

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ALGORITMO DINÂMICO PRIM APLICADO AO PLANEJAMENTO DA
EXPANSÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS DE MÉDIA TENSÃO**

FELIPE BACHINI BORNIOTI

FOZ DO IGUAÇU

2018

FELIPE BACHINI BORNIOTI

**ALGORITMO DINÂMICO PRIM APLICADO AO PLANEJAMENTO DA
EXPANSÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS DE MÉDIA TENSÃO**

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

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

BORNIOTI, FELIPE BACHINI
ALGORITMO DINÂMICO PRIM APLICADO AO PLANEJAMENTO DA
EXPANSÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS DE MÉDIA TENSÃO /
FELIPE BACHINI BORNIOTI; orientador(a), RICARDO LUIZ
BARROS DE FREITAS; coorientador(a), CARLOS ROBERTO
MENDONÇA DA ROCHA, 2018.
95 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste
do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas,
Graduação em Engenharia Elétrica Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Computação, 2018.

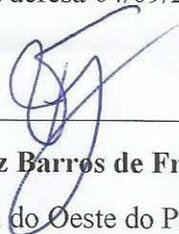
1. PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO. 2. SISTEMAS DE ENERGIA
ELÉTRICA. 3. ALGORITMO PRIM. I. LUIZ BARROS DE FREITAS,
RICARDO . II. ROBERTO MENDONÇA DA ROCHA, CARLOS. III.
Título.

**ALGORITMO DINÂMICO PRIM APLICADO AO PLANEJAMENTO DA
EXPANSÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS DE MÉDIA TENSÃO**

Felipe Bachini Bornioti

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

Data da defesa 04/09/2018.



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. **Hugo Andrés Ruiz Flórez**
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Resumo

O aumento no consumo e utilização de equipamentos eletroeletrônicos gera uma grande necessidade de ampliar as redes de distribuição de energia elétrica para suprir esta demanda de energia. Para isto, faz-se necessário realizar um planejamento para encontrar as estratégias mais adequadas para a expansão dos sistemas de energia elétrica. Uma das estratégias utilizadas no processo de planejamento é a determinação da topologia radial do sistema de energia elétrica com base em um parâmetro, seja ele as perdas elétricas, o custo de construção ou uma combinação de ambos. Este trabalho apresenta um algoritmo baseado na teoria de PRIM para a aplicação no Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com o propósito de encontrar a topologia radial do sistema com base no parâmetro do custo de construção das linhas. Para melhorar o desempenho computacional do algoritmo, devido a característica combinatória do problema, é utilizado o conceito de alocação dinâmica de dados e estruturas de dados com o auxílio de ponteiros para endereçamento de dados na memória. Esta estratégia promove rapidez no acesso de dados na memória sem que seja necessário realizar excessivos testes condicionais, e a utilização do espaço na memória apenas no momento em que este é demandado. Para validar o resultado encontrado é resolvido o fluxo de carga para determinação do estado de operação deste novo sistema. Para contornar a característica míope do algoritmo é empregado uma estratégia de perturbação no sistema de forma a encontrar diferentes soluções para o problema. Para a avaliação do desempenho do sistema desenvolvido foram realizados testes nos sistemas disponíveis na literatura especializada: 23, 33 e 49 Barras. Foram obtidos resultados melhores em quase todos os sistemas testados, em relação ao custo total. Os resultados obtidos comprovaram que o sistema foi eficiente e robusto no processo de busca pela solução.

Palavras-chave: Planejamento da Expansão, PRIM, topologia radial, fluxo de carga

Abstract

The increase in the consumption and use of electrical and electronic equipment generates a great need to expand distribution networks of electricity to meet this demand for energy. For this, it is necessary to carry out a plan to find the most appropriate strategies for the expansion of the electric power systems. One of the strategies used in the planning process is to determine the radial topology of electric power system based on a parameter, it can be electric losses, the cost of building a new line or a combination of both. This work presents an algorithm based on the PRIM's theory for the application in the Expansion Planning of Electric Distribution Systems with the purpose of finding the radial system topology based on the parameter of the construction cost of the lines. To improve the computational performance of the algorithm, due to Combinatorial feature, it is used the concept of dynamic allocation of data and data structures with pointers to allocate data in memory. This strategy promotes faster access of data in memory without having to perform excessive conditional tests, and the use of space in memory only at the moment when this is defendant. To validate the result found, the load flow is solved to determine the operating state of this new system. To avoid the myopic characteristic of the algorithm is employed a strategy of perturbation in the system in order to find different solutions to the problem. For the evaluation of the performance of the developed system, tests were performed on the systems available in the specialized literature: 23, 33 and 49 Barras. Better results were obtained in almost all the systems tested, in relation to the total cost. The obtained results proved that the system was efficient and robust in the solution search process.

Keywords: Expansion planning, PRIM, Dynamic allocation, Radial topology

Dedico este trabalho à minha família.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à Deus pelo dom da vida e por estar sempre ao meu lado escutando minhas preces e orações.

Agradeço aos meus pais, Jair Bornioti e Rosangela Saete Bachini Bornioti, pelo apoio e amor incondicional. Representam para mim meu porto seguro e fonte de inspiração. Agradeço meu irmão, Thiago, por ser um exemplo na busca constante de que é sempre possível alcançar nossos sonhos.

Agradeço à Rosa Maria de Oliveira, pelo companheirismo e por todo apoio, não somente neste mestrado, mas sim em toda minha vida. Obrigado por me fazer ser uma pessoa melhor e sempre me incentivar a buscar alcançar meus objetivos, sem nunca me deixar fraquejar no processo.

Agradeço ao professor Dr. Ricardo Luiz Barras de Freitas, pela orientação e horas extratrabalho a mim dedicados. Agradeço ao professor Dr. Carlos Roberto Mendonça da Rocha, pela paciência e dedicação ao longo do período do programa.

Agradeço aos colegas de trabalho e colegas da pós-graduação, por contribuírem de alguma forma para esta formação.

A todos que contribuíram de alguma maneira para que tudo isso fosse possível, o meu muito obrigado.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Siglas e Símbolos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Definição do Problema.....	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura do Trabalho	3
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.....	5
2.1.1 O Estado da Arte.....	6
2.2 Considerações Finais do Capítulo	9
3 Formulação do problema do PESDEE	11
3.1 Considerações Iniciais.....	11
3.2 Modelo Matemático	12
3.3 Metodologia para a Solução do Modelo Matemático	14
3.3.1 Fluxo de Carga em Sistemas Radiais.....	14
3.4 Considerações Finais do Capítulo	17
4 Algoritmo Dinâmico PRIM	19
4.1 Considerações Iniciais.....	19
4.2 Teoria de PRIM	19
4.3 Modelagem Computacional	21
4.4 Algoritmo Dinâmico PRIM.....	24
4.4.1 Fase de Melhoria	26
4.5 Fluxograma.....	27

4.6	Considerações Finais do Capítulo.....	27
5	Testes e Resultados	29
5.1	Sistema de 23 Barras.....	29
5.1.1	Resultados para o Sistema Teste de 23 Barras	31
5.2	Sistema de 33 Barras.....	37
5.2.1	Resultados para o Sistema Teste de 33 Barras	37
5.3	Sistema de 49 Barras.....	44
5.3.1	Resultados para o Sistema Teste de 49 Barras	47
5.4	Considerações Finais do Capítulo.....	55
6	Conclusões.....	57
	Referências Bibliográficas	59
A	Artigo Apresentado.....	63

Lista de Figuras

Figura 3.1: Sistema de Distribuição Radial. Fonte: (Shirmohammadi <i>et al.</i> , 1988).....	15
Figura 3.2: Sistema de Distribuição Radial Segmentado em Camadas. Fonte: (Shirmohammadi <i>et al.</i> , 1988).....	15
Figura 3.3: Sistema de Distribuição Radial Segmentado em Camadas Renumerado. Fonte: (Shirmohammadi <i>et al.</i> , 1988).....	15
Figura 4.1: Execução do Algoritmo de Prim em um grafo. Fonte: (Cormen <i>et al.</i> , 2009).	20
Figura 4.2: Estrutura de Dados globais do SDEE.....	22
Figura 4.3: Estrutura de Dados das Barras do SDEE.....	22
Figura 4.4: Estrutura de Dados dos Ramos do SDEE.....	23
Figura 4.5: Lista Duplamente Encadeada das Barras e dos Ramos do SDEE.	23
Figura 4.6: Exemplo da modelagem computacional do SDEE malhado.	24
Figura 4.7: Fluxograma do Algoritmo Especializado PRIM.	28
Figura 5.1: Sistema de Distribuição de 23 Barras.	31
Figura 5.2: Primeira Topologia Radial do Sistema de 23 Barras.	35
Figura 5.3: Topologia Radial Final do Sistema de 23 Barras.....	37
Figura 5.4: Sistema de Distribuição de 33 Barras.	39
Figura 5.5: Primeira Topologia Radial do Sistema de 33 Barras.	43
Figura 5.6: Sistema de Distribuição de 49 Barras	47
Figura 5.7: Topologia Radial Inicial do Sistema de 49 Barras.....	53
Figura 5.8: Topologia Radial Final do Sistema de 49 Barras.....	54

Lista de Tabelas

Tabela 5.1: Dados do tipo do condutor utilizado para o sistema de 23 e 33 Barras	29
Tabela 5.2: Dados das Barras do Sistema de 23 Barras	30
Tabela 5.3: Dados dos Ramos do Sistema de 23 Barras	30
Tabela 5.4: Processo iterativo da 1º topologia para o Sistema de 23 Barras	32
Tabela 5.5: Tensão nas barras da 1º topologia radial do sistema de 23 Barras.	34
Tabela 5.6: Corrente e Perdas da 1º topologia radial do sistema de 23 Barras.	34
Tabela 5.7: Sistema de 23 Barras – Resumo dos resultados	36
Tabela 5.8: Dados das Barras do Sistema de 33 Barras.....	38
Tabela 5.9: Dados dos Ramos do Sistema de 33 Barras	38
Tabela 5.10: Processo iterativo da 1º topologia para o Sistema de 33 Barras	40
Tabela 5.11: Tensão nas barras da 1º topologia radial do sistema de 33 Barras.	41
Tabela 5.12: Corrente e Perdas da 1º topologia radial do sistema de 23 Barras.	42
Tabela 5.13: Sistema de 33 Barras – Resumo dos resultados	44
Tabela 5.14: Dados do condutor para o sistema de 49 Barras.....	45
Tabela 5.15: Dados das Barras do Sistema de 49 Barras	45
Tabela 5.16: Dados dos Ramos do Sistema de 49 Barras	46
Tabela 5.17: Processo iterativo da 1º topologia para o Sistema de 49 Barras	48
Tabela 5.18: Tensão nas barras da 1º topologia radial do sistema de 49 Barras.	51
Tabela 5.19: Corrente e Perdas da 1º topologia radial do sistema de 49 Barras.	52
Tabela 5.20: Sistema de 49 Barras – Resumo dos resultados	54
Tabela 5.21: Resumo dos Resultados para os Sistemas Testes	55

Lista de Siglas e Símbolos

AHC	Algoritmo Heurístico Construtivo
BFS	<i>Backward Forward Sweep</i>
B&B	<i>Branch-and-Bound</i>
FC	Fluxo de Carga
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
PESEE	Planejamento da Expansão dos Sistemas de Energia Elétrica
PESDEE	Planejamento da Expansão dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
PNLIM	Programação Não-Linear Inteiro Mista
VNS	Busca em Vizinhança Variável
Ω_l	Conjunto dos ramos
Ω_b	Conjunto de barras;
c	Custo total de investimento (US\$);
c_{ij}	Custo de construção do ramo ij (US\$/km);
x_{ij}	Circuito que pode ser adicionado ao ramo ij ;
l_{ij}	Comprimento do ramo ij ;
n_b	Número de barras;
P_i	Potência ativa calculada na barra i ;
Q_i	Potência reativa calculada na barra i ;
P_{Si}	Potência ativa fornecida pela subestação na barra i ;
Q_{Si}	Potência reativa fornecida pela subestação na barra i ;
P_{Di}	Demanda de potência ativa na barra i ;
Q_{Di}	Demanda de potência reativa na barra i ;
\underline{V}	Magnitude mínima da tensão;
\bar{V}	Magnitude máxima da tensão;

V_i	Magnitude da tensão na barra i ;
V_j	Magnitude da tensão na barra j ;
θ_{ij}	Diferença entre os ângulos das tensões das barras i e j ;
G_{ij}	Elemento ij da matriz de condutância nodal;
B_{ij}	Elemento ij da matriz de susceptância nodal;
P_{ij}	Potência ativa no ramo ij ;
Q_{ij}	Potência reativa no ramo ij ;
S_{ij}	Potência aparente no ramo ij ;
g_{ij}	Condutância do ramo ij ;
δ_{lt}	Fator de conversão kW para kWh;
c_e	Custo das perdas de energia;
ϕ_l	Fator de perdas;
I	Taxa de juros;
p	Horizonte de planejamento.

Capítulo 1

Introdução

Todos os dias novos consumidores se conectam ao Sistema de Energia Elétrica (SEE), devido ao desenvolvimento econômico e social. O constante aumento do número de empreendimentos sendo construídos (novas indústrias, comércios e residências) faz com que o consumo de energia elétrica aumente desenfreadamente. Desta forma, a demanda por energia elétrica exige que novas centrais geradoras sejam construídas para atender estes novos consumidores.

Além da construção de novas centrais geradoras de energia elétrica faz-se necessário a expansão do sistema de distribuição para que a energia chegue ao consumidor final. Dessa forma, novas linhas de transmissão e distribuição, assim como subestações, devem ser planejadas e construídas. A construção e a expansão do SEE requer elevados níveis de investimentos por parte das concessionárias de energia para atender a todos os consumidores de forma confiável, sem interrupção e com altos índices de confiabilidade dentro dos níveis previsto pela legislação.

Henderson (2014), afirma que quando acontece a falta de energia, ocorrem graves consequências, perturbando a rotina diária das pessoas e até mesmo a perda de vidas. A eletricidade é parte fundamental para uma sociedade e as interrupções de fornecimento podem estar relacionadas com erros de operações de equipamentos, erros de projeto ou até mesmo desastres ambientais, proveniente de falhas nas tomadas de decisão do processo de planejamento.

Para facilitar o entendimento da metodologia da execução do processo de planejamento do SEE, que é extremamente complexo, costuma-se dividir o processo entre os seus principais agentes: Sistema de Geração, Sistema de Transmissão e Sistema de Distribuição. Haffner (2000) afirma que, com a função de integrar diversos agentes envolvidos este processo assume uma importância grandiosa, nas melhorias do SEE.

Uma das soluções para a melhorias é o desenvolvimento de técnicas de solução e modelos de otimização para auxiliar no Planejamento da Expansão dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (PESDEE) com extrema importância para os departamentos de planejamento das empresas concessionárias de energia elétrica (Oliveira, 2010). Como foco deste trabalho,

estão sendo abordadas técnicas de planejamento da expansão com otimização para colaborar com as soluções das melhorias do SEE.

De acordo com Sousa (2013), o PESDEE é um processo que busca estabelecer diretrizes e identificar o melhor plano de ação para viabilizar a construção de novos SEE de forma a alcançar as metas estipuladas pelas empresas distribuidoras, resultando na elaboração do projeto da rede de distribuição. Estas metas podem ser analisadas através de diversas considerações, tais como técnico, econômico e social. Tecnicamente, o planejamento deve buscar melhoria na qualidade do serviço, flexibilidade e padrões de confiabilidade devido à complexidade das redes de distribuição. Economicamente, os custos de investimentos com a construção de novas linhas e subestações e os custos operacionais devem ser minimizados de forma a maximizar os benefícios. Por fim, socialmente, o planejamento deve buscar a redução de impactos ambientais de forma a melhorar a imagem das distribuidoras perante a sociedade.

Ainda segundo Sousa (2013), o objetivo clássico do PESDEE consiste em estabelecer os investimentos necessários para que a demanda de energia elétrica seja atendida de forma econômica e confiável. Ademais, devem ser consideradas restrições técnicas tais como limite do fluxo de potência no sistema, níveis de tensão nas barras do sistema e restrições de radialidade em função da filosofia de operação da rede.

Conforme Barreto (2007), um modelo capaz de retratar com precisão todos os aspectos envolvidos no PESDEE de forma que sejam definidos quais investimentos sejam feitas para que o SEE atenda aos requisitos mínimos de qualidade não existe. De acordo com Oliveira (2010), em geral, os modelos propostos para resolver o PESDEE levam em consideração principalmente a determinação da capacidade, a localização e a construção ótima de linhas de distribuição e subestações.

1.1 Definição do Problema

Com o crescimento constante dos consumidores, se faz necessário a expansão da rede, construção de novos circuitos, ampliação ou troca de linhas existentes, ampliação ou construção de subestações, entre outros. O problema de PESDEE consiste em encontrar aquela topologia para o SDEE que atenderá todas as restrições operacionais, físicas e financeiras e, atingirá os menores custos relacionados com investimentos para construção e operações desta nova configuração que ocorrem devido ao crescimento da demanda. Todas estas alterações constituem o problema do PESDEE (Gonen, 1986).

Um modelo capaz de abordar todas as alterações constituintes do problema do PESDEE, representando todas os pontos envolvidos para que o SDEE planejado atenda aos requisitos mínimos de qualidade alcançando os menores índices de investimentos, não existe (Barreto, 2007). Na literatura especializada encontram-se diversos trabalhos que buscam solucionar o problema do PESDEE através de modelos simplificadas e a partir de técnicas de solução, como as técnicas de Otimização Clássicas, as Heurísticas e Meta-heurística.

Pode-se destacar como técnicas de otimização clássica os algoritmos *branch-exchange* (Miguez *et al.*, 2002) e *branch and bound* (Paiva *et al.*, 2005). Nestes algoritmos o esforço computacional é significativo devido ao tamanho do espaço de busca. Técnicas utilizadas como algoritmos genéticos (Miranda *et al.*, 1994) e (Ramirez-Rosado & Bernal-Agustin, 1998), colônia de formigas (Gómez *et al.*, 2004) e busca tabu (Baykasoglu *et al.*, 1999) são apresentados na literatura. Para garantir e verificar a viabilidade de cada investimento, a maioria das técnicas de solução resolvem o fluxo de potência para obter o ponto de operação do sistema. As técnicas utilizadas para resolver o problema do PESDEE consideram principalmente a alocação ótima de subestações e o desenvolvimento de modelos para obter a localização ótima para a construção de novas linhas de distribuição (Oliveira, 2010).

Neste contexto, este trabalho busca explorar um modelo capaz de auxiliar na solução na solução do problema do PESDEE, resultando em melhores configurações para o SDEE.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a formulação de uma nova metodologia para a solução do problema do PESDEE, levando em consideração os custos de investimento para a construção de novas linhas em redes de média tensão, buscando melhorar o desempenho e o tempo de processamento computacional para o estabelecimento de uma solução para o PESDEE. Dentro deste contexto constitui-se como objetivos específicos:

- Estudar o método *Backward-Forward-Sweep* na solução do fluxo de potência em sistemas de distribuição;
- Implementação computacional do algoritmo proposto;
- Testes computacionais com o algoritmo desenvolvido nos principais sistemas testes presentes na literatura;
- Avaliar e comparar o desempenho do algoritmo com trabalhos presentes na literatura especializada.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 6 capítulos.

O Capítulo 1 apresenta 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.

O Capítulo 2 faz uma revisão da literatura, apresentando as principais abordagens para o problema do PSDEE

O Capítulo 3 apresenta as principais características e a forma de solucionar o fluxo de potência, através do método *Backward-Forward-Sweep*, em redes radiais de média tensão.

O Capítulo 4 apresenta a proposta do algoritmo para a solução do PSDEE.

O Capítulo 5, apresentam-se os testes computacionais e resultados obtidos a partir da simulação do algoritmo seguida de uma análise dos resultados.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, as considerações e recomendações finais.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Na literatura especializada são encontradas diversas propostas para formulação e solução do problema do PESDEE. Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica das metodologias aplicadas para resolver o problema do PESDEE.

2.1 Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Diversas técnicas podem ser utilizadas para a solução do problema de PESDEE. Entre elas estão as técnicas de otimização clássicas como a programação linear, programação não-linear e programação linear inteiro mista, algoritmos heurísticos e meta-heurísticos (Baquero, 2012). A resolução de problemas de otimização é constituída de dois processos consecutivos: a modelagem matemática do problema e o desenvolvimento da técnica necessária para solucionar a modelagem matemática proposta (Souza, 2011).

Os modelos para a solução do problema do PESDEE desenvolvidos levam em consideração principalmente a construção de novos circuitos e subestações no SDEE. Muitos trabalhos buscam obter resultados para resolver o problema da localização e capacidade ótima de circuitos a serem construídos. Alguns trabalhos buscam solucionar o problema da obtenção da capacidade e localização ótima de subestações. Há ainda, os trabalhos que buscam solucionar de forma conjunta o planejamento de subestações e circuitos (Oliveira, 2010).

De forma geral, os modelos matemáticos apresentados para resolver o problema do PESDEE possuem o objetivo de minimizar as perdas de potência ativa do sistema e minimizar os custos de construção dos circuitos e subestações para um horizonte de tempo pré-determinado (Ponnaivaikko & Rao, 1982), (Goswami, 1997), (Miguez *et al.*, 2002) e (Gómez *et al.*, 2004). Entretanto, a função objetivo de cada modelo pode se distinguir na forma de calcular as perdas e custos de construção, assim como a forma de calcular os custos de operação deste sistema e as variações em relação ao horizonte de planejamento, além do mais estes modelos podem ser lineares ou não-lineares, estático ou multi-estágios. Estes modelos podem se diferenciar em relação ao horizonte de planejamento, podendo ser de curto ou longo prazo.

2.1.1 O Estado da Arte

O primeiro trabalho presente na literatura especializada para solucionar o problema do PESDEE foi proposto por Knight (1960). Neste trabalho foi proposto a utilização da técnica de otimização clássica da programação inteira cujo objetivo do modelo proposto foi a minimização da função objetivo para o custo da expansão da rede, sujeita as restrições lineares.

Em 1974, Adams e Laughton (1974) propuseram um modelo de programação linear inteiro mista para o planejamento mono-objetivo do SDEE. O objetivo deste modelo era obter a alocação e dimensionamento dos circuitos, sendo que a localização e a potência das subestações eram previamente determinadas. Este modelo foi resolvido através do algoritmo de *Branch & Bound*.

Crawford e Holt (1975) apresentaram um modelo que torna a subestação como elemento principal no processo do PESDEE. O modelo proposto por estes autores buscava determinar a localização, dimensão e a região de serviço ótima das subestações. Utilizaram para tal o modelo de programação inteira cujo objetivo era a minimização da soma das distâncias das subestações até os pontos de carga multiplicadas pelas potências fornecidas pela subestação para este ponto. Para determinar a área ótima de demanda utilizaram os algoritmos de transporte de Ford e Fulkerson e o algoritmo de Dijkstra foi utilizado para encontrar o caminho mais curto para a alocação ótima das subestações.

Wall *et al.* (1979) foi considerado um dos primeiros trabalhos que se utiliza a proposta de modelagem matemática para a solução do problema de PESDEE. Os autores definiram um modelo para a alocação dos condutores utilizados nas linhas de distribuição, partindo da definição da localização das subestações e centros de carga. O modelo foi resolvido com um problema de fluxo em redes através da aplicação de uma técnica heurística que buscava determinar topologias radiais através da modificação das soluções não radiais por meio da eliminação das linhas que transportavam menor nível de corrente em laços de configurações não radiais. Eles identificaram a necessidade por encontrar topologias radiais ótimas, contudo não era apresentada a restrição de radialidade no modelo.

Kaplan e Braunstein (1981) propuseram um modelo que considerava a alocação e capacidade ótima de novas subestações cuja função objetivo estava relacionada com os custos de construção e perdas. Para isto, as bitolas dos condutores eram definidas previamente. A função objetivo era minimizada através da solução de equações diferenciais que determinaram a posição da subestação em um sistema de coordenadas cartesianas.

Ponnaivaikko e Rao (1982) apresentaram um modelo linearizado cujo objetivo era minimizar os custos de construção dos circuitos e subestações, assim como os custos relacionados as perdas ativas no sistema. Este modelo foi solucionado através da programação quadrática inteiro misto. Para representar as restrições neste problema foi empregado um modelo linearizado, porém o mesmo interferiu na precisão dos resultados.

Miranda *et al.* (1994) modelaram o problema de PESDEE através da programação não

linear inteiro mista e foi utilizado um algoritmo genético para encontrar a solução. O horizonte de planejamento foi dividido em três etapas, sendo considerado como pseudodinâmico. Este trabalho buscou minimizar os custos com investimento, perdas e os custos associados com o desvio da tensão das barras e o grau de confiabilidade no sistema. Para testes foi utilizado um sistema de 54 barras.

Goswami (1997) traçou o problema do PESDEE como um PNLIM cujo objetivo era minimizar os custos de instalação e operação do SDEE. Um algoritmo de troca de ramos, chamado *Branch Exchange*, foi utilizado para selecionar as subestações e alimentadores afim de atingir o objetivo do modelo. Inicialmente era gerada uma solução de topologia radial, através da técnica adotada e de alguns critérios pré-estabelecidos, iniciava-se o processo de troca de ramos. Esta troca consistiu em adicionar um circuito não pertencente à solução radial e remover um circuito que pertencesse a solução atual de forma que soluções de melhor qualidade fossem encontradas.

Bernal-Agustín (1998) desenvolveu uma metodologia utilizando Algoritmos Genéticos. O objetivo deste modelo era minimizar os custos de investimento e operação do sistema, incluindo adicionalmente os custos e confiabilidade de modo que se configurasse um planejamento pseudodinâmico utilizando método monoestágio de maneira sucessiva. A influência das restrições de radialidade, limites de tensão nas barras e a linearização ou não dos custos variáveis eram evidenciados neste trabalho. Esta metodologia obteve soluções com tempos computacionais pequenos quando testada em sistemas de grande porte.

Miguez *et al.* (2002) propuseram uma melhoria da técnica heurística *Branch Exchange* cujo objetivo era obter a configuração ótima do sistema de média tensão minimizando os custos de investimentos, perdas de energia e qualidade da oferta de energia, conhecendo a localização geográfica dos pontos de demanda e localização das subestações.

Gómez *et al.* (2004) utilizaram a programação linear inteira mista para modelar um sistema de média tensão. O sistema era modelado como um problema de planejamento estático, para a construção de circuitos e subestações, considerando diferentes tipos de condutores. O objetivo deste modelo era minimizar os custos de investimento em circuitos, subestações e custos de operação do sistema. As restrições consideradas neste modelo eram os limites das magnitudes das tensões das barras, balanço de potência, limites das capacidades de linhas e subestações e a restrição de radialidade do sistema. A metodologia foi testada em dois sistemas, um de pequeno porte e outro de médio porte.

Em Cossi (2008) foi proposto um modelo de planejamento integrado do sistema de distribuição de média e baixa tensão e, foi abordado como um problema de programação não linear inteiro misto estático multi-objetivo. O objetivo deste modelo referia-se ao custo de investimento e a confiabilidade da rede. As restrições consideradas neste modelo referiam-se ao atendimento das demandas nas barras de consumo, limites de queda de tensão, restrição física de operação de equipamentos, condutores, restrições de natureza financeira e radialidade do sistema. Para solução deste modelo foi utilizado um algoritmo de Busca Tabu (*Tabu Search*)

em três etapas: primeiramente foi feita o balanceamento das cargas, em seguida era feita a alocação e definição da capacidade e quantidade de transformadores e por fim a definição dos ramos e tipos de condutores que comporiam a solução.

Oliveira (2010) apresentou um modelo de planejamento integrado do SDEE através da programação não linear inteiro misto. Este modelo teve o objetivo de minimizar os custos com operação e construção dos circuitos, subestações, custos com alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão. Foram restrições desta modelagem o balanço de potência da solução, a máxima capacidade dos circuitos e subestações, a magnitude de tensão nas barras, o controle dos taps e a restrição de radialidade. Para solucionar a função objetivo duas técnicas de solução foram implementadas: um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC) especializado e um algoritmo *Branch-and-Bound* (B&B) não linear. O AHC especializado adicionou passo a passo um circuito, uma subestação, um banco de capacitor ou um regulador de tensão com base em um indicador de sensibilidade. O algoritmo B&B não linear utilizou uma técnica de sondagem e técnicas de escolha das variáveis de separação para solucionar o problema do PESDEE.

Em Souza (2011) foi exposto um modelo para minimização dos custos com a construção e/ou expansão das redes e subestações, assim como a redução das perdas ativas e perdas com a operação do sistema. Este trabalho aplicou uma técnica de otimização através da metaheurística de Busca em Vizinhança Variável (VNS) a partir de uma solução de boa qualidade obtida inicialmente por um AHC para obter a solução do problema de PESDEE. Foi utilizada para testes desta metodologia os sistemas de 23, 54, 136, 202 e 417 barras.

Baquero (2012) modelou o problema do planejamento da expansão de sistemas de distribuição através da PNLIM mono-objetivo que permitiu processar tanto o planejamento estático como multiestágio por intermédio de uma estratégia de decomposição de maneira a dividir em subproblemas de seleção das subestações, reconfiguração e recondutoramento dos alimentadores dependentes. Para solucionar o problema do PESDEE foi empregada a metaheurística de Busca Tabu combinada com técnicas heurísticas para explorar o espaço de busca com maior eficácia. O método colocado foi testado nos sistemas de 54 e 417 barras apresentando excelente desempenho computacional.

Camargo (2014) modelou o problema do PESDEE como um problema de programação não linear inteiro misto mono-objetivo e multiestágio. O objetivo deste modelo foi estabelecer um plano de expansão do sistema de distribuição com os custos de operação e custo de investimento mínimo, sujeitos além das restrições físicas e operacionais as restrições que estabelecem os indicadores de continuidade DIC, FIC, DEC e FEC. Para resolver o problema do PESDEE foi desenvolvido um algoritmo genético especializado baseado na proposta de Chu-Beasley somado com as técnicas heurísticas especializadas. Para avaliar a eficiência do modelo proposto foram realizados testes com os sistemas testes propostos na literatura especializada. O algoritmo apresentou resultados eficientes, pois o mesmo encontrou resultados melhores que o presente na literatura.

2.2 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram abordadas os principais trabalhos e soluções para a solução do problema do planejamento da expansão de sistemas de distribuição (PESDEE). A grande maioria dos trabalhos apresentados utilizaram a modelagem matemática para representar o problema, o que se diferencia era a técnica de solução adotada para a solução do problema.

Capítulo 3

Formulação do problema do PESDEE

Neste capítulo é apresentado a metodologia proposta para determinar a solução do problema de PESDEE que apresente o menor custo de construção da topologia radial do SDEE e menor custo de operação do sistema ao longo do horizonte de planejamento combinados. São apresentados também neste capítulo, o modelo matemático utilizado e suas restrições. Complementarmente, é apresentado o método utilizado para o cálculo do fluxo de carga para sistemas radiais, a fim de encontrar o estado de operação da topologia radial encontrada pelo modelo de otimização.

3.1 Considerações Iniciais

O problema do PESDEE consiste em encontrar um conjunto de ações a serem tomadas no SDEE para atender a demanda futura de energia elétrica objetivando atingir os menores custos relacionados com investimentos em construção e o custo de operação desta nova rede, satisfazendo um conjunto de restrições físicas e operacionais do sistema.

Diversos métodos são utilizados para resolver o problema do PESDEE, estão entre eles o recondutoramento de condutores, troca entre os alimentadores, aumento da capacidade das subestações, instalação de novas subestações, uso de geração distribuída, entre outros. O resultado final do problema de planejamento, considerando todas as ações necessárias para encontrar a solução ótima pode envolver numerosos custos que se analisados todos de uma forma conjunta torna o processo complexo. A adaptação por meio de aproximações e restrições no modelo de planejamento torna o processo simplificado.

Partindo desta pressuposição o método proposto neste trabalho busca, através de uma estratégia construtiva, encontrar, dentro de um conjunto de condutores existente de um SDEE, a solução do problema do PESDEE objetivando minimizar alguns dos custos globais envolvidos no processo da expansão de sistemas de distribuição. São eles, o custo de construção dos alimentadores pertencentes à solução e custo de operação desta rede ao longo do horizonte de planejamento.

Além dos custos, as restrições físicas e operacionais do sistema devem ser consideradas

neste modelo para que a solução encontrada para o problema do PESDEE seja de boa qualidade. Pode-se considerar como restrições físicas o fluxo de corrente pelos condutores que não deve ser excedido e a potência máxima nas subestações. Como limites operacionais, temos o balanço do fluxo de potência, limite na flutuação da tensão nos transformadores do sistema e a impossibilidade de uma carga ser alimentada por dois ou mais alimentadores simultaneamente.

3.2 Modelo Matemático

O modelo matemático utilizado para a solução do problema do PESDEE neste trabalho, cujo objetivo é a minimização do custo global considerando o custo de construção de novas linhas e o custo de operação do sistema ao longo do horizonte de planejamento é apresentado através da função objetivo dado pela Equação (3.1) e suas restrições exposto pelas Equações (3.2) a (3.7) (Oliveira, 2010) e (Camargo, 2014).

$$\min c = \underbrace{\sum_{(ij) \in \Omega_l} (c_{ij} l_{ij} x_{ij})}_{IL} + \underbrace{\delta_{l_t} \sum_{(k,m) \in \Omega_b} x_{ij} * r_{ij} * (I_{ij,R} + I_{ij,I})^2}_{\substack{PA \\ CO}} \quad (3.1)$$

s.a.

$$P_i - P_{Si} + P_{Di} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3.2)$$

$$Q_i - Q_{Si} + Q_{Di} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3.3)$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3.4)$$

$$I_{ij} \leq \bar{I} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (3.5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (3.6)$$

$$\sum_{(ij) \in \Omega_l} x_{ij} = n_b - 1 \quad (3.7)$$

A Função Objetivo (FO) c apresentada na Equação (3.1) tem como objetivo minimizar o custo total de investimento para construção de novas linhas de média tensão (IL) e o custo de operação do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica dentro do horizonte de planejamento (OC).

Na formulação matemática, a variável binária x_{ij} é uma variável de decisão que representa o estado do ramo ij na solução encontrada para o problema. Assim, se assumir o valor 1, significa que o ramo ij faz parte da solução, e se assumir o valor 0, significa que o

respectivo não faz parte da solução. Formulando, assim, o custo de investimento para a construção de um novo SDEE baseado na solução encontrada.

Os parâmetros c_{ij} e l_{ij} representam o custo de construção do ramo por quilômetro (linha) ij e o seu respectivo comprimento. Desta maneira, na primeira parcela da FO, tem-se que o custo total de investimento para a construção de novas linhas é o somatório dos custos de construção individuais de cada ramo pertencente à solução do problema do PESDEE.

A segunda parcela da função objetivo (CO) representa o custo de operação do SDEE dentro de um horizonte de planejamento. A variável δ_{it} é uma constante de multiplicação cuja função é converter potência ativa em custo efetivo monetário, considerando a conversão de potência ativa em energia e o valor monetário desta energia ao longo do tempo sobre uma variação da taxa de juros considerada. O valor de δ_{it} é dado pela Equação (3.8):

$$\delta_{it} = c_e \phi_l 8760 \sum_{p=1}^{p=np(t)} \frac{1}{(1+I)^p} \quad (3.8)$$

Da Equação (3.8) tem-se que c_e é o custo do kWh, $np(t)$ é horizonte de planejamento em anos do estágio t e I a taxa de juros. A variável ϕ_l representa o fator de perda que é determinado pela relação entre as perdas médias e perdas máximas em um determinado período de tempo (Oliveira, 2010).

A parcela PA da FO representa as perdas ativas de energia elétrica e é composta pelo somatório das perdas ativas elétricas individuais de cada ramo pertencente à solução do problema do PESDEE.

As Equações (3.2) e (3.3) representam as restrições do balanço do fluxo de potência ativo e reativo em que as variáveis P_i e Q_i são calculadas a partir da formulação do método de varredura que será apresentado nas próximas subseções.

A Equação (3.4) representa os limites da magnitude de tensão na barra i , de modo que esta opere dentro de limites de operação aceitáveis para fornecimento de energia elétrica permitidos pela legislação vigente. A Equação (3.5) representa o limite máximo da corrente em um ramo ij .

A Equação (3.6) representa a característica binária da variável de decisão que identifica os ramos que podem ser adicionados os SDEE e a Equação (3.7) representa uma das condições necessária para que a solução encontrada possua configuração radial. Os parâmetros n_b , Ω_l e Ω_b representam, respectivamente, o número de barras do sistema de distribuição, o conjunto de ramos do sistema e o conjunto de barras do sistema de distribuição em planejamento.

3.3 Metodologia para a Solução do Modelo Matemático

A técnica desenvolvida neste trabalho para a solução do problema do PESDEE expresso através do Modelo Matemático apresentado na Seção 3.2 deste capítulo será apresentado no Capítulo 4. O Algoritmo Especializado tem a capacidade de, por intermédio de tomadas de decisão, gerar um conjunto de soluções radiais factíveis para a solução do problema do PESDEE.

Para avaliar o estado do sistema, ou seja, a qualidade das soluções radiais factíveis obtidas através do Algoritmo Especializado é resolvido o Fluxo de Carga (FC) para redes radiais. Desta forma, é possível verificar se as soluções radiais encontradas respeitam os limites de operação para um sistema de distribuição de boa qualidade. Os valores das tensões, em módulo e ângulo, nas barras, assim como as correntes que fluem por cada ramo do SDEE são obtidas pelo cálculo do FC. Desta forma pode-se descartar àquelas soluções radiais que não atendem as restrições de operação.

3.3.1 Fluxo de Carga em Sistemas Radiais

Para a solução do Fluxo de Carga de sistemas radiais utilizou-se o método de varredura *Backward Forward Sweep* (BFS). Originalmente apresentado por Shirmohammadi *et al.* (1988), este método consiste no cálculo do fluxo de potência de sistemas de transmissão e distribuição fracamente malhados, através da formulação das leis de Kirchhoff e uma técnica de compensação multiponto.

O método BFS é considerado um método de varredura pois apresenta um processo iterativo que efetua um percurso a partir das barras mais extremas do SDEE em direção à subestação (*Backward Sweep*) e então o caminho inverso, da subestação em direção às barras mais extremas (*Forward Sweep*). Este processo de varredura se repete até que se obtenha uma convergência para a solução.

Para que seja possível efetuar o processo de varredura em um sistema distribuição radial é necessário que a barra mais extrema seja identificada. Para isto, o sistema de distribuição radial é segmentado em camadas onde as barras são agrupadas nas camadas conforme se afastam da subestação. É feita, então, a renumeração das barras na sequência em que foi elencada as camadas, a partir da barra da subestação, de modo que a barra de maior número seja a mais afastada da subestação. É ilustrado o processo de segmentação em camadas e renumeração das barras através das Figura 3.1, Figura 3.2 e Figura 3.3.

Com a segmentação do sistema e renumeração das barras é possível iniciar o processo de varredura pra a solução do FC do sistema de distribuição radial. Inicialmente, é necessário que as tensões em todas as barras do sistema sejam estipuladas, tipicamente são definidas as tensões das barras geralmente como sendo 1 pu ou o valor da tensão da subestação. A partir desta definição, pode-se calcular as injeções de corrente em todos os barramentos, com base nas

Equações (3.9) e (3.10).

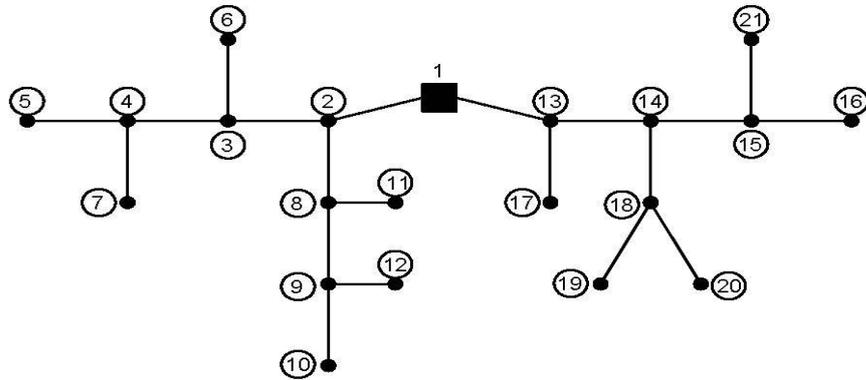


Figura 3.1: Sistema de Distribuição Radial. Fonte: (Shirmohammadi *et al.*, 1988).

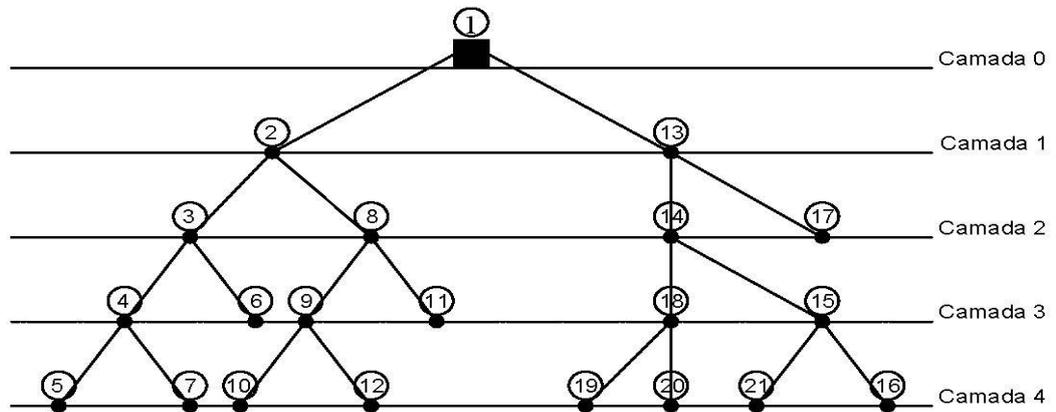


Figura 3.2: Sistema de Distribuição Radial Segmentado em Camadas. Fonte: (Shirmohammadi *et al.*, 1988).

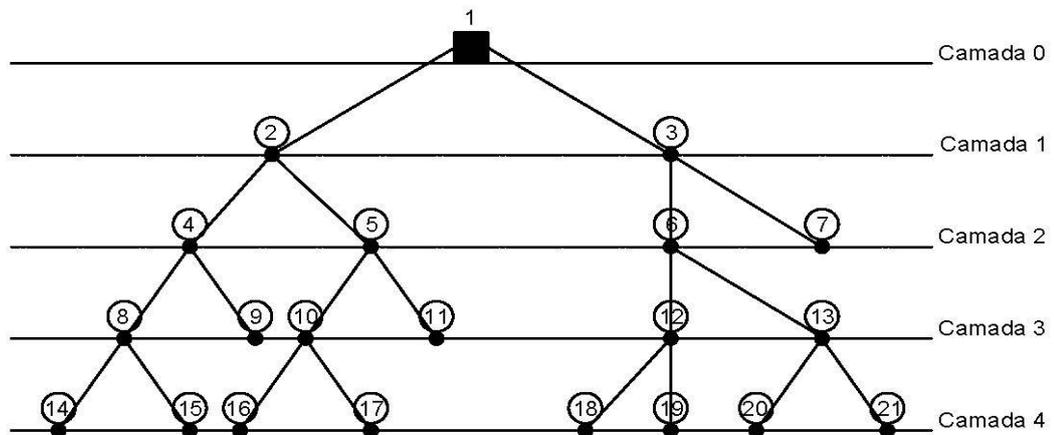


Figura 3.3: Sistema de Distribuição Radial Segmentado em Camadas Renumerado. Fonte: (Shirmohammadi *et al.*, 1988).

$$I_{kr} = \frac{P_k * V_{kr} + Q_k * V_{ki}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (3.9)$$

$$I_{ki} = \frac{P_k * V_{ki} - Q_k * V_{kr}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (3.10)$$

Sendo,

I_{kr} – Corrente real na barra k;

I_{ki} – Corrente imaginária na barra k;

V_{kr} – Tensão real na barra k;

V_{ki} – Tensão imaginária na barra k;

P_k – Potência ativa na barra k;

Q_k – Potência reativa na barra k.

Calculadas as correntes injetadas em cada barra é possível definir a corrente de cada ramo, dado pelas Equações (3.11) e (3.12):

$$I_{kmr} = I_{kr} + \sum_{j \in \Omega_m} I_{jmr} \quad (3.11)$$

$$I_{kmi} = I_{ki} + \sum_{j \in \Omega_m} I_{jmi} \quad (3.12)$$

Sendo,

I_{kmr} – Corrente real no ramo km;

I_{kmi} – Corrente imaginária no ramo km;

Ω_m – Conjunto de barras conectadas à barra m a sua jusante.

Finalizada a etapa *Backward Sweep* com a definição das correntes injetadas em cada barra e as correntes nos ramos é possível avançar para a etapa *Forward Sweep*. Esta etapa consiste na atualização das tensões em todas as barras do sistema e se inicia a partir do barramento da subestação e termina nas barras mais extremas ao sistema. O equacionamento para atualização das tensões nas barras é dado pelas Equações (3.13) e (3.14).

$$V_{mr} = V_{kr} - r_{km} * I_{kmr} + x_{km} * I_{kmi} \quad (3.13)$$

$$V_{mi} = V_{ki} - r_{km} * I_{kmi} - x_{km} * I_{kmr} \quad (3.14)$$

Sendo,

V_{mr} – Tensão real na barra m ;

V_{mi} – Tensão imaginária na barra m ;

r_{km} – Resistência do ramo km ;

x_{km} – Reatância do ramo km .

A partir dos valores já obtidos é possível determinar as perdas de energia elétrica nesta topologia radial em estudo. As Perdas Ativas (P_t) e Reativas (Q_t) são dadas a partir das Equações (3.15) e (3.16):

$$P_t = \sum_{(k,m) \in \Omega_b} r_{km} * (I_{kmr} + I_{kmi})^2 \quad (3.15)$$

$$Q_t = \sum_{(k,m) \in \Omega_b} x_{km} * (I_{kmr} + I_{kmi})^2 \quad (3.16)$$

Para finalizar o processo de cálculo é necessário realizar o teste de convergência. Este teste consiste na análise da diferença entre as perdas calculadas na iteração atual e as perdas calculadas na iteração anterior. Caso este valor seja menor que a tolerância estabelecida, pode-se considerar que o algoritmo convergiu para a solução final. Caso esta diferença seja maior que a tolerância o processo de cálculo deve ser retomado até que se obtenha convergência.

3.4 Considerações Finais do Capítulo

Este modelo tem a capacidade de solucionar o PESDEE com o objetivo principal de minimizar os custos de investimento para a construção de novas linhas e o custo de operação desta rede ao longo do horizonte de planejamento. Foi exposto neste capítulo as restrições físicas e operacionais que este modelo deve respeitar para que a solução do problema de PESDEE obtenha uma solução de boa qualidade.

Capítulo 4

Algoritmo Dinâmico PRIM

Neste capítulo é apresentado a metodologia aplicada para o desenvolvimento do sistema de solução do problema do PESDEE. Este sistema utiliza como base a teoria de Prim (1957) para encontrar uma topologia radial factível para a solução do problema do PESDEE. Para a implementação computacional é utilizado a linguagem de programação Dev-C++, com alocação dinâmica.

4.1 Considerações Iniciais

O Algoritmo Dinâmico PRIM emprega um processo iterativo, em cada iteração, o algoritmo realiza a tomada de decisão com base em um valor de peso. No problema do PESDEE, em cada iteração, é adicionada uma linha de distribuição baseado em um peso relacionado ao custo de implantação desta linha de distribuição. O processo iterativo termina quando uma solução factível é encontrada. Obtém-se, assim, a primeira topologia radial factível. Através de uma metodologia de perturbação do sistema é obtida diferentes topologias radiais factíveis. Desta maneira, pode-se determinar aquela topologia radial que satisfaça todas as restrições e disponha da melhor solução para a solução do problema do PESDEE

A seguir é exposto a teoria de PRIM utilizada como base na implementação do sistema proposto, a modelagem computacional através da linguagem de programação Dev-C++, a metodologia adotada para a solução do Modelo Matemático (Capítulo 3) e suas características e a Fase de Melhoria implementada para obtenção de resultados distintos. Em seguida é apresentado um fluxograma completo com todos os passos do algoritmo desenvolvido.

4.2 Teoria de PRIM

No final da década de 50 Robert Clay Prim elaborou o algoritmo PRIM para a aplicação em problemas de otimização combinatória. O objetivo deste algoritmo é construir uma árvore geradora mínima formada por ramos sucessivamente selecionados. Essa árvore geradora mínima é formada a partir de um nó pelo acréscimo de novos ramos, aumentando a

arborescência até que todos os nós sejam incluídos. O critério de escolha pelo ramo que será acrescentado usualmente é o ramo que possui menor custo para os problemas de minimização. O passo a passo da construção da árvore geradora mínima com base na Teoria de Prim é ilustrado na Figura 4.1:

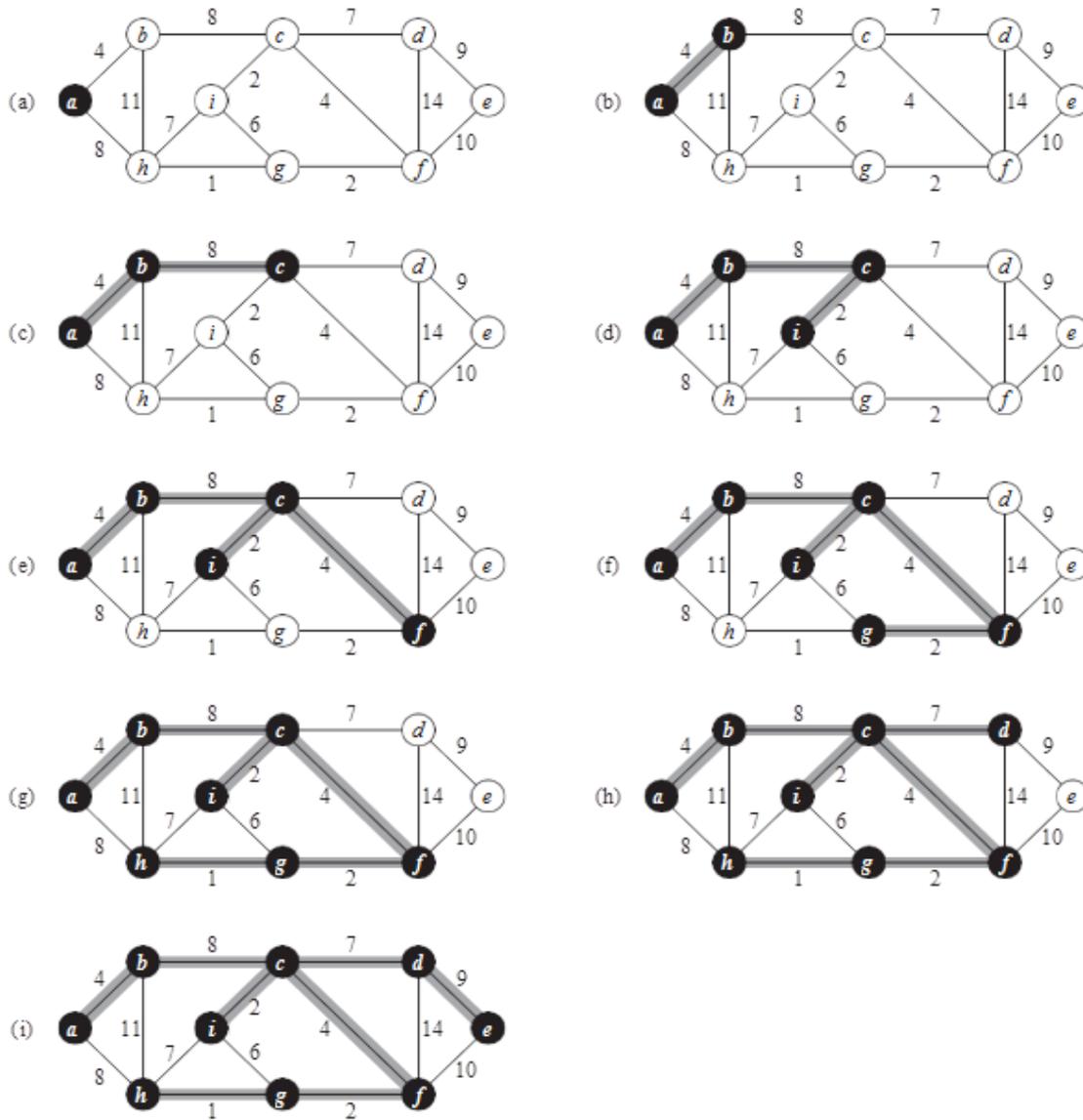


Figura 4.1: Execução do Algoritmo de Prim em um grafo. Fonte: (Cormen *et al.*, 2009).

O algoritmo de PRIM inicia-se conectando o nó *a*. A partir da conexão do nó *a* define-se o conjunto de nós candidatos a serem conectados, que são todos os ramos que possuem um nó conectado e outro aberto, nesta ilustração são os ramos *(a-b)* e *(a-h)*. Dentro do conjunto de nós candidatos, escolhe-se aquele que possui ramo de menor custo *(a-b)*. A cada iteração o algoritmo retorna ao ponto inicial para verificação dos pesos dos ramos candidatos, em caso de

empate, escolhe-se o primeiro ramo verificado. Pode-se observar esta condição na etapa (b), onde os ramos candidatos são os ramos $(a-h)$, $(b-c)$ e $(b-h)$, tem-se empate entre os ramos sendo o primeiro deles escolhido. O algoritmo de PRIM encerra com a formação da árvore geradora mínima.

Observa-se que a teoria de PRIM tem uma natureza de um algoritmo guloso e míope, ou seja, em cada iteração, ele escolhe a aresta mais “apetitosa” (menor custo) sem enxergar as consequências desta escolha na solução global.

4.3 Modelagem Computacional

O algoritmo foi implementado considerando o conceito de programação com alocação dinâmica. Com o objetivo de otimizar o processamento computacional, o algoritmo utiliza alocação dinâmica de memória que se refere ao processo de reservar espaço na memória durante a fase de execução do programa (em tempo real ou de execução) ao invés de fazê-lo durante a fase de desenvolvimento (tempo de compilação), quando não se sabe ao certo o espaço necessário.

A alocação de memória em tempo de compilação é chamada de alocação estática e, refere-se ao processo de reservar um espaço de memória previamente para todos os dados a serem utilizados, ocupando espaço na memória mesmo que este não seja usado no momento. É preciso fazer uma previsão final para o quanto de memória será utilizada para trabalhar. Dessa forma, este tipo de alocação tende a desperdiçar recursos, uma vez que o espaço total necessário para alocar as informações não é conhecido ou mal dimensionado. Na alocação em tempo de execução, também conhecida como alocação dinâmica, pode-se alocar a memória no exato momento em que é necessário e do tamanho exato exigido dos dados a serem manipulados. Desta maneira, pode-se aumentar ou diminuir a memória alocada (tamanho ou quantidade, além do tipo de dado) conforme a necessidade.

Outra vantagem é a utilização de ponteiros pois não move os dados na memória e sim aponta para os mesmos. Seus ponteiros também apontam para as posições de memória onde estão localizados e seus outros ponteiros apontam para os dados que se fazem necessários utilizar. Assim, os dados sempre ficam no mesmo lugar, e só saem quando removidos da memória RAM, reduzindo assim o número de computações (verificações condicionais) em uma grande escala.

O modelamento do SDEE foi feito com um algoritmo implementado utilizando estrutura de dados em forma de listas duplamente encadeadas para representar os dados das barras e dos ramos. Assim, a título de exemplo, as informações do estado de operação de uma barra, como demanda de potência e tensão são representados por um bloco e encadeadas com os blocos que representam as demais barras do sistema, formando assim uma lista. Os dados dos ramos do SDEE, também são modelados em forma de listas duplamente encadeadas de forma independente. Desta maneira, são obtidas duas listas independentes, uma contendo os dados das

barras e outra os dados dos ramos. As listas duplamente encadeadas possuem maior controle, confiabilidade e menor risco de perda acidental de informação. Complementarmente é criado uma estrutura de dados com as informações globais do sistema para referência de cálculo.

A representação do SDEE em sua configuração malhada foi feita com um algoritmo implementado interconectando as listas dos ramos e das barras de forma que, computacionalmente, tenha-se a possibilidade de movimentação para acessar as informações do SDEE. As estruturas de dados implementadas com os dados de entrada do SDEE são ilustradas nas Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4.

Globais
Nó de Referência
Tensão da Subestação (kV)
Tensão Base (kV)
Potência Base (kVA)
Tolerância do Erro Permitido
Tensão Mínima (pu)
Tensão Máxima (pu)

Figura 4.2: Estrutura de Dados globais do SDEE.

Barras
Número da Barra
Potência Ativa (kW)
Potência Reativa (kVAr)
Tensão Real e Imaginária (pu)
Corrente Real e Imaginária (pu)
Pb->próximo
Pb->anterior
Pb->ramos

Figura 4.3: Estrutura de Dados das Barras do SDEE.

Na Figura 4.2 é ilustrado os dados globais do SDEE e nele estão contidas as seguintes informações: o número da barra da subestação, tensão da subestação, tensão e potência base para cálculo em unidade, os limites máximos e mínimos admissíveis do módulo de tensão nas barras e a tolerância do erro permitido utilizado como critério de parada no cálculo do Fluxo de Potência.

A Figura 4.3 ilustra a Estrutura de Dados utilizada para modelagem computacional das barras do SDEE. As informações contidas nesta estrutura são: o Número da Barra, a Potência Ativa e a Potência Reativa da barra que foram os dados de entrada do problema. As demais

variáveis são utilizadas no processo de modelagem do SDEE e cálculo do Fluxo de Potência, além de ponteiros para interligação da estrutura da barra com seus próprios dados com a estrutura ramos para localizar os mesmos que as contenha.

Ramos
Número do Ramo
Número da Barra de Entrada
Número da Barra de Saída
Resistência (Ω)
Reatância (Ω)
Corrente Real e Imaginária (pu)
Potência Aparente (kVA)
Custo de Construção
Peso
Radial
Pr->próximo
Pr->anterior
Pr->entrada
Pr->saída

Figura 4.4: Estrutura de Dados dos Ramos do SDEE.

As informações da estrutura de ramos, ilustrada na Figura 4.4 são: Número do Ramo, Número da Barra de Entrada, Número da Barra de Saída, Resistência, Reatância e Custo de Construção são dados de entrada da Estrutura de Dados dos ramos. As outras informações são as tensões e correntes que serão calculadas pelo fluxo de carga e os ponteiros que mantem a ligação dos próprios dados na estrutura ramos e a ligação com a estrutura Barras para localizar com eficiência a referida barra dos ramos.

As variáveis Pb->próximo, Pb->anterior, Pr->próximo e Pr->anterior são ponteiros dentro da estrutura de dados e são utilizadas para formar ambas as listas duplamente encadeadas das Barras e dos Ramos. Esta etapa pode ser visualizada através da Figura 4.5.

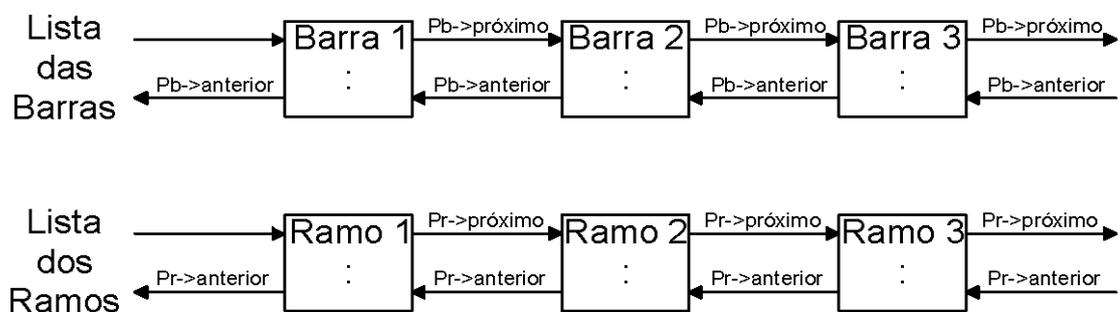


Figura 4.5: Lista Duplamente Encadeada das Barras e dos Ramos do SDEE.

Com base nas informações contidas nas variáveis Número da Barra de Entrada e Número da Barra de Saída é possível efetuar todas as interligações entre a Lista dos Ramos e Lista das Barras utilizando os ponteiros Pr->entrada e Pr->saída. Simultaneamente à interligação da Lista dos Ramos à Listas das Barras o algoritmo efetua a interligação inversa. No momento da interligação do ramo à barra de entrada ou à barra de saída o algoritmo utiliza o ponteiro Pb->ramos para interligar a barra a todos os ramos que possuem conexão com esta barra. Desta forma, ao final desta etapa, o SDEE estará modelado em sua forma malhada com todos os ramos representados através das interligações entre as Listas. A Figura 4.6 ilustra as interligações do SDEE de modo que se tenha as conexões entre as barras e os ramos do sistema em sua forma malhada.

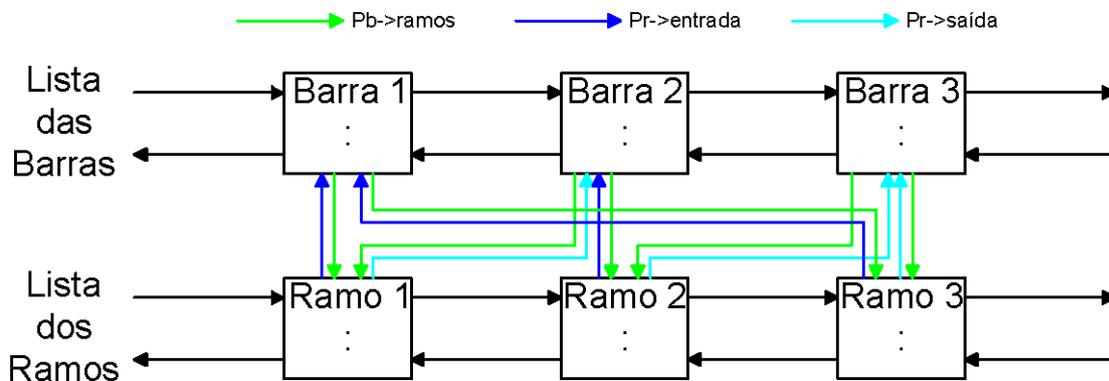


Figura 4.6: Exemplo da modelagem computacional do SDEE malhado.

Logo, com base na modelagem computacional efetuada para modelar o SDEE em sua forma malhada é possível aplicar o algoritmo para a obtenção da topologia radial de forma a resolver o problema do PESDEE proposto neste trabalho. Na próxima seção é explanado o algoritmo evidenciando a utilização da alocação dinâmica e o sistema de listas duplamente encadeadas aplicadas no SDEE.

4.4 Algoritmo Dinâmico PRIM

A partir da modelagem computacional apresentada na subseção anterior, o sistema desenvolvido tem a capacidade de realizar a busca da topologia radial com o menor custo total para solucionar o problema do PESDEE.

Neste contexto, são estabelecidos os três grupos de estruturas de dados para representar o SDEE sendo elas a estrutura de dados Globais, os dados das Barras e os dados dos Ramos. Para que o algoritmo possa efetuar o processo de busca pela topologia radial final são estabelecidas as seguintes variáveis para o problema:

- G – é a estrutura de dados Globais contendo as informações de referência do sistema;

- Lista V – é a lista duplamente encadeada contendo todos as barras livres (não utilizadas ainda na nova estrutura) e suas características, formada através da estrutura de dados, do SDEE a ser planejado;
- Lista S – é a lista duplamente encadeada contendo todos os ramos e suas características (Sistema Malhado), formada através da estrutura de dados, do SDEE a ser planejado;
- Lista T – é a lista duplamente encadeada utilizada como base para aplicação do Algoritmo Especializado PRIM (que serve para receber as Barras utilizadas para montar um sistema radial) e inicialmente é nula. Posteriormente ela conterà informações das barras do sistema;
- Lista R – é a lista duplamente encadeada inicialmente nula que é utilizada para armazenar os dados dos ramos pertencentes à topologia radial do SDEE.

Para que se possa representar as conexões do sistema computacionalmente as listas V e S foram interligadas conforme apresentado na subseção anterior. Nesta fase do processo o algoritmo considera que todos os nós estão desconectados e todos os ramos são candidatos a participarem da topologia radial final.

Inicialmente, identifica-se a barra pertencente à subestação através de um campo contendo uma variável da estrutura G. Esta etapa é importante, pois é a partir da subestação que a solução radial é construída. Uma vez identificado a barra da subestação, desloca-se esta barra da lista V para a lista T. É importante ressaltar que o encadeamento feito entre as listas dos ramos e das barras mantem-se intactas. Assim, uma vez que é identificado a barra da subestação, a partir do encadeamento, são identificados quais os ramos que estão conectados à esta barra.

Na sequência, inicia-se o processo de adição de novas linhas. Para todos os ramos candidatos conectados às barras presentes na lista T, verifica-se qual o ramo possui o menor peso. Este peso está diretamente relacionado ao custo de construção desta linha. Identificado o ramo de menor peso, o ramo é adicionado à lista R, e a barra a qual este ramo está conectado é deslocado para a lista T. Para garantir que não ocorra a formação de laços o algoritmo aprova as informações das barras que já pertencem à lista T, identificando as barras que já possuem conexão com o sistema. Dessa forma, todos os ramos que possui apenas um de seus barramentos de conexão já conectados serão os ramos candidatos. Aqueles que não possuírem barras de conexão marcadas ou que possuírem as duas barras de conexões marcadas não são candidatos no momento, pois se conectados, representam a situação de uma barra isolada ou a formação de um laço.

A solução do problema é construída de maneira iterativa, onde a cada iteração há um conjunto de ramos candidatos e o algoritmo utiliza um valor de peso para auxiliar na tomada de decisão. Esta etapa do algoritmo finaliza quando a lista V fica vazia, ou seja, todas as barras do SDEE estão conectadas e é formado uma topologia radial de custo mínimo de construção de circuitos, sendo esta, a primeira topologia radial encontrada pelo algoritmo.

Uma vez que a primeira topologia radial é determinada efetua-se o cálculo do Fluxo de Carga do SDEE. Esta etapa tem a finalidade de verificar o estado de operação da solução, ou seja, a qualidade da solução obtida através da checagem das condições de operação do sistema. Foram verificadas o atendimento às restrições do modelo matemático como o balanço do fluxo de potência, limites da magnitude de tensão e capacidade máxima de corrente nos ramos. Por fim foram calculadas as perdas ativas de energia elétrica para a topologia radial proposta e esta primeira etapa do algoritmo é finalizado.

Conforme descrito nas subseções anteriores, o algoritmo de PRIM possui uma natureza míope. Assim sendo, o algoritmo dinâmico possui a mesma característica.

Para contornar esta característica do algoritmo “guloso” uma segunda etapa é executada. Nesta segunda etapa é proposto uma metodologia para a geração de novas soluções radiais com o propósito de garantir a obtenção da solução ótima global. Na subseção seguinte é apresentada a metodologia adotada para obtenção de novas soluções radiais factíveis.

4.4.1 Fase de Melhoria

Esta etapa de melhoria visa estabelecer novas soluções radiais factíveis com o objetivo de encontrar outras topologias radiais de menor custo de construção. Para isto foi implementado uma metodologia que utiliza como base a perturbação do peso associado ao ramo.

Sabe-se que o algoritmo dinâmico PRIM utiliza o valor do custo de construção de cada ramo, através de um peso, para auxiliar na tomada de decisão no processo iterativo de construção dos ramos pertencentes à solução radial. Dentro deste contexto, uma alteração neste peso fará com que, no momento em que o algoritmo escolher o ramo de menor peso dentro do conjunto de ramos candidatos, este não obrigatoriamente seja o ramo de menor custo de construção.

Deve-se salientar que o custo de construção de cada ramo não se altera em hipótese alguma em todo o processo iterativo, mas sim o peso associado a este custo. Por consequência, após a finalização do processo iterativo uma nova topologia radial é estabelecida, podendo ser diferente da topologia inicial com menor custo de construção dos circuitos.

A metodologia adotada para alteração do valor do peso de cada ramo é representada pelas Equações (4.1) e (4.2):

$$M = \left(1 + \frac{rand() \% 81 - 40}{100}\right) \quad (4.1)$$

$$P_n = P_n * M \quad (4.2)$$

Na expressão, M representa a constante de multiplicação que será aplicado para variar o valor do peso P_n para “n” ramos do sistema. Na Equação (4.1) é gerado um valor aleatório entre

0 e 80 pela parcela $rand()$ que após aplicado na equação resultará em uma constante entre 1,4 e 0,6. Portanto, tem-se uma variação de quarenta por cento para mais ou para menos quando aplicado na Equação (4.2).

Este equacionamento é aplicado em todos os ramos do sistema na fase inicial do algoritmo onde é considerado que nenhum ramo pertence a topologia radial e todos os ramos do SDEE são candidatos. Para a primeira topologia radial encontrada pelo sistema considera-se que não há variação dos pesos, sendo este aplicado para as demais tentativas. Por fim, o algoritmo é capaz de gerar, através da perturbação dos pesos, um conjunto de topologias radiais factíveis para a solução do problema do PESDEE.

A fim de evitar a adição de soluções idênticas às já adicionadas ao conjunto de soluções, o algoritmo compara a solução encontrada a cada iteração. A partir da informação dos ramos abertos (ramos não pertencentes à solução radial) é possível identificar se a solução obtida já foi encontrada em etapas anteriores, em caso da solução for idêntica a mesma é descartada. Dessa forma, o conjunto de soluções factíveis possuirá soluções radiais distintas em relação aos ramos conectados (ramos pertencentes à solução radial).

É necessário eleger aquela topologia radial, pertencente ao conjunto de soluções factíveis para a solução do problema de PESDEE, que irá atingir o objetivo estabelecido através da modelagem matemática apresentado na subseção 3.2.

Uma vez conhecidos os valores referentes ao custo de construção dos circuitos e o custo de operação do SDEE obtido com base nas perdas ativas de energia elétrica e o horizonte de planejamento considerado, é possível estabelecer aquela topologia radial, dentro do conjunto de soluções encontradas, aquela que melhor satisfaça o problema do PESDEE. O custo de operação é obtido através do equacionamento (3.8).

O algoritmo fornece como resultado de todo o processo iterativo três soluções para o problema do PESDEE. São elas: Topologia Radial de Menor Custo de Construção de Circuitos; Topologia Radial de Menor Custo de Perdas; e Topologia Radial de Menor Custo Total.

4.5 Fluxograma

Com o propósito de ilustrar todo o processo iterativo com que o algoritmo encontra a solução para o problema do PESDEE é apresentado o fluxograma na Figura 4.7.

4.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o algoritmo implementado para solucionar o problema do PESDEE baseado na modelagem matemática apresentada no capítulo anterior. Este modelo tem a capacidade de encontrar uma topologia radial factível em sua primeira iteração. A partir das próximas iterações o algoritmo garante que a solução não fique presa em um ótimo local, tendo

a capacidade de encontrar diferentes topologias radiais factíveis identificando dentro deste conjunto a solução radial que minimize a função objetivo atendendo às restrições impostas.

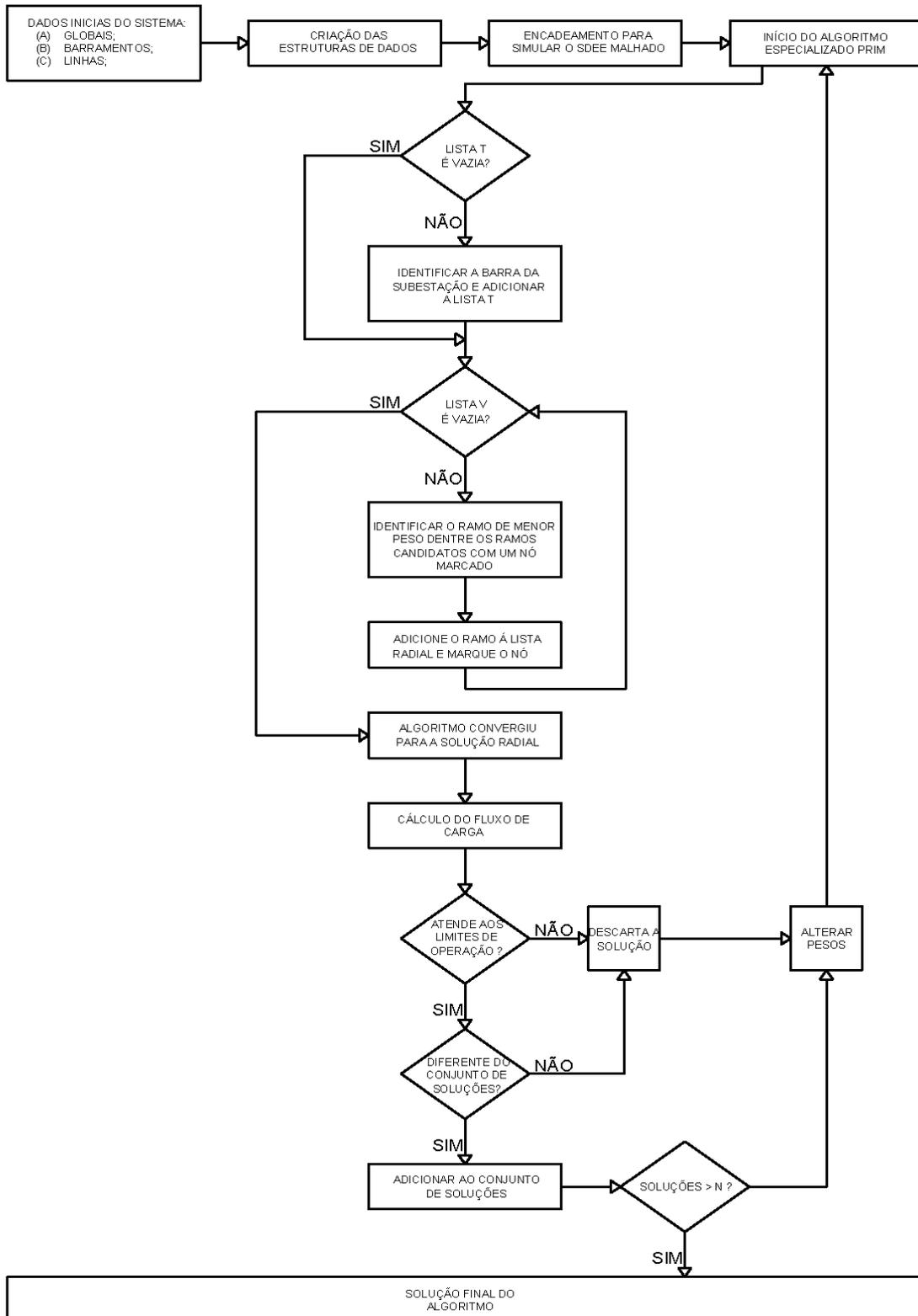


Figura 4.7: Fluxograma do Algoritmo Especializado PRIM.

Capítulo 5

Testes e Resultados

Neste capítulo são apresentados os sistemas utilizados para testes e os resultados obtidos a partir da simulação no algoritmo proposto neste trabalho. O algoritmo foi implementado em linguagem de programação DevC++, versão 5.11. Para testar o desempenho computacional do sistema implementado foram realizadas simulações com sistemas disponíveis na literatura. Para a realização dos testes utilizou-se um Notebook Samsung, Intel® Core™ i5-3230M, CPU @2.60 GHz, 4 GB RAM.

Os sistemas testes selecionados para os testes realizados para resolver o problema do PESDEE foram os sistemas de 23, 33 e 49 barras. A descrição dos sistemas, assim como os resultados obtidos com a simulação, é apresentada nas próximas subseções.

5.1 Sistema de 23 Barras

O sistema de distribuição de 23 barras apresentado em Nahman e Peric (2008) e Gómez *et al.* (2004). Este sistema inicialmente não possui nenhum circuito construído e é constituído por 35 linhas candidatas a adição. É adotado para o sistema as seguintes bases de tensão e potência para o sistema: 34,5 kV e 10 MVA, respectivamente. Para o teste, o limite de variação da magnitude de tensão adotado foi de 3%, e o fator de potência adotado para as demandas de potência foi de 0,9.

A subestação está localizada na barra 1 do sistema e opera como referência de tensão para o restante do sistema. A tensão de referência para a subestação é 35,535kV com ângulo de 0°. É adotado o condutor de alumínio 1/0 para a construção das linhas de média tensão. Os dados referentes a capacidade máxima de condução de corrente, resistência por quilômetro, reatância por quilômetro e custo por quilômetro são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Dados do tipo do condutor utilizado para o sistema de 23 e 33 Barras

Tipo	Capacidade	Resistência	Reatância	Custo
	A	Ω/km	Ω/km	US\$/km
1/0	230	0,6045	0,429	10000

Os dados referentes aos barramentos do SDEE e ramos são apresentados nas Tabela 5.2 e Tabela 5.3. A Tabela 5.2 apresenta a potência ativa disponível na barra da subestação, representada por S_0 , e apresenta, também, a potência demandada em cada barra do sistema de distribuição, S_D .

Tabela 5.2: Dados das Barras do Sistema de 23 Barras

Barra	S_D kVA	S_0 kVA	Barra	S_D kVA	S_0 kVA
1	0	10000	13	320	0
2	0	0	14	320	0
3	640	0	15	320	0
4	320	0	16	320	0
5	320	0	17	320	0
6	320	0	18	320	0
7	320	0	19	320	0
8	320	0	20	320	0
9	320	0	21	320	0
10	320	0	22	320	0
11	320	0	23	320	0
12	320	0			

Tabela 5.3: Dados dos Ramos do Sistema de 23 Barras

Ramo	Barra Entrada	Barra Saída	Comprimento (km)	Ramo	Barra Entrada	Barra Saída	Comprimento (km)
1	1	10	0,20209	19	10	20	0,69728
2	2	8	0,07560	20	11	13	0,50527
3	3	8	2,70790	21	11	21	0,63941
4	3	9	1,82020	22	11	22	0,69245
5	3	16	4,22370	23	12	15	0,98085
6	4	5	0,94020	24	12	23	0,67855
7	4	6	1,50170	25	13	15	0,62291
8	4	8	2,30530	26	14	17	0,44821
9	4	9	3,44790	27	14	23	0,48604
10	5	14	1,01620	28	15	18	0,57114
11	5	23	0,64091	29	15	21	0,60687
12	6	7	0,81807	30	16	20	0,50185
13	6	14	0,81772	31	16	22	0,94829
14	6	16	1,17520	32	17	18	0,44113
15	7	8	0,68661	33	19	20	0,73027
16	8	9	2,05670	34	19	21	0,55500
17	10	14	0,42971	35	19	22	0,58266
18	10	19	0,59489				

A Tabela 5.3 apresenta todos os ramos pertencentes ao sistema de distribuição em sua forma inicial malhado. Estes circuitos são todos os candidatos a participarem da solução radial para a solução do problema de PESDEE.

A Figura 5.1 ilustra o SDEE de 23 barras evidenciando os barramentos e suas conexões. As linhas tracejadas representam os ramos candidatos a participar da topologia radial para a solução do problema de PESDEE. Os números dentro dos círculos e quadrado são os números das barras e da subestação do sistema, respectivamente. E, os números sobre as linhas são os números dos ramos do SDEE.

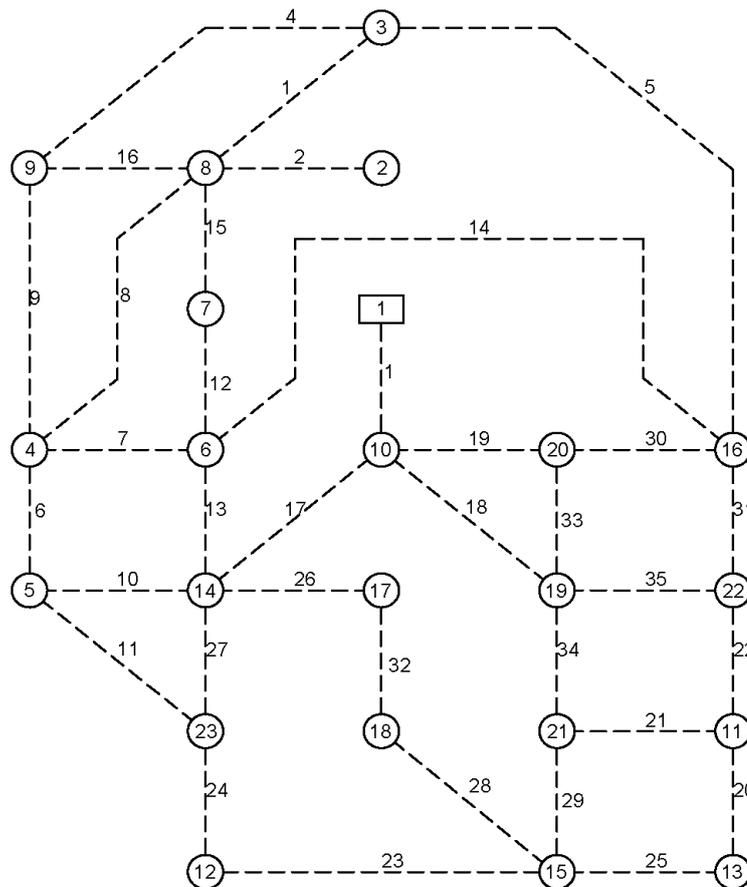


Figura 5.1: Sistema de Distribuição de 23 Barras.

Os dados utilizados para o cálculo do Custo de Operação do SDEE são: horizonte de planejamento de 20 anos, custo das perdas de energia de 0,05 US\$/kWh, fator de perdas de 0,35 e taxa de juros de 0,1.

5.1.1 Resultados para o Sistema Teste de 23 Barras

A primeira etapa do algoritmo é encontrar a primeira topologia radial considerando os pesos originais relacionados ao custo de construção de cada ramo. Estes pesos são atribuídos

de forma crescente desde o ramo de menor custo, cujo peso atribuído é o menor, até o ramo de maior custo, ou seja, maior peso.

O tempo computacional gasto para a determinação da primeira topologia radial é de 0,262 ms. Este tempo considera apenas o tempo gasto para processamento do sistema para encontrar a primeira topologia radial, ou seja, o tempo gasto com a entrada dos dados no sistema, o arquivamento dos resultados e o cálculo do fluxo de carga foram desconsiderados.

A Tabela 5.4 apresenta o processo iterativo do algoritmo para a definição da primeira topologia radial, evidenciando a influência do peso na tomada de decisão.

Na primeira iteração apenas o ramo 1 é candidato, devido ser o único ramo conectado à barra da subestação, dessa forma o ramo 1 é escolhido. Na segunda iteração, com a conexão da barra 10 através do ramo 1, tem-se os ramos 17, 18 e 19 como candidatos, escolhe-se o ramo 17 de menor peso. Na terceira iteração, com a conexão da barra 14 através do ramo 17 tem-se os seguintes ramos candidatos: 18, 19, 13, 10, 26 e 27. Sendo o ramo 26 de menor peso, este é escolhido.

Nota-se que o número de ramos candidatos aumenta a cada iteração devido ao crescimento do número de barras já conectadas ao sistema. Estes ramos candidatos estarão dentro do conjunto de ramos candidatos até o momento que o mesmo for escolhido ou este formar um laço no sistema, quando isto acontecer este ramo é removido do conjunto de ramos candidatos e desloca-se para o conjunto de ramos abertos. Esta situação pode ser evidenciada na nona iteração, onde o ramo 29 deixa de fazer parte do conjunto de ramos candidatos pois se conectado forma um laço, violando a restrição de radialidade do SDEE.

Este processo iterativo segue-se até que todas as barras do sistema estejam conectadas e tem-se o número de ramos conectados igual ao número de barras menos um.

Tabela 5.4: Processo iterativo da 1ª topologia para o Sistema de 23 Barras

Iteração	Peso dos Ramos Candidatos 'Pn'	Ramo Escolhido	Custo do ramo (US\$)
1	$P_1=21$	1	2020,90
2	$P_{17}=22; P_{18}=31; P_{19}=39$	17	4297,10
3	$P_{18}=31; P_{19}=39; P_{13}=41$ $P_{10}=46; P_{26}=24; P_{27}=25$	26	4482,10
4	$P_{18}=31; P_{19}=39; P_{13}=41$ $P_{10}=46; P_{27}=25; P_{32}=23$	32	4411,30
5	$P_{18}=31; P_{19}=39; P_{13}=41;$ $P_{10}=46; P_{27}=25; P_{28}=29$	27	4860,40
6	$P_{18}=31; P_{19}=39; P_{13}=41; P_{10}=46$ $P_{28}=29; P_{24}=36; P_{11}=35$	28	5711,40

7	P ₁₈ =31; P ₁₉ =39; P ₁₃ =41; P ₁₀ =46; P ₂₄ =36; P ₁₁ =35; P ₂₉ =32; P ₂₅ =33; P ₂₃ =45	18	5948,90
8	P ₁₉ =39; P ₁₃ =41; P ₁₀ =46; P ₂₄ =36; P ₁₁ =35; P ₂₉ =32; P ₂₅ =33; P ₂₃ =45; P ₃₃ =40; P ₃₅ =30; P ₃₄ =28	34	5550,00
9	P ₁₉ =39; P ₁₃ =41; P ₁₀ =46; P ₂₄ =36; P ₁₁ =35; P ₂₅ =33; P ₂₃ =45; P ₃₃ =40; P ₃₅ =30; P ₂₁ =34	35	5826,60
10	P ₁₉ =39; P ₁₃ =41; P ₂₅ =33; P ₂₃ =45; P ₃₃ =40; P ₂₁ =34; P ₃₁ =44; P ₂₂ =38	25	6229,10
11	P ₁₉ =39; P ₁₃ =41; P ₁₀ =46; P ₂₄ =36; P ₁₁ =35; P ₂₃ =45; P ₃₃ =40; P ₂₁ =34; P ₃₁ =44; P ₂₂ =38; P ₂₀ =27	20	5052,70
12	P ₁₉ =39; P ₁₃ =41; P ₁₀ =46; P ₂₄ =36; P ₁₁ =35; P ₂₃ =45; P ₃₃ =40; P ₃₁ =44;	11	6409,10
13	P ₁₉ =39; P ₁₃ =41; P ₂₄ =36; P ₂₃ =45; P ₃₃ =40; P ₃₁ =44; P ₆ =43	24	6785,50
14	P ₁₉ =39; P ₁₃ =41; P ₃₃ =40; P ₃₁ =44; P ₆ =43	19	6972,80
15	P ₁₃ =41; P ₃₁ =44; P ₆ =43; P ₃₀ =26;	30	5018,50
16	P ₁₃ =41; P ₆ =43; P ₁₄ =47; P ₅ =54	13	8177,20
17	P ₆ =43; P ₇ =48; P ₁₂ =37; P ₅ =54	12	8180,70
18	P ₆ =43; P ₇ =48; P ₁₅ =37; P ₅ =54	15	6866,10
19	P ₆ =43; P ₇ =48; P ₂ =20; P ₈ =51; P ₁₆ =50; P ₃ =52; P ₅ =54	2	756,00
20	P ₆ =43; P ₇ =48; P ₈ =51; P ₁₆ =50; P ₃ =52; P ₅ =54	6	9402,00
21	P ₁₆ =50; P ₃ =52; P ₅ =54; P ₉ =53	16	20567,00
22	P ₃ =52; P ₅ =54; P ₄ =49	4	18202,00
-	Não há ramos para serem adicionados		151727,40

O custo de construção dos circuitos da primeira topologia radial estabelecida pelo sistema é US\$151.727,40. Após estabelecer a configuração da primeira topologia radial, o sistema calcula o fluxo de potência, para estabelecer o estado do sistema com a topologia determinada. Os valores encontrados para o módulo da tensão em todas as barras e corrente nos ramos ficaram dentro dos limites estipulados inicialmente em 3% e 230A, respectivamente. Atendendo as restrições impostas pelo problema. Pode-se comprovar esta condição através das Tabela 5.5 e Tabela 5.6.

Tabela 5.5: Tensão nas barras da 1ª topologia radial do sistema de 23 Barras.

Barra	Tensão		Barra	Tensão	
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
1	35,535	0	13	35,4142	-0,0327
2	35,3825	-0,0412	14	35,4602	-0,0202
3	35,3175	-0,0589	15	35,4224	-0,0304
4	35,4327	-0,0277	16	35,4931	-0,0113
5	35,4389	-0,026	17	35,4454	-0,0242
6	35,4278	-0,029	18	35,4338	-0,0274
7	35,4007	-0,0363	19	35,4939	-0,0111
8	35,3825	-0,0412	20	35,4965	-0,0104
9	35,3417	-0,0523	21	35,4902	-0,0121
10	35,5056	-0,0079	22	35,49	-0,0121
11	35,4109	-0,0336	23	35,4474	-0,0237
12	35,4429	-0,0249			

Tabela 5.6: Corrente e Perdas da 1ª topologia radial do sistema de 23 Barras.

Ramo	Corrente		Perda (kW)	Ramo	Corrente		Perda (kW)
	Módulo	Ângulo			Módulo	Ângulo	
1	198,69	-25,8698	4,823	19	18,0308	-25,853	0,137
2	0	0	0,000	20	9,03677	-25,876	0,025
4	18,1213	-25,9008	0,361	24	9,02861	-25,867	0,033
6	9,0312	-25,8696	0,046	25	18,0727	-25,875	0,123
11	18,0608	-25,8687	0,126	26	45,1654	-25,872	0,553
12	45,2592	-25,8915	1,013	27	36,1169	-25,867	0,383
13	54,2916	-25,888	1,457	28	27,1065	-25,874	0,254
15	36,2198	-25,8948	0,545	30	9,01583	-25,853	0,025
16	27,1758	-25,8986	0,918	32	36,1374	-25,873	0,348
17	144,598	-25,8762	5,431	34	9,01657	-25,854	0,027
18	27,0488	-25,8537	0,26311	35	9,01661	-25,854	0,029

Para a primeira topologia radial determinada, as perdas ativas totais de energia elétrica foram de 16,921 kW. Para estas perdas ativas, considerando o horizonte de planejamento de 20 anos, o custo de operação desta primeira topologia radial é US\$22.083,66. Somando, assim, para a primeira topologia radial um custo total de US\$173.811,06. A Figura 5.2 ilustra a topologia radial determinada na primeira etapa do algoritmo.

Fase de Melhoria

Na segunda etapa do algoritmo é realizada a etapa de melhoria, cujo objetivo é mitigar a característica míope do sistema. Para tal o sistema efetua 2000 tentativas para determinar

topologias radiais distintas, através da variação dos pesos relacionados ao custo de construção, da topologia radial inicial estabelecida.

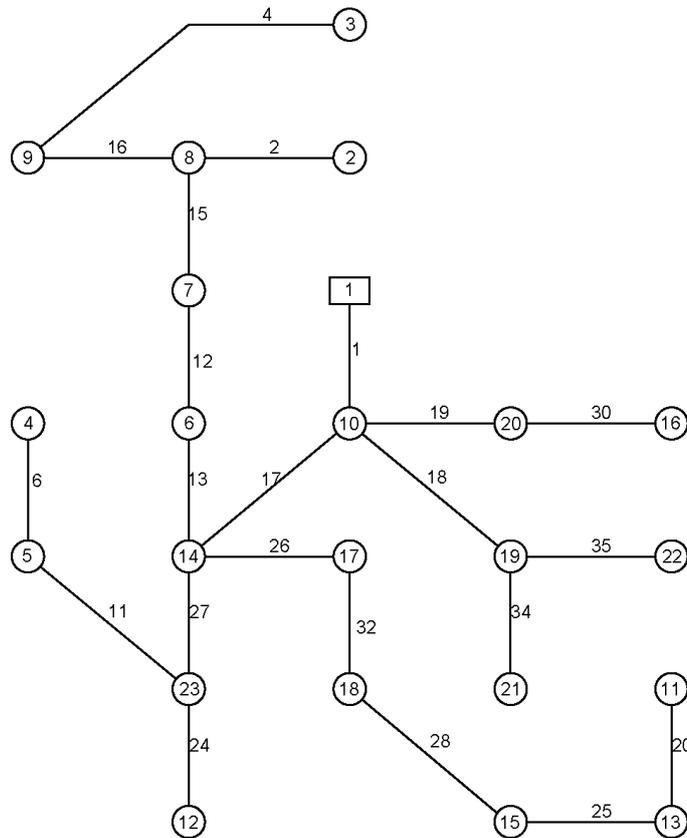


Figura 5.2: Primeira Topologia Radial do Sistema de 23 Barras.

Foram encontradas 1975 soluções radiais distintas, sendo que em todas as soluções é calculado o FC para a topologia encontrada. O tempo computacional total gasto pelo algoritmo foi de 403 milissegundos.

O resultado final do sistema é aquela topologia radial de custo total, custo de construção de circuitos e custo de perdas somados, de menor valor. O sistema identifica, dentro do conjunto das 1975 soluções, 3 topologias distintas. São elas: a topologia radial de menor custo de construção de circuitos, a topologia radial de menor perda ativa de energia e topologia radial de menor custo total.

A Tabela 5.7 mostra as três topologias radiais identificadas pelo algoritmo e faz um comparativo com os resultados obtidos na literatura especializada.

Tabela 5.7: Sistema de 23 Barras – Resumo dos resultados

Soluções	Ramos Abertos	Perdas (kW)	Custo dos Circuitos (US\$)	Custo das Perdas (US\$)	Custo Total (US\$)
(Oliveira, 2010)		15,491	151.892,00	20.227,00	172.119,00
(Brandt, 2016)		12,942	194.480,00	16.890,65	211.370,65
(Cuno, 2016)		16,921	151.727,40	22.083,66	173.811,06
(Benitez, 2017)		14,610	160.370,70	19.067,56	179.438,26
Menor Custo de Construção de Circuitos	29-21-22-33-31-23-10-14-7-8-3-9-5	16,921	151.727,40	22.083,66	173.811,06
Menor Perda de Potência Ativa	28-25-21-11-33-31-23-14-7-4-8-3-9	12,324	180.568,00	16.084,58	196.652,57
Menor Custo Total	29-25-22-33-31-23-10-14-7-8-3-9-5	15,491	151.892,00	20.217,54	172.109,54

A topologia radial de menor custo de construção de circuitos obtida pelo algoritmo apresentou o mesmo resultando em relação ao melhor resultado encontrado na literatura existente para o menor custo de construção de circuitos que é de US\$151.727,40 encontrado em Cuno (2016). A topologia radial de menor perda ativa de energia encontrada pelo sistema foi de, aproximadamente, 4,7% menor que o melhor resultado de perda de energia ativa encontrada por Brandt (2016), cujo valor é de 12,942 kW.

O comparativo dos resultados obtidos pelo algoritmo, em relação aos resultados presentes na literatura, considerou a metodologia adotada neste trabalho para calcular o Custo das Perdas para as topologias encontradas nos trabalhos de Brandt (2016), Cuno (2016) e Benitez (2017), com base no valor da perda ativa de potência respectivos de cada trabalho. O valor do Custo de Construção dos Circuitos é retirado do resultado de cada trabalho, com isto, obtém-se os valores do Custo Total de cada autor.

Observa-se na Tabela 5.7 que o Custo Total da topologia radial final é melhor que os resultados obtidos na literatura. A Figura 5.3 ilustra a topologia radial final obtida pelo algoritmo. Esta topologia radial encontrada para a solução do problema do PESDEE foi aquela que obteve menor custo total de US\$172.109,54.

Adicionalmente, pode-se observar que, apesar do algoritmo encontrar numerosas topologias radiais, objetivando encontrar o menor custo de construção, a primeira solução radial encontrada pelo algoritmo foi a de menor custo.

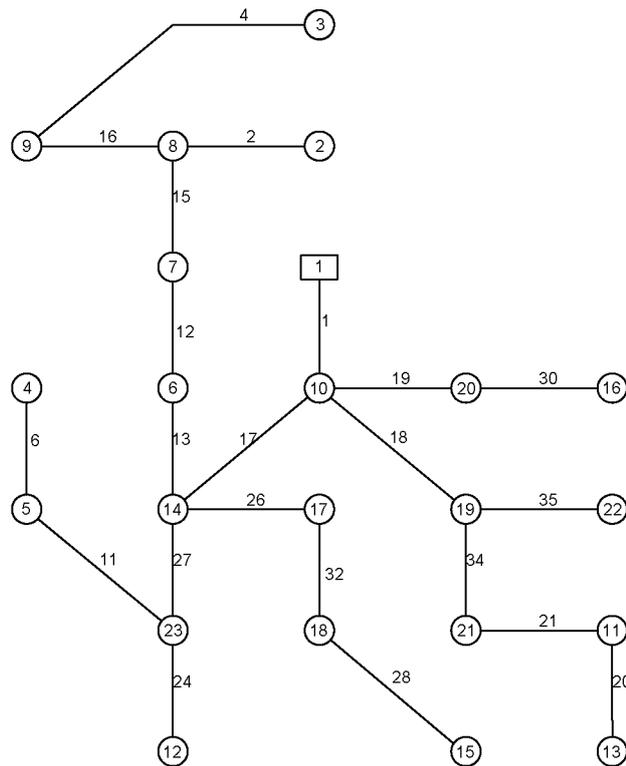


Figura 5.3: Topologia Radial Final do Sistema de 23 Barras.

5.2 Sistema de 33 Barras

O sistema de distribuição de 33 barras foi adaptado de Goswami e Basu (1992). Este sistema inicialmente não possui nenhum circuito construído e é constituído por 37 linhas candidatas a adição. A subestação está localizada na barra 33 do sistema e opera como referência de tensão para o restante do sistema. É adotado como base de cálculo para o sistema os mesmos parâmetros e tipo de condutor utilizados para o Sistema de 23 Barras.

Os dados referentes aos barramentos do sistema de distribuição e ramos são apresentados nas Tabela 5.8 e Tabela 5.9.

5.2.1 Resultados para o Sistema Teste de 33 Barras

Para encontrar a solução do problema do PESDEE para o sistema teste de 33 Barras o sistema utiliza a mesma metodologia utilizada para o sistema de 23 Barras.

Tabela 5.8: Dados das Barras do Sistema de 33 Barras

Barra	P _D kW	Q _D kVAr	S ₀ kVA	Barra	P _D kW	Q _D kVAr	S ₀ kVA
1	0	0	10000	18	90	40	0
2	100	60	0	19	90	40	0
3	90	40	0	20	90	40	0
4	120	80	0	21	90	40	0
5	60	30	0	22	90	40	0
6	60	20	0	23	90	50	0
7	200	100	0	24	420	200	0
8	200	100	0	25	420	200	0
9	60	20	0	26	60	25	0
10	60	20	0	27	60	25	0
11	45	30	0	28	60	20	0
12	60	35	0	29	120	70	0
13	60	35	0	30	200	600	0
14	120	80	0	31	150	70	0
15	60	10	0	32	210	100	0
16	60	20	0	33	60	40	0
17	60	20	0				

Tabela 5.9: Dados dos Ramos do Sistema de 33 Barras

Ramo	Barra Entrada	Barra Saída	Comprimento km	Ramo	Barra Entrada	Barra Saída	Comprimento km
1	33	1	0,1396	20	13	14	1,0673
2	1	2	0,7464	21	14	15	1,2467
3	1	18	0,3058	22	15	16	2,9008
4	2	3	0,5541	23	16	17	1,2549
5	2	22	0,7372	24	17	32	0,9539
6	3	4	0,577	25	18	19	2,7315
7	4	5	1,4596	26	19	20	0,8495
8	5	6	0,8722	27	20	21	1,5834
9	5	25	0,3073	28	22	23	1,5436
10	6	7	1,0108	29	23	24	1,5348
11	7	8	1,711	30	24	28	0,9539
12	7	20	3,8157	31	25	26	0,4302
13	8	9	1,7263	32	26	27	1,9047
14	8	14	3,8157	33	27	28	1,4389
15	9	10	0,2793	34	28	29	0,7683
16	10	11	0,532	35	29	30	1,8482
17	11	12	2,5199	36	30	31	0,6433
18	11	21	3,8157	37	31	32	0,8504
19	12	13	1,2078				

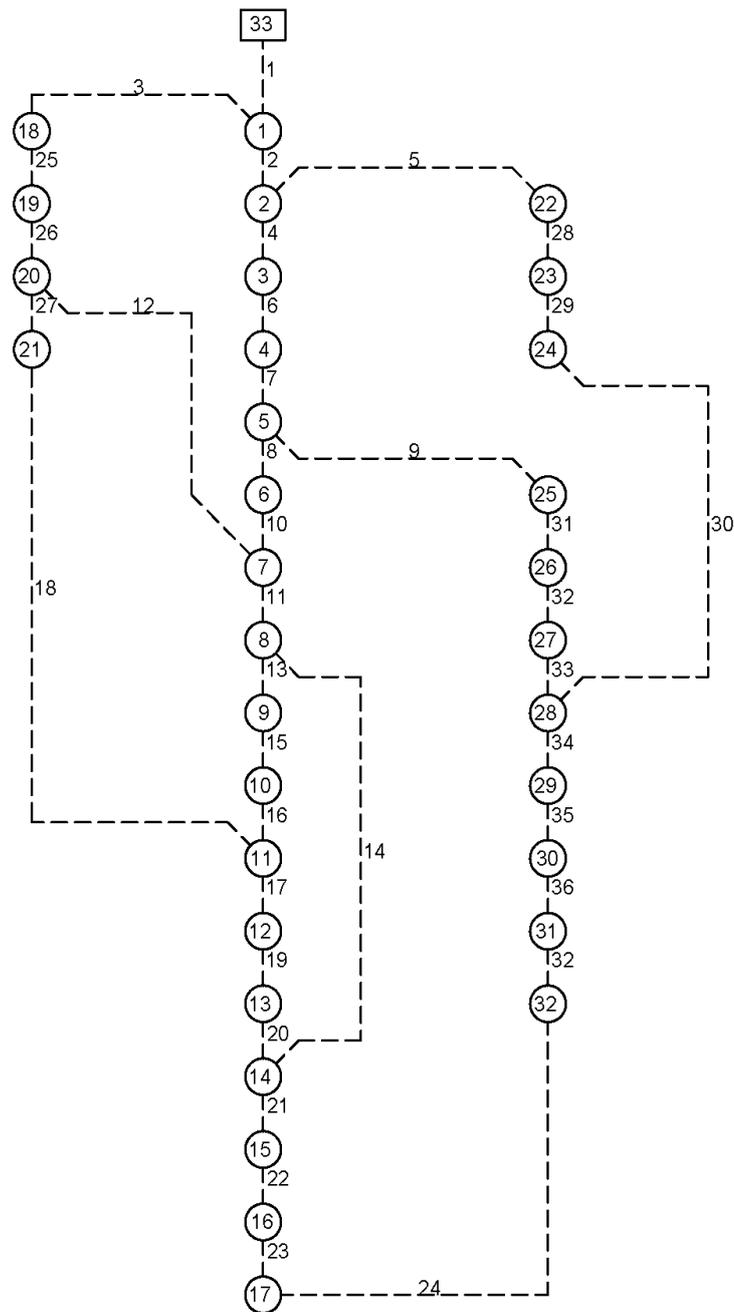


Figura 5.4: Sistema de Distribuição de 33 Barras.

O tempo computacional gasto para a determinação da primeira topologia radial é de 0,170 milissegundos. A Tabela 5.10 apresenta o processo iterativo do algoritmo para a definição da topologia radial da primeira solução, evidenciando a influência do peso na tomada de decisão.

Tabela 5.10: Processo iterativo da 1ª topologia para o Sistema de 33 Barras

Iteração	Peso dos Ramos Candidatos 'Pn'	Ramo Escolhido	Custo do ramo (LIS\$)
1	P ₁ =20	1	1396
2	P ₀₂ =30; P ₃ =22	3	3058
3	P ₀₂ =30; P ₂₅ =52	2	7464
4	P ₂₅ =52; P ₀₄ =26; P ₀₅ =29	4	5541
5	P ₂₅ =52; P ₀₅ =29; P ₀₆ =27	6	5770
6	P ₂₅ =52; P ₀₅ =29; P ₀₇ =43	5	7372
7	P ₂₅ =52; P ₀₇ =43; P ₂₈ =45	7	14596
8	P ₂₅ =52; P ₂₈ =45; P ₀₈ =34; P ₀₉ =23	9	3073
9	P ₂₅ =52; P ₂₈ =45; P ₀₈ =34; P ₃₁ =24	31	4302
10	P ₂₅ =52; P ₂₈ =45; P ₀₈ =34; P ₃₂ =50	8	8722
11	P ₂₅ =52; P ₂₈ =45; P ₃₂ =50; P ₁₀ =37	10	10108
12	P ₂₅ =52; P ₂₈ =45; P ₃₂ =50; P ₁₁ =47; P ₁₂ =54	28	15436
13	P ₂₅ =52; P ₃₂ =50; P ₁₁ =47; P ₁₂ =54; P ₂₉ =44	29	15348
14	P ₂₅ =52; P ₃₂ =50; P ₁₁ =47; P ₁₂ =54; P ₃₀ =36	30	9539
15	P ₂₅ =52; P ₃₂ =50; P ₁₁ =47; P ₁₂ =54; P ₃₃ =42; P ₃₄ =31	34	7683
16	P ₂₅ =52; P ₃₂ =50; P ₁₁ =47; P ₁₂ =54 P ₃₃ =42; P ₃₅ =49	33	14389
17	P ₂₅ =52; P ₁₁ =47; P ₁₂ =54; P ₃₅ =49	11	17110
18	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₃₅ =49 P ₁₃ =48; P ₁₄ =55	13	17263
19	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₃₅ =49 P ₁₄ =55; P ₁₅ =21	15	2793
20	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₃₅ =49 P ₁₄ =55; P ₁₆ =25	16	5320
21	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₃₅ =49 P ₁₄ =55; P ₁₇ =51; P ₁₈ =56	35	18482
22	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₁₄ =55 P ₁₇ =51; P ₁₈ =56; P ₃₆ =28	36	6433
23	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₁₄ =55; P ₁₇ =51 P ₁₈ =56; P ₃₇ =33	37	8504
24	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₁₄ =55; P ₁₇ =51; P ₁₈ =56; P ₂₄ =35	24	9539
25	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₁₄ =55 P ₁₇ =51; P ₁₈ =56; P ₂₃ =41	23	12549

26	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₁₄ =55 P ₁₇ =51; P ₁₈ =56; P ₂₂ =53	17	25199
27	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₁₄ =55 P ₁₈ =56; P ₂₂ =53; P ₁₉ =39	19	12078
28	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₁₄ =55 P ₁₈ =56; P ₂₂ =53; P ₂₀ =38	20	10673
29	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₁₈ =56 P ₂₂ =53; P ₂₁ =40	21	12467
30	P ₂₅ =52; P ₁₂ =54; P ₁₈ =56	25	27315
31	P ₁₂ =54; P ₁₈ =56; P ₂₆ =32	26	8495
32	P ₁₈ =56; P ₂₇ =46	27	15834
	Não há ramos para serem adicionados		343851,00

O custo de construção dos circuitos da primeira topologia radial estabelecida pelo sistema é US\$343.851,00. Os valores calculados para o módulo da tensão em todas as barras e corrente nos ramos ficaram dentro dos limites estipulados inicialmente em 3% e 230A e são apresentados nas Tabela 5.11 e Tabela 5.12.

Tabela 5.11: Tensão nas barras da 1^o topologia radial do sistema de 33 Barras.

Barra	Tensão		Barra	Tensão	
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
33	35,535	0	17	35,196	-0,0918
1	35,5219	-0,0035	18	35,5194	-0,0042
2	35,4594	-0,0203	19	35,5028	-0,0087
3	35,4429	-0,0248	20	35,4993	-0,0096
4	35,4275	-0,029	21	35,4961	-0,0105
5	35,3904	-0,039	22	35,4212	-0,0306
6	35,3717	-0,0441	23	35,3445	-0,0514
7	35,3547	-0,0487	24	35,283	-0,0681
8	35,3339	-0,0544	25	35,3896	-0,0393
9	35,3151	-0,0595	26	35,389	-0,0394
10	35,3125	-0,0602	27	35,2521	-0,0765
11	35,308	-0,0614	28	35,2539	-0,076
12	35,2903	-0,0662	29	35,2338	-0,0815
13	35,2836	-0,068	30	35,2095	-0,0881
14	35,2809	-0,0688	31	35,2033	-0,0898
15	35,2793	-0,0692	32	35,1992	-0,0909
16	35,1943	-0,0923			

Tabela 5.12: Corrente e Perdas da 1ª topologia radial do sistema de 23 Barras.

Ramo	Corrente		Perda (kW)	Ramo	Corrente		Perda (kW)
	Módulo	Ângulo			Módulo	Ângulo	
1	128,769	-25,899	1,399	24	3,51683	-25,911	0,008
2	114,39	-25,905	5,904	25	1,79272	-25,911	0,002
4	11,096	-25,85	0,023	26	1,79705	-25,934	0,002
6	40,7219	-25,892	0,555	27	4,59536	-25,934	0,012
11	70,8903	-25,915	2,240	28	8,32316	-25,852	0,114
12	36,6528	-25,894	0,469	29	5,54903	-25,852	0,016
13	34,7593	-25,896	1,066	30	2,77464	-25,852	0,007
15	29,2988	-25,898	0,453	31	67,9835	-25,917	4,313
16	3,67343	-25,881	0,003	32	54,8219	-25,922	2,788
17	22,9771	-25,902	0,323	33	41,6374	-25,926	1,000
18	16,6523	-25,906	0,287	34	1,83673	-25,881	0,001
19	14,8624	-25,907	0,231	35	1,79411	-25,918	0,003
20	13,0715	-25,908	0,029	36	35,9027	-25,928	0,599
21	11,5399	-25,909	0,043	37	17,9523	-25,932	0,360
22	9,57258	-25,91	0,140	38	13,2511	-25,933	0,068
23	7,60428	-25,91	0,042	39	6,64401	-25,934	0,023

Para a primeira topologia radial determinada, as perdas ativas totais de energia elétrica foram de 22,521 kW. Para estas perdas ativas, considerando o horizonte de planejamento de 20 anos, o custo de operação desta primeira topologia radial é US\$29.392,45. Somando, assim, para a primeira topologia radial um custo total de US\$373.243,46. A Figura 5.5 ilustra a topologia radial determinada na primeira etapa do algoritmo.

Fase de Melhoria

Na segunda etapa é efetuada 2000 tentativas para encontrar topologias distintas. Foram encontradas 787 soluções radiais, sendo que em todas as soluções é calculado o FC para a topologia encontrada. O tempo computacional total gasto pelo algoritmo foi de 197 milissegundos.

A topologia radial de menor custo total para o sistema teste de 33 Barras foi a mesma encontrada na primeira topologia radial encontrada pelo sistema. Dessa forma, pode-se verificar que o algoritmo foi capaz de encontrar, em sua primeira iteração, a mesma topologia que a encontrada na fase de melhoria.

A Tabela 5.13 mostra as topologias radiais encontradas e faz um comparativo com os resultados obtidos na literatura especializada.

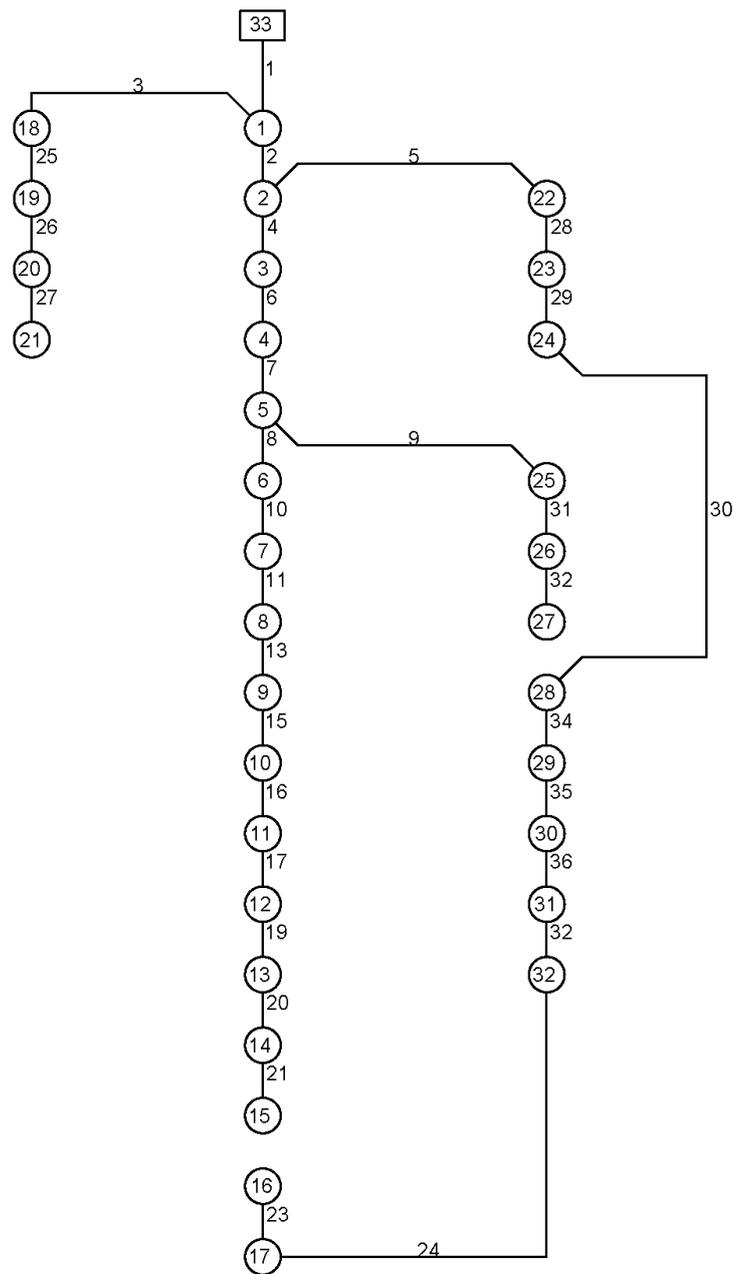


Figura 5.5: Primeira Topologia Radial do Sistema de 33 Barras.

A solução de menor perda de potência ativa obteve um resultado próximo ao encontrado por Brandt (2016). Contudo, o valor do custo dos circuitos possui uma diferença de 10,9%, evidenciando que a topologia deste trabalho obteve um resultado melhor que o apresentado.

O valor do custo de perdas para os trabalhos de Brandt (2016), Cuno (2016) e Benitez (2017) foram obtidos conforme descrito para o sistema de 23 Barras.

A topologia radial final encontrada para a solução do problema do PESDEE foi aquela

que obteve menor custo total de US\$373.243,46. A solução encontrada é a mesma apresentada em Cuno (2016) e Benitez (2017). Esta topologia radial é a primeira topologia radial encontrada pelo algoritmo ilustrada pela Figura 5.5.

Tabela 5.13: Sistema de 33 Barras – Resumo dos resultados

Soluções	Ramos Abertos	Perdas (kW)	Custo dos Circuitos (US\$)	Custo das Perdas (US\$)	Custo Total (US\$)
(Brandt, 2016)		19,446	464.760,00	25.379,04	490.139,04
(Cuno, 2016)		22,521	343.851,00	29.392,24	373.243,46
(Benitez, 2017)		22,521	343.851,00	29.392,24	373.243,46
Menor Perda de Potência Ativa	10-23-33-13-14	19,428	413.911,00	25.356,27	439.267,28
Menor Custo Total	32-22-12-14-18	22,521	343.851,00	29.392,45	373.243,46

5.3 Sistema de 49 Barras

O sistema de distribuição de 49 barras é uma adaptação do sistema apresentado em Oliveira (2010). Este sistema originalmente possui 136 barras, sendo alimentadas por duas subestações e 149 ramos, sendo deste 134 ramos já existentes e 15 ramos de ligação para realizar a transferência de carga entre as subestações.

Para a aplicação neste trabalho, foi considerado uma parcela do sistema, resultando em um sistema composto por 1 subestação e 49 barramentos. É constituído por 76 ramos candidatas a adição.

As bases de tensão e potência para o sistema são: 34,5 kV e 25 MVA, respectivamente. Para o teste, o limite de variação da magnitude de tensão adotado foi de 5%, e o fator de potência adotado para as demandas de potência foi de 0,9.

A subestação está localizada na barra 1 do sistema e opera como referência de tensão para o restante do sistema. A tensão da subestação é 35,535kV e ângulo de 0°.

Os dados referentes a resistência, reatância e custo por quilômetro do condutor utilizado na simulação deste sistema teste são apresentados na Tabela 5.14.

Os dados referentes aos barramentos do sistema de distribuição e ramos são apresentados nas Tabela 5.15 e Tabela 5.16.

Tabela 5.14: Dados do condutor para o sistema de 49 Barras

Tipo	Capacidade A	Resistência Ω/km	Reatância Ω/km	Custo US\$/km
1	230	0,04068	0,03076	4000

Tabela 5.15: Dados das Barras do Sistema de 49 Barras

Barra	SD kVA	S0 kVA	Barra	SD kVA	S0 kVA
1	0,0000	25000	26	55,7429	0
2	1,5000	0	27	83,0344	0
3	1,5000	0	28	154,0363	0
4	1,5000	0	29	252,0390	0
5	93,6563	0	30	80,3755	0
6	335,0450	0	31	94,8322	0
7	160,2193	0	32	86,4655	0
8	256,8657	0	33	418,3810	0
9	67,0485	0	34	497,8233	0
10	134,0893	0	35	1235,2656	0
11	150,8472	0	36	97,6203	0
12	125,7155	0	37	269,0935	0
13	268,1983	0	38	264,8550	0
14	313,5349	0	39	94,8332	0
15	326,8763	0	40	303,9557	0
16	231,8113	0	41	153,4063	0
17	213,7290	0	42	326,3331	0
18	51,4225	0	43	104,3149	0
19	45,7949	0	44	154,7971	0
20	33,5347	0	45	108,8097	0
21	257,0954	0	46	436,9400	0
22	67,0717	0	47	78,1756	0
23	257,0954	0	48	5,4618	0
24	9,8459	0	49	25,0696	0
25	65,0314	0			

A Figura 5.6 ilustra o SDEE de 49 barras evidenciando os barramentos e suas conexões. As linhas tracejadas representam os ramos candidatos a participar da solução do problema de PESDEE.

É adotado como base de cálculo do custo de operação do SDEE os mesmos parâmetros utilizados para o Sistema de 23 e 33 Barras.

Tabela 5.16: Dados dos Ramos do Sistema de 49 Barras

Ramo	Barra Entrada	Barra Saída	Comprimento (km)	Ramo	Barra Entrada	Barra Saída	Comprimento (km)
1	1	2	0,7522	39	23	30	1,0101
2	1	3	0,7522	40	24	25	0,7501
3	1	4	0,7522	41	24	28	0,4954
4	2	6	0,4954	42	24	29	0,8901
5	3	7	0,7522	43	25	29	0,4954
6	4	8	0,7522	44	26	31	1,0101
7	5	6	0,7501	45	27	30	0,7501
8	5	9	0,4954	46	27	31	1,2532
9	6	10	0,4954	47	29	31	1,2532
10	7	11	0,4954	48	29	34	1,1533
11	7	15	0,4954	49	30	32	0,4954
12	8	16	0,4954	50	31	32	1,2455
13	8	23	1,6125	51	31	35	0,4954
14	9	10	0,7501	52	32	36	0,4954
15	9	12	0,4954	53	33	34	0,7501
16	10	13	0,4954	54	33	45	1,6648
17	11	14	0,4954	55	34	35	1,2582
18	12	13	0,7501	56	34	37	0,4954
19	12	17	0,4954	57	35	36	1,2455
20	13	18	0,4954	58	35	38	0,4954
21	13	19	1,2689	59	35	40	1,6125
22	14	15	0,4954	60	36	39	0,4954
23	15	21	1,0101	61	37	40	0,4954
24	16	22	1,0101	62	38	39	1,2455
25	17	19	0,4954	63	38	41	0,4954
26	18	20	0,4954	64	39	43	0,4954
27	18	21	1,2689	65	40	45	0,4954
28	19	20	0,7501	66	40	46	1,2582
29	19	24	0,4964	67	41	42	0,7501
30	20	21	1,1533	68	41	46	0,7501
31	20	25	0,4954	69	42	43	0,4954
32	21	22	0,7501	70	42	47	0,4954
33	21	26	0,4954	71	43	44	0,4954
34	21	29	1,5866	72	43	48	0,4954
35	22	23	0,4954	73	44	49	0,4954
36	22	26	0,8901	74	46	47	0,7922
37	22	27	0,4954	75	47	48	0,4954
38	23	27	0,7501	76	48	49	0,4954

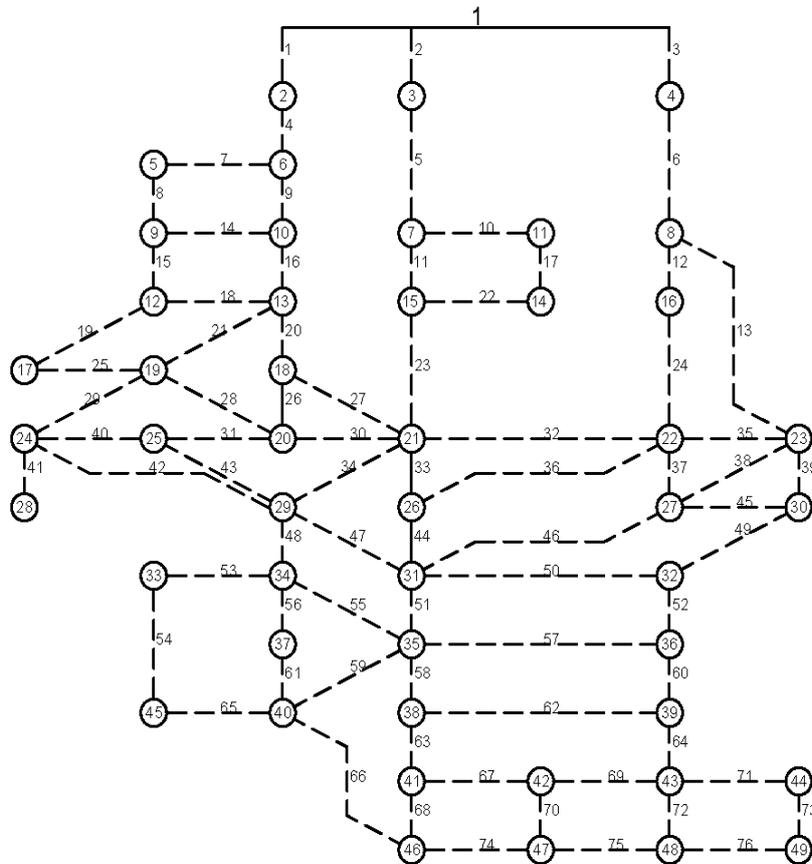


Figura 5.6: Sistema de Distribuição de 49 Barras

5.3.1 Resultados para o Sistema Teste de 49 Barras

Para encontrar a solução do problema do PESDEE para o sistema teste de 49 Barras o sistema utiliza a mesma metodologia utilizada para o sistema de 23 e 33 Barras.

O tempo computacional gasto para a determinação da primeira topologia radial é de 0,823ms.

A Tabela 5.17 apresenta o processo iterativo do algoritmo para a definição da topologia radial da primeira solução, evidenciando a influência do peso na tomada de decisão.

O custo de construção dos circuitos da primeira topologia radial estabelecida pelo sistema é US\$111.056,00. Os valores calculados para o módulo da tensão em todas as barras e corrente nos ramos ficaram dentro dos limites estipulados inicialmente em 5% e 230A e são apresentados nas e Tabela 5.18 e Tabela 5.19.

Tabela 5.17: Processo iterativo da 1ª topologia para o Sistema de 49 Barras

Iteração	Peso (Ramos Candidatas)	Ramo Escolhida	Custo (US\$)
1	P ₁ =69; P ₂ =70; P ₃ =71	1	1981,6
2	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₄ =20	4	1981,6
3	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₇ =58; P ₉ =22	9	1981,6
4	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₇ =58 P ₁₄ =59; P ₁₆ =27	16	1981,6
5	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₇ =58; P ₁₄ =59; P ₁₈ =60; P ₂₁ =90; P ₂₀ =30;	20	1981,6
6	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₇ =58; P ₁₄ =59; P ₁₈ =60; P ₂₁ =90; P ₂₆ =33; P ₂₇ =91	26	1981,6
7	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₇ =58; P ₁₄ =59; P ₁₈ =60; P ₂₁ =90; P ₂₇ =91; P ₃₀ =81; P ₃₁ =34; P ₂₈ =61	31	1981,6
8	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₇ =58; P ₁₄ =59; P ₁₈ =60; P ₂₁ =90; P ₂₇ =91; P ₃₀ =81; P ₂₈ =61; P ₄₃ =39; P ₄₀ =64;	43	1981,6
9	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₇ =58; P ₁₄ =59; P ₁₈ =60; P ₂₁ =90; P ₂₇ =91; P ₃₀ =81; P ₂₈ =61; P ₄₀ =64; P ₃₄ =92; P ₄₇ =87; P ₄₂ =76; P ₄₈ =82;	7	3000,4
10	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₁₄ =59; P ₁₈ =60; P ₂₁ =90; P ₂₇ =91; P ₃₀ =81; P ₂₈ =61; P ₄₀ =64; P ₃₄ =92; P ₄₇ =87; P ₄₂ =76; P ₄₈ =82; P ₈ =21;	8	1981,6
11	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₁₈ =60; P ₂₁ =90; P ₂₇ =91; P ₃₀ =81; P ₂₈ =61; P ₄₀ =64; P ₃₄ =92; P ₄₇ =87; P ₄₂ =76; P ₄₈ =82; P ₁₅ =26;	15	1981,6
12	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₂₁ =90; P ₂₇ =91; P ₃₀ =81; P ₂₈ =61; P ₄₀ =64; P ₃₄ =92; P ₄₇ =87; P ₄₂ =76; P ₄₈ =82; P ₁₉ =29;	19	1981,6
13	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₂₁ =90; P ₂₇ =91; P ₃₀ =81; P ₂₈ =61; P ₄₀ =64; P ₃₄ =92; P ₄₇ =87; P ₄₂ =76; P ₄₈ =82; P ₂₅ =32;	25	1981,6
14	P ₂ =70; P ₃ =71; P ₂₇ =91; P ₃₀ =81; P ₄₀ =64; P ₃₄ =92; P ₄₇ =87; P ₂₉₋₂₄ =76; P ₄₈ =82; P ₂₉ =57;	29	1981,6

15	$P_2=70; P_3=71; P_{27}=91; P_{30}=81;$ $P_{34}=92; P_{47}=87; P_{48}=82; P_{41}=38;$	41	1981,6
16	$P_2=70; P_3=71; P_{27}=91; P_{30}=81;$ $P_{34}=92; P_{47}=87; P_{48}=82;$	2	3008,8
17	$P_3=71; P_{27}=91; P_{30}=81; P_{34}=92;$ $P_{47}=87; P_{48}=82; P_5=72;$	3	3008,8
18	$P_{27}=91; P_{30}=81; P_{34}=92; P_{47}=87;$ $P_{48}=82; P_5=72; P_6=73;$	5	3008,8
19	$P_{27}=91; P_{30}=81; P_{34}=92; P_{47}=87;$ $P_{48}=82; P_6=73; P_{10}=23; P_{11}=24;$	10	1981,6
20	$P_{27}=91; P_{30}=81; P_{34}=92; P_{47}=87;$ $P_{48}=82; P_6=73; P_{11}=24; P_{17}=28;$	11	1981,6
21	$P_{27}=91; P_{30}=81; P_{34}=92; P_{47}=87;$ $P_{48}=82; P_6=73; P_{17}=28; P_{22}=31;$ $P_{23}=77;$	17	1981,6
22	$P_{27}=91; P_{30}=81; P_{34}=92; P_{47}=87;$ $P_{48}=82; P_6=73; P_{23}=77;$	6	3008,8
23	$P_{27}=91; P_{30}=81; P_{34}=92; P_{47}=87;$ $P_{48}=82; P_{23}=77; P_{12}=25; P_{13}=93;$	12	1981,6
24	$P_{27}=91; P_{30}=81; P_{34}=92; P_{47}=87;$ $P_{48}=82; P_{23}=77; P_{13}=93; P_{24}=78;$	23	4040,4
25	$P_{47}=87; P_{48}=82; P_{13}=93;$ $P_{24}=78; P_{32}=62; P_{33}=35;$	33	1981,6
26	$P_{47}=87; P_{48}=82; P_{13}=93; P_{24}=78;$ $P_{32}=62; P_{33}=75; P_{44}=80;$	32	3000,4
27	$P_{47}=87; P_{48}=82; P_{13}=93;$ $P_{44}=80; P_{35}=36; P_{37}=37;$	35	1981,6
28	$P_{47}=87; P_{48}=82; P_{44}=80;$ $P_{37}=37; P_{39}=79; P_{38}=63;$	37	1981,6
29	$P_{47}=87; P_{48}=82; P_{44}=80;$ $P_{39}=79; P_{46}=86; P_{45}=65;$	45	3000,4
30	$P_{47}=87; P_{48}=82; P_{44}=80;$ $P_{46}=86; P_{49}=40;$	49	1981,6

31	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₂ =42	52	1981,6
32	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₇ =84; P ₆₀ =45	60	1981,6
33	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₇ =84; P ₆₂ =85; P ₆₄ =48;	64	1981,6
34	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₇ =84; P ₆₂ =85; P ₆₉ =50; P ₇₂ =53; P ₇₁ =52;	69	1981,6
35	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₇ =84; P ₆₂ =85; P ₇₂ =53; P ₇₁ =52; P ₆₇ =67; P ₇₀ =51;	70	1981,6
36	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₇ =84; P ₆₂ =85; P ₇₂ =53; P ₇₁ =52; P ₆₇ =67; P ₇₄ =74; P ₇₅ =55;	71	1981,6
37	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₇ =84; P ₆₂ =85; P ₇₂ =53; P ₆₇ =67; P ₇₄ =74; P ₇₅ =55; P ₇₃ =54;	72	1981,6
38	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₇ =84; P ₆₂ =85; P ₆₇ =67; P ₇₄ =74; P ₇₃ =54; P ₇₆ =56;	73	1981,6
39	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₇ =84; P ₆₂ =85; P ₆₇ =67; P ₇₄ =74;	67	3000,4
40	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₇ =84; P ₆₂ =85; P ₇₄ =74; P ₆₃ =47; P ₆₈ =68;	63	1981,6
41	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₅₇ =84; P ₇₄ =74; P ₆₈ =68; P ₅₈ =44;	58	1981,6
42	P ₄₇ =87; P ₄₈ =82; P ₄₄ =80; P ₄₆ =86; P ₅₀ =83; P ₇₄ =74; P ₆₈ =68; P ₅₉ =94; P ₅₅ =88; P ₅₁ =41;	51	1981,6
43	P ₄₈ =82; P ₇₄ =74; P ₆₈ =68; P ₅₉ =94; P ₅₅ =88;	68	3000,4
44	P ₄₈ =82; P ₅₉ =94; P ₅₅ =88; P ₆₆ =89;	48	4613,2

45	P ₅₉ =94; P ₆₆ =89; P ₅₆ =43; P ₅₃ =66;	56	1981,6
46	P ₅₉ =94; P ₆₆ =89; P ₅₃ =66; P ₆₁ =46;	61	1981,6
47	P ₅₃ =66; P ₆₅ =49;	65	1981,6
48	P ₅₃ =66; P ₅₄ =95;	53	3000,4
	Não há ramos candidatos para serem conectados		111056

Tabela 5.18: Tensão nas barras da 1ª topologia radial do sistema de 49 Barras.

Barra	Tensão		Barra	Tensão	
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
1	35,535	0	26	35,5159	-0,0061
2	35,5313	-0,0012	27	35,5098	-0,0081
3	35,5298	-0,0017	28	35,5267	-0,0027
4	35,5345	-0,0002	29	35,5203	-0,0047
5	35,5282	-0,0022	30	35,5064	-0,0092
6	35,5289	-0,0019	31	35,4917	-0,0139
7	35,5246	-0,0033	32	35,5042	-0,0099
8	35,534	-0,0003	33	35,5173	-0,0057
9	35,5278	-0,0023	34	35,5177	-0,0055
10	35,5273	-0,0025	35	35,4918	-0,0139
11	35,5243	-0,0034	36	35,502	-0,0106
12	35,5274	-0,0024	37	35,5172	-0,0057
13	35,5257	-0,003	38	35,4927	-0,0136
14	35,524	-0,0035	39	35,4999	-0,0112
15	35,5216	-0,0043	40	35,5169	-0,0058
16	35,5338	-0,0004	41	35,4938	-0,0132
17	35,5271	-0,0025	42	35,4961	-0,0125
18	35,5243	-0,0034	43	35,4979	-0,0119
19	35,5269	-0,0026	44	35,4978	-0,0119
20	35,5229	-0,0039	45	35,5169	-0,0058
21	35,516	-0,0061	46	35,4934	-0,0134
22	35,5121	-0,0073	47	35,4961	-0,0125
23	35,5119	-0,0074	48	35,4979	-0,0119
24	35,5268	-0,0026	49	35,4978	-0,0119
25	35,5216	-0,0043			

Tabela 5.19: Corrente e Perdas da 1ª topologia radial do sistema de 49 Barras.

Ramo	Corrente		Perda (kW)	Ramo	Corrente		Perda (kW)
	Módulo	Ângulo			Módulo	Ângulo	
1	97,0878	-25,846	0,28843	35	7,23969	-25,849	0,00106
2	138,348	-25,852	0,58568	37	93,5848	-25,855	0,17650
3	13,7946	-25,842	0,00582	41	4,33579	-25,845	0,00038
4	97,0455	-25,846	0,18980	43	52,0896	-25,847	0,05468
5	138,306	-25,852	0,58533	45	91,2464	-25,855	0,25406
6	13,7524	-25,842	0,00579	48	44,9939	-25,848	0,09498
7	19,9798	-25,844	0,01218	49	88,9828	-25,855	0,15957
8	17,3437	-25,844	0,00606	51	2,67195	-25,856	0,00014
9	67,6356	-25,847	0,09219	52	86,5474	-25,855	0,15095
10	13,0723	-25,845	0,00344	53	11,7797	-25,848	0,00423
11	120,724	-25,853	0,29371	56	19,1981	-25,848	0,00743
12	6,52368	-25,842	0,00086	58	37,4762	-25,856	0,02830
15	15,4564	-25,844	0,00481	60	83,7977	-25,855	0,14151
16	63,8613	-25,847	0,08219	61	11,6217	-25,848	0,00272
17	8,82599	-25,845	0,00157	63	44,9385	-25,856	0,04070
19	11,9179	-25,845	0,00286	64	81,1263	-25,855	0,13264
20	56,3119	-25,847	0,06391	65	3,06361	-25,848	0,00019
23	111,522	-25,854	0,51105	67	61,571	-25,856	0,11568
25	5,90195	-25,845	0,00070	68	12,3105	-25,855	0,00462
26	54,8644	-25,847	0,06066	69	72,9669	-25,855	0,10730
29	4,61293	-25,845	0,00043	70	2,20237	-25,854	0,00010
31	53,9203	-25,847	0,05859	71	5,06698	-25,854	0,00052
32	102,713	-25,854	0,32192	72	0,15386	-25,854	0,00000
33	1,56952	-25,848	0,00005	73	0,70623	-25,854	0,00001

Para a primeira topologia radial determinada, as perdas ativas totais de energia elétrica foram de 4,656 kW. Para estas perdas ativas, considerando o horizonte de planejamento de 20 anos, o custo de operação desta primeira topologia radial é US\$6.077,09. Somando, assim, para a primeira topologia radial um custo total de US\$117.133,09. A Figura 5.7 ilustra a topologia radial determinada na primeira etapa do algoritmo.

Fase de Melhoria

Na segunda etapa é efetuada 2000 tentativas para encontrar topologias distintas. Foram encontradas 2000 soluções radiais, sendo que em todas as soluções é calculado o FC para a topologia encontrada. O tempo computacional total gasto pelo algoritmo foi de 1,08 segundos.

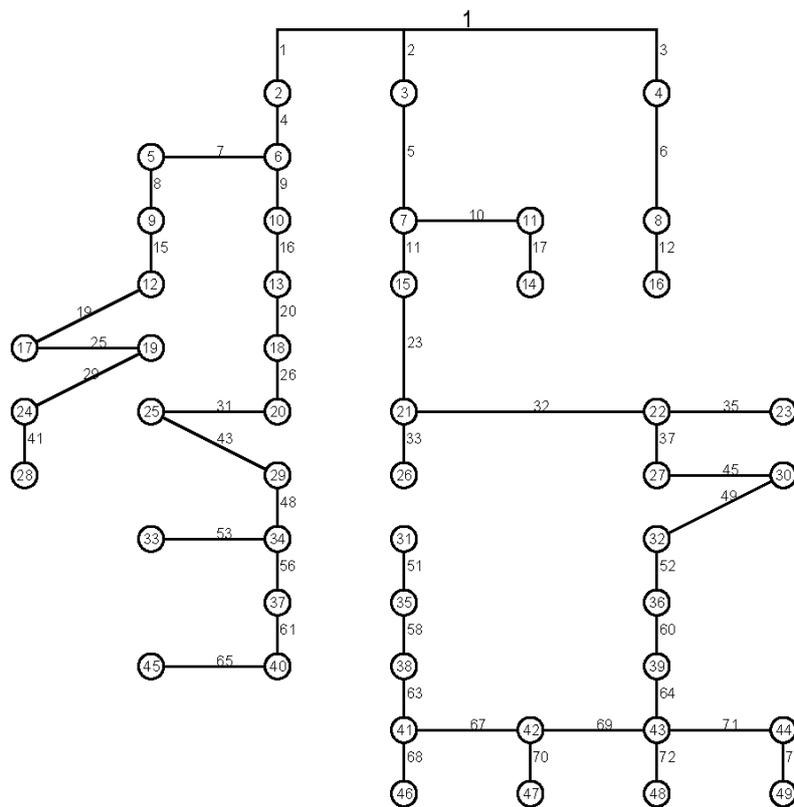


Figura 5.7: Topologia Radial Inicial do Sistema de 49 Barras

A Tabela 5.20 mostra as topologias radiais encontradas e faz um comparativo com os resultados obtidos na literatura especializada.

Obteve-se um melhor resultado de custo total menor quando comparado com as topologias radiais encontrados nos trabalhos apresentados. Para fazer este comparativo, empregou-se a metodologia adotada neste trabalho para calcular o custo das perdas para a topologia encontrada no trabalho de Benitez (2017), com base no valor da perda ativa de potência. Quando somado ao valor referente ao custo de construção dos circuitos, o mesmo é maior que o encontrado pela topologia radial definida pelo algoritmo.

O sistema desenvolvido neste trabalho teve a capacidade de encontrar o mesmo valor que o apresentado em Cuno (2016) para a topologia radial de menor custo de construção de circuitos. Já o menor valor da perda ativa de energia elétrica representa o menor valor quando comparado com todas as soluções encontradas.

A Figura 5.8 ilustra a topologia radial final obtida pelo algoritmo. A topologia radial final encontrada para a solução do problema do PESDEE foi aquela que obteve menor custo total de US\$116.989,67.

Tabela 5.20: Sistema de 49 Barras – Resumo dos resultados

Soluções	Ramos Abertos	Perda (kW)	Custo dos Circuitos (US\$)	Custo das Perdas (US\$)	Custo Total (US\$)
(Cuno, 2016)			111.056,00	-	-
(Benitez, 2017)		6,553	119.156,00	8.553,08	127.162,08
Menor Custo de Construção de Circuitos	22-75-76-14-18-28-38-40-74-36-42-24-39-44-30-50-57-62-46-47-55-66-21-27-34-13-59-54	4,656	111.056,00	6.077,09	117.133,09
Menor Perda de Potência Ativa	17-72-76-07-14-28-32-38-40-67-74-36-42-23-39-44-50-57-62-47-55-66-21-27-34-13-59-54	3,433	114.681,20	4.481,34	119.162,55
Menor Custo Total	22-70-73-07-14-18-28-38-67-68-36-42-23-39-30-50-57-62-46-47-55-66-21-27-34-13-59-54	3,620	112.264,00	4.725,27	116.989,67

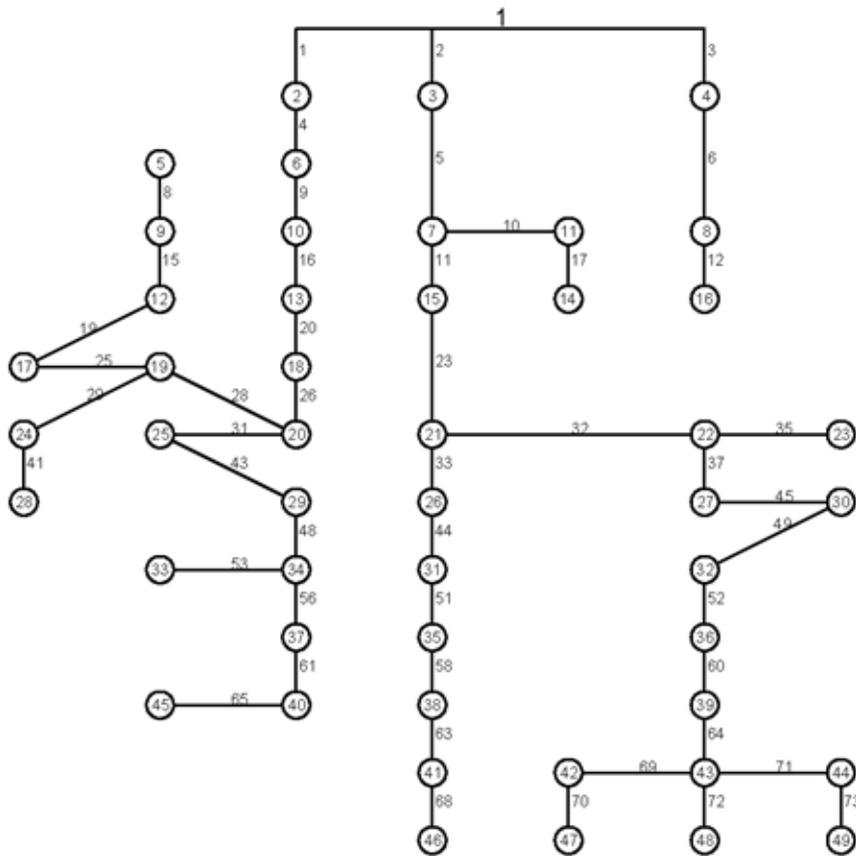


Figura 5.8: Topologia Radial Final do Sistema de 49 Barras.

5.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os testes e resultados obtidos pelo algoritmo em três sistemas testes apresentados na literatura: 23 Barras, 33 Barras e 49 Barras. O sistema encontrou uma topologia radial factível em sua primeira iteração, sendo que para o sistema de 33 Barras foi a solução ótima. Para os demais sistemas testes, o algoritmo obteve soluções de melhor qualidade através da estratégia adotada na fase de melhoria.

A partir dos resultados obtidos pode-se comprovar a eficiência do algoritmo em relação ao esforço computacional. O algoritmo teve a capacidade de realizar 2000 tentativas em cada teste realizado e encontrar um número significativo de topologias radiais factíveis em um tempo de execução baixo. A Tabela 5.21 mostra a quantidade de soluções obtidas para cada teste e o tempo de execução total do algoritmo.

Nota-se que o tempo de execução e o número de soluções encontradas para o sistema teste de 33 Barras é menor que o sistema teste de 23 Barras. Isto acontece, devido ao sistema de 23 Barras possuir um número menor de soluções se comparado ao sistema de 23 Barras. O sistema de 49 Barras possui maior complexidade, possuindo mais possibilidades de construção.

Tabela 5.21: Resumo dos Resultados para os Sistemas Testes

	Sistema 23 Barras	Sistema 33 Barras	Sistema 49 Barras
Nº de Soluções	1975	787	2000
Tempo (ms)	403	197	1080

Capítulo 6

Conclusões

O algoritmo desenvolvido utiliza como base a teoria de PRIM para a minimização dos custos de investimentos da solução. A vantagem desta teoria é a geração de uma solução de boa qualidade logo em sua primeira solução. E, através da estratégia aplicada para a geração de novas soluções, o sistema é capaz de encontrar topologias distintas para a solução do problema do PESDEE.

Nos testes realizados para verificar a eficiência do sistema desenvolvido, foram encontradas soluções com perdas ativas de energia elétrica menores que as melhores soluções disponíveis na literatura para todos os sistemas testados. Foram encontrados os mesmos resultados quando analisados as soluções que consideram os menores custos de construção de circuitos. E, por fim, foram encontrados resultados melhores em relação ao custo total para todos os sistemas testes com exceção do sistema de 23 Barras, que ficou com resultados iguais aos da literatura pelo motivo de ter poucos ramos.

Todos estes resultados foram obtidos com um tempo de execução excelente e esforço computacional mínimo. Isto acontece, devido a modelagem computacional empregada no algoritmo, através da utilização da alocação dinâmica de memória e o uso de ponteiros como recurso para acessar os dados na memória. Esta formulação possibilitou a utilização da memória apenas no exato momento em que esta fosse requerida, sem a necessidade de ocupar espaço na memória e, também o acesso rápido aos dados através dos ponteiros sem a necessidade de realizar numerosos testes condicionais. Possibilitando um menor carregamento do sistema, reduzindo o esforço computacional no processo de busca pela solução. Devido às características de tempo de execução e esforço computacional baixos este sistema pode ser estendido para considerar outros aspectos do PESDEE e até mesmo para a aplicação na operação em tempo real dos SDEE.

Para uma extensão do sistema desenvolvido neste trabalho pode ser considerado o aperfeiçoamento da determinação da solução de forma a comprovar a melhor topologia radial global para o problema do PESDEE. Pode ser considerado, também, a influência da conexão de geração distribuída, como os sistemas fotovoltaicos e carros elétricos interligados à rede. Assim como considerar a variação da demanda ao longo do dia para a determinação de uma topologia radial ótima para a solução do problema do PESDEE.

Referências Bibliográficas

- Adams, R.N. and Laughton, M.A. (1974). *Optimal planning of power networks using mixed-integer programming. Part 1: Static and time-phased network synthesis. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers 121*, 139.
- Amaral Filho, N.A. (2017). *Contribuições em Modelos e na Análise do Método BFS*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- Baquero, J.F.F. (2012). *Estratégia de Decomposição aplicada ao Problema de Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição*. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.
- Barreto, L.S. (2007). *Modelo de Otimização para o Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição Considerando Geração Distribuída*. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- Baykasoglu, A., Owen, S. and Gindy, N. (1999). *Solution of goal programming models using a basic taboo search algorithm. Journal of the Operational Research Society*. Catonsville, v. 50, n.9, p.960–973.
- Benitez, E.E. (2017). *Algoritmo Heurístico Construtivo Aplicado ao Planejamento de Redes Aéreas de Média Tensão com a Alocação de Geração Distribuída*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE.
- Bernal-Agustín, J.L. (1998). *Aplicación de Algoritmos Genéticos al Diseño Óptimo de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*. Ph.D. dissertation, Univ. Zaragoza, Zaragoza, Spain.
- Brandt, M.H.M. (2016). *Algoritmo Heurístico Especializado Aplicado Ao Planejamento Da Expansão De Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE.
- Camargo, V.L.V. de. (2014). *Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista.
- Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L. & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms*. Cambridge, Massachusetts.

- Cossi, A.M. (2008). *Planejamento de Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Média e Baixa Tensão*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista.
- Crawford, D.M. and Holt, S.B. (1975). *A mathematical optimization technique for locating and sizing distribution substations, and deriving their optimal service areas*. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 94, 230–235.
- Cuno, M.A.S. (2016). *Algoritmo Híbrido Aplicado Ao Planejamento Da Expansão De Redes Aéreas De Média Tensão*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE.
- Fletcher, R.H. and Strunz, K. (2007). *Optimal Distribution System Horizon Planning-Part I: Formulation*. *IEEE Transactions on Power Systems* 22, 791–799.
- Gómez, J.F., Khodr, H.M., De Oliveira, P.M., Ocque, L., Yusta, J.M., Villasana, R., (2004). *Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits*. *IEEE Transactions on Power Systems* 19, 996–1004.
- Gonen, T. (1986). *Electric power distribution systems engineering*. New York: MacgrawHill.
- Goswami, S.K. (1997). *Distribution system planning using branch exchange technique*. *IEEE Transactions on Power Systems* 12, 718–723.
- Goswami, S.K. and Basu, S.K. (1992). *A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization*. *IEEE Transactions on Power Delivery* 7, 1484–1491.
- Haffner, S.L. (2000). *O Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos no Contexto de um Ambiente Competitivo*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- Henderson, M.I. (2014). *When the Lights Go Out: Getting Power Systems Running Again [Guest Editorial]*. *IEEE Power and Energy Magazine* 12, 18–23.
- Kaplan, M. and Braunstein, A. (1981). *Contribution to the determination of the optimum site for substations*. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS-100, 2263–2270.
- Knight, U.G.W. (1960). *The logical design of electrical networks using linear programming methods*. *Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering* 107, 306.
- Miguez, E., Cidras, J., Diaz-Dorado, E. and Garcia-Dornelas, J.L. (2002). *An Improved Branch Exchange Algorithm for Large Scale Distribution Network Planning*. *IEEE Power Engineering Review* 22, 58–58.
- Miranda, V., Ranito, J.V. and Proenca, L.M. (1994). *Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning*. *IEEE Transactions on Power Systems* 9, 1927–1933.
- Nahman, J.M. and Peric, D.M. (2008). *Optimal Planning of Radial Distribution Networks by Simulated Annealing Technique*. *IEEE Transactions on Power Systems* 23, 790–795.
- Najafi, S., Hosseinian, S.H., Abedi, M., Vahidnia, A. & Abachezadeh, S. (2009). *A framework*

- for optimal planning in large distribution networks. IEEE Transactions on Power Systems* 24, 1019–1028.
- Oliveira, M.L. de. (2010). *Planejamento Integrado da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- Paiva, P.C., Khodr, H.M., Dominguez-Navarro, J.A., Yusta, J.M. & Urdaneta, A.J. (2005). *Integral Planning of Primary–Secondary Distribution Systems Using Mixed Integer Linear Programming. IEEE Transactions on Power Systems* 20, 1134–1143.
- Ponnavaikko, M. and Rao, K. s. (1982). *An Approach to Optimal Distribution System Planning Through Conductor Gradation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-101*, 1735–1742.
- Prim, R.C. (1957). *Shortest Connection Networks And Some Generalizations. Bell System Technical Journal* 36, 1389–1401.
- Queiroz, L.M.O. de. (2010). *Estimação e análise das perdas técnicas na distribuição de energia elétrica*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- Ramirez-Rosado, I.J. and Bernal-Agustin, J.L. (1998). *Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems. IEEE Transactions on Power Systems* 13, 696–703.
- Shirmohammadi, D., Hong, H.W., Semlyen, A. & Luo, G.X. (1988). *A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. IEEE Transactions on Power Systems* 3, 753–762.
- Sousa, J. (2013). *Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica através de um modelo de Programação Linear Inteira Misto (PLIM)*. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista.
- Souza, R.F.F. (2011). *Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição Usando a Metaheurística de Busca em Vizinhança Variável*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista.
- Wall, D.L., Thompson, G.L. and Northcote-Green, J. e. d. (1979). *An Optimization Model for Planning Radial Distribution Networks. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-98*, 1061–1068.

Apêndice A

Artigo Apresentado

Nesta seção encontra-se o artigo apresentado referente ao tema apresentado em:

- Bornioti, F. B., Freitas L. P. S., Rocha C. R. M. da, Freitas R. L. B., “*Dynamic Algorithm PRIM applied to the Expansion Planning to Medium Voltage Overhead Distribution Networks*”. 12th Latin-American Congresso n Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE 2017. ISBN 978-85-61065-03-04.

Algoritmo Dinâmico de PRIM aplicado ao Planejamento da Expansão de Redes de Distribuição Aéreas de Média Tensão

F. B. Bornioti, L. P. S. Freitas, C. Rocha, *Member, IEEE*, R. L. B. Freitas

Abstract – In this paper a new algorithm for application in the expansion planning to medium voltage overhead distribution networks is presented. This new algorithm is based on the PRIM algorithm, but was implemented with the concept of dynamic computational programming, using the aid of data structure to model the problem. The input data for the algorithm were modeled in a double-chained list format to ensure the movement and quick access of the information. Thus, the algorithm has the ability to establish a new radial topology for the network, seeking to meet future demand by building new lines that are successively selected at a lower possible construction cost. For the evaluation of the performance of the algorithm, computational tests using data from systems available in the specialized literature: the 23 and 33 node systems. The results were of quality and were obtained in an excellent processing time and the new algorithm was efficient and robust in the solution search process.

Index Terms – Distribution System Expansion Planning, Medium Voltage Aerial Lines, PRIM, dynamic computational programming, radial topology.

I. NOMENCLATURA

A nomenclatura utilizada neste trabalho é apresentada a seguir.

Ω_l	Conjunto dos ramos;
Ω_b	Conjunto de barras;
x_{ij}	Circuito que pode ser adicionado ao ramo ij ;
c_{ij}	Custo de construção do ramo ij (US\$/km);
l_{ij}	Comprimento do ramo ij ;
n_b	Número de barras;
c	Custo total de investimento;
P_i	Potência ativa calculada na barra i ;
Q_i	Potência reativa calculada na barra i ;

P_{Si}	Potência ativa fornecida pela subestação na barra i ;
Q_{Si}	Potência reativa fornecida pela subestação na barra i ;
P_{Di}	Demanda de potência ativa na barra i ;
Q_{Di}	Demanda de potência reativa na barra i ;
\underline{V}	Magnitude mínima da tensão;
\bar{V}	Magnitude máxima da tensão;
V_i	Magnitude da tensão na barra i ;
$I_{r_{ij}}$	Componente real da corrente no ramo ij ;
$I_{m_{ij}}$	Componente imaginária da corrente no ramo ij ;
\bar{I}_{ij}	Magnitude do limite máximo de corrente no ramo ij ;
G_{ij}	Elemento ij da matriz de condutância nodal;
B_{ij}	Elemento ij da matriz de susceptância nodal;
θ_{ij}	Diferença entre os ângulos das tensões das barras i e j ;

II. INTRODUÇÃO

Todos os dias novos consumidores conectam-se ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), visto que regularmente novas indústrias, comércio e residências entram em operação devido ao desenvolvimento econômico e social. Para atender a todos estes novos consumidores é necessário que o SDEE seja expandido, através da construção de novas linhas de distribuição, alocação de transformadores, reguladores de tensão, banco de capacitores e a construção de novas subestações de energia.

As empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica têm a responsabilidade de fazer a expansão do SDEE, para fornecer energia elétrica de forma confiável, sem interrupção e dentro dos níveis de qualidade previstos pela legislação [1]. O desafio das concessionárias de distribuição de energia elétrica é estabelecer diretrizes para a expansão dos sistemas existentes e criar novos planos para a viabilização de novos sistemas, buscando atender à demanda de energia elétrica levando em conta os custos, aspectos ambientais e

F. B. Bornioti, C. Rocha e R. L. B. Freitas estão com o PGEEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Campus de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil (e-mails: bornioti@gmail.com, c.rocha@ieee.org, e rlb.freitas@gmail.com).

L. P. S. Freitas está com a Faculdade União das Américas - Uniamérica, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil (e-mail: luciana@gmail.com).

sociais, normas reguladoras, dentre outros [2].

A construção de um novo SDEE requer elevados investimentos e é através do Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (PESDEE) que se busca uma forma de otimizar os custos e viabilizar a construção de novos SDEE [3].

De acordo com [3], os SDEE devem operar de forma eficiente e confiável e isto é alcançado através de planejamento. Encontram-se duas topologias de SDEE nos centros urbanos: sistemas malhados e sistemas radiais. Por razões técnicas, a maioria dos SDEE operam em forma radial, pode-se destacar neste tipo de topologia a facilidade de coordenação e proteção e a redução da corrente de curto-circuito. Desta maneira, o problema do PESDEE consiste em encontrar, considerando uma topologia do SDEE inicial, uma topologia radial de forma que esta opere respeitando critérios de qualidade, ao menor custo de investimento.

Na literatura especializada encontram-se diversos trabalhos que buscam solucionar o problema do PESDEE através de técnicas de solução, como as técnicas de Otimização Clássicas, as Heurísticas e Meta-heurística.

Pode-se destacar como técnicas de otimização clássica os algoritmos *branch-exchange* [5] e *branch and bound* [6]. Nestes algoritmos o esforço computacional é significativo devido ao tamanho do espaço de busca. Os algoritmos Heurísticos e as Meta-heurísticas são propostos de forma a garantir a radialidade para a solução encontrada. Técnicas utilizadas como algoritmos genéticos [7] e [8], colônia de formigas [9] e busca tabu [10] são apresentados na literatura. Para garantir e verificar a viabilidade de cada investimento, a maioria das técnicas de solução resolvem o fluxo de potência para obter o ponto de operação do sistema.

As técnicas utilizadas para resolver o problema do PESDEE consideram principalmente a alocação ótima de subestações e o desenvolvimento de modelos para obter a localização ótima para a construção de novas linhas de distribuição [3].

Em [11] é apresentado um modelo multiestágio que utiliza, para resolver o problema do PESDEE, os custos fixos no processo de busca pela solução ao invés de representar o problema através da modelagem matemática. O trabalho propõe utilizar parâmetros ao invés de trabalhar com variáveis obtidas através da modelagem matemática, sendo a tomada de decisão feita com os resultados obtidos a partir do fluxo de potência. O cálculo o fluxo de potência é realizado através do método de Newton, em cada etapa do processo de busca pela solução.

Em [3] é proposto um algoritmo heurístico construtivo para resolver o problema do PESDEE. No trabalho são consideradas como ações à curto prazo, a alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão. O modelo tem o objetivo de encontrar a solução cujo custo de construção de linhas, subestações, banco de capacitores e reguladores de tensão, e o custo de operação para esta solução proposta, seja minimizado.

Este artigo é o resultado da pesquisa cujo objetivo foi desenvolver uma nova metodologia para a solução do problema do PESDEE, levando em consideração os custos de

investimento para a construção de novas linhas em redes de média tensão. Neste contexto, buscou-se por melhorar o desempenho e o tempo de processamento para o estabelecimento de uma solução para o PESDEE, que pode ser utilizada como uma solução inicial para algoritmos mais complexos.

Assim, nas próximas seções são apresentadas: a metodologia utilizada para resolver o problema, o Algoritmo Dinâmico de PRIM, os testes e resultados obtidos com a aplicação do algoritmo em sistemas testes conhecidos na literatura especializada, e por fim as conclusões do trabalho.

III. METODOLOGIA PARA SOLUÇÃO DO PESDEE

A formulação matemática para a solução do problema de PESDEE para minimizar o custo de investimento na construção de novas linhas de média tensão de distribuição assume a seguinte forma:

$$\min c = \sum_{(ij) \in \Omega_l} (c_{ij} l_{ij} x_{ij}) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{(ij) \in \Omega_l} x_{ij} = n_b - 1 \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \quad (3)$$

A Função Objetivo c apresentada em (1) tem como o objetivo de minimizar o custo total de investimento para construção de novas linhas de média tensão do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. Os parâmetros c_{ij} e l_{ij} representam o custo de construção do ramo (linha) ij , e o seu respectivo comprimento.

Na formulação matemática, a variável binária x_{ij} é uma variável de decisão que representa o estado do ramo ij na solução encontrada para o problema. Assim, se assumir o valor 1, significa que o ramo ij faz parte da solução, e se assumir o valor 0, significa que o respectivo não faz parte da solução. Os parâmetros n_b e Ω_l representam, respectivamente, o número de barras do SDEE e o conjunto de ramos do sistema.

A restrição (2) representa a condição necessária para que a solução encontrada possua configuração radial e a restrição (3) representa a característica binária da variável de decisão que identifica os ramos que podem ser adicionados os SDEE.

A metodologia adotada para resolver o PESDEE está baseada em [12]. O método propõe resolver o modelo matemático apresentado anteriormente através do algoritmo de PRIM. Assim, inicialmente não se considera as restrições de magnitude de tensão nas barras do sistema e a corrente nos ramos.

Na literatura a restrição (2) é considerada suficiente para garantir que a solução gerada seja uma solução radial conexa [13] e [14]. Entretanto, com base na teoria de grafos, pode-se verificar que esta restrição é uma condição necessária para garantir a radialidade da solução, mas não é suficiente. Do ponto de vista da teoria de grafos, um subgrafo T pode ser considerado uma árvore caso satisfaça duas restrições: a) o

subgrafo deve possuir número de ramos iguais à quantidade de nós deste grafo menos 1, e b) este grafo deve ser conexo. Em outras palavras, a solução obtida deve garantir que todas as barras estejam conectadas de forma que não ocorra o ilhamento de nenhuma barra.

Para avaliar a factibilidade da topologia radial encontrada, um segundo modelo matemático é resolvido com as informações obtidas da topologia radial estabelecida. O objetivo desta etapa é analisar o estado do SDEE de forma a determinar se a solução radial estabelecida possui um estado de operação dentro de limites predeterminados.

A formulação matemática do modelo para esta etapa é apresentada a seguir.

$$v = \sum_{(ij) \in \Omega_l} (g_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})) \quad (4)$$

Sujeito a:

$$P_i - P_{Si} + P_{Di} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (5)$$

$$Q_i - Q_{Si} + Q_{Di} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (6)$$

$$P_i = V_i \sum_{j \in \Omega_b} V_j [G_{ij}(x_{ij}) \cos \theta_{ij} + B_{ij}(x_{ij}) \sin \theta_{ij}] \quad (7)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in \Omega_b} V_j [G_{ij}(x_{ij}) \sin \theta_{ij} - B_{ij}(x_{ij}) \cos \theta_{ij}] \quad (8)$$

Em (4), v representa o valor das perdas ativas de energia elétrica para a topologia radial determinada. As restrições (5) e (6) representam as equações do balanço de potência e os elementos P_i e Q_i são determinados pelas equações (7) e (8). Uma vez estabelecidos os valores das magnitudes das tensões nas barras, verifica-se o cumprimento dos limites de operação para as tensões através da restrição (9), apresentada a seguir.

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad (9)$$

O balanço de corrente elétrica da topologia é verificado com o auxílio das restrições (10) e (11) apresentadas a seguir.

$$I_{r_{ij}} = g_{ij} (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) - b_{ij} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) \quad (10)$$

$$I_{m_{ij}} = g_{ij} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) + b_{ij} (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) \quad (11)$$

Uma vez determinado os valores para corrente elétrica da topologia, verifica-se o cumprimento dos limites de operação para a capacidade das linhas através da restrição (12) apresentada a seguir.

$$x_{ij} (I_{r_{ij}}^2 + I_{m_{ij}}^2) \leq \bar{I}_{ij}^2 \quad (12)$$

Se o limite de tensão da barra ou a capacidade de algum ramo é violado, a etapa para a determinação da topologia se repete com a eliminação da variável binária x_{ij} que identifica o ramo que conecta a barra, que sofreu violação de tensão, ao sistema radial ou que indique o ramo com limite de

capacidade violada. Assim, o algoritmo tenta estabelecer uma nova topologia proibindo a participação dos elementos que violaram os limites para o fornecimento da energia elétrica. Se não for possível estabelecer uma configuração radial com a proibição, o algoritmo substitui o elemento identificado por um de maior capacidade (maior custo) e procura determinar uma nova topologia radial com esta consideração.

Desta maneira, o algoritmo busca determinar uma topologia radial e que seja factível para o problema.

Na próxima seção é apresentado o Algoritmo Dinâmico de PRIM.

IV. ALGORITMO DINÂMICO DE PRIM

O Algoritmo Dinâmico foi implementado com base na teoria do Algoritmo de PRIM [12]. A topologia final é encontrada através de um processo iterativo, de forma que a cada passo é proposto uma ação, e esta ação reflete nas próximas ações durante o processo iterativo. Em cada iteração, o algoritmo realiza a tomada de decisão com base em um valor de peso. Para o caso do problema do PESDEE, em cada iteração, é adicionada uma linha de distribuição baseado em um peso relacionado ao custo de implantação desta linha de distribuição. O processo iterativo termina quando uma solução factível é encontrada.

Nas subseções a seguir, é apresentada uma descrição do Algoritmo Dinâmico PRIM, explicitando a programação dinâmica, o princípio de funcionamento do algoritmo para encontrar a topologia radial, e um fluxograma que resume o seu funcionamento.

A. Programação Dinâmica

O algoritmo dinâmico foi implementado em Linguagem de Programação C considerando o conceito de programação dinâmica. Através de uma análise sequencial do problema de forma mais simples do que o problema original, a programação dinâmica busca resolver o problema de otimização.

Com o objetivo de otimizar o processamento, o algoritmo utiliza alocação dinâmica de memória que se refere ao processo de reservar espaço na memória durante a fase de execução do programa ao invés de fazê-lo durante a fase de desenvolvimento, quando não se sabe ao certo o espaço necessário. A alocação de memória pode ser feita de duas maneiras: em tempo de execução e em tempo de compilação.

A alocação de memória em tempo de compilação, alocação estática, refere-se ao processo de reservar um espaço de memória previamente para todos os dados declarados, ocupando espaço na memória mesmo que este não seja usado no momento. Dessa forma, este tipo de alocação tende a desperdiçar recursos, uma vez que o espaço total necessário para alocar as informações não é conhecido. Na alocação em tempo de execução, alocação dinâmica, pode-se alocar a memória no exato momento em que é necessário e do tamanho exato exigido. Desta maneira, pode-se aumentar ou diminuir a memória alocada conforme a necessidade. O algoritmo implementado utilizou a alocação dinâmica para armazenar os dados do SDEE para utiliza-los conforme são processados.

Para modelar o SDEE o algoritmo implementado utiliza estrutura de dados em forma de listas duplamente encadeadas para representar os dados das barras e dos ramos. Assim, a

título de exemplo, as informações do estado de operação de uma barra, como demanda de potência e tensão são representados por um bloco e encadeadas com os blocos que representam as demais barras do sistema, formando assim uma lista. Os dados dos ramos do SDEE, também são modelados em forma de listas duplamente encadeadas de forma independente. Desta maneira, são obtidas duas listas independentes, uma contendo os dados das barras e outra os dados dos ramos. As listas duplamente encadeadas possuem maior controle, confiabilidade e menor risco de perda acidental de informação.

Para representar o SDEE em sua configuração malhada, o algoritmo implementado interconecta as listas dos ramos e das barras de forma que, computacionalmente, tenha-se a possibilidade de movimentação para acessar as informações do SDEE.

B. Algoritmo Dinâmico PRIM

A partir da modelagem computacional feita através da programação dinâmica, o algoritmo desenvolvido tem a capacidade de realizar a busca da topologia radial com o menor custo para solucionar o problema do PESDEE.

Neste contexto, são estabelecidos três grupos de estruturas de dados para representar o SDEE. O primeiro grupo representa os dados globais do SDEE. Os dados globais são obtidos com base nos valores da barra da subestação como, número da barra da subestação, tensão de referência, potência base e tolerâncias. O segundo grupo representa os dados dos ramos (linhas) do SDEE, este grupo é representado por uma lista duplamente encadeada e contém dados de resistência e reatância das linhas, assim como a barra de entrada e a barra de saída para a conexão do ramo e a potência aparente. O terceiro grupo representa os dados das barras do SDEE como número de referência da barra, demanda de potência, tensão e corrente elétrica. Este grupo é inicialmente modelado por duas listas duplamente encadeadas. A primeira lista T é uma lista vazia e a segunda lista V é a lista que possui todas as barras do SDEE.

Nesta versão, o algoritmo considera que todos os ramos pertencem à topologia malhada e são candidatos a participarem da topologia radial final.

Inicialmente, identifica-se a barra pertencente à subestação através da estrutura de dados com os dados globais do SDEE. Esta etapa é importante, pois é a partir da subestação que a solução radial é construída. Uma vez identificado a barra da subestação, desloca-se esta barra da lista V para a lista T. É importante ressaltar que o encadeamento feito entre as listas dos ramos e dos nós mantem-se intactas. Assim, uma vez que é identificado a barra da subestação, a partir do encadeamento são identificados quais os ramos que estão conectados à esta barra.

Na sequência, inicia-se o processo de adição de novas linhas. Para todos os ramos candidatos conectados à barra presente na lista T, verifica-se qual o ramo possui o menor peso. Este peso está diretamente relacionado ao custo de implantação desta linha. Identificado o ramo de menor peso, o ramo é adicionado à uma lista vazia duplamente encadeada, e a barra a qual este ramo está conectado é deslocado para a lista T.

Com o objetivo de ilustrar a forma com que o algoritmo

determina a solução é apresentado um fluxograma através da Fig. 1.

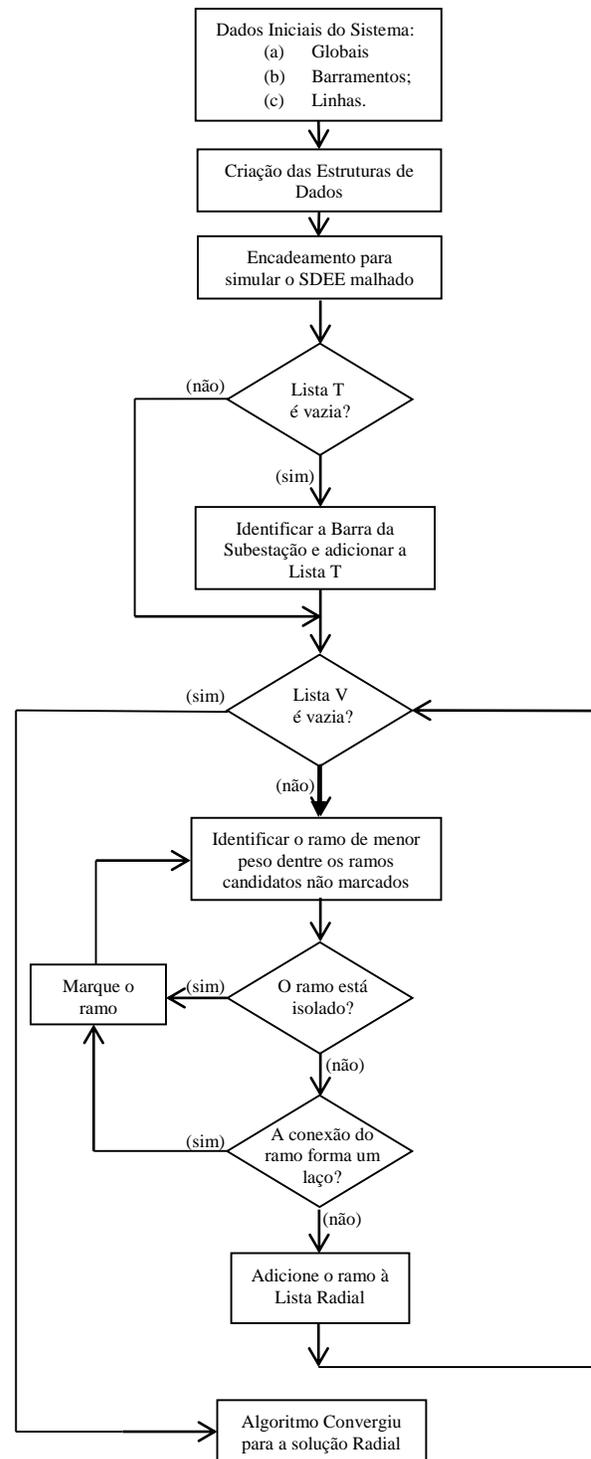


Fig. 1. Fluxograma do Algoritmo Dinâmico PRIM

A seguir, inicia-se um processo iterativo, e para cada novo passo são identificados todos os ramos candidatos que estão conectados às barras pertencentes à lista T, e é escolhido aquele que possui o menor custo de implantação. Para garantir que não ocorra a formação de laços o algoritmo

aprova as informações das barras que já fazem parte da lista T, identificando as barras que já possuem conexão com o sistema. Dessa forma, todos os ramos que possuem apenas um de seus barramentos de conexão já conectados serão os ramos candidatos. Aqueles que não possuírem barras de conexão marcadas ou que possuírem as duas barras de conexões marcadas não são candidatos no momento, pois se conectados, representam a situação uma barra isolada ou a formação de um laço.

O processo de busca pela solução radial finaliza quando todas as barras são conectadas, ou seja, quando todos os elementos pertencentes à lista V forem deslocados para a lista T, e uma lista contendo os ramos (linhas) pertencentes à solução radial é estabelecida e denominada de lista radial.

V. TESTES E RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os testes e resultados obtidos através da simulação do algoritmo implementado. Para testar o desempenho computacional do algoritmo implementado foram realizadas simulações com sistemas disponíveis na literatura. Para a realização dos testes utilizou-se um Notebook Samsung, Intel® Core™ i5-3230M, CPU @2.60 GHz, 4 GB RAM.

Os sistemas testes selecionados para os testes realizados para resolver o problema do PESDEE foram os sistemas de 23 e 33 barras [15][16].

A descrição dos sistemas, assim como dos resultados obtidos com a simulação, são apresentados nas próximas subseções.

A. Sistema de 23 Barras

O sistema de distribuição de 23 barras apresentado em [15] é constituído por 35 linhas candidatas a adição. O sistema é alimentado por uma subestação com 10 MVA de potência e uma tensão de 34,5 kV. Para o teste, o limite de variação da magnitude de tensão adotado foi de 3%, e o fator de potência adotado para as demandas de potência foi de 0,9.

Para a construção de linhas, foi considerado a possibilidade de construir linhas de média tensão com condutor de alumínio 1/0, com capacidade de condução de corrente de 230 A, e custo de construção de 10k US\$/km.

Os dados deste sistema, como resistência por quilômetro e comprimento da linha podem ser obtidos em [3].

A Fig. 2 ilustra todas as possíveis conexões entre as barras deste sistema.

O problema foi resolvido de forma iterativa pelo algoritmo, com a adição de uma nova linha a cada passo da iteração. O resultado obtido através da simulação está representado através da Fig. 3.

Nesta figura, as linhas pontilhadas representam as linhas selecionadas para a adição no processo, compondo assim a topologia radial final. O tempo computacional para a obtenção da solução foi de 0,1344 milissegundos.

A configuração da topologia radial determinada apresenta disparidade em relação às topologias encontrada em [3][4] [15]. O custo de construção para a topologia determinada foi de US\$ 151.727,31.

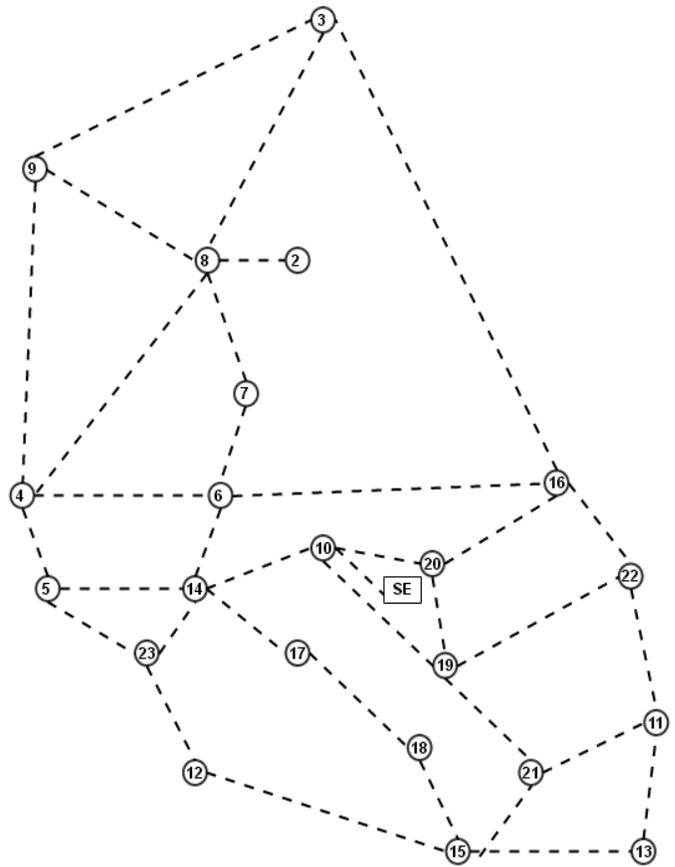


Fig. 2. Sistema de 23 barras - Conexões de linhas candidatas.

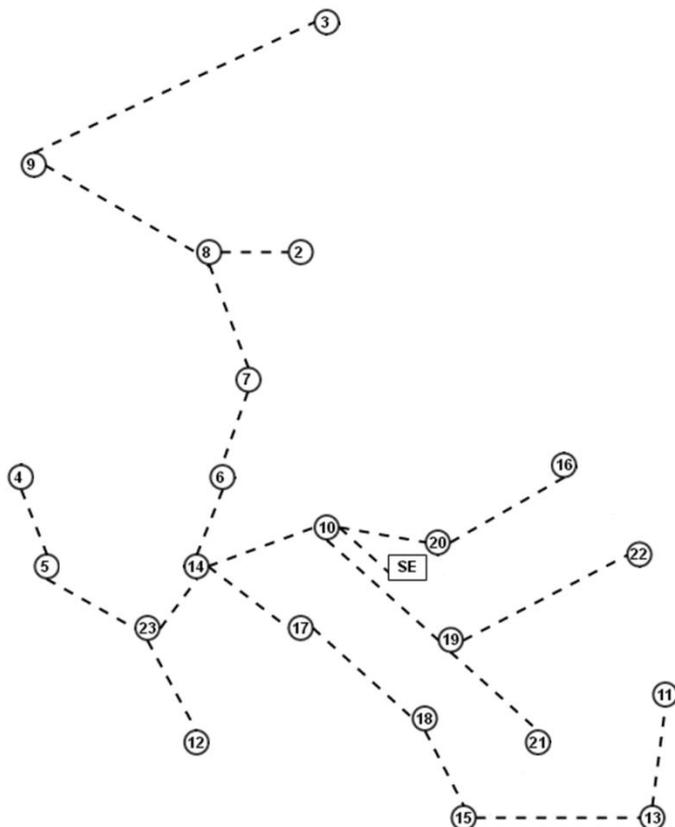


Fig. 3. Sistema de 23 barras - Topologia radial final determinada.

A Tabela I, representada a seguir, ilustra a comparação entre os resultados obtidos em [3][4] e [15] com o resultado obtido através do Algoritmo Dinâmico PRIM.

TABELA I
COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O SISTEMA TESTE DE 23 BARRAS

Soluções	Custo dos Circuitos
Resultado [3]	\$151.892,00
Resultado [4]	\$151.892,00
Resultado [14]	\$151.892,00
PRIM	\$151.727,31

Após estabelecer a configuração da topologia radial final, o algoritmo determinou o fluxo de potência, para estabelecer o estado do sistema com a topologia determinada. Os valores encontrados para o módulo da tensão em todas as barras ficaram dentro dos limites, estipulados inicialmente em 3%. Estes resultados estão descritos na Tabela II. Os valores obtidos estão muito próximos de 1 pu, com o menor valor representado por 0,994569 e referente a barra 03. Este valor representa uma queda de tensão de aproximadamente 0,5%.

TABELA II
ESTADO DAS BARRAS PARA O SISTEMA TESTE DE 23 BARRAS

# BARRA	TENSÃO (pu)	
1	1	0°
2	0,996178658	-0,002709872°
3	0,994576375	-0,003850953°
4	0,997462614	-0,00179906°
5	0,997615425	-0,001690084°
6	0,997324792	-0,001895537°
7	0,996640825	-0,002380849°
8	0,996179655	-0,002708885°
9	0,995170843	-0,003426732°
10	0,999271133	-0,000515787°
11	0,996923374	-0,002182273°
12	0,997714309	-0,001620177°
13	0,997006248	-0,002123646°
14	0,998140865	-0,001316419°
15	0,997208953	-0,00197912°
16	0,99896227	-0,000734901°
17	0,997776239	-0,001575958°
18	0,997488581	-0,001780436°
19	0,99898026	-0,000721987°
20	0,999044229	-0,000676903°
21	0,998890309	-0,000786135°
22	0,998886311	-0,000789332°
23	0,997824186	-0,001541567°

Os resultados obtidos com a solução do fluxo de potência para as linhas do sistema estão representados através da Tabela III, apresentada a seguir.

TABELA III
ESTADO DOS RAMOS PARA O SISTEMA TESTE DE 23 BARRAS

# RAMO	BARRA ENTRADA	BARRA DE SAÍDA	CORRENTE (A)		PERDA (kVA)
1	1	10	205,6293412	-0,001821647°	5,16553
17	10	14	149,9223751	-0,00223686°	5,83853
26	14	17	46,50328646	-0,001928358°	0,585929
32	17	18	37,20727564	-0,0020164°	0,369164
27	14	23	37,18865141	-0,001662734°	0,406342
28	15	18	27,90856125	-0,002095017°	0,268914
18	10	19	27,85620817	-0,000765819°	0,279047
34	19	21	9,285662869	-0,000786136°	0,0289278
35	19	22	9,285702893	-0,000789333°	0,0303698
25	13	15	18,60724312	-0,002152955°	0,130372
20	11	13	9,303992154	-0,002182276°	0,0264398
11	5	23	18,5965283	-0,001744572°	0,133983
24	12	23	9,296612202	-0,001620174°	0,035451
19	10	20	18,56920463	-0,000705906°	0,145342
30	16	20	9,284992507	-0,000734901°	0,0261538
13	6	14	56,93755862	-0,003014061°	1,6025
12	6	7	47,63724887	-0,003232436°	1,12223
15	7	8	38,33062668	-0,00343919°	0,609817
2	2	8	1,047483846	-0,002709863°	5,01E-05
6	4	5	9,298955048	-0,001799056°	0,0491457
16	8	9	27,97229246	-0,003709606°	0,972798
4	3	9	18,6519383	-0,003850945°	0,382791

A Tabela III apresenta os resultados obtidos para a verificação da capacidade das linhas que fazem parte da topologia radial final obtida pelo algoritmo, e as respectivas perdas elétricas.

Como pode ser observado, não houve nenhuma violação da capacidade de condução de corrente nos ramos. O pior caso foi o registrado na linha (01-10) ou ramo 1, com magnitude de corrente de aproximadamente 205 A, um valor próximo do limite de condução de corrente do condutor escolhido para a análise, que possui capacidade de condução de 230 A.

Para a topologia radial final determinada, as perdas ativas totais de energia elétrica foram de 18,2098 kW.

B. Sistema de 33 Barras

O sistema de distribuição de 33 barras apresentado em [17] é constituído por 35 linhas candidatas a adição. A Fig. 4, apresentada a seguir, ilustra todas as possibilidades de conexões para as barras do sistema. Também foi considerado que o sistema é alimentado por uma subestação com capacidade de 10 MVA de potência, com tensão de 34,5 kV. Para o teste, o limite de variação da magnitude de tensão considerado foi de 3%, o fator de potência para a demanda de potência foi de 0,9.

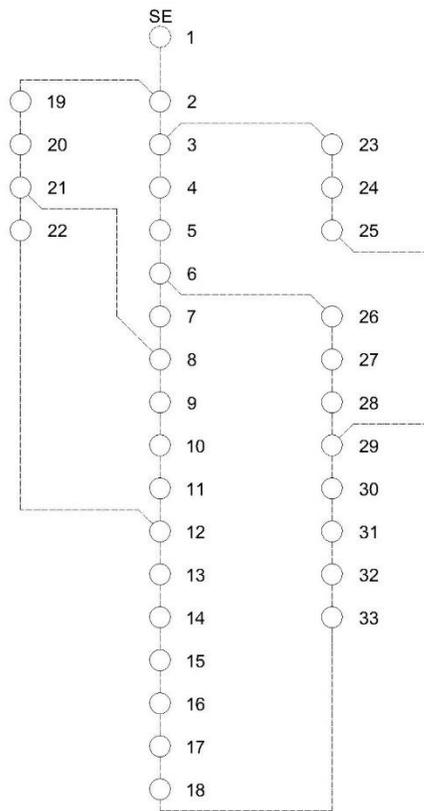


Fig. 4. Sistema de 33 barras - Conexões de linhas candidatas.

Para a construção das linhas, foi considerada a possibilidade de construir linhas de média tensão com condutor de alumínio 1/0, com capacidade de condução de corrente de 230 A e custo de construção de 10k US\$/km.

Os dados deste sistema, como resistência por quilômetro e comprimento da linha podem ser obtidos em [2].

O problema foi resolvido através do Algoritmo Dinâmico PRIM. O tempo computacional necessário para a obtenção da solução foi de 0,2422 milissegundos.

A configuração da topologia radial final encontrada é idêntica à solução obtida e apresentada em [18]. O custo de construção para a topologia radial final encontrada foi de US\$ 343.851,00.

Após estabelecer a configuração da topologia radial final, o algoritmo determinou o fluxo de potência, para estabelecer o estado do sistema com a topologia determinada. Estes resultados estão descritos pelas Tabelas IV e V.

A partir dos resultados apresentados pela Tabela IV, pode-se observar que os valores obtidos para a magnitude da tensão em todas as barras não violaram a restrição para os limites de tensão. A maior queda de tensão ocorre na barra 17, representando uma queda na magnitude de aproximadamente 0,8%.

A Tabela V apresenta os resultados obtidos para a verificação da capacidade das linhas que fazem parte da topologia radial final obtida pelo algoritmo, e as respectivas perdas elétricas.

Com os resultados apresentados pela Tabela V, pode-se concluir que não houve nenhuma violação relacionada com a capacidade de condução da linha.

TABELA IV
ESTADO DAS BARRAS PARA O SISTEMA TESTE DE 33 BARRAS

# BARRA	TENSÃO (pu)	
	Magnitude	Ângulo
1	1	0°
2	0,999675026	-0,000228941°
3	0,998131866	-0,001317643°
4	0,997724287	-0,001606339°
5	0,997342757	-0,001877063°
6	0,996426182	-0,002527285°
7	0,995965059	-0,00285515°
8	0,995545949	-0,003153291°
9	0,995032162	-0,003519229°
10	0,994569367	-0,00384903°
11	0,99403547	-0,003895983°
12	0,99392856	-0,00397494°
13	0,993958126	-0,004285327°
14	0,993792635	-0,004403565°
15	0,993724847	-0,004451899°
16	0,993683975	-0,004480685°
17	0,991586678	-0,005971415°
18	0,991627507	-0,005942315°
19	0,999614037	-0,000272393°
20	0,999203159	-0,000563628°
21	0,999118195	-0,000624041°
22	0,999039231	-0,000680353°
23	0,997186965	-0,00198502°
24	0,995292514	-0,0033287°
25	0,99377366	-0,004409154°
26	0,996406219	-0,002541788°
27	0,996392244	-0,002551931°
28	0,993011182	-0,004953379°
29	0,993058019	-0,004920114°
30	0,992559811	-0,005275361°
31	0,99196213	-0,005702963°
32	0,991807756	-0,005812893°
33	0,991706177	-0,005885774°

Como pode ser observado, não houve nenhuma violação da capacidade de condução de corrente nos ramos. O pior caso foi o registrado no condutor entre a subestação e a barra 02, linha (01-02) ou ramo 1, com magnitude de corrente de aproximadamente 132,54 A. A pior situação foi registrada para esta linha pois ela é a responsável por alimentar todo o sistema.

Para a topologia radial final determinada, as perdas ativas totais de energia elétrica foram de 23,8501 kW.

TABELA V
ESTADO DOS RAMOS PARA O SISTEMA TESTE DE 33 BARRAS

# RAMO	BARRA ENTRADA	BARRA DE SAÍDA	CORRENTE (A)	PERDA (kVA)	
1	1	2	132,534908	-0,003701746°	1,48232
3	2	19	11,42770164	-0,000535137°	0,0241407
2	2	3	117,7249938	-0,004108922°	6,2533
4	3	4	41,91681712	-0,003218688°	0,588522
6	4	5	37,72701777	-0,003397757°	0,496453
5	3	23	72,94861597	-0,004729869°	2,37146
7	5	6	35,77741671	-0,003480611°	1,1294
9	6	26	3,781732265	-0,00254686°	0,00265669
31	26	27	1,890876157	-0,002551942°	0,000929812
8	6	7	30,15590152	-0,003655876°	0,479466
10	7	8	23,64827765	-0,003876217°	0,341711
28	23	24	69,95582182	-0,004847297°	4,56645
29	24	25	56,40826614	-0,005212031°	2,95212
30	25	29	42,84004001	-0,005466307°	1,05828
34	29	30	36,93906927	-0,005551907°	0,633725
33	28	29	1,846122647	-0,004953369°	0,00296447
11	8	9	17,13774764	-0,004150868°	0,303778
13	9	10	15,29543664	-0,004226938°	0,244138
15	10	11	13,45222313	-0,004278711°	0,030553
16	11	12	11,8759113	-0,004329521°	0,0453567
35	30	31	18,4695137	-0,005828472°	0,381116
36	31	32	13,6326351	-0,00587301°	0,0722724
37	32	33	6,835250286	-0,005932759°	0,0240176
24	18	33	4,727633784	-0,005953683°	0,012888
23	17	18	1,84877296	-0,005971435°	0,00259282
17	12	13	9,851165461	-0,004402403°	0,147827
19	13	14	7,825536879	-0,004432701°	0,0447116
20	14	15	3,619136101	-0,004466582°	0,00845069
21	15	16	1,844868519	-0,004480682°	0,00256501
25	19	20	8,571801662	-0,000622678°	0,121323
26	20	21	5,714771215	-0,000652198°	0,016771
27	21	22	2,857500661	-0,000680354°	0,00781555

A Fig. 5 representa a topologia radial final encontrada como solução do problema do PESDEE pelo algoritmo.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a formulação de um algoritmo dinâmico baseado no algoritmo de PRIM para resolver o problema do PESDEE, para a minimização do custo de investimento para a expansão de linhas aéreas de média tensão. Foi apresentada uma estratégia que necessita da informação de poucos parâmetros para propor uma solução para o problema, quando comparada com outras estratégias apresentadas na literatura. A partir dos resultados obtidos

através de simulação do algoritmo considerando sistemas testes, verificou-se que o algoritmo desenvolvido apresenta um excelente desempenho com bastante eficiência, apresentando resultados de qualidade com um esforço computacional muito baixo.

Como sugestão para trabalhos futuros, poderia ser implementada uma estratégia auxiliar ao algoritmo para produzir não apenas uma configuração de topologia radial factível para o problema, mas várias, e adotar algum critério para selecionar a melhor entre as determinadas. Isto diminuiria a possibilidade do algoritmo encontrar uma solução ótima local.

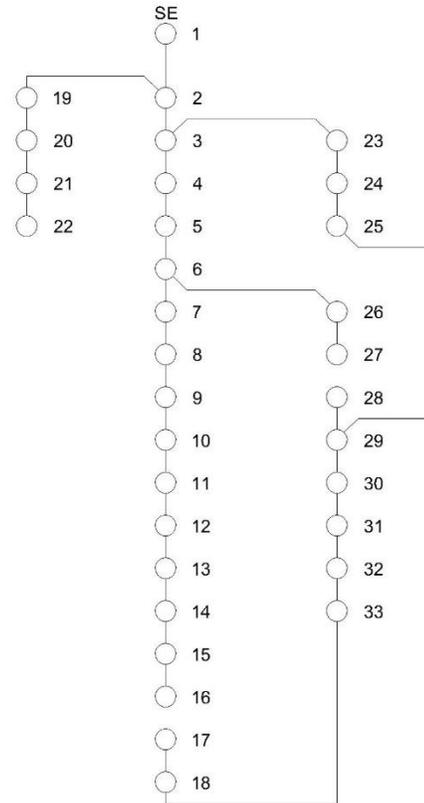


Fig. 5. Sistema de 33 barras - Topologia radial final determinada.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] A. M. Cossi, "Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão," Tese de doutorado, Departamento de Eng. Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.
- [2] C. Rocha, M. Brandt and W. Mendonça, "Algoritmo heurístico aplicado ao planejamento da expansão de sistemas de distribuição," presented at the XI Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE, São José dos Campos, Brasil, 2015.
- [3] M. Lavorato, "Planejamento integrado da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica," Tese de Doutorado, Dept. de Sistemas de Energia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas, 2010.
- [4] M. Lavorato, "Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 27, pp. 172-180, Feb. 2012.
- [5] E. Míguez, J. Cidrás, E. Díaz-Dorado, and J. L. García-Dornelas, "An improved branch-exchange algorithm for large-scale distribution network planning," IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, no. 4, pp. 931-936, Nov. 2002.
- [6] P. C. Paiva, H. M. Khodr, J. A. D. Domínguez-Navarro, J. M. Yusta, and A. J. Urdaneta, "Integral planning of primary-secondary distribution

systems using mixed integer linear programming,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 1134–1143, May 2005.

- [7] V. Miranda, J. V. Ranito, and L. M. Proença, “Genetic algorithm in optimal multistage distribution network planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 1927–1933, Nov. 1994.
- [8] I. J. Ramirez-Rosado and J. L. Bernal-Agustín, “Genetic algorithm applied to the design of large power distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 696–703, May 1998.
- [9] J. F. Gómez, H. M. Khodr, P. M. Oliveira, L. Ocque, J. M. Yusta, R. Villasana, and A. J. Urdaneta, “Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 996–1004, May 2004.
- [10] A. Baykasoglu, S. Owen, and N. Gindy, “Solution of goal programming models using a basic taboo search algorithm,” *J. Oper. Res. Soc.*, Nottingham, vol. 50, no. 9, pp. 960–973, 1999.
- [11] C. Rocha, J. Contreras, R. C. Lotero e J. Muñoz. Algoritmo Heurístico Construtivo Enumerativo Aplicado ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Automática- XIX CBA 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2012/Artigos/99402.pdf>
- [12] R. C. Prim, “Shortest Connection Networks and Some Generalizations,” *The Bell System Technical Journal*, pp. 1389–1401, May. 1957.
- [13] S. Haffner, L. F. A. Pereira, L. A. Pereira, and L. S. Barreto, “Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation—part I: Problem formulation,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 2, pp. 915–923, Apr. 2008.
- [14] J. L. Bernal-Agustín, “Aplicación de Algoritmos Genéticos al Diseño Optimo de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica,” Ph.D. dissertation, Univ. Zaragoza, Zaragoza, Spain, 1998.
- [15] J. M. Nahman and D. M. Peric, “Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 790–795, May 2008.
- [16] 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.
- [17] M. E. Baran e F. F. Wu. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(1):725–734, January 1989.
- [18] M. A. S. Cuno, “Algoritmo híbrido aplicado ao planejamento da expansão de redes aéreas de média tensão,” Dissertação de mestrado, Centro de Engenharia e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2016.



C. Rocha (M’09) Possui graduação (1996), mestrado (1999) e doutorado (2004) em Engenharia Elétrica, pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), campus de Ilha Solteira, Brasil. Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. Atua principalmente nos seguintes temas: Otimização, Técnicas de Otimização, Planejamento de Sistemas Elétricos.

R. L. B. Freitas. Graduado em Engenharia da Computação pela Escola de Engenharia de Lins (2005). Mestrado (2008) e Doutorado (2012) em Engenharia Elétrica pela UNESP, campus de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. Pós-Doutorado com o grupo de Otimização da UNESP, campus de Ilha Solteira com bolsa CNPq PDI. Conhecimentos em metaheurística, algoritmos, programação dinâmica, distribuição e planejamento de energia elétrica, redes neurais. Experiência na área de Engenharia Elétrica, Engenharia da Computação, Engenharia Biomédica. Atualmente é Professor Adjunto Doutor da UNIOESTE, campus de Foz do



Iguaçu, Paraná, Brasil.

VIII. BIOGRAFIAS



F. B. Bornioti. Possui graduação em Engenharia Elétrica (2014) pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. Atualmente é aluno do curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação (PGEEC) pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.



L. P. S. Freitas. Licenciada em Matemática pelo Centro Universitário do Norte Paulista e Licenciada em Pedagogia pela Universidade Federal de São Carlos. Especialista em Educação Matemática pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho Ilha Solteira. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho Ilha Solteira e Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho Ilha Solteira.

Conhecimentos em Engenharia Elétrica, com ênfase em Redes Neurais, atuando principalmente nos seguintes temas: Redes Neurais Artificiais MLP, ART e ARTMAP Nebulosa. Probabilidade e Estatística. Atualmente Professora Doutora da Uniamérica – Foz do Iguaçu.