhoria não alcançarão seu objetivo.

A Tabela 7.1 apresenta o processo passo a passo da etapa PRIM em andamento no algoritmo para montar a radial.

Tabela 7.1- Processo do PRIM passo a passo.

Ramo	Potência	Barra de entrada	Barra de saída	Barras do sistema radial
1	11177,599	14	9	14-9
2	11050,432	14	13	14-9-13
3	7605,065	14	4	14-9-13-4
4	7324,979	9	8	14-9-13-4-8
5	5893,25	13	12	14-9-13-4-8-12
6	4819,208	8	5	14-9-13-4-8-12-5
7	3905,061	4	2	14-9-13-4-8-12-5-2
8	2947,928	2	1	14-9-13-4-8-12-5-2-1
9	2852,675	12	6	14-9-13-4-8-12-5-2-1-6
10	2804,986	13	11	14-9-13-4-8-12-5-2-1-6-11
11	2514,548	4	3	14-9-13-4-8-12-5-2-1-6-11-3
12	2285,19	8	6	14-9-13-4-8-12-5-2-1-6-11-3
13	1977,198	7	3	14-9-13-4-8-12-5-2-1-6-11-3-7
14	1256,467	11	10	14-9-13-4-8-12-5-2-1-6-11-3-7-10
15	796,4	10	1	14-9-13-4-8-12-5-2-1-6-11-3-7-10
16	632,285	9	7	14-9-13-4-8-12-5-2-1-6-11-3-7-10

Fonte: próprio do autor.

Na Tabela 7.1 as linhas representam a ordem de construção em que os ramos foram escolhidos pelo algoritmo para entrar na radial. As quatro primeiras colunas representam as informações do ramo escolhido: numeração adotada para as barras conforme a Figura 7.1, sua potência ativa, a barra que alimenta o ramo escolhido e a barra alimentada pelo mesmo ramo respectivamente. A quinta coluna representa a ordem em que as barras são incluídas na configuração radial. Os ramos foram escolhidos pela regra do algoritmo PRIM, note que o ramo 12 marcado em vermelho na tabela não foi incluído, pois ele fecha um laço dentro da configuração, outra forma de identificar este problema é que o ramo liga duas barras que já fazem parte da configuração. A ordem de conexão das barras foi a seguinte: 14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1 - 6 - 11 - 3 - 7 - 10.

A Figura 7.2 ilustra os ramos que aparecem assinalados com destaque, 12 (08-06), 15 (10-01) e 16 (09-07), são os que possuem chaves não ligadas ou abertas.

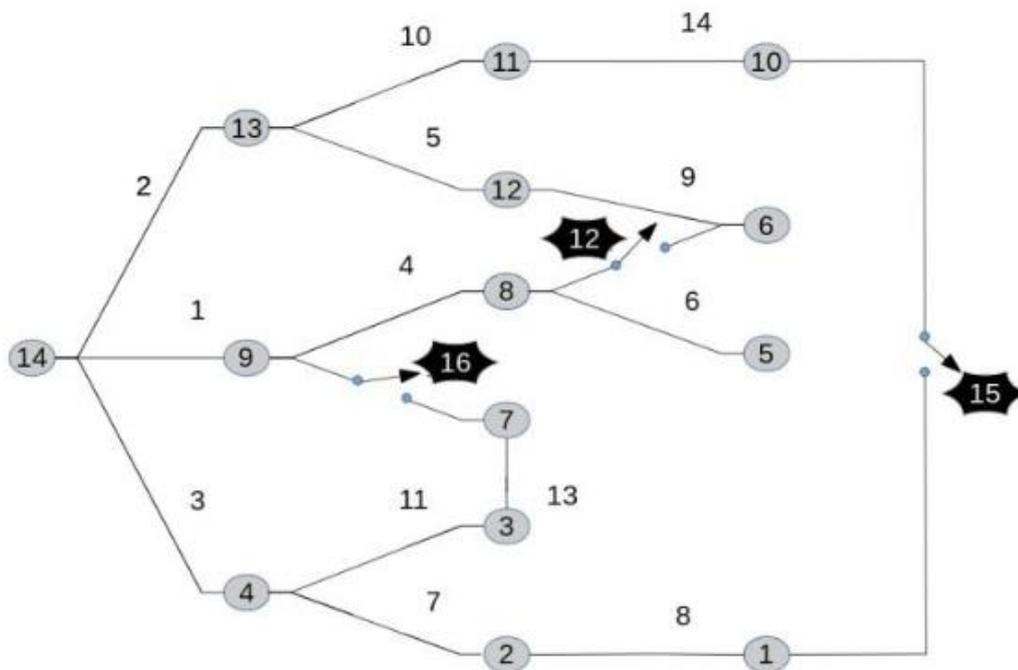


Figura 7.2 – Sistema destacando as chaves abertas.

Fonte: próprio do autor.

A Tabela 7.2 compara as radial encontrada pelo algoritmo com as radiais encontradas em outros trabalhos da literatura especializada, comprovando que o algoritmo encontrou a solução ótima ideal para o sistema.

Tabela 7.2 – Compara radiais encontradas

Trabalhos comparados	Ramos fora da radial (Contêm as chaves que não foram fechadas)
Após a última radial	8-6, 9-7 e 10-1
Chiou et al. (2005)	8-6, 9-7 e 10-1
Souza (2013)	8-6, 9-7 e 10-1
Possagnolo (2015)	8-6, 9-7 e 10-1

Fonte: próprio do autor.

A Tabela 7.3, apresenta e compara os valores para a maior queda de tensão na barra e cálculo de perdas elétricas, entre valores obtidos com o algoritmo e trabalhos disponíveis na literatura especializada.

Tabela 7.3 – Compara Perdas e queda de tensão.

Trabalhos comparados	Perdas Técnicas (kW)	Maior valor da queda de tensão (pu)
Civanlar (1988)	511,43	0,9743
Após a última radial	466,1355	0,9716
Chiou (2005)	466,13	0,9716
Souza (2013)	466,13	0,9716
Possagnolo (2015)	466,13	0,9759

Fonte: próprio do autor.

A barra 5 possui o valor com maior queda de tensão, com modulo igual a 0,971575319 PU e ângulo de 358,3108678 graus.

Os resultados obtidos com a solução do fluxo de potência para a topologia determinada pelo algoritmo atestaram a factibilidade da solução. A configuração encontrada com a menor perda para o sistema tem as suas perdas técnicas calculadas no valor de 466,135467 kW, demonstrando que o algoritmo encontrou a solução ótima para o sistema e obteve uma melhora da solução de 8,86% na redução das perdas.

7.2 Sistema de 33 barras

O sistema de 33 barras foi apresentado por Baran e Wu (1989). Possui uma barra ligada a geração (barra da subestação), 32 barras de carga e 37 ramos de interligação. As demandas de potência totais, ativa e reativa, são 3.715 kW e 2.300 kVAr, respectivamente. A barra de subestação é a barra 1 e está energizada com 12,66 kV e a potência base para os cálculos é de 100000 kVA.

Na Figura 7.3 está lustrada com a configuração do sistema de 33 barras, cinco dos seus ramos de conexão estão com as chaves abertas (21-8, 9-15, 12-22, 33-18 e 25-29) e tem as linhas tracejadas. Os demais ramos, linhas contínuas, encontram-se com as chaves fechadas formando a configuração radial inicial.

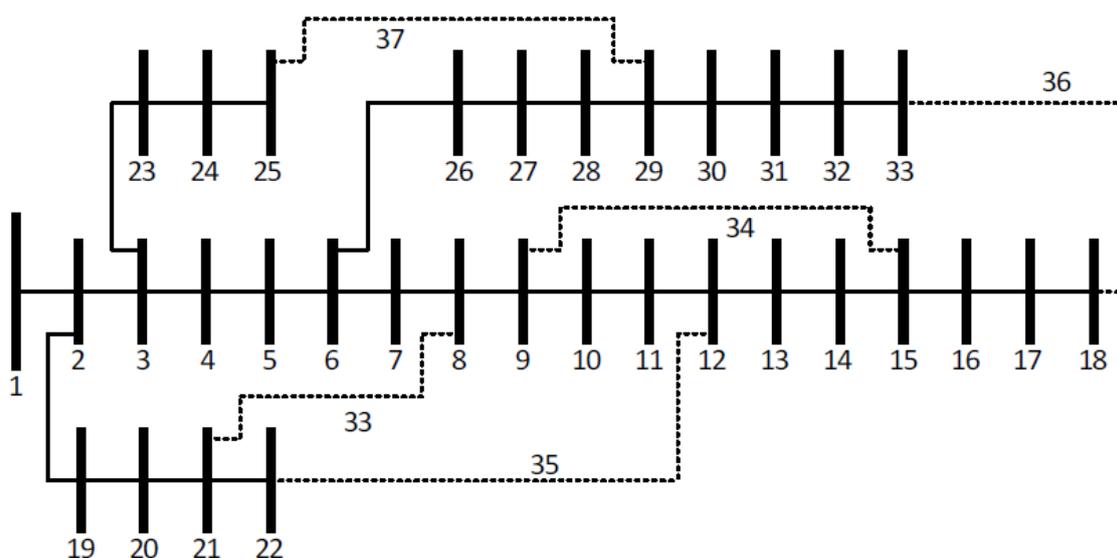


Figura 7.3 – Sistema de 33 barras completo.

Fonte: Baran e Wu (1989).

Os dados completos deste sistema são apresentados no Anexo A.

Este sistema possui 50751 configurações radiais possíveis, calculado a partir do Teorema da Matriz-Árvore, conforme demonstrado em Possagnolo (2015).

O algoritmo na sua primeira interação encontra executando o método de PRIM a configuração radial com as chaves 7, 10, 14, 28 e 32 abertas e com as perdas calculadas em 140,705867 kW. Esta solução obteve melhor resultado que a configuração inicial, porém o algoritmo realizando seu processo de melhoria das soluções encontrou outra configuração com os ramos 7, 9, 14, 32, 37 abertos, gerando uma configuração radial com as perdas calculadas de 139,551376 kW. A Tabela 7.4 apresenta a comparação dos ramos abertos durante a execução do algoritmo e alguns trabalhos da literatura especializada.

Tabela 7.4 - Compara radiais encontradas

Trabalhos comparados	Ramos fora da radial (Contêm as chaves que não foram fechadas)
Baran e Wu (1989)	33, 34, 35, 36, 37
1º Radial	7, 10, 14, 28, 32
Após a última radial	7, 9, 14, 32, 37
Souza (2013)	7, 9, 14, 32, 37
Possagnolo (2015)	7, 9, 14, 32, 37

Fonte: próprio do autor.

O algoritmo encontrou a solução ótima para este sistema, uma vez que esta foi a mesma solução encontrada nos demais trabalhos comparados. Os resultados do cálculos das perdas esta comparado na Tabela 7.5 em conjunto com as maiores quedas de tensão das configurações.

Tabela 7.5 - Compara Perdas e queda de tensão.

Trabalhos comparados	Perdas Técnicas (kW)	Maior valor da queda de tensão (pu)
Baran e Wu (1989)	202,6771	0,9743
1° Radial	140,7059	0,9413
Após a última radial	139,5514	0,9378
Souza (2013)	139,5514	0,9378
Possagnolo (2015)	139,5514	0,9378

Fonte: próprio do autor.

A barra com menor tensão é barra 32 e tem modulo igual a 0,937819047 PU e ângulo de 0,510175034 graus.

O algoritmo teve sucesso, gerando uma solução melhor que os resultados apresentados inicialmente, representando uma melhoria de 31,1460% em relação às perdas da configuração inicial e 0,8205% em relação a solução da primeira interação pelo método de Prim.

7.3 Sistema de 84 barras

O sistema de 84 barras é representado em Chiou et al. (2005). Possui uma barra de subestação, 83 barras de carga e 96 circuitos. A barra da subestação é a barra 84 e está energizada com 11,4 kV e a potência base para os cálculos é de 100000 kVA. As demandas totais de potência ativa e reativa são respectivamente 28.351 kW e 20.700 kVAr. Todos os ramos possuem chaves possibilitando a reconfiguração. Na Figura 7.4, o sistema completo de 84 barras está ilustrado, a representação possui algumas linhas pontilhadas representando os ramos com chaves abertas e as demais linhas contínuas interligando as barras representam a configuração radial inicial para o sistema.

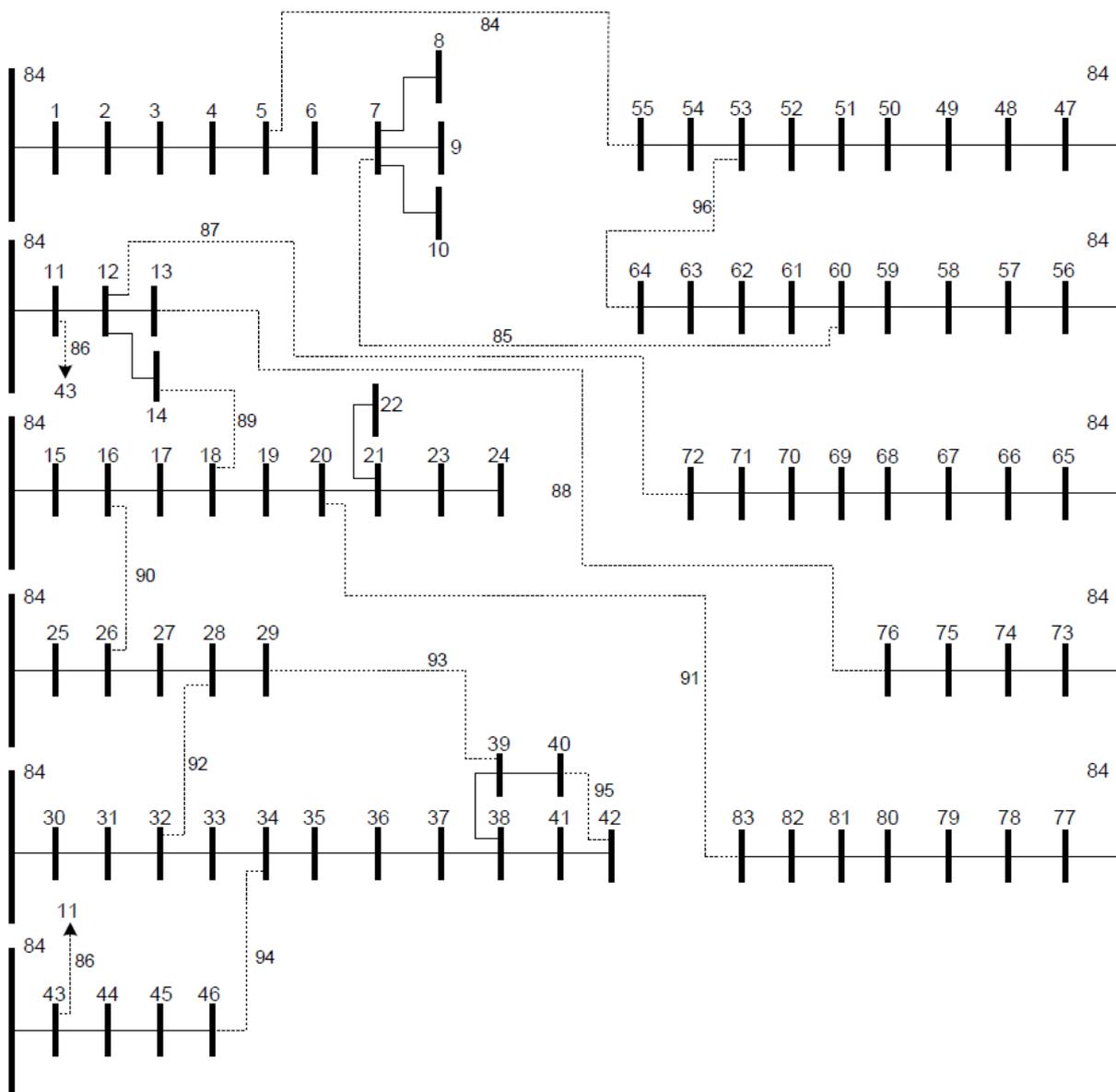


Figura 7.4 – Sistema de 84 barras completo.

Fonte: Chiou et al. (2005).

O sistema tem a possibilidade de encontrar $4,0363 \times 10^{15}$ configurações radiais (Possagnolo, 2015).

Executando o algoritmo com o método de PRIM, na primeira interação, foi gerada a topologia radial com as chaves 7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90 e 92 abertas, com as perdas de 471,729925 kW. Depois do processamento do restante do algoritmo foi produzida a configuração radial com as perdas calculadas de 469,879853 kW, com os ramos 7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90 e 92 desligados. A comparação das radiais encontradas pelo algoritmo estão ilustradas na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 - Compara radiais encontradas

Trabalhos comparados	Ramos fora da radial (Contêm as chaves que não foram fechadas)
Chiou (2005)	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96
1° Radial	7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92
Após a última radial	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92
Souza (2013)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92
Possagnolo (2015)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92

Fonte: próprio do autor.

Comparando com os diversos trabalhos da literatura, mais uma vez o programa obteve a melhor solução para o sistema proposto. A barra 71 tem maior queda de tensão com modulo igual a 0,953187233 PU e ângulo de 358,1742802 graus. Os resultados da comparação dos cálculos das perdas estão na Tabela 7.7 em conjunto com as maiores quedas de tensão das configurações.

Tabela 7.7 - Compara Perdas e queda de tensão.

Trabalhos comparados	Perdas Técnicas (kW)	Maior valor da queda de tensão (pu)
Chiou (2005)	531,9975	0,9285
1° Radial	471,7299	0,9517
Após a última radial	469,8799	0,9532
Souza (2013)	469,88	0,9532
Possagnolo (2015)	469,8799	0,9532

Fonte: próprio do autor.

O algoritmo encontrou uma solução com uma melhoria de 11,6763% em relação às perdas da configuração inicial e 0,3922% em relação a solução da primeira interação pelo método de Prim.

7.4 Sistema de 136 barras

O sistema de 136 barras foi originalmente apresentado por Mantovani et al. (2000) e representa o sistema real da cidade de Três Lagoas (MS). A barra 136 é a barra de subestação está energizada com 13,8 kV, possui 135 barras de carga e 156 ramos de ligação das barras. A potência base para os cálculos é de 100000 kVA. A demanda de potência ativa é 18.313,8090 kW e a demanda de potência reativa é 7.932,5335 kVAr. A tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é 0,9307 PU. Na Figura 7.5 ilustra o sistema inicial com 21 circuitos de ligação desligados e os demais circuitos estão ligados formando a configuração radial

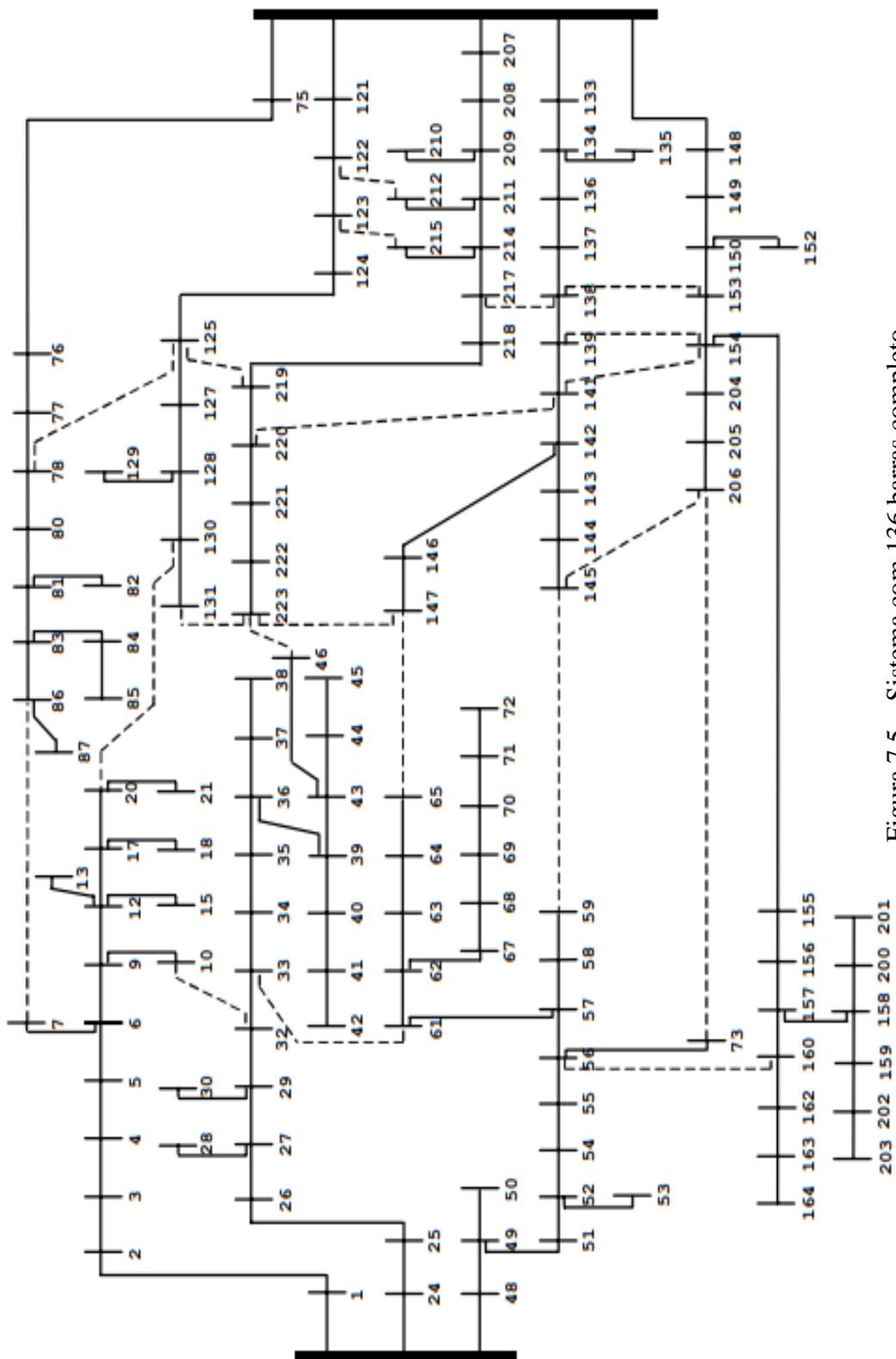


Figura 7.5 – Sistema com 136 barras completo.
 Fonte: Mantovani et al. (2000).

O número de árvores geradoras que podem ser formadas para o sistema de 136 barras são $5,4351 \times 10^{25}$ configurações radiais (Possagnolo, 2015).

A Tabela 7.8 demonstra as configuração obtidas em algumas etapas do processamento do programa, indicando os ramos com chaves abertas para cada etapa e compara alguns trabalhos da literatura.

Tabela 7.8 - Compara radiais encontradas

Trabalhos comparados	Ramos fora da radial (contêm as chaves que não foram fechadas)
Mantovani (2000)	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156
1° Radial	9, 35, 50, 51, 54, 84, 90, 96, 106, 126, 135, 136, 138, 143, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 155
Após a última radial	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155
Souza (2013)	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155
Possagnolo (2015)	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155

Fonte: próprio do autor.

O método de PRIM na primeira interação encontrou a configuração radial com perdas de 292,9256 kW, uma melhora de 12,0872% em comparação com a configuração inicial. Finalizando o algoritmo gerou-se a configuração radial com as perdas calculadas de 280,1930 kW, alcançando uma melhora da solução em relação à inicial de 12,5393% e uma melhora em relação ao método de PRIM de 4,3467% de melhora nas perdas. A Tabela 7.9 compara os resultados dos cálculos das perdas.

Tabela 7.9 - Compara Perdas e queda de tensão.

Trabalhos comparados	Perdas Técnicas (kW)	Maior valor da queda de tensão (pu)
Mantovani (2000)	320,3644	0,9307
1° Radial	292,9256	0,9489
Após a última radial	280,1930	0,9589
Souza (2013)	280,1930	0,9589
Possagnolo (2015)	280,1930	0,9589

Fonte: próprio do autor.

A barra 105 possui menor tensão com modulo igual a 0,958909828 PU e ângulo de 357,8095561 graus.

7.5 Sistema de 415 barras

O sistema real de grande porte de 415 barras foi proposto inicialmente em Bernal-Agustin (1998) para um problema de planejamento e adaptado em Souza (2013) para o problema da reconfiguração. Possui uma barra de subestação, barra 1, 414 barras de carga e 473 ramos de interligação entre as barras. A tensão nas subestações é 10,00 kV, tensão base usada nos cálculos. Todos os ramos possuem chaves que possibilitam a reconfiguração. As demandas totais, considerando as demandas máximas, de potência ativa e reativa são, respectivamente, 27.372,40 kW e 13.237,00 kVAr. A máxima queda de tensão na configuração inicial é 0,9301 PU.

Para o sistema de 415 barras o número de árvores geradoras possíveis são de $9,3045 \times 10^{51}$ configurações radiais (Possagnolo, 2015).

Na Tabela 7.10 são apresentados os ramos com chaves abertas para configuração radial escolhida e a comparação com alguns trabalhos.

Tabela 7.10 - Compara radiais encontradas

Trabalhos comparados	Ramos fora da radial (contêm as chaves que não foram fechadas)
Bernal-Agustin (1998)	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.
1° Radial	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.
Após a última radial	7, 17, 18, 24, 33, 36, 39, 43, 54, 61, 68, 86, 96, 106, 111, 117, 120, 123, 136, 146, 148, 155, 163, 169, 170, 175, 179, 191, 196, 209, 236, 244, 253, 256, 258, 259, 262, 289, 294, 304, 317, 330, 337, 352, 353, 385, 389, 391, 392, 402, 404, 407, 408, 423, 424, 431, 437, 454, 462.
Souza (2013)	5, 13, 15, 16, 21, 26, 31, 54, 57, 59, 60, 73, 86, 87, 94, 96, 97, 111, 115, 136, 142, 149, 150, 155, 156, 158, 163, 168, 169, 178, 179, 191, 195, 199, 214, 221, 254, 256, 266, 282, 317, 322, 325, 358, 362, 369, 392, 395, 403, 404, 416, 423, 426, 431, 436, 437, 446, 449, 466.
Possagnolo (2015)	5, 13, 15, 16, 21, 26, 31, 54, 57, 59, 60, 73, 86, 87, 94, 96, 97, 111, 115, 136, 142, 149, 150, 155, 156, 158, 163, 168, 169, 178, 179, 191, 195, 199, 209, 214, 254, 256, 270, 294, 317, 322, 325, 354, 362, 369, 392, 395, 403, 404, 416, 423, 426, 431, 436, 437, 446, 449, 466.

Fonte: próprio do autor.

Comparando com os trabalhos da literatura o programa obteve a melhor solução para o sistema proposto até o momento. A barra 95 possui maior queda de tensão, tem módulo igual a 0,95168315 PU e ângulo de 355,0256312 graus. Os resultados da comparação dos cálculos das perdas está na Tabela 7.11, em conjunto com as maiores quedas de tensão das configurações.

Tabela 7.11 - Compara Perdas e queda de tensão.

Trabalhos comparados	Perdas Técnicas (kW)	Maior valor da queda de tensão (pu)
Bernal-Agustin (1998)	708,9417	0,9301
1° Radial	662,5017	0,9374
Após a última radial	557,9064	0,9517
Souza (2013)	581,5625	0,9548
Possagnolo (2015)	581,5494	0,9585

Fonte: próprio do autor.

O método de PRIM encontrou a configuração radial com perdas de 662,5017 kW, uma melhora de 6,5506% em comparação com a configuração inicial. Completando o algoritmo foi encontrada com aplicação da melhoria das soluções radial uma configuração com as perdas calculadas de 557,906433 kW, melhorando a solução em relação à inicial em 21,30% e em relação ao método de PRIM em 15,79% de melhora nas perdas.

7.6 Discussão

O método de PRIM encontra excelentes soluções, porém muitas vezes ele fica preso no primeiro ótimo local encontrado. Para buscar novas radiais com melhores qualidades dentro do espaço possível foi utilizado uma variável randômica. Esta aleatoriedade da variável aplicada para melhoria não demonstrou um padrão para obtenção da melhor solução dos sistemas. Mas mesmo assim foram encontrados melhores resultados para sistemas que os valores ótimos locais encontrados pela heurística de PRIM, a não ser quando o este ótimo local era o ótimo global (apenas para o sistema de 14 barras).

Capítulo 8

Conclusões

Neste trabalho o problema de reconfiguração de redes de distribuição foi formulado para encontrar boas topologia radiais através de uma heurística simples e robusta aliada a uma programação inteligente, com a utilização de listas duplamente encadeadas, visando alcançar a melhor configuração do sistema de distribuição com mínimas perdas.

O emprego da alocação dinâmica de memória possibilita maior flexibilidade, velocidade e uma economia de memória durante a execução do programa, pois o espaço total de memória gasto pela estrutura é proporcional ao número de elementos nela armazenado. Foram utilizadas listas duplamente encadeadas interligadas formando uma teia encadeada para modelar o sistema no algoritmo, esta teia facilita o acesso às informações diminuindo o esforço computacional conseguindo resultados com excelentes tempos de processamento.

Para avaliar o desempenho do algoritmo foram realizados testes computacionais em cinco sistemas, e seus resultados foram comparados os resultados de trabalhos da literatura especializada. Nos quatro primeiros sistemas propostos o algoritmo encontrou soluções com valores iguais aos melhores valores encontrados em outros trabalhos, e para o sistema de grande porte com 415 barras foi encontrado um valor para as perdas menor que o melhor valor encontrado na literatura. Os resultados obtidos com as simulações mostraram soluções de qualidade, com um tempo de processamento excelente e esforço computacional muito inferior, atestando a eficiência do novo algoritmo.

A escolha de um trabalho prático proporcionou uma grande satisfação em aplicar o algoritmo em sistemas reais, e poder verificar seus resultados e aplicações.

8.1 Trabalhos Futuros

O algoritmo foi formulado buscando o menor esforço computacional durante a execução, acredita-se que ainda pode ser melhorado, buscando menor esforço computacional e melhores resultados. Também pode ser ampliado para outras demandas. Futuramente podem ser realizados os seguintes trabalhos:

- Aliar o método com outras metaheurísticas;
- Fazer a análise de sistemas maiores;
- Considerar vários níveis de demanda;
- Considerar geração distribuída;
- Aplicar em outras áreas para otimização.

Referências

- Abur, A. (1996). A modified linear programming method for distribution system reconfiguration. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 18(7), 469–474. [https://doi.org/10.1016/0142-0615\(96\)00005-1](https://doi.org/10.1016/0142-0615(96)00005-1)
- Abur, A. (1996). Determining the optimal radial network topology within the line flow constraints. In *1996 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Circuits and Systems Connecting the World. ISCAS 96* (Vol. 1, p. 673–676). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.1996.540037>
- Amasifen, J. C. C., Romero, R., & Mantovani, J. R. S. (2005). Algoritmos evolutivos dedicados à reconfiguração de redes radiais de distribuição sob demandas fixas e variáveis: estudo dos operadores genéticos e parâmetros de controle. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, 16(3), 303–317. <https://doi.org/10.1590/S0103-17592005000300004>
- ANEEL. (2014). Agência Nacional de Energia Elétrica. Recuperado 5 de fevereiro de 2018, de <http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/noticias/CONSUMIDOR/557474-DEBATEDORES-QUESTIONAM-PROPOSTA-DE-LIMITAR-COBRANCA-POR-PERDAS-ELETRICAS-A-5-DA-TARIFA.html>
- Baran, M. E., & Wu, F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), 1401–1407. <https://doi.org/10.1109/61.25627>
- Carreno, E. M., Romero, R., & Padilha-Feltrin, A. (2008). An Efficient Codification to Solve Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(4), 1542–1551. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2002178>
- Celes, W., Cerqueira, R., & Rangél, J. L. (2016). *Introducao a Estrutura de Dados*. (Elsevier, Org.) (2º Edição). Rio de Janeiro.
- Chang, H.-C., & Kuo, C.-C. (1994). Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing. *Electric Power Systems Research*, 29(3), 227–238. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0378-7796(94)90018-3)
- Chiou, J. P., Chang, C. F., & Su, C. T. (2005). Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 668–674. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846096>
- Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H., & Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), 1217–1223. <https://doi.org/10.1109/61.193906>
- EBC. (2018). Empresa Brasil de Comunicação. Recuperado 26 de março de 2018, de <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2018-03/consumo-de-energia-cresceu-08-em-2017-aponta-comite-do-setor-eletrico>
- Edelweiss, N., & Livi, A. L. C. (2014). *Algoritmos e Programação com Exemplos em Pascal e C*. (B. C. E. Ltda., Org.). Porto Alegre - RS.

- Fioravanti, C. J. (2014). *Reconfiguração de Alimentadores em Sistemas de Distribuição Usando uma Metaheurística e Espaço de Busca Reduzido*. UNESP - Ilha Solteira - SP.
- Franco, J., Lavorato, M., Rider, M. J., & Romero, R. (2012). An efficient implementation of tabu search in feeder reconfiguration of distribution systems. In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (p. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345048>
- Fred Glover Gary A. Kochenberger. (2003). *Handbook of Metaheuristics*. (F. Glover & G. A. Kochenberger, Orgs.) (Vol. 57). Boston: Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/b101874>
- Glamocanin, V. (1990). Optimal loss reduction of distributed networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(3), 774–782. <https://doi.org/10.1109/59.65905>
- Gomes, F. V., Carneiro, S., Pereira, J. L. R., Vinagre, M. P., Garcia, P. A. N., & Araujo, L. R. (2005). A New Heuristic Reconfiguration Algorithm for Large Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1373–1378. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.851937>
- Goswami, S. K., & Basu, S. K. (1992). A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(3), 1484–1491. <https://doi.org/10.1109/61.141868>
- Guimaraes, M., Lorenzetti, J. F. C., & Castro, C. A. (2004). Reconfiguration of distribution systems for stability margin enhancement using tabu search. In *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004*. (Vol. 2, p. 1556–1561). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2004.1460251>
- Hayashi, Y., Iwamoto, S., Furuya, S., & Liu, C.-C. (1996). Efficient determination of optimal radial power system structure using Hopfield neural network with constrained noise. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3), 1529–1535. <https://doi.org/10.1109/61.517513>
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor MI University of Michigan Press. <https://doi.org/10.1137/1018105>
- Jarník, V. (2004). O jistém problému minimálním. (Z dopisu panu O. Borůvkovi). *Analysis Mathematica*, 30(4), 259–287. <https://doi.org/10.1007/s10476-005-0515-y>
- Kim, H., Ko, Y., & Jung, K.-H. (1993). Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(3), 1356–1366. <https://doi.org/10.1109/61.252662>
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Land, A. H., & Doig, A. G. (1960). An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica*, 28(1), 497–520.
- Lavorato, M., Franco, J. F., Rider, M. J., & Romero, R. (2012). Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(1), 172–180. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2161349>
- Lavorato, M., Rider, M. J., Garcia, A. V., & Romero, R. (2010). A constructive heuristic algorithm for distribution system planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(3), 1734–1742. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2038164>

- Liu, C. C., Lee, S. J., & Vu, K. (1989). Loss minimization of distribution feeders: optimality and algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), 1281–1289. <https://doi.org/10.1109/61.25615>
- Mantovani, J. R. S., Casari, F., & Romero, R. A. (2000). Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *Revista Brasileira de Controle & Automação - SBA*, 11(03), 150–159.
- Mendoza, J., Lopez, R., Morales, D., Lopez, E., Dessante, P., & Moraga, R. (2006). Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms With Restricted Population and Addressed Operators: Real Application. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 948–954. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.873124>
- Merlin, A., & Back, H. (1975). Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In *Fifth Power Systems Computation Conference*. <https://doi.org/citeulike-article-id:1698930>
- Murphy, L., & Wu, F. F. (1990). *A comprehensive analysis of distribution automation systems*. University of California.
- Nara, K., Shiose, A., Kitagawa, M., & Ishihara, T. (1992). Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3), 1044–1051. <https://doi.org/10.1109/59.207317>
- Oliveira, M., Marina, L., & Rubén, R. (2011). Reconfiguração De Sistemas De Distribuição Utilizando a Metaheurística Grasp (p. 827–838). Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de PESQUISA OPERACIONAL.
- Pereira, F. S. (2010). *Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas*. Universidade de São Paulo, São Carlos. <https://doi.org/10.11606/T.18.2010.tde-28042010-151514>
- Possannolo, L. H. F. M. (2015). *Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável*. UNESP - Ilha Solteira.
- Prim, R. C. (1957). Shortest Connection Networks And Some Generalizations. *Bell System Technical Journal*, 36(6), 1389–1401. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1957.tb01515.x>
- Ramirez-Rosado, I. J., & Bernal-Agustin, J. L. (1998). Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(2), 696–703. <https://doi.org/10.1109/59.667402>
- Romero, R. (2001). Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição de energia elétrica usando um algoritmo genético modificado. (p. 551–560). Campos do Jordão - SP: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL-SBPO.
- Salazar, H., Gallego, R., & Romero, R. (2006). Artificial Neural Networks and Clustering Techniques Applied in the Reconfiguration of Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(3), 1735–1742. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.875854>
- Sarma, N. D. R., & Prakasa Rao, K. S. (1995). A new 0–1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 33(2), 125–131. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(95\)00934-A](https://doi.org/10.1016/0378-7796(95)00934-A)

- Shirmohammadi, D., & Hong, H. W. (1989). Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), 1492–1498. <https://doi.org/10.1109/61.25637>
- Souza, S. S. F. (2013). *Algoritmo GRASP Especializado Aplicado ao Problema de Reconfiguração de Alimentadores em Sistemas de Distribuição Radial*. UNESP - Ilha Solteira.
- Souza, S. S. F., Lavorato, M., & Romero, R. (2012). GRASP Especializado Aplicado ao Problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição. In *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* (Vol. 44, p. 01–06). In Sixth IEEE/PES transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3476.1763>
- Zhang, D., Fu, Z., & Zhang, L. (2007). An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 77(5–6), 685–694. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.06.005>

Apêndice A

Publicação do Trabalho

Nunes Jr. H. L. M., Ghellere M. S., Rocha C. R. M. da, Freitas R. L. B. “*Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com a Aplicação do Algoritmo Dinâmico Guloso*”. THE 12th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2017. ISBN 978-85-61065-03-4.

Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com a Aplicação do Algoritmo Dinâmico Guloso

H. L. M. Nunes Jr., M. S. Ghellere, C. Rocha *Member, IEEE*, R. L. B. Freitas

Abstract-- This paper aims to present a new algorithm to the application about the reconfiguration problem of electric power distribution systems with the objective of establishing the best configuration for the distribution network minimizing electrical losses and improving voltage levels. The new algorithm was implemented using the Dev-C++ and based on the Greedy Algorithm, but it was built through intelligent programming with double chained lists and dynamic memory to ensure a good performance. Thus the algorithm has the capacity of establishing a radial topology for the network, seeking to minimize losses by opening or closing switches that are successively selected. To evaluate the performance of the algorithm, computational tests were performed on systems that are available in the specialized literature. The results obtained with the simulations showed quality solutions obtained with an excellent processing time, attesting the efficiency of the new algorithm.

Index Terms - Optimization of electrical systems, Reconfiguration of power supplies, Meta-heuristic, PRIM, doubly linked lists

I. NOMENCLATURA

v	Perdas ativas.
g_{ij}	Condutância do ramo ij .
x_{ij}	Estado da chave no circuito (ou ramo) ij .
V_i	Magnitude da tensão na barra i .
$\hat{\theta}_{ij}$	Diferença entre os ângulos das tensões das barras ij .
P_{Si}	Potência ativa injetada pela subestação na barra i .
P_{Di}	Demanda de potência ativa na barra i .
P_{ij}	Fluxo de potência ativa através do ramo ij .
Q_{Si}	Potência reativa injetada pela subestação na barra i .
Q_{Di}	Demanda de potência reativa na barra i .
Q_{ij}	Fluxo de potência reativa através do ramo ij .
\underline{V}	Limite inferior para a magnitude da tensão.
\overline{V}	Limite superior para a magnitude da tensão.
n_b	Número de barras do sistema de distribuição.
Ω_l	Conjunto de ramos do sistema de distribuição.
Ω_{bi}	Conjunto de barras conectadas à barra i .
Ω_b	Conjunto de barras do sistema de distribuição.

II. INTRODUÇÃO

O problema energético mundial é uma realidade. Nos últimos anos, ele vem piorando devido ao aumento na demanda além dos limites da geração instalada, a escassez progressiva de recursos derivados de carbono e à preocupação crescente com a preservação do meio ambiente. Essa circunstância tem incentivado pesquisadores em todo o mundo a buscar alternativas para o aumento do rendimento e a economicidade do sistema elétrico de potência.

As perdas técnicas na distribuição de energia são atualmente da ordem de 8% no Brasil [1]. Medidas que visem à redução destas perdas são desejáveis, principalmente se incorrerem um baixo custo de investimento.

Diante deste cenário será elaborado o cálculo das mínimas perdas através de um algoritmo dinâmico guloso para Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE).

O sistema de distribuição muitas vezes se confunde com a topologia das cidades, se ramificando ao longo de ruas e avenidas para atender a demandas industriais, residenciais e comerciais. O serviço de distribuição no Brasil é feito pelas concessionárias de energia que são responsáveis por garantir o fornecimento de uma energia eficiente e segura para todos os consumidores.

O sistema opera com linhas de média e baixa tensão, que compõem as chamadas redes primária e secundária, respectivamente. A rede primária compreende do barramento de distribuição até o barramento primário do transformador de distribuição, que reduz o nível de tensão de dezenas de kV para centenas de V. Consumidores comerciais e industriais de grande porte tem sua demanda atendida pela rede primária e os demais pela rede secundária. A energia é efetivamente entregue aos consumidores conectados à rede de distribuição elétrica, através de rede de tipo aérea ou de tipo subterrânea.

No Brasil, a maioria dos sistemas de distribuição possui uma estrutura malhada, mas operam com configuração radial, isto é, há apenas um caminho entre cada cliente e a subestação, ou seja, uma interrupção no fluxo de energia pode resultar na perda completa de fornecimento de energia para o cliente. Porém as maiores vantagens da configuração do sistema radial, além do seu baixo custo, é a simplicidade de análise e previsibilidade de desempenho.

As redes primárias são compostas por um ramal principal do qual são feitas derivações, que normalmente são protegidas por chaves seccionadoras, que operam na condição normal fechada, destinadas a isolar blocos de carga, permitindo sua manutenção corretiva ou preventiva. Também são instaladas em um mesmo circuito, ou entre circuitos distintos, chaves

H. L. M. Nunes Jr., M. S. Ghellere, C. Rocha and R. L. B. Freitas estão com o Centro de Engenharias e Ciências Exatas - CECE da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil (e-mails: h.junior@unila.edu.br, morg.ghellere@gmail.com, c.rocha@ieee.org, rlbfreitas@gmail.com).

operando em aberto, que com seu fechamento possibilitam manobras de transferência de carga.

Durante a operação do sistema de distribuição devem ser consideradas as restrições de carga e restrições operacionais do sistema, e neste contexto a operação da rede de distribuição pode ser dividida em três estados distintos: Normal, Emergência e Restauração.

O sistema de distribuição opera em regime permanente. Considerando a sua operação no estado normal, é desejado que mantivesse a maior eficiência possível, contribuindo para a confiabilidade e segurança. O fato de buscar por diminuir as perdas ativas contribui para aumentar sua eficiência e diminuir os custos operacionais. Para auxiliar nesta atividade, as principais funções são: o controle integrado da potência reativa e a reconfiguração da rede para minimizar as perdas elétricas.

O problema da Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE) consiste em determinar a topologia radial ideal para atender uma determinada condição de operação por meio da abertura e fechamento de chaves seccionadoras posicionadas em locais estratégicos, com intuito de alcançar uma estratégia ótima de operação com a minimização de perdas e o atendimento da demanda diária com qualidade e redução de custos de operação. Estas características foram determinantes para escolha do algoritmo dinâmico guloso para solução deste problema. Além disto, a topologia ótima deve satisfazer as restrições operacionais, como o limite de tensão nas barras.

O problema de RSDEE é de natureza combinatória e pode ser modelado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM). Em [2] são apresentadas duas técnicas de solução para o problema: o Algoritmo Heurístico Construtivo, e o algoritmo de otimização clássica conhecido como Algoritmo de *Branch and Bound*.

Em [3] e [4] também são apresentados algoritmos heurísticos que são aplicados ao problema. Em [3] é apresentado um método heurístico para a troca de ramos (*Branch-Exchange*) e em [4] é apresentada uma técnica capaz de encontrar o ótimo em problemas de grande porte, introduzindo duas aproximações para o fluxo de potência. O método leva em consideração a redução de perdas e o balanceamento de cargas. Em [5] foi apresentada uma técnica heurística baseada em um padrão de fluxo de potência ótimo. Em [6] foi apresentada uma metodologia parecida com o método [3], porém, o método faz trocas entre os estados das chaves para manter a topologia radial, não levando em consideração a rede malhada. Em [7] foi proposto a utilização do algoritmo PRIM [8] para reconfiguração de sistemas de distribuição com o objetivo de redução de perdas de radiação das linhas. O trabalho também propõe a utilização do método para o serviço de restauração do sistema.

Foram apresentados trabalhos que utilizaram meta-heurísticas para obter a solução do problema de RSDEE, e entre estes, pode-se citar os algoritmos genéticos [9], *Simulated Annealing* [10], algoritmos evolutivos [11] e [12], algoritmo genético com população reduzida [13], Busca Tabu [14], Algoritmo de Colônia de Formigas [15], algoritmo genético de Chu-Beasley com um operador de recombinação [16], algoritmo baseado no crescimento de plantas [17], GRASP [18] e busca em vizinhança variável [19].

A reconfiguração de topologias em sistemas de distribuição é uma alternativa muito econômica de aumentar a eficiência do sistema, permitindo protelar investimentos no reforço de linhas, subestações entre outros [20].

Este artigo apresenta o Algoritmo Dinâmico de PRIM aplicado para resolver o problema de RSDEE com a aplicação em redes aéreas de média tensão. Ele pode ser usado para planejamento e para operação de redes de distribuição de energia. O algoritmo implementado é baseado em [8] e foi construído com a utilização de programação dinâmica, ele permite calcular o valor da função objetivo e verificar a factibilidade da solução levando em consideração o perfil de tensão das barras. Nas próximas seções são apresentadas a fundamentação teórica, materiais e métodos, os resultados obtidos com a simulação.

III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ainda que possuam uma estrutura malhada, o sistema de distribuição deve operar com uma configuração radial facilitando a operação e proteção das redes elétricas.

Neste trabalho o problema de reconfiguração de redes de distribuição foi formulado para encontrar a topologia radial ideal, ou dita ideal através da abertura e fechamento de chaves seccionadoras posicionadas em pontos estratégicos para minimizar as perdas nos alimentadores. Este problema é tratado como um problema de programação não linear de grande porte com variáveis reais e inteiras. Assim, é possível encontrar no espaço de configurações possíveis, a configuração que produza as perdas mínimas de potência no sistema de distribuição.

Por muito tempo a restrição de radialidade dificultou a modelagem matemática correta para o problema da reconfiguração. Este problema foi resolvido com o trabalho apresentado em [21].

O Problema pode ser representado pela teoria dos grafos, que possui natureza “combinatorial”, e o número de soluções produzidas pela abertura ou fechamento das chaves cresce exponencialmente com o aumento da complexidade do sistema, denominado de explosão “combinatorial”. Esta natureza combinatória tornou este problema difícil de resolver, sendo um dos problemas mais pesquisados entre os problemas de otimização da operação de sistemas elétricos de potência.

A teoria de grafos apresenta sistemáticas para diagramas conexos com pesos constantes que asseguram descobrir uma árvore geradora mínima, por esse motivo foi escolhido o algoritmo de Prim [8] e [22] com a utilização de uma programação dinâmica para este trabalho. Diferenciando de [7], que utiliza uma programação estática com as impedâncias da linha como parâmetros de peso para aplicação do método, para este trabalho as perdas são os valores dos pesos dos ramos, que resultam do cálculo do fluxo de potência da topologia, ou seja, para cada topologia os pesos dos ramos são modificados. Assim, o algoritmo é utilizado somente para conseguir uma solução subótima, levando em conta valores estimados para os pesos. Um processo de busca ótima, portanto, implica analisar implícita ou explicitamente todas as configurações radiais possíveis.

A. Modelo Matemático

O modelo matemático do problema de reconfiguração é uma árvore geradora que minimize uma função objetivo como as perdas, satisfazendo as restrições físicas necessárias para que a operação do sistema seja radial, respeitando os limites para a magnitude das tensões nas barras, os limites de capacidade das linhas e as duas leis de Kirchhoff estruturadas através do fluxo de potência.

A formulação matemática para minimizar as perdas ativas para um sistema simétrico e equilibrado, considerando as demandas de potência fixas e configuração radial única, assume a forma apresentada a seguir [21].

$$\text{Minv} = \sum_{(ij) \in \Omega_l} \left[g_{ij} x_{ij} \left(V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_{ij}) \right) \right] \quad (1)$$

s.a.

$$P_{Si} - P_{Di} - \sum_{j \in \Omega_{bi}} x_{ij} \cdot P_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$Q_{Si} - Q_{Di} - \sum_{j \in \Omega_{bi}} x_{ij} \cdot Q_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3)$$

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

$$x_{ij} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \leq S_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (6)$$

$$\sum_{(ij) \in \Omega_l} x_{ij} = n_b - 1 \quad (7)$$

A equação (1) representa a função objetivo, que busca minimizar as perdas ativas do sistema de distribuição de energia elétrica. As restrições (2) e (3) representam o balanço de potência ativa e reativa, respectivamente. Em (4) está representada a restrição dos limites de magnitude de tensão para cada barra do sistema, sendo estes limites regidos e padronizados pelas normas reguladoras do sistema. A restrição (5) representa o cumprimento do limite para o fluxo de potência na linha ou circuito ij . Em (6) é apresentada a variável de decisão binária do problema. Ela pode assumir dois valores, representando dois estados de operação: se assumir o valor 1 significa chave para ij fechada (linha ij conectada ao sistema) e se assumir o valor 0 significa chave para ij aberta (linha ij desconectada do sistema). Em (7) é apresentada uma restrição relacionada com a determinação de uma topologia radial.

As restrições (2) e (3) garantem o cumprimento da primeira lei de Kirchhoff (lei das correntes). Nestas restrições, P_{ij} e Q_{ij} são determinados pelas equações apresentadas a seguir:

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j \left(g_{ij} \cos(\theta_{ij}) + b_{ij} \sin(\theta_{ij}) \right) \quad (8)$$

$$Q_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j \left(g_{ij} \sin(\theta_{ij}) + b_{ij} \cos(\theta_{ij}) \right) \quad (9)$$

Estas restrições (8) e (9) garantem o cumprimento da segunda lei de Kirchhoff (lei das tensões).

Para assegurar que um sistema de distribuição tenha uma topologia radial é necessário satisfazer as restrições (6) e (7), e assegurar que todas as barras com demanda de potência sejam atendidas, formando um grafo conexo. Isto foi um dos desafios implementados no algoritmo especializado dinâmico guloso e assegurado na programação através de uma restrição. Desta forma as restrições estabelecidas garantem que qualquer solução factível, assim como a solução ótima, seja radial.

Neste contexto, foi desenvolvido uma heurística com a utilização de listas duplamente encadeadas e memória dinâmica para a obtenção de um programa inteligente para resolver o problema da reconfiguração de alimentadores aéreos de média tensão com mínimas perdas no sistema de distribuição de energia elétrica.

B. Algoritmo de Prim

O algoritmo de Prim [8] é um algoritmo guloso que identifica uma árvore geradora mínima para um grafo malhado, com pesos atribuídos às chaves dos ramos (linhas) e não direcionados. Para a aplicação deste método deve-se conhecer a árvore com todas as chaves dos ramos fechadas (linhas conectadas). Para iniciar o algoritmo é necessário atribuir pesos às chaves dos ramos desta árvore, e depois considerar todas as chaves dos ramos abertas (linhas desconectadas).

Com a indicação da barra inicial, o algoritmo começa a busca pela chave do ramo de menor peso que conecte a árvore a outra barra que ainda não faz parte da árvore. Assim, a chave do ramo escolhida é fechada e conecta uma nova barra formando uma nova árvore e o procedimento se repete até que todas as barras estejam presentes na árvore, ou quando não existam chaves de ramo que atendam essa condição. Assim, o algoritmo segue a lógica apresentada através da Fig. 1.

1) Inicialização:

- Todos as chaves de ramos do sistema malhado devem ter pesos atribuídos;
- Todos as chaves de ramos devem estar abertas ou desligadas;
- Escolha a barra de inicialização (árvore formada contém apenas esta barra).

2) Repita os passos a) e b) até que a árvore formada contenha todas as barras.

- a) Escolha a chave de ramo com menor peso entre todas as chaves que estão ligadas à árvore formada e feche-a, conectando o ramo.
- b) Acrescente a barra ligada a este ramo à árvore formada.

3) Encontrou a árvore mínima formada.

Fig. 1. Algoritmo de Prim.

A Fig. 2(a) apresenta o sistema inicial, com todas chaves abertas (linhas pontilhadas) e com pesos atribuídos aos seus ramos.

Na Fig. 2(b) até a Fig. 2(d) o processo de fechamento das chaves (linha pintada) é demonstrado, a árvore atual se expande da maneira gulosa, simplesmente anexando a barra com menor peso conforme descrito nos parágrafos anteriores.

Na Fig. 2(e), com a escolha do ramo de peso 4, um laço seria formado para o sistema, violando uma condição de restrição. Esta chave não é fechada e este ramo não é considerado para solução deste sistema.

Na Fig. 2(f) é fechada a última chave, encontrando a configuração radial para o sistema (numero de ramos $- 1 =$ numero de barras).

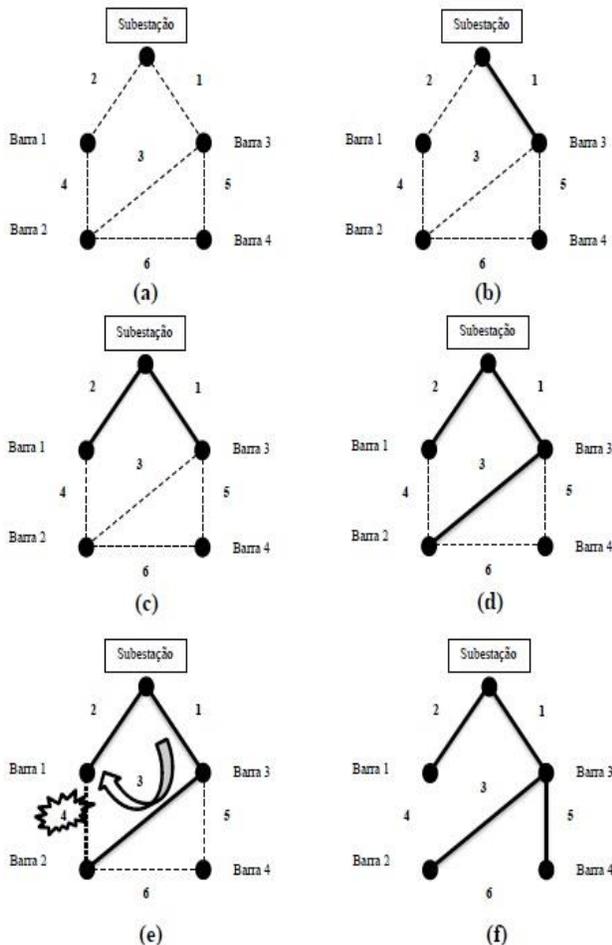


Fig. 2. Prim - Sistema simplificado de 5 barras.

Esse procedimento demonstra que o algoritmo encontra um subgrafo do grafo original no qual a soma total dos ramos é minimizada e todas as barras são interligadas.

O algoritmo de Prim tem características de um algoritmo guloso: para cada iteração é escolhida para ser fechada a chave do ramo com menor peso da árvore, sem se importar com o efeito global dessa escolha.

A Fig. 3 representa um fluxograma do algoritmo para facilitar o entendimento de sua execução.

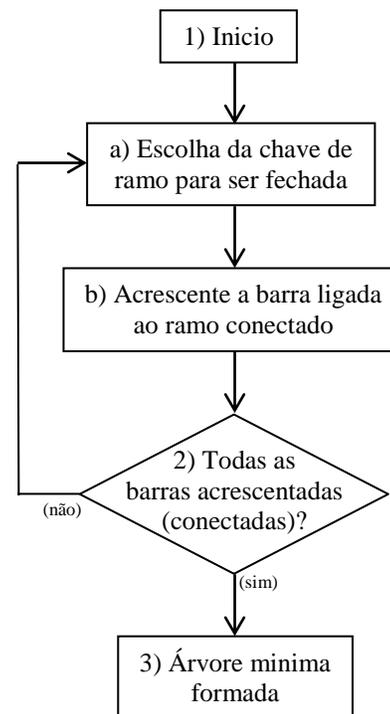


Fig. 3. Fluxograma para o Algoritmo de Prim.

C. Cálculo do Fluxo de Potência

Para cada proposta de solução fornecida pelo algoritmo guloso, é resolvido o problema de fluxo de potência para determinar as perdas ativas da configuração e verificar se a topologia é factível.

O fluxo de potência é resolvido utilizando o método de varredura para sistemas radiais, como o apresentado em [22].

Se a proposta for inactível, ou em outras palavras, se não atender aos limites para as tensões nas barras ou à capacidade das linhas, a solução é então descartada pelo algoritmo.

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

O algoritmo dinâmico guloso foi implementado com a utilização da ferramenta Dev-C++, baseando-se no algoritmo de Prim [8] e em listas dinâmicas duplamente encadeadas com capacidade de resolver sistemas elétricos de grande porte, determinando apropriadas configurações radiais para o sistema.

Estas listas foram implementadas usando ponteiros. Desta maneira, a memória é alocada conforme a necessidade de armazenar ou excluir elementos (informação), ou seja, a memória vai sendo alocada dinamicamente no tempo de execução. Assim, o espaço total de memória ocupada pela lista é proporcional ao número de elementos da lista.

Porém, não é assegurado que os elementos arquivados na lista estarão em espaços de memória contíguos. Assim, para que todos os elementos se mantenham relacionados e seja possível percorrê-los em ambos os sentidos da lista, deve-se realizar um duplo encadeamento dos elementos, que é feito armazenando-se, junto com a informação de cada elemento, um ponteiro para o próximo elemento e outro ponteiro para o elemento anterior da lista. Assim se estabelece uma lista

dinâmica duplamente encadeada.

As listas dinâmicas não só alocam espaço em tempo real, mas também facilitam o movimento das informações sem mover os dados, e sim ponteiros.

O algoritmo implementado busca determinar uma configuração radial para o sistema com as menores perdas. Uma vez que é estabelecido o sistema para ser resolvido, o algoritmo resolve o problema de acordo com a lógica apresentada através da Fig. 4.

1. Inicialização:
 - 1.1. Recebe a informação do número de barras do sistema.
N = número digitado;
 - 1.2. Busca no banco de dados os arquivos com configuração para N barras;
 - 1.3. Estrutura os dados em listas dinâmicas duplamente encadeadas;
 - 1.4. Interligar com ponteiros a lista dos ramos e a lista das barras para formar um sistema malhado;
 - 1.5. Identifica a barra de referência; (Barra da subestação).
2. PRIM
 - 2.1. Ponteiro aponta para barra de referência; (lista radial)
 - 2.2. Contador: número de ramos = 0
 - 2.3. Repita os passos 2.3.1, 2.3.2 e 2.3.3 até que a árvore formada contenha todas as barras (lista barras = \emptyset) e (número de ramos = N - 1)
 - 2.3.1. Escolhe a chave de ramo com menor peso entre os ramos que ligam uma barra da lista radial às outras barras do sistema para ser fechada.
 - 2.3.2. Acrescenta barra interligada com o ramo escolhido (chave fechada) na lista radial.
 - 2.3.3. Contador: número de ramos + 1.
 - 2.4. Radial com mínimas perdas encontradas = lista radial.
3. Algoritmo de fluxo de potência de varredura.
4. Salva os resultados em arquivos .txt.

Fig. 4. Algoritmo Dinâmico Guloso.

Todos os resultados são arquivados em local predeterminado.

O algoritmo verifica se aparecem restrições violadas relacionadas com a capacidade de condução dos ramos (linhas) e com a magnitude de tensão nas barras do sistema. Toda proposta que for identificada como ineficaz é desconsiderada pelo algoritmo.

V. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a simulação do algoritmo proposto.

Para a aplicação do algoritmo foram utilizados três sistemas testes disponíveis na literatura especializada. Nas simulações foram consideradas o estado crítico para os sistemas, considerando todas as demandas de potências como máximas, uma vez que esta condição é utilizada pela concessionária para dimensionar as redes. As condições de limites para as tensões nas barras dos sistemas foram: limite inferior - 95% da tensão nominal, e limite superior - 105% da tensão nominal.

Todas as simulações foram realizadas utilizando um PC Intel Core i5 2,4 GHz, 4 GB de RAM, e sistema operacional Windows 7 Professional 32 bits.

Nas próximas subseções são apresentados os sistemas testes utilizados na simulação, e os respectivos resultados obtidos.

A. Sistema teste de 14 barras

Este sistema teste foi originalmente proposto em [4]. Possui uma subestação, 13 barras de carga e 16 ramos. As demandas de potência totais, ativa e reativa, são 28700 kW e 5900 kVAR, respectivamente. Todos os ramos possuem chaves. A barra onde está localizada a subestação é a 14, energizada com tensão de 23 kV.

A Fig. 5 Apresenta o sistema teste inicial com os ramos indicados com chaves abertas e a barra 14 é a barra da subestação.

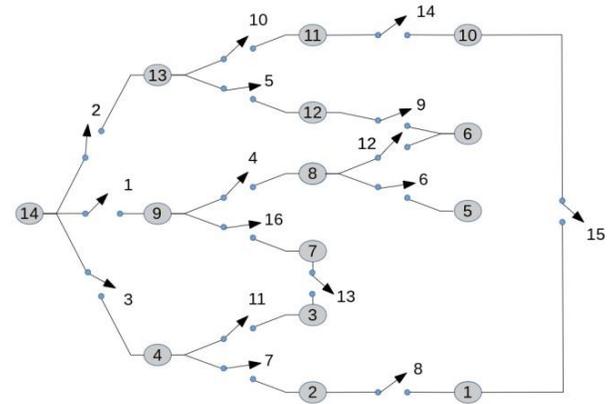


Fig. 5. Sistema de 14 barras [4]

A Fig. 6 apresenta os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo.

Nesta figura pode-se observar a ordem de construção que o algoritmo realiza para resolver o problema. A ordem de conexão das barras foi a seguinte: 14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1 - 6 - 11 - 3 - 7 - 10.

De acordo com a figura, os ramos que aparecem assinalados com destaque, 12 (08-06), 15 (10-01) e 16 (09-07) são os que possuem chaves não ligadas.

Em outras palavras, se um destes ramos em destaque tivesse sua chave fechada, conectando o ramo ao sistema, seria provocado um laço, descaracterizando a radialidade da topologia.

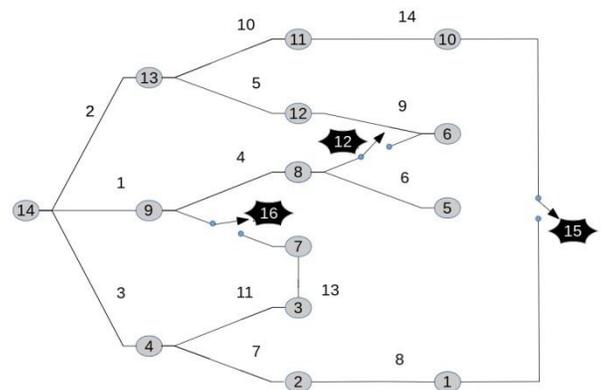


Fig. 6. Sistema radial com menores perdas para o sistema de 14 barras [4].

Ramo	Potência	Barra de entrada	Barra de saída	Barras do sistema radial	Barras não conectadas ao sistema
1	11177,599	14	9	14 - 9	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14
2	11050,432	14	13	14 - 9 - 13	1-2-3-4-5-6-7-8-10-11-12-13
3	7605,065	14	4	14 - 9 - 13 - 4	1-2-3-4-5-6-7-8-10-11-12
4	7324,979	9	8	14 - 9 - 13 - 4 - 8	1-2-3-5-6-7-8-10-11-12
5	5893,25	13	12	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12	1-2-3-5-6-7-10-11-12
6	4819,208	8	5	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5	1-2-3-5-6-7-10-11
7	3905,061	4	2	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2	1-2-3-6-7-10-11
8	2947,928	2	1	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1	1-3-6-7-10-11
9	2852,675	12	6	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1 - 6	3-6-7-10-11
10	2804,986	13	11	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1 - 6 - 11	3-7-10-11
11	2514,548	4	3	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1 - 6 - 11 - 3	3-7-10
12	2285,19	8	6	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1 - 6 - 11 - 3	7-10
13	1977,198	7	3	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1 - 6 - 11 - 3 - 7	7-10
14	1256,467	11	10	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1 - 6 - 11 - 3 - 7 - 10	-10
15	796,4	10	1	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1 - 6 - 11 - 3 - 7 - 10	
16	632,285	9	7	14 - 9 - 13 - 4 - 8 - 12 - 5 - 2 - 1 - 6 - 11 - 3 - 7 - 10	

Fig. 7. Funcionamento do algoritmo para Sistema de 14 barras [4].

Na Fig. 7 é demonstrado o passo a passo do funcionamento do algoritmo para o sistema proposto.

A Tabela I, apresentada a seguir, as radiais encontradas pelo algoritmo comparando com outros trabalhos presentes na literatura especializada.

TABELA I
RESULTADOS PARA SISTEMA DE 14 BARRAS

	Circuitos com chaves abertas (Ramos entre as barras)
Algoritmo utilizado	8-6, 10-1, 9-7
Heurística em [20]	8-6, 10-1, 9-7
Em [12]	8-6, 10-1, 9-7
Em [25]	8-6, 10-1, 9-7

O algoritmo proposto encontrou a solução ótima ideal para o sistema de 14 barras.

Os resultados obtidos com a solução do fluxo de potência para a topologia determinada pelo algoritmo atestaram a factibilidade da solução determinada.

A Tabela II, apresentada a seguir, compara os valores para a maior queda de tensão na barra e cálculo de perdas elétricas, entre valores obtidos com o algoritmo e trabalhos disponíveis na literatura especializada.

TABELA II
RESULTADOS FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMA DE 14 BARRAS

	Maior valor da queda de tensão		Perda total do sistema (kVA)
	Barra	Tensão (pu)	
Solução encontrada	5	0,971153	466,13
[20], [12]	-	0,9759	466,13

B. Sistema teste de 84 barras

O sistema de 84 barras foi apresentado em [12]. Possui uma subestação, 83 barras de carga e 96 ramos. As demandas de potência totais, ativa e reativa, são 28351 kW e 20700 kVAr, respectivamente.

Todos os ramos possuem chaves. A barra onde está localizada a subestação é a 84, energizada com tensão de 11,4 kV.

A Fig. 8 apresenta os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo. Uma topologia radial para o sistema foi estabelecida pelo algoritmo e nesta figura está representada a ordem obtida através da aplicação do algoritmo para a conexão das barras do sistema.

84 - 47 - 48 - 49 - 50 - 11 - 12 - 15 - 16 - 17
18 - 25 - 26 - 51 - 77 - 78 - 19 - 30 - 31 - 43
44 - 01 - 02 - 03 - 56 - 57 - 52 - 04 - 73 - 74
75 - 65 - 66 - 67 - 68 - 53 - 20 - 05 - 46 - 28
59 - 60 - 34 - 06 - 69 - 70 - 71 - 07 - 72 - 32
14 - 83 - 76 - 54 - 21 - 80 - 64 - 13 - 29 - 81
82 - 35 - 10 - 61 - 09 - 62 - 08 - 36 - 63 - 39
33 - 55 - 37 - 38 - 41 - 40 - 23 - 42 - 22 - 24

Fig. 8. Resultados Sistema de 84 barras.

Esta topologia radial determinada pelo algoritmo apresenta treze chaves abertas. Os ramos não conectados (relacionados a estas chaves) são apresentados através da Tabela III. Nesta tabela também está representada as configurações obtidas por outros trabalhos presentes na literatura especializada.

TABELA III
RESULTADOS PARA SISTEMA DE 84 BARRAS

	Circuitos com chaves abertas (Ramos entre as barras)
Algoritmo utilizado	6-7, 32-33, 38-39, 41-42, 62-63, 71-72, 81-82, 5-55, 11-43, 13-76, 14-18, 16-26, 28-32
Heurística em [20]	6-7, 32-33, 38-39, 41-42, 62-63, 71-72, 81-82, 5-55, 11-43, 13-76, 14-18, 16-26, 28-32
[25]	6-7, 32-33, 38-39, 41-42, 62-63, 71-72, 81-82, 5-55, 11-43, 13-76, 14-18, 16-26, 28-32

Os resultados obtidos com a solução do algoritmo

comprovaram sua qualidade e posteriormente tiveram calculados do fluxo de potência para atestar a factibilidade da solução determinada.

A Tabela IV, apresentada a seguir, compara os valores para a maior queda de tensão na barra e cálculo de perdas elétricas, entre valores obtidos com o algoritmo e trabalhos disponíveis na literatura especializada.

TABELA IV
RESULTADOS FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMA DE 84 BARRAS

	Maior valor da queda de tensão		Perda total do sistema (kVA)
	Barra	Tensão (pu)	
Solução encontrada	9	0,951345	471,7299
[18], [24]	-	0,9517	471,73

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o sistema de 136 barras.

C. Sistema teste de 136 barras

O sistema de 136 barras é um sistema real de grande porte e é apresentado em [23]. Possui uma subestação, 135 barras de carga e 156 ramos. As demandas de potência totais, ativa e reativa, são 18.313,8090 kW e 7.932,5335 kVar, respectivamente. A barra onde está localizada a subestação é a 136, energizada com tensão de 13,8 kV.

A Fig. 9 apresenta os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo. Uma topologia radial para o sistema foi estabelecida pelo algoritmo e nesta figura está representada a ordem obtida através da aplicação do algoritmo para a conexão das barras do sistema.

```

136 - 039 - 040 - 042 - 043 - 045 - 046 - 017
018 - 019 - 020 - 085 - 086 - 001 - 002 - 003
022 - 004 - 047 - 005 - 099 - 100 - 101 - 024
103 - 063 - 064 - 006 - 121 - 122 - 025 - 065
123 - 075 - 076 - 066 - 125 - 127 - 008 - 129
130 - 010 - 131 - 132 - 110 - 088 - 077 - 078
026 - 079 - 090 - 091 - 027 - 087 - 080 - 107
067 - 081 - 104 - 105 - 013 - 068 - 133 - 089
028 - 051 - 052 - 031 - 070 - 092 - 093 - 083
097 - 098 - 032 - 048 - 056 - 057 - 134 - 058
108 - 106 - 033 - 034 - 007 - 126 - 073 - 074
135 - 038 - 094 - 035 - 036 - 118 - 059 - 014
015 - 128 - 062 - 095 - 053 - 109 - 116 - 037
012 - 119 - 021 - 023 - 120 - 016 - 096 - 029
114 - 084 - 009 - 124 - 011 - 055 - 111 - 060
054 - 082 - 069 - 050 - 044 - 030 - 112 - 049
071 - 102 - 041 - 072 - 061 - 113 - 115 - 117

```

Fig. 9. Resultados Sistema de 136 barras.

Esta topologia radial determinada pelo algoritmo apresenta vinte e uma chaves abertas. As chaves abertas são apresentados através da Tabela V, onde é feita comparação com as configurações obtidas por outros trabalhos presentes na literatura especializada.

TABELA V
RESULTADOS PARA SISTEMA DE 136 BARRAS

	Circuitos com chaves abertas (Ramos)
Algoritmo utilizado	8-9, 31-35, 49-50, 48-51, 53-54, 83-84, 89-90, 95-96, 105-106, 125-126, 134-135, 7-73, 15-83, 62-120, 66-79, 79-131, 91-104, 90-129, 92-104, 92-132, 128-77
AHCASC [25]	8-9, 31-35, 49-50, 48-51, 53-54, 89-90, 91-92, 95-96, 103-104, 105-106, 125-126, 134-135, 7-73, 15-83, 62-120, 66-79, 79-131, 84-135, 90-129, 92-104, 128-77
Prim [25]	8-9, 31-35, 49-50, 48-51, 53-54, 83-84, 89-90, 95-96, 105-106, 125-126, 134-135, 7-73, 15-83, 62-120, 66-79, 79-131, 91-104, 90-129, 92-104, 92-132, 128-77

Foi calculado o fluxo de potência para a topologia determinada pelo algoritmo, que atestaram a factibilidade da solução determinada.

A Tabela VI, apresentada a seguir, compara os valores para a maior queda de tensão na barra e cálculo de perdas elétricas, entre valores obtidos com o algoritmo e trabalhos disponíveis na literatura especializada.

TABELA VI
RESULTADOS FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMA DE 136 BARRAS

	Maior valor da queda de tensão		Perda total do sistema (kVA)
	Barra	Tensão (pu)	
Solução encontrada	50	0,952495	292,93
AHCASC [25]	-	-	293,2879
Prim [25]	-	0,9489	292,9256

A seguir são apresentadas as conclusões do trabalho.

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho o problema de reconfiguração de redes de distribuição é formulado para encontrar a topologia radial ideal através de uma heurística simples aliada a uma programação inteligente, com a utilização de listas dinâmicas duplamente encadeadas. Para avaliar o desempenho do algoritmo foram realizados testes computacionais, e seus resultados foram comparados outros os resultados de outros trabalhos da literatura especializada. Os resultados obtidos com as simulações mostraram soluções de qualidade, com um tempo de processamento excelente e esforço computacional muito inferior, atestando a eficiência do novo algoritmo. Outro ponto forte do método é a utilização de listas dinâmicas duplamente encadeadas, que utiliza o espaço de memória de acordo com a necessidade, tornando o processo mais eficiente.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Anuário Statistics de Energia Elétrica 2013. Rio de Janeiro. 2013. Acesso, em: setembro/25/2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Paginas/Default.aspx>
- [2] A. Merlin, H. Back. "Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system". In: POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, 5., Cambridge. Proceedings... Zurich: PSCC, 1975, p. 1-18. 1975.
- [3] S. Civanlar, J. J. Graiger, H. Yin e S. S. H. Lee. "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 3. 1988.
- [4] M. E. Baran e F. F. Wu. "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 4, n. 2. 1989.
- [5] D. Shirmohammadi e H. W. Hong. "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction." IEEE Trans. Power Systems, vol. 4, pp. 1492-1498. 1989.
- [6] S. K. Goswami e S. K. Basu, "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization," IEEE Trans. Power Delivery, vol.7, pp. 1484-1491, Jul. 1992.
- [7] T. D. Sudhakar e K. N. Srinivas. "Power system reconfiguration based on prim's algorithm." In Electrical Energy Systems (ICEES), 2011 1st International Conference on, pp. 12-20. IEEE. January, 2011.
- [8] R. C. Prim, "Shortest Connection Networks and Some Generalizations," The Bell System Technical Journal, pp. 1389-1401, May, 1957.
- [9] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, T. Ishihara. "Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum reconfiguration". IEEE Trans. Power Systems, New York, vol. 7, n. 3 pp. 1044-1051. 1989.
- [10] H. D. Chang, C. C. Kuo. "Network reconfiguration in distribution system using simulated annealing." IEEE Trans. Power Systems, New York, vol. 29, n. 3 pp. 227-238. 1994.
- [11] J. P. Chiou, C. F. Chang, C. T. Su. "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.
- [12] A. C. B. Delbem, A. C. Carvalho, N. G. Bretas. "Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration". IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 20, n. 1, p.425-436. 2005.
- [13] J. Mendoza, R. Lopez, D. Morales, E. Lopes, P. Dessante, R. Moraga. "Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms whit restricted population and addressed operators: Real applications". IEEE Transactions on Power Systems, v. 21, n. 2, p.948-954. 2006.
- [14] D. Zhang, Z. Fu, L. Zhang; "An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems." Electric Power Systems Research, Lausanne, v. 77, n. 5-6, p. 685-694, 2007
- [15] A. M. G. Cabezas. "Novas formulações para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica." 2007. 77 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2007.
- [16] E. M. Carreño, ROMERO, R. Romero, A. P. Feltrin. "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.
- [17] C. Wang, H. Z. Cheng. "Optimization of network configuration in large distribution systems using plant growth simulation algorithm." IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 23, n. 1, p. 119-126, 2008.
- [18] S. S. F. Souza. "Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração e alimentadores em sistemas de distribuição radial." 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2013.
- [19] L. H. F. M. Possagnolo, R. A. R. Lázaro. "Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável." XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Salvador, Brasil. p. 1146-1157, 2014.
- [20] F. S. Pereira. "Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônia de formigas." 2010. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2010.
- [21] M. Lavorato, J. F. Franco, M. J. Rider, R. Romero. "Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems." IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 4, pp. 172-180. 2012.
- [22] J. M. Harris, J. L. Hirst, M. J. Mossinghoff. "Combinatorics and graph theory." 2. ed. New York: Springer, 381 p. 2008.
- [23] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, G. X. LUO. "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.
- [24] J. R. S. Mantovani, F. Casari, R. Romero. "Reconfiguração de sistema de distribuição adiais utilizando o critério de queda de tensão." SBA Controle e Automação, vol. 11, no. 2, pp. 150-159. 2000.
- [25] L. H. F. M. Possagnolo. "Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável." 2015 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2015.

VIII. BIOGRAFIAS



(UNILA), Foz do Iguçu, Paraná, Brasil.

H. L. M. Nunes Jr. Possui graduação (2010) em Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Foz do Iguçu, Paraná, Brasil. Atualmente é aluno do curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação (PGEEC), da UNIOESTE, Foz do Iguçu, Paraná, Brasil. Também é chefe da coordenadoria de projetos e planejamento da Universidade Federal da Integração Latino Americana



M. S. Ghellere. Aluna de graduação do curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência.



Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Otimização, Técnicas de Otimização, Planejamento de Sistemas Elétricos.

C. Rocha (M'09) Possui graduação (1996), mestrado (1999) e doutorado (2004) em Engenharia Elétrica, área de concentração Controle & Automação, pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, campus de Ilha Solteira, estado de São Paulo, Brasil. Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, campus de Foz do Iguçu, estado do Paraná. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de



Foz do Iguçu, Paraná, Brasil.

R. L. B. Freitas Graduado em Engenharia da Computação pela Escola de Engenharia de Lins (2005). Mestrado em Engenharia Elétrica pela UNESP de Ilha Solteira - SP (2008) e Doutorado em Engenharia Elétrica da UNESP de Ilha Solteira-SP (2012). Pós-Doutorado com o grupo de Otimização da UNESP de Ilha Solteira com bolsa CNPq PDJ. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, Engenharia da Computação, Engenharia Biomédica. Atualmente Professor Adjunto Doutor da UNIOESTE - Campus

Anexo A – Dados dos Sistemas de Teste

Sistema com 33 barras

Dados dos ramos

Barra de Entrada	Barra de Saída	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)
1	2	0,0922	0,047	4.520,47
2	3	0,493	0,2511	3.140,97
3	4	0,366	0,1864	1.419,35
4	5	0,3811	0,1941	1.270,54
5	6	0,819	0,707	1.199,01
6	7	0,1872	0,6188	455,47
7	8	0,7114	0,2351	241,61
8	9	1,03	0,74	407,69
9	10	1,044	0,74	71,03
10	11	0,1966	0,065	31,46
11	12	0,3744	0,1238	69,05
12	13	1,468	1,155	281,59
13	14	0,5416	0,7129	212,07
14	15	0,591	0,526	71,24
15	16	0,7463	0,545	306,63
16	17	1,289	1,721	252,34
17	18	0,732	0,574	203,26
2	19	0,164	0,1565	1.253,32
19	20	1,5042	1,3554	1.154,80
20	21	0,4095	0,4784	1.041,94
21	22	0,7089	0,9373	515,28
3	23	0,4512	0,3083	1.592,05
23	24	0,898	0,7091	1.480,46
24	25	0,896	0,7011	1.005,11
6	26	0,203	0,1034	693,54
26	27	0,2842	0,1447	630,15
27	28	1,059	0,9337	567,18
28	29	0,8042	0,7006	506,15
29	30	0,5075	0,2585	917,26
30	31	0,9744	0,963	429,15
31	32	0,3105	0,3619	272,44
32	33	0,341	0,5302	120,29
8	21	2	2	423,91
9	15	2	2	290,22
12	22	2	2	414,92
18	33	0,5	0,5	143,06
25	29	0,5	0,5	548,53

Sistema com 33 barras**Dados dos ramos**

Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
1	0	0
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	600
31	150	70
32	210	100
33	60	40

Sistema com 84 barras

Barra de Entrada	Dados dos ramos			Potência Ativa (kW)	Barra de Entrada	Dados dos ramos			Potência Ativa (kW)
	Barra de Saida	Resistência [%]	Reatância [%]			Barra de Saida	Resistência [%]	Reatância [%]	
16	17	0,0524	0,1076	4.995,87	56	84	0,2268	0,7728	2.623,78
17	18	0,1572	0,3228	4.364,87	56	57	0,5371	1,1029	2.623,78
11	12	0,3406	0,6944	4.203,21	51	52	0,0393	0,0807	2.577,31
47	84	0,243	0,828	3.891,30	57	58	0,0524	0,1076	2.529,41
47	48	0,0655	0,1345	3.891,30	3	4	0,0917	0,1883	2.356,98
48	49	0,0655	0,1345	3.875,21	73	84	0,324	1,104	2.301,73
49	50	0,0393	0,0807	3.859,15	73	74	0,0324	0,1104	2.301,73
11	84	0,0786	0,1614	3.844,92	74	75	0,0567	0,1932	2.297,69
15	84	0,1134	0,3864	3.758,98	65	84	0,0486	0,1656	2.249,15
15	16	0,0524	0,1076	3.758,98	65	66	0,1703	0,3497	2.249,15
25	84	0,0567	0,1932	3.747,40	66	67	0,1215	0,414	2.177,75
25	26	0,1048	0,2152	3.689,27	67	68	0,2187	0,7452	2.164,22
50	51	0,0786	0,1614	3.593,70	52	53	0,0786	0,1614	1.991,80
77	84	0,2511	0,8556	3.592,07	19	20	0,1703	0,3497	1.989,70
77	78	0,1296	0,4416	3.592,07	26	27	0,2489	0,5111	1.974,36
18	19	0,0393	0,0807	3.553,42	4	5	0,2096	0,4304	1.918,70
30	84	0,1965	0,396	3.526,13	45	46	0,2358	0,4842	1.899,03
30	31	0,131	0,269	3.526,13	27	28	0,0486	0,1656	1.836,98
43	84	0,0486	0,1656	3.385,81	58	59	0,0405	0,138	1.791,54
43	44	0,0393	0,0807	3.019,18	59	60	0,0393	0,0807	1.788,57
78	79	0,0486	0,1656	3.016,31	34	46	0,0262	0,0538	1.634,52
44	45	0,131	0,269	2.977,53	5	6	0,0393	0,0807	1.632,49
1	84	0,1944	0,6624	2.883,94	68	69	0,0486	0,1656	1.601,99
1	2	0,2096	0,4304	2.883,94	69	70	0,0729	0,2484	1.598,99
2	3	0,2358	0,4842	2.745,90	16	26	0,0917	0,1883	1.596,24

70	71	0,0567	0,1932	1.594,50	7	8	0,1048	0,2152	360,78
7	60	0,131	0,269	1.376,95	81	82	0,0917	0,1883	315,34
12	72	0,3406	0,6994	1.172,45	35	36	0,4978	1,0222	283,30
31	32	0,131	0,269	1.126,27	6	7	0,0405	0,138	275,16
71	72	0,0262	0,0528	915,60	63	64	0,0243	0,0828	267,14
12	14	0,0786	0,1614	899,77	29	39	0,0786	0,1614	236,71
20	83	0,0786	0,1614	893,57	33	34	0,1703	0,3497	235,48
28	32	0,0524	0,1076	887,55	38	41	0,1965	0,4035	219,44
75	76	0,0486	0,1656	761,36	54	55	0,131	0,269	174,92
53	54	0,0524	0,1076	754,16	36	37	0,0393	0,0807	166,09
20	21	0,2358	0,4842	681,95	37	38	0,0393	0,0807	143,86
79	80	0,131	0,264	654,05	62	63	0,2358	0,4842	126,75
53	64	0,0393	0,0807	623,65	39	40	0,2096	0,4304	116,86
12	13	0,0262	0,0538	602,06	21	23	0,1965	0,4035	104,44
28	29	0,131	0,269	469,86	38	39	0,0786	0,1614	97,98
80	81	0,131	0,264	429,15	40	42	0,1965	0,4035	94,76
13	76	0,4585	0,9415	421,90	5	55	0,131	0,269	89,56
82	83	0,3144	0,6456	414,33	21	22	0,1572	0,3228	53,86
34	35	0,0524	0,1076	400,04	23	24	0,131	0,269	50,99
7	10	0,1048	0,2152	397,28	14	18	0,5371	1,0824	39,55
60	61	0,0262	0,0538	385,81	41	42	0,2096	0,4304	37,30
7	9	0,2358	0,4842	378,60	32	33	0,0262	0,0538	35,53
11	43	0,131	0,269	370,62					
61	62	0,1048	0,2152	363,41					

Sistema com 84 barras

Dados dos ramos			Dados dos ramos		
Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]	Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
1	0	0	41	200	160
2	100	50	42	50	30
3	300	200	43	0	0
4	350	250	44	30	20
5	220	100	45	800	700
6	1100	800	46	200	150
7	400	320	47	0	0
8	300	200	48	0	0
9	300	230	49	0	0
10	300	260	50	200	160
11	0,9	0	51	800	600
12	1200	800	52	500	300
13	800	600	53	500	350
14	700	500	54	500	300
15	0	0	55	200	80
16	300	150	56	0	0
17	500	350	57	30	20
18	700	400	58	600	420
19	1200	1000	59	0	0
20	300	300	60	20	10
21	400	350	61	20	10
22	50	20	62	200	130
23	50	20	63	300	240
24	50	10	64	300	200
25	50	30	65	0	0
26	100	60	66	50	30
27	100	70	67	0	0
28	1800	1300	68	400	360
29	200	120	69	0	0
30	0	0	70	0	0
31	1800	1600	71	2000	1500
32	200	150	72	200	150
33	200	100	73	0	0
34	800	600	74	0	0
35	100	60	75	1200	950
36	100	60	76	300	180
37	20	10	77	0	0
38	20	10	78	400	360
39	20	10	79	2000	1300
40	20	10	80	200	140

Dados dos ramos		
Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
81	500	360
82	100	30
83	400	360
84	0	0

Sistema com 136 barras

Barra de Entrada	Barra de Saída	Dados dos ramos			Dados dos ramos				
		Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)	Barra de Entrada	Barra de Saída	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)
136	39	0,3321	0,7665	3.448,78	127	129	0,1388	0,3205	1.524,19
39	40	0,1182	0,2728	3.409,97	129	130	0,0432	0,0996	1.523,30
40	42	0,0019	0,0043	3.388,07	90	91	0,3321	0,7665	1.499,00
42	43	0,0694	0,1602	3.387,85	8	10	0,1088	0,1086	1.492,50
43	45	0,0638	0,1472	3.183,76	130	131	0,0919	0,2122	1.482,84
45	46	0,1313	0,3032	2.990,15	77	78	0,2082	0,4807	1.420,72
136	17	0,3321	0,7665	2.957,63	110	47	0,497	0,6457	1.386,29
17	18	0,0019	0,0043	2.928,83	86	88	0,439	1,0134	1.385,14
18	19	0,2232	0,5154	2.928,67	76	77	0,2251	0,5197	1.365,31
19	20	0,1088	0,2512	2.909,43	25	26	0,0188	0,0433	1.333,07
136	85	0,0113	0,026	2.750,62	78	79	0,0469	0,1083	1.312,24
85	86	0,4184	0,9658	2.749,79	90	103	0,0769	0,1776	1.293,56
136	1	0,3321	0,7665	2.693,79	26	27	0,1182	0,1181	1.269,32
1	2	0,0019	0,0043	2.670,14	86	87	0,105	0,1364	1.236,48
2	3	0,2232	0,5154	2.618,64	79	80	0,6195	0,6186	1.113,53
20	22	0,182	0,4201	2.609,30	107	110	0,0455	0,0591	1.052,02
3	4	0,0994	0,2295	2.557,67	66	67	0,3283	0,7579	1.041,96
46	47	0,0619	0,1429	2.480,29	80	81	0,3405	0,34	957,24
4	5	0,1557	0,3595	2.457,57	103	104	0,696	1,6067	948,52
136	99	0,0094	0,0217	2.415,36	10	13	0,1182	0,1181	946,95
99	100	0,1688	0,3898	2.414,82	67	68	0,1707	0,3941	926,78
100	101	0,1182	0,2728	2.349,43	92	93	0,1332	0,3075	893,13
22	24	0,0244	0,0563	2.272,67	51	52	0,0263	0,0606	882,90
101	103	0,4559	1,0524	2.268,13	132	133	0,3783	0,3778	882,15
136	63	0,0075	0,0173	2.255,93	88	89	0,0752	0,0258	879,02
63	64	0,2701	0,6236	2.255,56	27	28	0,0237	0,0236	862,41
5	6	0,1632	0,3768	2.113,34	91	104	0,1419	0,1417	808,29
136	121	0,0113	0,026	2.045,00	66	79	0,1294	0,2988	680,87
121	122	0,6491	1,4984	2.044,53	25	51	0,045	0,1039	668,74
24	25	0,045	0,1039	1.997,10	28	31	0,0568	0,0567	660,45
64	65	0,3827	0,8835	1.926,01	68	70	0,0582	0,1343	646,48
122	123	0,045	0,1039	1.912,56	91	92	0,0844	0,1949	604,97
136	75	0,0113	0,026	1.879,78	79	131	0,0169	0,039	588,57
75	76	0,7298	1,6846	1.879,40	81	83	0,1088	0,1086	567,87
125	127	0,0976	0,2252	1.851,60	92	132	0,0769	0,1776	544,94
65	66	0,3302	0,7622	1.822,77	93	97	0,1032	0,2382	542,38
131	132	0,1613	0,3724	1.770,66	97	98	0,1351	0,3118	542,03
123	125	0,0206	0,0476	1.718,37	31	32	0,0948	0,0499	537,57
6	8	0,0568	0,0567	1.555,27	47	48	0,1144	0,2642	533,05
104	105	0,4577	1,0567	1.534,36	52	56	0,1088	0,2512	527,65

Dados dos ramos					Dados dos ramos				
Barra de Entrada	Barra de Saída	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)	Barra de Entrada	Barra de Saída	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)
56	57	0,2559	0,1346	527,34	106	107	0,2135	0,2774	473,72
133	134	0,3972	0,3966	512,74	35	36	0,3696	0,1944	471,84
57	58	0,417	0,2193	504,61	89	90	0,0769	0,1776	460,34
107	108	0,5497	0,2891	499,81	32	33	0,417	0,2193	442,26
106	107	0,2135	0,2774	473,72	33	34	0,1137	0,0598	441,75
35	36	0,3696	0,1944	471,84	73	74	1,3235	0,454	438,42
89	90	0,0769	0,1776	460,34	38	135	0,0851	0,085	437,36
32	33	0,417	0,2193	442,26	6	7	0,1144	0,2642	396,36
33	34	0,1137	0,0598	441,75	126	76	0,1706	0,0897	388,91
73	74	1,3235	0,454	438,42	70	73	0,0675	0,1559	382,16
38	135	0,0851	0,085	437,36	135	98	0,2932	0,2928	375,84
6	7	0,1144	0,2642	396,36	93	94	0,2932	0,2928	359,48
126	76	0,1706	0,0897	388,91	35	38	0,0568	0,0567	354,09
70	73	0,0675	0,1559	382,16	104	118	0,3227	0,7449	342,20
135	98	0,2932	0,2928	375,84	58	59	0,5023	0,2642	340,43
93	94	0,2932	0,2928	359,48	13	14	0,5023	0,2642	327,21
35	38	0,0568	0,0567	354,09	13	15	0,0568	0,0567	313,32
104	118	0,3227	0,7449	342,20	127	128	0,1182	0,2728	305,46
58	59	0,5023	0,2642	340,43	47	62	0,1388	0,3205	284,62
13	14	0,5023	0,2642	327,21	94	95	0,2175	0,2172	279,58
13	15	0,0568	0,0567	313,32	52	53	0,06	0,1386	279,50
127	128	0,1182	0,2728	305,46	108	109	0,5402	0,2842	272,46
47	62	0,1388	0,3205	284,62	109	116	1,0993	0,5783	272,21
94	95	0,2175	0,2172	279,58	36	37	0,2654	0,1396	269,69
52	53	0,06	0,1386	279,50	10	12	0,9174	0,3147	268,59
108	109	0,5402	0,2842	272,46	118	119	0,1463	0,3378	266,00
109	116	1,0993	0,5783	272,21	20	21	0,7108	0,3739	257,39
36	37	0,2654	0,1396	269,69	22	23	0,3033	0,1595	257,22
10	12	0,9174	0,3147	268,59	90	129	0,0769	0,1776	256,85
118	119	0,1463	0,3378	266,00	134	135	0,2932	0,2928	246,22
20	21	0,7108	0,3739	257,39	48	51	0,045	0,1039	241,02
22	23	0,3033	0,1595	257,22	125	126	0,5307	0,2792	234,56
90	129	0,0769	0,1776	256,85	119	120	0,1238	0,2858	231,06
134	135	0,2932	0,2928	246,22	128	77	0,0525	0,1213	225,69
48	51	0,045	0,1039	241,02	15	16	0,2938	0,1545	213,81
125	126	0,5307	0,2792	234,56	92	104	0,0769	0,1776	209,93
119	120	0,1238	0,2858	231,06	96	120	0,2648	0,2644	203,18
128	77	0,0525	0,1213	225,69	28	29	0,1895	0,0997	202,23
15	16	0,2938	0,1545	213,81	108	114	0,7771	0,4088	170,74
92	104	0,0769	0,1776	209,93	105	106	0,203	0,2637	168,39

Dados dos ramos					Dados dos ramos				
Barra de Entrada	Barra de Saída	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)	Barra de Entrada	Barra de Saída	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)
96	120	0,2648	0,2644	203,18	15	83	0,1419	0,1417	167,75
28	29	0,1895	0,0997	202,23	84	135	0,3317	0,1745	161,58
108	114	0,7771	0,4088	170,74	83	84	0,5686	0,2991	158,41
105	106	0,203	0,2637	168,39	9	24	0,2654	0,1396	148,28
15	83	0,1419	0,1417	167,75	7	73	0,1313	0,3032	143,58
84	135	0,3317	0,1745	161,58	123	124	0,5264	0,1806	137,15
83	84	0,5686	0,2991	158,41	31	35	0,0757	0,0756	129,98
9	24	0,2654	0,1396	148,28	10	11	0,398	0,2094	125,76
7	73	0,1313	0,3032	143,58	55	98	0,1419	0,1417	118,23
123	124	0,5264	0,1806	137,15	110	111	0,4739	0,2493	115,66
31	35	0,0757	0,0756	129,98	59	60	0,3317	0,1745	100,36
10	11	0,398	0,2094	125,76	54	55	0,0206	0,0476	97,69
55	98	0,1419	0,1417	118,23	81	82	0,5686	0,2991	94,87
110	111	0,4739	0,2493	115,66	68	69	0,5591	0,2941	89,37
59	60	0,3317	0,1745	100,36	50	96	0,1419	0,1417	71,69
54	55	0,0206	0,0476	97,69	43	44	0,815	0,4287	68,09
81	82	0,5686	0,2991	94,87	29	30	0,398	0,2094	63,44
68	69	0,5591	0,2941	89,37	53	54	0,03	0,0693	54,05
50	96	0,1419	0,1417	71,69	62	120	0,0394	0,0909	50,06
43	44	0,815	0,4287	68,09	111	112	0,8624	0,4536	49,56
29	30	0,398	0,2094	63,44	95	96	0,2648	0,2644	49,24
53	54	0,03	0,0693	54,05	48	49	0,2837	0,2833	49,19
62	120	0,0394	0,0909	50,06	49	50	0,2837	0,2833	49,18
111	112	0,8624	0,4536	49,56	8	9	0,5212	0,2742	42,75
95	96	0,2648	0,2644	49,24	70	71	0,7013	0,3689	30,54
48	49	0,2837	0,2833	49,19	101	102	2,2861	0,7841	9,85
49	50	0,2837	0,2833	49,18	40	41	2,9629	1,0163	6,82
8	9	0,5212	0,2742	42,75	71	72	1,0235	0,5384	5,46
70	71	0,7013	0,3689	30,54					
101	102	2,2861	0,7841	9,85					
40	41	2,9629	1,0163	6,82					
71	72	1,0235	0,5384	5,46					
60	61	0,2085	0,1097	0					
112	113	0,5686	0,2991	0					
114	115	1,0804	0,5683	0					
116	117	0,4739	0,2493	0					

Sistema com 136 barras

Dados dos ramos			Dados dos ramos		
Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]	Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
136	0	0	40	1,254	0,531
1	0	0	41	6,274	2,66
2	47,78	19,009	42	0	0
3	42,551	16,929	43	117,88	49,971
4	87,022	34,622	44	62,668	26,566
5	311,31	123,855	45	172,285	73,034
6	148,869	59,228	46	458,556	194,388
7	238,672	94,956	47	262,962	111,473
8	62,299	24,786	48	235,761	99,942
9	124,598	49,571	49	0	0
10	140,175	55,768	50	109,215	46,298
11	116,813	46,474	51	0	0
12	249,203	99,145	52	72,809	30,865
13	291,447	115,952	53	258,473	109,57
14	303,72	120,835	54	69,169	29,322
15	215,396	85,695	55	21,843	9,26
16	198,586	79,007	56	0	0
17	0	0	57	20,527	8,702
18	0	0	58	150,548	63,819
19	0	0	59	220,687	93,552
20	30,127	14,729	60	92,384	39,163
21	230,972	112,92	61	0	0
22	60,256	29,458	62	226,693	96,098
23	230,972	112,92	63	0	0
24	120,507	58,915	64	294,016	116,974
25	0	0	65	83,015	33,028
26	56,981	27,857	66	83,015	33,028
27	364,665	178,281	67	103,77	41,285
28	0	0	68	176,408	70,184
29	124,647	60,939	69	83,015	33,028
30	56,981	27,857	70	217,917	86,698
31	0	0	71	23,294	9,267
32	85,473	41,787	72	5,075	2,019
33	0	0	73	72,638	28,899
34	396,735	193,96	74	405,99	161,524
35	0	0	75	0	0
36	181,152	88,563	76	100,182	42,468
37	242,172	118,395	77	142,523	60,417
38	75,316	36,821	78	96,042	40,713
39	0	0	79	300,454	127,366

Dados dos ramos			Dados dos ramos		
Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]	Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
80	141,238	59,873	120	61,084	25,894
81	279,847	118,631	121	0	0
82	87,312	37,013	122	94,622	46,26
83	243,849	103,371	123	49,858	24,375
84	247,75	105,025	124	123,164	60,214
85	0	0	125	78,35	38,304
86	89,878	38,101	126	145,475	71,121
87	1137,28	482,108	127	21,369	10,447
88	458,339	194,296	128	74,789	36,564
89	385,197	163,29	129	227,926	111,431
90	0	0	130	35,614	17,411
91	79,608	33,747	131	249,295	121,877
92	87,312	37,013	132	316,722	154,842
93	0	0	133	333,817	163,199
94	74,001	31,37	134	249,295	121,877
95	232,05	98,369	135	0	0
96	141,819	60,119	99	0	0
97	0	0	100	51,322	21,756
98	76,449	32,408	101	59,874	25,381
99	0	0	102	9,065	3,843
100	51,322	21,756	103	2,092	0,887
101	59,874	25,381	104	16,735	7,094
102	9,065	3,843	105	1506,522	638,634
103	2,092	0,887	106	313,023	132,694
104	16,735	7,094	107	79,831	33,842
105	1506,522	638,634	108	51,322	21,756
106	313,023	132,694	109	0	0
107	79,831	33,842	110	202,435	85,815
108	51,322	21,756	111	60,823	25,784
109	0	0	112	45,618	19,338
110	202,435	85,815	113	0	0
111	60,823	25,784	114	157,07	66,584
112	45,618	19,338	115	0	0
113	0	0	116	250,148	106,041
114	157,07	66,584	117	0	0
115	0	0	118	69,809	29,593
116	250,148	106,041	119	32,072	13,596
117	0	0	120	61,084	25,894
118	69,809	29,593	121	0	0
119	32,072	13,596	122	94,622	46,26

Dados dos ramos

Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
123	49,858	24,375
124	123,164	60,214
125	78,35	38,304
126	145,475	71,121
127	21,369	10,447
128	74,789	36,564
129	227,926	111,431
130	35,614	17,411
131	249,295	121,877
132	316,722	154,842
133	333,817	163,199
134	249,295	121,877
135	0	0

Sistema com 415 barras

Dados dos ramos					Dados dos ramos				
Barra de Entrada	Barra de Saída	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)	Barra de Entrada	Barra de Saída	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)
362	1	0,02415	0,02849	4754,354	216	218	0,06579	0,04536	1911,8224
363	362	0,01887	0,01922	4682,0203	218	219	0,00292	0,00202	1908,7946
211	1	0,05629	0,03881	4556,1106	351	379	0,02339	0,01613	1905,8112
209	211	0,05592	0,03856	4476,9132	379	380	0,1034	0,0873	1904,6894
1	190	0,14154	0,14412	3992,8039	380	229	0,04119	0,03477	1899,7766
208	209	0,03838	0,02646	3929,4286	368	345	0,11513	0,07938	1881,8095
159	190	0,2359	0,2402	3887,4469	297	296	0,05044	0,03478	1875,2534
365	363	0,04836	0,04924	3472,9389	219	220	0,08041	0,05544	1873,3355
123	1	0,01352	0,01595	3451,868	1	350	0,22661	0,15624	1781,3566
269	365	0,07077	0,07206	3420,1488	229	228	0,06309	0,05327	1780,2332
120	123	0,29488	0,30025	3403,2524	345	346	0,05848	0,04032	1779,2416
120	94	0,25383	0,25846	3403,1663	350	203	0,02339	0,01613	1772,6274
268	269	0,05496	0,05597	3272,4848	383	251	0,01097	0,00756	1744,2386
1	274	0,1155	0,07963	2771,5817	94	119	0,05603	0,06609	1735,9855
275	276	0,11586	0,07988	2706,8775	129	346	0,2617	0,18043	1727,6601
274	275	0,0837	0,05771	2621,2547	237	372	0,05375	0,04537	1704,1873
276	264	0,11513	0,07938	2557,1963	372	239	0,02658	0,02244	1702,0635
1	92	0,38889	0,26813	2441,3157	239	243	0,08354	0,07053	1668,7965
92	2	0,34101	0,23512	2390,4466	235	236	0,04203	0,02898	1654,4305
254	257	0,07887	0,06658	2340,2788	159	182	0,0541	0,06381	1575,1252
283	282	0,06631	0,05598	2291,5221	208	277	0,06725	0,04637	1541,7657
253	254	0,04586	0,03872	2282,1636	160	129	0,22784	0,19235	1439,2579
1	215	0,34759	0,23965	2208,3339	70	382	0,03107	0,02142	1413,5254
1	364	0,28509	0,19656	2206,4398	281	282	0,05373	0,03704	1379,7117
364	285	0,05848	0,04032	2165,7264	203	206	0,1034	0,0873	1376,345
257	283	0,05375	0,04537	2148,4795	59	70	0,05373	0,03704	1349,2761
300	285	0,08114	0,05594	2143,5972	159	161	0,08407	0,05796	1338,353
360	253	0,04971	0,03427	2139,4698	228	371	0,04674	0,03946	1322,4327
251	360	0,09869	0,06804	2133,771	371	374	0,03943	0,03329	1321,2834
220	223	0,07098	0,05992	2122,6915	277	279	0,04825	0,03326	1304,2858
223	237	0,08179	0,06905	2072,9668	374	226	0,00234	0,00197	1300,1765
215	216	0,106	0,07308	2048,1908	267	268	0,15643	0,10786	1289,43
208	236	0,07676	0,05292	2034,5146	206	207	0,05988	0,05055	1245,9215
264	265	0,07237	0,0499	2013,1203	73	77	0,07676	0,05292	1222,877
265	367	0,00877	0,00605	1974,685	363	381	0,26316	0,18144	1216,8846
367	340	0,0011	0,00076	1974,175	381	268	0,30958	0,21344	1212,1743
340	341	0,02741	0,0189	1964,2864	119	122	0,05117	0,03528	1199,211
268	297	0,05044	0,03478	1933,0058	182	186	0,0483	0,05698	1167,337
1	351	0,22661	0,15624	1915,9019	279	280	0,03436	0,02369	1163,4147
341	368	0,1791	0,12348	1915,3259	349	207	0,03213	0,02713	1113,1672

Dados dos ramos					Dados dos ramos				
Barra de Entrada	Barra de Saída	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)	Barra de Entrada	Barra de Saída	Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)
299	296	0,03801	0,02621	1083,358	84	33	0,04203	0,02898	763,4725
186	166	0,03774	0,03843	1076,5229	117	97	0,04021	0,02772	759,2074
226	225	0,02741	0,0189	1075,6079	232	231	0,09686	0,06678	759,0228
129	154	0,03505	0,02959	1058,2433	96	117	0,07858	0,05418	758,5397
166	170	0,03774	0,03843	1035,4779	19	8	0,02193	0,01512	753,0784
72	73	0,09869	0,06804	1031,9982	294	292	0,09174	0,06325	747,0852
232	349	0,07595	0,06412	1023,1385	67	68	0,08626	0,05947	735,4178
129	151	0,0329	0,02268	1013,2995	20	51	0,08772	0,06048	735,4093
282	234	0,0555	0,04685	1010,0912	2	17	0,08772	0,06048	730,4542
3	20	0,61039	0,42084	996,768	17	18	0,11696	0,08064	729,7843
129	141	0,03213	0,02713	976,5228	62	64	0,06031	0,04158	727,2194
300	301	0,0932	0,06426	969,2738	184	187	0,03505	0,02959	724,951
296	260	0,04788	0,03301	963,7172	187	167	0,08471	0,07151	724,6159
170	174	0,02921	0,02466	949,8884	322	321	0,09503	0,06552	717,6491
280	281	0,06214	0,04284	938,5996	260	324	0,10782	0,07434	710,9708
266	267	0,09942	0,06854	935,2307	179	160	0,06945	0,04788	689,7555
225	224	0,06945	0,04788	935,2284	12	15	0,10516	0,08878	687,5096
122	118	0,20103	0,1386	927,0271	1	373	0,02778	0,01915	681,6214
118	84	0,04021	0,02772	924,7197	373	352	0,10417	0,07182	681,3765
90	370	0,1579	0,10886	916,6831	78	79	0,02193	0,01512	681,3193
98	94	0,04021	0,02772	910,0198	22	33	0,04386	0,03024	678,9457
83	90	0,12098	0,08341	909,6494	243	356	0,00914	0,0063	676,2257
382	383	0,15022	0,10357	908,4705	356	357	0,05117	0,03528	676,0818
2	14	0,01645	0,01134	863,5639	8	9	0,09503	0,06552	661,2556
321	299	0,07018	0,04838	858,2229	9	3	0,01462	0,01008	660,6497
224	222	0,06945	0,04788	844,5811	58	20	0,59211	0,40824	652,9085
116	98	0,06214	0,04284	838,4293	58	62	0,12939	0,08921	648,0255
383	370	0,01828	0,0126	835,158	77	59	0,38743	0,26712	647,2539
174	180	0,06369	0,06485	817,6205	59	69	0,0212	0,01462	644,8598
64	67	0,04496	0,031	812,8662	18	5	0,12244	0,08442	643,9205
159	184	0,22661	0,15624	809,1656	161	172	0,08772	0,06048	643,9118
281	235	0,04934	0,03402	794,3936	5	6	0,04934	0,03402	643,2008
14	16	0,09869	0,06804	788,1264	307	300	0,07822	0,05393	637,5716
16	19	0,15717	0,10836	787,2787	235	234	0,08333	0,05746	635,5182
268	292	0,09869	0,06804	783,8095	161	185	0,13158	0,09072	634,8633
2	13	0,03213	0,02713	774,2626	77	78	0,05117	0,03528	632,4035
13	4	0,04528	0,03822	773,9179	101	96	0,106	0,07308	629,4353
4	12	0,06718	0,05672	773,4691	357	244	0,01279	0,00882	625,6659
79	83	0,24123	0,16632	772,4987	352	414	0,07054	0,04864	621,5771
97	116	0,04386	0,03024	767,0815	324	323	0,08772	0,06048	621,4719

Barra de Entrada	Barra de Saída	Dados dos ramos			Barra de Entrada	Barra de Saída	Dados dos ramos		
		Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)			Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)
324	323	0,08772	0,06048	621,4719	339	265	0,06798	0,04687	457,7401
222	221	0,08772	0,06048	619,4528	155	151	0,06945	0,04788	457,5485
172	188	0,09138	0,063	613,4904	403	404	0,06835	0,04712	452,5053
384	243	0,22734	0,15674	612,4121	200	119	0,07676	0,05292	447,1592
15	11	0,13291	0,1122	608,1306	296	295	0,0742	0,05116	446,091
295	294	0,02266	0,01562	607,0962	221	220	0,08407	0,05796	428,9572
160	180	0,04386	0,03024	605,2079	259	261	0,05112	0,04316	428,6102
85	244	0,13999	0,09652	604,8743	257	259	0,06871	0,04738	428,3648
20	44	0,01462	0,01008	601,4184	188	168	0,09138	0,063	427,4679
376	230	0,02775	0,02343	601,1299	168	176	0,11331	0,07812	427,1677
233	376	0,01168	0,00986	600,9862	176	179	0,06579	0,04536	426,8172
301	302	0,05556	0,0383	593,5272	309	307	0,09869	0,06804	423,3537
69	65	0,03107	0,02142	587,0657	47	21	0,08407	0,05796	421,0187
230	231	0,04557	0,03847	564,942	151	152	0,05483	0,0378	419,6313
167	175	0,09055	0,07645	552,8167	156	137	0,08407	0,05796	414,126
21	57	0,21565	0,14868	548,8963	130	131	0,05483	0,0378	412,0212
141	130	0,04674	0,03946	547,7257	134	139	0,11976	0,10111	410,4811
68	85	0,02924	0,02016	547,1336	164	165	0,0329	0,02268	395,9513
414	401	0,07273	0,05015	545,5699	99	102	0,05117	0,03528	394,0173
100	101	0,05848	0,04032	544,0238	288	300	0,18677	0,12877	391,663
185	164	0,09138	0,063	538,4984	158	200	0,02193	0,01512	390,2119
401	402	0,07091	0,04889	528,6677	124	158	0,10234	0,07056	389,9309
102	100	0,05483	0,0378	525,9774	127	124	0,02924	0,02016	389,7127
265	266	0,10782	0,07434	521,2391	128	127	0,27047	0,18648	389,103
6	7	0,04021	0,02772	517,0975	125	128	0,02193	0,01512	388,9796
336	323	0,05483	0,0378	508,5176	57	125	0,09138	0,063	388,7205
382	66	0,0329	0,02268	506,4944	21	50	0,03655	0,0252	380,6001
263	264	0,06871	0,04738	506,0204	44	25	0,12793	0,0882	379,3753
21	72	0,19372	0,13356	498,9066	165	173	0,13889	0,09576	378,0048
154	134	0,07887	0,06658	496,1002	234	233	0,02775	0,02343	376,5805
322	329	0,03143	0,02167	486,5944	251	252	0,18823	0,12978	375,3192
65	71	0,07127	0,04914	481,4532	51	52	0,06945	0,04788	375,27
154	156	0,03213	0,02713	476,3928	153	141	0,07303	0,06165	366,9824
262	263	0,06309	0,05327	474,5334	10	11	0,04674	0,03946	357,3043
261	262	0,03797	0,03206	474,3323	66	252	0,19298	0,13306	354,5706
175	181	0,08471	0,07151	472,454	94	113	0,0329	0,02268	354,3835
402	403	0,05958	0,04108	466,1671	183	182	0,0329	0,02268	351,2303
53	22	0,04021	0,02772	463,3099	94	111	0,06579	0,04536	345,4773
7	3	0,0519	0,03578	460,67	131	157	0,03655	0,0252	343,0273

Barra de Entrada	Barra de Saída	Dados dos ramos			Barra de Entrada	Barra de Saída	Dados dos ramos		
		Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)			Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)
84	99	0,13158	0,09072	339,5812	28	36	0,09138	0,063	204,3231
33	55	0,04386	0,03024	336,3895	40	47	0,09138	0,063	204,1824
26	53	0,10051	0,0693	327,7204	144	148	0,09503	0,06552	202,7244
384	68	0,03107	0,02142	327,014	407	408	0,04898	0,03377	201,8713
20	33	0,06579	0,04536	325,9303	404	405	0,04021	0,02772	199,251
137	144	0,09503	0,06552	319,5744	135	145	0,14255	0,09828	197,6028
113	114	0,07676	0,05292	312,2847	301	305	0,04386	0,03024	195,7732
152	135	0,07676	0,05292	306,3606	243	246	0,03651	0,03083	193,6939
132	153	0,08772	0,06048	300,2435	30	26	0,05483	0,0378	192,3387
25	35	0,12793	0,0882	293,7132	324	266	0,1038	0,07157	190,6696
71	63	0,02266	0,01562	291,4458	304	378	0,05885	0,04057	190,5853
338	339	0,04203	0,02898	290,2825	329	330	0,02668	0,0184	188,7674
55	23	0,07676	0,05292	289,8495	88	89	0,08041	0,05544	187,3489
66	384	0,03472	0,02394	286,6194	136	132	0,14986	0,10332	183,4558
289	288	0,04678	0,03226	277,2276	142	136	0,08041	0,05544	183,3351
139	143	0,06214	0,04284	274,8738	114	115	0,04752	0,03276	176,6723
329	333	0,05848	0,04032	272,2817	145	146	0,0329	0,02268	175,2002
173	179	0,11331	0,07812	263,2837	76	72	0,05483	0,0378	173,8892
268	327	0,03838	0,02646	262,1439	81	76	0,053	0,03654	173,7787
111	106	0,06579	0,04536	259,9496	327	328	0,05483	0,0378	172,2117
138	155	0,106	0,07308	241,9456	203	204	0,05112	0,04316	170,8819
52	56	0,11696	0,08064	239,6314	159	199	0,27047	0,18648	169,3547
21	49	0,13524	0,09324	232,1701	290	289	0,06287	0,04334	169,2526
230	228	0,02629	0,02219	231,036	1	375	0,01097	0,00756	168,5312
275	209	0,13962	0,09626	228,8551	375	202	0,14986	0,10332	168,4375
72	74	0,02193	0,01512	228,7676	310	305	0,0826	0,05695	168,1622
51	54	0,05483	0,0378	224,0266	243	249	0,04878	0,04118	167,4107
57	149	0,06945	0,04788	223,9535	160	181	0,09138	0,063	166,17
54	24	0,0731	0,0504	223,9006	89	67	0,10782	0,07434	164,3206
32	44	0,25585	0,1764	221,7352	150	148	0,02193	0,01512	163,2251
48	50	0,0731	0,0504	217,7981	46	50	0,03655	0,0252	162,5936
162	183	0,08407	0,05796	215,6637	84	109	0,04752	0,03276	162,16
181	178	0,05848	0,04032	215,608	246	247	0,05263	0,03629	157,9004
314	309	0,06981	0,04813	212,6386	63	61	0,10965	0,0756	156,4932
10	88	0,10954	0,09248	210,4632	330	331	0,04167	0,02873	154,3173
333	334	0,04167	0,02873	210,0863	292	290	0,01681	0,01159	149,7757
149	138	0,12793	0,0882	209,6881	73	80	0,0731	0,0504	146,8071
157	133	0,11331	0,07812	207,4642	115	112	0,04021	0,02772	146,6868
404	407	0,08333	0,05746	207,3767	199	197	0,06945	0,04788	145,9091
84	104	0,0731	0,0504	205,134	197	191	0,01097	0,00756	145,8007
23	28	0,06945	0,04788	204,448	309	313	0,07858	0,05418	144,0355

Barra de Entrada	Barra de Saída	Dados dos ramos			Barra de Entrada	Barra de Saída	Dados dos ramos		
		Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)			Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kVA)
405	406	0,07164	0,04939	143,6788	310	314	0,07237	0,0499	86,3227
408	410	0,05519	0,03805	142,6297	84	107	0,06579	0,04536	83,9424
312	307	0,07237	0,0499	140,6344	34	47	0,17361	0,1197	81,2827
209	210	0,11696	0,08064	140,0171	49	39	0,08772	0,06048	79,1898
237	238	0,06222	0,05253	140,0054	39	30	0,11696	0,08064	79,0874
334	335	0,05592	0,03856	140,0029	143	150	0,09869	0,06804	78,7778
232	293	0,07493	0,05166	138,4475	300	286	0,10965	0,0756	78,7294
24	29	0,09503	0,06552	138,4375	35	38	0,08041	0,05544	78,0459
109	108	0,04966	0,04192	137,9845	38	41	0,10417	0,07182	77,948
37	32	0,106	0,07308	136,3053	412	413	0,08735	0,06023	75,6829
180	177	0,05483	0,0378	135,5302	414	385	0,072	0,04964	75,5893
406	390	0,04532	0,03125	127,9191	293	236	0,06945	0,04788	72,6928
106	95	0,08407	0,05796	124,3757	133	140	0,106	0,07308	71,9157
43	48	0,08041	0,05544	122,0868	146	149	0,05483	0,0378	69,7817
410	411	0,06433	0,04435	121,5027	313	317	0,06835	0,04712	69,7666
104	105	0,04966	0,04192	119,6663	36	45	0,13158	0,09072	69,4326
316	312	0,10526	0,07258	119,5926	216	217	0,09931	0,08384	68,8828
304	305	0,20834	0,14364	119,2656	49	45	0,04386	0,03024	68,1572
11	86	0,03505	0,02959	114,5906	362	272	0,01645	0,01134	66,6417
260	287	0,03582	0,0247	112,2642	334	336	0,07127	0,04914	63,7035
324	326	0,00548	0,00378	112,2595	302	303	0,04532	0,03125	63,2964
323	322	0,06762	0,04662	112,2468	402	387	0,05665	0,03906	62,1718
411	412	0,06762	0,04662	110,2217	1	273	0,01425	0,00983	62,1698
345	369	0,053	0,03654	107,6228	408	409	0,06689	0,04612	59,1281
56	27	0,09503	0,06552	104,0433	41	43	0,11696	0,08064	57,7214
369	370	0,20834	0,14364	102,6257	200	201	0,00731	0,00504	57,6978
31	40	0,106	0,07308	97,2965	110	84	0,04386	0,03024	56,1465
74	75	0,106	0,07308	96,3709	202	1	0,48246	0,33264	56,1308
308	316	0,22186	0,15296	96,3083	103	110	0,07676	0,05292	56,0533
305	308	0,05044	0,03478	96,2126	306	310	0,12646	0,08719	55,971
105	108	0,06579	0,04536	95,9192	304	306	0,06945	0,04788	55,8782
337	338	0,02924	0,02016	95,325	405	389	0,05885	0,04057	55,4639
378	377	0,11148	0,07686	95,2857	148	57	0,1462	0,1008	53,9646
314	318	0,07237	0,0499	90,9682	29	34	0,11513	0,07938	53,0374
61	60	0,04386	0,03024	90,7527	42	37	0,06762	0,04662	50,9778
60	58	0,01097	0,00756	90,651	221	344	0,02924	0,02016	50,0908
257	258	0,106	0,07308	89,9106	357	245	0,00548	0,00378	50,0901
247	248	0,07273	0,05015	89,9073	317	319	0,12354	0,08518	48,3066
204	205	0,06214	0,04284	89,906	310	320	0,01279	0,00882	47,8543
119	121	0,01022	0,00863	87,6652	296	298	0,03765	0,02596	45,6189

Barra de Entrada	Barra de Saída	Dados dos ramos			Barra de Entrada	Barra de Saída	Dados dos ramos		
		Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kVA)			Resistência [%]	Reatância [%]	Potência Ativa (kW)
400	404	0,04752	0,03276	45,618	412	399	0,05665	0,03906	18,7885
310	315	0,0614	0,04234	45,1048	359	251	0,14072	0,09702	17,6305
413	396	0,06945	0,04788	44,2848	401	386	0,05921	0,04082	16,5531
315	311	0,08333	0,05746	43,4758	341	342	0,11331	0,07812	15,6528
311	304	0,10526	0,07258	43,3838	406	391	0,0731	0,0504	15,6527
75	81	0,08407	0,05796	41,797	412	398	0,07164	0,04939	15,6527
365	366	0,02559	0,01764	41,2368	243	355	0,00548	0,00378	15,4161
409	394	0,06908	0,04763	38,0144	355	354	0,12793	0,0882	15,324
290	291	0,00548	0,00378	38,0133	314	317	0,08151	0,0562	15,2191
318	315	0,06945	0,04788	35,0483	331	332	0,02741	0,0189	14,3179
366	271	0,01645	0,01134	34,4386	147	142	0,106	0,07308	13,68
140	147	0,15351	0,10584	33,0539	403	388	0,08333	0,05746	13,4166
352	353	0,21382	0,14742	32,297	303	304	0,19518	0,13457	12,2955
239	240	0,00584	0,00493	32,2026	27	31	0,10234	0,07056	12,2093
249	358	0,04313	0,02974	31,896	163	184	0,07595	0,06412	11,2699
358	359	0,00548	0,00378	31,7966	277	278	0,0329	0,02268	11,1804
413	397	0,07054	0,04864	31,3058	411	395	0,05958	0,04108	11,1804
254	255	0,02741	0,0189	29,0692	95	112	0,0329	0,02268	11,1583
46	42	0,02559	0,01764	27,3659	370	348	0,11879	0,0819	9,849
353	213	0,20103	0,1386	26,8346	354	241	0,0731	0,0504	9,8489
352	212	0,11367	0,07837	26,8338	319	318	0,06652	0,04586	9,3946
324	325	0,04825	0,03326	26,8332	57	147	0,15717	0,10836	7,3343
3	10	0,10782	0,07434	26,5024	366	270	0,10051	0,0693	6,7083
359	250	0,0201	0,01386	25,4953	369	347	0,13158	0,09072	5,3852
368	343	0,00914	0,0063	25,4952	353	214	0,05007	0,03452	5,3852
364	284	0,10417	0,07182	24,1668	407	392	0,07858	0,05418	5,3852
190	189	0,0731	0,0504	23,5313	354	242	0,01828	0,0126	5,3852
68	93	0,08407	0,05796	23,26	189	198	0,10965	0,0756	0,2
189	193	0,02339	0,01613	23,2596	82	80	0,0731	0,0504	0,1
92	87	0,01285	0,01085	23,2595	86	91	0,09503	0,06552	0,1
138	194	0,01279	0,00882	23,2595	126	124	0,02924	0,02016	0,1
199	192	0,01462	0,01008	23,2595	169	162	0,07676	0,05292	0,1
135	195	0,00914	0,0063	23,2595	171	163	0,06426	0,05425	0,1
107	103	0,05483	0,0378	22,669	198	196	0,03655	0,0252	0,1
336	337	0,06469	0,0446	22,419					
409	393	0,07383	0,0509	21,0242					
410	415	0,06579	0,04536	21,0241					
254	361	0,05885	0,04057	20,2146					
361	256	0,04021	0,02772	20,1248					
374	227	0,00366	0,00252	20,1246					

Sistema com 415 barras

Dados dos ramos			Dados dos ramos		
Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]	Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
1	0,1	0	41	122	59
2	0,1	0	42	70	34
3	122	59	43	58	28
4	0,1	0	44	0,1	0
5	0,1	0	45	122	59
6	114	55	46	122	59
7	51	25	47	122	59
8	83	40	48	86	42
9	0,1	0	49	77	37
10	122	59	50	0,1	0
11	122	59	51	122	59
12	77	37	52	122	59
13	0,1	0	53	122	59
14	68	33	54	0,1	0
15	71	34	55	42	20
16	0,1	0	56	122	59
17	0,1	0	57	13	6
18	77	37	58	77	37
19	30	14	59	50	24
20	13	6	60	0,1	0
21	1	0	61	60	29
22	194	94	62	71	34
23	77	37	63	122	59
24	77	37	64	77	37
25	77	37	65	95	46
26	122	59	66	121	58
27	104	51	67	77	37
28	0,1	0	68	103	50
29	77	37	69	52	25
30	243	118	70	57	27
31	77	37	71	171	83
32	77	37	72	121	58
33	0,1	0	73	39	19
34	121	58	74	119	58
35	194	94	75	49	24
36	122	59	76	0,1	0
37	77	37	77	50	24
38	0,1	0	78	44	21
39	0,1	0	79	82	40
40	96	47	80	132	64

Dados dos ramos			Dados dos ramos		
Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]	Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
81	194	94	121	79	38
82	0,1	0	122	247	119
83	122	59	123	0,1	0
84	3	1	124	0,1	0
85	52	25	125	0,1	0
86	103	50	126	0,1	0
87	21	10	127	0,1	0
88	21	10	128	0,1	0
89	21	10	129	77	37
90	5	3	130	122	59
91	0,1	0	131	62	30
92	0,1	0	132	105	51
93	21	10	133	122	59
94	18	9	134	77	37
95	122	59	135	77	37
96	116	56	136	0,1	0
97	7	3	137	85	41
98	64	31	138	8	4
99	49	24	139	122	59
100	16	8	140	35	17
101	77	37	141	55	27
102	119	58	142	153	74
103	71	34	143	316	153
104	77	37	144	105	51
105	194	94	145	20	10
106	122	59	146	95	46
107	55	27	147	38	18
108	38	18	148	83	40
109	22	10	149	50	24
110	0,1	0	150	77	37
111	77	37	151	122	59
112	122	59	152	102	49
113	38	18	153	60	29
114	122	59	154	77	37
115	27	13	155	194	94
116	64	31	156	56	27
117	0,1	0	157	122	59
118	0,1	0	158	0,1	0
119	0,1	0	159	3	1
120	0,1	0	160	1	0

Dados dos ramos			Dados dos ramos		
Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]	Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
161	52	25	200	0,1	0
162	194	94	201	52	25
163	10	5	202	202	98
164	128	62	203	202	98
165	16	8	204	73	35
166	37	18	205	81	39
167	154	75	206	115	56
168	0,1	0	207	118	57
169	0,1	0	208	318	154
170	78	38	209	161	78
171	0,1	0	210	126	61
172	27	13	211	59	29
173	103	50	212	24	12
174	122	59	213	24	12
175	72	35	214	5	2
176	0,1	0	215	126	61
177	122	59	216	56	27
178	194	94	217	62	30
179	0,1	0	218	0,1	0
180	77	37	219	32	15
181	82	40	220	158	77
182	53	26	221	126	61
183	122	59	222	202	98
184	64	31	223	41	20
185	86	42	224	81	39
186	82	40	225	126	61
187	0,1	0	226	202	98
188	167	81	227	18	9
189	0,1	0	228	202	98
190	0,1	0	229	106	51
191	131	64	230	175	85
192	21	10	231	174	84
193	21	10	232	113	55
194	21	10	233	202	98
195	21	10	234	0,1	0
196	0,1	0	235	202	98
197	0,1	0	236	403	195
198	0,1	0	237	202	98
199	0,1	0	238	126	61

Dados dos ramos			Dados dos ramos		
Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]	Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
239	0,1	0	280	202	98
240	29	14	281	318	154
241	9	4	282	82	40
242	5	2	283	126	61
243	0,1	0	284	22	10
244	18	9	285	13	6
245	45	22	286	71	34
246	32	16	287	101	49
247	61	30	288	113	54
248	81	39	289	126	61
249	126	61	290	0,1	0
250	23	11	291	34	17
251	14	7	292	83	40
252	18	9	293	59	29
253	126	61	294	126	61
254	5	3	295	145	70
255	26	13	296	202	98
256	18	9	297	50	24
257	126	61	298	41	20
258	81	39	299	202	98
259	0,1	0	300	77	37
260	126	61	301	161	78
261	41	20	302	477	231
262	0,1	0	303	68	33
263	28	14	304	14	7
264	30	14	305	4	2
265	81	39	306	0,1	0
266	202	98	307	66	32
267	318	154	308	0,1	0
268	176	85	309	60	29
269	126	61	310	95	46
270	6	3	311	0,1	0
271	31	15	312	19	9
272	60	29	313	67	32
273	56	27	314	18	9
274	126	61	315	33	16
275	118	57	316	21	10
276	126	61	317	33	16
277	202	98	318	42	20
278	10	5	319	52	25
279	126	61	320	43	21

Dados dos ramos			Dados dos ramos		
Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]	Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
321	126	61	361	0,1	0
322	107	52	362	0,1	0
323	202	98	363	0,1	0
324	126	61	364	0,1	0
325	24	12	365	0,1	0
326	101	49	366	0,1	0
327	81	39	367	0,1	0
328	155	75	368	0,1	0
329	23	11	369	0,1	0
330	31	15	370	0,1	0
331	126	61	371	0,1	0
332	13	6	372	0,1	0
333	56	27	373	0,1	0
334	120	58	374	0,1	0
335	126	61	375	0,1	0
336	403	195	376	0,1	0
337	81	39	377	86	41
338	177	86	378	86	41
339	151	73	379	0,1	0
340	9	4	380	0,1	0
341	29	14	381	0,1	0
342	14	7	382	0,1	0
343	23	11	383	0,1	0
344	45	22	384	0,1	0
345	0,1	0	385	68	33
346	36	17	386	15	7
347	5	2	387	56	27
348	9	4	388	12	6
349	80	39	389	50	24
350	0,1	0	390	115	56
351	0,1	0	391	14	7
352	0,1	0	392	5	2
353	0,1	0	393	19	9
354	0,1	0	394	34	17
355	0,1	0	395	10	5
356	0,1	0	396	40	19
357	0,1	0	397	28	14
358	0,1	0	398	14	7
359	0,1	0	399	17	8
360	0,1	0	400	41	20

Dados dos ramos

Nome da Barra	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
401	0,1	0
402	0,1	0
403	0,1	0
404	0,1	0
405	0,1	0
406	0,1	0
407	0,1	0
408	0,1	0
409	0,1	0
410	0,1	0
411	0,1	0
412	0,1	0
413	0,1	0
414	0,1	0
415	19	9

