



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Planejamento de Sistemas de
Distribuição de Energia Elétrica
Utilizando Algoritmo Busca Tabu**

Fernando Abel Bazan Lucero

Ilha Solteira - SP

1210001374



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMO BUSCA TABU

Fernando Abel Bazan Lucero

José Roberto Sanches Mantovani

Orientador

Rubén Romero Lázaro

Co-orientador

1210001374



Proc. 053/2003-NPD 045/03

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCN. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
04.04.03	30.04.03
REGISTRADO POR	TOMBO
<i>Ailza</i>	Te. 1374
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
<i>ilustração autor R\$ 10.00</i>	B3623

Ilha Solteira – SP, Março de 2003

*Co Sys - 185959
Sys - 54761
30404029*

BCpIS - FEIS - UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMO BUSCA TABU

Fernando Abel Bazan Lucero

José Roberto Sanches Mantovani

Orientador

Rubén Romero Lázaro

Co-orientador

Dissertação submetida à Universidade
Estadual Paulista – UNESP, Câmpus de
Ilha Solteira, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica

Ilha Solteira – SP, Março de 2003

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da FEIS/UNESP

Bazan Lucero, Fernando Abel

B362p Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmo busca tabu / Fernando Abel Bazan Lucero. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2003
xx, 112 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2003.

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani

Co-orientador: Rubén Romero Lázaro

Bibliografia: p. 113-115

1. Energia elétrica-Distribuição. 2. Energia elétrica-Planejamento. 3. Otimização combinatória.

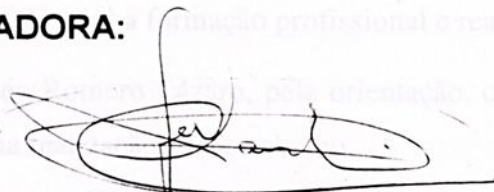
Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmo Busca Tabu

AGRADECIMENTOS

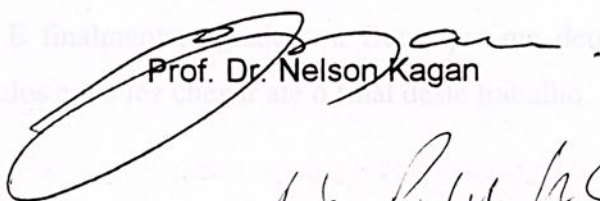
Fernando Abel Bazan Lucero

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE
ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

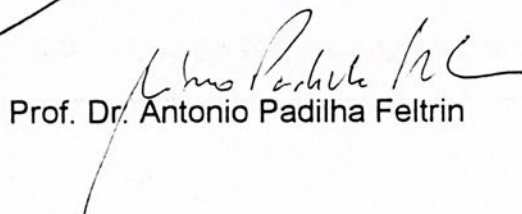
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani – orientador



Prof. Dr. Nelson Kagan



Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin

Ilha Solteira-SP, março de 2003

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho tornou-se possível graças à colaboração de muitas pessoas, porém poucas vezes lembramos de agradecer o apoio daqueles que estiveram presentes.

Agradeço aos meus pais, Miguel e Teresa, pelo amor, carinho, compreensão e por acreditarem em mim em todos os momentos da minha vida. Ficam guardados os exemplos de vida, paciência, compreensão e trabalho que eles inculcaram em mim.

Ao professor José Roberto Sanches Mantovani, pela orientação, confiança, amizade e por contribuir pela minha formação profissional e realização deste trabalho.

Ao professor Rubén Romero Lázaro, pela orientação, confiança, amizade e por suas críticas e sugestões na realização deste trabalho.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Superior pelo apoio financeiro através de bolsa de mestrado.

E finalmente, agradeço a Deus que me deu força e vontade para superar os obstáculos e me fez chegar até o final deste trabalho.

RESUMO

O planejamento da expansão de sistemas de Distribuição de Energia Elétrica é um problema de grande importância para as empresas distribuidoras de energia elétrica que devem oferecer serviços de qualidade a um baixo custo, sendo também de relevante interesse sob o aspecto da pesquisa científica e tecnológica na área da otimização de sistemas, pois trata-se da formulação e solução de um problema de otimização de grande porte que apresenta variáveis dos tipos real e inteira e portanto a sua solução apresenta característica combinatória.

Neste trabalho o planejamento da expansão de sistemas de distribuição é formulado inicialmente como um Modelo de Programação Linear Inteiro Misto (PLIM) de grande porte que foi reestruturado para ser resolvido por um algoritmo de Busca Tabu (BT) dedicado para incorporar as não linearidades das redes de energia elétrica. Este algoritmo de BT utiliza as funções básicas como memória de curto e longo prazos, lista tabu, critério de aspiração, configurações de elite e estratégias de intensificação e diversificação. Para representar matematicamente e computacionalmente a rede de distribuição, utilizou-se arranjos vetoriais binários que são adequados para o problema de planejamento, permitindo uma fácil interligação com o critério de troca dos alimentadores, que foi a estrutura de vizinhança adotada para o algoritmo BT. Para avaliar as configurações candidatas utiliza-se um algoritmo de fluxo de potência radial monofásico simples e eficiente. As formulações matemáticas dos modelos estático, pseudo dinâmico e dinâmico são apresentadas e discutidas.

Resultados para dois sistemas testes encontrados na literatura, um com 3 linhas existentes e 13 linhas potenciais, uma subestação existente e uma potencial, e o outro com 16 linhas existentes e 45 linhas potenciais, duas subestações existentes e duas futuras, são apresentados e discutidos considerando-se os modelos de planejamento estático, pseudo dinâmico e dinâmico.

ABSTRACT

Considering the fast increase of the electric power demand, the distribution systems expansion planning has been calling a problem of great importance for the utilities, which have to offer low-cost and high-quality services. The expansion planning problem has also been of relevant interest for the technological and scientific research in the optimization area, due to the nonlinearity and resolution of a large-scale problem, which presents real and integer variables, thus the resolution has combinatorial characteristics.

The distribution systems expansion planning is formulated initially as a large-size Linear Integer-Mixed Programming Model that was constructed in order to be solved by a Tabu Search Algorithm (TS) dedicated to include the network's characteristics. This TS algorithm uses the following basic functions: the short and long term memories, the tabu list, the aspiration criteria, the elite configurations, and the intensification and diversification strategies. In order to represent qualitatively and comparatively the distribution network, it was used binary-structural areas, which are binary areas hierarchicalized from top to bottom and binary-structural areas, which are suitable for the planning problem, allowing an easy link with the search expansion technique, which was the neighborhood structure adopted for this TS algorithm. A strategic TS that incorporates automatic diversification and new elite replacement strategies as well as an efficient radial single-phase power flow algorithm are applied to solve the problem. Mathematical formulations of the static, pseudo dynamic and dynamic models are presented and discussed.

ABSTRACT

Considering the fast increase of the electric power demand, the distribution systems expansion planning has been revealing a problem of great importance for the utilities, which have to offer low-cost and high-quality services. The expansion-planning problem has also been of relevant interest for the technological and scientific research in the optimization area, due to the formulation and resolution of a large-size problem, which presents real and integer variables, thus the resolution has combinatorial characteristics.

The distribution systems expansion planning is formulated initially as a large-size Linear-Integer-Mixed Programming Model that was restructured in order to be solved by a Tabu Search Algorithm (TS) dedicated to include the network's non-linearities. This TS algorithm uses the following basic functions: the short and long term memories, the tabu list, the aspiration criteria, the elite configurations, and the intensification and diversification strategies. In order to represent mathematically and computationally the distribution network, it was used binary vectorial arrays which are suitable for the planning problem, allowing an easy link with the branch exchange technique which was the neighborhood structure adopted for this TS algorithm. A simple and efficient radial single-phase power flow algorithm was used to analyze the possible configurations. Mathematic formulations of the static, pseudo dynamic and dynamic models are presented and discussed.

Results of simulations using two distributions systems are presented and discussed for the pseudo dynamic and dynamic models. The first system presents 3 existing lines sections and 13 potential lines sections, with 1 existing and 1 potential substations. The second system presents 16 existing lines sections and 45 potential lines sections, with 2 existing and 2 potential substations. It was considered a three-stages horizon planning.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1 Valor presente no planejamento dinâmico
- Figura 3.1 A estratégia da Decomposição de Benders
- Figura 3.2 Ilustração do operador recombinação
- Figura 4.1 Principais Características do algoritmo Busca Tabu
- Figura 4.2 Execução de um movimento BT com memória de curto prazo
- Figura 4.3 Implementação simples da estratégia de intensificação no algoritmo Busca Tabu
- Figura 4.4 Implementação simples de estratégia de diversificação no algoritmo Busca Tabu
- Figura 5.1 Ilustração do esquema de codificação
- Figura 5.2 Ilustração da heurística para obtenção da rede inicial
- Figura 5.3 Técnica de troca de ramos ((a) Intrazona; (b) Interzona)
- Figura 5.4 Exemplo ilustrativo da defloração e numeração dos nós de um sistema de distribuição radial para cálculo de fluxo de carga
- Figura 5.5 Linha típica de um sistema de distribuição
- Figura 5.6 Diagrama de blocos do algoritmo Busca Tabu para o problema de planejamento estático
- Figura 5.7 Diagrama de blocos do algoritmo Busca Tabu para o problema de planejamento dinâmico

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1 Valor presente no planejamento dinâmico
- Figura 3.1 A estratégia da Decomposição de Benders
- Figura 3.2 Ilustração do operador recombinação
- Figura 4.1 Principais Características do algoritmo Busca Tabu
- Figura 4.2 Execução de um movimento BT com memória de curto prazo
- Figura 4.3 Implementação simples da estratégia de intensificação no algoritmo Busca Tabu
- Figura 4.4 Implementação simples de estratégia de diversificação no algoritmo Busca Tabu
- Figura 5.1 Ilustração do esquema de codificação.
- Figura 5.2 Ilustração da heurística para obtenção da rede inicial
- Figura 5.3 Técnica de troca de ramos ((a) Intrazona; (b) Interzona)
- Figura 5.4 Exemplo Ilustrativo da definição e numeração dos nós de um sistema de distribuição radial para cálculo de fluxo de carga
- Figura 5.5 Linha típica de um sistema de distribuição
- Figura 5.6 Diagrama de blocos do algoritmo Busca Tabu para o problema de planejamento estático
- Figura 5.7 Diagrama de blocos do algoritmo Busca Tabu para o problema de planejamento dinâmico

- Figura 6.1 Configuração existente e linhas e subestações potenciais do sistema I
- Figura 6.2 Sistema radial inicial do sistema I com planejamento pseudodinâmico
- Figura 6.3 Sistema proposto para o primeiro estágio do planejamento pseudodinâmico
- Figura 6.4 Sistema proposto para o segundo estágio do planejamento pseudodinâmico
- Figura 6.5 Sistema proposto para o terceiro estágio do planejamento pseudodinâmico
- Figura 6.6 Sistema proposto para o primeiro estágio do planejamento dinâmico
- Figura 6.7 Sistema proposto para o segundo estágio do planejamento dinâmico
- Figura 6.8 Sistema proposto para o terceiro estágio do planejamento dinâmico
- Figura 6.9 Configuração existente e linhas e subestações potenciais
- Figura 6.10 Sistema radial inicial para o planejamento pseudodinâmico
- Figura 6.11 Sistema proposto para o primeiro estágio do planejamento pseudodinâmico
- Figura 6.12 Sistema proposto para o segundo estágio do planejamento pseudodinâmico
- Figura 6.13 Sistema proposto para o terceiro estágio do planejamento pseudodinâmico
- Figura 6.14 Sistema radial inicial para o planejamento dinâmico
- Figura 6.15 Sistema proposto para o primeiro estágio do planejamento dinâmico
- Figura 6.16 Sistema proposto para o segundo estágio do planejamento dinâmico
- Figura 6.17 Sistema proposto para o terceiro estágio do planejamento dinâmico

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1	Relações de equivalência entre Física e <i>Simulated annealing</i>
Tabela 6.1	Dados das demandas dos nós do sistema I nos três estágios de planejamento
Tabela 6.2	Dados das subestações do sistema I
Tabela 6.3	Dados das linhas do sistema I
Tabela 6.4	Dados do tipo de cabo a utilizar no sistema I
Tabela 6.5	Resultados sistema inicial ((a) S/E 10; (b) S/E 12)
Tabela 6.6	Resultados do estágio I ((a) S/E 10; (b) S/E 12)
Tabela 6.7	Resultados estágio II ((a) S/E 10; (b) S/E 12)
Tabela 6.8	Resultados estágio III ((a) S/E 10; (b) S/E 12)
Tabela 6.9	Resultados estágio I ((a) S/E 10; (b) S/E 12)
Tabela 6.10	Resultados estágio II ((a) S/E 10; (b) S/E 12)
Tabela 6.11	Resultados estágio III ((a) S/E 10; (b) S/E 12)
Tabela 6.12	Relação de custos de investimentos – Planejamento Pseudodinâmico vs. Planejamento Dinâmico do sistema I
Tabela 6.13	Dados das demandas dos nós do sistema II nos três estágios de planejamento

Tabela 6.14 Dados das subestações

Tabela 6.15 Dados das linhas do sistema

Tabela 6.16 Dados do tipo de cabo a utilizar no sistema.

Tabela 6.17 Resultados sistema radial inicial ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103; (d) S/E 104)

Tabela 6.18 Resultados do estágio I ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103)

Tabela 6.19 Resultados estágio II ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103)

Tabela 6.20 Resultados estágio III ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103)

Tabela 6.21 Resultados sistema radial inicial ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103)

Tabela 6.22 Resultados estágio I ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103)

Tabela 6.23 Resultados estágio II ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103)

Tabela 6.24 Resultados estágio III ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103)

Tabela 6.25 Relações de custos de investimento – Planejamento Pseudodinâmico vs Planejamento Dinâmico, sistema II

LISTA DE SÍMBOLOS

- CS_i : Custo da Subestação i (Unid/Subestação);
- X_{Si} : Variável binária que define a existência da subestação i (1 subestação é construída, 0 subestação não é construída)
- CF_{Li} : Custo fixo da linha i dependendo da bitola do condutor (Unid/km);
- X_{Li} : Variável binária que define a existência da linha i (1 linha é construída, 0 linha não é construída);
- CV_{MVAi} : Custo variável, por unidade de comprimento e fluxo de potência que a linha i transporta (Unid/MVA/km);
- S_{Li} : Fluxo de potência que transporta a linha i (MVA);
- d_{Li} : Comprimento da linha i (km);
- NS : Número total de subestações;
- NL : Número total de linhas;
- CF_{Esti} : Custo fixo de novos alimentadores, novas subestações e alimentadores que serão trocados por outros de maior capacidade (recondutoramento) no estágio i (Unid);
- CV_{Esti} : Custo variável do estágio i , inclui custos linearizados das perdas (Unid)
- $C_i(x)$: Custo de investimento no estágio i ;

- I : Taxa de atualização do capital (em anos);
- t_i : Tempo do estágio em que são construídas as linhas e as subestações do sistema;
- t_0 : Tempo inicial do período do planejamento.
- D_k : Potência aparente máxima no período de demanda do nó k ;
- $(Y_k)_E$: Potência aparente máxima, em kVA, fornecida pelo nó k associado a uma subestação existente no sistema de distribuição;
- $(Y_k)_b$: Potência aparente máxima, em kVA, fornecida pelo nó $k \in N_{SP}$ associado a uma subestação de capacidade b ;
- $(Y_{ij})_a$: Potência aparente máxima, em kVA, transportada pelo caminho $(i,j) \in N_L$ associado a uma linha de bitola a ;
- $(Y_{ij})_E$: Potência aparente máxima, em kVA, transportada pelo caminho (i,j) , associada a uma linha existente do sistema inicial;
- N_a : Conjunto de bitolas de condutores proposto para ser utilizado na construção de linhas.
- N_b : Conjunto das possíveis capacidades das subestações a serem construídas.
- N_{kP} : Conjunto de nós propostos para serem conectados ao nó k ;
- N_{kE} : Conjunto de nós que estão conectados ao nó k ;
- $(U_{ij})_a$: Capacidade máxima, em kVA, de fluxo de potência de uma linha de bitola a , associada ao caminho $(i,j) \in NL$;
- $(U_{ij})_E$: Capacidade máxima em kVA de fluxo de potência de uma linha existente do sistema de distribuição inicial, associada à rota $(i,j) \in N_{FE}$;
- $(U_k)_b$: Capacidade máxima em kVA, de fornecimento de potência de uma subestação associada ao nó $k \in N_S$;
- $(U_k)_E$: Capacidade máxima em kVA, de fornecimento de potência de uma subestação existente do sistema de distribuição inicial, associada ao nó $k \in N_{SE}$;
- (i, j) : Caminho entre os nós i e j

- N_{FP} : Conjunto de caminhos (entre nós) possíveis para a construção de linhas futuras;
- N_{FE} : Conjunto de caminhos (entre nós) associado a linhas existentes do sistema de distribuição inicial;
- N_{FR} : Conjunto de caminhos (entre nós) associados aos caminhos para recontoramento de linhas futuras;
- N_{SP} : Conjunto de nós selecionados para a construção de subestações futuras;
- N_{SE} : Conjunto de nós associados às subestações que existem no sistema de distribuição inicial;
- N_{SR} : Conjunto de nós selecionados para a construção de subestações futuras. Somente a capacidade da subestação é variável;
- $(X_k)_b$: Variável binária, 1 Constrói-se uma subestação, associada ao nó $k \in N_{SP}$. Caso contrário a variável é igual a zero
- $(X_{ij})_a$: Variável binária, 1 Constrói-se uma linha, associada ao caminho $(i,j) \in N_{FP}$. Em caso contrário esta variável é igual a zero.
- V_i : Tensão avaliada no i -ésimo nó do sistema;
- V_{nom} : Tensão nominal de operação;
- $\% \Delta V$: Porcentagem máxima permitida de queda de tensão, sobre a tensão nominal.
- z_{ij} : Variável binária associada ao caminho (i,j) . Esta variável é igual a 1 (um) se o fluxo do caminho é não nulo.
- nt : Número total de nós associados ao sistema de distribuição
- V : Magnitude da tensão
- s : Nó fonte ou nó de envio
- r : Nó de carga ou nó de recepção
- V_s : Magnitude da tensão de envio (V)
- V_r : Magnitude da tensão de carga (V)
- P : Potência ativa (MW);

- Q : Potência reativa (MVAR);
- R : Resistência de uma linha;
- X : Reatância de uma linha;
- θ : Ângulo de fase;
- L_p : Perdas ativas de uma linha;
- L_q : Perdas reativas de uma linha.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Introdução	1
------------------	---

CAPÍTULO II

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA EXPANSÃO DA DISTRIBUIÇÃO

2.1. Introdução	5
2.2. Planejamento Estático	6
2.3. Planejamento Multi-estágio	6
2.4. Modelagem Matemática	8
2.4.1. Função objetivo do modelo de planejamento ótimo estático	9
2.4.2. Função objetivo do modelo de planejamento ótimo dinâmico	10
2.4.3. Restrições matemáticas	10
2.4.3.1. Primeira Lei de Kirchhoff	11
2.4.3.2. Capacidade de transmissão dos alimentadores	12
2.4.3.3. Capacidade das subestações	12
2.4.3.4. Máxima quota de carga permitida e a configuração radial	14

Índice	1
CAPÍTULO III	
TECNICAS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO	
3.1 Teoremas	16
3.2 Algoritmos Heurísticos	17
3.2.1 Algoritmo Construtivo	18
3.2.2 Algoritmo de Decomposição e Partição	28
3.2.3 Manipulação de Nódos	29
3.2.4 Método de Busca Direta da Partição	20
3.3 Algoritmos de Otimização Clássica	21
3.3.1 O Algoritmo de Busca em Grade	22
3.3.2 Técnica de Decomposição de Problemas	22

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Introdução	1
------------------	---

CAPÍTULO II

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA EXPANSÃO DA DISTRIBUIÇÃO

2.1 Introdução	5
2.2 Planejamento Estático	6
2.3 Planejamento Multi estágio	6
2.4 Modelagem Matemática	8
2.4.1 Função objetivo do modelo de planejamento ótimo estático	9
2.4.2 Função objetivo do modelo de planejamento ótimo dinâmico	10
2.4.3 Restrições matemáticas	10
2.4.3.1 Primeira Lei de Kirchhoff	11
2.4.3.2 Capacidade de transmissão dos alimentadores	12
2.4.3.3 Capacidade das subestações	12
2.4.3.4 Máxima queda de tensão permitida e a configuração radial	14

CAPÍTULO III

TÉCNICAS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO

3.1	Introdução	16
3.2	Algoritmos Heurísticos	17
3.2.1	<i>Métodos Construtivos</i>	<i>18</i>
3.2.2	<i>Método de Decomposição e Partição</i>	<i>18</i>
3.2.3	<i>Métodos de Redução</i>	<i>19</i>
3.2.4	<i>Manipulação do Modelo</i>	<i>19</i>
3.2.5	<i>Métodos de Busca Através da Vizinhança</i>	<i>20</i>
3.3	Algoritmos de Otimização Clássica	21
3.3.1	<i>O Algoritmo Branch and Bound</i>	<i>22</i>
3.3.2	<i>Técnica de decomposição de Benders</i>	<i>22</i>
3.4	Meta – Heurísticas	23
3.4.1	<i>Simulated Annealing (S.A.)</i>	<i>23</i>
3.4.2	<i>Algoritmos Genéticos</i>	<i>25</i>
3.4.3	<i>Busca Tabu</i>	<i>27</i>
3.5	Modelos e Técnicas de Solução do Problema de Planejamento	
	Encontradas na Literatura	28
3.5.1	<i>Khator e Leung (1997) [10]</i>	<i>28</i>
3.5.2	<i>Rosado e Agustin (1998) [1]</i>	<i>30</i>
3.5.3	<i>Proença (1993) [14]</i>	<i>31</i>
3.5.4	<i>Ponnavaikko (1987) [13]</i>	<i>32</i>
3.5.5	<i>Kagan (1992) [8]</i>	<i>32</i>
3.5.6	<i>Goswani (1997) [7]</i>	<i>33</i>
3.5.7	<i>Sun et alii (1982) [16]</i>	<i>34</i>



3.6 Análise dos Algoritmos de Otimização Aplicados no Problema de Planejamento da Distribuição 35

CAPÍTULO IV

O ALGORITMO BUSCA TABU

4.1 Introdução 36

4.2 Fundamentos básicos de busca tabu 37

4.3 Memórias do algoritmo busca tabu 41

4.3.1 Memória de curto prazo 41

4.3.1.1 Critério de aspiração 42

4.3.1.2 Algoritmo BT com memória de curto prazo43

4.3.2 Memória de longo prazo 45

4.3.2.1 Memória baseada em frequência 45

4.3.2.2 Estratégia de intensificação 46

4.3.2.3 Estratégias de diversificação 48

4.4 Funções avançadas no algoritmo busca tabu 50

4.4.1 Oscilação estratégica 50

4.4.2 Path relinking 50

4.4.3 Configurações de elite 51

CAPÍTULO V

ALGORITMO DE BUSCA TABU PARA O PROBLEMA DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

5.1 Introdução 53

5.2 Codificação para o problema de planejamento 53

5.3 Configuração radial inicial 55

5.4 Vizinhança do algoritmo busca tabu 57



5.5	Infactibilidades da vizinhança proposta	61
5.6	Algoritmo de fluxo de carga radial	62
5.6.1	<i>Modelo do sistema de distribuição</i>	<i>63</i>
5.6.1.1	<i>Descrição do sistema de distribuição</i>	<i>64</i>
5.6.2	<i>Fluxo de potência radial – Equação básica</i>	<i>65</i>
5.6.2.1	<i>Equações básicas</i>	<i>66</i>
5.6.3	<i>Algoritmo para o cálculo do fluxo de potência</i>	<i>68</i>
5.7	Algoritmo Busca Tabu para o planejamento estático de sistemas de distribuição	68
5.7.1	<i>A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento estático ..</i>	<i>70</i>
5.7.1.1	<i>Avaliação das configurações vizinhas</i>	<i>71</i>
5.8	Planejamento pseudodinâmico de sistemas de distribuição	72
5.9	Algoritmo de busca tabu para o planejamento dinâmico de sistemas de distribuição	72
5.9.1	<i>A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico</i>	<i>75</i>
5.9.1.1	<i>Avaliação das configurações de cada estágio</i>	<i>76</i>
5.10	Lista Tabu	76
5.11	Critério de aspiração para soluções penalizadas	77
5.12	Critério de parada	77

CAPÍTULO VI

TESTES E RESULTADOS

6.1	Introdução	78
6.2	Sistema I	78
6.2.1	<i>Resultados dos testes realizados</i>	<i>80</i>
6.2.1.1	<i>Modelo Pseudodinâmico</i>	<i>80</i>
6.2.1.2	<i>Modelo Dinâmico</i>	<i>85</i>



6.3 Sistema II 89

6.3.1 Resultados dos testes realizados 92

6.3.1.1 Método Pseudodinâmico 92

6.3.1.2 Modelo Dinâmico 100

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Conclusões 110

BIBLIOGRAFIA

APENDICES

I – INTRODUÇÃO

O planejamento da expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) é um problema relevante e de grande importância para as empresas distribuidoras tanto nos aspectos técnicos como econômicos. Os principais aspectos técnicos e econômicos envolvidos no planejamento da expansão de SDEE são: redução de perdas técnicas e dos custos de operação e expansão da rede, confiabilidade, segurança e qualidade de serviço.

O problema do planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica (PSDEE) consiste em minimizar o custo total da expansão do sistema, que compreende a construção de linhas, subestações e a mudança da bitola de alimentadores existentes (recondutoramento).

O planejamento de sistemas de distribuição pode ser genericamente estabelecido da seguinte forma: seja um sistema de distribuição de energia elétrica atendendo um número fixo de consumidores (nós de consumo). A carga desse sistema não é estática e aumentará com o tempo. O crescimento da carga impõe a necessidade da expansão da rede: construção de novas linhas e/ou troca das linhas existentes por outro de maior capacidade, construção de subestações e ampliação das existentes. Os custos relacionados com estes investimentos e de operação da rede, satisfazendo um conjunto de restrições operacionais, físicas e financeiras constituem o problema de planejamento.

O horizonte de planejamento para as obras de construção de um sistema pode ser realizado em uma etapa, este planejamento é conhecido como planejamento estático, que pode ser realizado quando as obras a serem executadas são pequenas, ou seja, o montante dos investimentos é baixo não necessitando de mais de uma fase para a construção.

Quando o horizonte de planejamento é dividido em vários estágios, os investimentos em construções, substituição e ampliação de linhas e subestações são realizados nos diferentes períodos do planejamento. Este tipo de planejamento é conhecido como planejamento multi estágio, sendo o que representa melhor a realidade. O problema de quando têm que ser construídos os componentes do sistema é analisado simultaneamente com os requisitos quantitativos de todos os estágios que compõem o horizonte de planejamento. A solução do problema torna-se um planejamento dinâmico.

Uma forma aproximada de resolver o planejamento multi estágios, é considerar o problema como vários planejamentos estáticos consecutivos, assim cada estágio é resolvido como se fosse um único estágio. No estágio seguinte o planejamento é inicializado com o sistema que foi proposto no estágio anterior. Este método de planejamento é um planejamento consecutivo do sistema, sendo referenciado na literatura como pseudodinâmico.

O planejamento da expansão de sistemas de distribuição sob o aspecto da pesquisa operacional, pode ser formulado como um problema de programação matemática de grande porte envolvendo variáveis reais e inteiras, que permite o estudo e a proposição de diversas técnicas de otimização para sua solução, sendo propostas na literatura para sua solução técnicas heurísticas e técnicas de otimização clássica e combinatória. Na linha de solução utilizando otimização clássica são propostas técnicas de programação inteira mista tipo branch-and-bound [17] e [26], programação quadrática inteira mista (PQIM) [13], algoritmos baseados na solução de problema de transporte e programação pseudodinâmica [16]. Na linha de pesquisa que propõe a solução através de algoritmos combinatórios tem-se o algoritmo genético (AG) [1] e [14].

Os requisitos básicos necessários para um sistema de distribuição são segurança, economia e qualidade de serviço. Neste trabalho, com bases nestes requisitos, apresenta-se uma formulação matemática genérica do problema de expansão de redes de distribuição de energia elétrica, que é um modelo de programação não linear com



variáveis reais e binárias. A técnica de solução proposta para este modelo é um algoritmo de Busca Tabu (BT), que é uma técnica de otimização combinatória, que tem suas origens nos conceitos de inteligência artificial (IA), e tem sido aplicada em diversas áreas de engenharia. Busca tabu foi desenvolvida estabelecendo um conjunto de princípios (funções) que, de forma integrada, permite resolver um problema de maneira mais inteligente.

Aplicando-se a técnica BT ao problema de Planejamento da Distribuição, desenvolveu-se um algoritmo adaptado para problemas com esse tipo de características e estrutura que busca a(s) melhor(es) configuração(ões) de um conjunto de propostas de solução para cumprir os objetivos fundamentais do problema.

O algoritmo de Busca Tabu proposto foi implementado em linguagem de programação de alto nível, e os resultados obtidos com as simulações utilizando dois Sistemas de Distribuição: (a) Sistema constituído por 3 condutores existentes e 13 condutores potenciais, uma subestação existente uma subestação potencial (candidata) [8]; (b) Sistema apresentado em [14], sendo constituído por 16 condutores existentes e 45 condutores potenciais, duas subestações existentes e duas futuras. São 54 nós de consumo que precisam de energia nos diferentes estágios do horizonte de planejamento. Considerou-se três horizontes de planejamento para todos os sistemas.

Organização do texto

No Capítulo II apresenta-se uma formulação matemática genérica do problema de expansão de Redes de Distribuição de Energia Elétrica, que é pela sua natureza um problema de programação não linear de natureza combinatorial e dinâmica, envolvendo um horizonte de planejamento pré estabelecido para a execução do plano de obras.

No Capítulo III são discutidas as técnicas de solução propostas na literatura para o problema de planejamento da expansão da distribuição. A revisão bibliográfica dos principais trabalhos publicados é realizada com ênfase na formulação do problema, bem como nas técnicas de solução adotadas por diversos autores.



No Capítulo IV apresenta-se detalhadamente, com base na literatura, os conceitos de BT, que foi a técnica adotada neste trabalho para solução do problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição.

No Capítulo V discutem-se os aspectos relevantes da solução do problema de planejamento da expansão da distribuição usando Busca Tabu, tais como critérios de aspiração, convergência, avaliação da função objetivo. Finalmente apresenta-se um algoritmo de busca tabu dedicado à solução do problema de planejamento da expansão.

No Capítulo VI apresentam-se os resultados obtidos considerando planejamento estático e horizonte de planejamento de vários estágios (pseudodinâmico) e planejamento dinâmico de dois sistemas de distribuição de energia elétrica encontrados na literatura utilizando o algoritmo Busca Tabu. O algoritmo para a solução do problema de planejamento da expansão, proposto neste trabalho, foi implementado em linguagem de programação FORTRAN.

No Capítulo VII estão as principais conclusões obtidas sobre o trabalho desenvolvido, assim como sugestões para futuros trabalhos.



1.2. Planejamento Estático

É a decisão sobre investimentos e/ou quando se deve a expansão de um sistema elétrico, atendida em um curto prazo. É o planejamento a curto prazo, visando a atender a demanda da população, por isso, o planejamento dos investimentos é feito em um horizonte de tempo curto, geralmente de 1 a 5 anos. O planejamento a longo prazo, por sua vez, visa a atender a demanda da população em um longo prazo, geralmente de 10 a 20 anos. O planejamento a longo prazo é feito em um horizonte de tempo longo, geralmente de 10 a 20 anos. O planejamento a longo prazo é feito em um horizonte de tempo longo, geralmente de 10 a 20 anos.

No planejamento estático é considerado que todos os investimentos são realizados ao longo de um horizonte de planejamento. Neste tipo de planejamento, o objetivo é encontrar a melhor solução para o problema de expansão do sistema elétrico, considerando as restrições de capacidade das linhas e subestações e as restrições de tensão.

II - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA EXPANSÃO DA DISTRIBUIÇÃO

2.1. Introdução

O problema básico de planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica é a minimização do custo total da expansão, basicamente a construção de linhas, construção e ampliação de subestações existentes e a mudança da bitola de condutores existentes (recondutoramento), obedecendo a um conjunto de restrições, tais como conservar a radialidade do sistema, atendimento da demanda de potência nos nós (lei de Kirchhoff), restrições físicas de operação dos equipamentos que consistem em avaliar os limites máximos de capacidade das linhas e subestações e restrições para as quedas de tensão permissíveis que garantem a qualidade do serviço prestado.

Os requisitos básicos necessários para um plano de expansão do sistema de distribuição são segurança, economia e qualidade de serviço. Neste capítulo, com bases nestes requisitos, apresenta-se uma formulação matemática genérica do problema de expansão de Redes de Distribuição de Energia Elétrica, que é pela sua natureza um problema de programação não linear de natureza combinatorial e dinâmica, envolvendo um horizonte de planejamento pré-estabelecido para a execução do plano de obras. Conforme a filosofia do projeto e a formulação do problema, encontra-se na literatura abordagem para a solução do problema através de técnicas de análise de planejamento estático e ou dinâmico.

2.2. Planejamento Estático

É conhecido como planejamento estático quando as obras de construção de um sistema serão realizadas em um único estágio. Este planejamento é realizado quando as obras a serem executadas são pequenas, ou seja, o montante dos investimentos é baixo não necessitando de mais de uma fase para a construção. Nos trabalhos de planejamento de sistemas de distribuição a maioria dos autores trabalha com este tipo de planejamento, mesmo que não seja muito real.

No planejamento estático é assumido que todos os investimentos são realizados no início do horizonte de planejamento. Neste tipo de planejamento o objetivo é encontrar que os custos fixos e custos de operação sejam mínimos para o período de tempo considerado. Assim todos os investimentos são realizados no início do horizonte de planejamento.

2.3. Planejamento Multi estágios

O período de planejamento é geralmente dividido em vários estágios, por exemplo, períodos de um ano [4]. Isto é normalmente realizado em modelos em que a demanda é considerada constante durante cada estágio. O problema de planejamento de sistemas de distribuição é tipicamente multi estágios porque a expansão do sistema é uma função temporal. A construção de um sistema quando apenas um estágio é considerado, é um caso especial do problema de planejamento multi estágios. O planejamento multi estágios aumenta o tamanho do problema e como consequência o esforço computacional.

Este modelo de planejamento também é conhecido como problema dinâmico. As decisões de investimento de um sistema são realizadas simultaneamente no horizonte que é realizado o planejamento. O sistema é construído por fases tentando fazer os investimentos conforme sejam necessários dependendo de estudos de crescimento da carga. Neste tipo de planejamento é determinado onde e quantos componentes para a rede devem ser instalados, assim como quando novos investimentos devem ser realizados.

Como o planejamento é realizado em diferentes etapas é lógico pensar que os custos dos investimentos mudam nos diferentes horizontes de planejamento, é por isto



que é realizado uma atualização destes custos,ou seja os custos de investimento dos diferentes horizontes de planejamento têm que ser avaliados para um instante de tempo determinado, sendo afetados por uma taxa de atualização do capital.

No exemplo seguinte, ilustrado na figura 2.1, é considerado um problema de investimento com n horizontes de planejamento em t_n anos com uma taxa de atualização do capital i .

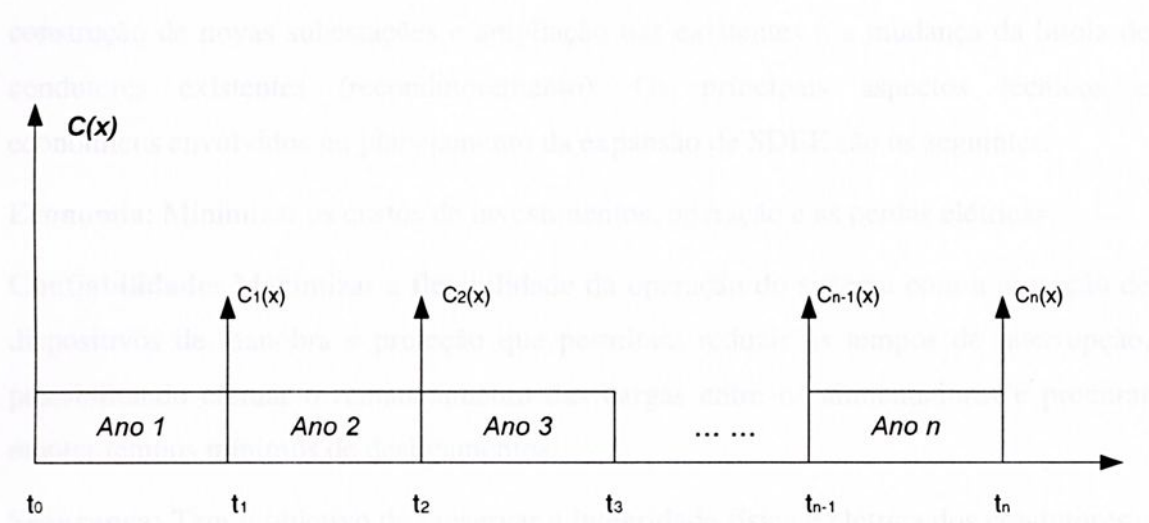


Figura 2.1. Valor presente no planejamento dinâmico

O custo atualizado para o ano t_0 será:

$$C(x) = C_1(x)/(1+I)^{t_1-t_0} + C_2(x)/(1+I)^{t_2-t_0} + C_3(x)/(1+I)^{t_3-t_0} + \dots + C_n(x)/(1+I)^{t_n-t_0}$$

Em que:

- $C_i(x)$: Custo de investimento no estágio i ;
- I : Taxa de atualização do capital (em anos);
- t_i : Tempo do estágio em que são construídas as linhas e as subestações do sistema;
- t_0 : Tempo inicial do horizonte de planejamento.

2.4. Modelagem Matemática

Existem ferramentas que podem ser aplicadas na análise e planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica, que permitem conhecer os valores atuais de demandas e potências de cada nó do sistema e prever o crescimento da demanda.

O problema básico de planejamento de sistemas de distribuição é a minimização dos custos totais da expansão do sistema, basicamente a construção de linhas, construção de novas subestações e ampliação das existentes e a mudança da bitola de condutores existentes (recondutoramento). Os principais aspectos técnicos e econômicos envolvidos no planejamento da expansão de SDEE são os seguintes:

Economia: Minimizar os custos de investimentos, operação e as perdas elétricas.

Confiabilidade: Maximizar a flexibilidade da operação do sistema com a alocação de dispositivos de manobra e proteção que permitam reduzir os tempos de interrupção, possibilitando efetuar o remanejamento das cargas entre os alimentadores e procurar manter tempos mínimos de desligamentos.

Segurança: Tem o objetivo de preservar a integridade física e elétrica dos condutores e equipamentos do sistema. A avaliação do estado físico dos condutores e equipamentos é efetuada através da observação de normas mínimas de segurança.

Qualidade de serviço: Os níveis de tensão e variações máximas e mínimas são especificadas pelas normas de cada país e devem ser preservadas no planejamento. A continuidade dos serviços de fornecimento de energia estão relacionadas com a qualidade e confiabilidade do sistemas que devem possibilitar o menor número de desligamentos possíveis, remanejamento das cargas entre os alimentadores. Neste caso um bom sistema de controle e proteção é essencial.

Qualidade do produto: Outros fatores importantes de qualidade estão relacionados com a qualidade da energia que está sendo entregue pela concessionária relacionados com a forma de onda . Neste caso destacam-se:

- **Desvios de frequência :** Considerada uma perturbação na rede elétrica. Produz uma baixa qualidade de energia, e afeta aos equipamentos eletrônicos e elétricos, causando aquecimento.

- Presença de harmônicos e outros tipos de problemas para a rede : Causam distúrbios às cargas da rede, e causam efeitos indesejáveis nos elementos do sistema.

Impacto ambiental: Alocar as linhas de distribuição e subestações visando a preservação do meio ambiente, atendendo leis de proteção ambiental.

2.4.1. Função objetivo do modelo de planejamento ótimo estático

Esse modelo considera uma função objetivo que representa os custos correspondentes às linhas e subestações do sistema de energia elétrica ou também conhecidos como custos fixos, que representam os investimentos na instalação de novos equipamentos nos sistemas, assim como os custos variáveis ou os custos de operação que representam as despesas necessárias para operar os sistema elétrico e principalmente as perdas nas linhas. A função objetivo é representada pela seguinte equação matemática:

$$FO = \sum_{i=1}^{NS} CS_i X_{Si} + \sum_{i=1}^{NL} CF_{Li} X_{Li} d_{Li} + \sum_{i=1}^{NL} CV_{MVAi} S_{Li} d_{Li}$$

Em que :

CS_i : Custo da Subestação i (Unid/Subestação);

X_{Si} : Variável binária que define a existência da subestação i (1 subestação é construída, 0 subestação não é construída)

CF_{Li} : Custo fixo da linha i dependendo da bitola do condutor (Unid/km);

X_{Li} : Variável binária que define a existência da linha i (1 linha é construída, 0 linha não é construída);

CV_{MVAi} : Custo variável, por unidade de comprimento e fluxo de potência que a linha i transporta (Unid/MVA/km);

S_{Li} : Fluxo de potência na linha i (MVA);

d_{Li} : Comprimento da linha i (km);

NS : Número de subestações totais;

NL : Número de linhas totais.

2.4.2. Função objetivo do modelo de planejamento ótimo dinâmico

No planejamento dinâmico existe uma variável adicional que é o tempo. Assim tem que ser definido em que fase do planejamento serão construídos os diferentes componentes do sistema elétrico. No planejamento estático definem-se as linhas e as subestações a serem construídas, mas no planejamento dinâmico, além de escolher as linhas e subestações a serem construídas também tem que se decidir o estágio no qual elas serão construídas, assim como a troca dos condutores por outro(s) de maior capacidade (recondutoramento) e ampliação das variáveis existentes. Desta forma no planejamento dinâmico a função objetivo é representada como:

$$FO_{dinamico} = (CF_{Est1} + CV_{Est1}) + (CF_{Est2} + CV_{Est2})/(1 + I)^{t^2-t_0} + (CF_{Est3} + CV_{Est3})/(1 + I)^{t^3-t_0} + \dots + (CF_{Estn} + CV_{Estn})/(1 + I)^{t^n-t_0}$$

Em que:

CF_{Esti} : Custo fixo no estágio i , custo de novos alimentadores, custo de novas subestações e custo de alimentadores que serão trocados por condutores de maior capacidade (recondutoramento);

CV_{Esti} : Custo variável do estágio i , inclui custos de operação do sistema e também as perdas.

I : Taxa atualização do capital (em anos);

t_i : Tempo do estágio em que são construídas as linhas e as subestações do sistema;

t_0 : Tempo inicial do período do planejamento.

2.4.3. Restrições matemáticas

A minimização da função objetivo está sujeita a restrições que visam o atendimento da demanda de potência nos nós do sistema de distribuição (primeira lei de kirchhoff), os limites de capacidade nas subestações e limites de capacidade nas linhas de transmissão de energia do sistema e restrições que visam contemplar a qualidade do

serviço tais como máxima queda de tensão permitida nas linhas e permitem estabelecer a radialidade e confiabilidade da operação do sistema.

2.4.3.1 Primeira Lei de Kirchhoff

As restrições que visam o atendimento da demanda são conhecidas como balanço de demanda, e estão baseadas nas leis de Kirchhoff aplicadas a cada nó do sistema. Matematicamente estas restrições são modeladas através da seguinte equação:

$$D_k - (Y_k)_E - \sum_{b \in N_b} (Y_k)_b = \sum_{i \in N_{kp}} \sum_{a \in N_a} [(Y_{ik})_a - (Y_{ki})_a] + \sum_{i \in N_{kE}} [(Y_{ik})_E - (Y_{ki})_E] \quad 2.1$$

Em que:

- D_k : Potência aparente máxima no período de demanda do nó k ;
- $(Y_k)_E$: Potência aparente máxima, em kVA, fornecida pelo nó k associado a uma subestação existente do sistema de distribuição existente;
- $(Y_k)_b$: Potência aparente máxima, em kVA, fornecida pelo nó $k \in N_{SP}$ associado a uma subestação de capacidade b ;
- $(Y_{ij})_a$: Potência aparente máxima, em kVA, transportada pelo caminho $(i,j) \in N_L$ associado a uma linha de bitola a ;
- $(Y_{ij})_E$: Potência aparente máxima, em kVA, transportada pelo caminho (i,j) , associado a uma linha existente do sistema de distribuição inicial;
- N_a : Conjunto de bitolas de condutores disponíveis para ser utilizado na construção de linhas.
- N_b : Conjunto das possíveis capacidades das subestações a serem construídas.
- N_{kp} : Conjunto de nós propostos para ser conectados ao nó k ;
- N_{kE} : Conjunto de nós que estão conectados ao nó k

Para obter um modelo não linear mais exato para representar a rede a equação 2.1, que foi desenvolvida para modelos de programação linear inteiro mistos (PLIM),



pode ser substituída pelas equações de fluxo de potência que serão detalhadas na seção 5. Esta representação não linear do modelo da rede é adequada para ser usada em algoritmos de *simulated annealing*, evolutivos, Busca Tabu e heurísticos.

2.4.3.2 Capacidade de transmissão dos alimentadores

Indicam os limites da capacidade nos alimentadores (existentes ou potenciais), no período de planejamento e operação do sistema. Podem ser formuladas matematicamente como [1]:

Linhas futuras:

$$0 \leq (Y_{ij})_a \leq (U_{ij})_a (X_{ij})_a$$

$$\forall (i,j) \in N_{FP}; \forall a \in N_a$$

Linhas existentes:

$$0 \leq (Y_{ij})_E \leq (U_{ij})_E$$

$$\forall (i,j) \in N_{FE}$$

Caminhos seleccionados para a construção de novas linhas:

$$0 \leq (Y_{ij})_a \leq (U_{ij})_a$$

$$\forall (i,j) \in N_{FR}; \forall a \in N_a$$

2.4.3.3 Capacidade das subestações

Indicam os limites da capacidade nas subestações (existentes ou potenciais), no período de planejamento e operação do sistema. São formuladas matematicamente como:



Subestações futuras:

$$0 \leq (Y_k)_b \leq (U_k)_b (X_k)_b$$

$$\forall k \in N_{SP}; \forall b \in N_b$$

Subestações existentes:

$$0 \leq (Y_k)_E \leq (U_k)_E$$

$$\forall k \in N_{SE}$$

Nós selecionados para a construção de novas subestações:

$$0 \leq (Y_k)_b \leq (U_k)_b$$

$$\forall k \in N_{SR}; \forall b \in N_b$$

Em que:

$(U_{ij})_a$: Capacidade máxima, em kVA, de fluxo de potência de uma linha de bitola a , associada ao caminho $(i, j) \in NL$;

$(U_{ij})_E$: Capacidade máxima em kVA de fluxo de potência de uma linha existente do sistema de distribuição inicial, associada à rota $(i, j) \in N_{FE}$;

$(U_k)_b$: Capacidade máxima em kVA, de fornecimento de potência de uma subestação associada ao nó $k \in N_S$;

$(U_k)_E$: Capacidade máxima em kVA, de fornecimento de potência de uma subestação existente do sistema de distribuição inicial, associada ao nó $k \in N_{SE}$.

(i, j) : Caminho entre nós i e j

N_{FP} : Conjunto de caminhos (entre nós) possíveis para a construção de linhas futuras;

N_{FE} : Conjunto de caminhos (entre nós) associado a linhas existentes do sistema de distribuição inicial;

- N_{FR} : Conjunto de caminhos (entre nós) associados aos caminhos para recondutoramento de linhas futuras;
- N_{SP} : Conjunto de nós selecionados para a construção de subestações futuras;
- N_{SE} : Conjunto de nós associados às subestações que existem no sistema de distribuição inicial;
- N_{SR} : Conjunto de nós selecionados para a construção de subestações futuras. Somente a capacidade da subestação é variável;
- $(X_k)_b$: Variável binária, 1 constrói-se uma subestação, associada ao nó $k \in N_{SP}$. Caso contrário a variável é igual a zero
- $(X_{ij})_a$: Variável binária, 1 constrói-se uma linha, associada ao caminho $(i, j) \in N_{FP}$. Em caso contrário esta variável é igual a zero.

2.4.3.4 Máxima queda de tensão permitida e a configuração radial

As restrições de queda de tensão permissível limitam os valores de tensão nos centros de demanda, monitorando a qualidade da energia entregue aos consumidores. Estas restrições eliminam algumas possíveis soluções que violam as restrições de tensão [1].

Restrição de máxima queda de tensão:

$$V_i \geq V_{nom} \left(1 - \frac{\% \Delta V_{nom}}{100} \right)$$

Em que :

- V_i : Tensão avaliada no i-ésimo nó do sistema;
- V_{nom} : Tensão nominal de operação;
- $\% \Delta V$: Porcentagem máxima permitida de queda de tensão, sobre a tensão nominal.

Restrição de radialidade:

$$\sum_{(i,j) \in N_{FL}} z_{ij} + \sum_{(i,j) \in N_{FR}} X_{ij} + \sum_{(i,j) \in N_{FT}} (X_{ij})_a \leq (nt) - \left[N_{SE} + N_{SR} + \sum_{k \in N_{SP}} (X_k)_b \right]$$

Em que:

z_{ij} : É uma variável binária associada ao caminho (i, j) . Esta variável é igual a 1 (um) se o fluxo do caminho é não nulo.

nt : É o número total de nós associados ao sistema de distribuição (nós iniciais e nós finais)

Deve-se mencionar que a modelagem apresentada com o devido grau de abstração do problema foi utilizada na resolução do problema utilizando algoritmo Busca Tabu. Usando BT, deve-se especificar uma proposta de codificação que represente uma proposta de solução ou uma topologia para construção. Dessa forma, uma vez especificada a proposta de solução, deve-se resolver um problema de fluxo de potencia que permita encontrar os custos operacionais. Restrições operacionais como capacidade de corrente de alimentadores e capacidade máxima das subestações são consideradas para avaliar a factibilidade da proposta de investimento e a restrição de radialidade é considerada implicitamente quando é especificada a proposta de solução e durante o processo de transição de BT através de topologias vizinhas radiais.

III - TÉCNICAS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO

3.1. Introdução

Neste capítulo são discutidas as técnicas de solução propostas na literatura para a solução do problema de planejamento da expansão da distribuição. A revisão bibliográfica, dos principais trabalhos publicados é realizada com ênfase na formulação do problema, bem como na técnica de solução adotada por diversos autores. Na literatura encontram-se diferentes técnicas de solução para o problema de planejamento da distribuição: técnicas heurísticas [12], algoritmos de *otimização clássica* [8] e as *meta heurísticas* [3], [12] e [14] tais como *simulated annealing*, *busca tabu* [11], [12] e *algoritmos genéticos* [12].

O interesse pelas técnicas de solução de problemas de natureza combinatorial tem aumentado muito nestes últimos anos. Os problemas de decisão que se apresentam na vida real, abordam a alocação e utilização de recursos escassos ou requisitos mínimos que têm que ser cumpridos, tendo como objetivo tomar decisões que consistem em obter um mínimo custo ou obter um máximo benefício.

Não é difícil de pensar, que a solução deste tipo de problemas chamaram muito a atenção dos pesquisadores, principalmente desde a II guerra mundial, com o desenvolvimento das investigações de operações de logística. No caso particular em que as funções e as restrições são lineares, tem-se os modelos de programação linear, e estão propostos e desenvolvidos algoritmos eficientes para sua solução (algoritmo simplex e



métodos de pontos interiores [9]). A maioria dos problemas não pode ser modelada de forma linear e convexa, sendo pois necessários o uso de modelos não lineares e o uso de outras técnicas de solução, conhecidos como algoritmos de programação não linear, heurísticos e combinatórios.

3.2. Algoritmos Heurísticos

Os problemas mais importantes da vida real não podem ser resolvidos através de uma técnica de otimização clássica exata, isto é, não é possível encontrar a solução ótima com esforços computacionais razoáveis para sistemas reais [12]. Em tais circunstâncias as técnicas heurísticas constituem uma poderosa ferramenta e adquirem enorme importância na solução de problemas da vida real.

As heurísticas permitem encontrar soluções de boa qualidade para problemas combinatórios complexos, isto é para problemas do tipo NP (Não Polinomial). Assim os algoritmos heurísticos são mais simples de implementar e fornecem soluções com esforços computacionais relativamente pequenos. É importante destacar que os algoritmos heurísticos não garantem o ótimo da solução encontrada em problemas de grande porte, mas dependendo da qualidade de um conjunto de regras, obtidas a partir do conhecimento do problema adicionado ao processo de busca, normalmente encontram soluções de boa qualidade.

A utilização dos algoritmos heurísticos é interessante para os seguintes casos :

- Quando não existe método de solução exato;
- A metodologia de solução existente requer um elevado esforço computacional e muita memória;
- Quando a solução ótima não é relevante porque existem muitos ótimos locais de boa qualidade ou de qualidades equivalentes;
- Quando os dados de entrada do problema são pouco confiáveis (a maioria dos problemas de planejamento).
- Quando existem limitações de tempo e espaço, normalmente solução de problemas em tempo real.



- Para encontrar uma boa solução para ajudar no desempenho de algum outro algoritmo de maior precisão, isto é, a solução obtida pelo algoritmo heurístico é ponto de partida de um outro algoritmo mais exato.

A seguir apresentam-se algumas heurísticas propostas na literatura para solução de problemas de alocação de recursos e planejamento de sistemas [12].

3.2.1. Métodos Construtivos

Consiste em ir adicionando, geralmente um a um, componentes individuais da solução até encontrar uma solução factível. O mais popular destes métodos construtivos é chamado o algoritmo guloso (*greedy*). A estratégia do algoritmo guloso é escolher em cada passo aquela solução que produza o máximo benefício. O algoritmo guloso termina quando encontra uma configuração factível ou não existe uma configuração vizinha melhor [12].

Um exemplo onde se pode aplicar esta tipo de heurística para encontrar uma solução é ao problema de 0-1 Knapsack ou também conhecido como problema da mochila, que consiste em selecionar dentre um conjunto de n produtos, cada um com custos (lucro) c_j e volume a_j conhecidos, pretende-se colocar esses produtos em um recipiente de volume V maximizando o lucro com os produtos colocados no recipiente (mochila).

Outro exemplo pode ser o problema do caixeiro viajante, em que, um viajante tem que visitar n cidades diferentes tentando caminhar a menor distância possível. Nestes dois exemplos pode-se aplicar o algoritmo guloso para tentar encontrar uma boa solução.

3.2.2. Método de Decomposição e Partição

A decomposição consiste em decompor ou separar o problema em vários subproblemas menores para simplificar o processo de solução, sendo a saída de um problema a entrada do outro. Este processo de decomposição deve ser resolvido de forma integrada.



A partição é ligeiramente diferente e consiste em separar um problema em vários subproblemas independentes e a solução do problema é obtida juntando as soluções parciais [12].

Um exemplo de decomposição pode ser usado no problema da mochila, no qual se tem um conjunto de produtos e busca-se colocar os produtos de maior valor dentro da mochila. O algoritmo de decomposição utilizado seria aquele que fixa todos os produtos atrativos no valor de 1 e os não atrativos no valor de 0, e obter um problema reduzido somente com as variáveis relacionadas com os produtos duvidosos.

3.2.3. Métodos de Redução

É possível reduzir o tamanho do problema identificando características específicas das variáveis [3]. Este tipo de método busca identificar algumas propriedades prováveis de estarem presentes na solução ótima do problema, e considerá-las fixas na formulação com vistas a simplificar o problema. Assim pode-se encontrar alguma variável com valor zero e outras que estejam relacionadas com ela.

Um exemplo seria no problema do planejamento da distribuição, em que existem algumas linhas que têm que assumir o valor de zero devido a seu alto custo. Desta forma, inicia-se um novo processo de solução com essas variáveis fixadas no valor zero.

3.2.4. Manipulação do Modelo

Neste tipo de heurística, modifica-se a estrutura do modelo para que a resolução seja mais simples. A solução do problema modificado auxilia na busca de uma boa solução do modelo inicial. Pode consistir em reduzir o espaço de soluções, linearizar funções, agrupar variáveis para reduzir seu número, colocar novas restrições baseado no comportamento esperado da solução ótima.

Na otimização de algum problema pode-se relaxar algumas restrições, para que o problema seja mais fácil de resolver [12].



3.2.5. Métodos de Busca Através da Vizinhança

Estes métodos são inicializados com uma solução factível inicial (obtida provavelmente por alguma outra heurística) e mediante alterações dessa solução ou mecanismos de transição, vão avançando de forma iterativa para outra solução vizinha da solução corrente. Este processo é repetido até que se cumpra um critério de parada pré estabelecido. Durante o processo sempre existe uma solução corrente e também é armazenada uma configuração chamada de incumbente, que é a melhor solução encontrada durante o processo que representa a resposta do problema encontrada pelo algoritmo. Um conceito importante nestes métodos, é como realizar a passagem de uma solução factível a outra. Para isso é importante definir a vizinhança de uma determinada solução, isto é, o conjunto de soluções que se assemelham à solução corrente.

Dentre estas técnicas de busca através de vizinhança, um tipo especial é o método de *busca local ou de descida*, no qual, a cada iteração o movimento se produz desde a solução atual até uma configuração melhor, finalizando a busca quando todas as configurações ao redor de sua vizinhança sejam piores, ou seja, a solução final será sempre um ótimo local.

Nos métodos de busca através de vizinhanças deve-se controlar adequadamente os seguintes problemas [12]:

- Dada uma configuração, deve-se especificar uma estratégia para decidir qual vizinho deve ser considerado como a próxima configuração;
- As configurações vizinhas podem ser factíveis ou infactíveis e cada uma delas possui um valor da função objetivo;
- O número de vizinhos pode ser muito elevado;
- Todos os vizinhos podem ser piores, o que significa que se pode estar em um ponto de ótimo local. Então deve existir uma estratégia para sair desse ótimo local adequadamente;
- Ainda existe o principal problema, que é, qual é a melhor maneira de definir um vizinho? Existem muitas formas e uma delas sempre é a melhor que as outras para cada tipo de problema;
- Um excelente algoritmo deve obter soluções ou configurações de uma qualidade que não devem depender da configuração inicial escolhida para iniciar o processo.

3.3. Algoritmos de Otimização Clássica

Os algoritmos de otimização clássica são muito eficientes na solução de problemas de pequeno e médio porte, e que adicionalmente não apresentam modelagem matemática sofisticada. Para problemas de grande porte com variáveis de natureza real e inteira, apresentam problemas de convergência e elevado esforço computacional.

As principais categorias de técnicas de otimização clássica descritas na literatura, utilizadas na solução de problemas da vida real são [8]:

- **Programação Linear (PL):** Uma ou mais funções lineares são maximizadas ou minimizadas, sujeitas a um conjunto de restrições, representada por igualdades e ou desigualdades lineares;
- **Programação Inteira (PI):** Resolve problemas de otimização em que todas as variáveis são de natureza inteira;
- **Programação linear inteira mista (PLIM):** Resolve problemas de otimização que incluem variáveis inteiras e contínuas. A função objetivo e as restrições são representadas por funções lineares dessas variáveis;
- **Programação quadrática (PQ):** Busca a solução de problemas em que a função objetivo é uma função quadrática e as restrições são funções lineares;
- **Algoritmos de transporte:** são algoritmos de programação matemática que resolvem principalmente problemas de fluxo em redes;
- **Programação dinâmica:** Técnica de otimização que trabalha com problemas multi estágios.

A principal vantagem dos algoritmos de otimização clássica é de obter o ótimo global do problema convexas e bem comportados, já que se realiza uma busca em todo o espaço de soluções. À medida que o número de variáveis aumenta, o tempo necessário para a solução de um problema pode ser não muito atraente para sua utilização prática.

3.3.1. O Algoritmo Branch and Bound

Um número muito grande de algoritmos foram propostos para solucionar problemas de programação linear inteiro misto (PLIM), mas o mais utilizado é o algoritmo Branch and Bound. Esta técnica demonstrou eficiência em problemas práticos de pequeno e médio porte, e tem a vantagem que resolve problemas lineares como subproblemas, isto é, problemas de programação linear (PL) sem restrições de integralidade.

O algoritmo Branch and Bound é representado por uma árvore enumerada, que tem ramos abertos em cada vértice e cada ramo representa possíveis decisões do vértice, e cada vértice é a solução de um PL. Quando são gerados dois nós, um deles é armazenado na lista para posterior análise, e o outro é resolvido. O método é inicializado com o problema original relaxado. É escolhida uma variável que é forçada a assumir seus valores inteiros mais próximos da solução atual, assim se tem dois ramos, nos quais tem as decisões se a variável é forçada a ficar em algum de seus limites. Depende do método de solução escolher qual destas duas opções é escolhida primeiro, mas tem que se avaliar ambas as possibilidades. O algoritmo é aplicado recursivamente aos subproblemas, gerando ramos e vértices para análise.

A solução do problema termina após a sondagem de todos os nós possíveis de serem gerados e se encontrar uma solução com todas as variáveis do problema sendo inteiras, caso exista, já que todas as soluções que estão mais abaixo desse nó são de pior qualidade.

3.3.2. Técnica de decomposição de Benders

A técnica de *Decomposição de Benders* [5] utiliza teoria da dualidade em programação matemática (linear e não linear), para particionar um problema de difícil solução, quando são consideradas todas as variáveis envolvidas em subproblemas com variáveis específicas, que são resolvidos iterativamente até que uma solução ótima seja obtida para o problema completo. A figura 3.1 ilustra a estratégia de Benders. O método da Decomposição de Benders mostra-se particularmente atrativo para problemas de programação mista, permitindo particionar o problema em dois subproblemas: (1) Mestre em que através de sua solução as decisões sobre as variáveis inteiras são obtidas, e; (2) Escravo que analisa a factibilidade das decisões que o mestre obteve.



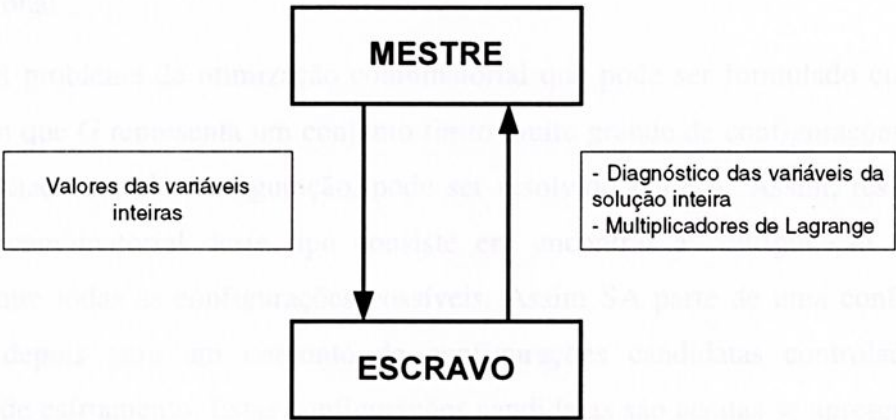


Figura 3.1 A estratégia da Decomposição de Benders

3.4. Meta - Heurísticas

Nesta subseção apresentam-se algumas técnicas de otimização de tipo combinatória descritas na literatura e utilizadas por alguns pesquisadores para solução de problemas de planejamento.

3.4.1. Simulated Annealing (SA)

O origem desta técnica matemática deve-se a um algoritmo que simulava o processo de fundição de um material. Se um material sólido é aquecido a temperaturas maiores que o seu ponto de fusão, e depois é esfriado retornando para seu estado sólido, ocorre que as partículas vão se acomodando num *estado fundamental*, e as propriedades do sólido dependem da velocidade que se produz esse esfriamento. Se o esfriamento é produzido demasiado rápido, o sólido pode chegar a estados meta-estáveis, nos quais as partículas têm alto número de imperfeições. Assim também um esfriamento muito lento pode produzir cristais muito grandes. É importante manter durante o processo o chamado quase equilíbrio termodinâmico.

Simulated Annealing é uma ferramenta adequada para a solução de problemas combinatórios. As desvantagens que apresenta são o tempo elevado de cálculo para encontrar o possível ótimo e a dificuldade de ajustar adequadamente os parâmetros que controlam o algoritmo. Para problemas de grande dimensão, são algoritmos adequados

para se utilizar processamento paralelo como alternativa para diminuir o esforço computacional.

Um problema de otimização combinatorial que pode ser formulado como *Min* $[(G,v)]$, em que *G* representa um conjunto finito muito grande de configurações, e *v* é o custo associado a cada configuração, pode ser resolvido por SA. Assim, resolver um problema combinatorial deste tipo consiste em encontrar a configuração de custo mínimo entre todas as configurações possíveis. Assim SA parte de uma configuração inicial e depois gera um conjunto de configurações candidatas controladas pelo programa de esfriamento. Estas configurações candidatas são aceitas se apresentam um custo menor que a configuração corrente, mas elas também podem ser aceitas se o custo for maior que a configuração corrente de acordo com um critério probabilístico. Esta última característica, a de aceitar configurações com custo mais elevado, permite ao SA sair de eventuais ótimos locais. Este processo é controlado pelo programa de esfriamento.

O programa de esfriamento controla o processo SA até atingir a convergência. A qualidade de um algoritmo SA depende da qualidade do programa de esfriamento. Um programa de esfriamento é definido pela determinação ou escolha dos parâmetros: temperatura inicial, taxa de esfriamento, número de tentativas de transição em cada nível de temperatura e o critério de parada.

Analogia entre física e *simulated annealing*, pode ser estabelecida pelas seguintes relações de equivalência [15]:

Termodinamica		Otimização
Configuração	<=>	Solução factível
Configuração elemental	<=>	Solução ótima
Energia da configuração	<=>	Valor da função objetivo
Temperatura	<=>	Parâmetro de controle

Tabela 3.1. Relações de equivalência entre Física e *Simulated Annealing*

3.4.2. Algoritmos Genético

Algoritmos genético são *técnicas de busca baseada nos mecanismos da seleção natural e a genética* [6]. Este algoritmo foi inventado por Holland na década de 70. A estrutura foi planejada tentando imitar a seleção da natureza, com a esperança que consiga êxitos similares com relação à capacidade de adaptação em ambientes diferentes. Com estas características pode-se afirmar que os algoritmos genéticos são flexíveis e gerais, e podem ser aplicados na solução de muitos problemas de otimização.

A evolução das espécies é determinada por um processo de seleção que leva à sobrevivência os indivíduos geneticamente melhores adaptados para superar os problemas do meio ambiente que geralmente são variáveis. Vários organismos se agrupam formando uma população, e aqueles indivíduos que melhor se adaptam são os que têm maiores possibilidade de sobreviverem e se reproduzirem. Alguns dos sobreviventes são selecionados pela natureza para se cruzarem, produzindo uma nova geração de organismos (recombinação), transmitindo suas características genéticas para os descendentes e melhorando as características genéticas da população. Nos organismos biológicos, a informação hereditária é passada através dos cromossomas que contêm a informação de todos esses fatores, isto é, os genes, os quais por sua vez são compostos por determinados números de valores, conhecidos como alelos, de valores geralmente binários. Os cromossomas que são arranjos de *bits* representam as soluções.

Um algoritmo genético simples é composto pelos operadores de seleção, recombinação, e mutação. O processo de seleção, consiste em selecionar as configurações da população corrente que têm que participar da formação da nova população, para aumentar a probabilidade de obter valores da função objetivo de boa qualidade. Assim, este operador escolhe aquelas configurações que podem ter vários descendentes e outras podem ser eliminadas do processo por serem consideradas de pobre qualidade. Uma maneira muito usada para implementar este operador é a chamada seleção proporcional com a ajuda da *roulette wheel*, que é uma representação de uma roda que gira e na qual cada indivíduo tem uma seção circular que é diretamente proporcional à qualidade do indivíduo. Um passo da seleção seria análogo a um jogo de roleta, em que é selecionado o indivíduo correspondente onde o arco do círculo se detém.

Depois que os pais foram selecionados, é utilizado o operador de recombinação. Nos Algoritmos genéticos, a recombinação consiste em trocar material genético de duas configurações escolhidas após a seleção. Suponha que se tem dois pais, *Pai 1* e *Pai 2* e as duas configurações descendentes geradas são *Filho 1* e *Filho 2*, se o ponto de cruzamento escolhido aleatoriamente é 3 [3]. Então a figura 3.2 mostra a recombinação.

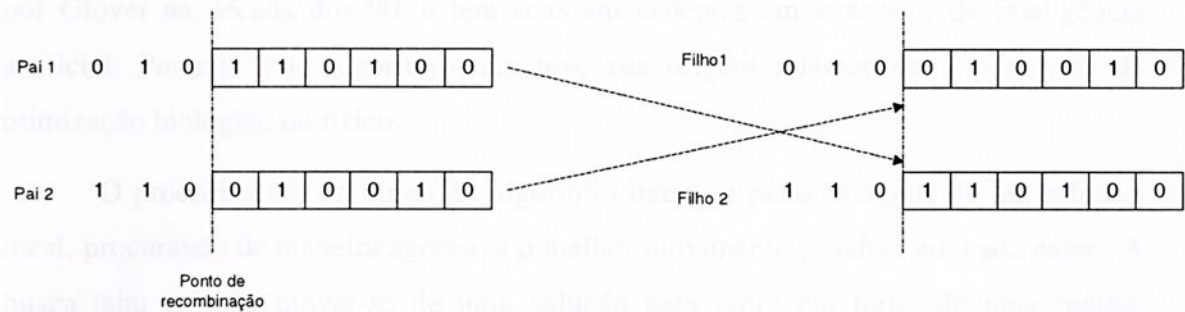


Figura 3.2. Ilustração do operador recombinação

O operador de recombinação busca simular o fenômeno de *crossing over* da genética. Existem vários tipos de recombinação, e a diferença entre eles está no número de pontos de recombinação. O tipo de recombinação do exemplo anterior é conhecido como recombinação de um ponto. Existe recombinação dos tipos múltipontos e uniforme. A operação de realizar ou não a recombinação é determinada de forma aleatória, dependendo da taxa de recombinação.

Depois da aplicação do operador de recombinação, pode-se implementar o operador de mutação. Em problemas que possuem codificação binária, este operador basicamente consiste em trocar o valor de uma variável de valor zero para 1 ou vice-versa. A probabilidade de mutação está sujeita a uma taxa de mutação. Na análise teórica e nas propostas originais, sugere-se que a mutação deve ser realizar *bit* por *bit*, e que a decisão de mutar uma posição tem que ser independente de mutar alguma outra. Assim, imagine que é a taxa de mutação para um problema é $\rho_m = k$. Dessa forma cada bit de uma configuração é analisado com esta probabilidade, sendo gerado um número aleatório $p \in [0,1]$ e se este número é menor que a taxa de mutação ρ_m , então é realizada a mutação. Para populações e configurações muito grandes a mutação pode trazer problemas pelo alto custo computacional.

3.4.3. Busca Tabu

O algoritmo busca tabu, é uma meta heurística para guiar inteligentemente o processo de solução de problemas de otimização na busca de soluções ótimas globais evitando ou procurando sair de ótimos locais. Na literatura [3], [11] e [12], este método tem sido descrito durante os últimos anos como uma técnica bastante promissora, obtendo-se soluções de boa qualidade em diferentes áreas de pesquisa. Foi inventado por Glover na década dos 90, e tem seus antecedentes em conceitos de inteligência artificial. Portanto este algoritmo não teve sua origem relacionada a processos de otimização biológico ou físico.

O procedimento de busca do algoritmo inicia-se pelas margens de um mínimo local, procurando de maneira agressiva o melhor movimento possível em cada passo. A busca tabu permite mover-se de uma solução para outra em torno de uma região, embora não seja a melhor. Assim o algoritmo pode escapar de ótimos locais e continuar estrategicamente a busca de soluções ainda melhores.

Para evitar retrocessos, ou seja voltar a regiões exploradas pela busca, o método grava movimentos recentes em uma ou mais listas tabu, as quais estão proibidas por um determinado tempo. A causa original da lista não foi prever um movimento prévio da repetição, mas sim de evitar que o processo retroceda. Em outras palavras o algoritmo busca tabu mantém uma memória de eventos que são de interesse com relação ao passado. Posteriormente utiliza-se essa memória para alterar o caminho da solução atual e assim influir no processo seguinte da busca. Dentre os dois tipos principais de memória existem aquelas que consideram a estrutura da memória, ou seja, uma solução pode ser armazenada de forma completa, este tipo de memória é conhecida como memória explícita. No outro tipo de memória a solução pode ser armazenada de forma parcial, guardando informação de alguns atributos que foram usados ao se passar de uma solução a outra.

Na memória pode haver informação de recência e frequência de eventos. Os eventos ocorridos mais recentemente são armazenados numa memória de recência, assim se algum movimento está armazenado nesta lista, ele será considerado como tabu ou proibido e não se realizará para a configuração em estudo, a menos que ela seja de excelente qualidade, em que será retirada a proibição. Esta estratégia é conhecida como critério de aspiração.



Pode-se armazenar as melhores soluções encontradas, para depois utilizar técnicas de diversificação e intensificação. Estas técnicas utilizam as memórias de curto e a de longo prazo. A estratégia de intensificação consiste em procurar novas soluções em regiões onde foram encontradas soluções de boa qualidade, e a estratégia de diversificação permite ao algoritmo sair para novas regiões em busca de novas soluções. As estratégias de intensificação e diversificação podem integrar-se, e este método é conhecido como *path relinking*.

Outro conceito importante dentro do algoritmo busca tabu é a oscilação estratégica, a qual guia os movimentos até chegar a um limite que pela qualidade geral da solução e critérios de parada, representa um ponto onde o algoritmo pararia, mas em lugar de parar, a estratégia permite ao algoritmo continuar modificando o critério de vizinhança. A repetição desta estratégia proporciona um bom método para combinar as estratégias de intensificação e diversificação.

Como se pode observar, o algoritmo de busca tabu tenta fazer uma busca com processos determinísticos e não aleatórios. O algoritmo busca tabu utiliza estruturas especiais de memória e de estratégias de busca dinâmica cuidadosamente desenvolvidas para guiar o processo de otimização de um modo eficiente.

3.5. Modelos e Técnicas de Solução do Problema de Planejamento Encontradas na Literatura

Nesta seção discutem-se alguns modelos e técnicas de solução propostas por pesquisadores da área para o problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição encontradas na literatura.

3.5.1. Khator e Leung (1997) [10]

Nesse artigo é realizada uma revisão de modelos matemáticos e técnicas de solução para o problema de planejamento de sistemas de distribuição. Apresentam a discussão e revisão de vários modelos encontrados na literatura empregados no planejamento da distribuição sempre visando uma melhoria na solução do problema.



Cada modelo é descrito com suas principais equações, particularidades, aplicações, técnicas de soluções propostas e autores que realizaram estes estudos.

O trabalho de Kathor e Leung foi dividido em duas partes: planejamento em condições normais e planejamento em condições de emergência.

- Planejamento da distribuição em condições normais: devido a natureza do problema de expansão, os modelos são resolvidos predominantemente com métodos matemáticos como programação linear, programação linear 0-1 e programação não linear. Discutem-se algumas heurísticas para solução do problema que foram desenvolvidas em função de aproximações efetuadas no modelo de planejamento (formulação do problema) e aproximações adotadas para elaboração desses modelos, e são classificadas de acordo com sua precisão.

Os modelos de otimização foram classificados em modelos de estágio simples e modelos de múltiplos estágios. Nos modelos de estágio simples, também conhecido como planejamento estático, a demanda das cargas nos nós de consumo é fixa. Os modelos de estágio simples foram divididos em modelos de alimentadores individuais, modelos de sistemas de alimentadores, modelos em duas fases e modelos subestações/alimentadores. Os modelos múltiplos estágios podem ser resolvidos como uma série de períodos simples, mas o resultado provavelmente não seja um ótimo global.

- Planejamento da distribuição para emergência, separados em duas categorias:
 - Único período: que inclui no modelo de planejamento as condições: (1) manter os sistema apto para atender o consumo sob a ação de uma contingência; (2) Capacidade de efetuar realocação de cargas – reconfiguração;
 - Multi período: incluir no modelo a construção de novos alimentadores para facilitar a realocação de cargas quando da incidência de contingências.

Neste trabalho também discutem-se futuras abordagens a serem dadas ao problema de planejamento, tais como aspectos relacionados com modelos de previsão de carga e formulação do problema utilizando lógica *fuzzy*.

3.5.2. Rosado e Agustin (1998) [1]

Neste trabalho é proposta a solução do problema de planejamento de sistemas de distribuição utilizando os algoritmos genéticos. Os modelos de planejamento abordados foram de estágio simples e múltiplos estágios. A função objetivo considera os custos de investimento das subestações e alimentadores futuros, assim também como os custos de operação do sistema proposto.

As restrições do problema são as tipicamente utilizadas no problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição: lei de Kirchhoff para corrente, limites permissíveis de fluxo nos alimentadores, limites de fornecimento de potência das subestações, quedas de tensão nos alimentadores.

A técnica de solução proposta é um Algoritmo Genético em que os operadores recombinação e mutação foram desenvolvidos para tentar encontrar o ótimo global ou estar muito próximo a este ótimo. Utilizam para representar o conjunto de configurações (população) uma codificação binária, permitindo maior flexibilidade de atuação devido a simplicidade da codificação. É permitido também utilizar condutores de diferentes bitolas, subestações de diferentes capacidades e alocação adequada de alimentadores visando aumentar a confiabilidade do sistema. No processo de mutação e recombinação, alguns indivíduos são trocados por novos indivíduos na próxima geração obedecendo a dois critérios: *crossover relativo*, que consiste que se foi obtida uma baixa quantidade de indivíduos a serem recombinados através da roleta, isto conduz a uma baixa probabilidade de reposição de novo indivíduos na próxima geração; e *mutação relativa*, a qual define que se um indivíduo é mutado através do operador de mutação, deve ser substituído por um novo. Isto previne que algumas variáveis não se tornem muito parecidas com outras.

Os autores também definem o termo “*proteção elitista*”, como uma técnica que armazena as melhores configurações para o sistema quando ocorre a passagem de uma geração para outra. Os algoritmos genéticos comuns possuem uma convergência muito rápida que dificulta descobrir uma solução ótima. Os autores definem outro operador, o “*fator de mutação*” para evitar encontrar a solução precoce através de múltiplas mutações, definido pelos autores como “*Epidemia*”. Esta técnica que utiliza o fator de mutação evita encontrar a solução ótima local muito rápido, ao invés de uma solução ótima global ou muito próxima da solução ótima, esta técnica elimina todas as soluções exceto as melhores. As soluções eliminadas são substituídas por novas soluções. Assim

com estas soluções de boa qualidade é reiniciado o processo, que farão parte da nova população inicial.

Este algoritmo genético obteve configurações ótimas para sistemas de distribuição de dimensões reais, com tempos razoáveis de solução em comparação ao tamanho de cada problema.

3.5.3. Proença (1993) [14]

A técnica de solução utilizada pelo autor para resolver o problema da expansão de sistemas de distribuição foi um algoritmo genético. A função objetivo avalia os custos fixos, perdas no sistema proposto, confiabilidade do sistema, qualidade da queda de tensão. As características típicas do problema de planejamento, como linhas existentes, linhas potenciais, horizontes de planejamento são consideradas no modelo. A codificação empregada procura manter a condição de radialidade do sistema, que é de difícil representação matemática.

Para testar a metodologia e formulação proposta foi utilizado um sistema de 54 pontos de demanda, 16 alimentadores existentes e 45 futuros, 2 subestações existentes e 2 potenciais. Foram considerados três estágios de planejamento para este sistema. Nestes estágios busca-se construir os alimentadores e as subestações e determinar em qual estágio isto ocorrerá. Os resultados obtidos foram satisfatórios pois atendeu-se o horizonte de planejamento. Os valores de tensão não ultrapassam os limites estabelecidos, as perdas foram baixas e os fluxos nos alimentadores permaneceram dentro dos limites permissíveis.

Os resultados obtidos demonstram que o algoritmo genético é uma ferramenta viável para a solução de problema de planejamento. No sentido de demonstrar a flexibilidade do algoritmo, o autor apresenta também uma aplicação ao planejamento de redes de gás. Basicamente o trabalho considera a otimização dinâmica, a inclusão de restrições de radialidade e utiliza também um análise multiobjetivo.

3.5.4. Ponnavaikko (1987) [13]

O problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição foi formulado como um problema de programação quadrático inteiro misto. A função objetivo é representada pelos custos fixos das linhas e subestações e também pelo custo das perdas nos alimentadores. A solução do problema é dividida em duas fases, na primeira parte a programação quadrática é solucionada pelo método de Wolfe, e as variáveis são tratadas como contínuas. Na segunda fase foi desenvolvido um procedimento para fazer o tratamento das variáveis inteiras. Na primeira fase, a partir da solução obtida pelo o método de Wolfe, são escolhidas as subestações que farão parte do sistema, aquelas cujo valor referente à suas variável de decisão for maior que meio. Assim, uma vez que se tem as subestações que farão parte do sistema, analisam-se as linhas que farão parte do sistema. Dessa forma é redefinido o problema com as subestações que foram escolhidas e os alimentadores que estão relacionados a elas. São introduzidas novas restrições para forçar que as variáveis sejam inteiras. O problema é resolvido novamente usando o procedimento de Wolfe.

O sistema utilizado para testar a metodologia foi um sistema simples com 8 nós de consumo, duas subestações potenciais e 15 alimentadores potenciais.

3.5.5. Kagan (1992) [8]

Propõe resolver o problema da expansão de sistemas de distribuição como se fosse um problema de programação linear inteiro misto, considerando uma função multi-objetivo, que representa:

- Múltiplos estágios;
- Subestações existentes com expansão de novas unidades;
- Novas subestações durante o processo de previsão;
- Alimentadores existentes com possibilidade de decisão de recondutoramento;
- Alimentadores futuros com diferentes bitolas e tipos de cabos para cada caminho;
- Restrições de tensão e balanço de energia;
- Limites de queda de tensão;
- Restrições de radialidade e segurança.

A modelagem matemática proposta no trabalho de Kagan, é baseada nas seguintes hipóteses:

- Fator de potência constante para todos os estágios do período de planejamento;
- As curvas de carga não foram consideradas na formulação;
- As cargas são representadas por um modelo de corrente constante;
- Os estudo de previsão de carga local é previamente avaliado e torna-se uma entrada para modelos de Planejamento da Expansão da Distribuição;
- Período de planejamento é dividido em vários estágios, onde cada um deles tem o mesmo tempo de duração.

A função objetivo é condicionada para o problema de expansão multi objetivo, sendo utilizados também conceitos de lógica *fuzzy*. Para testar a metodologia proposta é empregado um sistema teste hipotético com duas subestações, uma existente e outra potencial, 14 linhas totais, 3 linhas existentes e 11 linhas potenciais. São considerados três estágios de planejamento.

3.5.6. Goswani (1997) [7]

Desenvolveu-se um algoritmo baseado na técnica de troca de ramos para expansão da distribuição. A função objetivo avalia os custos fixos do sistema, as novas linhas e subestações que serão adicionadas, assim também avalia o custo das perdas originadas no sistema. O algoritmo é inicializado com uma configuração radial inicial, a qual não necessariamente tem de ser de boa qualidade, pois permite-se ao algoritmo modificar essa configuração para outra melhor.

O método de troca de ramos, basicamente converte uma configuração radial em uma não radial ou um sistema malhado formando laços. A estrutura radial é restaurada novamente quando se abre alguma outra linha da rede para minimizar a função objetivo. Os autores definem dois tipos de troca de linhas. O procedimento chamado *branch exchange intrazone*, tenta trocar elementos que estão em uma subestação, assim determina a configuração ótima da rede que é fornecida por uma subestação. O outro tipo de troca de ramos é conhecida como *branch exchange interzone*, a qual muda linhas entre duas subestações adjacentes.

Os critérios considerados para abrir um laço foram reduzir sobrecarga em uma linha, as quedas de tensão nos nós de consumo e reduzir o custo do sistema proposto.

Como exemplo numérico foi utilizado um sistema teste com 15 linhas e duas subestações. A solução do problema de planejamento é efetuada sem considerar o crescimento vegetativo da carga (estático).

3.5.7. Sun et alii (1982) [16]

Propõem para um horizonte de longo prazo o planejamento de alimentadores primários e subestações de distribuição, uma técnica de solução baseada no modelo de transportes e algoritmo de tipo *Branch and Bound*. Na primeira fase aplicam um modelo estático para obter uma solução que satisfaça as condições correspondentes ao final do horizonte de planejamento, considerando o conjunto completo de componentes da rede que seriam construídos durante o período do estudo. Na Segunda fase, o modelo estático é aplicado a cada rede intermediária expandida do estágio precedente, sendo escolhidos componentes da rede do conjunto que foi selecionado na primeira fase. O procedimento de planejamento é baseado num processo de otimização por concatenação, não se obtendo necessariamente a solução ótima.

3.6. Análise dos Algoritmos de Otimização Aplicados no Problema de Planejamento da Distribuição

O modelo matemático do planejamento da distribuição considerando-se de forma realista as características econômicas e físicas da operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica, é um problema de programação não linear inteiro misto de grande porte. As técnicas clássicas de otimização aplicadas na solução deste tipo de problema podem levar a soluções ótimas locais e, dependendo das dimensões e dos modelos adotados para o problema sob estudo, serem inviáveis de aplicar. As técnicas heurísticas são atraentes sob o aspecto computacional, geralmente não apresentam restrições com relação às dimensões e modelos dos sistemas, mas não garantem soluções ótimas para sistemas de médio e grande porte.

Para solução de problemas de planejamento as meta heurísticas têm se destacado como técnicas atraentes para problemas de grande e médio porte, permitindo encontrar soluções ótimas e ou um conjunto de soluções ótimas locais de boa qualidade. A limitação deste tipo de técnica é o tempo computacional que para área de planejamento da expansão e com os atuais sistemas computacionais, não chega a ser um problema crítico. As meta heurísticas, especialmente a busca tabu proposta neste trabalho para solução do planejamento da expansão da distribuição, representam uma vasta área de pesquisa para solução de problemas da vida real. Os trabalhos publicados deixam vários aspectos referentes a melhoria dos modelos e técnicas de solução dedicadas a um problema específico da vida real, para serem explorados e conseqüentemente melhorados.

4.1. Introdução

Desde a primeira introdução da busca tabu (BT) (Glover, 1989) e (Glover, 1990) para a solução de problemas de otimização, esta técnica tem se destacado como uma das mais poderosas para a solução de problemas de otimização. A busca tabu é uma técnica de otimização que utiliza uma memória de curto prazo para armazenar informações sobre as soluções já visitadas, evitando assim a repetição de soluções já conhecidas. Esta técnica é aplicada em problemas de otimização de grande porte, onde o espaço de busca é muito grande e a busca exaustiva é inviável. A busca tabu é uma técnica de otimização que utiliza uma memória de curto prazo para armazenar informações sobre as soluções já visitadas, evitando assim a repetição de soluções já conhecidas. Esta técnica é aplicada em problemas de otimização de grande porte, onde o espaço de busca é muito grande e a busca exaustiva é inviável.

A busca tabu é uma técnica de otimização que utiliza uma memória de curto prazo para armazenar informações sobre as soluções já visitadas, evitando assim a repetição de soluções já conhecidas. Esta técnica é aplicada em problemas de otimização de grande porte, onde o espaço de busca é muito grande e a busca exaustiva é inviável. A busca tabu é uma técnica de otimização que utiliza uma memória de curto prazo para armazenar informações sobre as soluções já visitadas, evitando assim a repetição de soluções já conhecidas. Esta técnica é aplicada em problemas de otimização de grande porte, onde o espaço de busca é muito grande e a busca exaustiva é inviável. A busca tabu é uma técnica de otimização que utiliza uma memória de curto prazo para armazenar informações sobre as soluções já visitadas, evitando assim a repetição de soluções já conhecidas. Esta técnica é aplicada em problemas de otimização de grande porte, onde o espaço de busca é muito grande e a busca exaustiva é inviável.

A busca tabu é uma técnica de otimização que utiliza uma memória de curto prazo para armazenar informações sobre as soluções já visitadas, evitando assim a repetição de soluções já conhecidas. Esta técnica é aplicada em problemas de otimização de grande porte, onde o espaço de busca é muito grande e a busca exaustiva é inviável. A busca tabu é uma técnica de otimização que utiliza uma memória de curto prazo para armazenar informações sobre as soluções já visitadas, evitando assim a repetição de soluções já conhecidas. Esta técnica é aplicada em problemas de otimização de grande porte, onde o espaço de busca é muito grande e a busca exaustiva é inviável.

IV - O ALGORITMO BUSCA TABU

4.1. Introdução

Dentre as principais heurísticas para solução de otimização encontradas na literatura está o algoritmo Busca Tabu (BT) [3], [12] e [15], que é uma heurística computacional de busca conhecida que tenta superar os problemas da convergência local em problemas de otimização. Neste Capítulo apresenta-se detalhadamente, com base na literatura, os conceitos de BT, que foi a técnica adotada neste trabalho para solução do problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição.

O algoritmo BT é um algoritmo de busca heurística, para solução de problemas gerais de otimização, adequado para solução de problemas combinatórios. Trata-se basicamente de um processo heurístico de busca local, que utiliza algumas estratégias adequadas para a busca de soluções ótimas de problemas de otimização bem e mal condicionados. Foi desenvolvido por Fred Glover nos anos 80, que tem suas bases em conhecimentos de inteligência artificial, tendo sido mais intensivamente elaborado, sofisticado e explorado na solução de problemas de diversas áreas do conhecimento na década de 90, por outros autores que desenvolveram importantes estudos para melhorar o desempenho dessa heurística [3] [11] e [15]. O algoritmo busca tabu ainda é pesquisado ativamente, e continua evoluindo.

A palavra tabu sugere algo proibido, ou pelo menos inibido. A heurística BT básica emprega restrições tabu para inibir certos movimentos e alguns procedimentos denominados critérios de aspiração são utilizados para decidir quando os movimentos

classificados como tabu podem ser executados. Desta forma, BT conduz a busca para áreas ainda não analisadas do espaço de busca, tentando evitar a convergência da solução para um mínimo ou máximo local. As restrições tabu são geralmente controladas por uma lista que memoriza os últimos movimentos executados. O tempo que um movimento permanece nesta lista, em geral está relacionado com o número de iterações do algoritmo e com o número de movimentos possíveis a partir da solução candidata atual (solução que está sendo analisada). A implementação de um algoritmo BT básico envolve decidir como os movimentos (geração de novas soluções) são realizados, a definição dos critérios de aspiração e como é feito o gerenciamento da memória dos movimentos, além de outros detalhes e técnicas que são discutidas neste capítulo.

O algoritmo BT pode ser convenientemente caracterizado como sendo uma busca através de soluções vizinhas. Cada solução tem um conjunto associado de soluções vizinhas chamadas vizinhança. Define-se uma vizinhança, e procura-se a melhor solução local para passar para este ponto ou a menos pior, logo uma vez definida novamente uma nova vizinhança continua com a busca do ótimo global. Desta forma BT é um método de muita exigência e de alto custo computacional, devido a que para cada passo que ele realiza tem que analisar todos os vizinhos e realizar um movimento. Pode-se dizer que o algoritmo Busca Tabu tem uma exploração sensível.

Um algoritmo de BT complexo utiliza em sua estrutura algumas técnicas avançadas de exploração e de memória, como são memórias de longo e curto prazo, estratégias de intensificação, diversificação, oscilação estratégica, *path relinking*, lista de configurações de elite, etc.



4.2. Fundamentos básicos de busca tabu

A busca BT é um procedimento heurístico proposto por Fred Glover para resolver problemas de otimização combinatória. Foi concebido através de um conjunto de procedimentos que permitem resolver um problema de busca local de forma inteligente. O algoritmo BT ao contrário de outros algoritmos baseados em técnicas aleatórias de busca de soluções, caracteriza-se por utilizar uma estratégia baseada nas estruturas de memórias para escapar dos ótimos locais, que podem ocorrer ao se mover de uma solução a outra pelo espaço de soluções. Possui em sua estrutura uma memória que armazena os últimos movimentos realizados e que pode ser utilizada para “lembrar” aqueles movimentos que fazem voltar a busca para configurações já visitadas. Esta memória é utilizada para evitar o retorno a estas soluções.

O algoritmo BT está baseado em dois fundamentos principais, memória adaptativa e exploração sensível. A idéia da exploração sensível na BT, está inspirada na hipótese de que uma escolha ruim realizada por alguma estratégia produz mais informação que uma boa escolha aleatória.

A base da BT pode ser explicada, considerando-se uma função $f(x)$ para ser otimizada sobre um conjunto de soluções X . A busca começa a partir de uma solução $x_o \in X$ e que pode ser um ótimo local, e é uma característica de início de qualquer busca local. Cada x tem um contorno ou conjunto de vizinhos $N(x)$. O algoritmo busca tabu encontrará a melhor solução ou a menos pior dentro desse intervalo da vizinhança e passará para aquela que foi escolhida obtendo-se x_I , que será a solução atual. Ao continuar com x_I com a busca no espaço de soluções pode ser que x_o seja melhor que todos os vizinhos (movimento entre x_o e x_I) é obvio que se retorna para a mesma solução, entrando em um ciclo que impede sair dessa região e explorar outras regiões diferentes.

Para evitar cair em ótimos locais, o algoritmo considera alguns movimentos “tabu”, de forma que esses movimentos não podem ser aceitos por um determinado tempo ou um certo número de iterações. No caso anterior pode ser considerado tabu o movimento de x_I a x_o de maneira que não se aceitaria novamente x_o como solução atual, mas sim outra solução, evitando cair em um ciclo.

À medida que a busca prossegue o algoritmo pode mudar o critério de vizinhança $N(x)$ para $N^*(x)$, assim se evita que o algoritmo pare em regiões que não são

muito atraentes. Um processo repetitivo desta estratégia leva o algoritmo de busca local a parar no momento em que não existe nenhuma configuração vizinha que produza uma diminuição da função objetivo o que significa que foi encontrada um ótimo local ou quando foi esgotado um critério de parada escolhido.

A ênfase na exploração sensível em busca tabu, deriva-se da hipótese que uma má seleção estratégica pode produzir mais informação que uma boa seleção aleatória [3]. Um algoritmo BT para um problema específico pode usar algumas ou todas as funções mostradas na Figura 4.1 [12], interligadas das formas mais variadas. A finalidade da BT é encontrar formas novas e mais efetivas de obter vantagens dos conceitos que estão representados nesta figura e que serão detalhados nas próximas seções.

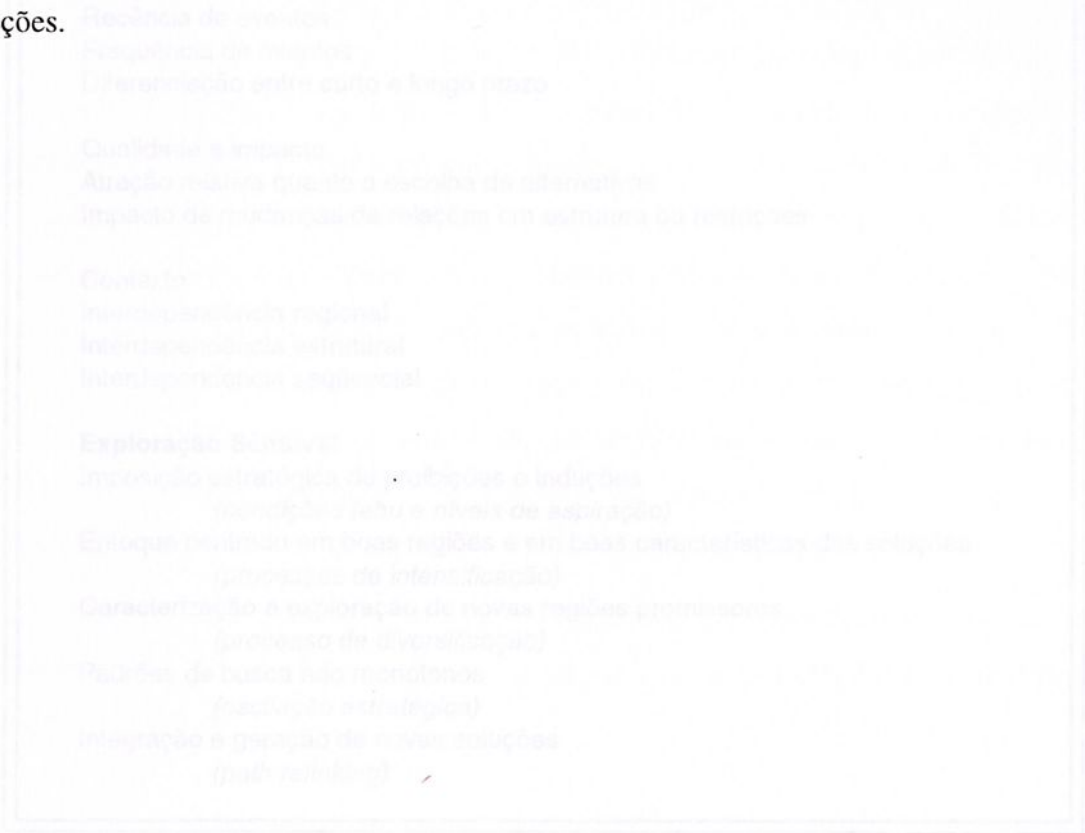


Figura 4.1 Principais Características de Algoritmos de Busca Tabu

4.3. Memórias do algoritmo Busca Tabu

A estrutura de memória do algoritmo de Busca Tabu é bastante simples. Para memória de curto prazo utiliza-se um critério de proximidade. A memória de curto prazo consiste em armazenar informação de partes recentes, isto é, deve-se armazenar as informações das últimas transições. Para aproveitar esta memória, os atributos selecionados são designados como tabu e guardados em uma lista de atributos proibidos, e as configurações que contém estes atributos são penalizadas e consideradas como tabu ou proibidas. Isto evita que algumas

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE BUSCA TABU

Memória adaptativa

- Seletividade (incluindo esquecimento estratégico)
- Abstração e decomposição (usando memória explícita e por atributos)

Tempo

- Recência de eventos
- Frequência de eventos
- Diferenciação entre curto e longo prazo

Qualidade e impacto

- Atração relativa quanto a escolha de alternativas
- Impacto de mudanças de relações em estrutura ou restrições

Contexto

- Interdependência regional
- Interdependência estrutural
- Interdependência sequencial

Exploração Sensível

- Imposição estratégica de proibições e induções
(condições tabu e níveis de aspiração)
- Enfoque centrado em boas regiões e em boas características das soluções
(processos de intensificação)
- Caracterização e exploração de novas regiões promissoras
(processo de diversificação)
- Padrões de busca não monótonos
(oscilação estratégica)
- Integração e geração de novas soluções
(path relinking)

Figura 4.1. Principais Características do algoritmo Busca Tabu

A memória de longo prazo é utilizada para armazenar informações de partes recentes, isto é, deve-se armazenar as informações das últimas transições. Para aproveitar esta memória, os atributos selecionados são designados como tabu e guardados em uma lista de atributos proibidos, e as configurações que contém estes atributos são penalizadas e consideradas como tabu ou proibidas. Isto evita que algumas

4.3. Memórias do algoritmo busca tabu

A estrutura da memória do algoritmo BT é referenciada através de quatro princípios: recência, frequência, qualidade e influência [11]. Recência e frequência são complementares um com outro. O conceito de qualidade refere-se à habilidade de diferenciar a qualidade da solução visitada durante a busca. Assim a memória pode ser utilizada como um bom mecanismo para se movimentar de uma solução para outra. O algoritmo busca mover-se para regiões de boa qualidade e penaliza quando são realizados movimentos para regiões pobres. O princípio de influência, considera o impacto das escolhas durante a busca, guardando informação com respeito à influência das escolhas ou uma solução particular, adiciona-se aprendizagem ao algoritmo.

As memórias utilizadas no algoritmo BT podem ser explícita ou por atributos. A memória explícita guarda as informações completas de uma determinada configuração, e consiste tipicamente em uma elite de soluções visitadas durante a busca. A memória baseada em atributos, guarda informações sobre atributos das soluções que mudam ao se passar de uma solução para outra. O armazenamento da informação através de atributos apresenta a vantagem de pequena memória para armazenamento e facilidade de manipulação e verificação. Também, apresenta a vantagem de que um atributo proibido pode evitar retornar a uma configuração já visitada, mas também apresenta a grande desvantagem de que seja visitado um conjunto de configurações que compartilham atributos proibidos como configurações já visitadas.

Existem dois tipos de memórias no algoritmo BT, memória de curto prazo e memória de longo prazo. Cada tipo de memória está acompanhado de suas próprias estratégias especiais.

4.3.1. Memória de curto prazo

A memória de curto prazo é mais comumente utilizada nos algoritmos BT e também é a mais simples. Esta memória utiliza uma lista de atributos proibidos e um critério de aspiração. A memória de curto prazo consiste em armazenar informação do passado recente, isto é, deve-se armazenar as informações das últimas transições. Para aproveitar esta memória, os atributos selecionados são designados como tabu e guardados em uma lista de atributos proibidos, e as configurações que contêm estes atributos são penalizadas e consideradas como tabu ou proibidas. Isto evita que algumas



soluções do passado pertençam à nova vizinhança e portanto não serão avaliadas ou serão penalizadas.

Este fato é uma limitação porque algumas configurações de excelente qualidade, que podem ser a ótima global, podem estar temporariamente proibidas porque compartilham atributos proibidos com configurações já visitadas. Este problema pode ser solucionado de duas formas:

- Eliminando a proibição após um determinado número de transições, podendo ocorrer o problema de ciclagem.
- Utilizando uma nova estratégia, conhecida como critério de aspiração, que consiste em avaliar a função objetivo de uma configuração considerada como tabu, e se aquela função objetivo é de boa qualidade, é retirada a proibição.

A qualidade de um algoritmo BT que utiliza memória de curto prazo depende da forma em que é especificada a estrutura de vizinhança, do tipo de atributo escolhido, da duração da proibição dos atributos e do critério de aspiração adotado [12].

4.3.1.1 Critério de aspiração

O critério de aspiração representa um elemento importante de flexibilidade na busca tabu. A proibição tabu de uma solução pode ser ignorada se algumas condições são cumpridas. É obvio que qualquer solução que seja a melhor encontrada que as anteriores merece ser considerada admissível, inclusive com a retirada da proibição.

Os critérios de aspiração são introduzidos em BT para determinar quando uma restrição tabu pode ser quebrada, isto é a restrição é ignorada e o movimento, mesmo sendo classificado como proibido, é executado. Um critério de aspiração bastante utilizado é o de ignorar a restrição tabu sempre que a solução encontrada por um determinado movimento proibido for melhor que a solução encontrada até o momento. A aplicação adequada desses procedimentos é fundamental para se atingir altos níveis de performance em BT.

A base deste conceito está na influência que mede a qualidade da configuração analisada. Pode ser considerada uma configuração vizinha de excelente qualidade, mesmo estando proibida se:

- Apresentar um valor da função objetivo melhor que o incumbente do processo;
- Apresentar um valor da função objetivo melhor que os encontrados no processo BT com memória de curto prazo;
- Apresentar um valor da função objetivo de melhor qualidade dentre as últimas transições.

4.3.1.2 Algoritmo BT com memória de curto prazo

Na Figura 4.2 apresenta-se um diagrama de blocos de uma iteração do algoritmo BT que utiliza memória de curto prazo. Analisando-se este diagrama, verifica-se que a partir da solução corrente, deve-se avaliar todas as configurações candidatas $x \in N(x)$ e escolher o melhor vizinho. A seguir estão detalhados as propriedades e funções de cada bloco.

- **Bloco A:** Geradas todas as configurações candidatas $x' \in N(x)$;
- **Bloco B:** Acionada a lista tabu, que não elimina automaticamente uma configuração candidata que possui atributos proibidos. Assim configurações com atributos proibidos são penalizadas na função objetivo em C, para que se tornem pouco atrativas;
- **Bloco C:** Implementado o critério de aspiração, que dá maior flexibilidade ao processo;
- **Bloco D:** Penaliza as configurações que estão proibidas;
- **Bloco E:** Realizada a avaliação da função objetivo para cada configuração candidata;
- **Bloco F:** Armazenada a melhor configuração candidata encontrada;
- **Bloco G:** Verificado se todas as configurações vizinhas já foram analisadas;
- **Bloco H:** Realizada a transição, em que a configuração corrente é substituída pela melhor configuração candidata encontrada, isto é a melhor vizinha é encontrada.

4.3.3. Memória de longo prazo

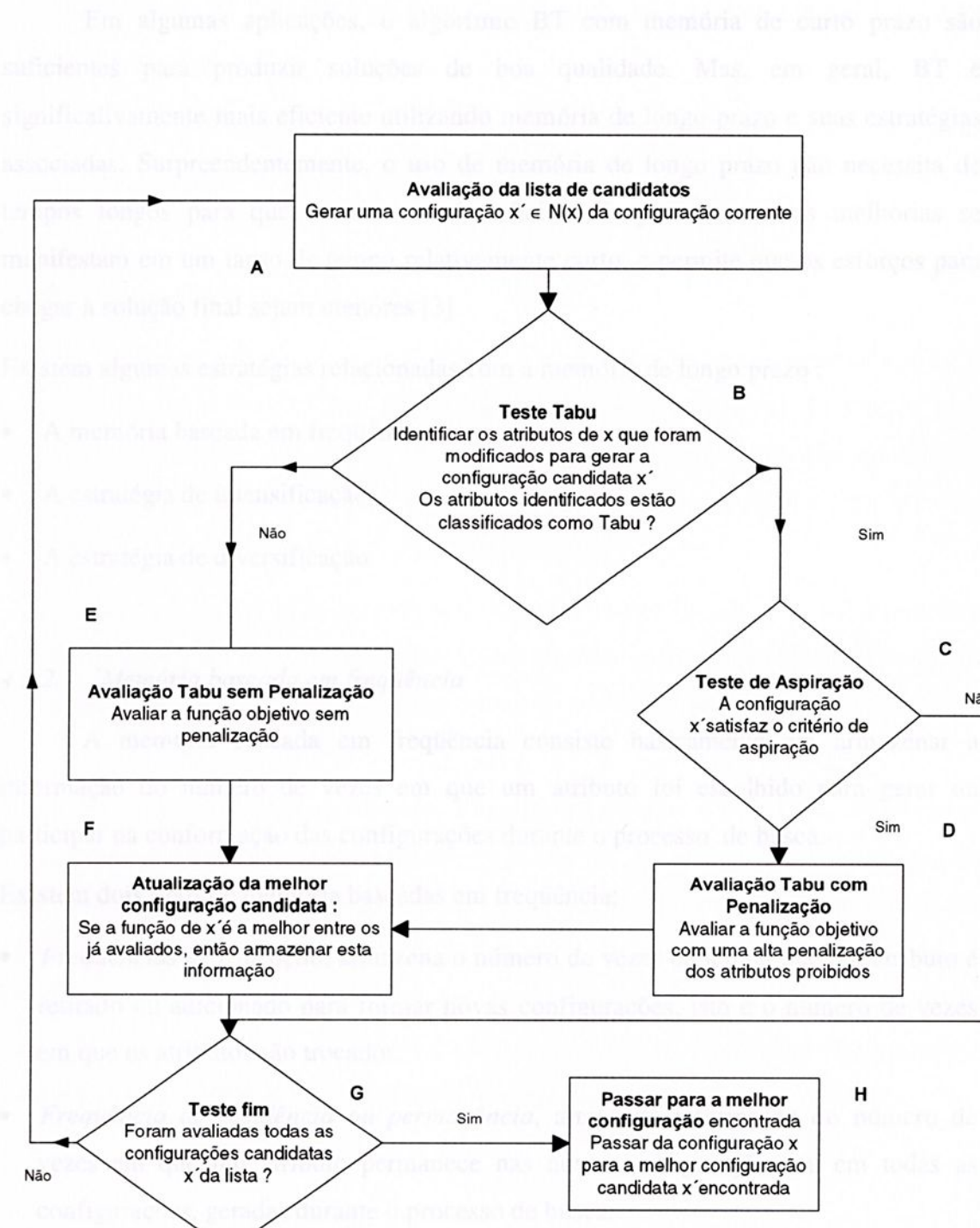


Figura 4.2. Execução de um movimento BT com memória de curto prazo

4.3.2. Memória de longo prazo

Em algumas aplicações, o algoritmo BT com memória de curto prazo são suficientes para produzir soluções de boa qualidade. Mas, em geral, BT é significativamente mais eficiente utilizando memória de longo prazo e suas estratégias associadas. Surpreendentemente, o uso de memória de longo prazo não necessita de tempos longos para que ocorram os benefícios. Frequentemente, as melhorias se manifestam em um lapso de tempo relativamente curto, e permite que os esforços para chegar à solução final sejam menores [3].

Existem algumas estratégias relacionadas com a memória de longo prazo :

- A memória baseada em frequência ;
- A estratégia de intensificação;
- A estratégia de diversificação.

4.3.2.1 Memória baseada em frequência

A memória baseada em frequência consiste basicamente em armazenar a informação do número de vezes em que um atributo foi escolhido para gerar ou participar na conformação das configurações durante o processo de busca.

Existem dois tipos de memória baseadas em frequência:

- *Frequências de transição*, armazena o número de vezes ou tempo que um atributo é retirado ou adicionado para formar novas configurações, isto é o número de vezes em que os atributos são trocados.
- *Frequência de residência ou permanência*, armazena informação do número de vezes em que um atributo permanece nas novas configurações ou em todas as configurações, geradas durante o processo de busca.

A informação da memória baseada em frequência pode ser utilizada de diferentes maneiras, por exemplo:

- Armazenar a frequência de permanência de um atributo e depois implementar uma diversificação ou também uma intensificação que são duas estratégias que serão explicadas futuramente.
- Armazenar a frequência de permanência como configurações de elite (melhores configurações encontradas)

4.3.2.2 Estratégia de intensificação

É um dos componentes importantes na memória de longo prazo da BT. A estratégia de intensificação está baseada na modificação das regras de eleição para favorecer movimentos em busca de novas configurações, aproveitando informação acumulada no processo de busca. Pode-se iniciar um retorno para regiões atrativas com a finalidade de realizar uma busca mais intensiva.

Um tipo de enfoque de intensificação, é a intensificação por decomposição, realizada através da imposição de restrições em algumas partes do problema, permitindo um enfoque mais concentrado nas outras partes do problema que não foram restringidas [3].

Um exemplo deste procedimento é mostrado na Figura 4.3 [12], que a parte mais importante é o bloco B, onde se identifica a estratégia de seleção de configurações de elite. Este bloco identifica a estratégia que deve ser implementada para encontrar um conjunto de configurações de elite, em que cada uma delas identifica uma região promissora. Assim, a partir de cada uma das configurações de elite armazenadas na lista, deve-se implementar um novo processo de busca de excelentes configurações guiada por uma estratégia BT de memória de curto prazo como indica o bloco D.

Figura 4.3. Implementação da estratégia de intensificação no algoritmo Busca Tabu

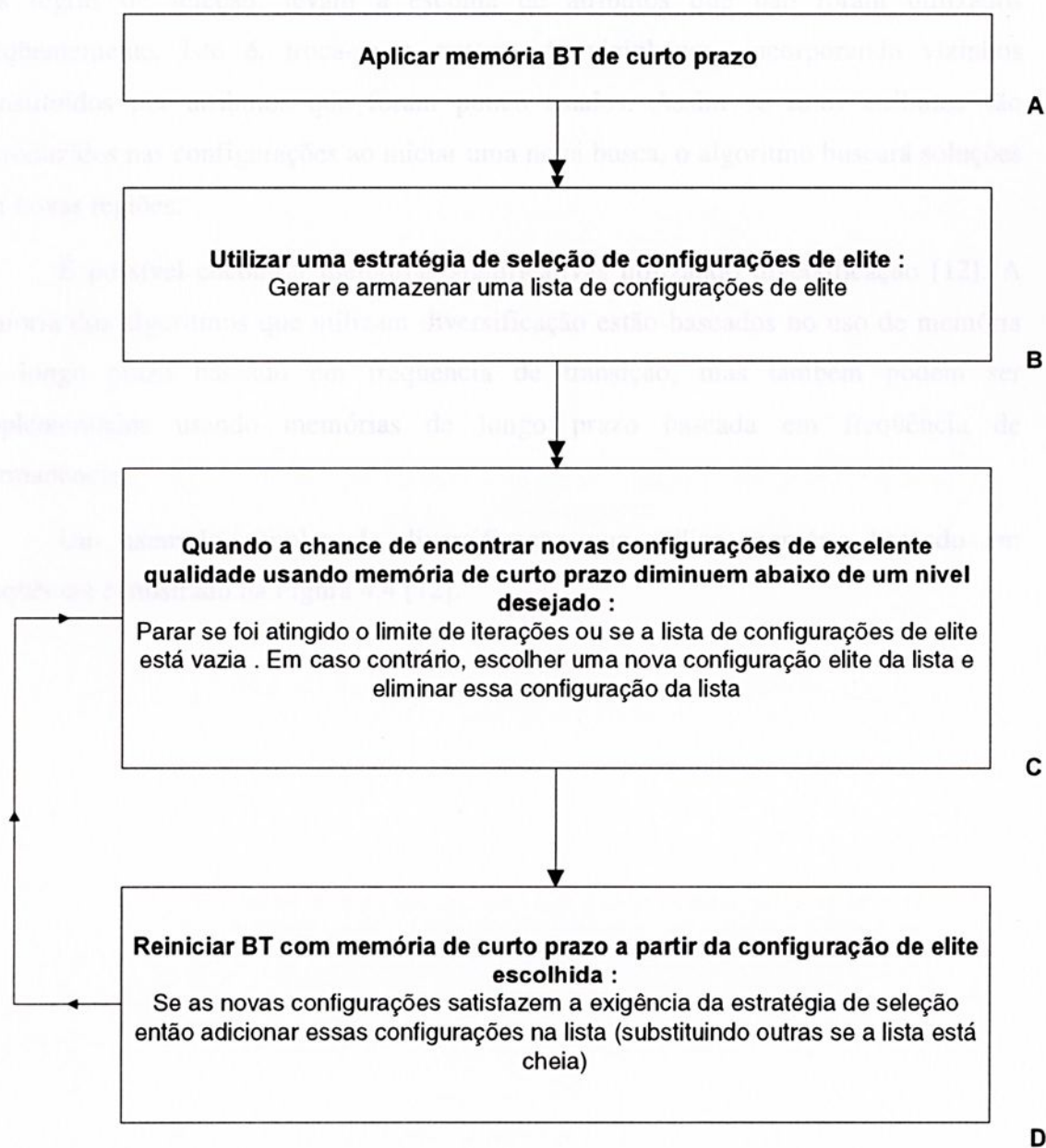


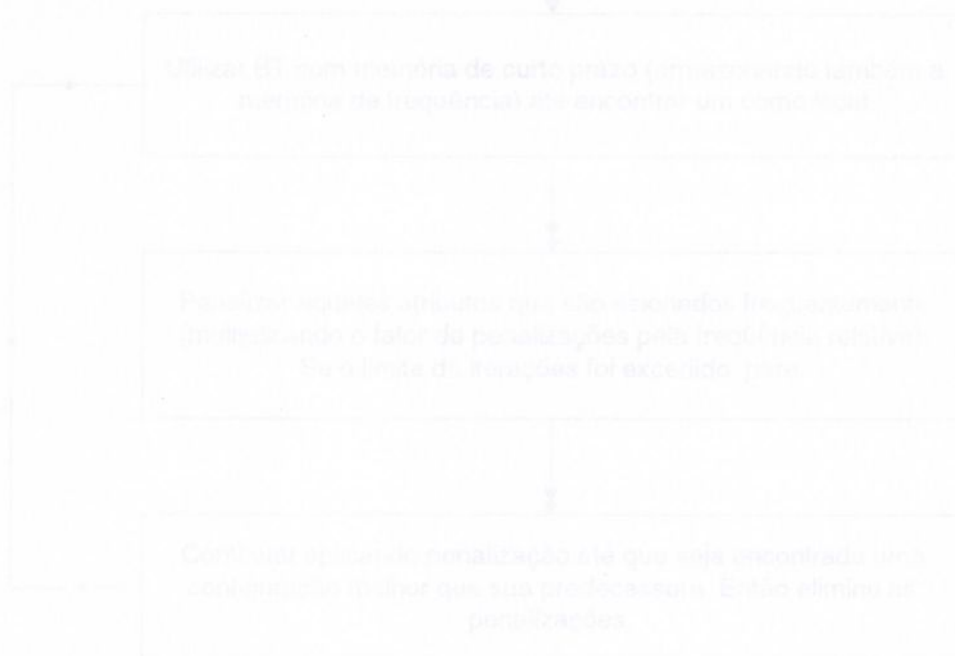
Figura 4.3. Implementação simples da estratégia de intensificação no algoritmo Busca Tabu

4.3.2.3 Estratégias de diversificação

As estratégias de diversificação, como seu nome sugere, foram desenvolvidas para levar a busca para novas regiões. Estão baseadas na filosofia de que a modificação das regras de seleção, levam a escolha de atributos que não foram utilizados freqüentemente. Isto é, troca-se o critério de vizinhança, incorporando vizinhos constituídos por atributos que foram pouco usados. Assim se estes atributos são introduzidos nas configurações ao iniciar uma nova busca, o algoritmo buscará soluções em novas regiões.

É possível encontrar melhorias significativas utilizando diversificação [12]. A maioria dos algoritmos que utilizam diversificação estão baseados no uso de memória de longo prazo baseado em freqüência de transição, mas também podem ser implementados usando memórias de longo prazo baseada em freqüência de permanência.

Um exemplo simples de diversificação que utiliza memória baseado em freqüência é mostrado na Figura 4.4 [12].



4.4 Funções avançadas no algoritmo busca tabu

4.4.1 Oscilação e diversificação

A oscilação ocorre quando o algoritmo encontra um ótimo local e não consegue escapar dele.

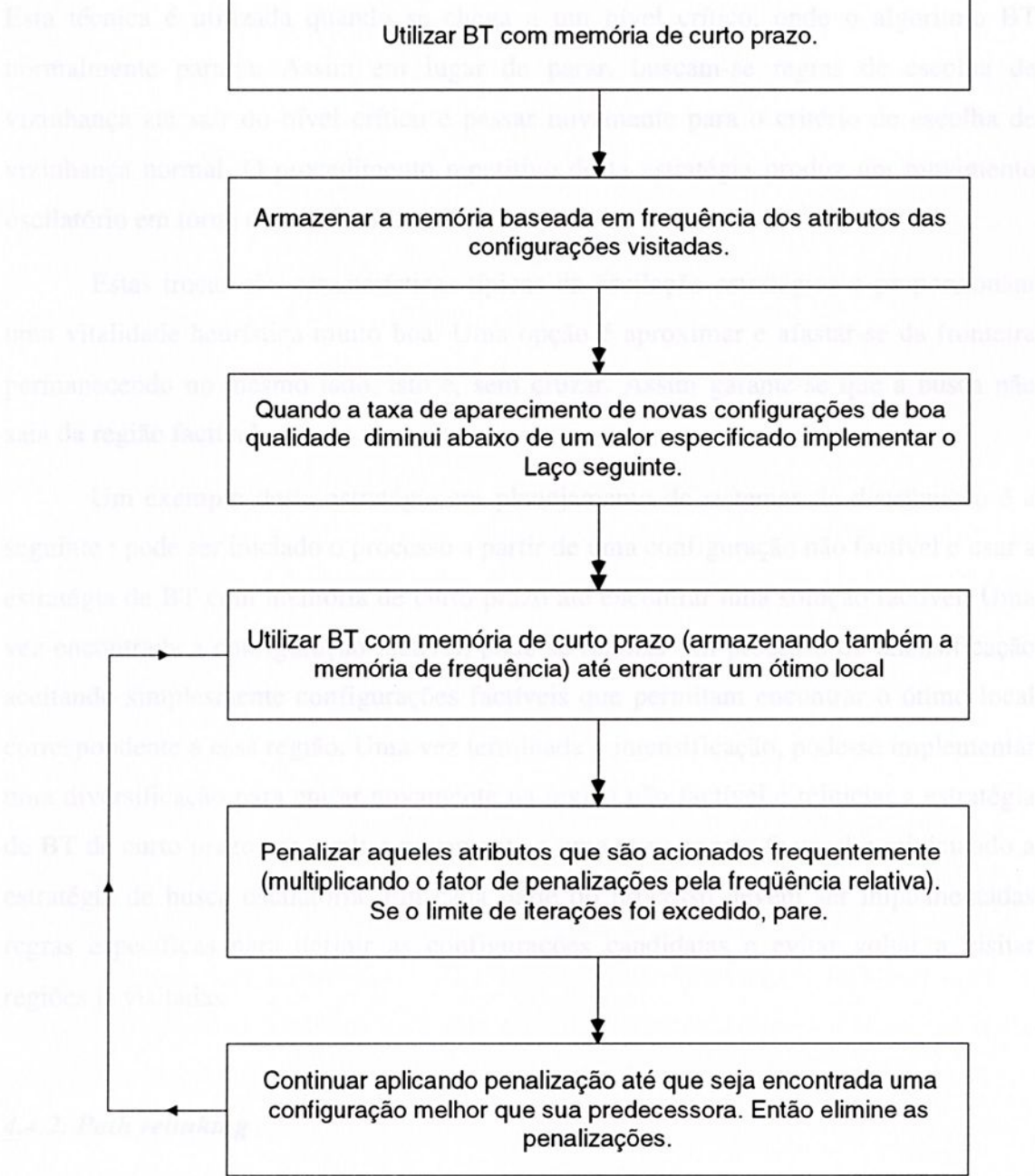


Figura 4.4. Implementação simples de estratégia de diversificação no algoritmo Busca Tabu

4.4. Funções avançadas no algoritmo busca tabu

4.4.1. Oscilação estratégica

A oscilação estratégica visa a interação entre intensificação e diversificação. Esta técnica é utilizada quando se chega a um nível crítico, onde o algoritmo BT normalmente pararia. Assim em lugar de parar, buscam-se regras de escolha de vizinhança até sair do nível crítico e passar novamente para o critério de escolha de vizinhança normal. O procedimento repetitivo desta estratégia produz um movimento oscilatório em torno do nível crítico, daí o nome.

Estas trocas são características típicas da oscilação estratégica e proporcionam uma vitalidade heurística muito boa. Uma opção é aproximar e afastar-se da fronteira permanecendo no mesmo lado, isto é, sem cruzar. Assim garante-se que a busca não saia da região factível.

Um exemplo desta estratégia em planejamento de sistemas de distribuição é a seguinte : pode ser iniciado o processo a partir de uma configuração não factível e usar a estratégia de BT com memória de curto prazo até encontrar uma solução factível. Uma vez encontrada a configuração factível, pode-se realizar um processo de intensificação aceitando simplesmente configurações factíveis que permitam encontrar o ótimo local correspondente a essa região. Uma vez terminada a intensificação, pode-se implementar uma diversificação para entrar novamente na região não factível e reiniciar a estratégia de BT de curto prazo para voltar novamente a uma nova região factível e reiniciando a estratégia de busca oscilatória. Em cada parte do processo devem ser implementadas regras específicas para definir as configurações candidatas e evitar voltar a visitar regiões já visitadas.

4.4.2. Path relinking

A estratégia é utilizada para gerar configurações atrativas para depois iniciar um processo de intensificação ou diversificação. A estratégia de *path relinking* permite gerar uma nova configuração utilizando como base algumas configurações de boa qualidade que foram armazenadas durante o processo (configurações de elite).



A estratégia busca conectar as soluções de elite para gerar novas soluções. A partir de uma destas soluções gera-se uma trajetória que leva a outra solução, conhecida como solução guia [3].

O *path relinking* é muito parecido com a recombinação dos algoritmos genéticos, mas existem diferenças. Uma delas é que o *path relinking* escolhe as configurações que serão utilizadas da lista de configurações de elite e os algoritmos genéticos utilizam um critério de probabilidade e realizam um sorteio para escolher as configurações que serão utilizadas no processo de recombinação; a outra diferença é que a configuração formada pelo *path relinking* é formada pelos atributos das configurações geradoras e são escolhidas de maneira determinística, enquanto que nos algoritmos genéticos depende de uma probabilidade e de uma taxa de recombinação.

Um exemplo simples de implementação de *path relinking* seria copiando uma parcela dos atributos de uma configuração de elite em outra configuração de elite tendo cuidado com as infactibilidades que podem ser geradas. Assim nem todas as configurações obtidas utilizando *path relinking* são atrativas. As configurações obtidas por *path relinking* podem ser utilizadas para iniciar o processo utilizando as estratégias de intensificação ou diversificação, dependendo da qualidade de atributos copiados e da estratégia de BT adotada.

4.4.3. Configurações de elite

Esta estratégia é iniciada construindo uma lista, na qual serão colocadas as melhores configurações encontradas no processo de busca. O número de soluções escolhidas pode variar entre 10 e 50, dependendo do problema e da quantidade de vizinhos [3]. Estas configurações de elite são utilizadas de diferentes formas, tais como reiniciar o processo utilizando alguma delas, ou para efetuar os processos de diversificação, intensificação ou oscilação estratégica. Podem ser utilizadas também para gerar novas configurações utilizando *path relinking*.

Para que uma configuração consiga entrar na lista de configurações de elite, precisa ser avaliada de forma apropriada. Pode acontecer que alguma configuração que está na lista pode sair da lista, porque foi encontrada uma outra configuração com melhor valor de função objetivo, que substituirá a posição desta na lista elite. Assim para que uma configuração substitua uma configuração de elite terá que satisfazer [12] :



- Possuir uma função objetivo de melhor qualidade que alguma já armazenada na lista elite;
- Possuir um número mínimo de atributos diferentes com relação a cada uma das configurações já armazenadas;

É óbvio que a solução incumbente encontra-se dentro desta lista.

V- ALGORITMO DE BUSCA TABU PARA O PROBLEMA DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

5.1. Introdução

Neste capítulo discutem-se os aspectos relevantes da solução do problema de planejamento da expansão da distribuição usando Busca Tabu, tais como critérios de seleção, convergência, avaliação da função objetivo. Finalmente apresenta-se um algoritmo de busca tabu dedicado à solução do problema de planejamento da expansão.

5.2. Codificação para o problema de planejamento

Na codificação para planejamento da expansão de sistemas de distribuição pretende-se encontrar uma topologia para o sistema com vista a minimizar os custos de investimento e de operação e atender os requisitos de segurança da operação, confiabilidade e qualidade do serviço. Os problemas que se apresentam são conservar a radialidade do sistema, e o suprimento de energia a todos os nós com carga (potencialidade da rede, sem limitações).

Para representar matematica e computacionalmente a rede de distribuição utilizam-se arrays vetoriais binários que são adequados para o problema de planejamento, permitindo também uma fácil interação com o sistema de troca de armazenadores.

V - ALGORITMO DE BUSCA TABU PARA O PROBLEMA DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

5.1. Introdução

Neste capítulo discutem-se os aspectos relevantes da solução do problema de planejamento da expansão da distribuição usando Busca Tabu, tais como critérios de aspiração, convergência, avaliação da função objetivo. Finalmente apresenta-se um algoritmo de busca tabu dedicado à solução do problema de planejamento da expansão.

5.2. Codificação para o problema de planejamento

Na codificação para planejamento da expansão de sistemas de distribuição pretende-se encontrar uma topologia para o sistema com vistas a minimizar os custos de investimento e de operação e atender os requisitos de segurança da operação, confiabilidade e qualidade do serviço. Os problemas que se apresentam são conservar a radialidade do sistema, e o suprimento de energia a todos os nós com carga (conectividade da rede, sem ilhamento).

Para representar matematica e computacionalmente a rede de distribuição, utilizou-se arranjos vetoriais binários que são adequados para o problema de planejamento, permitindo também uma fácil interligação com o critério de troca de alimentadores.

Dessa forma a codificação usada para o problema foi um arranjo vetorial que indica quais são os alimentadores que estão operando (1) ou não (0) assim como as correspondentes subestações. Adotou-se um vetor adicional que indica o número da bitola do condutor que está operando no sistema. Neste sistema de codificação, adota-se uma notação matricial que permite identificar as ligações das linhas às subestações e permite analisar a radialidade do sistema. Esta forma de codificação está ilustrada na Figura 5.1

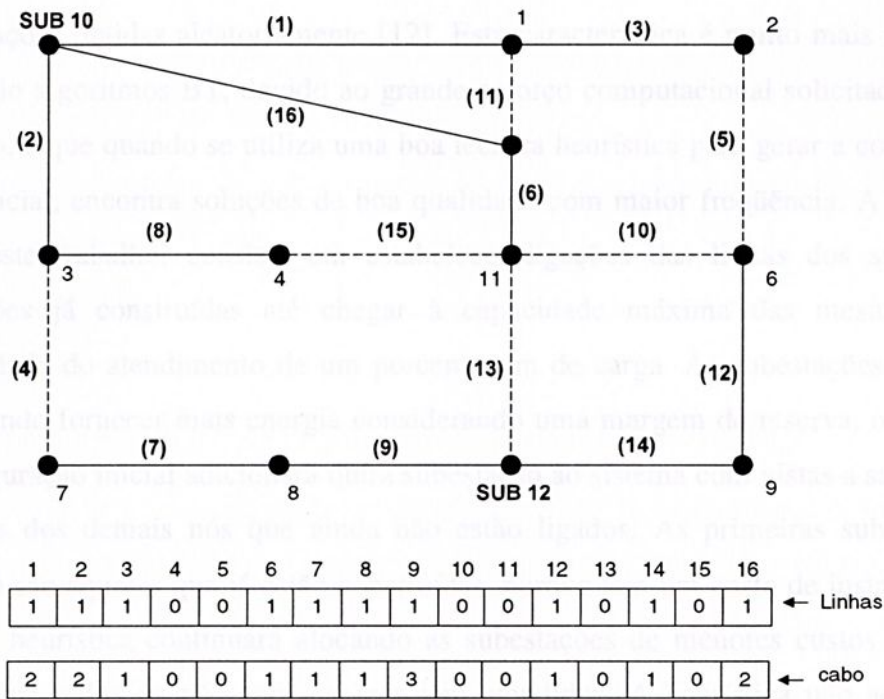


Figura 5.1. Ilustração do esquema de codificação.

Neste exemplo o sistema tem duas subestações, em que os alimentadores 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 12, 14 e 16 estão ligados e fazem parte do sistema proposto. Não é necessário definir neste tipo de codificação quais subestações estão fazendo parte do sistema, porque esta informação está implícita no arranjo. Assim, por exemplo, no caso da subestação Sub 10, ela tem 3 possíveis alimentadores que podem conectá-la com o sistema, e no caso de que nenhum dos alimentadores 1, 2 ou 16 esteja com valor de 1 (existente) quer dizer que a subestação não existe e não faz parte do sistema proposto.

O outro arranjo vetorial que acompanha ao vetor das linhas é um vetor de igual dimensão e que define a bitola de condutor a ser utilizado em cada linha a ser conectada. Assim o problema proposto tem que ter um conjunto de diferentes condutores para escolher a bitola do condutor mais apropriado para o sistema proposto.

5.3. Configuração radial inicial

Os algoritmos combinatoriais apresentam melhor desempenho quando os processos de otimização são iniciados com boas configurações iniciais em lugar de configurações obtidas aleatoriamente [12]. Esta característica é muito mais importante no caso do algoritmo BT, devido ao grande esforço computacional solicitado por este algoritmo, e que quando se utiliza uma boa técnica heurística para gerar a configuração básica inicial, encontra soluções de boa qualidade com maior frequência. A heurística, usada neste trabalho, consiste em estabelecer ligações das linhas dos sistemas às subestações já construídas até chegar à capacidade máxima das mesmas ou na possibilidade do atendimento de um percentagem de carga. As subestações existentes não podendo fornecer mais energia considerando uma margem de reserva, o algoritmo de configuração inicial adicionará outra subestação ao sistema com vistas a satisfazer as demandas dos demais nós que ainda não estão ligados. As primeiras subestações a avaliar-se são aquelas que já estão construídas, porque têm um custo de instalação zero (fixo). A heurística continuará alocando as subestações de menores custos fixos para garantir que todos os nós com carga sejam atendidos. A heurística não adiciona no sistema nós sem carga a não ser que o respectivo nó seja utilizado só como transporte, ou para conectar algum outro nó que tem carga.

Com a configuração radial inicial, é avaliada a capacidade de transporte de fluxo das linhas e se alguma delas não cumpre com as restrições, a bitola do alimentador é trocada por uma de capacidade maior.

A heurística para obter a configuração radial inicial possui três vantagens importantes:

1. Encontrar um sistema com um custo baixo, construindo-se subestações, somente quando necessário;
2. A heurística vai tomando as subestações mais atrativas sob o aspecto econômico de construir para adicionar ao sistema;

3. A heurística não adiciona no sistema nós sem carga a não ser que o respectivo nó seja utilizado só como passagem, ou seja, para conectar algum outro nó que tem carga, mas que somente pode ser conectado por meio de um nó sem carga.

Com esta heurística obteve-se configurações de boa qualidade e radiais. A seguir, apresenta-se o algoritmo computacional referente a esta heurística.

Algoritmo

- i. Escolher a subestação de menor custo e que não foi ainda analisada S_i (escolher aquelas subestações que têm os menores custos);
- ii. Somar as potências de todos os nós com carga que estão conectadas à subestação S_i , e armazenar este valor;
- iii. Escolher um nó n_i que pode ser conectado à subestação S_i para entrar no sistema proposto e que não faça parte do sistema corrente;
- iv. Somar a potência do nó n_i à potência armazenada da subestação S_i ;
- v. Verificar se a soma da potência do nó conectado n_i à subestação S_i não é maior que a capacidade máxima da subestação S_i . Se não voltar para *iii*, caso contrário ir para *vi*;
- vi. Desligar do sistema o último nó adicionado na rede e fechar a subestação S_i ;
- vii. Verificar se todos os nós com carga fazem parte do sistema, caso contrário, fazer $i = i + 1$; e voltar para *i*.

Um exemplo é mostrado a seguir. Seja o sistema da Figura 5.2(a) com duas subestações S_1 e S_2 existente e proposta, respectivamente. A subestação S_1 que deve fornecer energia para os nós n_1 , n_2 e n_3 . Ampliar o sistema para fornecer energia aos nós n_4 , n_5 e n_6 e se necessário, construir a subestação S_2 . É adicionado ao sistema o nó n_4 para a subestação S_1 , e verificado se a potência de fornecimento da subestação S_1 é maior que a capacidade (ver figura 5.2(b)). Assim é adicionado ao sistema o nó n_5 , mas neste caso a potência de fornecimento da subestação S_1 é maior que a capacidade das

cargas conectadas e então o nó n_5 é retirado do sistema. É construída a subestação S_2 e adicionados a ela os nós n_6 e n_5 (ver figura 5.2(c)).

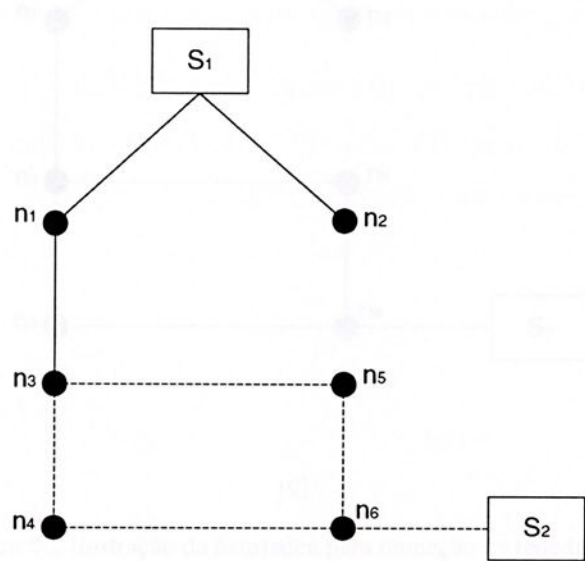


Figura (a)

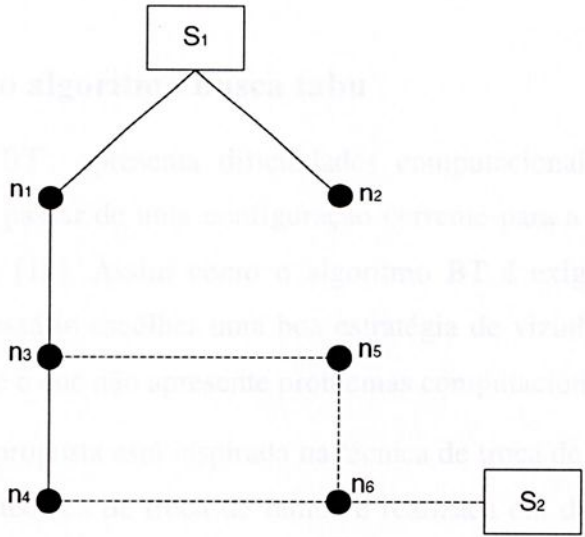


Figura (b)

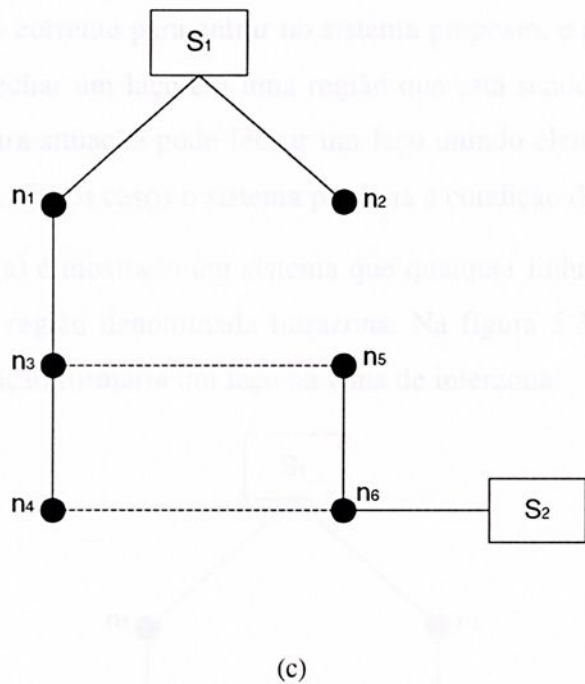


Figura 5.2 Ilustração da heurística para obtenção da rede inicial

Pode-se encontrar na literatura, heurísticas mais sofisticadas para obter o sistema radial inicial para iniciar o algoritmo BT.

5.4. Vizinhança do algoritmo busca tabu

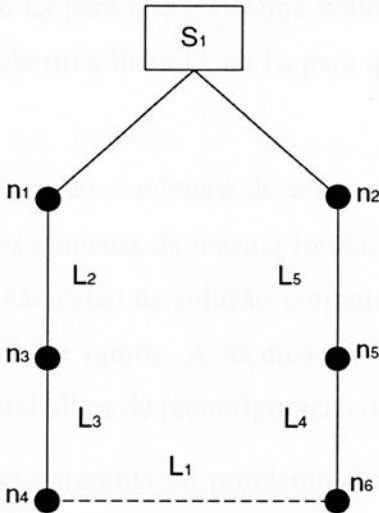
O algoritmo BT apresenta dificuldades computacionais para realizar uma transição, isto é para passar de uma configuração corrente para a melhor configuração candidata ou vizinha [12]. Assim como o algoritmo BT é exigente e de alto custo computacional é necessário escolher uma boa estratégia de vizinhança que permita ao algoritmo ser eficiente e que não apresente problemas computacionais.

A vizinhança proposta está inspirada na técnica de troca de ramos implementada por Goswami [7]. A técnica de troca de ramos é realizada em duas zonas, a primeira zona chamada intrazona em que a troca de ramos é realizada entre elementos que pertencem a um subsistema que estão conectados e alimentados por uma mesma subestação, e a segunda zona chamada interzona em que a troca é realizada entre ramos que podem unir duas subestações.

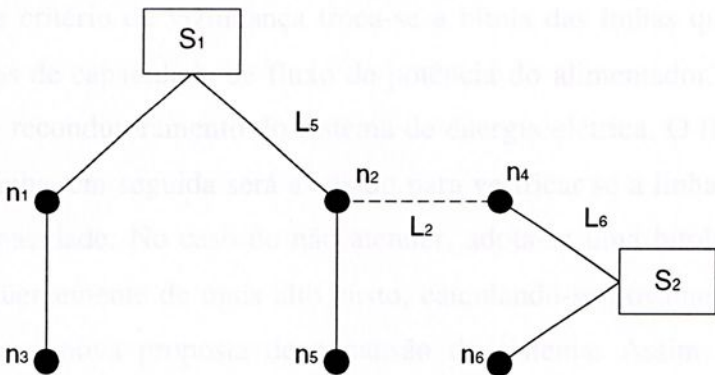
A técnica de troca de ramos basicamente converte um sistema radial em um sistema com laços, ou seja um sistema não radial. São escolhidas linhas que não fazem

parte da configuração corrente para entrar no sistema proposto, e na maioria das vezes, estas linhas podem fechar um laço em uma região que está sendo alimentada por uma subestação ou em outra situação pode fechar um laço unindo elementos que interligam duas subestações. Em ambos casos o sistema perderia a condição de radialidade.

Na figura 5.3(a) é mostrado um sistema que qualquer linha L_1 ao ser construída formaria um laço na região denominada intrazona. Na figura 5.3(b) é mostrada outra linha L_2 que a construção formaria um laço na zona de interzona.



(a)



(b)

Figura 5.3. Técnica de troca de ramos ((a) Intrazona; (b) Interzona)

A estrutura da radialidade é restaurada novamente abrindo alguma outra linha do sistema, e mais especificamente, abrindo alguma outra linha do laço formado. A troca de ramos é de sucesso, se é retirado uma linha que forma o laço mas não foi a linha que fechou o laço. Assim com a filosofia desta técnica, um vizinho de uma configuração corrente é qualquer sistema que seja diferente em uma linha desta configuração, e que prossiga conservando a radialidade do sistema.

No exemplo 5.3(a), anterior, se a linha L_1 é construída teria que se retirar uma linha do conjunto L_2, L_3, L_4 e L_5 para que o sistema volte novamente a ser radial. E no exemplo 5.3(b) teria que ser aberto a linha L_5 ou L_6 para que o sistema volte novamente a ser radial.

É lógico pensar que quando o número de nós e as possíveis linhas são muito grandes, o número de vizinhos aumenta da mesma forma, mas tem que ser considerado que nem todas as linhas que não estão na solução corrente, formarão um sistema radial através desta técnica de troca de ramos. A técnica de troca de ramos é de simples filosofia, sendo utilizada em trabalhos de reconfiguração de sistemas.

Outro problema que se apresenta no problema de planejamento é a capacidade de fluxo que pode transportar uma determinada linha, e se deve analisar o caso de troca de bitolas para aquelas linhas que não cumpram com este requisito, fazendo uma troca de bitola, mas seguindo a mesma filosofia, isto é a linha permanece construída, mas ela terá que ter o seu condutor trocado por outro de maior capacidade de fluxo de potência.

Com este critério de vizinhança troca-se a bitola das linhas que não cumprem com os requisitos de capacidade de fluxo de potência do alimentador. Este conceito é conhecido como recondutoramento do sistema de energia elétrica. O fluxo de potência que passa pela linha, em seguida será avaliado para verificar se a linha cumpre com os requisitos de capacidade. No caso de não atender, adota-se uma bitola imediatamente superior, conseqüentemente de mais alto custo, calculando-se novamente todo o fluxo de potência para a nova proposta de expansão do sistema. Assim com estas duas famílias de vizinhos, a troca de ramos e recondutoramento, o algoritmo BT pode ter mais possibilidades de encontrar uma solução de boa qualidade e real.

Para o algoritmo BT proposto, as configurações vizinhas candidatas são determinadas da seguinte maneira:



- Escolher uma linha do sistema que não esteja ligada e conectar esta ao sistema, não importando se adicionando esta linha vai gerar um laço, que tornará o sistema infactível devido à violação da restrição da radialidade;
- Se o sistema for infactível radialmente, analisar a linha que teria que ser aberta para retornar ao sistema novamente radial. Sempre é retirada uma linha adjacente à linha adicionada, assim é garantida a radialidade do sistema. No caso de ter mais de uma linha adjacente à linha adicionada, terá que se avaliar todas estas opções. O algoritmo BT avaliará todas e adotará aquela que torna a função objetivo mais econômica;
- Uma vez realizado a troca de ramos, é avaliada a capacidade das linhas que compõem o sistema;
- Se alguma linha não satisfaz o fluxo de potência transportado que passa pela respectiva linha, ela terá que ser trocada por alguma outra de bitola maior, assim sucessivamente até encontrar uma bitola que cumpra as características de operação. A avaliação do fluxo de potência do sistema será novamente efetuada para o novo sistema. No caso que o sistema não seja factível por não ter condutores de bitolas maiores, o sistema será penalizado com um alto custo e por consequência ele não será escolhido pelo algoritmo BT.

5.5. Infactibilidades da vizinhança proposta

Dentre os problemas de infactibilidade que poderá ocorrer no tipo de vizinhança adotada está o das configurações não radiais, mas como o critério proposto é uma estratégia adequada que permite tirar aquelas configurações não radiais, o problema que o sistema proposto não seja radial não ocorrerá, já que se em algum momento se encontra alguma configuração não radial, o critério de vizinhança tentará abrir alguma linha convertendo o sistema novamente em um sistema radial.

Outro problema de infactibilidade está relacionado com as violações de limites de capacidade de linhas e níveis de tensão nos nós mais afastados das subestações. Quando qualquer um destes problemas é encontrado no sistema proposto, eles são penalizados com um valor de custo muito alto na função objetivo.



As infactibilidades com relação às violações dos limites de capacidade das linhas, é resolvido tomando para o mesmo caminho, outro condutor com capacidade maior, mas isto envolverá um maior custo fixo. Com a mudança dos parâmetros da nova linha, deve-se avaliar um novo fluxo de potência para o sistema.

5.6. Algoritmo de fluxo de potência radial

Para encontrar a função objetivo e verificar possíveis infactibilidades de uma proposta de solução ou topologia, deve-se resolver um problema de fluxo de potência.

O fluxo de potência para ser utilizado como ferramenta auxiliar do planejamento da distribuição deve ser suficientemente rápido e preciso. Para diminuir o esforço computacional do algoritmo de planejamento utilizando Busca Tabu foi implementado um método de fluxo de potência radial monofásico proposto por Cespedes [2], que é obtido a partir da eliminação do ângulo da tensão nas equações que representam as leis de Kirchhoff da rede [2]. Neste método é possível transformar o problema de fluxo de potência em função apenas dos módulos de tensão de barra. Esta estratégia é possível devido à radialidade do sistema. Adicionalmente os ângulos de tensão de barra não interessa no processo porque interessa apenas a avaliação das perdas do sistema elétrico. Entretanto, após a convergência do algoritmo, estes ângulos podem ser facilmente encontrados. Permite-se a obtenção da magnitude de tensão em qualquer nó de carga e com isto calcular a magnitude de tensão remanescente nos demais nós do alimentador, e uma vez determinado o estado do sistema, permite-se o cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa.

Neste contexto, o método é simples e eficiente para o cálculo exato de fluxo de potência, adotando-se uma modelagem para tensões dependente das cargas. O método é de fácil implementação e tem uma rápida convergência, sendo uma boa ferramenta para o problema de planejamento de sistemas de distribuição. Este método é conhecido como método de soma de potências; também existem outros métodos na literatura especializada.



5.6.1. Modelo do sistema de distribuição

O sistema trifásico pode ser representado por um sistema monofásico equivalente, em que as linhas de distribuição são representadas por resistências e reatâncias, sendo que as capacitâncias shunt não são consideradas em sistemas de distribuição e em casos de linhas longas a injeção reativa pode ser considerada como cargas reativas.

As cargas são representadas por suas potências ativas (P_0) e reativa (Q_0). O efeito da variação da tensão na representação das cargas é dado por :

$$P = P_0 \times V^k$$

$$Q = Q_0 \times V^k$$

Em que:

V : magnitude da tensão

$k = 0$: para cargas representadas pelo modelo de potência constante;

$k = 1$: para cargas representadas pelo modelo de corrente constante;

$k = 2$: para cargas representadas pelo modelo de impedância constante;

Ou seja, o valor da constante k pode ser diferente de acordo com as características da carga. Para representar o modelo de carga como potência constante, utiliza-se o valor para k igual a zero.

O caso de sistemas desbalanceados não será considerado, já que não se utilizam normalmente modelos de sistemas desbalanceados no planejamento da expansão de sistemas de distribuição.



5.6.1.1 Descrição do sistema de distribuição

A representação da topologia do sistema adota a nomenclatura que utiliza os nós finais dos ramos do sistema em um vetor ordenado e não repetitivo, que são coincidentes com outro vetor que contém os nós iniciais dos respectivos ramos. É também importante conhecer a definição de nós finais (end node), que são aqueles nós que estão no extremo do sistema, eles podem ser reconhecidos porque não aparecem na coluna de nós iniciais. A Figura 5.4, ilustra esta representação em que os nós 5, 7 e 9 são os nós finais. O nó final é também conhecido como nó de chegada da potência (*receiving node*) e o nó inicial também conhecido como nó de entrega ou nó fonte (*source node*).

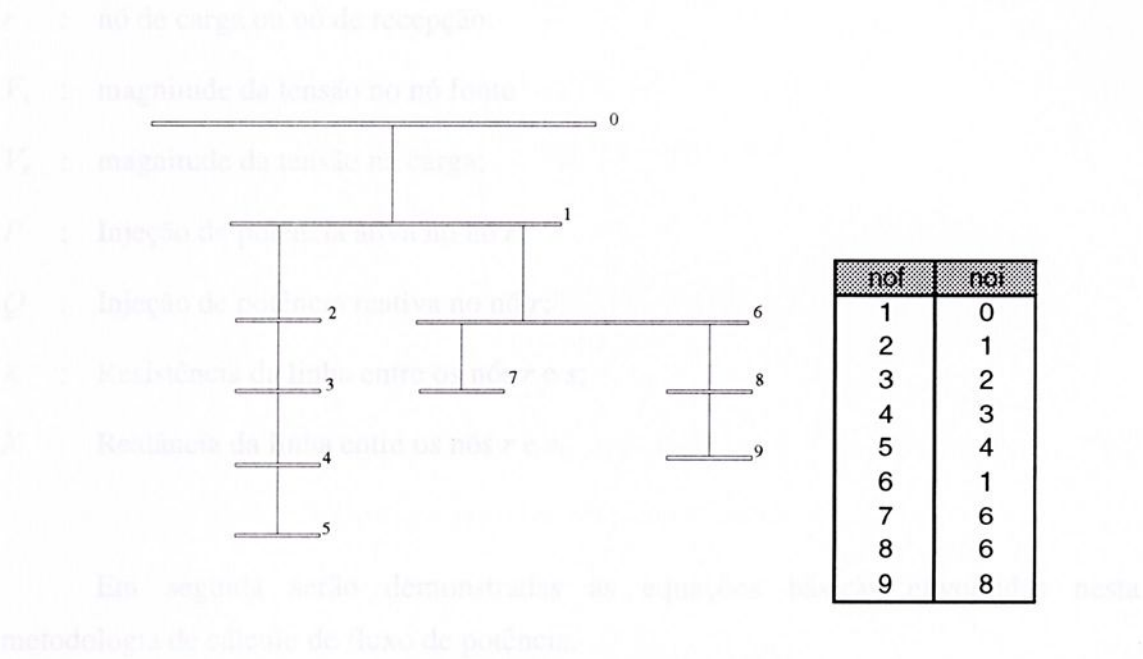


Figura 5.4. Exemplo Ilustrativo da definição e numeração dos nós de um sistema de distribuição radial para cálculo de fluxo de carga

Um ramo pode ser considerado como estando orientado ao seu respectivo nó fonte. Para resolver o fluxo de potência a árvore formada pelos ramos deve ser representado de forma sistemática, assim os cálculos são iniciados nos nós finais e finalizados no nó fonte.

5.6.2. Fluxo de potência radial – Equação básica

O problema de fluxo de potência abordado neste trabalho, consiste em resolver para cada linha do sistema de distribuição a seguinte equação:

$$Vr^4 + [2(PR + QX) - Vs^2]Vr^2 + (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) = 0 \tag{5.1}$$

Em que:

- s : nó fonte ou nó de envio;
- r : nó de carga ou nó de recepção;
- V_s : magnitude da tensão no nó fonte
- V_r : magnitude da tensão na carga;
- P : Injeção de potência ativa no nó r ;
- Q : Injeção de potência reativa no nó r ;
- R : Resistência da linha entre os nós r e s ;
- X : Reatância da linha entre os nós r e s .

Em seguida serão demonstradas as equações básicas envolvidas nesta metodologia de cálculo de fluxo de potência.

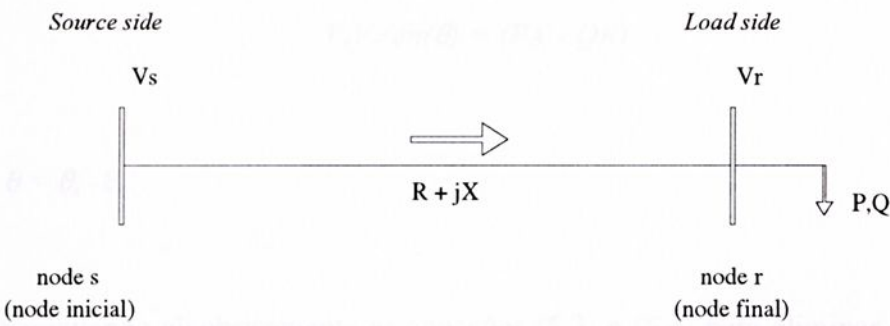


Figura 5.5 Linha típica de um sistema de distribuição

5.6.2.1 Equações básicas

Para qualquer linha do sistema, de acordo com a figura 5.5 a lei de Kirchhoff fornece a seguinte relação:

$$\dot{V}_s - \dot{V}_r = \dot{I}(R + jX) \quad (5.2)$$

sabe-se que:

$$\dot{S} = \dot{I}^* \dot{V}$$

na equação (5.2):

$$\dot{V}_s - \dot{V}_r = (P - jQ)(R + jX) / \dot{V}_r^*$$

$$V_s V_r [\cos(\theta_s - \theta_r) + j \sin(\theta_s - \theta_r)] - V_r^2 = (P - jQ)(R + jX)$$

Em que θ_s e θ_r são os ângulos de fase dos vetores $\dot{V}_s$ e $\dot{V}_r$, respectivamente, e $\dot{V}_r^*$ é o conjugado da tensão. Separando as partes real e imaginária:

$$V_s V_r \cos(\theta) - V_r^2 = (PR + QX) \quad (5.3)$$

$$V_s V_r \sin(\theta) = (PX - QR) \quad (5.4)$$

Em que: $\theta = \theta_s - \theta_r$

Manipulando algebricamente as equações (5.3) e (5.4) para eliminar as funções trigonométricas obtém-se:

$$V_r^4 + [2(PR + QX) - V_s^2]V_r^2 + (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) = 0$$

Observações:

- Das soluções de V_r^2 só se escolhe a solução positiva;
- De igual maneira quando se resolve para V_r , só se adota a solução positiva ou a maior delas, por que isto define a estabilidade do sistema;
- P, Q são as cargas totais para cada barra, e ela compreende a carga do nó próprio, todas as cargas que estão conectadas a ele, assim como as perdas.

$$P(\text{nó}) = P(\text{carga}) + P(\text{carga barras á jusante}) + P(\text{perdas á jusante totais})$$

As perdas para os condutores podem ser obtidas da seguinte maneira:

$$L_p = I^2 R$$

$$L_q = I^2 X$$

Em que:

$$I = (P^2 + Q^2)/V_r$$

Assim as perdas são definidas através das seguintes equações:

$$L_p = R(P^2 + Q^2)/V_r^2 \quad (5.5)$$

$$L_q = X(P^2 + Q^2)/V_r^2 \quad (5.6)$$

Em que:

L_p : perdas ativas para a linha

L_q : perdas reativas para a linha

5.6.3. Algoritmo para o cálculo do fluxo de potência

- i. Leitura dos dados do sistema: nó inicial, nó final, resistência, reatância, potência ativa, e potência reativa. Tensão no nó fonte (*source voltage*).
- ii. Assumir a magnitude da tensão para cada nó (para a primeira iteração assumir para todas as barras tensão igual à da barra fonte).
- iii. Passo *Upstream*, desde o nó final até o nó fonte, avalie as potências verdadeiras para cada barra, nestas potências estão incluídas as potências de cada barra que estão a jusante da barra analisada, assim como as perdas totais acumuladas até essa barra, e também a potência da barra.
- iv. Passo *Downstream*, desde o nó fonte até os nós finais, usando a Equação 5.1, calcular as tensões de cada barra V_r .
- v. Com as novas tensões, calcular novamente as perdas e com elas as novas potências de cada barra. Comparar as novas perdas totais com as perdas da iteração anterior. Se o valor da diferença entre elas for maior do que o erro predeterminado, volte ao passo *iii*. Caso contrário FIM.

5.7. Algoritmo Busca Tabu para o planejamento estático de sistemas de distribuição

O algoritmo BT parte de uma solução inicial e com uma vizinhança claramente especificada. Assim, conhecida uma solução inicial e o conjunto de vizinhos dessa solução, o algoritmo BT identifica a solução vizinha de melhor qualidade e o processo passa para essa nova solução. Entretanto, para evitar voltar a uma solução já analisada o algoritmo BT armazena em uma lista o atributo que foi usado no processo de transição. Um atributo proibido evita que se volte a uma solução já analisada, mas também não permite que se visitem outras soluções que compartilham atributos proibidos de soluções já visitadas. Este problema é contornado usando um critério de aspiração que elimina a proibição sempre que uma solução candidata, que pode ser obtida acionando um atributo proibido, seja de boa qualidade. A proibição de um atributo é eliminada após um número especificado de transições que geralmente é pequeno, isto é, a estratégia usa informação de memória de curto prazo. No problema analisado são atributos os alimentadores e as subestações. O processo BT termina após um número

especificado de transições. Na Figura. 5.6 encontra-se o diagrama de blocos do algoritmo BT implementado para o planejamento estático da expansão de sistemas de distribuição:

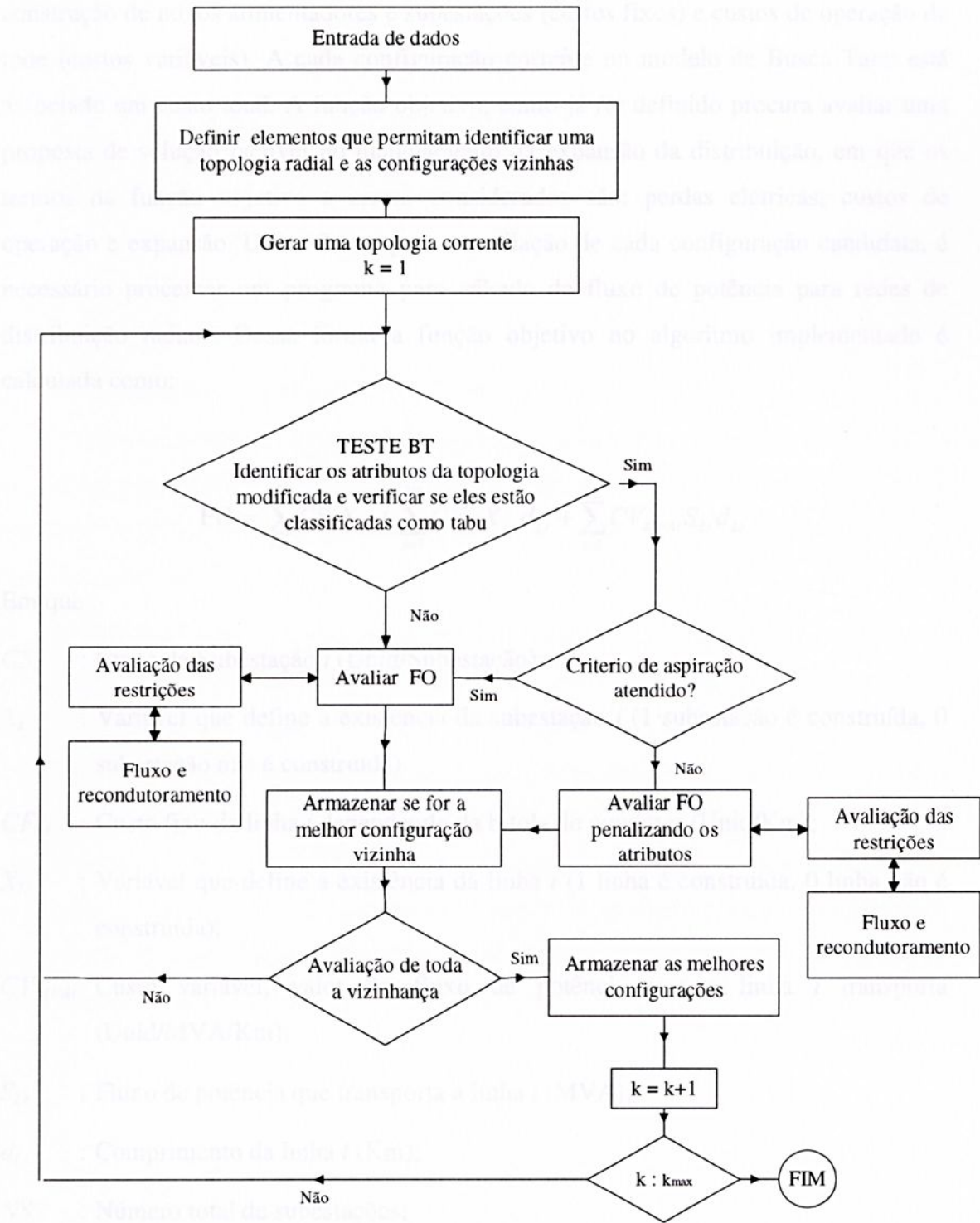


Figura 5.6. Diagrama de blocos do algoritmo Busca Tabu para o problema de planejamento estático

5.7.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento estático

O custo é uma das partes mais importantes no problema de planejamento de sistemas elétricos, assim procura-se o mínimo custo na construção de subestações e alimentadores do sistema de distribuição, considerando custos de investimento na construção de novos alimentadores e subestações (custos fixos) e custos de operação da rede (custos variáveis). A cada configuração corrente no modelo de Busca Tabu está associado um custo total. A função objetivo, como já foi definido procura avaliar uma proposta de solução factível no planejamento da expansão da distribuição, em que os termos da função objetivo a serem considerados são: perdas elétricas, custos de operação e expansão. Dessa forma para a avaliação de cada configuração candidata, é necessário processar um programa para cálculo de fluxo de potência para redes de distribuição radiais. Dessa forma a função objetivo no algoritmo implementado é calculada como:

$$FO = \sum_{i=1}^{NS} CS_i X_s + \sum_{i=1}^{NL} CF_{Li} X_{Li} d_{Li} + \sum_{i=1}^{NL} CV_{MVAi} S_{Li} d_{Li}$$

Em que :

CS_i : Custo da Subestação i (Unid/Subestação);

X_s : Variável que define a existência da subestação i (1 subestação é construída, 0 subestação não é construída)

CF_{Li} : Custo fixo da linha i dependendo da bitola do condutor (Unid/Km);

X_{Li} : Variável que define a existência da linha i (1 linha é construída, 0 linha não é construída);

CV_{MVAi} : Custo variável, valor do fluxo de potência que a linha i transporta (Unid/MVA/Km);

S_{Li} : Fluxo de potência que transporta a linha i (MVA);

d_{Li} : Comprimento da linha i (Km);

NS : Número total de subestações;

NL : Número total de linhas.

A função objetivo avalia, para cada configuração radial, o custo total de investimento e de operação do sistema. Os custos fixos são dados pelos custos de construção das linhas e subestações, e pela possível troca de bitola de um alimentador; e os custos variáveis são dados pelos custos de operação das linhas multiplicados pelos valores de perdas calculados com o auxílio do fluxo de potência.

A confiabilidade da rede está representada na continuidade do serviço de fornecimento de energia, ou seja, que cada ponto de consumo não fique sem suprimento de energia e esteja conectado a alguma fonte de suprimento. Esse aspecto deve ser contemplado com sistema de proteção coordenado e seletivo e chaves de manobras estrategicamente localizados no sistema.

5.7.1.1 Avaliação das configurações vizinhas

Para cada vizinho factível (configuração radial), deve-se encontrar o valor da função objetivo (custo fixo e custo de operação) da respectiva configuração para depois escolher o melhor entre os vizinhos propostos e iniciar a transição passando para a melhor configuração encontrada.

Para cada novo vizinho, avaliam-se as linhas e subestações que são construídas no estágio correspondente, assim os custos fixos das respectivas linhas e subestações são adicionados na função objetivo. Como cada novo vizinho implica calcular o respectivo fluxo de potência, assim com os valores fornecidos são calculados os custos de operação do sistema, e verificadas as restrições da capacidade das linhas e as tensões de cada nó são avaliadas, sendo o sistema penalizado no caso que algumas delas não cumpram a restrição de mínima tensão. Também é avaliada a capacidade de cada subestação, e caso não cumprir com os limites de capacidade a configuração é penalizada com um alto custo.

5.8. Planejamento pseudodinâmico de sistemas de distribuição

O planejamento pseudodinâmico consiste em utilizar o planejamento estático várias vezes. Neste trabalho foi empregado o planejamento pseudodinâmico. Para cada estágio do horizonte de planejamento são utilizados os resultados do planejamento estático do estágio anterior para iniciar o processo de um novo planejamento estático. O planejamento estático é chamado tantas vezes quantos estágios tenha o horizonte de planejamento, mas considerando que para cada novo estágio o processo é iniciado com o sistema resultante proposto pelo planejamento anterior.

5.9. Algoritmo de busca tabu para o planejamento dinâmico de sistemas de distribuição

O problema de planejamento de sistemas de distribuição considerando múltiplos estágios é denominado planejamento dinâmico, e a diferença entre o planejamento estático e dinâmico, é que no dinâmico determina-se quando os investimentos em novos condutores e novas subestações serão feitos. O problema de planejamento dinâmico é mais complexo devido a que o horizonte total de planejamento é dividido em várias etapas.

O planejamento dinâmico tem a mesma configuração inicial, estrutura de vizinhança e infactibilidades que o planejamento estático. O problema varia com relação ao tempo de quando uma nova linha ou subestação será construída.

O algoritmo BT gera uma configuração radial inicial para o primeiro estágio, e avalia-se esta configuração para as cargas dos outros estágios de planejamento. Em cada estágio o sistema proposto é otimizado construindo linhas para novos nós do sistema proposto, encontrando também novos caminhos que reduzam as perdas, e trocando de bitola para condutores que estejam sobrecarregados. O custo da função objetivo destes futuros estágios é atualizado para valores do tempo do primeiro estágio.

A otimização do sistema proposto será realizada em número de vezes igual ao número de estágios do planejamento. O algoritmo BT realiza para cada estágio do planejamento dinâmico uma troca de bitola ou recondutoramento, como foi utilizado no planejamento estático. Assim para cada estágio também são analisadas quedas de tensão, limites de subestações, limites de condutores.

A solução de um estágio no horizonte de planejamento será o sistema inicial para o estágio seguinte de planejamento. Assim por exemplo, o algoritmo BT para a solução de planejamento dinâmico tem uma proposta de codificação para o primeiro estágio e buscará analisar se este sistema proposto cumpre com as condições de carga dos demais estágios, buscando otimizá-lo, construindo novas linhas, novas subestações e fazendo recondutoramento caso seja necessário. A idéia desta técnica não é encontrar uma nova solução para cada estágio de planejamento, se não de melhorar o sistema proposto e mudar alguns elementos, se necessário.

Na Figura. 5.7 encontra-se o diagrama de blocos do algoritmo BT implementado neste trabalho para o planejamento dinâmico da expansão de sistemas de distribuição:

5.2.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

Na implementação do algoritmo, a definição de restrições em linhas e

subestações são necessárias para garantir a qualidade da solução, como já foi discutido

na seção 5.1.2. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

esta seção apresenta a função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

5.2.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

Na implementação do algoritmo, a definição de restrições em linhas e

subestações são necessárias para garantir a qualidade da solução, como já foi discutido

na seção 5.1.2. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

esta seção apresenta a função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

5.2.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

Na implementação do algoritmo, a definição de restrições em linhas e

subestações são necessárias para garantir a qualidade da solução, como já foi discutido

na seção 5.1.2. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

esta seção apresenta a função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

5.2.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

Na implementação do algoritmo, a definição de restrições em linhas e

subestações são necessárias para garantir a qualidade da solução, como já foi discutido

na seção 5.1.2. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

esta seção apresenta a função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

5.2.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

Na implementação do algoritmo, a definição de restrições em linhas e

subestações são necessárias para garantir a qualidade da solução, como já foi discutido

na seção 5.1.2. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

esta seção apresenta a função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

5.2.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

Na implementação do algoritmo, a definição de restrições em linhas e

subestações são necessárias para garantir a qualidade da solução, como já foi discutido

na seção 5.1.2. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

esta seção apresenta a função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

5.2.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

Na implementação do algoritmo, a definição de restrições em linhas e

subestações são necessárias para garantir a qualidade da solução, como já foi discutido

na seção 5.1.2. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

esta seção apresenta a função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

5.2.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

Na implementação do algoritmo, a definição de restrições em linhas e

subestações são necessárias para garantir a qualidade da solução, como já foi discutido

na seção 5.1.2. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

esta seção apresenta a função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

5.2.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

Na implementação do algoritmo, a definição de restrições em linhas e

subestações são necessárias para garantir a qualidade da solução, como já foi discutido

na seção 5.1.2. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

esta seção apresenta a função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

5.2.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

Na implementação do algoritmo, a definição de restrições em linhas e

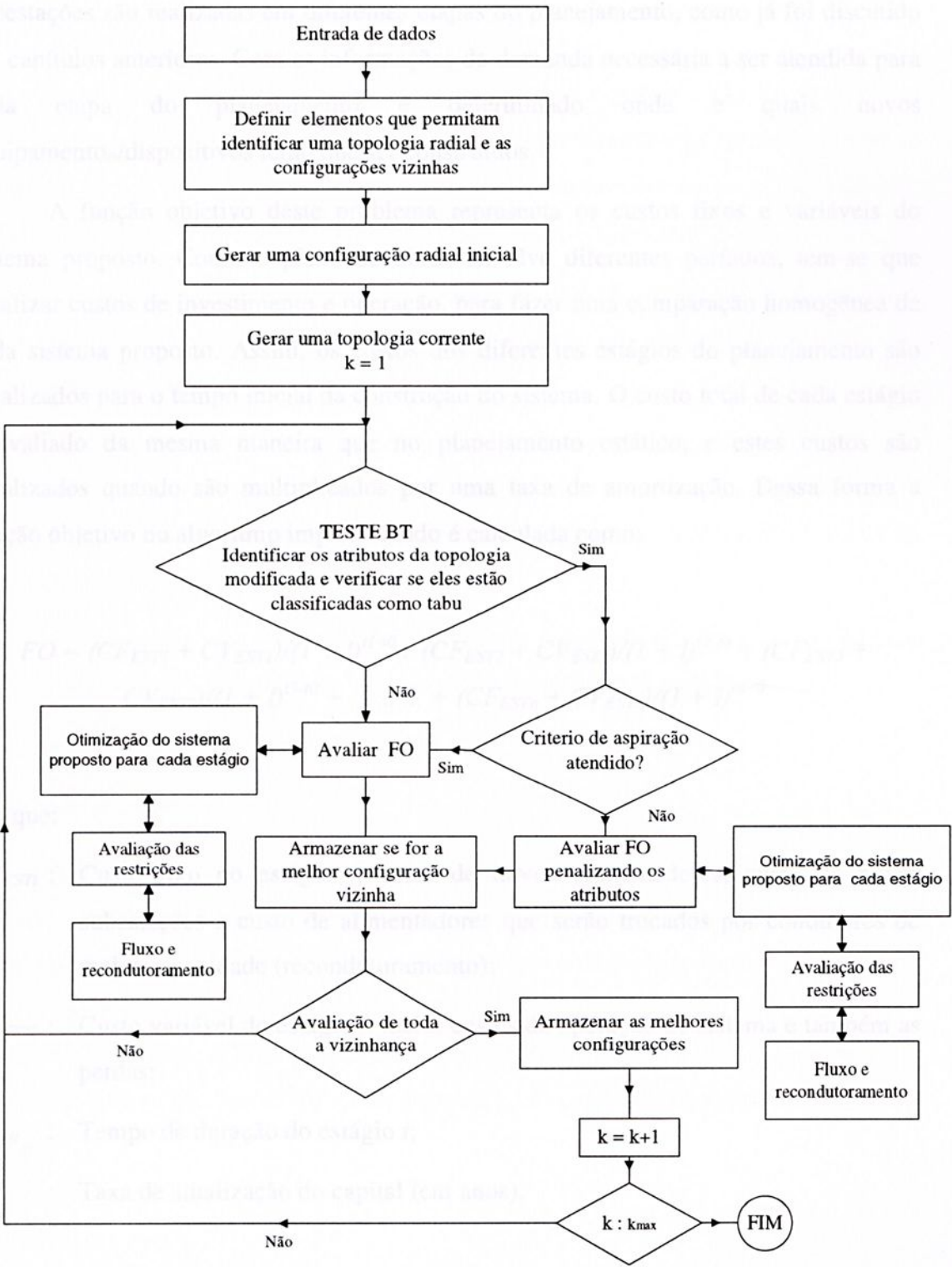


Figura 5.7. Diagrama de blocos do algoritmo Busca Tabu para o problema de planejamento dinâmico.

5.9.1. A função objetivo para o algoritmo BT para o planejamento dinâmico

No planejamento dinâmico, as decisões de investimentos em linhas e subestações são realizadas em diferentes etapas do planejamento, como já foi discutido em capítulos anteriores. Com as informações da demanda necessária a ser atendida para cada etapa do planejamento é determinado onde e quais novos equipamentos/dispositivos terão que ser construídos.

A função objetivo deste problema representa os custos fixos e variáveis do sistema proposto. Como o plano de obras envolve diferentes períodos, tem-se que atualizar custos de investimento e operação, para fazer uma comparação homogênea de cada sistema proposto. Assim, os custos dos diferentes estágios do planejamento são atualizados para o tempo inicial da construção do sistema. O custo total de cada estágio é avaliado da mesma maneira que no planejamento estático, e estes custos são atualizados quando são multiplicados por uma taxa de amortização. Dessa forma a função objetivo no algoritmo implementado é calculada como:

$$FO = (CF_{EST1} + CV_{EST1})/(1 + I)^{t1-t0} + (CF_{EST2} + CV_{EST2})/(1 + I)^{t2-t0} + (CF_{EST3} + CV_{EST3})/(1 + I)^{t3-t0} + \dots \dots \dots + (CF_{ESTn} + CV_{ESTn})/(1 + I)^{tn-t0}$$

Em que:

CF_{ESTi} : Custo fixo no estágio i , custo de novos alimentadores, custo de novas subestações e custo de alimentadores que serão trocados por condutores de maior capacidade (recondutoramento);

CV_{ESTi} : Custo variável do estágio i , inclui custos de operação do sistema e também as perdas;

$t_i - t_0$: Tempo de duração do estágio i ;

I : Taxa de atualização do capital (em anos).

A função objetivo avalia o custo de investimento e de operação do sistema a construir para o início do horizonte. Os custos fixos de um estágio representam os

custos de investimento das linhas e subestações de cada estágio. Os custos variáveis representam os custos de operação de cada estágio.

5.9.1.1 Avaliação das configurações de cada estágio

Para cada configuração, resultado de um estágio anterior, o algoritmo BT tenta melhorar este sistema, construindo novas linhas, novas subestações e trocando bitolas se for necessário. A idéia fundamental não é construir um sistema novo, se não melhorar para novos valores de demanda o sistema proposto pelo estágio anterior.

Para melhorar o sistema proposto são avaliados os limites das subestações e linhas do sistema proposto para os novos valores da demanda. Também são consideradas as quedas de tensão em cada nó.

É lógico pensar que os custos fixos de linhas e subestações construídas são geralmente zeros, mas se uma linha é trocada por uma bitola maior este valor será considerado no custo fixo do respectivo estágio. Também são considerados os custos de novas subestações que podem ser adicionadas.

A otimização para cada estágio é terminada depois de um determinado número de iterações em que a função objetivo do respectivo estágio não melhora.

5.10. Lista Tabu

A Lista Tabu é implementada com o objetivo de prevenir ciclos e evitar visitar configurações já visitadas. Assim, quando uma configuração é construída, os atributos usados para encontrar essa topologia são colocados na lista tabu. Portanto, o movimento reverso desses atributos permanece proibido durante um número especificado de iterações. Esta lista é armazenada na parte superior de uma matriz quadrada de dimensão igual ao número de linhas do sistema, e são armazenados os atributos de cada transição.



5.11. Critério de aspiração para soluções penalizadas

Se existe alguma configuração que seja radial mas que seus atributos estejam proibidos, a mesma pode ser eleita para participar como a nova configuração corrente, desde que seja uma configuração de boa qualidade mesmo sendo penalizada com um adicional do valor de sua função objetivo.

5.12. Critério de parada

O critério de parada do algoritmo é estabelecido fixando o número de iterações que a solução incumbente (melhor solução encontrada) não apresenta melhoria. Quanto maior for este número de iterações, maior será a possibilidade de encontrar uma função objetivo de melhor qualidade, conseqüentemente com mais alto custo computacional.

Este critério de parada foi utilizado para os planejamentos pseudodinâmico e dinâmico.



Linha	Comprimento (km)	Capacidade (MW)	Preço (R\$)
1	2,00	6,00	6,00
2	2,00	5,40	5,40
3	3,00	2,20	2,64
4	3,00	6,00	6,00
5	4,00	4,40	5,28
6	5,00	6,00	7,15
7	6,70	7,70	9,25
8	8,30	8,70	9,50
9	1,00	2,75	3,30
13	5,00	6,00	6,00

Tabela 6.1 Dados das linhas de transmissão existentes no sistema I

VI - TESTES E RESULTADOS

6.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos com sistemas encontrados na literatura [8] e [14] considerando planejamento estático e um horizonte de planejamento de vários estágios (pseudodinâmico) e planejamento dinâmico de dois sistemas de distribuição de energia elétrica encontradas na literatura utilizando o algoritmo Busca Tabu. O algoritmo para a solução do problema de planejamento da expansão, proposto neste trabalho, foi implementado em linguagem de programação FORTRAN.

6.2. SISTEMA I

O sistema constituído por 3 linhas existentes e 13 linhas potenciais, uma subestação existente (nó 10) e uma subestação futura (nó 12). São considerados 3 estágios no horizonte de planejamento. Encontram-se nas tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 as características elétricas do sistema I. A figura 6.1 mostra a topologia inicial deste sistema e o conjunto de linhas candidatas

Tabela 6.2 Dados das linhas de transmissão

Linha	Comprimento (km)	Capacidade (MW)	Preço (R\$)	Estágio
1	10	0,0285	0,0285	20
2	20	0,0115	0,0230	20
3	25	0,0185	0,0465	20

Tabela 6.3 Dados de carga de pico e média no sistema I

No	Demanda dos nós (MVA)		
	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
1	5,00	6,00	6,90
2	5,00	5,75	6,33
3	2,00	2,20	2,64
4	5,00	6,00	6,60
5	4,00	4,40	5,06
6	5,00	6,50	7,15
7	6,70	7,71	9,25
8	5,00	6,00	6,90
9	5,00	5,75	6,90
11	5,00	5,00	5,00

Tabela 6.1 Dados das demandas dos nós do sistema I nos três estágios de planejamento

	Subestação	Capacidade (MVA)	Custo fixo (Unid)
Existente	10	45,0	0,0
Futura	12	35,0	1500,0

Tabela 6.2 Dados das subestações do sistema I

Linha	Nó Inicial	Nó Final	Liga	Distancia (Km)	Tipo de cabo
1	1	10	1	2,00	1
2	3	10	1	2,00	1
3	2	1	1	1,00	1
4	7	3	--	1,00	--
5	6	2	--	2,00	--
6	5	11	--	1,00	--
7	7	8	--	1,00	--
8	3	4	--	1,00	--
9	8	12	--	1,00	--
10	11	6	--	1,00	--
11	1	5	--	1,00	--
12	6	9	--	1,00	--
13	12	11	--	1,00	--
14	9	12	--	1,00	--
15	4	11	--	1,00	--
16	10	5	--	2,30	--

Tabela 6.3 Dados das linhas do sistema I

tipo de cabo	MVAmax	R(pu/Km)	X(pu/Km)	CF (unid/Km)	CV (unid/Km/MVA)
1	10	0,0285	0,0365	20	4
2	20	0,0215	0,0285	30	2
3	25	0,0185	0,0195	40	1

Tabela 6.4 Dados do tipo de cabo a utilizar no sistema I

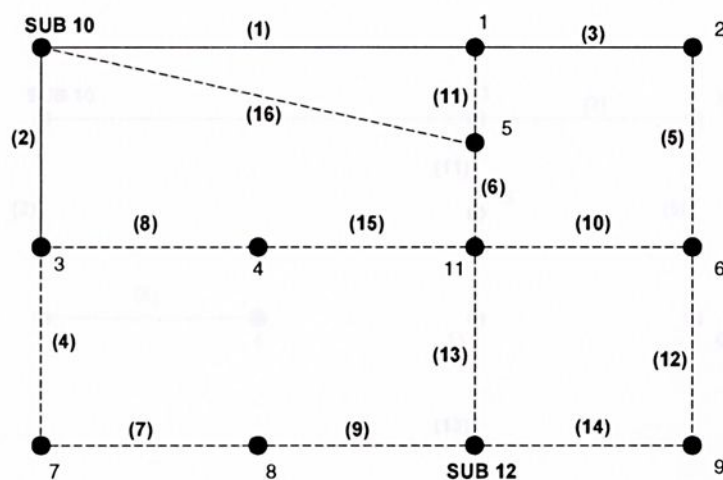


Figura 6.1 Configuração existente e linhas e subestações potenciais do sistema I

6.2.1. Resultados dos testes realizados

6.2.1.1 Modelo Pseudodinâmico

a. Sistema Radial Inicial

Subestação 10					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
1	2	19,2387	5	1	5,02
2	1	7,0321	8	1	5,0098
3	2	10,0596	11	1	4,0047
MVA Subestação		26,2709			

(a)

Subestação 12					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
7	1	6,7208	13	1	5,0061
9	2	11,7029	14	1	5,0061
MVA Subestação		21,6857			

(b)

Tabela 6.5 Resultados sistema inicial ((a) S/E 10; (b) S/E 12)

Custo total sistema inicial: 1930,3310

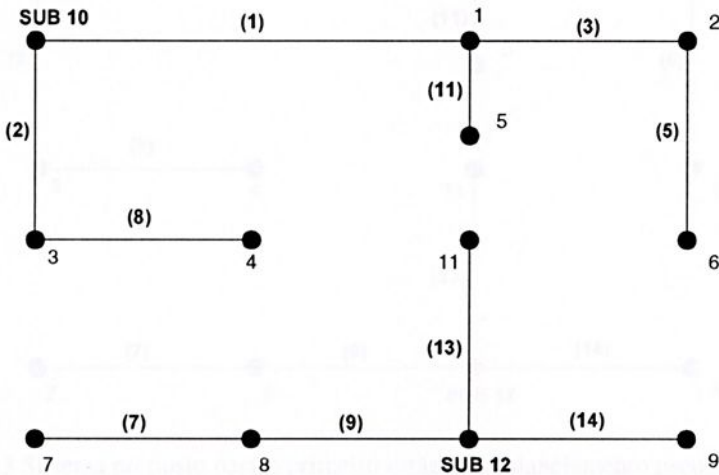


Figura 6.2 Sistema radial inicial do sistema I com planejamento pseudodinâmico

b. Primeiro estágio

Subestação 10					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
1	2	19,1929	5	1	5,0198
2	1	7,0321	8	1	5,0098
3	2	10,0508	11	1	4,0046
MVA Subestação		26,225			

(a)

Subestação 12					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
7	1	6,7207	13	1	5,0061
9	2	11,6966	14	1	5,0061
MVA Subestação		21,6792			

(b)

Tabela 6.6 Resultados do estágio I ((a) S/E 10; (b) S/E 12)

Custo total estágio I : 2079,672

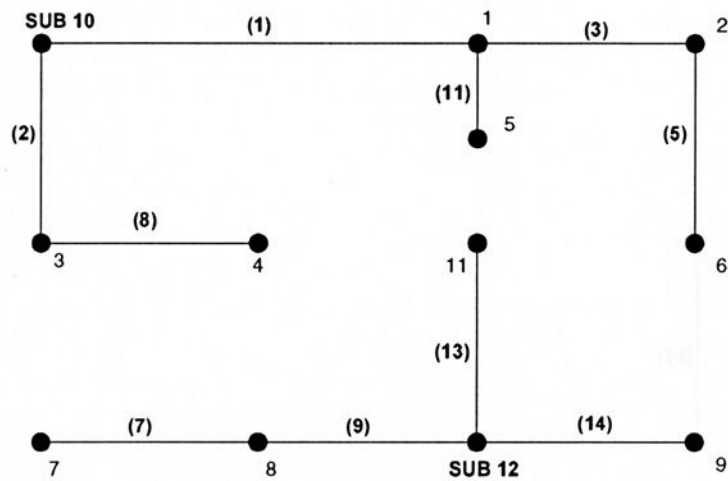


Figura 6.3 Sistema proposto para o primeiro estágio do planejamento pseudodinâmico

c. Segundo estágio

Subestação 10					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
1	2	16,2795	8	1	6,0159
2	1	8,2263	11	1	4,4128
3	2	5,7662			
MVA Subestação		24,5058			

(a)

Subestação 12					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
7	1	7,7347	13	1	5,0061
9	2	13,7128	14	2	12,2988
12	1	6,5147			
MVA Subestação		30,9769			

(b)

Tabela 6.7 Resultados estágio II ((a) S/E 10; (b) S/E 12)

Custo total do sistema do primeiro estágio: 128,8497

Custo total estágio II: 363,2206

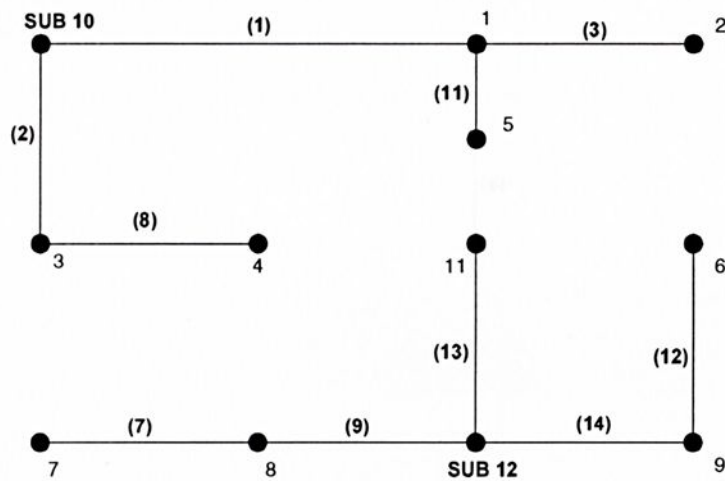


Figura 6.4 Sistema proposto para o segundo estágio do planejamento pseudodinâmico

d. Terceiro estágio

Subestação 10					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
1	3	23,507	6	1	5,01
2	1	9,3019	8	1	6,6181
3	1	6,3396	11	2	10,095
MVA Subestação		32,8088			

(a)

Subestação 12					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
7	1	9,2836	12	1	7,1756
9	2	16,1635	14	2	14,1135
MVA Subestação		30,2358			

(b)

Tabela 6.8 Resultados estágio III ((a) S/E 10; (b) S/E 12)

Custo total do sistema do terceiro estágio: 529,8807

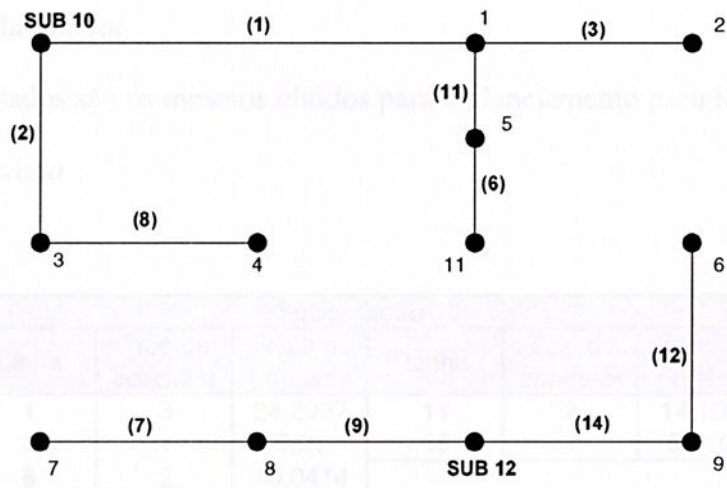


Figura 6.5 Sistema proposto para o terceiro estágio do planejamento pseudodinâmico

Comentários dos testes realizados:

Inicializa-se com um sistema radial onde se busca homogeneizar o fornecimento das duas subestações, sendo construídas a subestação sub12 e a bitola da linha 1 é trocada por uma de maior capacidade. O sistema proposto para o primeiro estágio sofre algumas alterações das linhas construídas, adicionando-se a subestação sub12 ao sistema e o fornecimento de energia da subestação sub 10 é muito maior que o fornecimento da subestação sub 12. No sistema proposto para o segundo estágio pode-se observar que a linha 5 é retirada do sistema e o nó 6 passa a ser atendido pela subestação2, a linha 14 altera para um condutor de bitola maior. No sistema proposto para o terceiro estágio a linha 1 é trocada de bitola, constroe-se a linha 6 para alimentar o nó 11 que passa a ser atendido pela subestação sub 10, e é retirada a linha 13. No primeiro e terceiro estágios as potências fornecidas pelas subestações são similares.

6.2.1.2 Modelo Dinâmico

a. Sistema radial inicial

Os resultados são os mesmos obtidos para o planejamento pseudodinâmico.

b. Primeiro estágio

Subestação 10					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
1	3	24,2937	11	2	14,1006
3	1	5,01	15	1	5,0101
6	2	10,0414			
MVA Subestação		24,2937			

(a)

Subestação 12					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
4	1	2,0008	12	1	5,0098
7	1	8,7078	14	2	10,0286
9	2	13,7078			
MVA Subestação		23,7148			

(b)

Tabela 6.9 Resultados estágio I ((a) S/E 10; (b) S/E 12)

Custo total do sistema do primeiro estágio: 2027,30

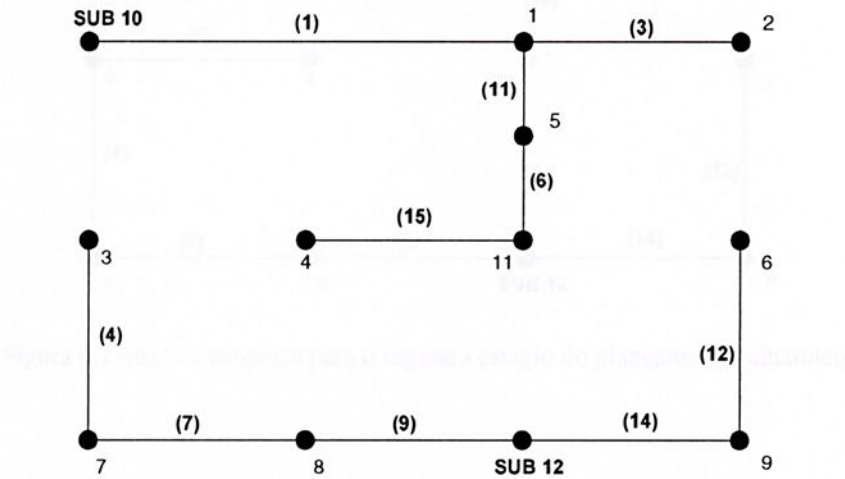


Figura 6.6 Sistema proposto para o primeiro estágio do planejamento dinâmico

d. Terceiro estágio

Subestação 10					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
1	3	23,5049	6	2	5,0079
2	1	9,3019	8	1	6,6181
3	1	6,3396	11	2	10,093
MVA Subestação		32,8067			

(a)

Subestação 12					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
7	2	9,2761	12	1	7,1756
9	3	16,1483	14	2	14,1135
MVA Subestação		30,2206			

(b)

Tabela 6.11 Resultados estágio III ((a) S/E 10; (b) S/E 12)

Custo total do sistema do terceiro estágio: 335,0872

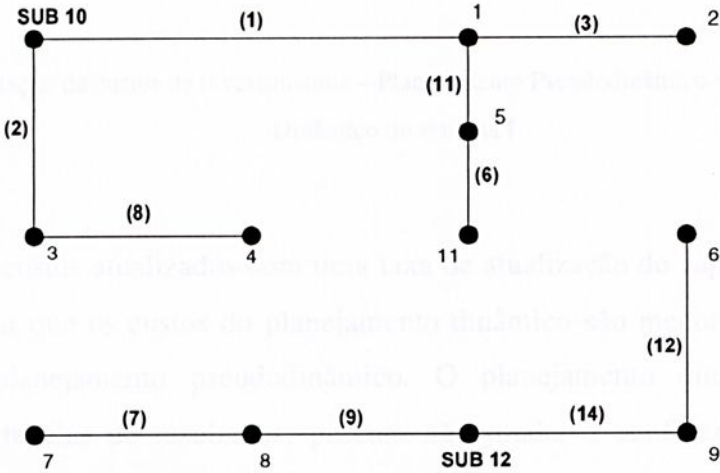


Figura 6.8 Sistema proposto para o terceiro estágio do planejamento dinâmico

Comentários dos testes realizados:

O sistema radial inicial para este tipo planejamento é igual ao pseudodinâmico. No sistema proposto para o primeiro estágio do planejamento pseudodinâmico é construída a subestação sub 12 sendo os nós 4, 5 e 11 alimentados pela subestação sub 10, e retirada a linha 2. No segundo estágio a linha 9 muda para uma bitola de maior capacidade, é retirada a linha 15 do sistema e adicionada a linha 8. No terceiro estágio nenhuma linha muda para uma bitola maior e a topologia do sistema é alterada. No processo de busca dos estágios pode-se encontrar sistemas mais baratos que o sistema proposto pelo estágio anterior, mas a construção de novas linhas fará ao sistema total muito mais oneroso, é por esse motivo que o sistema não muda muito no segundo e terceiro estágios.

Na tabela 6.12 estão os custos e investimentos obtidos para este sistema utilizando-se os modelos de planejamento pseudodinâmico e dinâmico.

	Planejamento Pseudodinâmico	Planejamento Dinâmico
Estágio I	2079,672	2027,3
Estágio II	363,2206	346,1639
Estágio III	529,8807	335,0872
Custo atualizado	2689,549	2504,243

Tabela 6.12 Relação de custos de investimentos – Planejamento Pseudodinâmico vs. Planejamento Dinâmico do sistema I

Com os custos atualizados com uma taxa de atualização do capital de 5% anual pode-se observar que os custos do planejamento dinâmico são menores que os custos obtidos pelo planejamento pseudodinâmico. O planejamento dinâmico, como é observado nas tabelas de resultados, procura não mudar a configuração entre cada estágio, e busca definir um sistema que permita garantir o fornecimento de energia para os três estágios, tornando-o mais seguro. Por outro lado o planejamento pseudodinâmico é mais flexível no sentido de que a mudança para novos caminhos é permitida, um estágio é independente do outro.

6.3. SISTEMA II

Este sistema foi proposto por Proença [14], sendo constituído por 16 linhas existentes e 45 linhas potenciais, duas subestações existentes e duas futuras. São 54 nós de consumo que precisam de energia nos diferentes estágios do horizonte de planeamento. As tabelas 6.13, 6.14 e 6.15 fornecem as características elétricas deste sistema. Na tabela 6.16 estão os dados das linhas utilizados nos testes e a figura 6.8 apresenta a topologia da rede.

Nó	Demanda dos nós (MVA)			Nó	Demanda dos nós (MVA)		
	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3		Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
1	3,3	3,8	4,2	26	0	0,8	1,2
2	1,1	1,3	1,5	27	0	1,2	1,5
3	0,4	0,5	0,7	28	0,4	0,5	0,7
4	1,4	1,9	1,1	29	0,6	0,9	1,4
5	2	2,3	2,6	30	2	2,3	2,6
6	0,6	0,7	0,7	31	0,6	0,7	0,7
7	0,2	0,5	1	32	0	1,5	1,7
8	1,5	1,7	1,9	33	1,8	2,3	2,9
9	1,9	2	1,2	34	0,9	1	1,2
10	2	2,4	2,9	35	0	0	0,9
11	0,2	0,3	0,3	36	0,2	0,2	0,3
12	1	1,6	1,8	37	1	1,6	2,1
13	0,9	1	1,1	38	0	0	1,1
14	0,8	0,9	1	39	0,8	0,9	1
15	1	1,2	1,4	40	1	1,2	1,4
16	1,3	1,5	1,9	41	0,3	0,5	0,9
17	0,5	0,6	0,7	42	0	0	1,2
18	0,9	1	1,2	43	0	0	1,3
19	1	1,2	1,4	44	0,5	1	1,4
20	0,5	0,7	0,8	45	0,5	0,5	0,8
21	0,5	1,6	1,8	46	0	1,6	1,8
22	0,5	1	1,1	47	0,5	0,5	1
23	0,5	0,9	1	48	0,5	0,6	0,8
24	0,5	0,4	0,5	49	0	0,6	0,5
25	0,6	0,8	0,9	50	0	0	0,8

Tabela 6.13 Dados das demandas dos nós do sistema II nos três estágios de planeamento

	Subestação	Capacidade(MVA)	Custo fixo (Unid)
Existente	101	33,4	100,0
	102	30,0	80,0
Futuras	103	22,0	200,0
	104	22,0	240,0

Tabela 6.14 Dados das subestações

Linha	Nó Inicial	Nó Final	Liga	Distancia (Km)	Tipo de cabo	Linha	Nó Inicial	Nó Final	Liga	Distancia (Km)	Tipo de cabo
4	101	1	1	2,81	2	35	6	28	--	5	--
5	101	3	1	2,18	2	36	104	30	--	2,81	--
6	3	4	1	3,12	1	37	30	29	--	3,12	--
7	4	7	1	2,5	1	38	30	43	--	4,06	--
8	4	5	1	3,12	1	39	43	37	--	2,5	--
9	7	8	1	3,12	1	40	37	31	--	1,87	--
10	5	6	1	2,5	1	41	31	10	--	3,12	--
11	1	9	1	3,43	1	42	13	43	--	3,75	--
12	1	2	1	3,12	1	43	12	45	--	2,5	--
13	9	10	1	7,18	1	44	45	44	--	2,18	--
14	102	14	1	3,75	1	45	44	38	--	3,12	--
15	14	15	1	3,75	1	46	38	39	--	3,43	--
16	15	16	1	2,81	1	47	39	32	--	4,06	--
17	102	11	1	2,81	1	48	39	33	--	2,81	--
18	11	12	1	3,12	1	49	33	8	--	4,68	--
19	12	13	1	4,37	1	50	33	34	--	1,87	--
20	19	20	--	3,12	--	51	34	35	--	2,18	--
21	18	19	--	2,5	--	52	35	36	--	2,18	--
22	17	18	--	4,06	--	53	103	36	--	2,5	--
23	9	17	--	4,3	--	54	103	28	--	3,12	--
24	18	21	--	3,12	--	55	103	41	--	3,12	--
25	104	21	--	2,5	--	56	41	40	--	2,5	--
26	104	22	--	3,75	--	57	40	16	--	2,5	--
27	9	22	--	4,68	--	58	41	42	--	3,75	--
28	22	23	--	3,43	--	59	42	48	--	2,5	--
29	23	24	--	2,81	--	60	48	49	--	3,75	--
30	24	25	--	2,18	--	61	49	50	--	2,18	--
31	25	8	--	2,81	--	62	42	47	--	3,12	--
32	8	27	--	3,75	--	63	47	46	--	3,12	--
33	27	26	--	3,43	--	64	46	14	--	3,43	--
34	27	28	--	3,12	--						

Tabela 6.15 Dados das linhas do sistema

6.3.1 Resultados dos testes realizados

6.3.1.1 Modelo Proposto

Cabo	tipo de cabo	MVAmax	R(pu/Km)	X(pu/Km)	CF (unidade/Km)	CV (unidade/Km/MVA)
1/0	1	9,00	0,3655	0,2520	20,00	9,00
2/0	2	11,00	0,2921	0,2466	30,00	8,00
3/0	3	12,50	0,2359	0,2402	40,00	7,00
4/0	4	14,00	0,1932	0,2279	50,00	6,00
2x1/0	5	19,00	0,1827	0,1260	60,00	5,00
2x2/0	6	22,40	0,1460	0,1233	70,00	4,00
2x3/0	7	25,00	0,1180	0,1201	80,00	2,00
2x4/0	8	28,00	0,0966	0,1140	90,00	1,00

Tabela 6.16 Dados do tipo de cabo a utilizar no sistema.

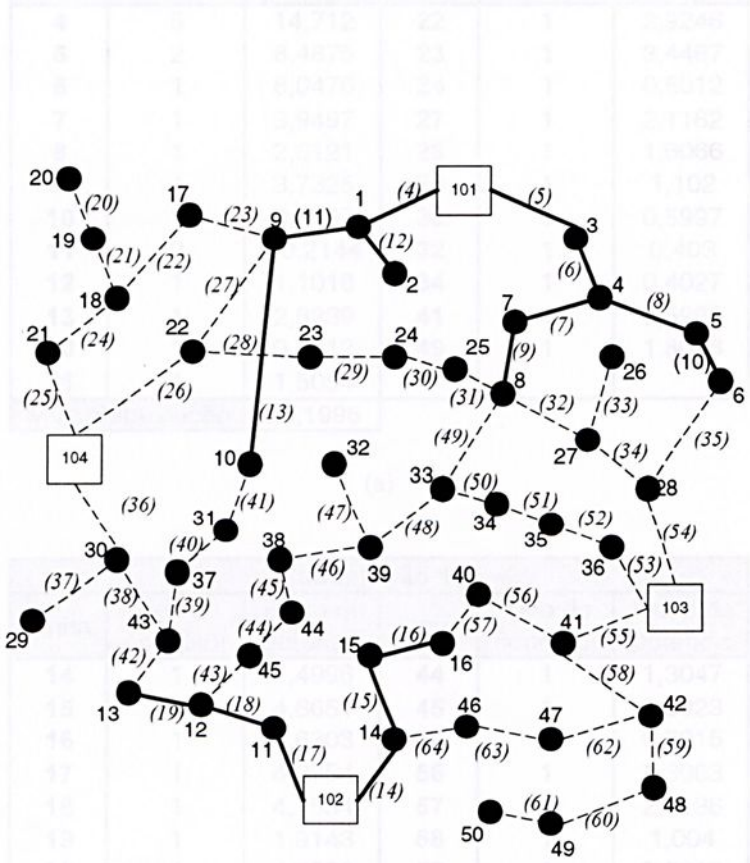


Figura 6.9 Configuração existente e linhas e subestações potenciais

6.3.1. Resultados dos testes realizados

6.3.1.1 Modelo Pseudodinâmico

Neste modelo são resolvidos três estágios de planejamento estático consecutivamente. O sistema final que é a resposta de um estágio do planejamento, será o sistema inicial para o estágio seguinte.

a. Sistema Radial Inicial

Subestação 101					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
4	5	14,712	22	1	2,9246
5	2	8,4875	23	1	3,4467
6	1	8,0476	24	1	0,5012
7	1	3,9497	27	1	2,1162
8	1	2,6121	28	1	1,6066
9	1	3,7325	29	1	1,102
10	1	0,5997	30	1	0,5997
11	2	10,2144	32	1	0,403
12	1	1,1018	34	1	0,4027
13	1	2,6239	41	1	0,5998
20	1	0,5012	49	1	1,8088
21	1	1,5054			
MVA Subestação		23,1996			

(a)

Subestação 102					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
14	1	5,4996	44	1	1,3047
15	1	4,6651	45	1	0,8023
16	1	3,6303	46	1	0,8015
17	1	4,9754	56	1	1,3063
18	1	4,7534	57	1	2,3136
19	1	1,9143	58	1	1,004
39	1	1,0028	59	1	0,5012
42	1	1,0044	62	1	0,5012
43	1	1,8089			
MVA Subestação		10,4751			

(b)

Subestação 103					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
51	1	1,107	53	1	1,107
52	1	0,9048			
MVA Subestação		1,107			

(c)

Subestação 104					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
36	1	2,6091	37	1	0,5998
MVA Subestação		2,6091			

(d)

Tabela 6.17 Resultados sistema radial inicial ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103; (d) S/E 104)

Custo total do sistema inicial proposto: 892,4451

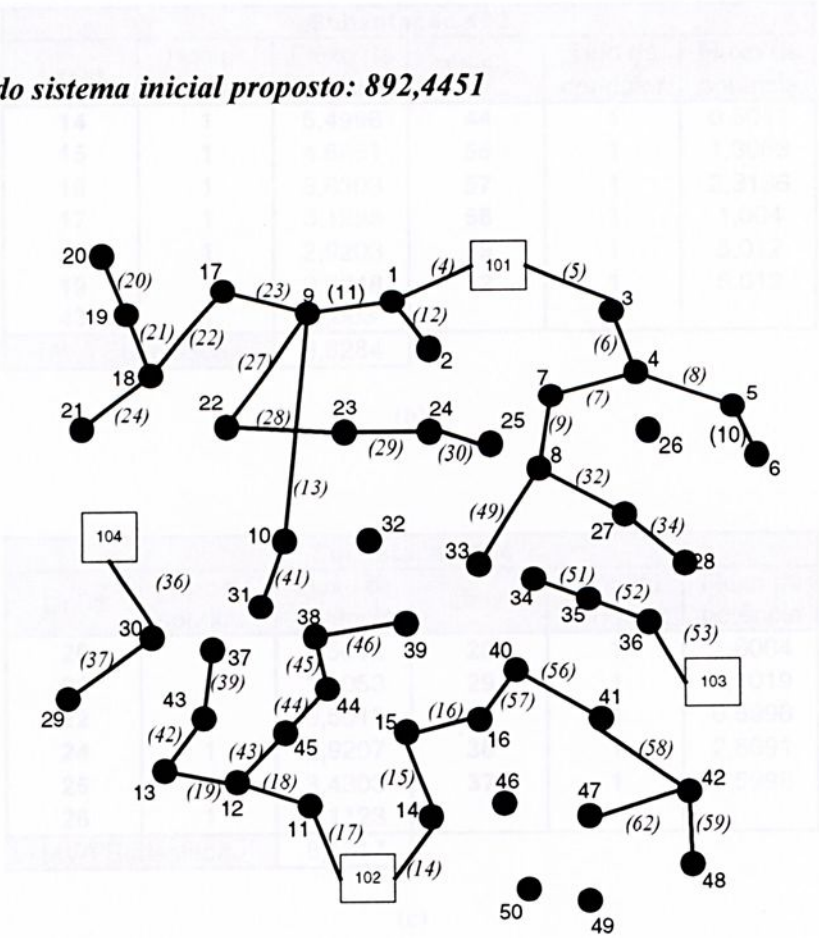


Figura 6.10 Sistema radial inicial para o planejamento pseudodinâmico

b. Primeiro estágio

Subestação 101					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
4	2	10,0722	32	1	0,403
5	2	10,5064	34	1	0,427
6	2	10,0465	40	1	1,0026
7	1	5,9225	41	1	1,6053
8	1	2,6121	48	1	0,8013
9	1	5,685	49	1	3,7371
10	1	0,5997	50	1	1,1057
11	1	5,5971	51	1	0,2013
12	1	1,1018	52	1	0,2013
13	1	3,6483			
MVA Subestação		20,5785			

(a)

Subestação 102					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
14	1	5,4996	44	1	0,5011
15	1	4,6651	56	1	1,3063
16	1	3,6303	57	1	2,3136
17	1	3,1298	58	1	1,004
18	1	2,9203	59	1	5,012
19	1	0,9048	62	1	5,012
43	1	1,003			
MVA Subestação		8,6284			

(b)

Subestação 104					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
20	1	0,5012	28	1	1,6064
21	1	1,5053	29	1	1,1019
22	1	0,5013	30	1	0,5996
24	1	2,9207	36	1	2,6091
25	1	3,4303	37	1	0,5998
26	1	2,1123			
MVA Subestação		8,1517			

(c)

Tabela 6.18 Resultados do estágio I ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 104)

Custo total do sistema do primeiro estágio: 900,6643

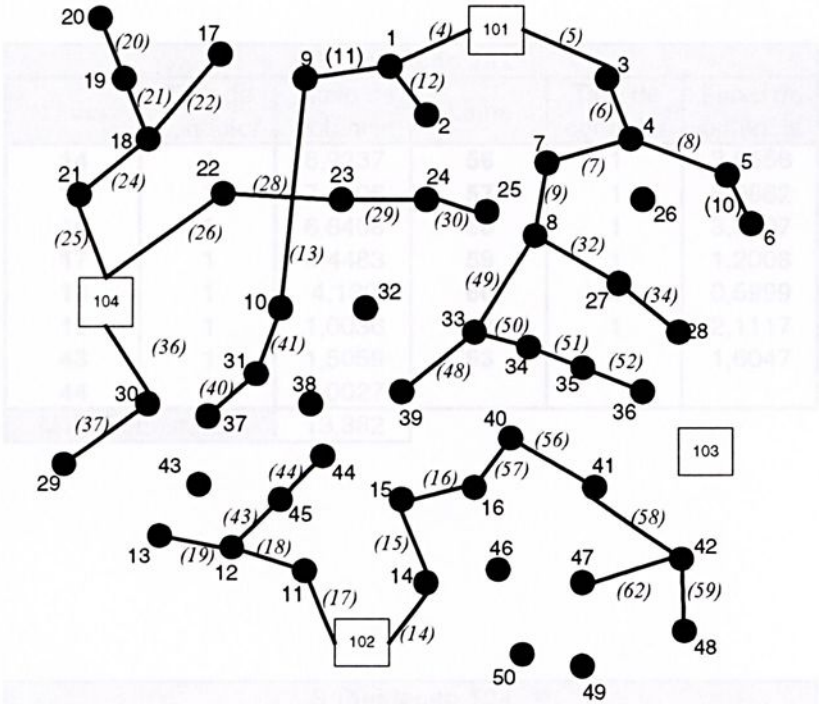


Figura 6.11 sistema proposto para o primeiro estágio do planejamento pseudodinâmico

c. Segundo estágio

Subestação 101					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
4	3	12,0441	34	1	2,0099
5	5	16,5907	35	1	2,5242
6	5	16,0003	40	1	1,6032
7	1	8,3531	41	1	2,3124
8	1	5,5806	47	1	1,5068
9	1	7,7802	48	1	2,4173
10	1	3,2373	49	1	5,997
11	1	6,8557	50	1	1,2043
12	1	1,3036	51	1	0,2013
13	1	4,7866	52	1	0,2013
33	1	0,8015			
MVA Subestação		28,6348			

(a)

Subestação 102					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
14	1	8,9337	56	1	3,8556
15	1	7,9406	57	1	5,0862
16	1	6,6408	58	1	3,3307
17	1	4,4483	59	1	1,2008
18	1	4,132	60	1	0,5999
19	1	1,0036	62	1	2,1117
43	1	1,5059	63	1	1,6047
44	1	1,0027			
MVA Subestação		13,382			

(b)

Subestação 104					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
20	1	0,7028	28	1	2,1148
21	1	1,9095	29	1	1,2053
22	1	0,5999	30	1	0,8011
24	1	3,5268	36	1	3,2163
25	1	5,1477	37	1	0,9044
26	1	3,1275			
MVA Subestação		11,4916			

(c)

Tabela 6.19 Resultados estágio II ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 104)

Custo total do sistema do segundo estágio: 555,2955

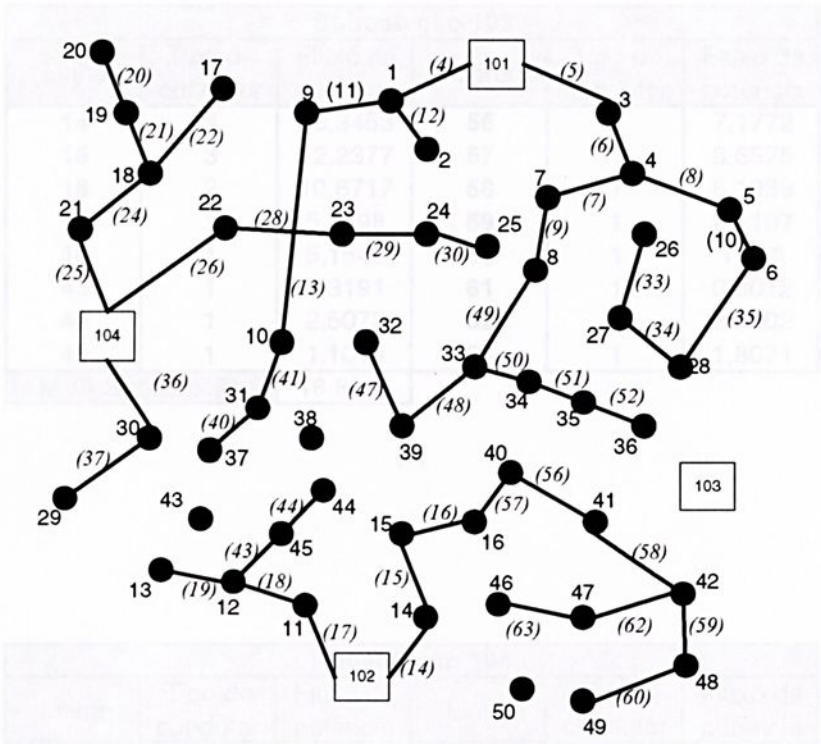


Figura 6.12 Sistema proposto para o segundo estágio do planejamento pseudodinâmico

d. Terceiro estágio

Subestação 101					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
4	3	10,6429	33	1	1,2008
5	6	20,1861	34	1	2,7134
6	6	19,3824	35	1	3,4361
7	3	11,2674	41	1	0,6984
8	1	6,8147	47	1	1,7048
9	2	10,1708	48	1	2,7158
10	1	4,152	49	1	8,1556
11	1	4,8717	50	1	2,4036
12	1	1,5056	51	1	1,2002
13	1	3,64	52	1	0,2998
MVA Subestação		30,8289			

(a)

Subestação 102					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
14	4	13,3453	56	1	7,1772
15	3	12,2377	57	1	8,6575
16	2	10,6717	58	1	6,1939
17	1	5,4798	59	1	2,1107
18	1	5,1549	60	1	1,305
43	1	3,3191	61	1	0,8012
44	1	2,5073	62	1	2,8202
45	1	1,1018	63	1	1,8071
MVA Subestação		18,8251			

(b)

Subestação 104					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
20	1	0,8014	29	1	1,4028
21	1	2,2062	30	1	0,8997
22	1	6,986	36	1	8,612
24	1	4,1248	37	1	1,4024
25	1	5,9537	38	1	4,5442
26	1	3,5269	39	1	2,1066
28	1	2,4127	42	1	1,1021
MVA Subestação		18,0925			

(c)

Tabela 6.20 Resultados estágio III ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 104)

Custo total do sistema do terceiro estágio: 720,615

6.3.2.2 Modelo Dinâmico
Sistema radial final

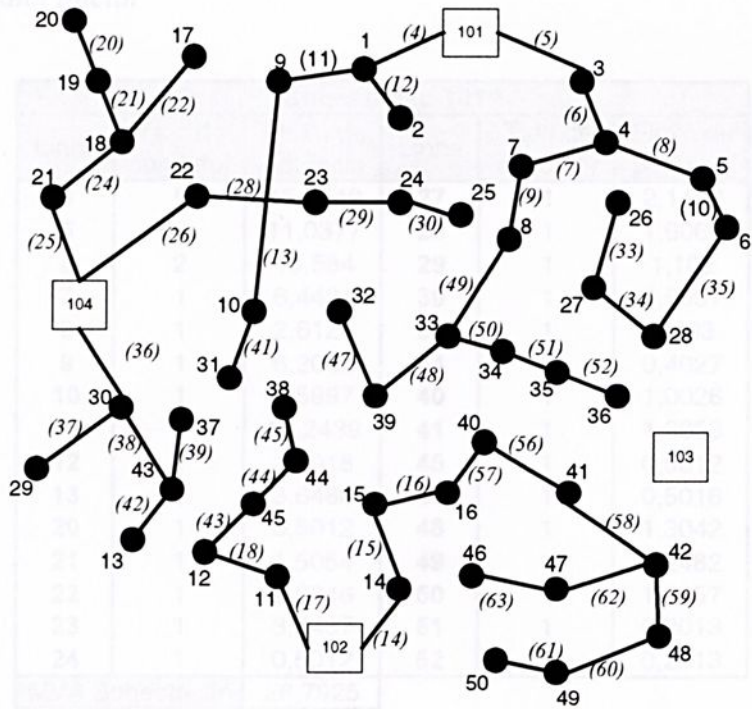


Figura 6.13 sistema proposto para o terceiro estágio do planejamento pseudodinâmico

Comentários dos testes realizados:

O sistema inicial proposto considera a construção de 4 subestações. No sistema proposto para o primeiro estágio é construída a subestação 101, e a bitola da linha 6 foi trocada para uma de bitola maior. No segundo é trocada a bitola das linhas 4, 5 e 6 para uma bitola maior. A configuração do sistema muda dentro dos nós que estão sendo fornecidos pela subestação 101. No terceiro estágio a bitola das linhas 5, 6, 7 e 9 da subestação 101 mudarem para bitolas maiores. Nos dois últimos estágios são adicionados ao sistema os nós que não possuíam cargas. Também se observa que em todos estágios a subestação 101 é a que mais energia fornece ao sistema, no segundo e terceiro estágios esta tendência tenta se homogeneizar, assim as subestações 102 e 103 aumentam a potência de fornecimento e a subestação 101 acrescenta em pouca magnitude.

6.3.1.2 Modelo Dinâmico

a. Sistema radial inicial

Subestação 101					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
4	5	15,7549	27	1	2,1162
5	3	11,0377	28	1	1,6066
6	2	10,584	29	1	1,102
7	1	6,4484	30	1	0,5997
8	1	2,6121	32	1	0,403
9	1	6,2042	34	1	0,4027
10	1	0,5997	40	1	1,0026
11	3	11,2439	41	1	1,6053
12	1	1,1018	45	1	0,5012
13	1	3,6486	46	1	0,5016
20	1	0,5012	48	1	1,3042
21	1	1,5054	49	1	4,2482
22	1	2,9246	50	1	1,1057
23	1	3,4467	51	1	0,2013
24	1	0,5012	52	1	0,2013
MVA Subestação		26,7925			

(a)

Subestação 102					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
14	1	5,4996	43	1	0,5012
15	1	4,6651	56	1	1,3063
16	1	3,6303	57	1	2,3136
17	1	2,6221	58	1	1,004
18	1	2,4151	59	1	0,5012
19	1	0,9048	62	1	0,5012
MVA Subestação		8,1217			

(b)

Subestação 104					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
36	1	2,6091	37	1	0,5998
MVA Subestação		2,609			

(c)

Tabela 6.21 Resultados sistema radial inicial ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 104)

Custo total do sistema radial inicial: 725,8875

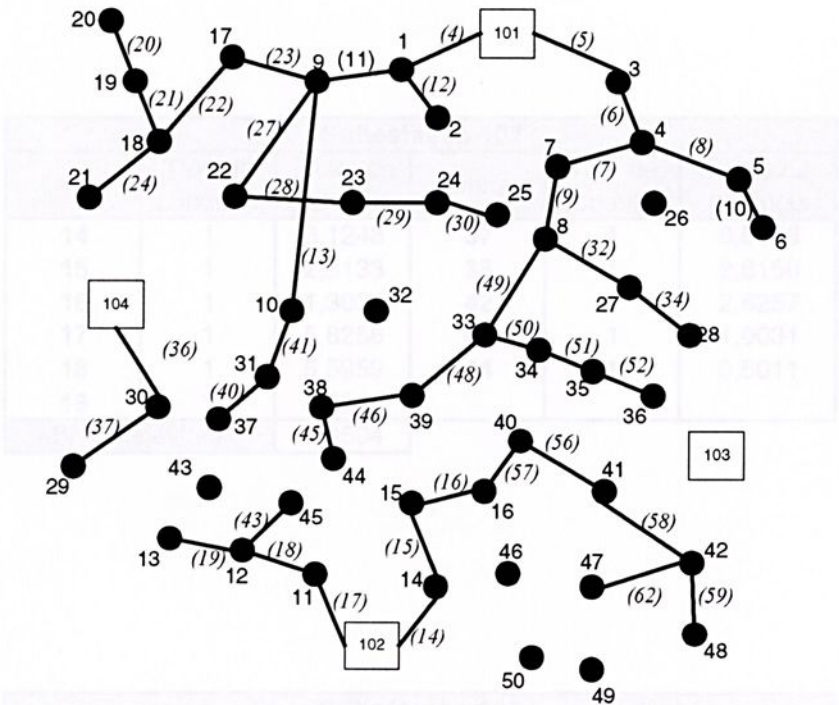


Figura 6.14 Sistema radial inicial para o planejamento dinâmico

b. Primeiro estágio

Subestação 101					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
4	5	14,6214	21	1	1,5054
5	2	7,3292	22	1	2,9246
6	1	6,8988	23	1	3,4467
7	1	2,8227	24	1	0,5012
8	1	2,6120	27	1	1,0041
9	1	2,6133	28	1	0,5013
10	1	0,5997	30	1	0,5011
11	2	10,1248	31	1	1,1019
12	1	1,1018	40	1	1,0026
13	1	3,6486	41	1	1,6053
20	1	0,5012			
MVA Subestação		21,9506			

(a)

Subestação 102					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
14	1	3,1248	37	1	0,5998
15	1	2,3133	38	1	2,6150
16	1	1,3034	42	1	2,6257
17	1	5,8256	43	1	1,0031
18	1	5,5959	44	1	0,5011
19	1	3,5516			
MVA Subestação		8,9504			

(b)

Subestação 103					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
48	1	8,0130	55	1	2,3118
50	1	2,6080	56	1	1,0033
51	1	3,5231	58	1	1,0039
52	1	3,5340	59	1	0,5012
53	1	3,7458	62	1	0,5012
54	1	0,4026			
MVA Subestação		6,4602			

(c)

Tabela 6.22 Resultados estágio I ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103)

Custo total do sistema do primeiro estágio: 793,5513

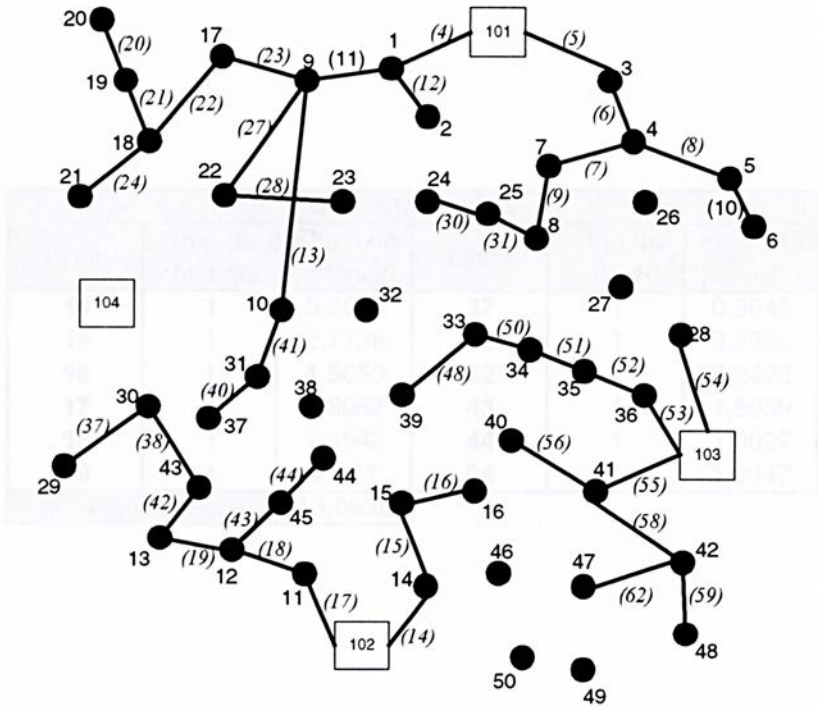


Figura 6.15 Sistema proposto para o primeiro estágio do planejamento dinâmico

c. Segundo estágio

Subestação 101					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
4	6	19,2741	21	1	1,9097
5	2	8,9885	22	1	4,5515
6	1	8,4456	23	1	5,1989
7	1	3,4329	24	1	1,6046
8	1	3,0176	27	1	1,9134
9	1	2,9199	28	1	0,9046
10	1	0,7027	30	1	0,4026
11	5	14,0397	31	1	1,2049
12	1	1,3036	40	1	1,6032
13	1	4,7866	41	1	2,3124
20	1	0,7028			
MVA Subestação		28,4096			

(a)

Subestação 102					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
14	1	5,2586	37	1	0,9045
15	1	2,7196	38	1	3,2256
16	1	1,5053	42	1	3,2422
17	1	7,8052	43	1	1,5059
18	1	7,4543	44	1	1,0027
19	1	4,277	64	1	1,6047
MVA Subestação		13,0638			

(b)

Subestação 103					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
33	1	0,8014	54	1	2,5163
34	1	2,0095	55	1	3,4233
47	1	1,5065	56	1	1,2052
48	1	2,4167	58	1	1,7063
50	1	4,7372	59	1	1,2007
51	1	5,7686	60	1	0,5999
52	1	5,7981	62	1	0,5012
53	1	6,0265			
MVA Subestação		11,9661			

(c)

Tabela 6.23 Resultados estágio II ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103)

Custo total do sistema do segundo estágio: 507,1015

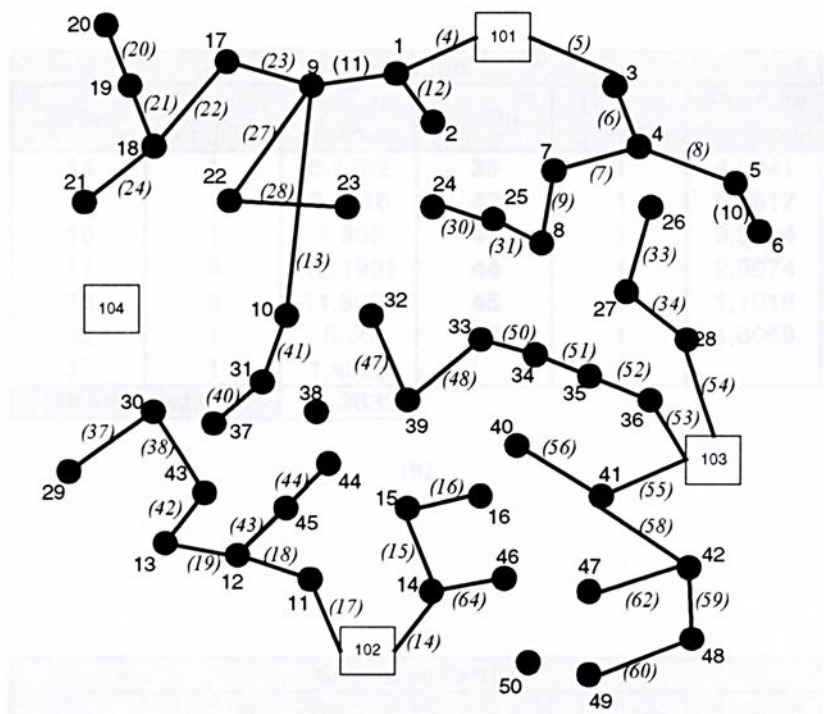


Figura 6.16 Sistema proposto para o segundo estágio do planejamento dinâmico

d. Terceiro estágio

Subestação 101					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
4	6	21,1743	21	1	2,2066
5	2	9,5989	22	1	5,2596
6	1	8,8531	23	1	6,0221
7	1	4,3388	24	1	1,8068
8	1	3,3153	27	1	2,1121
9	1	3,3175	28	1	1,0032
10	1	0,6983	30	1	0,5011
11	5	15,3137	31	1	1,4024
12	1	1,5056	40	1	2,1056
13	1	5,817	41	1	2,814
20	1	0,8014			
MVA Subestação		30,7731			

(a)

Subestação 102					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
14	1	6,1732	38	1	4,0341
15	1	3,3216	42	1	5,3817
16	1	1,905	43	1	3,3194
17	3	12,1901	44	1	2,5074
18	3	11,8097	45	1	1,1018
19	1	6,56	64	1	1,8069
37	1	1,4026			
MVA Subestação		18,3632			

(b)

Subestação 103					
Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência	Linha	Tipo de condutor	Fluxo de potência
33	1	1,2007	54	1	3,4213
34	1	2,7126	55	1	6,6838
47	1	1,7045	56	1	1,4029
48	1	2,715	58	1	4,3401
50	1	5,6423	60	1	1,3047
51	1	6,8834	61	1	0,8011
52	1	7,8365	62	1	1,0031
53	1	8,1864			
MVA Subestação		18,2914			

(c)

Tabela 6.24 Resultados estágio III ((a) S/E 101; (b) S/E 102; (c) S/E 103)

Custo total do sistema do terceiro estágio: 587,1452

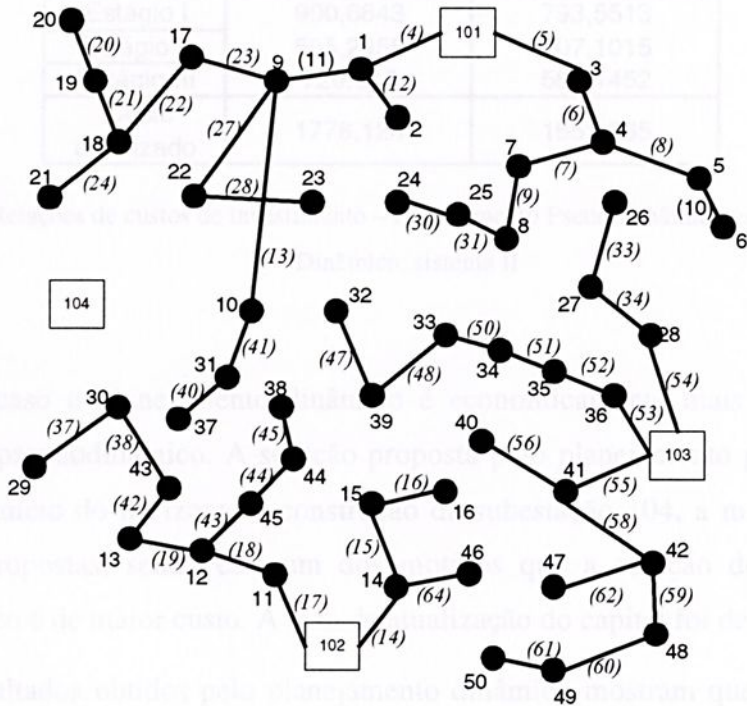


Figura 6.17 Sistema proposto para o terceiro estágio do planejamento dinâmico

Comentário dos testes realizados:

O sistema radial inicial proposto tem 3 subestações, as duas subestações existentes 101 e 102, e a nova subestação 104. No sistema proposto para o primeiro estágio, a subestação 101 está fornecendo a maior parte da energia, mas as demais subestações procuram atender a demanda restante. No segundo estágio as linhas 4 e 11 da subestação 101 mudam para uma bitola de maior capacidade. Foram incluídos no sistema os nós 27, 26, 32, 46 e 49. No terceiro estágio o sistema não altera sua configuração original, foram alteradas algumas bitolas das linhas geralmente menos afastados das subestações, como por exemplo as linhas 17, e 18. Foram incluídos os nós 43 e 50. As subestações 102 103 estão fornecendo quase a mesma potência.

Na tabela 6.24 estão os custos de investimentos obtidos para este sistema utilizando-se os modelos de planejamento pseudodinâmico e dinâmico.

	Planejamento Pseudodinâmico	Planejamento Dinâmico
Estágio I	900,6643	793,5513
Estágio II	555,2955	507,1015
Estágio III	720,615	587,1452
Custo atualizado	1778,124	1551,335

Tabela 6.25 Relações de custos de investimento – Planejamento Pseudodinâmico vs Planejamento Dinâmico, sistema II

Neste caso o planejamento dinâmico é economicamente mais atrativo que o planejamento pseudodinâmico. A solução proposta pelo planejamento pseudodinâmico considera no início do horizonte a construção da subestação 104, a mais onerosa das subestações propostas, sendo este um dos motivos que a solução do planejamento pseudodinâmico é de maior custo. A taxa de atualização do capital foi de 5% por ano.

Os resultados obtidos pelo planejamento dinâmico mostram que o sistema não altera muito de sua configuração inicial, ao contrário do que ocorre com os resultados obtidos pelo planejamento pseudodinâmico. O fato de que o sistema não altera sua topologia, faz com que se obtenha um sistema seguro quando as cargas são acrescentadas e a análise da proteção não mude ao longo do período de planejamento e construção do sistema.

Observação:

Alteração drástica da topologia implica em investimentos para construção e alteração de características de linhas, S/Es e equipamentos.

Comentários gerais dos testes

A proibição de uma configuração ter que permanecer na lista tabu depois de 5, 10, 15 iterações, não fez muita diferença para encontrar o possível ótimo do problema proposto, basicamente mudou o tempo para se chegar a uma configuração de boa qualidade. O algoritmo mostrou um melhor desempenho quando se utiliza uma proibição de 5 iterações.

O critério de aspiração foi empregado para aquelas configurações que tinha atributos proibidos mas que cumpriam com as restrições de: radialidade, níveis de tensão, capacidade máxima de subestações e linhas. O valor da função objetivo destas configurações era penalizado com um valor adicional (15% a mais do valor total), permitindo assim a estas configurações de boa qualidade participarem da nova solução corrente e talvez cheguem a ser a nova solução incumbente.

O critério de parada adotado, ou seja, se o algoritmo não encontra uma solução melhor depois de um determinado número de iterações (entre 15 e 20 iterações depois de encontrar a melhor solução) permite ao algoritmo não ficar procurando soluções, quando não se tem a oportunidade de melhorar o valor da incumbente.

O valor da taxa de atualização do capital foi de 5% por ano.

VII – CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma formulação que considera as alternativas de construções de linhas, subestações e a troca da bitola de alimentadores (recondutoramento), em sistemas de distribuição. A técnica de solução proposta para resolver este problema de programação não-linear inteiro misto do tipo binário (0/1), foi através de algoritmo de busca tabu.

A metodologia proposta é flexível, aplicada para o análise e estudos de planejamento de alguns sistemas de distribuição e forneceu como resultado um conjunto de soluções alternativas juntamente com a melhor solução para o problema. O algoritmo Busca Tabu mostrou ser uma ferramenta flexível para solucionar o problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica, sendo adequado para para solução de qualquer tipo de problema de natureza combinatorial, em particular sistemas de distribuição de energia envolvendo operações de chaveamentos - reconfiguração, alocação de capacitores, dispositivos de manobras e proteção, entre outros.

A principal vantagem da utilização desta técnica para resolver o problema de planejamento está na facilidade de se trabalhar com um modelo não linear do problema e incorporar à formulação modelos reais de componentes dos sistemas, atendendo-se requisitos técnicos e econômicos para obtenção de resultados compatíveis com a realidade das concessionárias de energia. Embora tenha sido usado um modelo linearizado para a função objetivo, pode-se facilmente trocá-lo por qualquer função não linear, considerando-se as perdas de energia calculadas através do fluxo de potência. Neste caso deve-se considerar as demandas dos diferentes tipos de consumidores

adotando-se curvas de carga típicas do sistema sob estudo, para se obter uma boa precisão dos resultados obtidos com o modelo de planejamento.

A técnica de cálculo fluxo de potência utilizada mostrou-se eficiente, segura e adequada para a solução deste tipo de problema, por ser um algoritmo simples de cálculo de fluxo de potência, não teve problemas devido o mesmo ser processado sucessivamente durante o processo de busca.

Os resultados obtidos através das simulações dos sistemas encontrados na literatura comprovam a eficiência da metodologia desenvolvida e implementada.

O planejamento pseudodinâmico apresenta bons resultados em comparação com os resultados obtidos pelo planejamento dinâmico, este tipo de planejamento permite ao planejador ter um melhor controle da construção do sistema nos diferentes estágios. Os dados de um sistema podem mudar com o tempo, isto faz com que o planejamento seja avaliado novamente. Este planejamento é executado várias vezes consecutivas de forma estática e o sistema resultante de um estágio é o sistema inicial para o seguinte estágio de planejamento. Assim se um horizonte de planejamento é dividido em 3 estágios, são executados três planejamentos estáticos, iniciando em cada estágio com o sistema proposto no estágio anterior.

O planejamento dinâmico permite determinar a construção dos componentes do sistema de distribuição em diferentes períodos do horizonte de planejamento. O algoritmo propõe a construção de um sistema que se mantém fixo nos estágios seguintes, nos exemplos mostrados no capítulo anterior verifica-se que são mudadas as bitolas das linhas que estão mais perto das subestações, mas o caminho das linhas do sistema proposto no primeiro estágio é mantido

Embora o planejamento dinâmico forneça resultados mais próximos da realidade com custos de investimentos menores, o problema envolvendo estes dois modelos está no tempo computacional que não deve influenciar no modelo de planejamento adotado, devendo-se sempre optar pelo modelo que oferece menores custos de investimentos e maior confiabilidade. A relação entre os tempos computacionais consumidos para resolver problemas de médio porte, usando os modelos estático e dinâmico foi superior a cem unidades de tempo.



Sugestões para futuros trabalhos

- Incorporar ao modelos de planejamento a natureza probabilística do crescimento das cargas
- Tratar o planejamento como um modelo multi-objetivo e através do uso de lógica *fuzzy*, buscar a melhor solução compromisso para cada estágio do horizonte de planejamento.
- Incluir no modelo de planejamento capacidade para operação em condições de emergência – restauração de sistemas de distribuição.
- Melhorar o algoritmo de BT - Uso de técnicas mais elaboradas para realizar a transição entre vizinhos [18], juntamente com a técnica de troca de ramos.; - Adequar as funções avançadas de TB (path relinking, oscilação estratégica, configurações de elite) para o planejamento de sistemas de distribuição;
- Implementação do algoritmo BT para planejamento da expansão de redes de distribuição em máquinas de memória distribuída, permitindo expandir o espaço de busca, sofisticar a modelagem do problema e ao mesmo tempo reduzir o tempo computacional. O modelo de programação adotado pode ser um modelo assíncrono, alocando-se um processador para fazer o gerenciamento do processo de busca (mestre) e um conjunto de processadores para solução dos subproblemas correspondentes (escravos).

mantimento usando algoritmos combinatoriais", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica de Parana (Colômbia) 2002

[14] Geoffroy, A.M., "Generalized Bender's Decomposition" Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 10, 1972

[16] Goldberg, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, INC., 1989

[7] Gward, S.K., "Distribution System Planning Using Branch Exchange Technique", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 13(2), 718-723, 1997

[8] Kagan, N. "Electrical Distribution System Planning Using Multi Objective and Perry Mathematical Programming", PhD Thesis, University of London, 1992

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] Bernal Agustín, J.L.; Ramirez Rosado, I.J., "Genetic Algorithm Applied to the Design of Large Power Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 13(2): 696-703. 1998
- [2] Cespedes, R., "New Method for the Analysis of Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, USA, 5(1): 391-396, 1990
- [3] Diaz A., F. Glover, J. Gonzáles, P. Moscato, "Optimización heurística y redes neuronales", Editorial Paraninfo S.A., España 1996.
- [4] Escobar, A. "Planeamento dinâmico de la expansión de sistemas de transmisión usando algoritmos combinatoriales", Dissertação de Mestrado, Faculdade de engenharia elétrica, Universidade Tecnológica de Pereira (Colômbia). 2002
- [5] Geoffrion, A.M. "Generalized Benders Decomposition" Journal of Optimization Theory and Applications. Vol. 10, 1972
- [6] Goldberg, D. E. Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, INC., 1989.
- [7] Goswami, S.K., "Distribution System Planning Using Branch Exchange Technique", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 12(2): 718-723. 1997
- [8] Kagan, N. "Electrical Distribution System Planning Using Multi objective and Fuzzy Mathematical Programming", PhD Thesis, University of London. 1992

- [9] Karmakar, N. "A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming", *Combinatorics*, No. 4, 1984.
- [10] Khator, S.R., Leung, L.C. "Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues", *IEEE Transactions on Power Systems*, USA, 12(3): 1151-1158. 1997
- [11] Laguna M., "Tabu Search Tutorial", *II escuela de Verano Latino – América de investigación operativa*. 1995
- [12] Monticelli, A.; Romero, R., "Tutorial on modern heuristic optimization techniques with application to power systems" *IEEE* 2002
- [13] Ponnavaikko *et al.*. Distribution System Planning Through a Quadratic Mixed Integer Programming Approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, USA, 2(4): 1157-1163. 1987
- [14] Proença, L.B. "Algoritmos Genéticos no Planejamento da Expansão de Distribuição de Energia Elétrica", *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal*. 1993
- [15] Reeves C. R., "Modern Heuristic techniques for combinational problems", *Library of congress Catalogin-in-publication Data*, England 1993,
- [16] Sun *et al.* "Optimal Distribution Substation and Primary Feeder Via the Fixed Charge Network Formulation", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 3: 602-609. 1982
- [17] Thompson, G. L., Wall, D.L. "A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Locations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 5 : 2683-2688. 1981
- [18] Baran, M. E., Wu, F. F., "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No.2, April 1989.



BIBLIOGRAFIA

- [19] Bäck, T., "Evolutionary Computation: Comments on the History and Current State", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1, No. 1, April 1997.
- [20] Bazaraa, M.S.; Sherali, H.D.; Shetty, C.M., "Nonlinear Programming – Theory and Algorithms", John Wiley & Sons, Second Edition.
- [21] Da Silva, et al, "Transmission Network Expansion Planning Under Tabu Search Approach", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 16(1): 62-68. 2001
- [22] Gallego, R; Romero, R.; Montecelli, A., "Tabu Search Algorithm for Network Synthesis", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 15(2): 490-495. 2000
- [23] Glover, F., "Tabu Search Fundamentals and Uses", University of Colorado, Boulder, Colorado, April 1995.
- [24] Glover, F.; Laguna, M., "Tabu Search", University of Colorado at Boulder, Kluwer Academic Publishers.
- [25] Gönen T., "Electric Power Distribution System Engineering", McGraw – Hill Series in Electrical Engineering, 1986
- [26] Siqueira, M. "Alocação ótima de subestações e alimentadores em sistemas de distribuição de energia elétrica usando um algoritmo de Branch and Bound", Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp 2002
- [27] Soares, W.C., "Algoritmo de Busca tabu Usado no Problema de alocação de Capacitores em Sistemas de Distribuição Radial", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp, 1999.





PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO UM ALGORITMO DE BUSCA TABU

FERNANDA A. RAZAN - JESSE R. S. MANTOVANI - RUBÉN ROMERO

Grupo de Pesquisa em Distribuição de Energia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de São Carlos, Universidade Estadual Paulista - UNESP,
São Carlos, SP, 13560-970, São Carlos, SP, Brasil

Palavras-chave: Planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica

Resumo: Com o aumento rápido do custo da energia elétrica, o planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica tornou-se um problema de grande importância para as empresas distribuidoras de energia elétrica. Este trabalho trata-se de um trabalho de pesquisa em andamento, cujo objetivo é desenvolver um algoritmo de busca tabu para a solução do problema de planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. O algoritmo proposto é baseado no algoritmo de busca tabu (BT) e no algoritmo de busca tabu com memória (BTM). O algoritmo proposto é aplicado ao problema de planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica de uma empresa distribuidora de energia elétrica.

APENDICE I

Abstract: Considering the fact that the cost of the electric energy is increasing rapidly, the distribution system expansion has been becoming a problem of great importance for the electric distribution companies. This work is a research in progress, whose objective is to develop a tabu search algorithm for the solution of the distribution system expansion problem. The proposed algorithm is based on the tabu search (TS) and the tabu search with memory (TSM) algorithms. The proposed algorithm is applied to the distribution system expansion problem of an electric utility company.

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA

Keywords: Distribution system expansion, tabu search, tabu search with memory, distribution system expansion

CBA 2002

Introdução

O planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica é um problema de grande importância para as empresas distribuidoras de energia elétrica. Este trabalho trata-se de um trabalho de pesquisa em andamento, cujo objetivo é desenvolver um algoritmo de busca tabu para a solução do problema de planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. O algoritmo proposto é baseado no algoritmo de busca tabu (BT) e no algoritmo de busca tabu com memória (BTM). O algoritmo proposto é aplicado ao problema de planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica de uma empresa distribuidora de energia elétrica.

Introdução
O planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica é um problema de grande importância para as empresas distribuidoras de energia elétrica. Este trabalho trata-se de um trabalho de pesquisa em andamento, cujo objetivo é desenvolver um algoritmo de busca tabu para a solução do problema de planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica.

O planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica é um problema de grande importância para as empresas distribuidoras de energia elétrica. Este trabalho trata-se de um trabalho de pesquisa em andamento, cujo objetivo é desenvolver um algoritmo de busca tabu para a solução do problema de planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. O algoritmo proposto é baseado no algoritmo de busca tabu (BT) e no algoritmo de busca tabu com memória (BTM). O algoritmo proposto é aplicado ao problema de planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica de uma empresa distribuidora de energia elétrica.





PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO UM ALGORITMO DE BUSCA TABU

FERNANDO A. BAZAN JOSE R. S. MANTOVANI RUBÉN ROMERO

Grupo de Pesquisas em Distribuição de Energia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista – UNESP.
Caixa Postal 31, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

E-mails: fernando@dee.feis.unesp.br, mant@dee.feis.unesp.br, ruben@dee.feis.unesp.br

Resumo – Com o aumento rápido do consumo de energia elétrica, o planejamento da expansão de sistemas de Distribuição de Energia Elétrica tem-se revelado um problema de grande importância para as empresas distribuidoras de energia elétrica, apresentando também relevante interesse sob o aspecto da pesquisa na área da otimização de sistemas. Neste trabalho formula-se o planejamento da expansão de sistemas de distribuição como um problema de otimização não linear, considerando uma função objetivo que reflete os custos de operação e investimentos com a instalação de novos equipamentos, e o conjunto de restrições relacionados com as equações que fornecem as condições de operação da rede. A técnica de solução proposta para este problema é um algoritmo de Busca Tabu (BT). Apresentam-se resultados obtidos com as simulações utilizando dois Sistemas de Distribuição, um com 10 barras e 3 subestações e outro com 54 barras e 4 subestações. Considerou-se um horizonte de planejamento em três estágios e dois estágios respectivamente.

Abstract – Considering the fast increase of the electric power consumption, the expansion planning of the distribution electrical systems has been revealing a problem of great importance for the electrical distribution companies. This problem also presents important interest in systems optimization research area. In this work, the distribution expansion planning is formulated as a non linear optimization problem, considering an objective function that shows the operation costs and investments with the installation of new equipment, and the constraints set related with the equations that supply the network operation conditions. The solution technique proposed is the tabu search (TS). There are presented results with simulations using two distributions systems, one with 10 nodes and three substations, and the other with 54 nodes and 4 substations. It was considered a three stages horizon planning and two stages respectively.

Keywords : Distribution networks, Losses optimization, Optimal search techniques, Combinatorial optimization .

1. Introdução

O planejamento da expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica é um problema relevante e de grande importância para as empresas distribuidoras de Energia Elétrica tanto nos aspectos técnicos como econômico. Sob o aspecto da pesquisa operacional, trata-se de um problema de programação matemática de grande porte envolvendo variáveis reais e inteiras, que permite o estudo e a proposição de diversas técnicas de otimização para sua solução. Para solução do problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica (PDEE) são propostas na literatura técnicas heurísticas e técnicas de otimização clássica e combinatória. Na linha de solução utilizando otimização clássica são propostas técnicas de programação inteira mista tipo branch-and-bound, programação quadrática inteira mista (PQIM), algoritmos baseados na solução de problema de transporte e programação dinâmica. Na linha de pesquisa que propõe a solução através de algoritmos combinatórios tem-se o algoritmo genético (AG).

Ponnavaikko *et al.* (1987), formulam a expansão de sistemas de distribuição como um problema de programação quadrático inteiro misto (PQIM), resolvendo-o em dois estágios. Na segunda etapa do processo de solução é utilizado

um procedimento heurístico para considerar a natureza das variáveis binárias envolvidas na formulação do problema (*construir* ou *não construir* subestações, novos alimentadores, etc). Sun *et al.* (1982) propõem para um horizonte de planejamento de longo prazo para alimentadores primários e subestações de distribuição, uma técnica de solução baseada no modelo de transportes e algoritmo do tipo branch-and-bound. O procedimento de planejamento é baseado num processo de otimização por concatenação, não se obtendo necessariamente a solução ótima. Kagan (1992) inclui na formulação do planejamento da expansão de redes de distribuição aspectos referentes às incertezas das cargas e além dos objetivos relacionados com o custo operacional e da expansão, normalmente tratados, outros objetivos tais como considerações sob aspectos ambientais da região física em que está localizado o sistema são levados em conta, custos referentes ao financiamento do investimento da expansão da rede, etc. Thompson e Wall (1981), formulam o planejamento da distribuição como um modelo de transportes e utilizam a técnica de branch-and-bound para resolver o problema de alocação ótima de subestações. Os custos fixos decorrentes da alocação de novas subestações são considerados e utilizam uma função linearizada por partes dos custos dos alimentadores. Uma proposta heurística





construtiva interessante é sugerida por Goswami (1997). Nessa proposta, inicialmente são geradas topologias radiais usando todas as subestações candidatas. Posteriormente, essa topologia encontrada é otimizada usando a técnica de troca de ramos, entre ramos de uma mesma zona e entre ramos que ligam duas subestações. Esse processo de troca de ramos é realizado até encontrar um ótimo local. Na linha de pesquisa envolvendo os métodos de otimização combinatória para solução do problema de planejamento da distribuição, o algoritmo genético (AG), foi proposto por Ramirez-Rosado e Bernal-Agustín (1998) e Proença (1993). O algoritmo genético visa resolver em cada estágio o problema de planejamento considerando um horizonte pré-estabelecido e permite incorporar na modelagem diferentes tipos de sofisticções, sempre com o aumento do custo computacional.

Os requisitos básicos necessários para um sistema de distribuição são *Segurança, Economia e Qualidade de serviço*. Neste trabalho, com bases nestes requisitos, apresenta-se uma formulação matemática genérica do problema de expansão de Redes de Distribuição de Energia Elétrica (Khator e Leung (1997)), que é um modelo de programação não linear com variáveis reais e binárias. A técnica de solução proposta para este modelo é um algoritmo de Busca Tabu (TS) (Gallego et. al. (2000)); que é uma técnica de otimização combinatória, que tem suas origens nos conceitos de inteligência artificial (IA), e tem sido aplicada em diversas áreas de engenharia. Aplicando-se a técnica TS a este problema, procura-se a(s) melhor(es) configuração(ões) de um conjunto de propostas de solução para cumprir os objetivos fundamentais do problema. Apresentam-se resultados obtidos com as simulações utilizando dois Sistema de Distribuição, um com 10 barras e 1 subestação existente e 2 a ser construída, e outro com 54 barras, duas subestações existentes e duas potenciais. Considerou-se três horizontes de planejamento.

2. Formulação do Problema

Matematicamente o planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser formulado como um problema de otimização não linear inteiro misto (PNLIM) de grande porte, genericamente escrito como:

Minimizar [*Custos de investimentos* (construção de novas subestações e alimentadores,

recondutoramento, etc) + *Custos de Operação* (fluxo nas linhas)]

Sujeito a:

- *Atendimento da Demanda* (Leis de Kirchhoff).
- *Qualidade do Serviço Oferecido* (Queda de tensão máxima permitida nos alimentadores, presença de harmônicos, desvios de frequência, assimetria do sistema trifásico e outros tipos de problemas na rede).
- *Restrições Físicas de Operação dos Equipamentos Instalados e a Instalar no Sistema* (Capacidade das subestações, Máximo fluxo de potência permitido nos alimentadores).
- *Restrições Lógicas* (Manter radialidade do sistema).
- *Impacto ambiental*.

3. Técnica de Solução

A pesquisa proposta neste plano enfoca a solução do problema da expansão, utilizando-se um algoritmo de busca tabu que pertence à categoria dos algoritmos de otimização combinatória.

O algoritmo Tabu Search Básico (TSB) parte de uma solução inicial e com uma vizinhança claramente especificada. Assim, conhecida uma solução inicial e o conjunto de vizinhos dessa solução, o algoritmo TSB identifica a solução vizinha de melhor qualidade e o processo passa para essa nova solução. Entretanto, para evitar voltar a uma solução já analisada o algoritmo TSB armazena em uma lista o atributo que foi usado no processo de transição. Um atributo proibido evita que se volte a uma solução já analisada, mas também não permite que se visite outras soluções que compartilham atributos proibidos de soluções já visitadas. Este problema é contornado usando um critério de aspiração que elimina a proibição sempre que uma solução candidata, que pode ser obtida acionando um atributo proibido, seja de boa qualidade. A proibição de um atributo é eliminada após um número especificado de transições que geralmente é pequeno, isto é, a estratégia usa informação de memória de curto prazo. No problema analisado são atributos os alimentadores e as subestações. O processo TSB termina após um número especificado de transições.

Na Fig. 1 encontra-se o diagrama de blocos do algoritmo TSB implementado neste trabalho para o planejamento da expansão de sistemas de distribuição. A seguir são detalhados os principais passos ilustrados neste diagrama.





Figura 1. Diagrama de blocos do TS para o problema de planejamento.

3.1 Função objetivo

O custo é uma das partes mais importantes no PDEE, assim procura-se o mínimo custo na construção de subestações e alimentadores do sistema de distribuição, considerando-se custos de investimento na construção de novos alimentadores e subestações (custos fixos) e custos de operação da rede (custos variáveis). O custo total é fornecido para cada configuração corrente no modelo de Busca Tabu. Dessa forma, a função objetivo no algoritmo implementado é calculada como:

$$FO = \sum \{ \sum \text{Custos fixos} + \sum \text{Custos variáveis} \}$$

A função objetivo avalia para cada configuração radial o custo total de investimento e de operação do sistema analisado. Os custos fixos são dados pelos custos de construção das linhas e subestações, e os custos variáveis pelos custos de operação das linhas multiplicados pelos valores de seus fluxos de potência.

A confiabilidade da rede está representada na continuidade do serviço de fornecimento de

energia, ou seja que cada ponto de consumo não fique sem suprimento de energia e esteja conectado a alguma fonte de suprimento. Este aspecto está garantido através do algoritmo que garante a radialidade da rede e o não ilhamento das barras.

3.2 Fluxo de Carga

O método de cálculo de fluxo de carga em redes de distribuição radiais baseado num equivalente elétrico e na eliminação do ângulo de fase da tensão nas equações a serem resolvidas, foi implementado neste trabalho (Cespedes, (1990)). Trata-se de um método eficiente e simples para a solução exata do fluxo de carga em redes radiais de média tensão. Este método, conhecido como soma de potências permite a determinação da magnitude de tensão em qualquer nó da rede, sendo possível calcular a magnitude de tensão remanescente no alimentador, especificado um nó. Aplica-se tanto a sistemas monofásicos como trifásicos. Para aplicação deste método utilizou-se um algoritmo de ordenação e numeração dos nós do sistema de distribuição.

O algoritmo de fluxo de carga implementado consiste basicamente dos seguintes passos:

- Leitura dos dados do sistema: nó inicial, nó final, resistência, reatância, potência ativa, e potência reativa. Tensão no nó fonte (source voltage).
- Assumir a magnitude da tensão para cada nó (para a primeira iteração assumir para todas as barras, tensão igual à barra fonte).
- Passo Upstream*, desde o nó final até o nó fonte, encontre valores aproximados das potências verdadeiras para cada barra, nestas potências estão incluídas as potências de cada barra que estão a jusante da barra analisada, assim como as perdas totais acumuladas até essa barra, e também a potência da barra.
- Passo Downstream*, desde o nó fonte até os nós finais, usando a equação fundamental Cespedes (1990), calcular valores aproximados das tensões de cada barra.
- Com as novas tensões, calcular novamente as perdas e as novas potências de cada barra. Comparar as novas perdas totais com as perdas da iteração anterior. Se o valor da diferença entre elas for maior do que a tolerância para convergência, volte ao passo três.

3.3 Codificação

A codificação usada para o problema foi um arranjo vetorial que indica quais os alimentadores estão operando (1) ou não (0) assim como as correspondentes subestações. Esta forma de codificação está ilustrada na Figura 2. Neste sistema de codificação adota-se uma notação matricial que permite identificar as ligações das linhas às subestações.

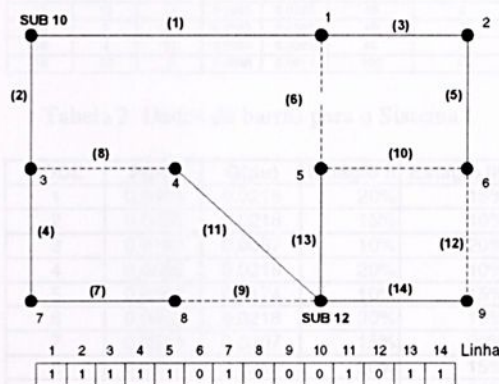


Figura 2. Ilustração do esquema de codificação.

3.4 Estrutura de Vizinhança

O algoritmo é inicializado com uma configuração radial inicial. Esta configuração é composta pelos ramos do sistema que fornecem uma configuração radial, sendo formada por uma ou mais árvores. A raiz de cada árvore é o nó da subestação. A configuração radial inicial, deve possuir todos os nós de consumo ligados, mas não é necessário que seja de boa qualidade.

A estrutura de vizinhança é determinada através de uma técnica heurística conhecida como "branch exchange technique", proposta por Goswami(1997), sendo executada da seguinte forma:

- Seja uma topologia radial qualquer da rede de distribuição e inclua um dos alimentadores que não está ligado na configuração inicial. Devido a inclusão deste alimentador a configuração resultante pode ser radial ou perder a radialidade, tornando-se infactível.
- Se a nova configuração for infactível deve-se desligar um outro alimentador que faça a configuração vizinha factível ou seja radial.
- Neste critério, tem-se dois tipos de troca de linhas:

Intrazona : quando a troca de linhas é dentro de uma área servida por uma subestação de distribuição;

Interzona : quando a troca de linhas é realizado entre áreas servidas por subestações adjacentes.

Uma maneira de avaliar que uma configuração não seja radial é observar que os nós conectados a uma subestação não devem estar presentes em outra subestação (Interzona) ou verificar que um nó não se repita duas vezes em uma configuração da mesma subestação (Intrazona).

3.5 Lista Tabu

A **Lista Tabu** é implementada com o objetivo de prevenir ciclos e evitar visitar configurações já visitadas. Assim, quando uma configuração é construída, os atributos usados para encontrar essa topologia são colocados na lista tabu. Portanto, o movimento reverso desses atributos permanece proibido durante um número especificado de iterações. Esta lista é armazenada na parte superior de uma matriz quadrada de dimensão igual ao número de linhas do sistema, e são armazenados os atributos de cada transição.

O critério de aspiração usado é o tradicional, ou seja, quando a função objetivo de uma configuração cujo atributo encontra-se na lista tabu é de boa qualidade ela é avaliada e seu valor é penalizado. Se ela mesmo com a penalização manter-se de boa qualidade passa a ser a nova solução corrente.

3.6 Critério de parada

O critério de parada determina que se a solução incumbente não apresenta melhoria durante um número especificado de iterações, deve-se parar o processo iterativo.

4. Testes e Resultados

O algoritmo para a solução do problema de planejamento da expansão proposto neste trabalho foi implementado em linguagem de programação de alto nível e foram realizados testes com o programa desenvolvido utilizando-se dois sistemas testes. Considerou-se um horizonte de planejamento em três estágios para o primeiro sistema e dois estágios para o segundo.

4.1 Sistema I

O sistema é composto por 3 alimentadores existentes (linhas contínuas), 13 alimentadores potenciais (linhas pontilhadas), uma subestação existente (SUB 20) e uma subestação futura (SUB21). O nó 11 continua com igual carga no segundo estágio e é convertido em subestação no terceiro estágio.



Tabela 1. Dados de linhas para o Sistema I

RAMO	NOF	NOI	R(pu)	X(pu)	CF(Unid/lin)	CV(Unid/MVA)
1	1	10	0.0570	0.0730	0	8
2	3	10	0.0570	0.0730	0	8
3	2	1	0.0285	0.0365	0	4
4	7	3	0.0285	0.0365	40	4
5	6	2	0.0570	0.0730	80	8
6	5	11	0.0285	0.0365	40	4
7	7	8	0.0285	0.0365	40	4
8	3	4	0.0285	0.0365	40	4
9	8	12	0.0285	0.0365	40	4
10	11	6	0.0285	0.0365	40	4
11	1	5	0.0285	0.0365	40	4
12	6	9	0.0285	0.0365	40	4
13	12	11	0.0285	0.0365	40	4
14	9	12	0.0285	0.0365	40	4
15	4	11	0.0285	0.0365	40	4
16	10	5	0.0635	0.0814	100	10

Tabela 2. Dados de barras para o Sistema I

NODE	P(pu)	Q(pu)	Estagio II	Estagio III
1	0.0450	0.0218	20%	15%
2	0.0450	0.0218	15%	10%
3	0.0180	0.0087	10%	20%
4	0.0450	0.0218	20%	10%
5	0.0360	0.0174	10%	15%
6	0.0450	0.0218	30%	10%
7	0.0540	0.0397	15%	20%
8	0.0450	0.0218	20%	15%
9	0.0450	0.0218	15%	20%
11	0.0450	0.0218	0%	---

SUB	MVA	Costo
10	30	0
12	30	1500
11	30	1500

Os resultados encontrados para este sistema encontram-se na Fig. 4, onde estão representadas as melhores topologias encontradas para cada estágio de planejamento com os respectivos valores de custos.

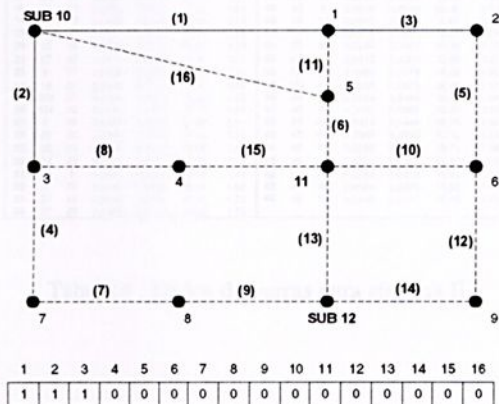
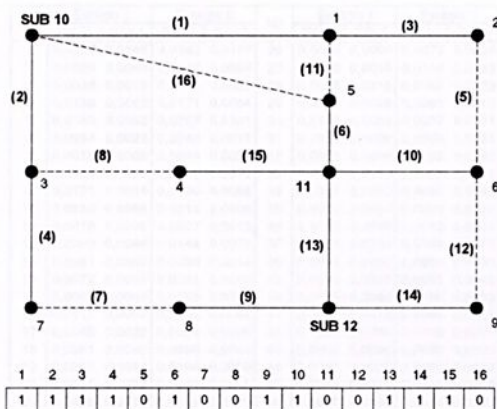
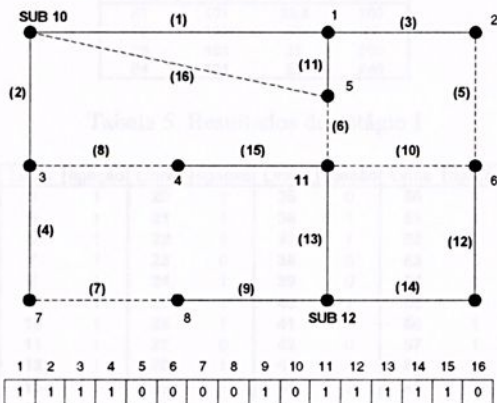


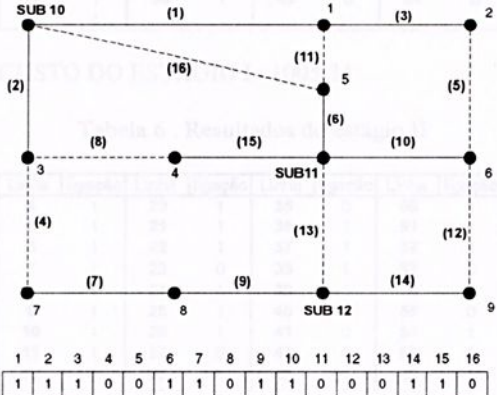
Figura 3. Configuração existente



ESTÁGIO I
CUSTO : 2149.9



ESTÁGIO II
CUSTO : 2229.1



ESTÁGIO III
CUSTO : 3597.9

Figura 4. Configuração final para cada estágio de planejamento - Sistema II



4.1 Sistema II

O sistema é composto por 16 alimentadores existentes (linhas contínuas), 45 alimentadores potenciais (linhas pontilhadas), duas subestações existentes (S1 e S2) e duas subestações futuras (S3 e S4).

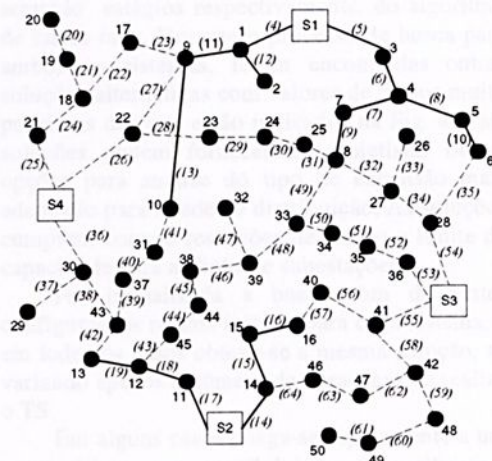


Figura 5. Configuração existente e potencial do sistema II

Tabela 3. Dados de linhas para o Sistema II

Linha	NCF	NCA	R(km)	X(km)	Offshore (s)	Custo (MVA)	Linha	NCF	NCA	R(km)	X(km)	Offshore (s)	Custo (MVA)
4	101	1	0,0285	0,041	14,05	1,41	38	5	28	0,0285	0,0598	25,00	2,50
5	101	3	0,0221	0,0497	10,90	1,09	38	104	30	0,0221	0,0395	14,05	1,41
6	3	4	0,0315	0,0711	15,50	1,55	37	30	29	0,0315	0,0373	15,50	1,55
7	4	7	0,0254	0,0670	12,50	1,25	38	30	43	0,0254	0,0486	20,30	2,03
8	4	5	0,0315	0,0711	15,50	1,55	38	43	37	0,0315	0,0299	12,50	1,25
9	7	8	0,0315	0,0711	15,50	1,55	40	37	31	0,0315	0,0224	9,35	0,94
10	5	9	0,0254	0,0670	12,50	1,25	41	31	10	0,0254	0,0373	15,50	1,55
11	1	9	0,0348	0,0792	17,15	1,72	42	13	43	0,0348	0,0449	18,75	1,88
12	1	2	0,0315	0,0711	15,50	1,55	43	12	45	0,0315	0,0299	12,50	1,25
13	9	10	0,0728	0,1637	35,90	3,59	44	45	44	0,0728	0,0261	10,90	1,09
14	102	14	0,0390	0,0855	18,75	1,88	45	44	38	0,0390	0,0373	15,50	1,55
15	14	15	0,0390	0,0855	18,75	1,88	46	38	39	0,0390	0,0411	17,15	1,72
16	15	16	0,0285	0,0641	14,05	1,41	47	39	32	0,0285	0,0486	20,30	2,03
17	102	11	0,0285	0,0641	14,05	1,41	48	39	33	0,0285	0,0395	14,05	1,41
18	11	12	0,0315	0,0711	15,50	1,55	49	33	8	0,0315	0,0560	29,40	2,94
19	12	13	0,0443	0,0996	21,85	2,19	50	33	34	0,0443	0,0224	9,35	0,94
20	19	20	0,0315	0,0711	15,50	1,55	51	34	35	0,0315	0,0261	10,90	1,09
21	18	19	0,0254	0,0670	12,50	1,25	52	35	36	0,0254	0,0251	10,90	1,09
22	17	18	0,0412	0,0925	20,30	2,03	53	103	35	0,0412	0,0299	12,50	1,25
23	9	17	0,0436	0,0960	21,50	2,15	54	103	28	0,0436	0,0373	15,50	1,55
24	18	21	0,0315	0,0711	15,50	1,55	55	103	41	0,0315	0,0373	15,50	1,55
25	104	21	0,0254	0,0670	12,50	1,25	56	41	40	0,0254	0,0449	18,75	1,88
26	104	22	0,0390	0,0855	18,75	1,88	57	40	16	0,0390	0,0299	12,50	1,25
27	9	22	0,0475	0,1057	23,40	2,34	58	41	42	0,0475	0,0449	18,75	1,88
28	22	23	0,0348	0,0792	17,15	1,72	59	42	48	0,0348	0,0299	12,50	1,25
29	23	24	0,0285	0,0641	14,05	1,41	60	48	49	0,0285	0,0449	18,75	1,88
30	24	25	0,0221	0,0497	10,90	1,09	61	49	50	0,0221	0,0261	10,90	1,09
31	25	8	0,0285	0,0641	14,05	1,41	62	42	47	0,0285	0,0373	15,50	1,55
32	8	27	0,0390	0,0855	18,75	1,88	63	47	46	0,0390	0,0373	15,50	1,55
33	27	26	0,0348	0,0792	17,15	1,72	64	46	14	0,0348	0,0411	17,15	1,72
34	27	28	0,0315	0,0711	15,50	1,55							

Tabela 4. Dados de barras para sistema II

Nó	Estágio I		Estágio II		Nó	Estágio I		Estágio II	
	P(pu)	Q(pu)	P(pu)	Q(pu)		P(pu)	Q(pu)	P(pu)	Q(pu)
1	0,0297	0,0145	0,0342	0,0167	26	0,0000	0,0000	0,0072	0,0035
2	0,0099	0,0048	0,0117	0,0057	27	0,0000	0,0000	0,0108	0,0053
3	0,0036	0,0018	0,0045	0,0022	28	0,0036	0,0018	0,0045	0,0022
4	0,0126	0,0062	0,0171	0,0084	29	0,0054	0,0026	0,0081	0,0040
5	0,0180	0,0088	0,0207	0,0101	30	0,0180	0,0088	0,0207	0,0101
6	0,0054	0,0026	0,0063	0,0031	31	0,0054	0,0026	0,0063	0,0031
7	0,0018	0,0009	0,0045	0,0022	32	0,0000	0,0000	0,0135	0,0066
8	0,0135	0,0066	0,0153	0,0075	33	0,0162	0,0079	0,0207	0,0101
9	0,0171	0,0084	0,0180	0,0088	34	0,0081	0,0040	0,0090	0,0044
10	0,0180	0,0088	0,0216	0,0106	35	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	0,0018	0,0009	0,0027	0,0013	36	0,0018	0,0009	0,0018	0,0009
12	0,0090	0,0044	0,0144	0,0070	37	0,0090	0,0044	0,0144	0,0070
13	0,0081	0,0040	0,0090	0,0044	38	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
14	0,0072	0,0035	0,0081	0,0040	39	0,0072	0,0035	0,0081	0,0040
15	0,0090	0,0044	0,0108	0,0053	40	0,0090	0,0044	0,0108	0,0053
16	0,0117	0,0057	0,0135	0,0066	41	0,0027	0,0013	0,0045	0,0022
17	0,0045	0,0022	0,0054	0,0026	42	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18	0,0081	0,0040	0,0090	0,0044	43	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19	0,0090	0,0044	0,0108	0,0053	44	0,0045	0,0022	0,0090	0,0044
20	0,0045	0,0022	0,0063	0,0031	45	0,0045	0,0022	0,0045	0,0022
21	0,0045	0,0022	0,0144	0,0070	46	0,0000	0,0000	0,0144	0,0070
22	0,0045	0,0022	0,0090	0,0044	47	0,0045	0,0022	0,0045	0,0022
23	0,0045	0,0022	0,0081	0,0040	48	0,0045	0,0022	0,0054	0,0026
24	0,0045	0,0022	0,0036	0,0018	49	0,0000	0,0000	0,0054	0,0026
25	0,0054	0,0026	0,0072	0,0035	50	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Nome	node	MVA	Custo
S1	101	33,4	100
S2	102	33	80
S3	103	22	200
S4	104	22	240

Tabela 5. Resultados do estágio I

Linha	ligação	Linha	ligação	Linha	ligação	Linha	ligação
4	1	20	1	35	0	50	1
5	1	21	1	36	1	51	1
6	1	22	1	37	1	52	1
7	1	23	0	38	0	53	0
8	1	24	1	39	0	54	0
9	1	25	1	40	1	55	0
10	1	26	1	41	1	56	1
11	1	27	0	42	0	57	1
12	1	28	1	43	1	58	1
13	1	29	1	44	1	59	1
14	1	30	1	45	1	60	0
15	1	31	0	46	1	61	0
16	1	32	1	47	0	62	1
17	1	33	0	48	1	63	0
18	1	34	1	49	0	64	0
19	1						

CUSTO DO ESTÁGIO I : 1005,34

Tabela 6. Resultados do estágio II

Linha	ligação	Linha	ligação	Linha	ligação	Linha	ligação
4	1	20	1	35	0	50	1
5	1	21	1	36	1	51	1
6	1	22	1	37	1	52	1
7	1	23	0	38	1	53	0
8	1	24	1	39	1	54	0
9	1	25	1	40	1	55	0
10	1	26	1	41	0	56	1
11	1	27	0	42	0	57	1
12	1	28	1	43	1	58	1
13	1	29	1	44	1	59	1
14	1	30	1	45	1	60	1
15	1	31	0	46	1	61	0
16	1	32	1	47	1	62	0
17	1	33	1	48	1	63	1
18	1	34	1	49	0	64	1
19	1						

CUSTO DO ESTÁGIO II : 1138,15



4.2 Comentários dos testes

Em todos os testes realizados o algoritmo encontrou soluções de boa qualidade, convergindo em 8, 7, 8, iterações para o sistema I no primeiro, segundo e terceiro estágios respectivamente, e 12, 11, iterações para sistema II, no primeiro e segundo estágios respectivamente, do algoritmo de busca tabu. Durante o processo de busca para ambos os sistemas, foram encontradas outras soluções alternativas com valores de custos muito próximos dos que estão indicados na Fig. 4. Tais soluções podem fornecer ao projetistas outras opções para análise do tipo de expansão mais adequado para a rede de distribuição. As soluções cumprem com as restrições de tensão e limite de capacidade para as linhas e subestações.

Foi inicializada a busca com diferentes configurações radiais iniciais para cada sistema, e em todos os casos obteve-se a mesma solução, só variando apenas o número de iterações que realiza o TS.

Em alguns casos chega-se rapidamente a um ponto ótimo, sem possibilidades de melhorar a solução incumbente (provável ótimo)

O tempo empregado para a solução de cada sistema e para cada estágio variou de 2 a 4 minutos, utilizando-se um computador com processador pentium IV

5. Conclusões

Neste trabalho foi proposta uma formulação que considera as alternativas de construções de linhas e subestações em sistemas de distribuição. A técnica de solução propostas para resolver este problema de programação não-linear inteiro misto do tipo binário (0/1), foi através de algoritmo de busca tabu. A metodologia proposta é flexível, aplicada para análise e estudos de planejamento de alguns sistemas de distribuição e forneceu como resultado um conjunto de soluções alternativas juntamente com a melhor solução para o problema.

A principal vantagem da utilização desta técnica para resolver o problema de planejamento está na facilidade de se trabalhar com um modelo não linear do problema e incorporar à formulação modelos reais de componentes dos sistemas. A técnica de fluxo de carga utilizada mostrou-se eficiente, segura e adequada para a solução deste tipo de problema.

Os resultados obtidos através das simulações dos sistemas encontrados na literatura (Proença (1993)) comprovam a eficiência da metodologia desenvolvida e implementada.

Agradecimentos

Agradecemos à CAPES pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Cespedes, R.(1990). "New Method for the Analysis of Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, USA, 5(1):391-396.
- Da Silva et al. (2001). "Transmission Network Expansion Planning Under Tabu Search Approach", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 16(1):62-68.
- Gallego et al. (2000) "Tabu Search Algorithm for Network Synthesis", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 15(2):490-495.
- Goswami, S.K. (1997). "Distribution System Planning Using Branch Exchange Technique", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 12(2):718-723.
- Kagan, N. (1992) "Electrical Distribution System Planning Using Multiobjective and Fuzzy Mathematical Programming", PhD Thesis, University of London.
- Khator, S.R., Leung, L.C.(1997) "Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 12(3):1151-1158.
- Ponnavaikko *et al.* (1987). Distribution System Planning Through a Quadratic Mixed Integer Programming Approach, IEEE Transactions on Power Delivery, USA, 2(4):1157-1163.
- Proença, L.B.(1993). "Algoritmos Genéticos no Planeamento da Expansão de Distribuição de Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Ramirez Rosado, I.J., Bernal Agustín, J.L.(1998). "Genetic Algorithm Applied to the Design of Large Power Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 13(2):696-703.
- Sun *et al.* (1982) "Optimal Distribution Substation and Primary Feeder Via teh Fixed Charge Network Formilation", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 3 : 602-609
- Thompson, G. L., Wall, D.L.(1981) "A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Locations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 5 : 2683-2688



EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO BUSCA TABU

A. Iltis, J. R. S. Mantovani e R. A. Romero - UNIFEI/UNESP

Resumo - Este trabalho apresenta uma metodologia para a expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica.

APENDICE II

XV SEMINARIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

SENDI 2002

26 a 29 de Novembro de 2002

Salvador / Bahia - Brasil

1. INTRODUÇÃO

A expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica é um problema de grande importância para as empresas fornecedoras de energia elétrica, pois os aspectos técnicos, como confiabilidade, segurança, qualidade operacional, entre outros, são fundamentais para a expansão de um sistema. Este trabalho apresenta uma metodologia para a expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica, considerando os aspectos técnicos, como confiabilidade, segurança, qualidade operacional, entre outros, são fundamentais para a expansão de um sistema.

Cheng e Wei [1], formulam o planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica como um modelo de programação e utilizam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Este trabalho apresenta uma metodologia para a expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema técnico de planejamento de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica é a maximização do custo total de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica, considerando os aspectos técnicos, como confiabilidade, segurança, qualidade operacional, entre outros, são fundamentais para a expansão de um sistema.

Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores usam a técnica de busca tabu para resolver o problema de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica.

EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO BUSCA TABU

A. Bazan, J. R. S. Mantovani e R. A. Romero – DEE/FEIS/UNESP

E-mail : fernando@dee.feis.unesp.br, mant@dee.feis.unesp.br, ruben@dee.feis.unesp.br.

Palavras-chave - Redes de distribuição, otimização de perdas, técnicas de busca ótima, otimização combinatória.

Resumo - O planejamento da expansão de sistemas de Distribuição de Energia Elétrica tem-se revelado um problema de grande importância para as empresas distribuidoras de energia elétrica. O problema do planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) consiste em minimizar o custo total da expansão do sistema, que compreende a construção de linhas, subestações e a mudança da bitola de alimentadores existentes (recondutoramento).

Os principais aspectos técnicos e econômicos envolvidos no planejamento da expansão de SDEE são: economia, confiabilidade, segurança e qualidade de serviço.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para solução do problema de expansão de redes de distribuição, usando um modelo de otimização não linear que considera uma função objetivo que minimiza os custos de expansão e todas as restrições necessárias para representar realisticamente o sistema. A técnica de solução proposta para este problema é um algoritmo de Busca Tabu (BT).

1. INTRODUÇÃO

O planejamento da expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (PDEE) é um problema relevante e de grande importância para as empresas distribuidoras de Energia Elétrica tanto nos aspectos técnicos como econômico. Sob o aspecto da pesquisa operacional, trata-se de um problema de programação matemática de grande porte envolvendo variáveis reais e inteiras, que permite o estudo e a proposição de diversas técnicas de otimização para sua solução. Para solução do problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica são propostas na literatura técnicas heurísticas e técnicas de otimização clássica e combinatória.

Thompson e Wall [13], formulam o planejamento da distribuição como um modelo de transportes e utilizam a técnica de branch-and-bound para resolver o problema de alocação ótima de subestações. Os custos fixos decorrentes da alocação de novas subestações são considerados e utilizam uma função linearizada por partes dos custos dos alimentadores. Uma proposta heurística construtiva interessante é sugerida por Goswami [5]. Nessa proposta, inicialmente são geradas topologias radiais usando todas as subestações candidatas. Posteriormente, essa topologia encontrada é otimizada usando a técnica de troca de ramos, entre ramos de uma

mesma zona e entre ramos que ligam duas subestações. Esse processo de troca de ramos é realizado até encontrar um ótimo local. Na linha de pesquisa envolvendo os métodos de otimização combinatória para solução do problema de planejamento da distribuição, o algoritmo genético (AG), foi proposto por Ramirez-Rosado e Bernal-Agustín [11] e Proença [10]. O algoritmo genético visa resolver em cada estágio o problema de planejamento considerando um horizonte pré-estabelecido e permite incorporar na modelagem do problema diferentes tipos de sofisticções, sempre com o aumento do custo computacional.

Os requisitos básicos necessários para um sistema de distribuição são: segurança, economia e qualidade de serviço. Neste trabalho, com bases nestes requisitos, apresenta-se uma formulação matemática genérica do problema de expansão de Redes de Distribuição de Energia Elétrica [7], que é um modelo de programação não linear com variáveis reais e binárias. A técnica de solução proposta para este modelo é um algoritmo de Busca Tabu (BT) [3]; que é uma técnica de otimização combinatória, que tem suas origens nos conceitos de inteligência artificial (IA), e tem sido aplicada em diversas áreas de engenharia. Aplicando-se a técnica BT a este problema, procuram-se a(s) melhor(es) configuração(ões) de um conjunto de propostas de solução para cumprir os objetivos fundamentais do problema. Apresentam-se resultados obtidos com as simulações utilizando dois Sistemas de Distribuição, um com 10 barras e 1 subestação existente e outra projetada; e um sistema com 54 barras e 2 subestações existentes e 2 potenciais. Consideram-se três horizontes de planejamento para ambos sistemas.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema básico de planejamento da expansão de sistemas de distribuição elétrica é a minimização do custo totais da expansão do sistema, basicamente a construção de linhas, subestações e a mudança da bitola de alimentadores existentes (recondutoramento).

Os principais aspectos técnico-econômicos envolvidos no planejamento da expansão de SDEE são os seguintes:

- Economia : Minimizar os Custos de Investimentos e Custos de Operação
- Confiabilidade : Maximizar a flexibilidade do sistema, para garantir sua confiabilidade.
- Segurança

- Qualidade de serviço :Este aspecto está relacionado com a confiabilidade do sistema.

Também pode-se mencionar outros fatores importantes de qualidade como:

- Impacto ambiental;
- Desvios de frequência;
- Assimetria do sistema trifásico;
- Presença de harmônicos e outros tipos de problemas para a rede.

O planejamento de sistemas de distribuição pode ser genericamente estabelecido da seguinte forma :

Suponha que exista uma rede de distribuição de energia elétrica atendendo um número fixo de consumidores (nós de consumo) e uma subestação fornecendo a energia requerida para satisfazer a demanda desses consumidores. A carga desse sistema não é estática e aumentará com o tempo. O crescimento da carga impõe a necessidade da expansão da rede: construção de novos alimentadores, subestações e troca de bitola de alimentadores existentes. O custo relacionado com estes investimentos e o custo de operação da rede satisfazendo as restrições do problema constituem o problema de planejamento.

O planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser formulado genericamente como:

Minimizar [Custos de investimentos (construção de novas subestações e alimentadores, recondutoramento, etc) + Custos de Operação (fluxo nas linhas)]

Sujeito a:

- Atendimento da Demanda (Leis de Kirchhoff).
- Qualidade do Serviço Oferecido (Queda de tensão máxima permitida nos alimentadores, presença de harmônicos, desvios de frequência, assimetria do sistema trifásico, e outros tipos de problemas na rede).
- Restrições Físicas de Operação dos Equipamentos Instalados e a Instalar no Sistema (Capacidade das subestações, Máxima fluxo de potência permitido nos alimentadores).
- Restrições Lógicas (Manter radialidade do sistema).
- Impacto ambiental.

3. TÉCNICAS DE SOLUÇÃO

A pesquisa desenvolvida e apresentada neste trabalho enfoca a solução do problema da expansão, utilizando-se um algoritmo de busca tabu que pertence à categoria dos algoritmos de otimização combinatória. O algoritmo BT é um algoritmo de busca estatística, para solução de problemas gerais de otimização, adequados para solução de problemas combinatórios. Trata-se basicamente de um processo metaheurístico de busca local, que utiliza algumas estratégias adequadas para a busca de soluções ótimas de problemas de otimização bem e mal

condicionados. Foi desenvolvido por Fred Glover [4] nos anos 80, que tem suas bases em conhecimentos de inteligência artificial.

O algoritmo Busca Tabu Básico (BTB) parte de uma solução inicial e com uma vizinhança claramente especificada. Assim, conhecida uma solução inicial e o conjunto de vizinhos dessa solução, o algoritmo BTB identifica a solução vizinha de melhor qualidade e o processo passa para essa nova solução. Entretanto, para evitar voltar a uma solução já analisada o algoritmo BTB armazena em uma lista o atributo que foi usado no processo de transição. Um atributo proibido evita que se volte a uma solução já analisada, mas também não permite que se visite outras soluções que compartilham atributos proibidos de soluções já visitadas. Este problema é contornado usando um critério de aspiração que elimina a proibição sempre que uma solução candidata, que pode ser obtida acionando um atributo proibido, seja de boa qualidade. A proibição de um atributo é eliminada após um número especificado de transições que geralmente é pequeno, isto é, a estratégia usa informação de memória de curto prazo. No problema analisado são atributos os alimentadores e as subestações. O processo BTB termina após um número especificado de transições. Na Fig. 1 encontra-se o diagrama de blocos do algoritmo BTB implementado neste trabalho para o planejamento da expansão de sistemas de distribuição :

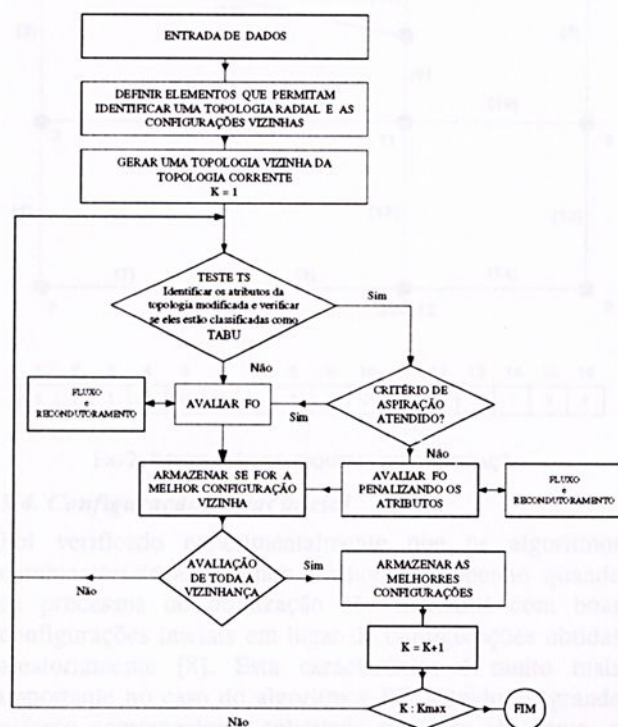


FIG.1 DIAGRAMA DE BLOCOS DO ALGORITMO BUSCA TABU PARA O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO

3.1. Função objetivo

O custo é uma das partes mais importantes no PDEE, assim procura-se o mínimo custo na construção de subestações e alimentadores do sistema de distribuição,

considerando-se custos de investimento na construção de novos alimentadores e subestações (custos fixos) e custos de operação da rede (custos variáveis). O custo total é fornecido por cada configuração corrente no modelo de Busca Tabu. A função objetivo, como já foi definida procura avaliar uma proposta de solução factível no planejamento da expansão da distribuição, em que os termos da função objetivo a serem considerados são: perdas elétricas, confiabilidade, custos de operação e expansão. Dessa forma a função objetivo no algoritmo implementado é calculada como:

$$FO = \sum \{ \sum \text{Custos fixos} + \sum \text{Custos variáveis} \}$$

A função objetivo avalia, para cada configuração radial, o custo total de investimento e de operação do sistema analisado. Os custos fixos são dados pelos custos de construção das linhas e subestações, e pela possível troca de bitola de um alimentador; e os custos variáveis pelos custos de operação das linhas multiplicados pelos valores de seus fluxos de potência.

A confiabilidade da rede está representada na continuidade do serviço de fornecimento de energia, ou seja, que cada ponto de consumo não fique sem suprimento de energia e esteja conectado a alguma fonte de suprimento. Este aspecto está garantido através do algoritmo que garante a radialidade da rede e o não ilhamento das barras com carga.

3.2. Fluxo de carga

O método de cálculo de fluxo de carga em redes de distribuição radiais, baseado num equivalente elétrico e na eliminação do ângulo de fase da tensão nas equações a serem resolvidas, foi implementado neste trabalho [1]. Trata-se de um método eficiente e simples para a solução exata do fluxo de carga em redes radiais de média tensão. Este método, conhecido como soma de potências permite a determinação da magnitude de tensão em qualquer nó da rede, sendo possível calcular a magnitude das tensões remanescentes no alimentador, especificado um nó. Aplica-se tanto a sistemas monofásicos como trifásicos. Juntamente com este método de cálculo de fluxo de carga utilizou-se um algoritmo de ordenação e numeração dos nós do sistema de distribuição.

O algoritmo de fluxo de carga implementado consiste basicamente dos seguintes passos:

- Leitura dos dados do sistema: nó inicial, nó final, resistência, reatância, potência ativa, e potência reativa. Tensão no nó fonte (source voltage).
- Assumir a magnitude da tensão para cada nó (para a primeira iteração assumir para todas as barras, tensão igual à barra fonte).
- Passo Upstream*; Desde o nó final até o nó fonte, encontre valores aproximados das potências verdadeiras para cada barra, nestas potências estão incluídas as potências de cada

barra que estão a jusante da barra analisada assim como as perdas totais acumuladas até essa barra, e também a potência da barra.

- Passo Downstream*; Desde o nó fonte até os nós finais, usando a equação fundamental [1], calcular valores aproximados das tensões de cada barra.
- Com as novas tensões, calcular novamente as perdas e com elas as novas potências de cada barra. Comparar as novas perdas totais com as perdas da iteração anterior. Se o valor da diferença entre elas for maior do que a tolerância para convergência, volte ao passo iii.

3.3. Codificação

A codificação usada para o problema foi um arranjo vetorial que indica quais os alimentadores estão operando (1) ou não (0) assim como as correspondentes subestações. Adotou-se um vetor adicional que indica o número da bitola do condutor que está operando no sistema. Neste sistema de codificação, adota-se uma notação matricial que permite identificar as ligações das linhas às subestações e permite analisar a radialidade do sistema. Esta forma de codificação está ilustrada na Fig. 2

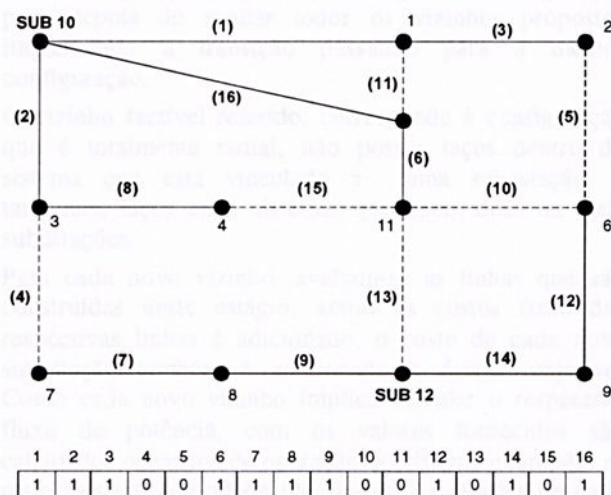


FIG 2. ILUSTRAÇÃO DO ESQUEMA DE CODIFICAÇÃO.

3.4. Configuração radial inicial

Foi verificado experimentalmente que os algoritmos combinatoriais apresentam melhor desempenho quando os processos de otimização são iniciados com boas configurações iniciais em lugar de configurações obtidas aleatoriamente [8]. Esta característica é muito mais importante no caso do algoritmos BT, devido ao grande esforço computacional solicitado por este algoritmo, e que quando se utiliza uma boa técnica heurística para gerar a configuração básica e inicial, encontram-se soluções de boa qualidade com maior frequência. A heurística, usada neste trabalho, consiste em estabelecer ligações de linhas dos sistemas às subestações já construídas até chegar à capacidade máxima das mesmas. A subestação não podendo fornecer mais energia, o algoritmo de configuração inicial adicionará outra

subestação ao sistema com vistas a satisfazer a demandas dos demais nós que ainda não estão ligadas ao sistema. As primeiras subestações a avaliar-se são aquelas que já estão construídas no sistema, devido a que têm um custo zero. A heurística continuará alocando as subestações de menor custo para garantir que todos os nós com carga sejam atendidos. A heurística não adiciona no sistema nós sem carga a não ser que o respectivo nó seja utilizado só como transporte, ou para conectar algum outro nó que tem carga.

Com a configuração inicial radial, é avaliada a capacidade de transporte de fluxo das linhas e se alguma delas não cumpre com as restrições, a bitola do alimentador é trocada por um de capacidade maior.

3.5. Estrutura de vizinhança

Com a solução inicial radial, encontram-se os vizinhos desta solução. A estrutura de vizinhança é determinada através de uma técnica heurística conhecida como "branch exchange technique", [5], sendo executada da seguinte forma:

- i. Seja uma topologia radial qualquer da rede de distribuição e inclua um dos alimentadores que não está ligado na configuração inicial. Devido a inclusão deste alimentador, a configuração resultante pode ser radial ou perder a radialidade, tornando-se infactível.
- ii. Se a nova configuração for infactível, deve-se desligar um outro alimentador que faça a configuração vizinha factível ou seja radial.
- iii. Neste critério, tem-se dois tipos de troca de linhas:

Intrazona : quando a troca de linhas é dentro de uma área servida por uma subestação de distribuição;

Interzona : quando a troca de linhas é realizado entre áreas servidas por subestações adjacentes.

Em outra família de vizinhança, dentro da vizinhança de troca de linhas, trocam-se a bitola de linhas que não cumprem com os requisitos de capacidade de fluxo de potência do alimentador. Este conceito é conhecido como reconductoramento do sistema de energia Elétrica. Assim, inicia-se o processo com o sistema básico que já está construído e adiciona-se linhas para unir aqueles nós com carga ao sistema; As linhas que são adicionadas são as de menor capacidade, e como é lógico pensar, as mais atrativas sob o aspecto econômico. O fluxo de potência que passa pela linha, em seguida será avaliado se a linha cumpre com os requisitos de capacidade. No caso de não atender adota-se uma bitola imediatamente superior conseqüentemente de mais alto custo, calculando-se novamente todo o fluxo de potência para a nova proposta de expansão do sistema.

3.6. Infactibilidades

Dentro dos problemas de infactibilidade que se pode encontrar são as configurações não radiais, mas com o critério de vizinhança é uma estratégia adequada, o

problema de que o sistema proposto não seja radial não ocorre, já que, se em algum momento encontra-se alguma configuração não radial, o critério de vizinhança do algoritmo BT buscará retirar algum circuito, convertendo o sistema novamente em um sistema radial.

Também dentro das infactibilidades do sistema encontram-se as violações de limites de capacidade de linhas e níveis de tensão nos nós mais afastados das subestações. Quando qualquer magnitude de tensão é violada no sistema proposto ele será penalizado com um valor de custo muito alto, assim esses sistemas dificilmente ou nunca serão adotados como próxima configurações.

As infactibilidades com relação às violações dos limites de capacidade das linhas, pode ser solucionadas adotando-se para o mesmo caminho da linha, um outro alimentador com capacidade maior, mas isto envolverá um maior custo da função objetivo. Mas como os parâmetros da nova linha mudaram, deve-se avaliar um novo fluxo de potência para o sistema.

3.7. Avaliação das configurações vizinhas

Uma vez determinada uma configuração vizinha factível, deve-se encontrar o valor da função objetivo (custo fixo, custo de operação, e perdas) da respectiva configuração para depois de avaliar todos os vizinhos propostos implementar a transição passando para a melhor configuração.

O vizinho factível referido, corresponde à configuração que é totalmente radial, não possui laços dentro do sistema que está vinculado a uma subestação, e tampouco laços entre sistemas que unem duas ou mais subestações.

Para cada novo vizinho, avaliam-se as linhas que são construídas neste estágio, assim os custos fixos das respectivas linhas é adicionado, o custo de cada nova subestação também é adicionado à função objetivo. Como cada novo vizinho implica calcular o respectivo fluxo de potência, com os valores fornecidos são calculados os custos de operação do sistema e também as restrições de capacidade das linhas. As tensões de cada nó são avaliadas e a configuração penalizada em caso não cumpra a restrição de mínima tensão. Também é considerado dentro da avaliação, a capacidade que cada subestação tem de fornecer energia para o sistema, e se as respectivas subestações cumprem com esses limites de capacidade, e caso não cumprem, são penalizadas com um alto custo.

3.8. Lista tabu

A Lista Tabu é implementada com o objetivo de prevenir ciclos e evitar visitar configurações já visitadas. Assim, quando uma configuração é construída, os atributos usados para encontrar essa topologia são colocadas na lista tabu. Portanto, o movimento reverso desses atributos permanece proibido durante um número especificado de iterações. Esta lista é armazenada na parte superior de uma matriz quadrada de extensão igual ao número de

linhas do sistema, e são armazenados os atributos de cada transição.

O critério de aspiração usado é o tradicional, ou seja, quando a função objetivo de uma configuração cujo atributo encontra-se na lista tabu é de boa qualidade ela é avaliada e seu valor é penalizado. Se ela mesmo com a penalização manter-se de boa qualidade passa a ser a nova solução corrente.

3.9. Critério de parada

O critério de parada determina que, se a solução incumbente não apresenta melhoria durante um número especificado de iterações, deve-se interromper o processo iterativo .

4. TESTES E RESULTADOS

O algoritmo para a solução do problema de planejamento da expansão, proposto neste trabalho, foi implementado em linguagem de programação FORTRAN e foram realizados testes com o programa desenvolvido utilizando-se dois sistemas.

As características elétricas, e custos dos alimentadores possíveis de serem alocados durante a etapa de planejamento são dados na tabela I.

TABELA I
CARACTERÍSTICAS ALIMENTADORES USADOS NOS TESTES

Cabo	tipo	MVAmax	R(pu/km)	X(pu/Km)	CF(\$/KM)	CV(\$/KM/MVA)
1/0	1	9,00	0,3655	0,2520	20,00	1,00
2/0	2	11,00	0,2921	0,2466	30,00	2,00
3/0	3	12,50	0,2359	0,2402	40,00	4,00
4/0	4	14,00	0,1932	0,2279	50,00	5,00
2x1/0	5	19,00	0,1827	0,1260	60,00	6,00
2x2/0	6	22,40	0,1460	0,1233	70,00	7,00
2x3/0	7	25,00	0,1180	0,1201	80,00	8,00
2x4/0	8	28,00	0,0966	0,1140	90,00	9,00

4.1. Sistema I

Características do sistema

Alimentadores existentes: 3

Alimentadores potenciais: 13

Subestações existentes: 1

Subestações potenciais: 1

Nós de consumo: 3

Os dados de linhas da rede básica para este sistema estão apresentados na tabela II

TABELA II
DADOS DE LINHAS DO SISTEMA I-CASO BASE

Linha	NOF	NOI	Liga	Dist(Km)	Cabo
1	1	10	1	0,200	1
2	3	10	1	0,200	1
3	2	1	1	0,100	1
4	7	3	0	0,100	1
5	6	2	0	0,200	1
6	5	11	0	0,100	1
7	7	8	0	0,100	1
8	3	4	0	0,100	1
9	8	12	0	0,100	1
10	11	6	0	0,100	1
11	1	5	0	0,100	1
12	6	9	0	0,100	1
13	12	11	0	0,100	1
14	9	12	0	0,100	1
15	4	11	0	0,100	1
16	10	5	0	0,230	1

TABELA III
CARGAS CONECTADAS ÀS BARRAS

Nó	MVA		
	Estágio I	Estágio II	Estágio III
1	5	6	7
2	5	5,7	6,3
3	2	2,2	2,6
4	5	6	6,6
5	4	4,4	5,1
6	5	6,5	7,1
7	6,7	7,7	9,2
8	5	6	7
9	5	5,7	7
11	5	5	5

TABELA IV
DADOS DAS SUBESTAÇÕES DO SISTEMA I

Sub	MVA	Custo
sub 10	30	0
sub 12	35	1500

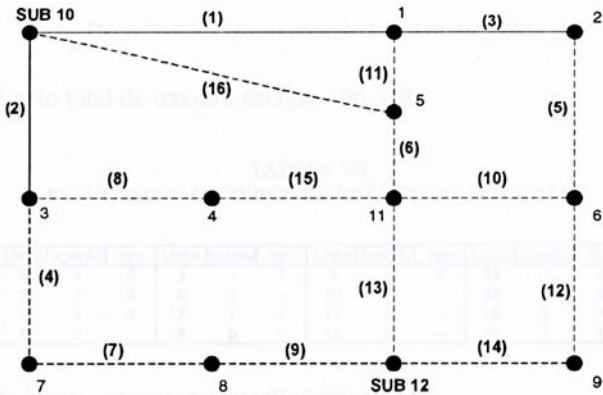


FIG 3. SISTEMA INICIAL EXISTENTE

4.1.1. Resultados do primeiro estágio

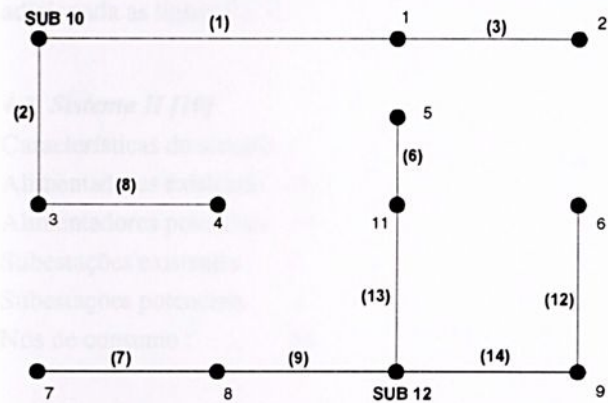


FIG. 4 PROPOSTA DE PLANEJAMENTO DO PRIMEIRO ESTÁGIO

Custo total do primeiro estágio : 1540,4980

TABELA V
RESULTADOS DO PRIMEIRO ESTÁGIO DO SISTEMA I

Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo
1	1	2	5	0	--	9	1	3	13	1	2
2	1	1	6	1	1	10	0	--	14	1	2
3	1	1	7	1	1	11	0	--	15	0	--
4	0	--	8	1	1	12	1	1	16	0	--

Potência subestação 10 : 17,0983 MVA

Potência subestação 12 : 30,7174 MVA

Comentários sobre o primeiro estágio

Há uma solicitação maior da nova subestação; na solução final as linhas com menor distância são alocadas. A linha 5, torna o sistema muito caro e a queda de tensão no final da linha será alto em comparação a os demais nós. As linha que mudaram de bitola foram 1,9,13 e 14, elas poderão transmitir um fluxo maior de corrente e evitará queda de tensão elevada.

4.1.2. Resultados do segundo estágio

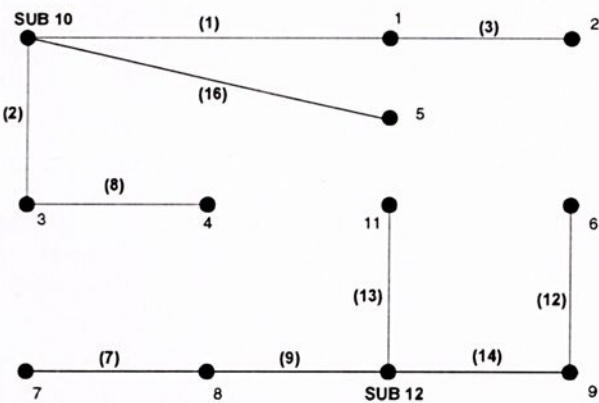


FIG.5 SISTEMA RESULTANTE DO SEGUNDO ESTÁGIO

Custo total do segundo estágio: 49,1035

TABELA VI
RESULTADOS DO SEGUNDO ESTÁGIO DO SISTEMA I

Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo
1	1	3	5	0	--	9	1	4	13	1	2
2	1	1	6	0	--	10	0	--	14	1	3
3	1	1	7	1	1	11	0	--	15	0	--
4	0	--	8	1	1	12	1	1	16	1	1

Potência subestação 10 : 24,4804 MVA

Potência subestação 12 : 30,9748 MVA

Comentários sobre o segundo estágio

O algoritmo Busca Tabu tentará adicionar nós no sub-sistema que está fornecendo menos potência. Assim pode-se observar que é adicionado o nó 5 no sistema fornecido pela subestação sub 10 e é retirado da subestação sub 12. A linha 1 , 9 e 14 aumentaram para uma bitola maior. Foi adicionada a linha 16 e retirada do sistema a linha 6.

4.1.3. Resultados do terceiro estágio

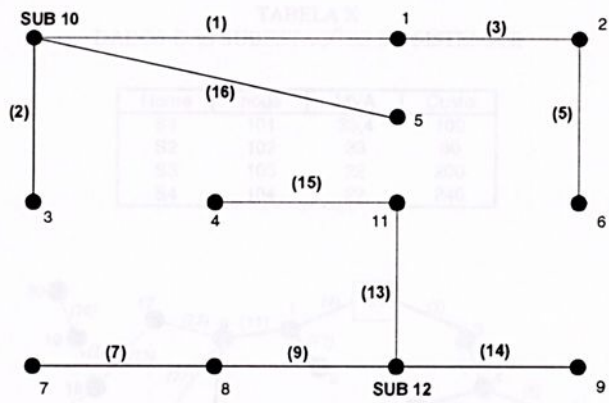


FIG. 6 SISTEMA RESULTANTE DO TERCEIRO ESTÁGIO

Custo total do terceiro estágio : 96,3485

TABELA VII
RESULTADOS DO TERCEIRO ESTÁGIO DO SISTEMA I

Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo
1	1	6	5	1	1	9	1	5	13	1	3
2	1	5	6	0	--	10	0	--	14	1	3
3	1	4	7	1	2	11	0	--	15	1	1
4	0	--	8	0	--	12	0	--	16	1	1

Potência subestação 10 : 28,2899 MVA

Potência subestação 12 : 34,6584 MVA

Comentários sobre o terceiro estágio

Neste estágio final é adicionado á subestação sub12, o nó 4 e liberado o nó 6, assim as subestações trabalharão em seus limites máximos. Os alimentadores das linhas 1, 2 e 3 foram trocados para uma bitola muito maior, devido ao fluxo de potência

nestas linhas. As linhas 8 e 12 foram retiradas e foram adicionada as linhas 5 e 15.

4.2. Sistema II [10]

Características do sistema

Alimentadores existentes : 16

Alimentadores potenciais : 45

Subestações existentes : 2

Subestações potenciais : 2

Nós de consumo : 54

4.2.1. Dados das linhas do sistema II

TABELA VIII
DADOS DE LINHAS DO SISTEMA II

Linha	NOF	NOI	Liga	Dist(Km)	cabo	Linha	NOF	NOI	Liga	Dist(Km)	cabo
4	101	1	1	0,281	2	35	6	28	0	0,5	1
5	101	3	1	0,218	2	36	104	30	0	0,281	1
6	3	4	1	0,312	1	37	30	29	0	0,312	1
7	4	7	1	0,25	1	38	30	43	0	0,406	1
8	4	5	1	0,312	1	39	43	37	0	0,25	1
9	7	8	1	0,312	1	40	37	31	0	0,187	1
10	5	6	1	0,25	1	41	31	10	0	0,312	1
11	1	9	1	0,343	1	42	13	43	0	0,375	1
12	1	2	1	0,312	1	43	12	45	0	0,25	1
13	9	10	1	0,718	1	44	45	44	0	0,218	1
14	102	14	1	0,375	1	45	44	38	0	0,312	1
15	14	15	1	0,375	1	46	38	39	0	0,343	1
16	15	16	1	0,281	1	47	39	32	0	0,406	1
17	102	11	1	0,281	1	48	39	33	0	0,281	1
18	11	12	1	0,312	1	49	33	8	0	0,468	1
19	12	13	1	0,437	1	50	33	34	0	0,187	1
20	19	20	0	0,312	1	51	34	35	0	0,218	1
21	18	19	0	0,25	1	52	35	36	0	0,218	1
22	17	18	0	0,406	1	53	103	36	0	0,25	1
23	9	17	0	0,43	1	54	103	28	0	0,312	1
24	18	21	0	0,312	1	55	103	41	0	0,312	1
25	104	21	0	0,25	1	56	41	40	0	0,375	1
26	104	22	0	0,375	1	57	40	16	0	0,25	1
27	9	22	0	0,468	1	58	41	42	0	0,375	1
28	22	23	0	0,343	1	59	42	48	0	0,25	1
29	23	24	0	0,281	1	60	48	49	0	0,375	1
30	24	25	0	0,218	1	61	49	50	0	0,218	1
31	25	8	0	0,281	1	62	42	47	0	0,312	1
32	8	27	0	0,375	1	63	47	46	0	0,312	1
33	27	26	0	0,343	1	64	46	14	0	0,343	1
34	27	28	0	0,312	1						

TABELA IX
DADOS DE NÓS DO SISTEMA II

Nó	MVA			Nó	MVA		
	Estágio I	Estágio II	Estágio III		Estágio I	Estágio II	Estágio III
1	3,31	3,81	5,00	26	0,00	0,80	2,00
2	1,10	1,30	2,00	27	0,00	1,20	2,70
3	0,40	0,50	1,50	28	0,40	0,50	1,80
4	1,40	1,91	3,50	29	0,60	0,90	2,30
5	2,00	2,30	3,50	30	2,00	2,30	3,70
6	0,60	0,70	1,90	31	0,60	0,70	0,70
7	0,20	0,50	0,80	32	0,00	1,50	1,20
8	1,50	1,70	1,50	33	1,80	2,30	2,00
9	1,91	2,00	3,20	34	0,90	1,00	0,80
10	2,00	2,41	2,00	35	0,00	0,00	0,00
11	0,20	0,30	1,00	36	0,20	0,20	0,30
12	1,00	1,60	2,80	37	1,00	1,60	1,60
13	0,90	1,00	2,50	38	0,00	0,00	0,00
14	0,80	0,90	2,00	39	0,80	0,90	0,70
15	1,00	1,20	1,00	40	1,00	1,20	1,00
16	1,30	1,50	1,20	41	0,30	0,50	1,80
17	0,50	0,60	2,00	42	0,00	0,00	0,80
18	0,90	1,00	2,50	43	0,00	0,00	1,50
19	1,00	1,20	2,80	44	0,50	1,00	0,80
20	0,50	0,70	2,30	45	0,50	0,50	0,50
21	0,50	1,60	3,20	46	0,00	1,60	1,60
22	0,50	1,00	1,00	47	0,50	0,50	0,60
23	0,50	0,90	1,00	48	0,50	0,60	2,00
24	0,50	0,40	0,40	49	0,00	0,60	2,00
25	0,60	0,80	0,80	50	0,00	0,00	1,00

TABELA X
DADOS DAS SUBESTAÇÕES DO SISTEMA II

Nome	node	MVA	Custo
S1	101	33,4	100
S2	102	33	80
S3	103	22	200
S4	104	22	240

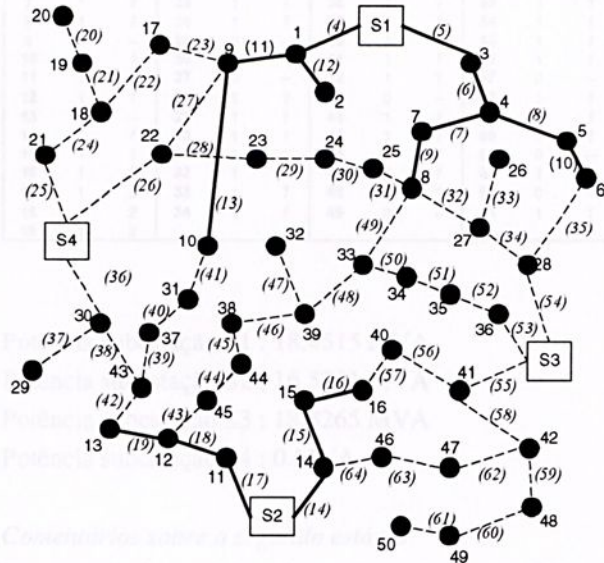


FIG. 7 SISTEMA INICIAL EXISTENTE E SUBESTAÇÕES E ALIMENTADORES POTENCIAIS.

4.2.2. Resultados do primeiro estágio

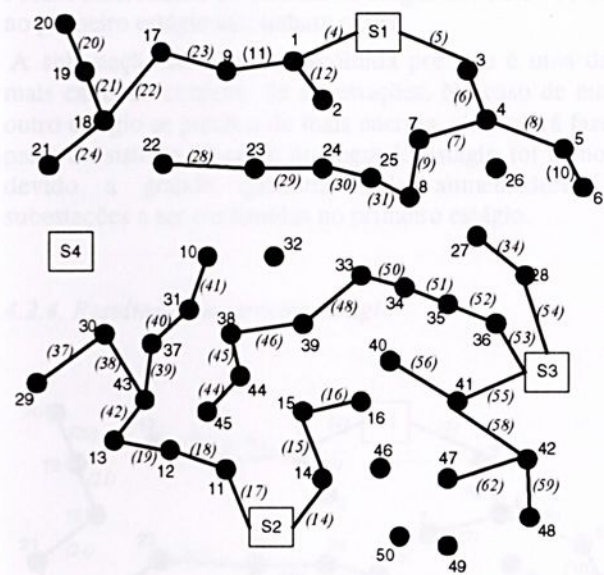


FIG. 8 SISTEMA RESULTANTE DO PRIMEIRO ESTÁGIO

Custo total primeiro estágio : 603,9703

TABELA XI
RESULTADOS DO PRIMEIRO ESTÁGIO DO SISTEMA II

Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo
4	1	2	20	1	1	35	0	--	50	1	1
5	1	2	21	1	1	36	0	--	51	1	1
6	1	1	22	1	1	37	1	1	52	1	1
7	1	1	23	1	1	38	1	1	53	1	1
8	1	1	24	1	1	39	1	1	54	1	1
9	1	1	25	0	--	40	1	1	55	1	1
10	1	1	26	0	--	41	1	1	56	1	1
11	1	1	27	0	--	42	1	1	57	0	--
12	1	1	28	1	1	43	0	--	58	1	1
13	0	--	29	1	1	44	1	1	59	1	1
14	1	1	30	1	1	45	1	1	60	0	--
15	1	1	31	1	1	46	1	1	61	0	--
16	1	1	32	0	--	47	0	--	62	1	1
17	1	1	33	0	--	48	1	1	63	0	--
18	1	1	34	1	1	49	0	--	64	0	--
19	1	1									

Potência subestação S1 : 18,2462 MVA
Potência subestação S2 : 11,7899 MVA
Potência subestação S3 : 7,4941 MVA
Potência subestação S4 : 0 MVA

Comentários sobre o primeiro estágio

Foram utilizadas as subestações já existentes. O algoritmo BT não indicou a construção de uma nova subestação, para evitar uma função objetivo de alto custo. Foi retirada do sistema a linha 13, devido à queda de tensão que ela ocasiona.

4.2.3. Resultados do segundo estágio

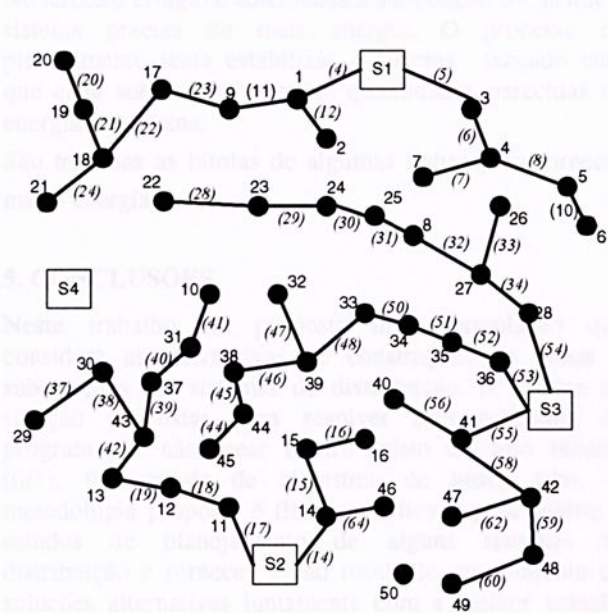


FIG. 9 SISTEMA RESULTANTE DO SEGUNDO ESTÁGIO

Custo total do segundo estágio : 169,0558

TABELA XII
RESULTADOS DO SEGUNDO ESTÁGIO DO SISTEMA II

Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo
4	1	3	20	1	1	35	0	--	50	1	1
5	1	2	21	1	1	36	0	--	51	1	1
6	1	1	22	1	1	37	1	1	52	1	1
7	1	1	23	1	1	38	1	1	53	1	1
8	1	1	24	1	1	39	1	1	54	1	1
9	0	--	25	0	--	40	1	1	55	1	1
10	1	1	26	0	--	41	1	1	56	1	1
11	1	1	27	0	--	42	1	1	57	0	--
12	1	1	28	1	1	43	0	--	58	1	1
13	0	--	29	1	1	44	1	1	59	1	1
14	1	1	30	1	1	45	1	1	60	1	1
15	1	1	31	1	1	46	1	1	61	0	--
16	1	1	32	1	1	47	1	1	62	1	1
17	1	3	33	1	1	48	1	1	63	0	--
18	1	2	34	1	1	49	0	--	64	1	1
19	1	2									

Potência subestação S1 : 18,4515 MVA
Potência subestação S2 : 16,5701 MVA
Potência subestação S3 : 18,5265 MVA
Potência subestação S4 : 0 MVA

Comentários sobre o segundo estágio

Como se observa na fig. 9 a subestação S3 está alimentando um número muito grande de consumidores, mas ela esta fornecendo quase tanta energia como a subestação S1.

A linha 32 foi adicionada e retirada a linha 9. Assim a subestação fornecerá aos nós 22, 23, 24, 25 e 8.

As linhas 4, 17, 18 e 19 mudaram para uma bitola maior. Foram adicionados ao sistema as cargas 26, 32 e 49, que no primeiro estágio não tinham carga.

A subestação S4 não foi escolhida por que é uma das mais caras do conjunto de subestações. No caso de num outro estágio se precisar de mais energia, ela poderá fazer parte do sistema. O custo do segundo estágio foi menor, devido a grande quantidade de alimentadores e subestações a ser construídas no primeiro estágio.

4.2.4. Resultados do terceiro estágio

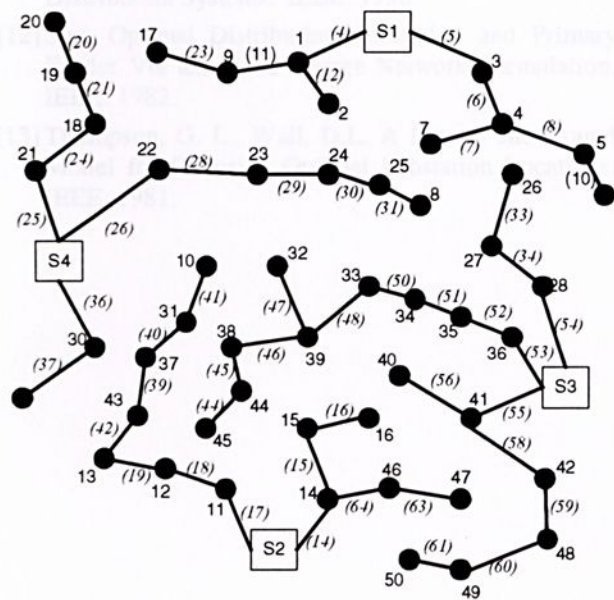


FIG. 10 SISTEMA RESULTANTE DO TERCEIRO ESTÁGIO.

Custo total do terceiro estágio : 443,2252

TABELA XIII
RESULTADOS DO TERCEIRO ESTÁGIO DO SISTEMA II

Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo	Linha	ligação	tipo
4	1	3	20	1	1	35	0	—	50	1	1
5	1	3	21	1	1	36	1	1	51	1	1
6	1	2	22	0	—	37	1	1	52	1	1
7	1	1	23	1	1	38	0	—	53	1	1
8	1	1	24	1	1	39	1	1	54	1	1
9	0	—	25	1	3	40	1	1	55	1	1
10	1	1	26	1	1	41	1	1	56	1	1
11	1	1	27	0	—	42	1	1	57	0	—
12	1	1	28	1	1	43	0	—	58	1	1
13	0	—	29	1	1	44	1	1	59	1	1
14	1	1	30	1	1	45	1	1	60	1	1
15	1	1	31	1	1	46	1	1	61	1	1
16	1	1	32	0	—	47	1	1	62	0	—
17	1	4	33	1	1	48	1	1	63	1	1
18	1	3	34	1	1	49	0	—	64	1	1
19	1	2									

Potência subestação S1 : 23,7789 MVA
Potência subestação S2 : 18,9795 MVA
Potência subestação S3 : 21,7981 MVA
Potência subestação S4 : 21,8047 MVA

Comentários sobre o terceiro estágio

No terceiro estágio é adicionada a subestação S4, já que o sistema precisa de mais energia. O processo de planejamento tenta estabilizar o sistema fazendo com que cada subestação entregue quantidades parecidas de energia ao sistema.

São trocadas as bitolas de algumas linhas para fornecer maior energia.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma formulação que considera as alternativas de construções de linhas e subestações em sistemas de distribuição. A técnica de solução propostas para resolver este problema de programação não-linear inteiro misto do tipo binário (0/1), foi através de algoritmo de busca tabu. A metodologia proposta é flexível, aplicada para análise e estudos de planejamento de alguns sistemas de distribuição e forneceu como resultado um conjunto de soluções alternativas juntamente com a melhor solução para o problema.

A principal vantagem da utilização desta técnica para resolver o problema de planejamento está na facilidade de se trabalhar com um modelo não linear do problema e incorporar à formulação modelos reais de componentes dos sistemas. A técnica de fluxo de carga utilizada mostrou-se eficiente, segura e adequada para a solução deste tipo de problema.

Os resultados obtidos através das simulações dos sistemas encontrados na literatura [10] comprovam a eficiência da metodologia desenvolvida e implementada.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] Cespedes R. New Method for the Analysis of Distribution Networks. IEEE. 1990

[2] Da Silva. Transmission Network Expansion Planning Under Tabu Search Approach . IEEE. 2001

[3] Gallego. “Tabu Search Algorithm for Network Synthesis”. IEEE.2000.

[4] Glover, F., Laguna, M., Tabu Search, University of Colorado at Boulder, Kluwer Academic Publishers.

[5] Goswami, S.K. Distribution System Planning Using Branch Exchange Technique. IEEE.1997.

[6] Kagan, N. “Electrical Distribution System Planning Using Multiobjective and Fuzzy Mathematical Programming”, PhD Thesis, University of London. 1992

[7] Khator, S.R., Leung, L.C. Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues. IEEE. 1997



- [8] Montecelli A., Romero R. Tutorial on modern heuristic optimization techniques with application to power systems. IEEE 2002
- [9] Ponnavaikko. Distribution System Planning Through a Quadratic Mixed Integer Programming Approach. IEEE.1987.
- [10] Proença, L.B. "Algoritmos Genéticos no Planejamento da Expansão de Distribuição de Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 1993.
- [11] Ramirez Rosado, I.J., Bernal Agustín, J.L. Genetic Algorithm Applied to the Design of Large Power Distribution Systems. IEEE. 1998.
- [12] Sun. Optimal Distribution Substation and Primary Feeder Via the Fixed Charge Network Formulation. IEEE. 1982.
- [13] Thompson, G. L., Wall, D.L. A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Locations. IEEE. 1981.



EXPANSIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZANDO BÚSQUEDA TABÚ

F. Arias, J. A. S. Martínez y R. A. Romero - ICAECP

Email: fernando@icae.unesp.br, jams@icae.unesp.br, romero@icae.unesp.br

1. Resumen

El planeamiento de la expansión de sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (PSDEE) es un problema de gran importancia para los sistemas distribuidores de Energía Eléctrica. El PSDEE consiste en determinar el crecimiento de la expansión del sistema eléctrico, que comprende la construcción de una o más subestaciones y el cambio del tamaño de alimentadores de energía (transformadores). Los costos de operación

APENDICE III

El objetivo de este trabajo es presentar un algoritmo Tabú para la solución del problema de expansión de redes de distribución eléctrica. Se propone un modelo de expansión de redes que consiste en una función objetivo que minimiza los costos de expansión y cumple las restricciones necesarias para mantener un sistema real. En este trabajo se presentan y discuten los resultados obtenidos en la aplicación de un algoritmo de distribución

I CONGRESO INTERNACIONAL DE CIENTÍFICOS

2. Introducción

PERUANOS

I CIRMCP 2003

2 a 5 de Janeiro de 2003

Lima - Perú

3. Formulación del problema

El problema básico del planeamiento de la expansión de sistemas de distribución eléctrica es la minimización del costo total de la expansión del sistema. La expansión se construye de líneas, subestaciones y alimentadores de energía. El tamaño de alimentadores existentes (transformadores).

Los principales aspectos técnico-económico en el planeamiento de la expansión de PSDEE son los siguientes: Economía, minimizando los costos de inversión y costos de operación, confiabilidad y seguridad.

El planeamiento de sistemas de distribución eléctrica puede ser dividido en la siguiente forma:

EXPANSIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZANDO BÚSQUEDA TABÚ

F. Bazan, J. R. S. Mantovani e R. A. Romero – UNESP

E-mail : fernando@dee.feis.unesp.br, mant@dee.feis.unesp.br, ruben@dee.feis.unesp.br .

1. Resumen

El planeamiento de la expansión de sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (PSDEE) se ha revelado como un problema de gran importancia para las empresas distribuidoras de energía eléctrica. El PSDEE consiste en minimizar el costo total de la expansión del sistema eléctrico, que comprende la construcción de líneas, subestaciones y el cambio del tamaño de alimentadores existentes (*reconductoring*) y los costos de operación.

El objetivo de este trabajo es utilizar el algoritmo Busca Tabú para la solución del problema de expansión de redes de distribución, usando un modelo de optimización no lineal que considera una función objetivo que minimiza los costos de expansión y cumpla las restricciones necesarias para representar un sistema real. En este trabajo es presentado y discutido los resultados obtenidos en la simulación de un sistema de distribución considerándose tres horizontes de planeamiento.

2. Introducción

EL planeamiento de la expansión de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (PSDEE) es un problema relevante y de gran importancia para las empresas distribuidoras de Energía Eléctrica tanto en los aspectos técnicos como económicos. Sobre el aspecto de la investigación operacional, se trata de un problema de programación matemática de gran porte envolviendo variables reales y enteras, que permite el estudio y la proposición de diversas técnicas de optimización para su solución. Los requisitos básicos necesarios para un sistema de distribución son: seguridad, economía y calidad de servicio. En este trabajo, basándose en estos requisitos, se presenta una formulación matemática genérica del problema de la expansión de Redes de Distribución de Energía Eléctrica, que es un modelo de programación no lineal con variables reales y binarias. La técnica de solución propuesta para este modelo es un algoritmo de Busca Tabú (BT) [2]; que es una técnica de optimización combinatoria, que tiene sus orígenes en los conceptos de inteligencia artificial (IA), y ha sido aplicada en diversas áreas de la ingeniería.

3. Formulación del problema

El problema básico del planeamiento de la expansión de sistemas de distribución eléctrica es la minimización del costo total de la expansión del sistema, básicamente la construcción de líneas, subestaciones y el cambio del tamaño de alimentadores existentes (*reconductoring*).

Los principales aspectos técnico-económicos envueltos en el planeamiento de la expansión de SDEE son los siguientes: Economía, minimizando los costos de inversión y costos de operación, confiabilidad y seguridad.

El planeamiento de sistemas de distribución puede ser establecido de la siguiente forma:

Suponga que exista una red de distribución de energía eléctrica atendiendo un número fijo de consumidores (nodos de consumo) y una subestación suministrando la energía requerida para satisfacer la demanda de esos consumidores. La carga de los sistemas no es estática y aumentará con el tiempo. El crecimiento de la carga impone la necesidad de la expansión de la red: construcción de nuevos alimentadores, subestaciones y cambio de tamaño de alimentadores existentes. El costo relacionado con estas inversiones es el costo de operación de la red, el cual debe satisfacer las restricciones del problema que tiene el problema de planeamiento.

El problema del planeamiento de la expansión de sistemas de distribución de energía eléctrica puede ser formulado de forma general como:

Minimizar [*Costos de inversión* (construcción de nuevas subestaciones y alimentadores, reconductoring, etc) + *Costos de operación* (flujo de potencia en las líneas)]

Sujeto a:

- *Atención de la Demanda* (Leyes de Kirchhoff).
- *Calidad del Servicio ofrecido* (Caída de tensión máxima permitida en los alimentadores, presencia de armónicos, asimetría del sistema trifásico, y otros tipos de problemas en la red)
- *Restricciones Físicas de operación de los equipos instalados y a instalar en el sistema* (Capacidad de las subestaciones, Máximo flujo de potencia permitido en los alimentadores)
- *Restricciones Lógicas* (Mantener la radialidad del sistema).

4. Técnicas de solución

La investigación desarrollada en este trabajo enfoca la solución del problema de la expansión, utilizando un algoritmo de busca tabú que pertenece a la categoría de los algoritmos de optimización combinatoria. Se trata básicamente de un proceso meta-heurístico de busca local, que utiliza algunas estrategias adecuadas para la busca de soluciones de problemas de optimización [4]. Fue desarrollado por Fred Glover [2] en los años 80, que tiene sus bases en conocimientos de inteligencia artificial.

Thompson y Wall [7], formulan el problema de planeamiento como un modelo de transportes y utilizan la técnica de *Branch and Bound* para la solución. Una propuesta heurística es constructiva es sugerida por Goswami [3] para la solución del problema de planeamiento. Proença [5], Ramírez Rosado y Bernal Agustín [6] propusieron resolver este problema utilizando los algoritmos genéticos.

El algoritmo Busca Tabú (BT) parte de una solución inicial y con una vecindad claramente especificada. Así, conocida una solución inicial y el conjunto de vecinos de esa solución, el algoritmo BT identifica la solución vecina de mejor calidad y el proceso pasa para esa nueva solución. Entretanto, para evitar regresar a una solución ya analizada el algoritmo BT almacena en una lista el atributo que fue usado en el proceso de transición. Un atributo prohibido evita que se regrese a una solución ya analizada, pero también no permite que se visite otras soluciones que compartían atributos prohibidos de soluciones ya visitadas. Este problema es solucionado usando un criterio de aspiración que elimina la prohibición siempre que una solución candidata, que puede ser obtenida accionando un atributo prohibido, sea de buena calidad. La prohibición de un atributo es eliminada después de un número especificado de transiciones que generalmente es pequeño, es decir, la estrategia usa información de memoria de corto plazo. En el problema analizado

son atributos los alimentadores y las subestaciones. El proceso BT termina después de un número específico de transiciones. En la Fig. 1 se encuentra el diagrama de bloques del algoritmo BT implementado en este trabajo para el planeamiento de la expansión de sistemas de distribución:

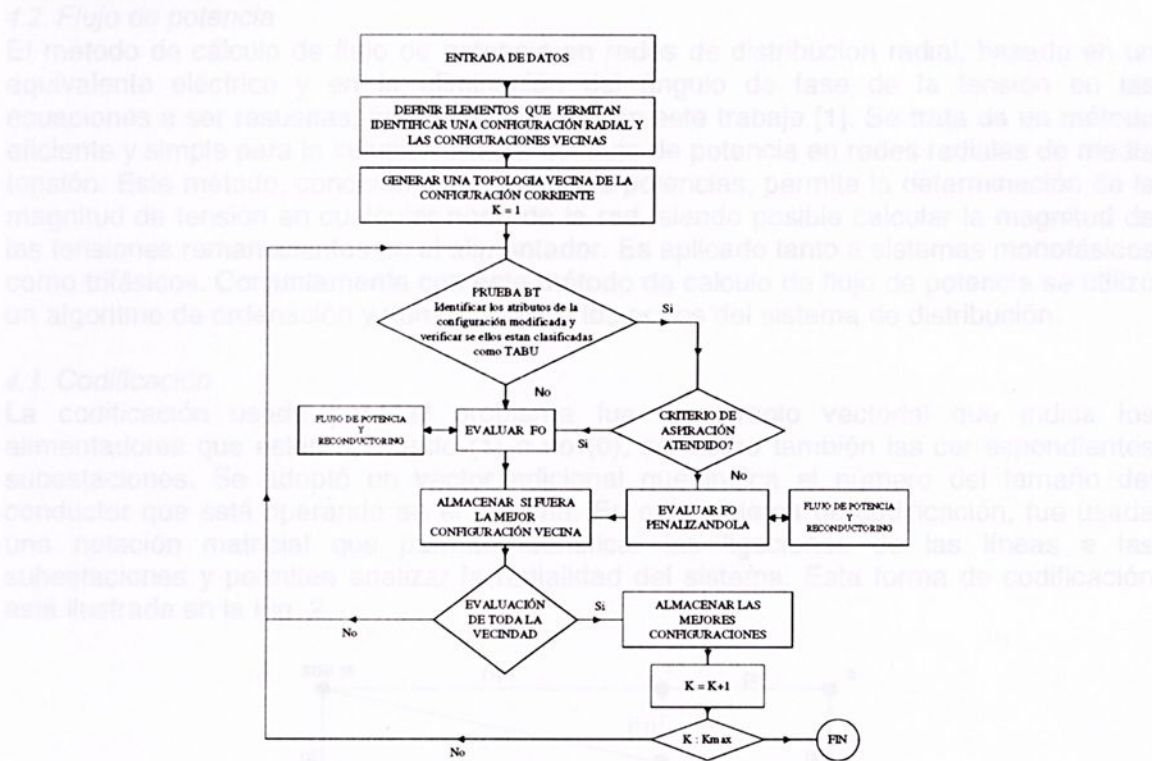


Fig.1 Diagrama de bloques del algoritmo Busca Tabú para el problema de planeamiento.

4.1. Función objetivo

El costo es una de las partes más importantes en el PSDEE, siendo el objetivo la minimización. Se consideran costos de inversión en la construcción de nuevos alimentadores y subestaciones (costos fijos) y costos de operación de la red (costos variables). El costo total es entregado por cada configuración corriente en el modelo de Búsqueda Tabú. La función objetivo, como ya fue definida, procura evaluar una propuesta de solución factible en el planeamiento de la expansión de la distribución. Los términos de la función objetivo a ser considerados son: pérdidas eléctricas, confiabilidad, costos de operación y expansión. De esa manera la función objetivo en el algoritmo implementado es calculada como:

$$FO = \sum_{i=1}^{N_{sub}} \{ \sum \text{Costos fijos} + \sum \text{Costos variables} \}$$

La función objetivo evalúa, para cada configuración radial, el costo total de inversión y de operación del sistema analizado. La confiabilidad de la red está representada en la continuidad del servicio de suministro de energía, es decir, cada punto de consumo no debe quedar sin alimentación de energía y además cada nodo esté conectado a alguna

fuelle de alimentaci3n. Este ultimo aspecto est3 garantizado a trav3s del algoritmo implementado, que mantiene la radialidad de la red y no permite aislar las barras con carga del sistema.

4.2. Flujo de potencia

El m3todo de c3lculo de flujo de potencia en redes de distribuci3n radial, basado en un equivalente el3ctrico y en la eliminaci3n del 3ngulo de fase de la tensi3n en las ecuaciones a ser resueltas, fue implementado en este trabajo [1]. Se trata de un m3todo eficiente y simple para la soluci3n exacta del flujo de potencia en redes radiales de media tensi3n. Este m3todo, conocido como suma de potencias, permite la determinaci3n de la magnitud de tensi3n en cualquier nodo de la red, siendo posible calcular la magnitud de las tensiones remanecientes en el alimentador. Es aplicado tanto a sistemas monof3sicos como trif3sicos. Conjuntamente con este m3todo de calculo de flujo de potencia se utiliz3 un algoritmo de ordenaci3n y numeraci3n de los nodos del sistema de distribuci3n.

4.3. Codificaci3n

La codificaci3n usada para el problema fue un arreglo vectorial que indica los alimentadores que est3n operando (1) o no (0), as3 como tambi3n las correspondientes subestaciones. Se adopt3 un vector adicional que indica el n3mero del tama1o del conductor que est3 operando en el sistema. En este sistema de codificaci3n, fue usada una notaci3n matricial que permite identificar las ligaciones de las l3neas a las subestaciones y permiten analizar la radialidad del sistema. Esta forma de codificaci3n est3 ilustrada en la Fig. 2

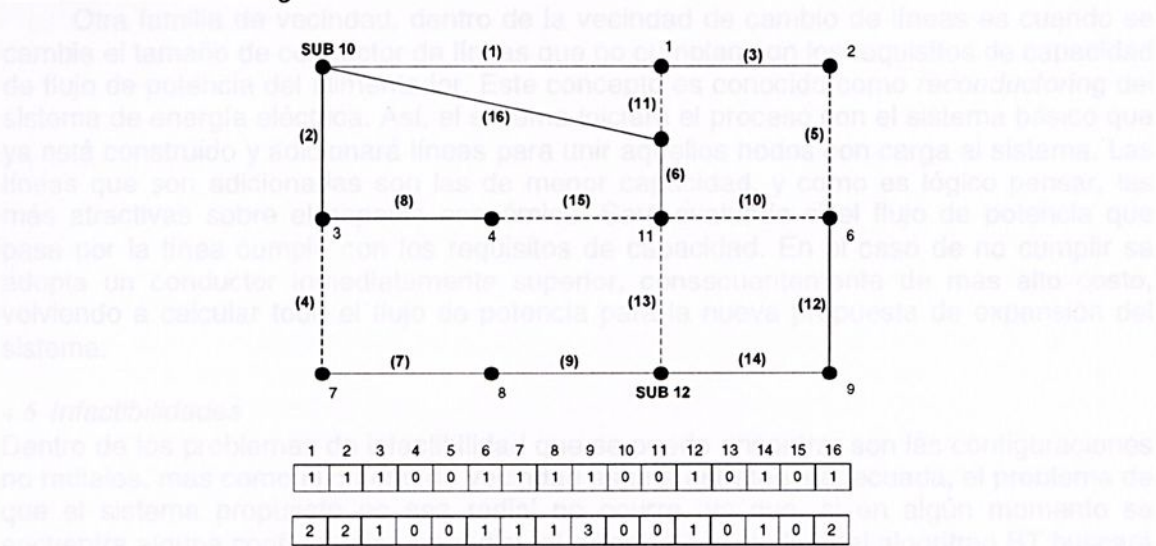


Fig. 2. Ilustraci3n de la codificaci3n.

4.4. Configuraci3n radial inicial

El m3todo heur3stico utilizado en este trabajo consiste en establecer ligaciones de l3neas de los sistemas a las subestaciones ya construidas hasta llegar a la capacidad m3xima de las mismas. Cuando una subestaci3n no puede suministrar m3s energ3a, el algoritmo de configuraci3n inicial adicionar3 otra subestaci3n al sistema con vistas a satisfacer las demandas de los nodos que todav3a no est3n ligados al sistema. Las primeras

subestaciones a ser evaluadas son aquellas que ya están construidas en el sistema, debido a que tienen un costo cero. La heurística continuará ubicando las subestaciones de menor costo para garantizar que todos los nodos con carga sean atendidos. La heurística no adiciona al sistema nodos sin carga a no ser que el respectivo nodo sea utilizado sólo como transporte, o para conectar algún otro nodo que tiene carga.

4.5. Estructura de la vecindad

Con la solución radial inicial, se encuentran los vecinos de esta solución. La estructura de vecindad es determinada a través de un cambio de ramas, siendo realizada de la siguiente forma:

- i. Sea una topología radial cualquiera de la red de distribución, incluya uno de los alimentadores que no está ligado en la configuración inicial. Debido a la inclusión de este alimentador, la configuración resultante puede ser radial o perder la radialidad, tornándose infactible.
- ii. Si la nueva configuración fuera infactible, se debe desconectar algún otro alimentador que haga la configuración vecina factible, es decir radial.
- iii. En este criterio, se tiene dos tipos de cambio de líneas:
Intrazona : cuando el cambio de líneas es dentro de un área servida por una subestación de distribución;
Interzona : cuando el cambio de líneas es realizado entre áreas servidas por subestaciones adyacentes.

Otra familia de vecindad, dentro de la vecindad de cambio de líneas es cuando se cambia el tamaño de conductor de líneas que no cumplan con los requisitos de capacidad de flujo de potencia del alimentador. Este concepto es conocido como *reconductoring* del sistema de energía eléctrica. Así, el sistema iniciará el proceso con el sistema básico que ya está construido y adicionará líneas para unir aquellos nodos con carga al sistema. Las líneas que son adicionadas son las de menor capacidad, y como es lógico pensar, las más atractivas sobre el aspecto económico. Será evaluado si el flujo de potencia que pasa por la línea cumple con los requisitos de capacidad. En el caso de no cumplir se adopta un conductor inmediatamente superior, consecuentemente de más alto costo, volviendo a calcular todo el flujo de potencia para la nueva propuesta de expansión del sistema.

4.6. Infactibilidades

Dentro de los problemas de infactibilidad que se puede encontrar son las configuraciones no radiales, mas como el criterio de vecindad es una estrategia adecuada, el problema de que el sistema propuesto no sea radial no ocurre, ya que, si en algún momento se encuentra alguna configuración no radial, el criterio de vecindad del algoritmo BT buscará retirar algún circuito, convirtiendo el sistema nuevamente en un sistema radial.

También dentro de las infactibilidades del sistema se encuentran las violaciones de límites de capacidad de líneas y niveles de tensión en los nodos más alejados de las subestaciones.

4.7. Evaluación de las configuraciones vecinas

Una vez determinada una configuración vecina factible, se debe encontrar el valor de la función objetivo (costo fijo, costo de operación, y pérdidas) de la respectiva configuración

para después de evaluar todos los vecinos propuestos implementar la transición pasando para la mejor configuración.

Para cada nuevo vecino, se evalúan las líneas que son construidas, así como el costo fijo de las respectivas líneas, el costo de cada nueva subestación también es adicionado a la función objetivo. Es calculado el costo de operación del sistema y también las restricciones de capacidad de las líneas, las tensiones de cada nodo son evaluadas y se penalizada en el caso de no de cumplir la restricción de mínima tensión. También es considerada dentro de la evaluación, la capacidad que cada subestación tiene que suministrar para el sistema, y si las respectivas subestaciones cumplen con esos límites de capacidad.

4.8. Lista tabú

La *Lista Tabú* es implementada con el objetivo de prevenir ciclos y evitar visitar configuraciones ya visitadas. Así, cuando una configuración es construida, los atributos usados para encontrar esa topología son colocados en la lista tabú. Por lo tanto, el movimiento reverso de esos atributos permanece prohibido durante un número especificado de iteraciones

El criterio de aspiración usado es el tradicional, o sea, cuando la función objetivo de una configuración cuyo atributo se encuentra en la lista tabú es de buena calidad ella es evaluada y su valor es penalizado. Si esta configuración penalizada es de buena calidad pasa a ser la nueva solución corriente.

4.9. Criterio de parada

El criterio de parada determina que, si la solución incumbente (la mejor solución encontrada) no presenta mejoría durante un número especificado de iteraciones, se debe interrumpir el proceso iterativo.

5. Pruebas y resultados

El algoritmo para la solución del problema de planeamiento de la expansión, propuesto en este trabajo, fue implementado en lenguaje de programación FORTRAN. Este programa fue desarrollado para ayudar al planeador a tomar decisiones futuras para la construcción de una red eléctrica.

Para testar el algoritmo implementado se utilizo un sistema con una subestación existente y una proyectada, tres líneas existentes y 13 líneas proyectadas. Se dividió el problema en tres periodos o horizontes de planeamiento, al finalizar cada horizonte obtendremos las configuraciones de los sistemas a ser construidos, así como su respectivo costo y características eléctricas. La configuración final de cada horizonte será la configuración inicial del siguiente horizonte de planeamiento.

En la tabla I se encuentran los datos eléctricos, costos fijos y de operación del conjunto de cables que pueden ser utilizados en la construcción de las líneas de distribución.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LOS TIPOS DE ALIMENTADORES PROPUESTOS

Cable	tipo	MVAmax	R(pu/km)	X(pu/Km)	CF(unid/KM)	CV(unid/KM/MVA)
1/0	1	9,00	0,3655	0,2520	20,00	1,00
2/0	2	11,00	0,2921	0,2466	30,00	2,00
3/0	3	12,50	0,2359	0,2402	40,00	4,00
4/0	4	14,00	0,1932	0,2279	50,00	5,00
2x1/0	5	19,00	0,1827	0,1260	60,00	6,00
2x2/0	6	22,40	0,1460	0,1233	70,00	7,00
2x3/0	7	25,00	0,1180	0,1201	80,00	8,00
2x4/0	8	28,00	0,0966	0,1140	90,00	9,00

En la tabla II están los datos de las líneas propuestas para el sistema, los nodos iniciales, nodos finales de cada línea, la distancia de las líneas, así como también las líneas que están formando parte del sistema existente.

TABLA II
DATOS DE LÍNEAS DEL SISTEMA I - CASO BASE

Línea	Nodo inicial	Nodo final	Ligado	Dist(Km)	Tipo Cable
1	1	10	1	0,200	1
2	3	10	1	0,200	1
3	2	1	1	0,100	1
4	7	3	0	0,100	0
5	6	2	0	0,200	0
6	5	11	0	0,100	0
7	7	8	0	0,100	0
8	3	4	0	0,100	0
9	8	12	0	0,100	0
10	11	6	0	0,100	0
11	1	5	0	0,100	0
12	6	9	0	0,100	0
13	12	11	0	0,100	0
14	9	12	0	0,100	0
15	4	11	0	0,100	0
16	10	5	0	0,230	0

La tabla III muestra las cargas de las barras para las diferentes etapas del planeamiento.

TABLA III
CARGAS DE LAS BARRAS

Nodo	MVA		
	Horizonte I	Horizonte II	Horizonte III
1	5	6	7
2	5	5,7	6,3
3	2	2,2	2,6
4	5	6	6,6
5	4	4,4	5,1
6	5	6,5	7,1
7	6,7	7,7	9,2
8	5	6	7
9	5	5,7	7
11	5	5	5

La Tabla IV están los datos de capacidad máxima y costo de las subestaciones. El costo de la subestación 10 es cero debido a que ella ya esta construida y forma parte del sistema inicial.

TABLA IV
DATOS DE LAS SUBESTACIONES DEL SISTEMA I

Sub	MVA	Costo(unid)
sub10	30	0
sub12	35	1500

En la figura 3 esta representado las líneas que forman el sistema inicial (líneas continuas) así como las líneas propuestas (líneas discontinuas) y sus respectivos nodos finales e iniciales.

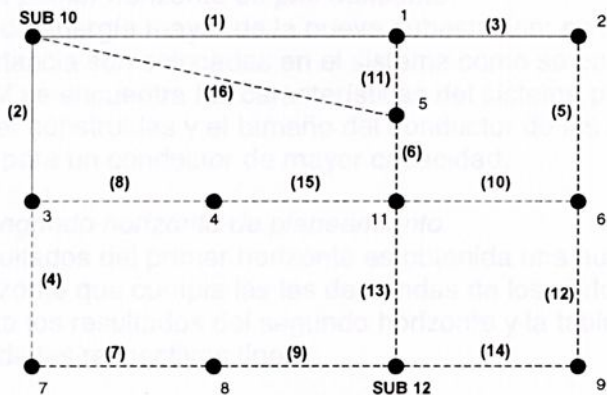


Fig. 3. Sistema inicial existente y líneas propuestas

5.1. Resultados del primer horizonte de planeamiento

En la figura 4 se observa la configuración propuesta para el primer horizonte de planeamiento, en la tabla V las características de las líneas que forman parte de este sistema. Así también es especificado la potencia suministrada por cada subestación, que fue obtenida por el flujo de potencia y el costo de esta propuesta.

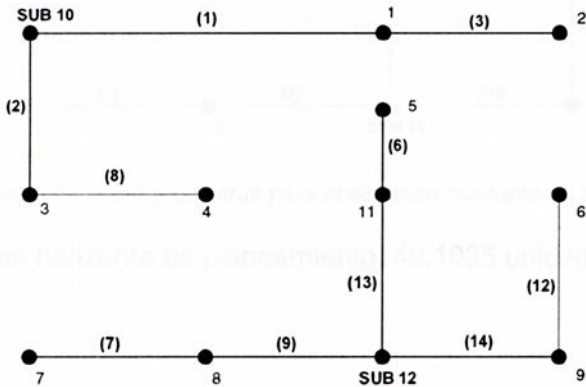


Fig. 4 Propuesta de la red a construir para el primer horizonte de planeamiento

Costo total del primer horizonte de planeamiento: 1540.4980 unidades

TABLA V
RESULTADOS DE LA PRIMERA FASE DEL SISTEMA I

Línea	ligación	tipo	Línea	ligación	tipo	Línea	ligación	tipo	Línea	ligación	tipo
1	1	2	5	0	—	9	1	3	13	1	2
2	1	1	6	1	1	10	0	—	14	1	2
3	1	1	7	1	1	11	0	—	15	0	—
4	0	—	8	1	1	12	1	1	16	0	—

La potencia suministrada por la subestación 10 y la subestación 12 son 10: 17.0983 MVA y 12: 30.7174 MVA respectivamente.

Comentarios sobre el primer horizonte de planeamiento

Hay una solicitud de energía mayor de la nueva subestación; en la solución final las líneas con menor distancia son colocadas en el sistema como se puede observar en la figura 4. En la tabla V se encuentra las características del sistema propuesto, las posibles líneas que pueden ser construidas y el tamaño del conductor de las respectivas líneas. La línea 1 es cambiada para un conductor de mayor capacidad.

5.2. Resultados del segundo horizonte de planeamiento

Iniciando con los resultados del primer horizonte es obtenida una nueva configuración para el segundo horizonte que cumpla las las demandas de los nodos de este horizonte. La figura 5 representa los resultados del segundo horizonte y la tabla VI las líneas a ser conectadas y el tipo de las respectivas líneas.

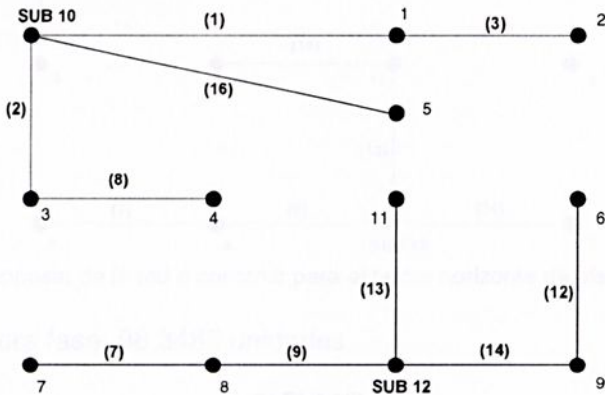


Fig.5 Propuesta de la red a construir para el segundo horizonte de planeamiento

Costo total del segundo horizonte de planeamiento: 49.1035 unidades

TABLA VI
RESULTADOS DE LA SEGUNDA FASE DEL SISTEMA I

Línea	ligación	tipo	Línea	ligación	tipo	Línea	ligación	tipo	Línea	ligación	tipo
1	1	3	5	0	—	9	1	4	13	1	2
2	1	1	6	0	—	10	0	—	14	1	3
3	1	1	7	1	1	11	0	—	15	0	—
4	0	—	8	1	1	12	1	1	16	1	1

La potencia suministrada por la subestación 10 y la subestación 12 son 24.4804 MVA y 30.9748 MVA respectivamente.

Comentarios sobre el segundo horizonte de planeamiento

Como se puede observar el costo de este horizonte es mucho menor, debido a q muchas de las líneas ya fueron construidas en el primer horizonte. El algoritmo BT intentará adicionar nodos en aquel sistema que está suministrando menos potencia es decir tratara que las subestaciones mas sobrecargadas alimenten menos nodos y estos nodos seran alimentados por subestaciones q suministran menos energía. Así, se puede observar que es adicionado el nodo 5 en el sistema suministrado por la subestación sub 10 (colocando el circuito 6) y es retirado de la subestación sub 12 (retirando el circuito 16)

5.3. Resultados del tercer horizonte de planeamiento

La figura 6 representa el sistema propuesto para el tercer horizonte de planeamiento, y en la tabla VII las características de este sistema.

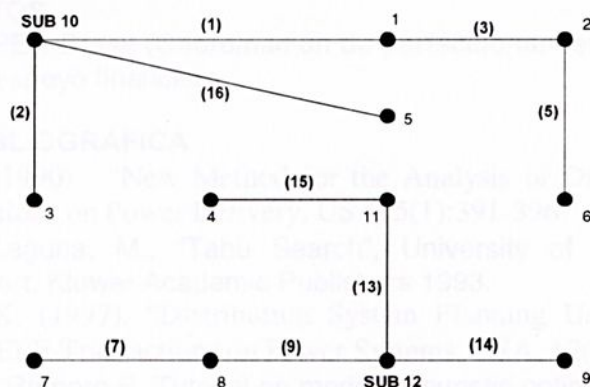


Fig. 6 Propuesta de la red a construir para el tercer horizonte de planeamiento

Costo total de la tercera fase: 96.3485 unidades

TABLA VII
RESULTADOS DE LA TERCERA FASE DEL SISTEMA I

Línea	ligación	tipo	Línea	ligación	tipo	Línea	ligación	tipo	Línea	ligación	tipo
1	1	6	5	1	1	9	1	5	13	1	3
2	1	5	6	0	—	10	0	—	14	1	3
3	1	4	7	1	2	11	0	—	15	1	1
4	0	—	8	0	—	12	0	—	16	1	1

La potencia suministrada por la subestación 10 y la subestación 12 son 10: 28.2899 MVA y 12: 34.6584 MVA respectivamente.

Comentarios sobre el tercer horizonte de planeamiento

En esta fase final es adicionado a la subestación sub12 (adicionando el circuito 15) el nodo 4 y liberado el nodo 6 (retirando el circuito 8), así las subestaciones trabajarán en su límite máximo.

5.CONCLUSIONES

- En este trabajo fue propuesta una formulación que considera las alternativas de construcciones de líneas y subestaciones en sistemas de distribución. La técnica de solución propuesta para resolver este problema de programación no lineal entero mixto del tipo binario (0/1), fue a través del algoritmo de busca tabú.
- La metodología propuesta es flexible, aplicada para análisis y estudios de planeamiento de algunos sistemas de distribución, entregando como resultado un conjunto de soluciones alternativas juntamente con la mejor solución para un problema.
- La principal ventaja de la utilización de esta técnica para resolver el problema de planeamiento está en la facilidad de trabajar con un modelo no lineal del problema e incorporar a la formulación modelos reales de componentes de los sistemas. La técnica de flujo de carga utilizada se mostró eficiente, segura y adecuada para la solución de este tipo de problema.
- En trabajos futuros se puede utilizar otras funciones especializadas del algoritmo busca tabú, que se pueden encontrar en la literatura especializada [2]

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a CAPES Brasil (Coordinación de perfeccionamiento de personas de nivel superior) por el apoyo financiero.

7. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Cespedes, R.(1990). "New Method for the Analysis of Distribution Networks" , IEEE Transactions on Power Delivery, USA, 5(1):391-396.
- [2] Glover, F., Laguna, M., "Tabu Search", University of Colorado at Boulder, Technical report, Kluwer Academic Publishers 1993.
- [3] Goswami, S.K. (1997). "Distribution System Planning Using Branch Exchange Technique", IEEE Transactions on Power Systems, USA, 12(2):718-723.
- [4] Montecelli A., Romero R. Tutorial on modern heuristic optimization techniques with application to power systems. IEEE 2002
- [5] Proença, L.B. "Algoritmos Genéticos no Planejamento da Expansão de Distribuição de Energia Eletrica", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 1993.
- [6] Ramirez Rosado, I.J., Bernal Agustín, J.L.(1998). "Genetic Algorithm Applied to the Design of Large Power Distribution Systems" , IEEE Transactions on Power Systems, USA, 13(2):696-703.
- [7] Thompson, G. L., Wall, D.L.(1981) "A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Locations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 5 : 2683-2688



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br

