

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
UNESP – FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PLANEJAMENTO E PROJETO DE CIRCUITOS SECUNDÁRIOS
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE
ALGORITMO BUSCA TABU**

Cezar Henrique de Souza

José Roberto Sanches Mantovani
Orientador

Antonio Marcos Cossi
Colaborador

Ilha Solteira, Agosto de 2006.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
UNESP – FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PLANEJAMENTO E PROJETO DE CIRCUITOS SECUNDÁRIOS
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE
ALGORITMO BUSCA TABU**

Cezar Henrique de Souza

José Roberto Sanches Mantovani
Orientador

Antonio Marcos Cossi
Colaborador

Dissertação submetida à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Ilha Solteira, Agosto de 2006.

*Dedico este trabalho a minha amada esposa
Keila Cristiane, que sempre me incentivou para
a realização dos meus ideais, encorajando-me
a enfrentar todos os momentos difíceis da vida.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido a graça de concluir mais uma etapa de minha caminhada com sucesso.

A meus pais, irmãos e familiares, pelo carinho, amor e apoio que muito contribuíram na minha formação.

Ao meu orientador José Roberto Sanches Mantovani, pela dedicação e doação dispensadas para a elaboração dessa dissertação.

Ao meu colaborador Antonio Marcos Cossi, pelo seu empenho, esforço e, em especial, pela demonstração de compreensão e solidariedade na solução dos problemas que surgiram.

Aos professores Antonio Padilha Feltrin e Rubén Romero Lázaro pela contribuição durante a realização desse trabalho.

Aos diretores da Incomel – Eletricidade e Telefonia, pelo apoio e confiança para a viabilização desse trabalho.

Aos colegas do laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica e a todos aqueles que participaram direta ou indiretamente desse trabalho, o meu **MUITO OBRIGADO!**

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se o desenvolvimento e a implementação de um algoritmo computacional para o problema de planejamento e projeto de circuitos secundários de distribuição de energia elétrica. O problema é formulado como um modelo de Programação Não Linear Inteiro Misto (PNLIM), e para sua solução propõe-se um algoritmo de Busca Tabu (BT). Esta ferramenta permite determinar e avaliar os custos dos elementos que compõem o sistema de distribuição (reforma e/ou construção de redes secundárias), evidenciando sua robustez e precisão. Os algoritmos de cálculo mecânico e definição de estruturas são baseados em normas técnicas para se determinar os postes e estruturas do sistema sob estudo. Os condutores são especificados pelo algoritmo de fluxo de potência trifásico respeitando as condições topológicas, físicas e ambientais. Toda metodologia de cálculo e projeto utilizada neste problema está de acordo com os Procedimentos de Distribuição do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Para mostrar a eficiência do modelo proposto e da metodologia de planejamento e projeto desenvolvidos, apresentam-se resultados para dois sistemas reais de distribuição com 76 e 54 barras, respectivamente.

ABSTRACT

In this work, the development and implementation of a computational algorithm for the planning and design of secondary circuits of power distribution systems problem, is presented. The problem is formulated as a Non-linear Integer Mixed Programming (NLIMP) problem; and for its solutions it is proposed a Tabu Search (TS) algorithm. This tool allows determining and evaluating the cost of elements that are part of the distribution system (upgrade and/or construction of secondary networks), showing its robustness and accuracy. Mechanic calculation algorithms and structure definitions are based on technical norms in order to determine poles and structures of the system under study. Conductors are specified by the three-phase power flow algorithm, satisfying topological, physical and environmental conditions. All the calculation and design methodology used in this problem agrees with the Distribution Procedures of the National Electric System (PRODIST). In order to show the efficiency of the proposed model and the developed planning and design methodology, results for to real-life distribution systems, with 76 and 54 buses, are presented.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de uma rede de distribuição radial.....	29
Figura 2.2: Seção de um ramo L.....	29
Figura 2.3: Diagrama de uma rede de distribuição fracamente malhada.....	31
Figura 2.4: Representação dos breakpoints usando injeção de corrente nodal.....	32
Figura 2.5: Diagrama de blocos do algoritmo de fluxo de potência.....	34
Figura 2.6: Representação da rede aérea de distribuição.....	35
Figura 2.7: Critérios para definição dos comprimentos nominais dos postes.....	37
Figura 2.8: Configurações de um sistema de distribuição.....	39
Figura 3.1: Funções da metaheurística BT	44
Figura 3.2: Estrutura do algoritmo de busca local	45
Figura 3.3: Uma transição em BT.....	46
Figura 3.4: Estrutura Básica do Algoritmo BT	47
Figura 3.5: Codificação do problema de planejamento e projetos de circuitos secundários	51
Figura 3.6: Diagrama de blocos do algoritmo para gerar a configuração inicial.....	52
Figura 4.1: Topologia da rede distribuição do sistema I.	68
Figura 4.2: Topologia da rede distribuição e resultados obtidos para o sistema II.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características nominais dos postes	36
Tabela 2.2: Estruturas básicas da rede secundária	38
Tabela 2.3: Estruturas básicas da rede primária	38
Tabela 4.1: Características dos cabos da rede secundária.....	61
Tabela 4.2: Características dos cabos da rede primária	61
Tabela 4.3: Características dos transformadores de distribuição.....	61
Tabela 4.4: Características do postes de distribuição	62
Tabela 4.5: Custos de investimentos das estruturas da rede secundária	63
Tabela 4.6: Custos de investimentos das estruturas da rede primária.....	63
Tabela 4.7: Parâmetros de controle do algoritmo BT para o sistema I.....	64
Tabela 4.8 Dados cargas nas barras por fase para o sistema I.	65
Tabela 4.9: Magnitudes de tensões nas barras para a configuração obtida através da prática para o sistema I.	69
Tabela 4.10: Elementos da configuração obtidos através da prática para o sistema I.	70
Tabela 4.11: Magnitudes de tensões nas barras para a configuração obtida através de ferramenta computacional para o sistema I.....	71
Tabela 4.12: Elementos da configuração obtidos através de ferramenta computacional para o sistema I.....	72
Tabela 4.13: Comparação entre as configurações analisadas do sistema I.	73
Tabela 4.14: Parâmetros de controle do algoritmo BT para o sistema II.....	74
Tabela 4.15. Dados cargas nas barras por fase para o sistema II.	75
Tabela 4.16: Resultados da nova configuração para os circuitos do sistema II.	76

Tabela 4.17: Custos totais obtidos do planejamento e operação do circuito do sistema II.....76

LISTA DE SÍMBOLOS

$abcn$	Refere-se às fases abc e neutro do circuito trifásico
C	Conjunto formado pelos tipos de cabo que podem ser instalados no circuito v
CFB_k	Custo fixo para balanceamento das cargas entre as fases
$CFCP_k$	Custo fixo do condutor da rede primária
$CFCS_k$	Custo fixo do condutor da rede secundária
$CFEP_k$	Custo fixo da estrutura primária
$CFES_k$	Custo fixo da estrutura secundária
CFR_k	Custo fixo para troca de cabos
CFT_k	Custo fixo do transformador
$CFPT_k$	Custo fixo do poste
C_{kwh}	Custo do kWh em U\$
E_i	Engastamento do poste.
f_i	Variável de decisão para instalação (1) ou não (0) de condutor primário na posição i
$F_{j\ total}$	Esforço resultante total na barra j ;
fp_f	Fator de penalidade para a restrição de fluxo de potência nas linhas;
F_{Pi}	Tração do cabo da rede primária;
fp_S	Fator de penalidade para a restrição capacidade de operação do transformador;
fp_v	Fator de penalidade para a restrição de limites de tensão;

F_{Ri}	Força resultante parcial;
F_{Si}	Tração do cabo da rede secundária;
F_{Ti}	Tração do cabo da rede telefônica;
F_{Xj}	Esforço resultante da projeção do eixo x da barra j;
F_{Yj}	Esforço resultante da projeção do eixo y da barra j;
g_i	Variável de decisão para a instalação (1) ou não (0) da estrutura primária na posição i
h_i	Variável de decisão para a instalação (1) ou não (0) da estrutura secundária na posição i
H_{util}	Altura útil do poste;
H_{Si}	Altura média de instalação da rede secundária;
H_{Ti}	Altura média de instalação da rede telefônica;
$I_{ij\ abcn}$	Corrente no ramo i-j
$I_{ij\ abcn}$	Fluxo no ramo i-j
$\bar{I}_{ij\ abcn}$	Máximo fluxo no ramo i-j
$KVAS_{consumidor}$	Demanda Estatística para o novo consumidor
$KVAS_{setor}$	Demanda estatística do setor ou circuito;
L	Conjunto formado pelos ramais existentes no circuito v
L_i	Comprimento nominal do poste de concreto;
M_R	Consumo médio estimado para o novo consumidor;
N	Conjunto que representa os possíveis locais para a instalação do transformador
NB	Conjunto formado pelas barras do circuito v
NC	Conjunto formado pelos circuitos existentes no sistema
Nt	Conjunto formado pelos transformadores existentes
N_X	Número de consumidores do setor a serem atendidos
P	Conjunto dos números que representa as posições das cargas nas fases
P_{Dabc}	Demanda de potência ativa
$P_i^C\ abc$	Potência ativa consumida na barra i nas fases abc
$P_{ij}^L\ abc$	Perda ativa no ramal i-j nas fases abc e neutro
$S_i^T\ abc$	Potência do transformador
Q_{Dabc}	Demanda de potência reativa

$Q_i^C_{abc}$	Potência reativa consumida na barra i nas fases abc
$Q_{ij}^L_{abc}$	Perda reativa no ramo i-j nas fases abc e neutro
R	Conjunto formado pelos tipos de cabo da rede primária que podem ser instalados
$R_{ij}^k_{abcn}$	Resistência dos condutores no ramo i-j a ser construído ou trocados
T	Número de horas compreendido no período de um ano de planejamento (8760 horas)
t_i	Variável de decisão para instalação (1) ou não (0) do transformador
V_{abcn}	Magnitude de tensão nodal
$V_i^{cal}_{abc}$	Tensão calculada na barra i
$V_i^{max}_{abc}$	Limite da magnitude de tensão na barra i (máxima)
$V_i^{min}_{abc}$	Limite da magnitude de tensão na barra i (mínima)
X_{ij}_{abcn}	Reatância dos condutores no ramo i-j
$y_{k,ij}$	Variável de decisão para a troca (1) ou não (0) de cabo no ramo i-j
Z	Função objetivo
θ_i	Diferença angular entre dois ramos conectado a barra j.
θ_{abcn}	Magnitude dos ângulos de tensão nodal
μ_k	Variável de decisão para o balanceamento (1) ou não (0) das cargas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	23
2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	24
2.1	MODELO MATEMÁTICO	26
2.2	FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO A QUATRO FIOS	28
2.2.1	FLUXO DE POTÊNCIA PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS.....	28
2.2.2	FLUXO DE POTÊNCIA PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO FRACAMENTE MALHADAS.....	31
2.3	CÁLCULO MECÂNICO	34
2.4	DEFINIÇÃO DAS ESTRUTURAS	38
3	METODOLOGIA	40
3.1	O ALGORITMO BUSCA TABU	40
3.1.1	INTRODUÇÃO	41
3.1.2	ESPAÇO DE BUSCA E ESTRUTURA DE VIZINHANÇA	41
3.1.3	PRINCÍPIOS BÁSICOS.....	43
3.1.4	MEMÓRIA DE CURTO PRAZO	46
3.1.4.1	LISTA TABU	48
3.1.4.2	CRITÉRIO DE ASPIRAÇÃO	49
3.1.4.3	CRITÉRIO DE PARADA	49
3.2	BUSCA TABU DEDICADO AO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO E PROJETO ...	50

3.2.1	SISTEMA DE CODIFICAÇÃO	50
3.2.2	ALGORITMO CONSTRUTIVO PARA OBTER A CONFIGURAÇÃO INICIAL	52
3.2.3	AValiação DAS CONFIGURAÇÕES E INFECTIBILIDADES	55
3.2.4	ESTRUTURA DE VIZINHANÇA	57
3.2.5	CRITÉRIO DE ASPIRAÇÃO E CRITÉRIO DE PARADA.....	58
4	RESULTADOS	59
4.1	DADOS DE ENTRADA	59
4.1.1	CARGAS.....	60
4.1.2	CONDUTORES.....	60
4.1.3	TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICOS.....	61
4.1.4	POSTES	62
4.1.5	ESTRUTURAS DAS REDES PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA.....	62
4.2	SISTEMA I.....	64
4.3	SISTEMA II.....	73
4.4	COMENTÁRIOS DOS TESTES.....	76
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

O setor elétrico brasileiro tem sofrido um processo de grandes mudanças em sua estrutura nos últimos anos. Da privatização de boa parte das empresas distribuidoras, surgiu a necessidade de regulamentação estabelecendo novas regras para a prestação de serviços públicos de fornecimento de energia elétrica aos consumidores. A incrível evolução tecnológica, a crescente conscientização dos consumidores com relação a seus direitos e a necessidade de garantir a universalização do acesso em um futuro próximo, torna a energia elétrica um produto indispensável. Essas mudanças trouxeram novos desafios aos profissionais do setor elétrico, principalmente aqueles das empresas de distribuição, exigindo a correta compreensão dos problemas e das possíveis soluções (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

A importância de estudos de otimização e expansão de circuitos secundários está no fato destes concentrarem a maior parte das perdas de todo o sistema de energia elétrica, devido a sua baixa tensão. Essa otimização da expansão envolve a instalação de transformadores abaixadores e a conexão destes com os pontos de consumo (GÖNEN, 1986). O estudo de planejamento de circuitos secundários de distribuição de energia elétrica consiste basicamente em minimizar os custos operacionais e, principalmente, de investimentos, respeitando todas as regulamentações e padronizações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). O objetivo é possibilitar a conexão elétrica dos consumidores aos sistemas de distribuição, garantindo que os padrões de qualidade de serviço

sejam atingidos, conservando a segurança, a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos.

Sob o aspecto da pesquisa operacional, o planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica é um problema complexo que apresenta característica de explosão combinatória. Várias técnicas de otimização têm sido empregadas para a solução desse problema.

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para a solução de problemas de planejamento e projeto de circuitos secundários de distribuição usando uma técnica de otimização não linear conhecida como Busca Tabu. São empregadas variáveis inteiras e binárias, um programa de fluxo de potência trifásico e um programa de cálculo mecânico e estrutural para definição das características nominais dos postes e das estruturas de redes primárias e secundárias. O algoritmo de fluxo de potência utiliza o método de varredura (forward-backward) recomendado pelo PRODIST, que é utilizado para avaliar o estado de redes radiais e fracamente malhadas. Genericamente, nesta metodologia avalia-se cada configuração proposta de acordo com os critérios a seguir:

- Previsão de rede primária: Para o caso de expansão de redes deve-se verificar junto ao setor de planejamento das concessionárias de energia elétrica a existência de previsão de alimentadores para área do núcleo habitacional ou loteamento em análise ou para áreas adjacentes de forma a se compatibilizar os projetos do ponto de vista técnico-econômico. Portanto, o roteamento dos alimentadores primários deve basear-se nos projetos unifilares elaborados pela área de planejamento das concessionárias, podendo essa análise ser feita conjuntamente quando necessário;
- Definição de circuitos secundários: Na obtenção do modelo matemático proposto consideram-se os custos relativos a rede primária, as estruturas primárias e secundárias, aos postes e outros. São adotadas e implementadas no modelo para obtenção de soluções otimizadas de qualidade as seguintes ações de planejamento:
 - *BALANCEAMENTO DE CARGAS*: Níveis inadequados de tensão podem surgir com o desequilíbrio das correntes nas fases *abc* de um circuito. A fase mais carregada apresentará maior nível de queda de tensão, além disso, poderá surgir nível indesejado de corrente no neutro e,

conseqüentemente, maiores perdas elétricas. Entretanto, através do balanceamento de cargas ao longo de todo o comprimento do circuito consegue-se corrigir boa parte destes problemas, fazendo-se o devido equilíbrio das cargas;

- *RECONDUTORAMENTO*: A especificação adequada de condutores está diretamente relacionada às restrições de nível de tensão e fluxo de potência nos alimentadores. Esta técnica especifica os condutores para cada ramo do circuito secundário de forma a minimizar os investimentos respeitando as restrições citadas acima;

- *LOCALIZAÇÃO, CAPACIDADE E QUANTIDADE DOS POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO*: As configurações dos circuitos secundários e os ramais primários são determinados basicamente pelos postos de transformação. Os pontos indicados na planta de projeto como reservados para a área comercial ou para áreas com cargas importantes (reservatórios elevados, estação de tratamento de esgoto) são privilegiadas. Assim, sem prejuízo da configuração global, deve-se procurar colocar os transformadores projetados na frente ou adjacente a essas áreas. Em último caso, pelo menos, procura-se alocar a rede primária de tal forma a facilitar a futura ligação desses consumidores, quando surgirem, pela instalação de novos transformadores. Portanto, os postos de transformação contribuem significativamente na qualidade de uma solução.

No algoritmo de otimização implementado no sistema computacional desenvolvido para solução do problema utiliza-se uma heurística construtiva para a geração de configuração inicial com vistas a se obter uma solução inicial de boa qualidade, e reduzir o tempo computacional do algoritmo de busca tabu (*BT*) implementado para solução do problema de otimização resultante. Cada configuração é avaliada através da função de adaptação de acordo com os resultados do fluxo de potência trifásico implementado e do cálculo mecânico-estrutural. O sistema computacional desenvolvido é uma ferramenta de análise, planejamento e projeto para redes radiais, com vistas a encontrar a configurações otimizadas sob os aspectos técnicos e econômicos.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura existem poucos trabalhos que estudam o problema de planejamento e projetos de circuitos secundários de distribuição de energia elétrica. A seguir apresentam-se alguns modelos e técnicas de solução propostas por pesquisadores da área para o problema de planejamento e projetos de circuitos secundários de distribuição.

SOUZA E JR. (2001)

Apresentam uma metodologia para a otimização de projeto de rede secundária de distribuição de energia elétrica baseada em programação matemática. A programação matemática é uma ferramenta da pesquisa operacional empregada no processo de obtenção de modelos quantitativos com representação matemática.

O problema consiste em construir uma rede que atenda a demanda dos consumidores com segurança, confiabilidade e viável do ponto de vista econômico. A metodologia para a solução desse problema propõe a avaliação dos seguintes critérios:

Balanceamento de cargas: De acordo com o total de carga de consumidores da rede em estudo, determina-se o índice de balanceamento de cargas no transformador. O objetivo é minimizar a diferença entre o total de cargas nas fases A, B e C;

Posicionamento do transformador: O posicionamento do transformador é realizado através de uma função que procura minimizar o momento elétrico associado ao poste j em relação ao poste k . Este momento elétrico é definido como sendo o produto entre a carga no poste j e a distância do poste j ao poste k do transformador;

Dimensionamento dos condutores: Baseia-se na obtenção da tensão desejada. O objetivo é minimizar os investimentos para instalação dos cabos escolhidos em cada trecho, considerando a tensão no poste em estudo e a queda de tensão nos postes posteriores.

As soluções obtidas baseiam-se em modelos simples e principalmente, com rápido tempo de resposta.

COSTA E FRANÇA (2002)

Para o estudo do problema de planejamento de redes secundária de distribuição de energia elétrica foram propostas quatro formulações matemáticas e um novo método de resolução do subproblema de alocação de transformadores através do método das *p-medianas*. Tais formulações matemáticas são: (1) Formulação Baseada em Nós (FBN); (2) Formulação Baseada em Arcos (FBA); (3) Formulação Multi-produto Baseada em Nós (FMBN); (4) Formulação Multi-produto Baseada em Arcos (FMBA), sendo que apenas as duas primeiras formulações foram apresentadas no referido artigo.

Na FBN e FBA a otimização considera todos os principais custos e restrições do problema, porém buscando um comprometimento entre os custos de investimento para instalação e os custos de operação. Os custos de investimentos considerados são condutoramentos primário e secundário e instalação de transformadores. Já os custos de operação estão relacionados a perdas nas redes primária e secundária considerando toda vida útil da rede planejada. Tratam-se as perdas na rede secundária através de um custo quadrático optando-se por uma linearização por partes. As restrições são conservação do fluxo, capacidade de transformação, capacidade nos arcos e definição das variáveis;

O método de resolução proposta consiste em subdividir o problema de planejamento em três subproblemas: a localização dos transformadores p_1 , o roteamento da rede secundária p_2 e o roteamento da rede primária p_3 .

O método de resolução do problema das *p-medianas* para a alocação de transformadores e roteamento dos alimentadores secundários é adaptado por meio da relaxação lagrangiana ao invés de um algoritmo guloso seguido de melhoria (encontrado freqüentemente na literatura). O roteamento dos alimentadores primários é realizado pelo método das *árvores geradoras mínimas* seguido de uma busca local.

GARCIA ET AL. (2003)

Propõe um método GRASP (PARDALOS e RESENDE, 2001; RESENDE e WERNECK, 2002) para resolver o problema de planejamento a curto e longo prazo de redes secundárias de distribuição. A técnica proposta visa reduzir os custos de investimento e de perdas, obedecendo as restrições do problema, que incluem capacidade de equipamentos, configuração radial e limites de tensão, encontrando assim, a localização dos transformadores e o traçado dos circuitos secundários e primários.

Adota-se também a decomposição do problema em subproblemas e os resolvem separadamente. Os três subproblemas são a localização dos transformadores p_1 , o roteamento da rede secundária p_2 e o roteamento da rede primária p_3 .

O método GRASP concentra-se na resolução do problema com maior nível na hierarquia (p_1). Resolve o problema de localização/dimensionamento dos transformadores como um problema de *p-medianas não capacitado*, o qual consiste em encontrar p transformadores conectando cada carga ao transformador mais próximo e minimizando a soma dos momentos elétricos. Despreza-se a capacidade dos transformadores, pois o problema não-capacitado deve ser mais simples de resolver.

A abordagem utilizada para a determinação do circuito secundário (p_2) é a do *problema de caminhos mínimos*, ou seja, tenta-se conectar cada nó de demanda ao transformador mais próximo. Para a determinação do circuito primário (p_3) deve-se minimizar a dimensão da rede, podendo-se desprezar as perdas. Para contornar a perda de qualidade introduzida pela decomposição do problema realiza-se uma busca local, atuando na mudança de posição das medianas e recalculando o custo global. Embora um pouco restritos, os estudos práticos mostraram a eficiência do método.

GARCIA ET AL. (2004)

Para o problema de planejamento de redes secundárias adota-se uma função objetivo que minimiza os custos anualizados de investimentos e perdas, sujeita às restrições que incluem capacidade de equipamentos, configuração radial e

limites de tensão. O método apresenta como resultado os postes que devem receber os transformadores, capacidade de cada transformador instalado, circuito radial correspondente a cada transformador, especificação dos cabos utilizados e traçados da rede primária para interligar os transformadores.

O método de resolução é subdividido em três subproblemas clássicos que são a localização dos transformadores p_1 , o roteamento da rede secundária p_2 e o roteamento dos alimentadores primários p_3 . A metodologia compreende uma etapa construtiva seguida de uma busca local (melhoramento).

No subproblema p_1 é empregado um algoritmo guloso que minimiza a soma dos momentos elétricos. A abordagem utilizada para o subproblema p_2 baseia-se no problema de *caminhos mínimos*.

COSSI, ROMERO E MANTOVANI (2005)

O problema de planejamento de circuitos secundários radiais ou fracamente malhados foi formulado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM). Para a solução deste problema propôs-se a utilização de algoritmo genético.

O problema consiste basicamente em atender as demandas dos consumidores procurando minimizar os custos de operação e, principalmente de investimentos, atendendo as seguintes restrições operacionais:

- Restrições Elétricas: Fluxo de potência, baseado nas leis de Kirchhoff (lei das correntes e das tensões), limite queda de tensão do circuito secundário e limite máximo de fluxo de potência dos condutores;
- Restrição física de operação dos equipamentos: Capacidade máxima de operação dos transformadores;
- Restrição Financeira: Recurso financeiro disponível para o planejamento e expansão dos circuitos.

A função objetivo envolve os custos de investimentos na instalação de novos elementos (cabos, transformadores abaixadores, etc.) e os custos de perda de potência necessária para operar o sistema.

A proposta para se encontrar uma solução de ótima qualidade limita-se a três fatores: (i) Balanceamento adequado das cargas entre as fases do circuito trifásico; (ii) Posicionamento do transformador o mais próximo possível do centro de

carga do circuito; (iii) Recondutoramento dos circuitos. Utiliza-se um programa de cálculo de fluxo de potência trifásico a quatro fios para avaliar o estado do circuito.

O esquema de codificação utiliza base decimal e representa de forma simples e eficiente a técnica de solução proposta. Neste esquema, tem-se: (i) As posições $k=1,...,nb$ indicam as cargas nas fases abc, isto é, a ligação de cargas ativa e reativa em cada barra k do circuito; (ii) As posições seguintes $L=1,...,nl$ identificam as bitolas dos condutores em cada um dos ramos do circuito; (iii) A ultima posição indica a barra k na qual o transformador está alocado.

A população inicial é gerada aleatoriamente e o tamanho da população varia de acordo com o espaço de busca. Cada topologia é avaliada através da função de adaptação. Devido a natureza não linear das restrições do problema a função de adaptação considera custos de investimentos, de operação e penalização devido a violação de restrições.

Para a seleção das configurações que irão participar dos processos de recombinação e mutação, aplica-se a técnica de elitismo separando uma porcentagem das configurações de melhor qualidade da população corrente (configurações de elite). A seguir utiliza-se a técnica de torneio onde são realizados n jogos com k configurações participantes, sendo n o tamanho da população, excluídas as configurações de elite.

O processo de recombinação considera a recombinação de um único ponto para cada tipo de variável (balanceamento de carga, bitola dos condutores e posicionamento do transformador). Já o processo de mutação consiste em fazer as seguintes modificações na estrutura do cromossomo de acordo com a taxa de mutação preestabelecida: (i) trocar cargas das fases; (ii) alterar bitola do cabo; (iii) alterar a posição do transformador.

O controle de diversidade da população é realizado através da definição de uma taxa de diversificação, calculada em cada geração após a seleção. Caso a taxa de uma geração seja inferior a um valor preestabelecido, o mecanismo de controle de diversidade aumenta a taxa de mutação.

O critério de convergência consiste em verificar a variação da solução incumbente. A solução incumbente é a melhor solução encontrada durante o processo de transição. O processo é considerado convergido se durante um número especificado de iterações a solução incumbente não apresenta melhoria.

A solução encontrada para o problema analisado apresenta uma

topologia com perfis de tensão das barras dentro dos limites de qualidade e com custos relativamente reduzidos (respeitando a ordem de prioridades de investimentos).

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto desta dissertação é composto por este capítulo introdutório e está organizado da seguinte forma:

No Capítulo II apresenta-se a formulação utilizada na modelagem do problema de planejamento e projetos de circuitos secundários de distribuição. A formulação adotada é constituída por uma função custo e restrições operacionais dos equipamentos, transformadores abaixadores e alimentadores utilizados na operação e planejamento, restrição financeira, além do fluxo de potência trifásico a quatro fios (três fases e neutro) baseado em formulações das leis de Kirchhoff. A técnica metaheurística adotada neste trabalho é um algoritmo de busca tabu básico (BT). A metodologia de cálculos mecânicos para definição de estruturas para redes primárias e circuitos secundários é também apresentada neste capítulo.

No Capítulo III detalham-se os fundamentos teóricos e básicos e a estrutura do algoritmo busca tabu para a solução do problema do planejamento de circuitos secundários de distribuição – esquema de codificação, avaliação da função de adaptação, mecanismos de transição e estrutura de vizinhança adotados e dedicados ao problema de planejamento e projetos de sistemas de distribuição de energia elétrica em baixa tensão.

No Capítulo IV apresentam-se os resultados obtidos com testes efetuados para dois sistemas novos de distribuição de baixa tensão.

No Capítulo V conclui-se o trabalho, comentando o estudo desenvolvido e alguns resultados obtidos.

2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

No modelo de planejamento e projeto de sistemas secundários de distribuição, a função objetivo envolve os custos fixos e variáveis dos elementos que compõem os circuitos secundários de distribuição, tanto na operação quanto na expansão. A solução ótima refere-se ao menor custo calculado para uma dada configuração inicial da rede. Os custos fixos representam os investimentos na instalação de novos elementos (estruturas, cabos, transformadores abaixadores, etc) no sistema. Os custos variáveis representam as despesas necessárias para operar o sistema elétrico. As seguintes restrições impostas garantem a operação do sistema em condições técnicas e economicamente viáveis:

- As restrições do fluxo de potência permitem determinar diretamente o estado da rede em que as leis de Kirchhoff (lei das correntes e das tensões) asseguram o balanço de demanda para cada nó do circuito, fazendo com que o somatório do fluxo líquido de potência seja nulo;
- As restrições de limites de tensão impõem que a tensão em cada nó do circuito seja mantida dentro de limites preestabelecidos, evitando grandes variações de tensões. O valor dessas variações de tensões é de grande importância para a qualidade do serviço e, conseqüentemente, é um fator a considerar no planejamento e na operação dos sistemas de distribuição;
- As restrições do máximo fluxo de potência nos alimentadores garantem os limites da capacidade nos alimentadores (existentes ou futuros), durante o período de planejamento. Esse máximo fluxo de potência chama-se intensidade máxima admissível e está associada à intensidade

de corrente que circula pelos alimentadores sem que produza qualquer anomalia nos mesmos;

- As restrições da capacidade de operação do transformador asseguram que as capacidades totais dos transformadores alocados nos circuitos secundários sejam suficientes para atender a demanda durante o período de planejamento.

Em síntese, o problema de planejamento e projeto de circuitos secundários de distribuição de energia elétrica pode ser formulado genericamente como:

$$\text{Minimizar} \left\{ \begin{array}{l} - \text{Custos de investimentos (condutores e estruturas das redes} \\ \text{primária e secundária, transformadores, chaves fusíveis,} \\ \text{aterramentos, pára-raios, engastamentos, postes; mão-de-obra e} \\ \text{outros).} \\ - \text{Custos operacionais (perdas).} \end{array} \right.$$

Sujeito à:

- *Restrição de fluxo de potência;*
- *Restrições de limites tensão secundária;*
- *Restrições físicas de operação dos transformadores.*

A seguir apresentam-se o modelo matemático do problema de planejamento e projeto de circuitos secundários de distribuição e as técnicas de auxiliares que são utilizadas para solução do modelo matemático por meio de busca tabu. Além dessa metaheurística, outras técnicas são necessárias: fluxo de potência trifásico a quatro fios, cálculo mecânico e definição de estruturas. Sem elas não há como avaliar a função de adaptação e o conjunto de restrições de cada configuração visitada no espaço de busca do problema.

2.1 MODELO MATEMÁTICO

Matematicamente o planejamento e projetos de circuitos secundários de distribuição podem ser formulados como um problema de Programação Não Linear Inteiro Misto (PNLIM) da seguinte forma:

$$\text{Min } Z = \sum_{v \in NC} \left[\sum_{k \in C} \sum_{ij \in L} \left[CFCS_k + C_{kWh} \cdot T \cdot R_{ijabcn}^k \cdot |I_{ijabcn}|^2 \right] \cdot y_{k,ij} + \sum_{ij \in L} \left[CFR_k + C_{kWh} \cdot T \cdot R_{ijabcn}^k \cdot |I_{ijabcn}|^2 \cdot \left(1 - \sum_{k \in C} y_{k,ij} \right) \right] + \sum_{k \in N} CFT_k \cdot ti + \sum_{k \in P} CFB_k \cdot u_k + \sum_{k \in S} CFEP_k \cdot gi + \sum_{k \in W} CFES_k \cdot hi + \sum_{k \in R} CFCP_k \cdot fi + \sum_{k \in Q} CFPT_k \right] \quad (2.1)$$

$$W(P_{D_{abc}}, Q_{D_{abc}}, V_{abcn}, \theta_{abcn}) = 0 \quad (2.2)$$

$$V_{abcn}^{\min} \leq V_{abcn}^{\text{Cal}} \leq V_{abcn}^{\max} \quad (2.3)$$

$$|I_{ijabcn}| \leq \bar{I}_{ijabcn} \quad (2.4)$$

$$\sum_{i \in NB} S_{iabc}^C + \sum_{ij \in L} S_{ijabcn}^L \leq \sum_{i \in Nt} S_{iabc}^T \quad (2.5)$$

$$\sum_{k \in C} y_{k,ij} \leq 1, \forall ij \in L \quad (2.6)$$

Sendo:

Z : função objetivo; T : número de horas compreendido no período de um ano de planejamento (8760 horas); C_{kWh} : custo do kWh em U\$; NC : conjunto formado pelos circuitos existentes no sistema; L : conjunto formado pelos ramais existentes no circuito v ; C : conjunto formado pelos tipos de cabo que podem ser instalados no circuito v ; N : conjunto que representa os possíveis locais para a instalação do transformador; P : conjunto dos números que representa as posições das cargas nas fases; Q : conjunto formado pelos tipos de postes; R : conjunto formado pelos tipos de cabo da rede primária que podem ser instalados; NB : conjunto formado pelas barras do circuito v ; Nt : conjunto formado pelos transformadores existentes; CFR_k : custo fixo para troca de cabos; CFT_k : custo fixo do transformador; CFB_k : custo fixo para balanceamento das cargas entre as fases; $CFES_k$: custo fixo da estrutura

secundária; $CFEP_k$: custo fixo da estrutura primária; $CFCS_k$: custo fixo do condutor da rede secundária (instalação); $CFPT_k$: custo fixo do poste da rede secundária; $CFCP_k$: custo fixo do condutor da rede primária; $y_{k,ij}$: variável de decisão para a troca (1) ou não (0) de cabo no ramo i-j; t_i : variável de decisão para instalação (1) ou não (0) do transformador; f_i : variável de decisão para instalação (1) ou não (0) de condutor primário na posição i; h_i : variável de decisão para a instalação (1) ou não (0) da estrutura secundária na posição i; g_i : variável de decisão para a instalação (1) ou não (0) da estrutura primária na posição i; μ_k : variável de decisão para o balanceamento (1) ou não (0) das cargas; $abcn$: refere-se às fases abc e neutro do circuito trifásico; $I_{ij\ abcn}$: corrente no ramo i-j; $R_{ij\ abcn}^k$: resistência dos condutores no ramo i-j a ser construído ou trocados; P_{Dabc} : demanda de potência ativa; Q_{Dabc} : demanda de potência reativa; V_{abcn} : magnitude de tensão nodal; θ_{abcn} : magnitude dos ângulos de tensão nodal; $X_{ij\ abcn}$: reatância dos condutores no ramo i-j; $V_i^{min\ abc}$: limite da magnitude de tensão na barra i (mínima); $V_i^{max\ abc}$: limite da magnitude de tensão na barra i (máxima); $V_i^{cal\ abc}$: tensão calculada na barra i; $I_{ij\ abcn}$: fluxo no ramo i-j; $\bar{I}_{ij\ abcn}$: máximo fluxo no ramo i-j; $P_i^C\ abc$: potência ativa consumida na barra i nas fases abc; $P_{ij}^L\ abc$: perda ativa no ramal i-j nas fases abc e neutro; $Q_i^C\ abc$: potência reativa consumida na barra i nas fases abc; $Q_{ij}^L\ abc$: perda reativa no ramal i-j nas fases abc e neutro; $S_i^T\ abc$: potência aparente do transformador.

A função objetivo (equação (2.1)) envolve os custos fixos e variáveis dos elementos que compõem o sistema de distribuição (sistema primário e circuito secundário). Os custos fixos representam os investimentos na instalação de novos elementos (cabos, transformadores abaixadores, postes, estruturas etc) e os custos variáveis, a perda de potência necessária para operar o sistema elétrico.

A solução da equação (2.2) fornece o estado da rede em que as leis de Kirchhoff (lei das correntes e das tensões) asseguram o balanço de demanda para cada nó do circuito, fazendo com que o somatório do fluxo líquido de potência seja nulo. Na equação (2.3) impõe-se que o perfil de tensão para cada nó do circuito seja mantido dentro de limites preestabelecidos, evitando grandes variações de tensões. Na equação (2.4), assegura-se o limite da capacidade de fluxo nos condutores (existentes ou futuros), durante o período de planejamento. A equação (2.5) assegura que a capacidade total dos transformadores seja suficiente para atender a demanda durante o período de planejamento. A equação (2.6) estabelece que apenas um tipo de cabo pode ser escolhido para ser instalado ou trocado num possível recondutoramento nos ramais do circuito. Os termos $P_{ij\ abcn}^L$ e $Q_{ij\ abcn}^L$ representam as perdas elétricas e são dados pelas seguintes equações:

$$P_{ij\text{abcn}}^L = R_{ij\text{abcn}} \times |I_{ij\text{abcn}}|^2 \quad (2.7)$$

$$Q_{ij\text{abcn}}^L = X_{ij\text{abcn}} \times |I_{ij\text{abcn}}|^2 \quad (2.8)$$

2.2 FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO A QUATRO FIOS

O cálculo de fluxo de potência é baseado no modelo de fluxo trifásico a quatro fios para redes de distribuição de energia elétrica radiais ou fracamente malhadas (CHENG e SHIRMOHAMMADI, 1995 e CIRIC, FELTRIN e OCHOA, 2003) para se obter o estado de todas as barras do sistema de distribuição em análise, ou seja, realiza o cálculo de fluxo de potência para os “ n ” circuitos existentes. Porém, antes de se processar o fluxo de potência é necessária a renumeração das barras para se obter resultados adequados. Esta renumeração é desenvolvida em duas etapas: (1) Renumeração das barras para circuitos radiais; (2) Renumeração das barras para circuitos fracamente malhados. Desta forma, independentemente da radialidade do sistema de distribuição, o cálculo de fluxo de potência é capaz apresentar solução do estado das barras. A seguir apresenta-se o cálculo de fluxo de potência para redes radiais e, posteriormente, para redes fracamente malhadas.

2.2.1 FLUXO DE POTÊNCIA PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

A figura. 2.1 ilustra a topologia de uma rede de distribuição radial. Note que as barras são ordenadas por camadas a partir da barra de referência (barra do posto de transformação). Esta topologia é obtida através do processo de renumeração das barras por camadas, ou seja, mesmo que a numeração original das barras não esteja ordenada o processo de renumeração as ordena numericamente por camadas.

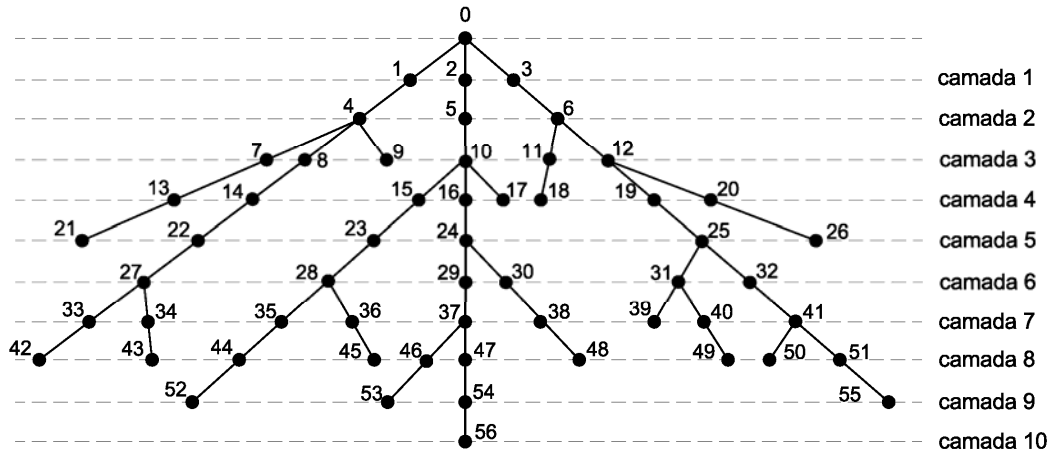
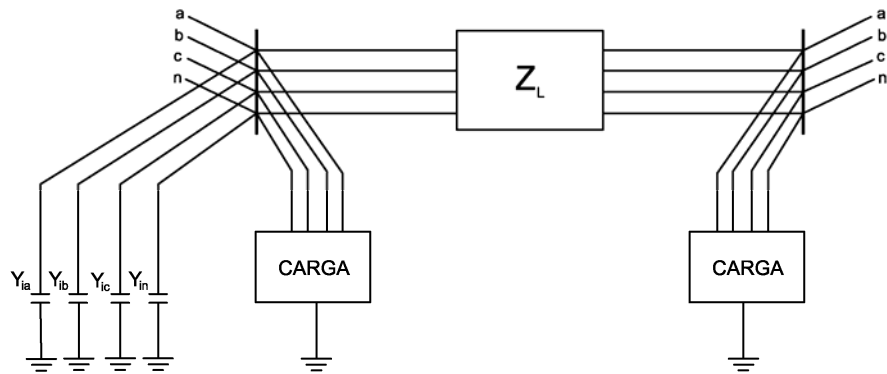


Figura 2.1: Diagrama de uma rede de distribuição radial

A figura. 2.2 representa a seção de um ramo L em uma rede trifásica.

Figura 2.2: Seção de um ramo L

Para a seção da figura. 2.2 a matriz de impedância série Z_L pode ser representada pela equação (2.9).

$$Z_L = \begin{bmatrix} Z_{aa,L} & Z_{ba,L} & Z_{ca,L} & Z_{na,L} \\ Z_{ab,L} & Z_{bb,L} & Z_{cb,L} & Z_{nb,L} \\ Z_{ac,L} & Z_{bc,L} & Z_{cc,L} & Z_{nc,L} \\ Z_{an,L} & Z_{bn,L} & Z_{cn,L} & Z_{nn,L} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

O cálculo de fluxo de potência é realizado por meio de um processo iterativo. Adotam-se valores de tensão (valor eficaz e ângulo de fase) para a barra de referência e para todas as outras barras do sistema. Segue abaixo a descrição de todo o processo de cálculo de fluxo de potência:

- i.* Cálculo da injeção de corrente de fase para cada barra da rede conforme a equação (2.10). A corrente de neutro pode ser obtida por meio da equação (2.11);

$$\begin{bmatrix} I_{ka} \\ I_{kb} \\ I_{kc} \end{bmatrix}^{(Ki)} = \begin{bmatrix} (S_{ka} / V_{ka}^{(Ki-1)})^* \\ (S_{kb} / V_{kb}^{(Ki-1)})^* \\ (S_{kc} / V_{kc}^{(Ki-1)})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ka}^* & & \\ & Y_{kb}^* & \\ & & Y_{kc}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kc} \end{bmatrix}^{(Ki)} \quad (2.10)$$

$$[I_{kn}]^{(Ki)} = -[I_{ka} + I_{kb} + I_{kc}]^{(Ki)} \quad (2.11)$$

ii. Partindo-se dos ramos da última camada em direção à camada da barra de referência, calculam-se as correntes em cada ramo L fazendo-se a soma da corrente da própria barra com a corrente de todos os ramos que derivam até a mesma barra (lei das correntes nos nós), conforme equação (2.12). Note que o sinal negativo na equação (2.12) é para ficar consistente com a injeção de corrente em (2.10);

$$\begin{bmatrix} J_{La} \\ J_{Lb} \\ J_{Lc} \\ J_{Ln} \end{bmatrix}^{(Ki)} = - \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \\ I_{Ln} \end{bmatrix}^{(Ki)} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mb} \\ J_{mc} \\ J_{mn} \end{bmatrix}^{(Ki)} \quad (2.12)$$

iii. Em seguida, calcula-se a nova tensão para cada barra de acordo com a equação (2.13), partindo-se da barra de referência em direção às ultimas camadas;

$$\begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kc} \\ V_{kn} \end{bmatrix}^{(Ki)} = \begin{bmatrix} V_{(k-1)a} \\ V_{(k-1)b} \\ V_{(k-1)c} \\ V_{(k-1)n} \end{bmatrix}^{(Ki)} - \begin{bmatrix} Z_{aa,L} & Z_{ba,L} & Z_{ca,L} & Z_{na,L} \\ Z_{ab,L} & Z_{bb,L} & Z_{cb,L} & Z_{nb,L} \\ Z_{ac,L} & Z_{bc,L} & Z_{cc,L} & Z_{nc,L} \\ Z_{an,L} & Z_{bn,L} & Z_{cn,L} & Z_{nn,L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_{La} \\ J_{Lb} \\ J_{Lc} \\ J_{Ln} \end{bmatrix}^{(Ki)} \quad (2.13)$$

iv. Calcula-se a variação das potências ativas e reativas em cada barra, para todas as fases e neutro, conforme equação (2.14);

$$\begin{aligned} \Delta S_{ka}^{(Ki)} &= V_{ka}^{(Ki)} \cdot (I_{ka}^{(Ki)})^* - Y_{ka}^* |V_{ka}|^2 - S_{ka} \\ \Delta S_{kb}^{(Ki)} &= V_{kb}^{(Ki)} \cdot (I_{kb}^{(Ki)})^* - Y_{kb}^* |V_{kb}|^2 - S_{kb} \\ \Delta S_{kc}^{(Ki)} &= V_{kc}^{(Ki)} \cdot (I_{kc}^{(Ki)})^* - Y_{kc}^* |V_{kc}|^2 - S_{kc} \\ \Delta S_{kn}^{(Ki)} &= V_{kn}^{(Ki)} \cdot (I_{kn}^{(Ki)})^* - Y_{kn}^* |V_{kn}|^2 - S_{kn} \end{aligned} \quad (2.14)$$

v. Utiliza-se como critério de convergência a variação das potências ativa e reativa das barras da rede. Se esta variação estiver dentro de uma faixa de

tolerância especificada o processo é finalizado. Caso contrário, o processo retorna para o cálculo das injeções de correntes nas barras.

2.2.2 FLUXO DE POTÊNCIA PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO FRACAMENTE MALHADAS

O processo de cálculo de fluxo de potência para rede fracamente malhada é similar ao cálculo de rede radial, entretanto, devem-se aplicar alguns conceitos da teoria de circuitos para transformá-la em uma configuração radial. Deve-se quebrar as interconexões da rede, criando os chamados *breakpoints* (pontos de ruptura). Desta forma, as correntes dos ramos interrompidos pela criação desses *breakpoints* serão substituídas por injeções de correntes em ambos os seus nós finais, com polaridade oposta, sem afetar as condições de operação do sistema. A partir do cálculo das correntes dos *breakpoints* de cada malha, determinam-se as variações das tensões das barras da abertura dos breakpoints, para cada iteração até que o critério de convergência seja satisfeito, ou seja, até que as variações dessas tensões sejam menores ou iguais a uma tolerância preestabelecida. A figura 2.3 apresenta a topologia de uma rede de distribuição fracamente malhada. Note que os breakpoints ocorrem nas barras 17, 42, 43 e 46.

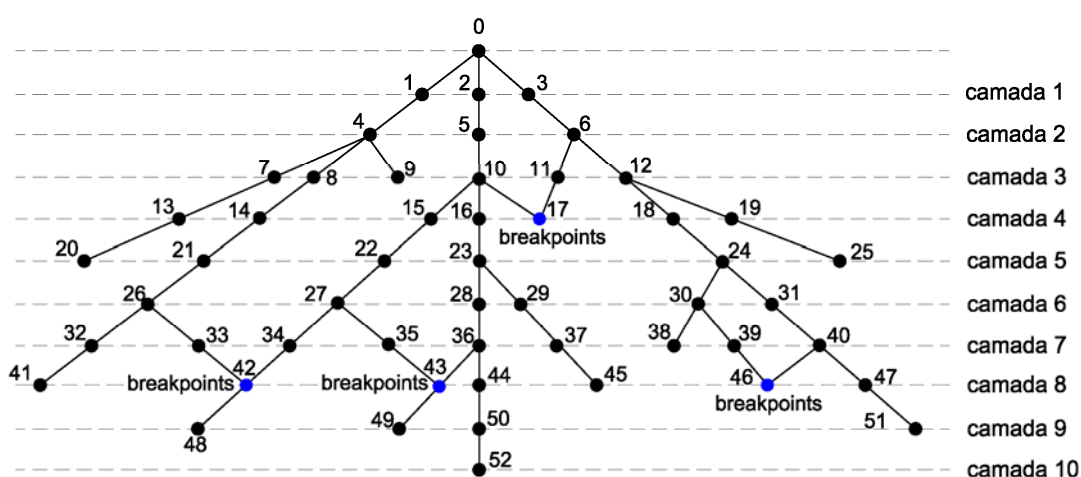


Figura 2.3: Diagrama de uma rede de distribuição fracamente malhada

O processo de renumeração das barras segue o mesmo critério das redes radiais, porém cada breakpoint forma uma nova barra fictícia, ou seja, as barras 17, 42, 43 e 46 formarão quatro barras fictícias.

Todo o procedimento para o cálculo de fluxo de potência para rede fracamente malhada é descrito a seguir:

- i. Identificar e quebrar laço, formando os breakpoints. Com isso o sistema passa a ter a estrutura de uma rede radial;
- ii. Injetar corrente nas duas barras criadas com a quebra do laço com polaridades opostas de acordo com as equações (2.15) e (2.16), conforme ilustrado na figura 2.4. As correntes nas outras barras serão nulas.

$$\begin{bmatrix} I_{k_{2a}} \\ I_{k_{2b}} \\ I_{k_{2c}} \end{bmatrix}^{(Ki)} = \begin{bmatrix} \bar{J}_{k_a} \\ \bar{J}_{k_b} \\ \bar{J}_{k_c} \end{bmatrix}^{(Ki)} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} I_{k_{1a}} \\ I_{k_{1b}} \\ I_{k_{1c}} \end{bmatrix}^{(Ki)} = - \begin{bmatrix} \bar{J}_{k_a} \\ \bar{J}_{k_b} \\ \bar{J}_{k_c} \end{bmatrix}^{(Ki)} \quad (2.16)$$

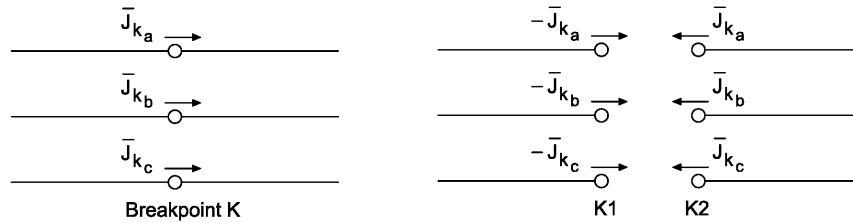


Figura 2.4: Representação dos breakpoints usando injeção de corrente nodal

- iii. Formar a matriz de impedância dos breakpoints (Z_{abc}^B) conforme a equação (2.17). A coluna J será igual ao vetor de tensão breakpoint para $J_i=1$ e $J_i=0$, com $i=1,2,npb$ e $i \neq j$. Isto corresponde à aplicação de 1pu de corrente de breakpoint J com todas as cargas e fonte removidas, o que é equivalente a injeção de corrente de 1pu com polaridade oposta nas duas barras do breakpoint, equações (2.15 e 2.16);

$$\begin{bmatrix} V_1^B \\ V_2^B \\ \vdots \\ V_{nb}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1j} & \dots & Z_{1p} \\ Z_{j1} & \dots & Z_{jj} & \dots & Z_{jp} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{p1} & \dots & Z_{pj} & \dots & Z_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_1 \\ J_j \\ \vdots \\ J_p \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

- iv. Realizar o cálculo de fluxo de potência para uma rede radial considerando todas as barras da rede, incluindo os breakpoints;

- v. Calcular a variação das tensões nas barras de cada breakpoint, para todas as fases e neutro, conforme equação (2.18);

$$\left[V_{k1,2_{abc}}^B \right]^{(Ki)} = \left[Z_{abc}^B \right] \cdot \left[\bar{J}_{k_{abc}} \right]^{(Ki)} \quad (2.18)$$

- vi. Utilizam-se como critérios de convergência a variação das tensões nas barras de cada breakpoint e a variação das potências ativa e reativa das barras da rede. Neste caso, se $\Delta V_{k1,2_{abc}}^B \leq \text{toler_br}$, processo convergido. Caso contrário, atualizar as correntes dos breakpoints de acordo com as equações (2.19) e (2.20).

$$I_{k1_{abc}} = I_{k1_{abc}} - \bar{J}_{abc} \quad (2.19)$$

$$I_{k2_{abc}} = I_{k2_{abc}} + \bar{J}_{abc} \quad (2.20)$$

A figura 2.5 apresenta o diagrama de blocos do algoritmo de fluxo de potência implementado em linguagem FORTRAN para redes de distribuição radial ou fracamente malhada.

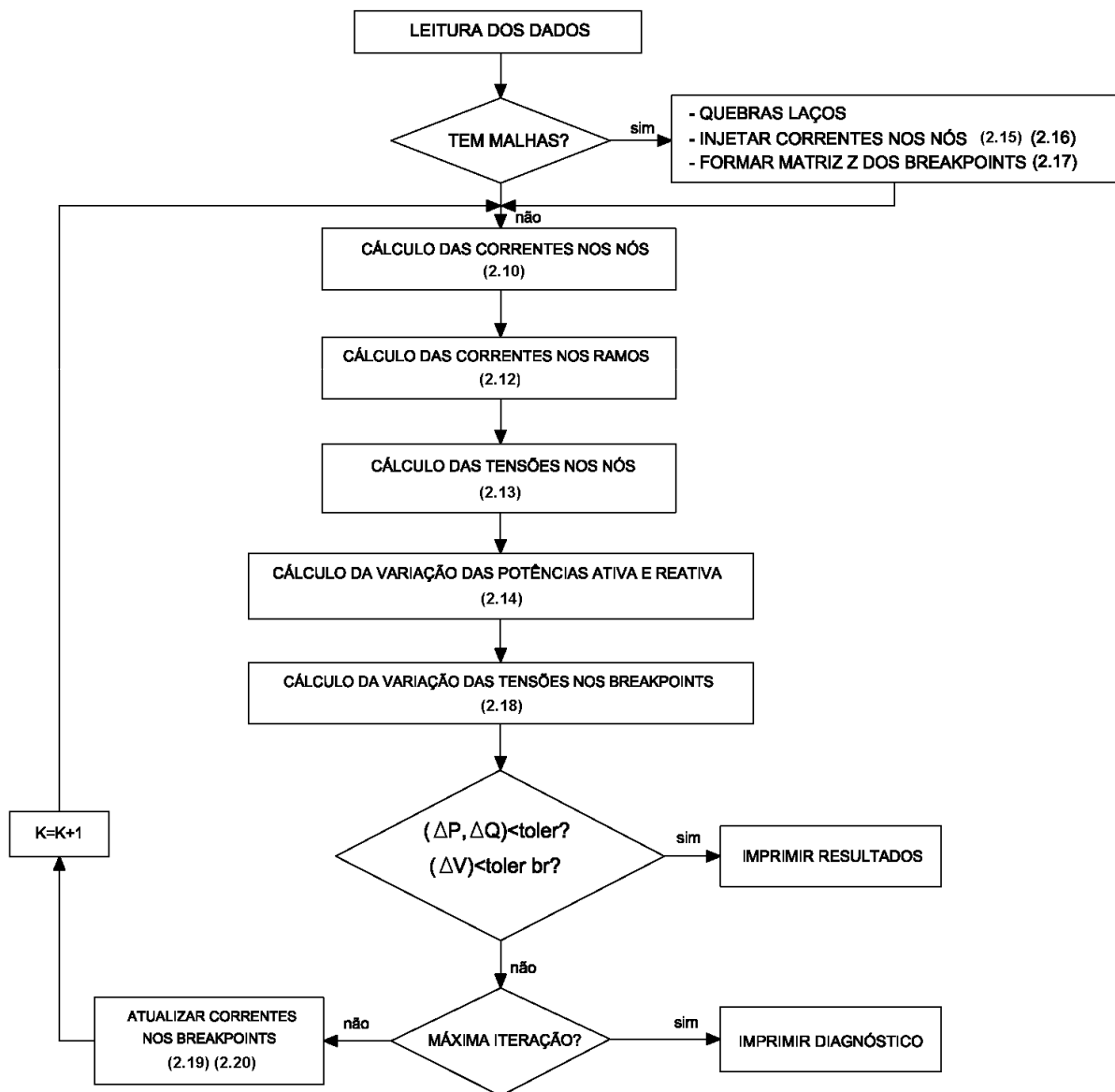


Figura 2.5: Diagrama de blocos do algoritmo de fluxo de potência

2.3 CÁLCULO MECÂNICO

Para o cálculo de esforços mecânicos em redes aéreas é utilizada a estrutura ilustrada na figura 2.6. Os postes de concreto deverão suportar os esforços devido a cabos da rede primária e secundária, além de cabo telefônico.

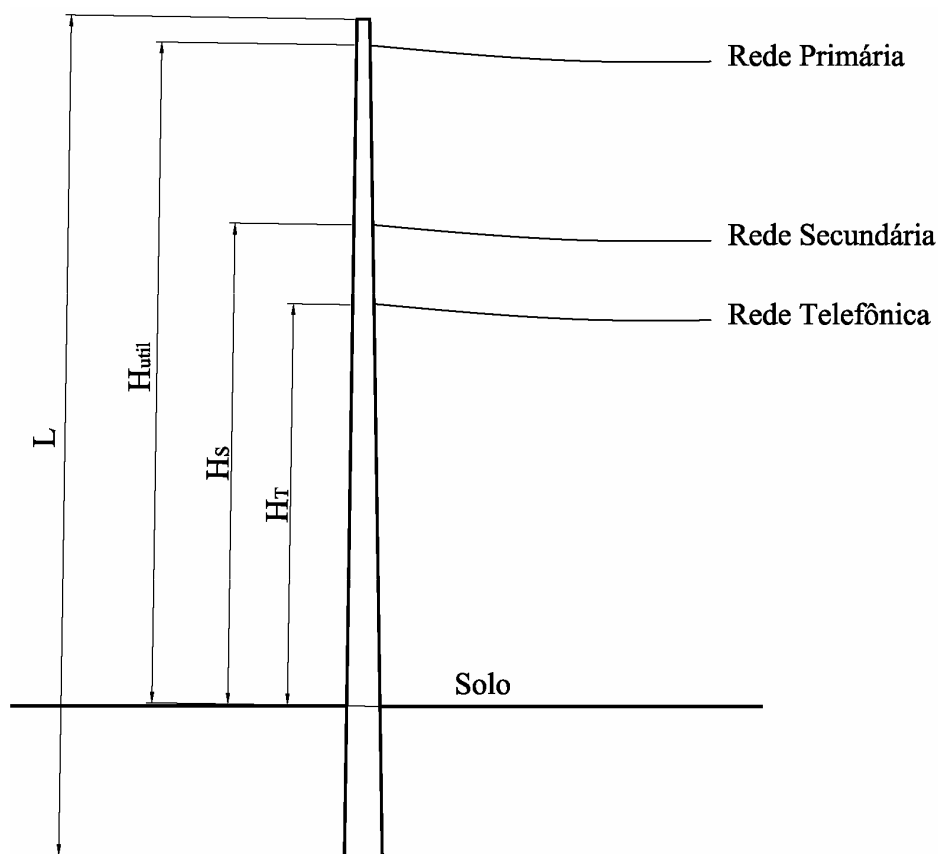


Figura 2.6: Representação da rede aérea de distribuição.

Segundo orientação da ABNT (NBR 8451, 1998), devem ser considerados para especificação dos postes os esforços nominais aplicados a 10cm do topo. No entanto, de acordo com os padrões técnicos das concessionárias de energia elétrica, devido a montagem das estruturas, os esforços são aplicados a 20cm do topo. Deve-se então referenciar todas as forças aplicadas ao poste para este ponto, a fim de determinar o esforço total, dimensionando-o segundo as capacidades padronizadas conforme tabela 2.1 (CPFL – GED 1347, 2004). Este método é chamado de “*método de transferência de esforços a 20cm do topo*” (CPFL – GED 3648, 2005, p. 5).

Tabela 2.1: Características nominais dos postes

Código	Comprimento (m)	Capacidade (daN)
1	9	200
2	9	400
3	9	600
4	9	1000
5	11	200
6	11	400
7	11	600
8	11	1000
9	12	400
10	12	600
11	12	1000

Considerando que as forças estão em um mesmo sentido e/ou mesmo plano, pode-se calcular o esforço resultante parcial em cada poste em função do tipo de condutor e topologia da rede através das equações (2.21), (2.22) e (2.23):

$$F_{Ri} = F_{Pi} + \left(\frac{F_{Si} \times H_{Si}}{H_{i\text{ util}}} \right) + \left(\frac{F_{Ti} \times H_{Ti}}{H_{i\text{ util}}} \right) \quad (2.21)$$

$$H_{i\text{ util}} = L - E - 0,20 \quad (2.22)$$

$$E_i = 0,10 \times L_i + 0,60 \quad (2.23)$$

Sendo:

F_{Ri} : Força resultante parcial; F_{Pi} : Tração do cabo da rede primária; F_{Si} : Tração do cabo da rede secundária; F_{Ti} : Tração do cabo da rede telefônica; $H_{i\text{ util}}$: Altura útil do poste; H_{Si} : Altura média de instalação da rede secundária; H_{Ti} : Altura média de instalação da rede telefônica; L_i : Comprimento nominal do poste de concreto; E_i : Engastamento do poste.

Após realizar o cálculo do esforço que cada ramo exerce sobre o poste, deve-se calcular o esforço resultante total. As parcelas de esforços de todos os ramos i ligados ao poste j , projetadas no eixo imaginário x e y , podem ser calculadas a partir das equações (2.24) e (2.25) e o esforço total pela equação (2.26).

$$F_{Xj} = F_{Ri} \cdot \cos(\theta_i) + \dots + F_{Rk} \cdot \cos(\theta_k) \quad (2.24)$$

$$F_{Yj} = F_{Ri} \cdot \sin(\theta_i) + \dots + F_{Rk} \cdot \sin(\theta_k) \quad (2.25)$$

$$F_{j\text{ total}} = \sqrt{F_{Yj}^2 + F_{Xj}^2} \quad (2.26)$$

Sendo:

$F_{j\ total}$: esforço resultante total na barra j ; F_{xj} : esforço resultante da projeção do eixo x da barra j ; F_{yj} : esforço resultante da projeção do eixo y da barra j ; θ_i : diferença angular entre dois ramos conectados a barra j .

Deve-se observar que o comprimento nominal dos postes tem influência no cálculo de esforços. Na figura 2.7 apresentam-se como são definidos os comprimentos nominais dos postes.

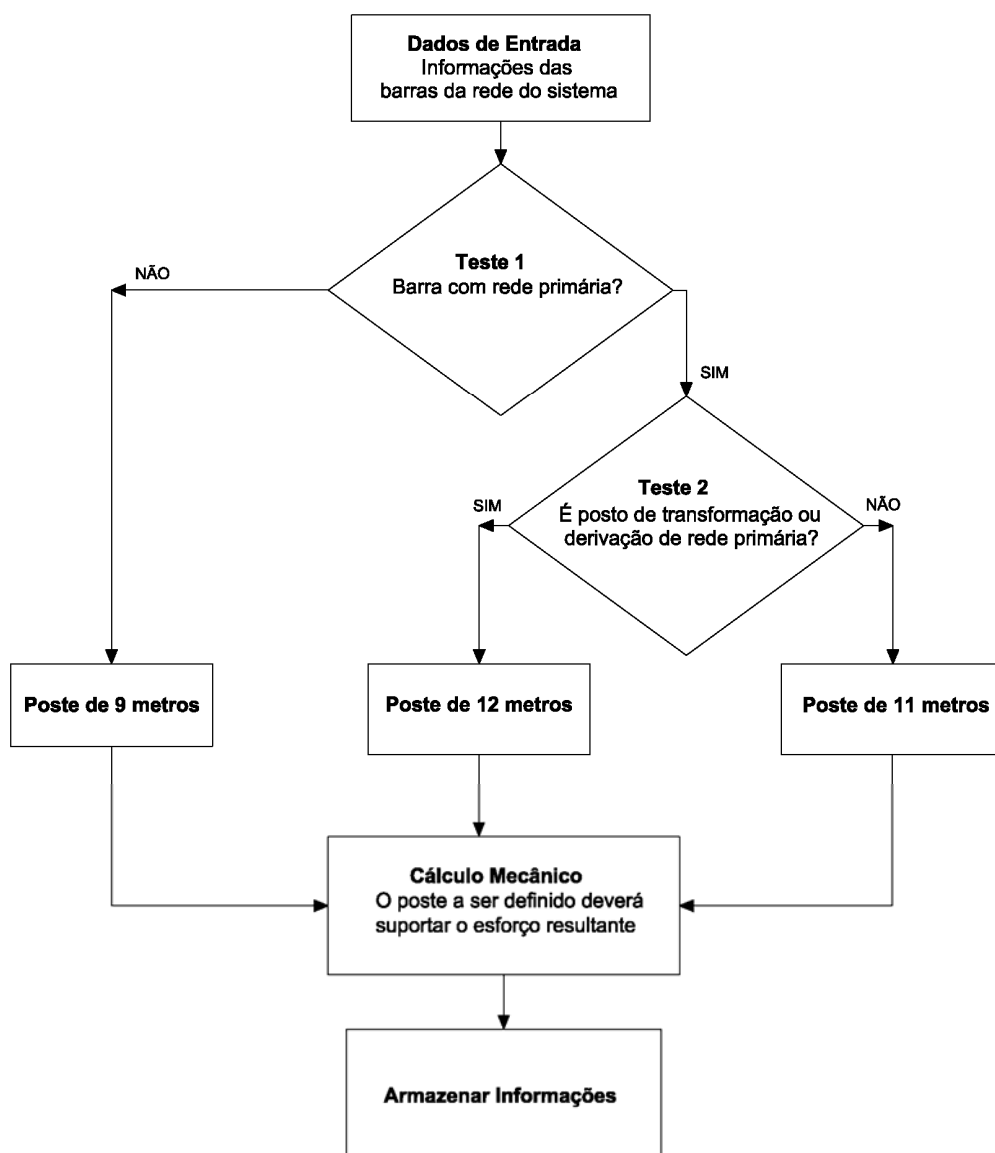


Figura 2.7: Critérios para definição dos comprimentos nominais dos postes

2.4 DEFINIÇÃO DAS ESTRUTURAS

O algoritmo para determinação das estruturas foi desenvolvido para redes aéreas compactas de distribuição de energia elétrica conforme normas e padrões da concessionária CPFL-Paulista (GED 4244, 2005; GED 4260, 2004; GED 4241, 2005 e GED 3597, 2005). As tabelas 2.2 e 2.3 mostram os tipos de estruturas básicas para as redes secundária e primária, respectivamente, que podem ser especificadas no projeto.

Tabela 2.2: Estruturas básicas da rede secundária

Código	Descrição	Código	Descrição
1	S21D	6	S2
2	S21DA	7	2S21C
3	2S2F	8	2S2DTO
4	2S2A	9	S21C
5	S32-S2	----	----

Tabela 2.3: Estruturas básicas da rede primária

Código	Descrição	Código	Descrição
10	CE1-1	17	CESHN3-1
11	CE1A-1	18	CECC-1
12	CE2-1	19	CECECC-1
13	CE3-1	20	N3CECC-1
14	CE4-1	21	CEATT-1
15	CE3CE3-1	22	CE1TR-1
16	CESC-1	23	CE3TR-1

As estruturas no sistema computacional desenvolvido são definidas de acordo com os seguintes critérios: diferença angular entre os ramos, derivação de rede, mudança de bitola do condutor secundário, fim de linha, topo aberto ou fechado, etc. Portanto, estes critérios só podem ser aplicados após o processamento dos algoritmos de fluxo de potência e cálculo mecânico. A heurística descrita abaixo é utilizada para determinação das estruturas da rede primária e secundária de cada poste.

- i. Leitura dos dados geométricos constantes na base de dados de entrada do

- sistema, ou seja, os ângulos de cada ramo em relação a uma referência. A referência deste sistema é sempre a direção de um ramo conectado à barra sob análise. Entretanto, os dados referentes a rede secundária não são necessariamente iguais aos da rede primária para um determinado poste;
- ii. Faz-se o cálculo de diferença angular entre os ramos ligados ao poste j (vide Fig. 2.8);
 - iii. Identificam-se os cabos de rede secundária e primária (se existir) de cada ramo conectado ao poste j ;
 - iv. Como todas as informações necessárias já estão preparadas, definem-se as estruturas da rede secundária e, posteriormente as estruturas da rede primária.

Na figura 2.8 mostram-se as configurações de um sistema de distribuição de energia elétrica. Em (a) tem-se uma barra fim de linha, em (b) uma barra no meio de um trecho do circuito k sem derivação, e em (c) uma barra também no meio de um trecho do circuito k , porém com derivação. Tanto em (b) quanto em (c) há possibilidade de mudança de bitola do condutor. Isto acontece quando o condutor do ramo A é diferente do condutor do ramo B e/ou diferente do condutor do ramo C.

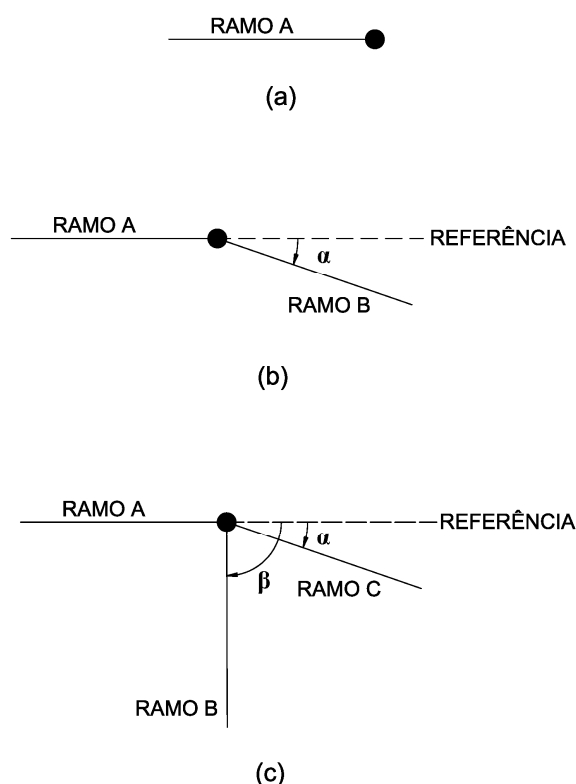


Figura 2.8: Configurações de um sistema de distribuição

3 METODOLOGIA

Neste capítulo apresentam-se os conceitos básicos da metaheurística busca tabu e detalha-se a estrutura da mesma para a solução do problema de planejamento e projeto de circuitos secundários de distribuição – esquema de codificação, avaliação da função de adaptação, mecanismos de transição e estrutura de vizinhança adotados.

3.1 O ALGORITMO BUSCA TABU

Nesta seção, apresentam-se os conceitos gerais da metaheurística busca tabu (BT) básica, utilizados na solução do modelo matemático de planejamento e projetos de sistemas secundários de distribuição. As funções avançadas de BT não são utilizadas na metodologia proposta, e desta forma não são detalhadas nesta seção. Em (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003) encontram-se detalhadas todas as funções básicas e avançadas de BT.

3.1.1 INTRODUÇÃO

BT é uma metaheurística adequada para solução de problemas combinatórios. Basicamente é um procedimento metaheurístico usado para gerenciar um algoritmo heurístico de busca local, que usa estratégias adequadas para controlar ou sair de soluções ótimas locais (GLOVER, 1995). BT realiza um conjunto de transições através do espaço de busca do problema e, nesse processo de transições, deve-se passar pela solução ótima ou soluções quase ótimas de problemas complexos.

BT foi inventado por Fred Glover na década de 80 a partir de um conjunto de princípios (funções) que, de forma integrada, permitem resolver um problema da maneira mais inteligente. Tais princípios tiveram sua origem baseada em conceitos que originalmente faziam parte do campo da inteligência artificial. A partir da década de 90 a metaheurística BT tem sido intensamente aplicada para resolver problemas complexos da pesquisa operacional, entretanto, sua aplicação para a solução de problemas de sistemas elétricos de potência ainda se encontra em pleno desenvolvimento.

Assim como no caso de outros algoritmos de otimização combinatória, existem aspectos básicos a serem analisados que podem ser críticos na formulação de algoritmos BT eficientes. O espaço de busca e a estrutura de vizinhança do problema são particularmente importantes. Relacionados a esses aspectos básicos existem alguns problemas que são os seguintes: (1) Especificar a forma de identificar e representar um elemento do espaço de busca, isto é, o sistema de codificação do problema; (2) Especificar a forma de avaliar a função objetivo ou seu equivalente; (3) Especificar a forma de verificar infactibilidades.

3.1.2 ESPAÇO DE BUSCA E ESTRUTURA DE VIZINHANÇA

O espaço de busca consiste de todas as soluções possíveis do problema sob estudo que podem ser visitadas durante a busca. O espaço de soluções possíveis para o problema pode envolver tanto variáveis reais como inteiras. Deve-

se observar que um espaço de busca grande pode produzir uma heurística lenta e um espaço de busca pequeno pode transformar uma metaheurística ineficiente. Na maioria das aplicações não é uma estratégia muito adequada restringir o espaço de busca apenas às soluções factíveis. Em muitos casos permitir o movimento da busca para soluções infactíveis pode ser extremamente conveniente e até necessário, pois considerar todas as restrições do problema na definição do espaço de busca, freqüentemente restringe muito este espaço e pode levar a soluções de qualidade inferiores.

Relaxação das restrições é uma estratégia atrativa uma vez que cria um grande espaço de busca, especialmente quando esse espaço pode ser explorado com simplicidade pela estrutura de vizinhança. A relaxação das restrições é facilmente implementada, deixando de considerar algumas restrições no espaço de busca do problema e adicionando à função objetivo penalizações ponderadas para cada restrição violada. Neste caso, há o problema de encontrar as ponderações corretas para cada tipo de restrição violada. Uma forma de contornar este problema é por meio do uso de penalidades auto-ajustáveis, ou seja, as ponderações são ajustadas dinamicamente com base na história recente do processo de busca. As ponderações das restrições violadas são aumentadas se e somente se, soluções infactíveis foram encontradas nas últimas poucas iterações, e reduzidas se todas as últimas soluções encontradas são factíveis. As ponderações de penalidades podem também ser modificadas sistematicamente para direcionar a busca através da fronteira de factibilidade do espaço de busca e então induzir a diversificação.

A definição de estrutura de vizinhança está relacionada com o espaço de busca. A cada iteração de BT as transformações locais que podem se aplicadas à solução corrente representada por S , definem um conjunto de soluções vizinhas no espaço de busca, representado por $N(S)$ (a vizinhança de S). Formalmente, $N(S)$ é um subconjunto do espaço de busca definido como:

$$N(S) = \{\text{Soluções Obtidas pela Aplicação de uma Transformação Local a } S\}$$

Idealmente, essa transformação local deve produzir uma solução vizinha que ainda não foi visitada apresentando melhor qualidade dentre as soluções vizinhas. Na inexistência de uma solução vizinha de melhor qualidade, deve-se passar para uma configuração vizinha menos ruim, ou seja, é permitida a

degradação da função objetivo.

No algoritmo BT convencional a função objetivo deve ser avaliada para todo elemento de $N(S)$ da solução corrente. Este procedimento pode acarretar em elevados custos computacionais. Uma alternativa seria considerar somente uma amostragem aleatória $N'(S) \subset N(S)$, reduzindo então significativamente o tempo computacional. Um outro aspecto interessante desta abordagem é que o caráter aleatório dado à busca pode atuar como um mecanismo anticiclagem. Isto permitiria o uso de lista tabu de dimensão menor do que seria necessária se uma exploração completa da vizinhança fosse realizada. Um aspecto negativo desta abordagem a ser observado é que há casos em que se podem perder excelentes soluções.

A escolha do espaço de busca e da estrutura de vizinhança são os passos mais críticos no desenvolvimento de algoritmos de BT para soluções de problemas reais, e neste caso deve-se usar todo o conhecimento que se tem do problema sob estudo para construir algoritmos de BT dedicados eficientes.

3.1.3 PRINCÍPIOS BÁSICOS

As principais características (funções) de BT são mostradas na figura 3.1. As pesquisas em BT consistem em usar tais funções de maneira integrada e eficiente para resolver cada problema específico, considerando as diversas formas de implementação de cada função dependendo das características do problema e do nível de sofisticação da implementação do algoritmo BT.

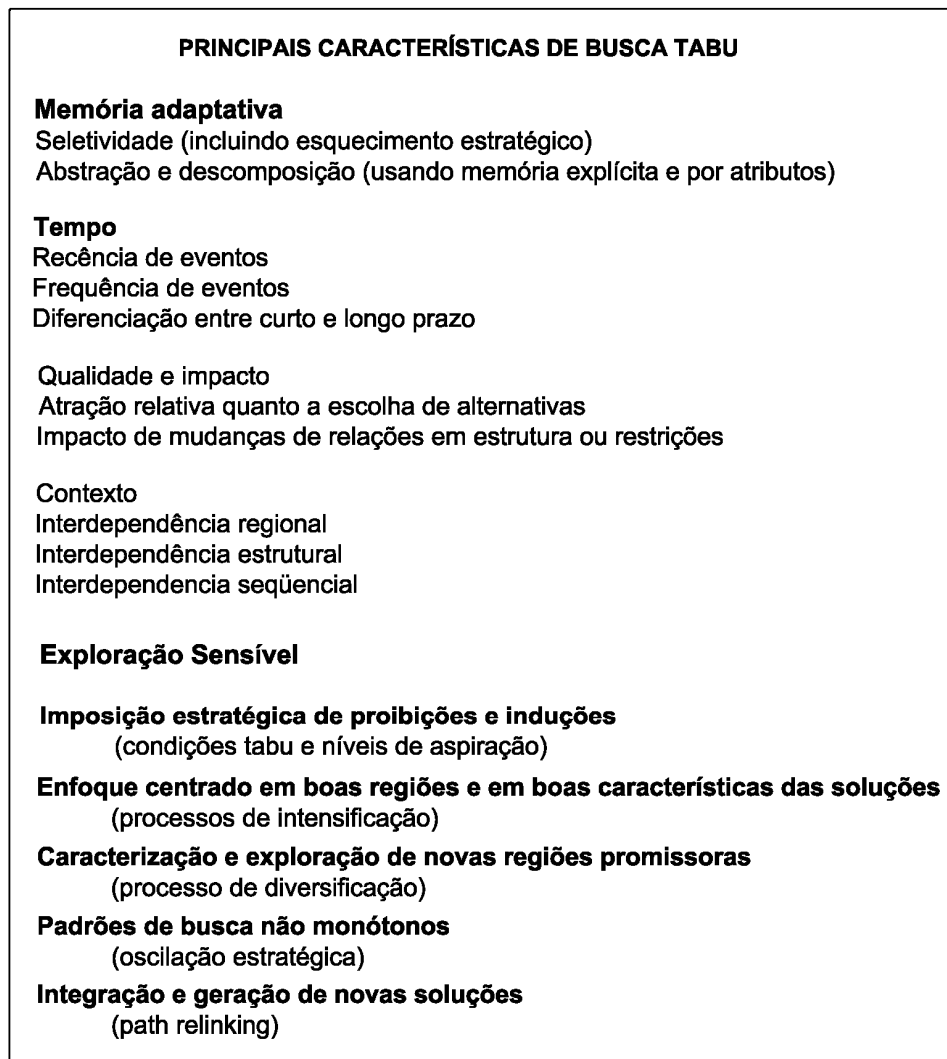


Figura 3.1: Funções da metaheurística BT

Sejam problemas genéricos do tipo:

$$\begin{aligned} &\text{Min } f(S) \\ &\text{s.a. } S \in X \end{aligned} \quad (3.1)$$

A essência lógica da metaheurística *BT* para esta classe de problema é apresentada a seguir. O início do processo de resolução do problema é similar a qualquer algoritmo heurístico de busca local. A partir de uma configuração S (solução factível ou infactível qualquer do problema), *BT* efetua as transições pela vizinhança de S . Define-se uma vizinhança de S como sendo o conjunto de todas as configurações $S' \in N(S)$ que podem ser obtidas pela aplicação de um mecanismo de transição a partir de S . No algoritmo de busca local, a partir da configuração corrente S , passa-se para a configuração vizinha S' que apresenta o melhor valor da função objetivo. Um procedimento repetitivo desta estratégia faz com que o algoritmo de

busca local pare no momento em que não exista nenhuma configuração vizinha que produza uma redução da função objetivo, o que significa que foi encontrado um ótimo local (A) como pode ser observado na figura 3.2.

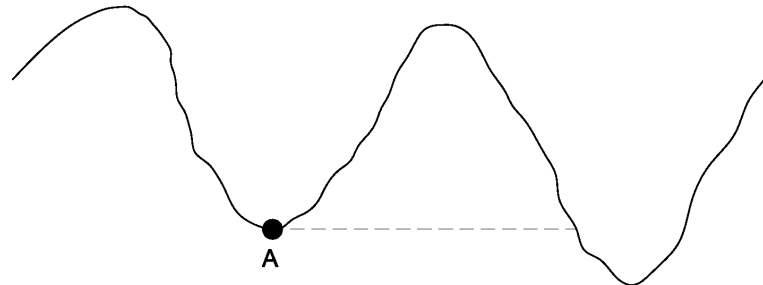


Figura 3.2: Estrutura do algoritmo de busca local

Existem dois aspectos fundamentais que diferem *BT* de um algoritmo de busca local:

1. A partir da configuração corrente, passa-se à melhor configuração vizinha ou a menos ruim, o que implica que é permitida uma degradação da qualidade da função objetivo.
2. O conjunto de vizinhos de S não se caracteriza de maneira estática. Assim, *BT* define uma nova estrutura de vizinhança, $N^*(S)$ que varia dinamicamente em estrutura e dimensão durante todo o processo de otimização. Esta estratégia permite o *BT* realizar uma busca eficiente e inteligente. A figura 3.3 mostra a relação entre $N(S)$ e $N^*(S)$. Os elementos de $N^*(S)$ são determinados de várias formas. Como ilustração, podem-se indicar as seguintes:
 - Usando uma lista tabu que armazena atributos de configurações consideradas tabu (proibidas). Neste caso $N^*(S) \subset N(S)$, pois alguns vizinhos definidos pela estrutura de vizinhança e cujos atributos fazem parte da lista tabu estão proibidos. Esta estratégia evita retornar as configurações já visitadas e a ciclagem.
 - Usando estratégias para diminuir a vizinhança ou a lista de configurações candidatas. Geralmente o número de configurações $S' \in N(S)$ pode ser muito grande e avaliar a função objetivo de todas essas configurações, para encontrar aquela que apresenta melhor desempenho, pode precisar de elevado esforço computacional.

- Usando configurações de elite e path relinking para caracterizar e encontrar novas configurações candidatas. Esta estratégia visa encontrar novas configurações de alta qualidade, que dificilmente seriam encontradas a partir da definição de $N^*(S)$. É fácil verificar que neste caso a relação $N^*(S) \subset N(S)$ já não é mais verdadeira.
- Redefinir o conjunto $N(S)$ durante o processo de otimização.

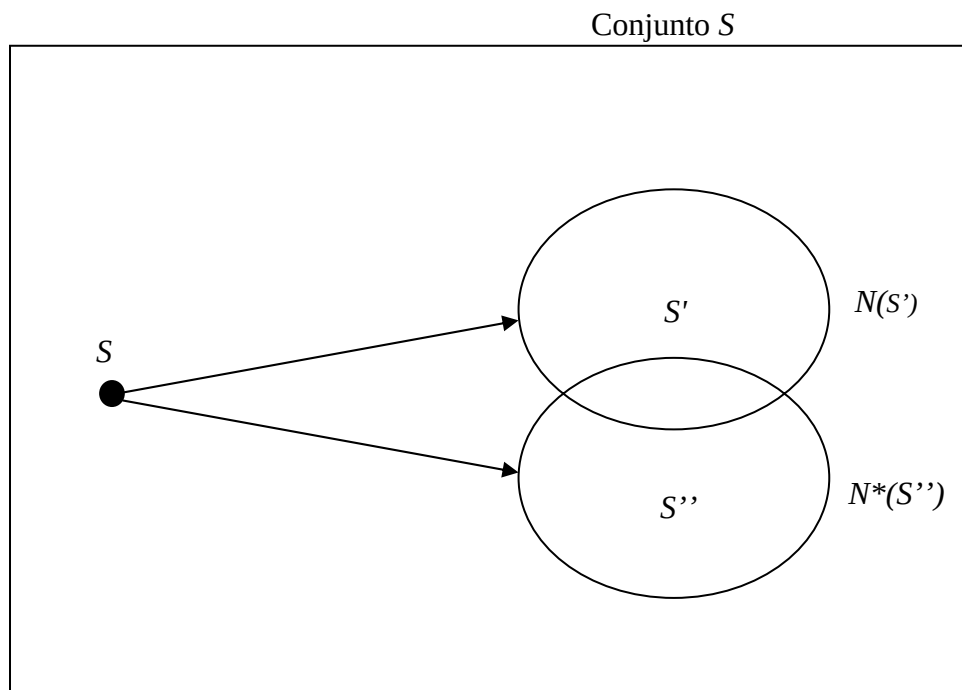


Figura 3.3: Uma transição em BT

3.1.4 MEMÓRIA DE CURTO PRAZO

O algoritmo *BT* mais elementar é o chamado algoritmo *BT* com memória de curto prazo caracterizada por apresentar: (1) Imposição estratégica de proibições e induções; (2) Recência de eventos. A memória de curto prazo usa basicamente a informação de atributos de configurações que foram modificados no passado recente, um critério de aspiração e, como em qualquer outro algoritmo computacional, um critério de parada. A idéia desta estratégia é armazenar as informações dos atributos das últimas transições em uma lista designada como lista tabu. Portanto, todas as configurações candidatas que apresentam algum dos

atributos proibidos são penalizadas e consideradas como tabu ou proibidas. Isto pode se tornar um problema para o algoritmo BT porque algumas configurações de excelente qualidade podem estar temporariamente proibidas por compartilharem atributos proibidos de configurações já visitadas. Em seguida, são apresentadas formas de contornar este tipo de problema.

Considerando-se a estrutura básica de um algoritmo *BT*, na figura 3.4 apresenta-se um diagrama de blocos ilustrando todas as suas etapas básicas.

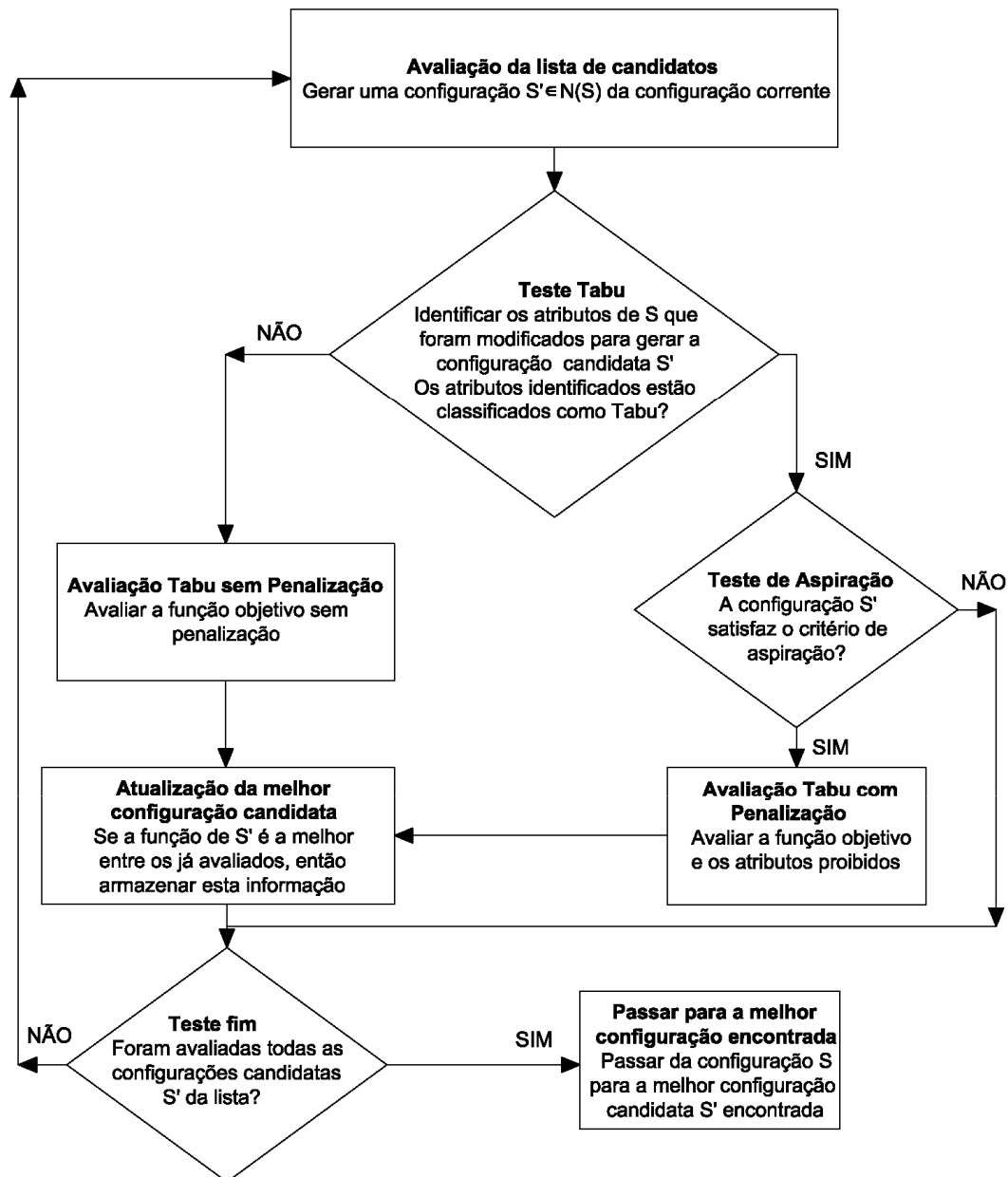


Figura 3.4: Estrutura Básica do Algoritmo BT

3.1.4.1 LISTA TABU

Atributos considerados *tabus* são usados para prevenir ciclagem quando se movimenta de um ponto de ótimo local, para outros pontos do espaço de busca que não são direções de melhoria da função objetivo. Nessa situação deve-se tomar alguma medida para prevenir que a busca refaça os mesmos caminhos de onde ela foi iniciada. Esta medida consiste em declarar como sendo *tabu* os movimentos que possam anular os efeitos de movimentos recentes realizados pelo processo de busca. Movimentos tabus são também úteis para auxiliar o movimento de busca para outras partes não visitadas do espaço de busca e permitir uma exploração mais extensiva deste espaço.

Os atributos tabus são armazenados numa memória de curto prazo. A memória de curto prazo consiste em armazenar as informações do passado recente do processo, isto é, deve-se armazenar informações das últimas k transições. Neste contexto aparece um aspecto importante relacionado com o que significa armazenar informações do passado recente; como armazenar essas informações? Para quê armazená-las?

A forma mais elementar de armazenar informações recentes consiste em armazenar as informações completas das configurações visitadas. Esta proposta, embora seja interessante porque armazena as informações completas, praticamente não é usada porque leva a problemas de memória para o armazenamento de todos os atributos da configuração, e de esforço computacional elevado para analisar as informações armazenadas. Portanto, a proposta mais viável consiste em armazenar os atributos das configurações visitadas no passado recente para evitar voltar a visitar essas configurações. O armazenamento das informações através de atributos apresenta a vantagem de pequena memória para armazenamento e facilidade de manipulação e verificação.

O uso simultâneo de múltiplas listas tabu algumas vezes é aconselhável. Listas tabu padrões são normalmente implementadas como listas do tipo *first in first out (FIFO)* de comprimento fixo.

3.1.4.2 CRITÉRIO DE ASPIRAÇÃO

As proibições são essenciais para o algoritmo de *BT*, mas algumas vezes são muito poderosas. Apresentam a vantagem de que um atributo proibido evita retornar a uma configuração já visitada, mas também impede que seja visitado um conjunto de configurações que compartilham atributos proibidos com configurações já visitadas. Este fato é uma limitação porque algumas configurações de excelente qualidade (inclusive a ótima global) podem estar temporariamente proibidas, porque compartilham atributos proibidos com configurações já visitadas. Por outro lado, as proibições também podem provocar uma estagnação geral no processo de busca. Estes problemas são contornados de duas maneiras: (1) eliminando-se a proibição após k transições, e criando-se um novo problema que torna possível o fenômeno de ciclagem (visita a configurações já visitadas) e (2) usando uma nova função ou estratégia *BT*, chamada de critério de aspiração. Esta estratégia simplesmente estipula que se uma configuração vizinha é encontrada ao se acionar um atributo proibido, mas essa configuração vizinha é de excelente qualidade então, deve-se eliminar a proibição. Compete a cada pesquisador, com base nas características físicas do problema sob análise, especificar o que significa configuração de excelente qualidade. Por exemplo, pode ser considerada uma configuração vizinha de excelente qualidade quando: (1) apresenta uma função objetivo melhor que a incumbente do processo *BT*; (2) apresenta um função objetivo melhor que as encontradas no processo *BT* com memória de curto prazo; (3) apresenta uma função objetivo de melhor qualidade dentre as últimas k_1 transições; ou, (4) a função objetivo foi reduzida em um valor previamente especificado. Cada estratégia escolhida leva, obviamente, a processos *BT* diferentes.

3.1.4.3 CRITÉRIO DE PARADA

Sob o aspecto teórico, o algoritmo *BT* poderia prosseguir no processo de busca indefinidamente, uma vez que a solução ótima do problema sob análise não é conhecida *a priori*. Na prática, evidentemente, o procedimento de busca tem que ser

interrompido de forma adequada ao problema sob análise.

Os critérios de parada normalmente utilizados em implementações de *BT* são:

- após um número fixo de iterações ou tempo de processamento (tempo de CPU);
- após um número preestabelecido de iterações que a solução incumbente não apresenta melhorias – este critério é utilizado na maioria das implementações de *BT*;
- depois que a função objetivo alcançar um valor preestabelecido.

Em esquemas complexos de implementação de *BT*, a busca é normalmente interrompida depois de completar uma sequência de fases, e a duração de cada fase é determinada por algum desses critérios.

3.2 BUSCA TABU DEDICADO AO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO E PROJETO

Nesta seção é apresentado um algoritmo *BT* dedicado ao problema de planejamento e projeto de circuitos secundários de distribuição de energia elétrica. A seguir, discutem-se os tópicos do algoritmo *BT* básico utilizado para resolução deste problema específico: sistema de codificação, obtenção da configuração radial inicial, avaliação das configurações e capacidade de verificação de infactibilidades, caracterização de estrutura de vizinhança e critério de parada. Note que neste trabalho não são propostas outras técnicas e estratégias senão o algoritmo *BT* básico ou *BT* com memória de curto prazo, mecanismo de transição e critério de parada.

3.2.1 SISTEMA DE CODIFICAÇÃO

Uma proposta de solução está adequadamente codificada quando, a partir dessa informação, é possível avaliar a função objetivo do problema (ou seu

equivalente) e determinar se a proposta é factível ou infactível. Portanto, para a representação de possíveis soluções de planejamento e projeto do circuito secundário de distribuição utiliza-se um vetor de dimensão $(nl+4nb)$ com variáveis inteiras e binárias, sendo nl o número de ramos e nb o número de barras do sistema sob estudo. Este vetor, denominado “vetor codificação”, armazena todas as informações necessárias para se avaliar a qualidade e a factibilidade de cada topologia. A figura 3.5 mostra este esquema de codificação de forma geral.

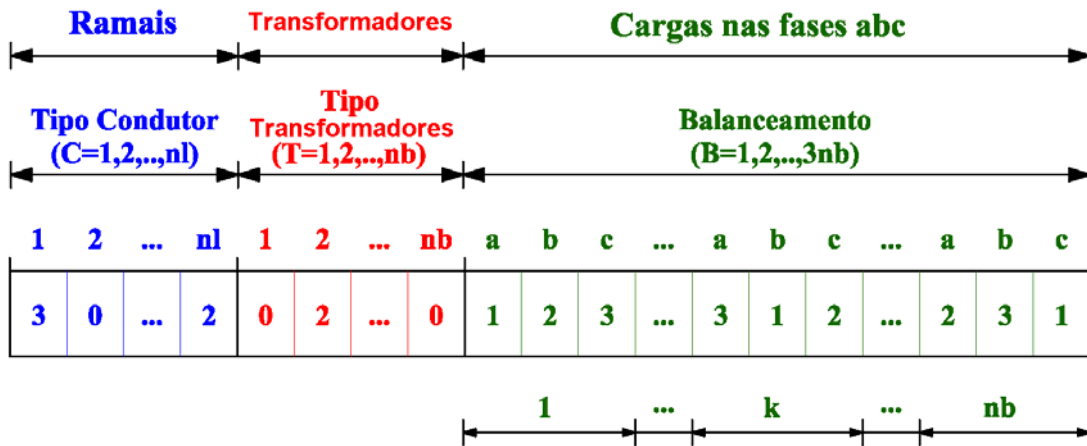


Figura 3.5: Codificação do problema de planejamento e projetos de circuitos secundários

Neste esquema, para circuitos secundários, tem-se:

- As posições $C=1, 2, \dots, nl$ determinam a bitola do condutor em cada um dos ramos C do circuito secundário;
- As posições $T=1, 2, \dots, nb$ representam o tipo e potência nominal do transformador que será instalado na barra T da rede de distribuição. Neste sentido é possível verificar a quantidade de circuitos do problema;
- As posições $B=1, 2, \dots, 3nb$ representam a conexão das cargas ativa e reativa em cada barra k , sendo $k=1, 2, \dots, nb$, nas fases a, b , e c nesta ordem, isto é, inicia-se com carga na barra 1 fase a , barra 1 fase b e barra 1 fase c e assim por diante. Os algarismos 1, 2 e 3 correspondem às cargas das fases a, b e c , respectivamente, porém sempre em relação às cargas declaradas na base de dados do sistema.

3.2.2 ALGORITMO CONSTRUTIVO PARA OBTER A CONFIGURAÇÃO INICIAL

A heurística de geração de configuração inicial consiste basicamente em criar conexões dos ramos do sistema de distribuição proposto atendendo os critérios técnicos: fluxo de potência, variação de tensão no circuito secundário e corrente máxima admissível no condutor. A figura 3.6 mostra o diagrama de blocos deste algoritmo.

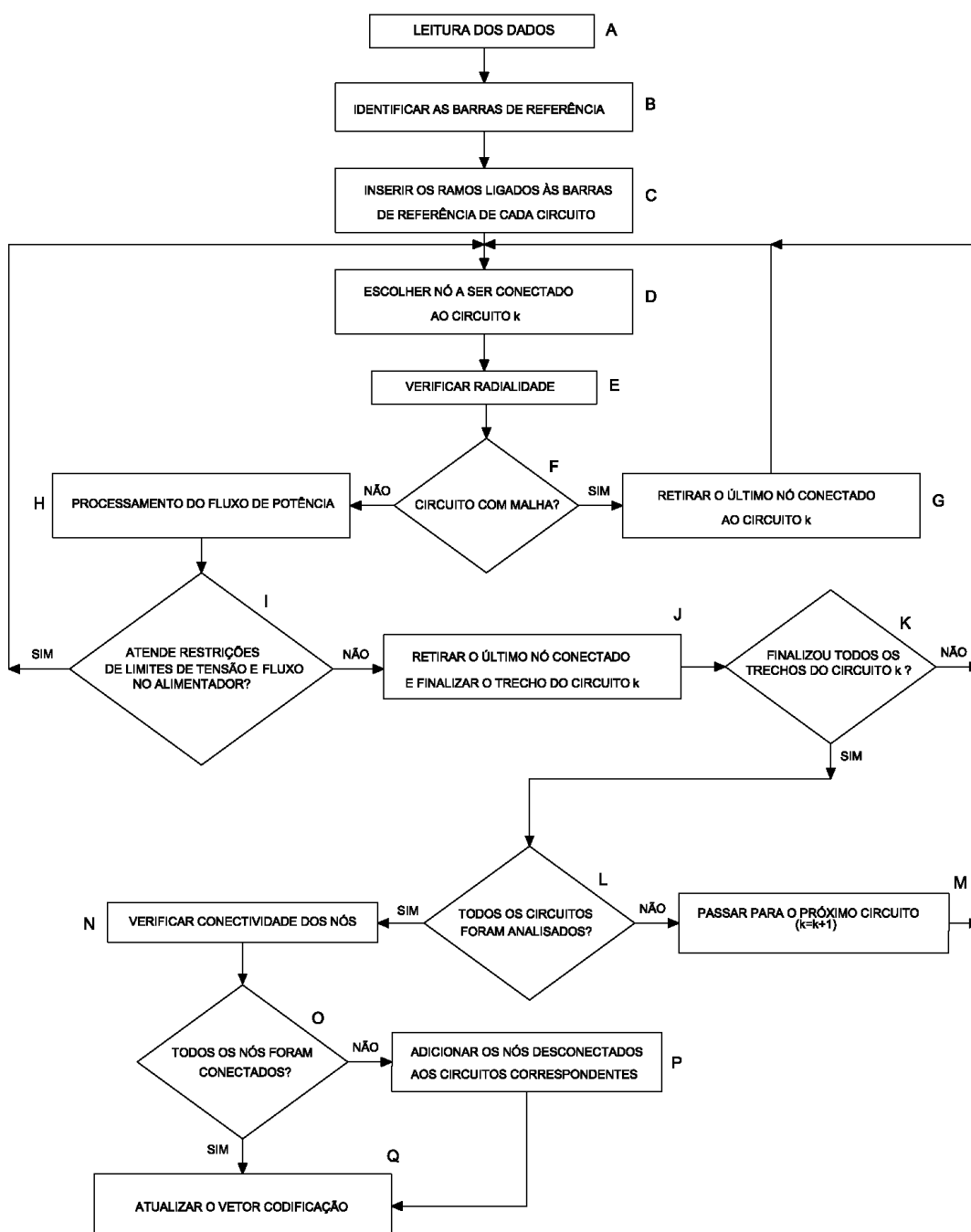


Figura 3.6: Diagrama de blocos do algoritmo para gerar a configuração inicial

Cada bloco está detalhado a seguir:

- Bloco A - Leitura dos dados de entrada: atribuição de todas as informações pertinentes ao sistema sob planejamento e projeto, ou seja, dados de carga, posição relativas dos postes já alocados, tipos de condutores das redes primária e secundária e suas características, tipos de transformadores, existência de previsão de rede primária e outros;
- Bloco B – Identificação das barras de posto de transformação: esta identificação segue a ordem crescente de numeração das barras, conforme base de dados. Nesta etapa a escolha do posicionamento do posto de transformação é realizada obedecendo a seguinte ordem: (1) alocar em barras que prevêm o atendimento a cargas de áreas institucionais com reservatório elevado. De forma geral, a potência de um motor instalado nestas áreas variam de 15cv a 30cv; (2) alocar em barras que apresentem viabilidade de instalação de rede primária e não apresentem restrições construtivas, privilegiando as barra que mantém cargas de maior potência instalada; (3) alocar em barras que haja possibilidade de instalação de rede primária e não apresente restrições construtivas, privilegiando as barras que mantêm cargas de maior importância;
- Bloco C – Inserção dos ramos ligados as barras de posto de transformação: com o objetivo de eliminar a possibilidade de haver conflito entre os circuitos (dois transformadores em um único circuito) utiliza-se deste artifício. Note que inserir os ramos ligados às barras dos postos de transformação implica em inserir as barras adjacentes aos postos de transformação. Caso a definição de postos de transformação seja feita de maneira adequada (Bloco B), o problema de conflito entre circuitos é minimizado ou até eliminado;
- Bloco D - Escolha do nó a ser conectado no circuito: a partir dos nós adjacentes ao posto de transformação já inseridos, inserir os nós vizinhos fazendo as conexões dos ramos;
- Bloco E – Verificação de radialidade: à medida que os circuitos forem construídos, deve ser mantida a condição de radialidade do sistema. Contudo, é necessário verificar a radialidade do sistema após inserção de

um novo nó;

- Bloco F – Condição de radialidade do circuito: caso se verifique a não radialidade do circuito, retira-se o último nó conectado (Bloco G) e volta para o bloco D. Caso contrário, passa-se para o passo seguinte (Bloco H);
- Bloco H - Processamento do fluxo de potência: o programa de fluxo de potência trifásico é executado sempre que houver a conexão de um nó e o circuito em análise mantiver radialidade;
- Blocos I e J - Verificação do estado da rede: são avaliados os critérios técnicos (Bloco I). A partir dos resultados obtidos por esta avaliação são tomadas as decisões que implicam em: retirar o último nó conectado ou adicionar um novo nó ao circuito. Se os critérios técnicos não forem atendidos retira-se um último nó conectado e finaliza o trecho do circuito k (Bloco J). Caso os critérios técnicos sejam atendidos deve-se retornar ao bloco D;
- Bloco k - Verificação de definição de um circuito: a conexão de novos nós ao circuito k é concluída assim que todos os trechos deste circuito forem finalizados. Se todos os trechos de um circuito k foram finalizados, então verificar se todos os circuitos foram finalizados (bloco L);
- Bloco L – Verificação se todos os circuitos foram analisados: Se existir algum circuito que ainda não foi finalizado, então passar para o próximo circuito fazendo $k=k+1$ (bloco M). Caso contrário, passar para o bloco seguinte (bloco N);
- Bloco N e O – Verificação da conectividade dos nós: Todos os nós do problema sob estudo devem estar conectados aos circuitos secundários. O bloco N identifica a existência de nós desconexos. O bloco O decide qual operação deve ser feita. Se houver nós desconexos, então passar para o bloco P. Caso contrário avançar para o bloco Q;
- Bloco P – Adição de nós desconexos: Identificar os nós desconexos e os possíveis circuitos que possam atendê-los. Mesmo que os critérios técnicos não sejam satisfeitos, estes nós são conectados aos circuitos existentes;
- Bloco Q – Atualização do vetor codificação: Ao finalizar o processo de geração de configuração inicial as informações são repassadas ao vetor

de codificação do sistema para o processo de BT.

3.2.3 AVALIAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES E INFATIBILIDADES

Para cada topologia calcula-se a função de adaptação (*fa*) a partir do esquema de codificação, levando-se em consideração a função objetivo e o conjunto de restrições do PNLIM. Dada a natureza não linear do problema, esta função é modelada considerando os custos de investimentos, de operação e as penalizações pelas restrições violadas: (1) magnitude de tensões nas barras nas fases abc e neutro; (2) fluxo de potência nos ramos nas fases abc e neutro; (3) Capacidade de operação dos transformadores.

Os custos fixos das estruturas utilizadas no projeto de redes secundárias são obtidos a partir do dimensionamento elétrico dos cabos e através de procedimentos baseados em cálculos mecânicos e das possíveis topologias preestabelecidas para o circuito secundário de distribuição. Para obter o dimensionamento mecânico e a definição das estruturas das redes primária e secundária utiliza-se uma metodologia baseada em normas técnicas de uma concessionária e da ABNT (NBR 8451, 1998), que são detalhados nas subseções 2.3 e 2.4. Para calcular o termo da função de adaptação que considera as restrições de atendimento das demandas ativa e reativa, utiliza-se um algoritmo de fluxo de potência trifásico, através do qual se obtém a magnitude e o ângulo das tensões nas fases em todas as barras do circuito. Trata-se de um fluxo de potência para a solução de redes de distribuição radiais ou fracamente malhadas, usando formulações básicas das leis de Kirchhoff (CHENG e SHIRMOHAMMADI, 1995; CIRIC, FELTRIN e OCHOA, 2003).

A função de adaptação contempla a função objetivo e os aspectos de factibilidade do problema de planejamento usando a técnica de penalidades, sendo determinada matematicamente pela equação (3.2):

$$\begin{aligned}
fa = & \quad Z \\
& + fp_v \cdot \sum_{i \in NB} \begin{cases} \|V_{iabcn}^{lim} - V_{iabcn}^{cal}\|^2 & Se \quad V_{iabcn}^{min} > V_{iabcn}^{cal} > V_{iabcn}^{max} \\ 0 & Se \quad V_{iabcn}^{min} < V_{iabcn}^{cal} < V_{iabcn}^{max} \end{cases} \\
& + fp_f \cdot \sum_{ij \in L} \begin{cases} |I_{ijabcn}| & Se \quad |I_{ijabcn}| \geq \bar{I}_{ijabcn} \\ 0 & Se \quad |I_{ijabcn}| \leq \bar{I}_{ijabcn} \end{cases} \\
& + fp_s \cdot \begin{cases} \left\| \sum_{i \in NB} S_{iabc}^C + \sum_{ij \in L} S_{ijabcn}^L \right\|^2 & Se \quad \sum_{i \in NB} S_{iabc}^C + \sum_{ij \in L} S_{ijabcn}^L \geq \sum_{i \in Nt} S_{iabc}^T \\ 0 & Se \quad \sum_{i \in NB} S_{iabc}^C + \sum_{ij \in L} S_{ijabcn}^L \leq \sum_{i \in Nt} S_{iabc}^T \end{cases}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Sendo:

fp_v : fator de penalidade para a restrição de limites de tensão; fp_f : fator de penalidade para a restrição de fluxo de potência nas linhas; fp_s : fator de penalidade para a restrição capacidade de operação do transformador.

Com a estrutura de vizinhança proposta, os vizinhos de uma solução codificada podem ser factíveis ou infactíveis. A seguir, apresentam-se os dois procedimentos adotados para lidar com os problemas de infactibilidades:

- Eliminar soluções infactíveis: se ao realizar uma transição o algoritmo BT verificar a existência de circuitos fracamente malhados, nós desconectados ou ainda conflito entre os circuitos (dois transformadores fazendo parte do mesmo circuito), esta transição é revertida. Outro problema de infactibilidade é causado quando uma solução apresenta atributos da lista tabu e não satisfaz o critério de aspiração. Neste caso, a ultima transição também é revertida;
- Penalizando as infactibilidades: as restrições de limites de tensão, fluxo de potência nas linhas e operação dos transformadores quando não atendidas geram infactibilidades. Entretanto, eliminar estas soluções não seria adequado porque neste tipo de problema as soluções factíveis representam uma parcela muito reduzida do espaço de busca. Neste caso, aplicam-se penalizações que são definidas conforme a função de adaptação e são calibradas adequadamente. Contudo, o fator de penalização é calibrado para resolver cada tipo de característica do problema de planejamento e projeto (redes tipicamente residenciais, comerciais, industriais) individualmente. Ou seja, o fator de penalização de

redes tipicamente residenciais não é necessariamente igual ao de redes em áreas mistas (residencial e comercial).

3.2.4 ESTRUTURA DE VIZINHANÇA

A forma de caracterizar a vizinhança pode ser decisiva na qualidade de um algoritmo BT. O esforço computacional do algoritmo BT é um aspecto muito relevante, e está relacionado com a estrutura de vizinhança de cada configuração corrente.

Baseado na proposta de codificação para o problema representado na figura 3.5, a estrutura de vizinhança é caracterizada da seguinte forma:

- (i) **Troca de ramos:** Este processo é realizado através de trocas de ramos em duas zonas a interzona e intrazona (GOSWAMI, 1997 e BAZAN, 2002). A cada iteração avaliam-se todas as possibilidades de trocas de ramos, sendo que a melhor configuração passa a ser a configuração corrente. Nesta etapa podem ocorrer conflitos entre circuitos (interzona) e surgimento de circuitos malhados (intrazona). Estes problemas são contornados revertendo a ultima transição;
- (ii) **Posição e Capacidade dos transformadores:** A cada troca de ramos é avaliada a posição e a capacidade dos transformadores de cada circuito. A busca de uma posição adequada do posto de transformação é realizada através do cálculo de momento elétrico. O objetivo é posicionar o transformador de modo a minimizar o módulo do momento elétrico de cada barra referente à barra do transformador. A capacidade do transformador é definida baseada na carga instalada (demanda dos consumidores do setor);
- (iii) **Recondutoramento e Balanceamento de Cargas:** O objetivo destes dois critérios se resume na obtenção de um nível adequado de tensão nas barras do sistema sob análise. A cada troca de ramos ou mudança de posição de transformadores são avaliados o recondutoramento dos alimentadores (mudança de bitola) e o balanceamento das cargas. O balanceamento de carga é realizado

em uma porcentagem das barras, mudando a posição das cargas em duas fases de forma aleatória;

- (iv) **Quantidade de transformadores:** Nessa etapa buscam-se soluções mais viáveis com a mudança de quantidade de transformadores. Ao se avaliar dois circuitos vizinhos e se identificar a possibilidade de transformá-los em um único circuito, realiza-se esta transição e repetem-se os procedimentos de (i) a (iii).

3.2.5 CRITÉRIO DE ASPIRAÇÃO E CRITÉRIO DE PARADA

O critério de aspiração estipula que se uma configuração vizinha encontrada ao se acionar um atributo proibido é de boa qualidade, então se deve eliminar a proibição. Considera-se que uma configuração vizinha é de boa qualidade quando apresenta função de adaptação melhor que a configuração incumbente do processo *BT*.

O processo de busca deve ser interrompido de forma adequada ao problema. O critério de parada consiste em avaliar o número de transições do processo *BT*, isto é, o processo de busca é interrompido se o número de iterações, preestabelecido na base de dados, for superado.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos com sistemas reais de expansão de rede aérea compacta de distribuição de energia elétrica para atender dois loteamentos considerando o algoritmo BT e as ferramentas auxiliares de análise e projeto: cálculo de fluxo de potência e cálculo mecânico para a definição de estruturas. Tais algoritmos foram implementados em linguagem de programação FORTRAN. Para implementá-los necessita-se de um computador do tipo PC com sistema operacional do tipo Windows ou similar com capacidade de memória RAM da ordem de 512Mb e unidades de disco rígido e CD-ROM. Os dados referentes às cargas, condutores, transformadores, postes, e as estruturas primária e secundária são apresentados a seguir.

4.1 DADOS DE ENTRADA

Detalham-se a seguir a estrutura e os dados necessários para o planejamento e projeto de circuitos secundários de distribuição aplicando-se a ferramenta computacional desenvolvida e implementada neste trabalho.

4.1.1 CARGAS

A metodologia do cálculo de carga foi desenvolvida por meio de medição de consumo médio dos consumidores em kWh para o faturamento e de cálculos estimativos do Sistema de Processamento de Dados da Distribuição (PRODADIS) da concessionária de distribuição de energia elétrica. Esta metodologia consiste em estimar o consumo de um novo consumidor com base nos já existentes, aplicando-se a curva de correlação entre kWh e kVA, elaborada com os dados do PRODADIS. A partir desta metodologia estima-se a carga do setor de transformador e dos consumidores a ele ligado (CPFL - GED 3735, 2004, p.14).

As demandas estatísticas do setor ($KVAS_{setor}$) e dos consumidores ($KVAS_{consumidor}$) podem ser calculadas do seguinte modo:

$$KVAS_{setor} = 0,037 \cdot (N_x \cdot M_R)^{0,803} \quad (4.1)$$

$$KVAS_{consumidor} = \frac{KVAS_{setor}}{N_x} \quad (4.2)$$

Sendo:

M_R : consumo médio estimado para o novo consumidor;

N_x : número de consumidores do setor a serem atendidos.

Com isso, a carga de cada consumidor varia de acordo com a característica e com a quantidade de consumidores pertencentes ao mesmo circuito. Normalmente a carga de cada consumidor residencial de classe de baixa e média renda sempre se encontra dentro de uma faixa de 1,5 a 1,8 kVA. Para consumidor residencial de classe alta a carga varia de 2,0 a 3,0 kVA.

4.1.2 CONDUTORES

Os cabos da rede secundária são condutores de alumínio isolados multiplexados com isolação 0,6/1kV (CPFL – GED 921, 2005). Suas especificações técnicas (impedâncias, bitolas, corrente máxima admissível e esforço mecânico) e seus respectivos custos estão apresentadas na tabela 4.1. Já os cabos da rede

primária são condutores de alumínio coberto em XLPE (CPFL – GED 920, 2003) cujas características estão descritas na tabela 4.2.

Tabela 4.1: Características dos cabos da rede secundária

Tipo	Seção (mm ²)	R (Ω/m)	X (Ω/m)	I _{max} (A)	Esforço(daN)	Custo(U\$/m)
1	3x1x35(35)	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$1,138 \cdot 10^{-4}$	129	135	1,99
2	3x1x50(50)	$7,44 \cdot 10^{-4}$	$1,092 \cdot 10^{-4}$	168	160	3,53
3	3x1x70(70)	$5,68 \cdot 10^{-4}$	$9,450 \cdot 10^{-5}$	227	240	4,60
4	3x1x120(70)	$2,94 \cdot 10^{-4}$	$9,420 \cdot 10^{-5}$	311	366	6,64

Tabela 4.2: Características dos cabos da rede primária

Tipo	Seção (mm ²)	I _{max} (A)	Esforço(daN)	Custo(U\$/m)
1	70	266	386	6,78
2	185	510	652	18,15

4.1.3 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICOS

Os transformadores trifásicos de distribuição de energia elétrica são dimensionados a partir do cálculo de fluxo de potência. Operam na frequência de 60Hz com tap primário de 13,8kV e tap secundário de 220/127V (CPFL – GED 196, 2003). Suas características e custos podem ser vistos na tabela 4.3 (CPFL – GED 3667, 2006, p. 10).

Tabela 4.3: Características dos transformadores de distribuição

Tipo	Potência	Demanda Máxima Diurno (KVA)	Demanda Máxima Noturno (KVA)	Custo fixo (US)
1	30kVA	até 52,5	até 56,2	1251,40
2	45kVA	52,6 a 78,7	56,3 a 83,7	1488,32
3	75kVA	78,8 a 131,2	83,8 a 140,0	2166,68
4	112,5kVA	131,3 a 196,2	140,1 a 210,0	2911,21

4.1.4 POSTES

A localização dos postes de distribuição é um dado de entrada do problema, sendo que o projetista deve alocar todos os postes segundo os critérios estabelecidos em normas técnicas das concessionárias. Na tabela 4.4 apresentam-se as características dos postes de concreto circular (CPFL – GED 1347, 2004) e seus respectivos custos.

Tabela 4.4: Características do postes de distribuição

Tipo	Comprimento (m)	Capacidade (daN)	Custo (U\$)
1	9	200	118,69
2	9	400	176,64
3	9	600	207,94
4	9	1000	278,04
5	11	200	171,03
6	11	400	252,34
7	11	600	296,29
8	11	1000	457,94
9	12	400	267,29
10	12	600	332,71
11	12	1000	469,21

4.1.5 ESTRUTURAS DAS REDES PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA

Para a definição das estruturas de redes de distribuição devem-se observar parâmetros básicos como: distâncias de segurança, afastamentos mínimos e características mecânicas e elétricas dos materiais. Para o problema em análise supõe-se que as distâncias de segurança e afastamentos mínimos são atendidas. As características mecânicas e elétricas definem cada tipo de estrutura e, portanto, a definição das estruturas somente é realizada após o processamento dos algoritmos de fluxo de potência e cálculo mecânico. As tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os custos relativos das estruturas da rede secundária e primária, respectivamente.

Tabela 4.5: Custos de investimentos das estruturas da rede secundária

Tipo	Descrição	Custo fixo (U\$)
1	S21D	19,51
2	S21DA	20,46
3	2S2F	41,44
4	2S2A	37,12
5	S32-S2	43,29
6	S2	17,55
7	2S21C	49,74
8	2S2DTO	24,10
9	S21C	42,13

Tabela 4.6: Custos de investimentos das estruturas da rede primária

Tipo	Descrição	Custo fixo (U\$)
10	CE1-1	44,51
11	CE1A-1	53,15
12	CE2-1	146,87
13	CE3-1	338,93
14	CE4-1	321,43
15	CE3CE3-1	350,86
16	CESC-1	788,57
17	CESHN3-1	721,48
18	CECC-1	498,36
19	CECECC-1	500,50
20	N3CECC-1	677,81
21	CEATT-1	164,85
22	CE1TR-1	600,18
23	CE3TR-1	625,78

4.2 SISTEMA I

Este sistema foi testado utilizando-se dados reais de um loteamento em construção de classe de baixa e média renda situado no município de Guapiaçú-SP, cuja topologia está ilustrada na figura 4.1. Este loteamento possui 167 lotes (características dos lotes: área média de 480m², ligação bifásica, consumo médio de 292kWh/mês), uma área de lazer com demanda de 5kVA, um reservatório elevado com motor trifásico de 15cv e uma estação de tratamento de esgoto com motor de 5cv. Adotou-se uma demanda média de 1,78kVA por consumidor. Para comparar o desempenho da ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho, apresenta-se para este sistema o projeto desenvolvido pelo engenheiro de planejamento, através de sua experiência prática e atendimento a normas técnicas.

Os parâmetros utilizados nos testes encontram-se na tabela 4.7. A tabela 4.8 apresenta os dados das cargas nas barras dos circuitos (cargas instaladas nas fases *abc*).

Tabela 4.7: Parâmetros de controle do algoritmo BT para o sistema I.

Parâmetros	Valor
Fator de Potência	0,92
Tensão Nominal do Circuito (Volts)	127
Limites de Variação de Magnitude de Tensão (%)	± 3,5
Fator de Penalidade (Limites Tensão) fp_v	500
Fator de Penalidade (Fluxo Potência no alimentador) fp_f	150
Fatores de Penalidade de (Carregamento dos Transformadores) fp_P e fp_Q	1000

Tabela 4.8 Dados cargas nas barras por fase para o sistema I.

Barra	Cargas (VA)					
	Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc
1	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
2	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01
3	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01
4	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
5	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01
6	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01
7	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
8	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01
9	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01
10	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
11	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01
12	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01
13	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
14	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01
15	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01
16	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
17	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01
18	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01
19	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
20	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01
21	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01
22	1.5333E+03	6.5317E+02	1.5333E+03	6.5317E+02	1.5333E+03	6.5317E+02
23	1.4260E+02	6.0745E+01	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
24	1.4260E+02	6.0745E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4260E+02	6.0745E+01
25	8.1880E+02	3.4879E+02	8.1880E+02	3.4879E+02	0.0000E+00	0.0000E+00
26	8.4870E+02	3.6153E+02	1.6974E+03	7.2306E+02	8.4870E+02	3.6153E+02
27	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02
28	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02
29	2.5013E+03	1.0655E+03	2.5013E+03	1.0655E+03	1.6675E+03	7.1032E+02
30	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02
31	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02
32	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02
33	8.4870E+02	3.6153E+02	1.6974E+03	7.2306E+02	8.4870E+02	3.6153E+02
34	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02
35	1.6974E+03	7.2306E+02	8.4870E+02	3.6153E+02	8.4870E+02	3.6153E+02
36	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02
37	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02
38	5.9800E+01	2.5474E+01	5.9800E+01	2.5474E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
39	8.4870E+02	3.6153E+02	8.4870E+02	3.6153E+02	1.6974E+03	7.2306E+02
40	0.0000E+00	0.0000E+00	5.9800E+01	2.5474E+01	5.9800E+01	2.5474E+01
41	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03
42	3.3230E+03	1.4155E+03	2.4923E+03	1.0617E+03	2.4923E+03	1.0617E+03
43	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03
44	2.5013E+03	1.0655E+03	2.5013E+03	1.0655E+03	1.6675E+03	7.1032E+02

Barra	Cargas (VA)					
	Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc
45	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03
46	2.4923E+03	1.0617E+03	2.4923E+03	1.0617E+03	3.3230E+03	1.4155E+03
47	5.9800E+01	2.5474E+01	5.9800E+01	2.5474E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
48	3.2108E+03	1.3677E+03	3.2108E+03	1.3677E+03	3.2108E+03	1.3677E+03
49	1.6675E+03	7.1032E+02	2.5013E+03	1.0655E+03	2.5013E+03	1.0655E+03
50	2.4923E+03	1.0617E+03	3.3230E+03	1.4155E+03	2.4923E+03	1.0617E+03
51	2.4923E+03	1.0617E+03	2.4923E+03	1.0617E+03	3.3230E+03	1.4155E+03
52	3.3230E+03	1.4155E+03	2.4923E+03	1.0617E+03	2.4923E+03	1.0617E+03
53	2.4923E+03	1.0617E+03	3.3230E+03	1.4155E+03	2.4923E+03	1.0617E+03
54	2.5013E+03	1.0655E+03	1.6675E+03	7.1032E+02	2.5013E+03	1.0655E+03
55	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02
56	5.9800E+01	2.5474E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	5.9800E+01	2.5474E+01
57	2.5013E+03	1.0655E+03	1.6675E+03	7.1032E+02	2.5013E+03	1.0655E+03
58	2.4923E+03	1.0617E+03	2.4923E+03	1.0617E+03	3.3230E+03	1.4155E+03
59	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03
60	2.5013E+03	1.0655E+03	2.5013E+03	1.0655E+03	1.6675E+03	7.1032E+02
61	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03
62	4.6000E+03	1.9595E+03	5.4786E+03	2.3338E+03	5.4786E+03	2.3338E+03
63	5.9800E+01	2.5474E+01	5.9800E+01	2.5474E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
64	3.3230E+03	1.4155E+03	2.4923E+03	1.0617E+03	2.4923E+03	1.0617E+03
65	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03	3.3151E+03	1.4121E+03
66	1.6675E+03	7.1032E+02	2.5013E+03	1.0655E+03	2.5013E+03	1.0655E+03
67	2.4923E+03	1.0617E+03	3.3230E+03	1.4155E+03	2.4923E+03	1.0617E+03
68	2.4923E+03	1.0617E+03	2.4923E+03	1.0617E+03	3.3230E+03	1.4155E+03
69	0.0000E+00	0.0000E+00	5.9800E+01	2.5474E+01	5.9800E+01	2.5474E+01
70	5.9800E+01	2.5474E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	5.9800E+01	2.5474E+01
71	8.4870E+02	3.6153E+02	1.6974E+03	7.2306E+02	8.4870E+02	3.6153E+02
72	1.6974E+03	7.2306E+02	8.4870E+02	3.6153E+02	8.4870E+02	3.6153E+02
73	8.4870E+02	3.6153E+02	8.4870E+02	3.6153E+02	1.6974E+03	7.2306E+02
74	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02
75	8.4870E+02	3.6153E+02	1.6974E+03	7.2306E+02	8.4870E+02	3.6153E+02
76	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02	1.6775E+03	7.1456E+02

Na figura 4.1 mostram-se as topologias do sistema I sob estudo, sendo que:

- Figura 4.1 (a) tem-se a topologia que é obtida usando a experiência dos engenheiros de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica. Este sistema projetado é o que foi executado na prática e é utilizado para fins de comparação com a metodologia proposta neste trabalho;
- Figura 4.1 (b) a topologia obtida através da ferramenta computacional para planejamento e projeto de sistemas secundários de distribuição desenvolvida neste trabalho de pesquisa.

Nas tabelas 4.9 e 4.10 apresentam-se os resultados de tensão nas barras e elementos (postes e estruturas secundária e primária), respectivamente, para o sistema I sob análise, planejado e projetado baseado na experiência do engenheiro. Da mesma forma, nas tabelas 4.11 e 4.12 apresentam-se os resultados obtidos através da ferramenta computacional proposta neste trabalho. Na tabela 4.13 apresentam-se as comparações dos custos obtidos entre as duas técnicas, ou seja, método prático de projetos e ferramenta computacional desenvolvida.

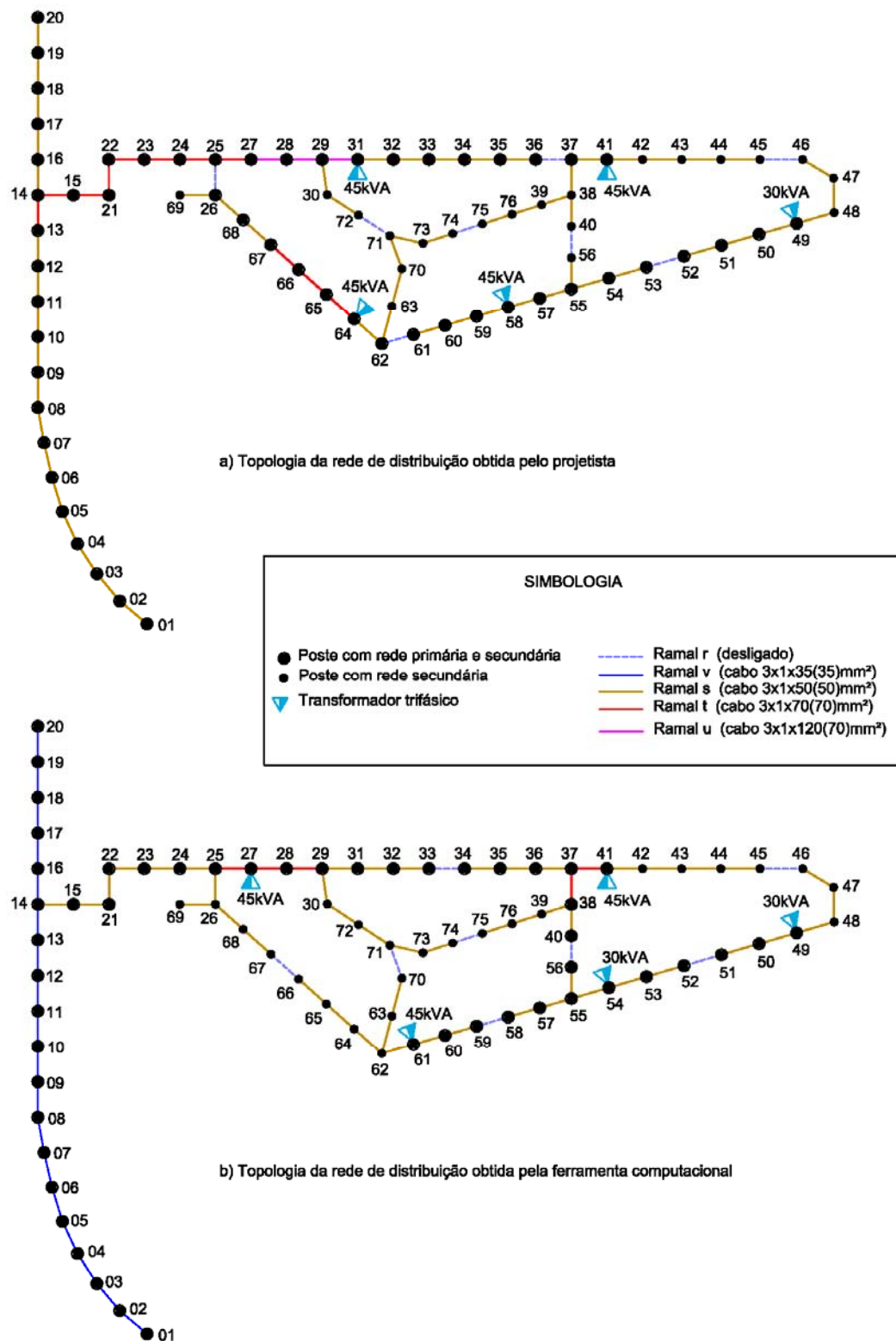


Figura 4.1: Topologia da rede distribuição do sistema I.

Tabela 4.9: Magnitudes de tensões nas barras para a configuração obtida através da prática para o sistema I.

Barra	Tensão (V)			Barra	Tensão (V)		
	Va	Vb	Vc		Va	Vb	Vc
31	127,017	127,017	127,017	42	125,294	125,409	125,528
29	126,215	126,274	126,369	38	125,904	125,665	125,682
32	125,975	125,978	126,095	43	124,026	124,142	124,380
28	125,751	125,818	125,962	39	125,598	125,280	125,298
30	125,864	126,011	126,107	40	125,904	125,659	125,677
33	125,162	125,166	125,401	44	123,216	123,333	123,689
27	125,384	125,459	125,651	76	125,264	124,833	124,964
72	125,632	125,895	125,992	45	122,754	122,871	123,228
34	124,464	124,587	124,823	75	125,152	124,608	124,852
25	124,890	124,982	125,261	49	127,017	127,017	127,017
35	123,998	124,239	124,475	48	126,257	126,257	126,153
24	124,515	124,621	124,901	50	125,880	125,882	125,881
36	123,766	124,007	124,244	47	125,895	125,895	125,681
23	124,270	124,376	124,666	51	125,082	125,200	125,084
22	123,987	124,094	124,385	46	125,569	125,569	125,245
21	123,873	123,980	124,272	52	124,626	124,858	124,742
15	123,765	123,880	124,172	58	127,017	127,017	127,017
14	123,606	123,743	124,035	57	126,006	126,104	126,006
13	123,496	123,633	123,938	59	125,767	125,767	125,883
16	123,521	123,680	123,972	55	125,267	125,371	125,267
12	123,369	123,506	123,811	60	124,968	124,968	125,200
17	123,470	123,646	123,921	54	124,718	124,823	124,718
11	123,229	123,384	123,690	56	125,261	125,371	125,261
18	123,436	123,612	123,887	61	124,512	124,513	124,745
10	123,108	123,264	123,587	53	124,443	124,457	124,444
19	123,401	123,595	123,870	64	127,017	127,017	127,017
9	123,000	123,156	123,479	62	125,977	125,760	125,759
20	123,385	123,595	123,853	65	125,875	125,595	125,688
8	122,930	123,098	123,421	63	125,486	125,156	125,154
7	122,872	123,039	123,374	66	125,081	124,521	124,707
6	122,808	122,976	123,311	70	125,036	124,601	124,591
5	122,744	122,928	123,264	67	124,462	123,712	123,990
4	122,696	122,880	123,232	71	125,036	124,601	124,591
3	122,667	122,851	123,202	68	124,002	123,122	123,405
2	122,635	122,835	123,186	73	124,798	124,362	124,272
1	122,619	122,819	123,186	26	123,881	122,870	123,275
41	127,017	127,017	127,017	74	124,576	124,139	124,049
37	126,320	126,194	126,203	69	123,881	122,863	123,267

Tabela 4.10: Elementos da configuração obtidos através da prática para o sistema I.

Barra	Poste (m/daN)	Estrutura Primária	Estrutura Secundária	Barra	Poste (m/daN)	Estrutura Primária	Estrutura Secundária
1	11/1000	CE3-1	2S2A	39	9/200	-----	S21D
2	11/200	CE2-1	S21D	40	9/200		2S2A
3	11/200	CE2-1	S21D	41	12/600	CE3TR-1	2S2A
4	11/200	CE2-1	S21D	42	9/200	-----	S21D
5	11/200	CE2-1	S21D	43	9/200	-----	S21D
6	11/200	CE2-1	S21D	44	9/200	-----	S21D
7	11/200	CE2-1	S21D	45	9/200	-----	2S2A
8	11/200	CE2-1	S21D	46	9/200	-----	2S2A
9	11/200	CE1A-1	S21D	47	9/400	-----	S21C
10	11/200	CE1-1	S21D	48	9/400	-----	S21C
11	11/200	CE1-1	S21D	49	12/600	CE3TR-1	2S2A
12	11/200	CE1-1	S21D	50	11/200	CE1-1	S21D
13	11/200	CE1-1	2S2F	51	11/200	CE1-1	S21D
14	11/1000	CESC-1	2S21C	52	11/200	CE1-1	2S2A
15	11/200	CE1A-1	S21D	53	11/200	CE1-1	2S2A
16	11/200	CE1-1	S21D	54	11/200	CE1-1	S21D
17	11/200	CE1-1	S21D	55	11/200	CE1-1	2S2DTO
18	11/200	CE1-1	S21D	56	9/200	-----	2S2A
19	11/200	CE1-1	S21D	57	11/200	CE1-1	S21D
20	11/1000	CE3-1	2S2A	58	12/400	CE1TR-1	2S2A
21	11/1000	CE3CE3-1	S21C	59	11/200	CE1-1	S21D
22	11/1000	CE3CE3-1	S21C	60	11/200	CE1-1	S21D
23	11/200	CE1-1	S21D	61	11/200	CE1-1	2S2A
24	11/200	CE2-1	S21DA	62	11/1000	CE4-1	S21C
25	11/1000	CESC-1	S21D	63	9/200	-----	S21D
26	11/1000	CE4-1	S21D	64	12/400	CE1TR-1	2S2A
27	11/200	CE1-1	2S2F	65	11/200	CE1-1	S21D
27	11/200	CE1-1	S21D	66	11/200	CE1-1	S21D
28	11/200	CE1-1	2S2F	67	11/200	CE1-1	2S2F
30	9/200	-----	S21DA	68	11/200	CE1-1	S21D
31	12/400	CE1TR-1	2S2A	69	9/400	-----	2S2A
32	11/200	CE1-1	S21D	70	9/400	-----	S21C
33	11/200	CE1-1	S21D	71	9/400	-----	2S2A
34	11/200	CE1-1	S21D	72	9/200	-----	2S2A
35	11/200	CE1-1	S21D	73	9/200	-----	S21D
36	11/200	CE1-1	2S2A	74	9/200	-----	2S2A
37	11/200	CE1-1	S21C	75	9/200	-----	2S2A
38	9/400	-----	2S2DTO	76	9/200	-----	S21D

Tabela 4.11: Magnitudes de tensões nas barras para a configuração obtida através de ferramenta computacional para o sistema I.

Barra	Tensão (V)			Barra	Tensão (V)		
	Va	Vb	Vc		Va	Vb	Vc
27	127,017	127,017	127,017	1	122,884	122,849	123,148
25	125,909	125,736	125,914	41	127,017	127,017	127,017
28	125,585	125,490	125,675	37	125,384	125,373	125,383
24	125,423	125,268	125,447	42	125,294	125,409	125,528
26	125,230	124,852	125,131	36	124,688	124,795	124,805
29	124,330	124,141	124,509	38	124,755	124,631	124,650
23	125,105	124,950	125,142	43	124,026	124,142	124,380
68	124,524	124,024	124,306	35	124,222	124,447	124,457
69	125,230	124,844	125,124	39	124,291	124,088	124,107
30	123,791	123,601	123,970	40	124,755	124,626	124,644
31	123,747	123,437	123,927	44	123,216	123,333	123,689
22	124,740	124,585	124,778	34	123,991	124,216	124,226
67	124,181	123,565	123,962	76	123,859	123,566	123,675
72	123,319	123,127	123,498	45	122,754	122,871	123,228
32	123,396	122,967	123,577	75	123,599	123,218	123,414
21	124,593	124,438	124,631	74	123,426	123,045	123,241
71	123,083	122,772	123,144	9	127,017	127,017	127,017
33	123,279	122,730	123,459	48	126,257	126,257	126,153
15	124,453	124,307	124,501	50	126,341	126,227	126,227
73	123,002	122,691	122,982	47	125,895	125,895	125,681
14	124,246	124,130	124,324	51	126,002	125,889	125,774
13	124,055	123,939	124,154	46	125,569	125,569	125,245
16	124,134	124,046	124,240	54	127,017	127,017	127,017
12	123,885	123,769	123,985	53	126,386	126,386	126,477
17	124,065	124,000	124,171	55	126,284	126,382	126,192
11	123,698	123,605	123,822	52	126,025	126,116	126,206
18	124,019	123,954	124,125	56	126,279	126,382	126,187
10	123,537	123,444	123,684	57	125,740	125,929	125,555
19	123,974	123,931	124,103	58	125,468	125,658	125,192
9	123,393	123,300	123,539	61	127,017	127,017	127,017
20	123,951	123,931	124,080	60	126,227	126,227	126,340
8	123,299	123,222	123,462	62	125,221	125,104	125,104
7	123,221	123,144	123,399	59	125,775	125,775	125,889
6	123,136	123,059	123,315	63	125,204	125,096	125,096
5	123,051	122,995	123,251	64	124,138	124,018	124,018
4	122,987	122,931	123,208	70	125,196	125,096	125,088
3	122,948	122,891	123,169	65	123,447	123,209	123,209
2	122,905	122,870	123,148	66	123,215	122,861	122,861

Tabela 4.12: Elementos da configuração obtidos através de ferramenta computacional para o sistema I.

Barra	Poste (m/daN)	Estrutura Primária	Estrutura Secundária	Barra	Poste (m/daN)	Estrutura Primária	Estrutura Secundária
1	11/1000	CE3-1	2S2A	39	9/200	-----	2S2F
2	11/200	CE2-1	S21D	40	11/200	CE1-1	2S2A
3	11/200	CE2-1	S21D	41	12/600	CE3TR-1	2S2A
4	11/200	CE2-1	S21D	42	9/200	-----	S21D
5	11/200	CE2-1	S21D	43	9/200	-----	S21D
6	11/200	CE2-1	S21D	44	9/200	-----	S21D
7	11/200	CE2-1	S21D	45	9/200	-----	2S2A
8	11/200	CE2-1	S21D	46	9/400	-----	2S2A
9	11/200	CE1A-1	S21D	47	9/400	-----	S21C
10	11/200	CE1-1	S21D	48	9/600	-----	S21C
11	11/200	CE1-1	S21D	49	12/600	CE3TR-1	2S2A
12	11/200	CE1-1	S21D	50	11/200	CE1-1	S21D
13	11/200	CE1-1	S21D	51	11/200	CE1-1	2S2A
14	11/1000	CESC-1	2S2DTO	52	11/200	CE1-1	2S2A
15	11/200	CE1A-1	S21D	53	11/200	CE1-1	S21D
16	11/200	CE1-1	S21D	54	12/400	CE1TR-1	2S2A
17	11/200	CE1-1	S21D	55	11/1000	CESC-1	2S2DTO
18	11/200	CE1-1	S21D	56	11/200	CE1A-1	2S2A
19	11/200	CE1-1	S21D	57	11/200	CE1-1	S21D
20	11/1000	CE3-1	2S2A	58	11/200	CE1-1	2S2A
21	11/1000	CE3CE3-1	S21C	59	11/200	CE1-1	2S2A
22	11/1000	CE3CE3-1	S21C	60	11/200	CE1-1	S21D
23	11/200	CE1-1	S21D	61	12/600	CE3TR-1	2S2A
24	11/200	CE2-1	S21DA	62	9/600	-----	2S2DTO
25	11/400	CE1-1	2S21C	63	9/200	-----	S21D
26	9/600	-----	S21C	64	9/200	-----	S21D
27	12/400	CE1TR-1	2S2A	65	9/200	-----	S21D
28	11/200	CE1-1	S21D	66	9/200	-----	2S2A
29	11/400	CE1-1	2S2A	67	9/200	-----	2S2A
30	9/200	-----	S21DA	68	9/200	-----	S21D
31	11/200	CE1-1	S21D	69	9/400	-----	2S2A
32	11/200	CE1-1	S21D	70	9/400	-----	2S2A
33	11/200	CE1-1	2S2A	71	9/400	-----	S21DA
34	11/200	CE1-1	2S2A	72	9/200	-----	S21D
35	11/200	CE1-1	S21D	73	9/200	-----	2S2A
36	11/200	CE1-1	S21D	74	9/200	-----	2S2A
37	11/1000	CESC-1	2S2DTO	75	9/200	-----	S21D
38	11/400	CE1-1	2S2DTO	76	9/200	-----	S21D

Tabela 4.13: Comparação entre as configurações analisadas do sistema I.

Descrição	Custos (U\$) Configuração Prática	Custos (U\$) Ferramenta Computacional
Perdas (anual)	$9,36.10^2$	$9,32.10^2$
Postes	$1,51.10^4$	$1,52.10^4$
Estrutura Secundária	$2,04.10^3$	$2,09.10^3$
Estrutura Primária	$9,36.10^3$	$9,40.10^3$
Transformadores	$7,21.10^3$	$6,97.10^3$
Cabos Rede Secundária	$8,86.10^3$	$7,68.10^3$
Cabos Rede Primária	$1,21.10^4$	$1,08.10^4$
Total	$5,56.10^4$	$5,31.10^4$

4.3 SISTEMA II

Este sistema apresenta dados reais de um loteamento em construção de classe de baixa renda situado no município de São José do Rio Preto-SP, cuja topologia está ilustrada na figura 4.2. Este loteamento possui 201 lotes (características dos lotes: área média de 300m², ligação bifásica, consumo médio de 292kWh/mês), uma área de lazer com demanda de 5kVA, um reservatório elevado com motor trifásico de 15cv.

Os parâmetros utilizados nos testes encontram-se na tabela. 4.14. Tratam-se de custos reais que foram especificados para mostrar a robustez e eficiência da metodologia proposta. Os dados das cargas nas barras dos circuitos (cargas instaladas nas fases *abc*) estão ilustrados na tabela 4.15. Os resultados referentes aos dados da nova configuração encontrada como solução e dos custos totais estão indicados nas tabelas 4.16 e 4.17. Estes resultados foram obtidos com a ferramenta computacional desenvolvida e implementada neste trabalho.

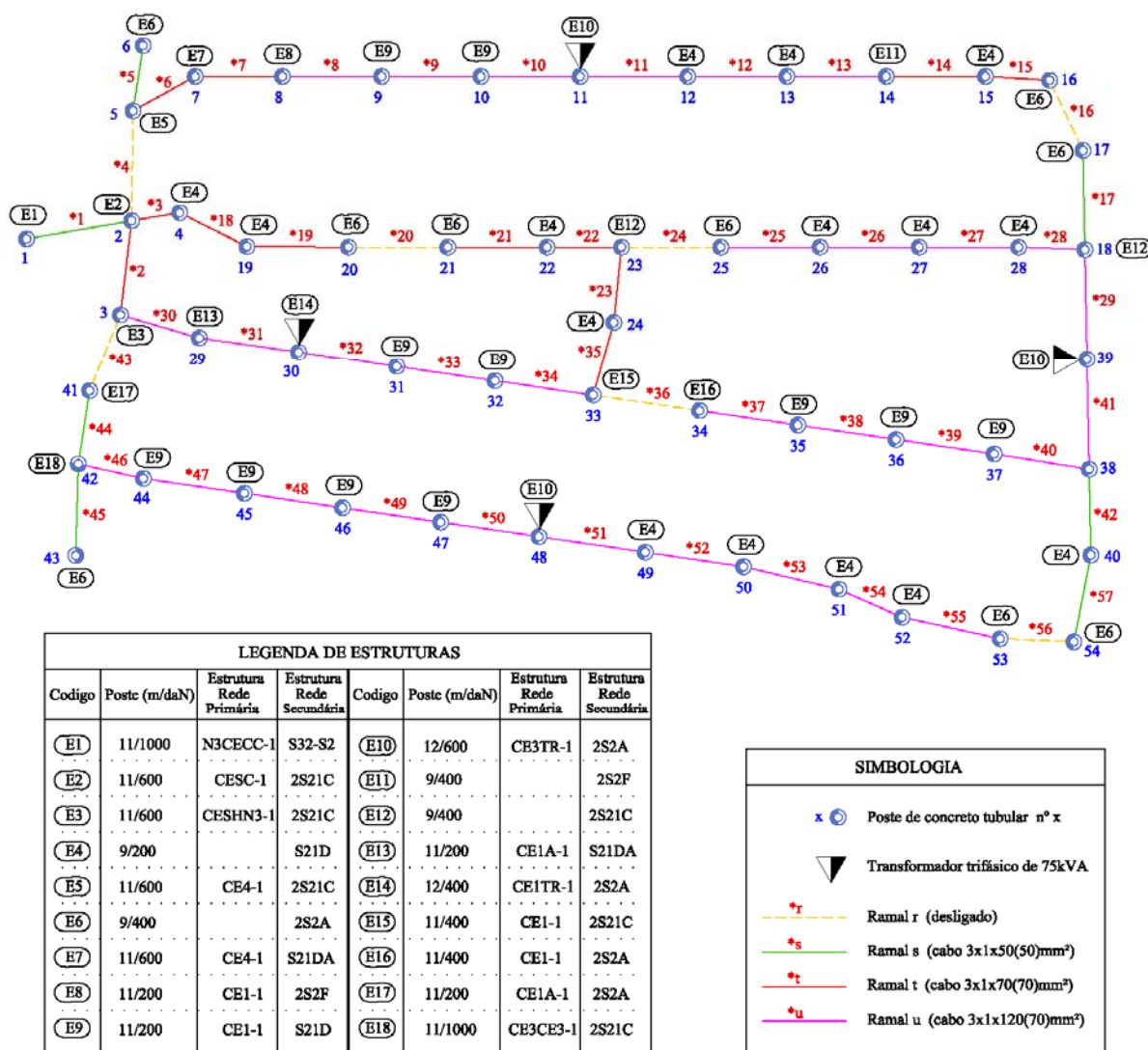


Figura 4.2: Topologia da rede distribuição e resultados obtidos para o sistema II.

Tabela 4.14: Parâmetros de controle do algoritmo BT para o sistema II

Parâmetros	Valor
Fator de Potência	0,92
Tensão Nominal do Circuito (Volts)	127
Potência dos Transformadores (kVA)	45
Limites de Variação de Magnitude de Tensão (%)	± 3,5
Fator de Penalidade (Limites Tensão) fpv	150
Fator de Penalidade (Fluxo Potência no alimentador) fpf	100
Fatores de Penalidade de (Carregamento dos Trafos) fp _P e fp _Q	1000

Tabela 4.15. Dados cargas nas barras por fase para o sistema II.

Barra	Cargas nas fases (kVA)			Barra	Cargas nas fases (kVA)			Barra	Cargas nas fases (kVA)		
	a	b	c		a	b	c		a	b	c
1	0,095	0,095	0,000	19	1,845	1,845	1,750	37	3,240	2,525	2,525
2	0,970	0,000	0,970	20	1,845	1,750	1,845	38	2,995	2,900	2,995
3	0,970	1,875	0,970	21	1,750	1,845	1,845	39	2,525	1,620	2,525
4	0,000	0,970	0,970	22	1,750	0,970	0,870	40	0,810	0,095	0,905
5	1,770	1,770	1,675	23	1,845	1,845	1,750	41	2,465	3,160	2,465
6	0,885	0,000	0,885	24	0,095	0,000	0,095	42	1,675	1,675	1,580
7	2,465	2,465	1,580	25	2,525	3,240	2,525	43	0,885	0,095	0,790
8	3,255	3,255	3,160	26	3,335	3,240	3,335	44	0,790	0,885	0,095
9	3,255	3,160	3,255	27	3,240	3,335	3,335	45	2,465	2,465	3,160
10	3,160	3,255	3,255	28	2,525	1,620	2,525	46	3,255	3,160	3,255
11	3,950	4,045	4,835	29	1,845	1,750	1,845	47	3,160	3,255	3,255
12	3,255	3,160	3,255	30	12,155	12,155	11,465	48	3,950	4,835	4,045
13	3,255	3,160	3,255	31	1,845	1,845	1,750	49	3,255	3,255	3,160
14	1,580	2,465	2,465	32	1,750	1,845	1,845	50	3,160	3,255	3,255
15	3,255	3,255	3,160	33	1,845	1,750	1,845	51	3,255	3,160	3,255
16	2,465	2,465	1,580	34	3,335	3,335	3,240	52	1,675	1,770	1,770
17	0,095	0,095	0,000	35	3,335	3,335	3,240	53	1,675	1,580	1,675
18	0,095	0,000	0,095	36	3,240	3,335	3,335	54	0,095	0,000	0,095

Tabela 4.16: Resultados da nova configuração para os circuitos do sistema II.

Barra	Queda Tensão (%)			Barra	Queda Tensão (%)		
	Va	Vb	Vc		Va	Vb	Vc
3	0,86	0,96	0,98	25	2,72	2,84	2,73
6	3,36	2,88	3,02	33	1,66	1,69	1,67
8	2,45	2,25	2,22	34	3,39	3,49	3,49
14	2,31	2,48	2,28	38	1,17	1,19	1,24
16	3,26	3,43	3,03	41	3,41	3,48	3,30
18	0,92	0,90	0,92	42	3,13	3,12	3,01
20	2,29	2,41	2,57	43	3,28	3,13	3,15
21	3,09	3,15	3,09	53	2,44	2,42	2,47

Tabela 4.17: Custos totais obtidos do planejamento e operação do circuito do sistema II.

Custo	Configuração Proposta
Operação (U\$)	$2,59.10^3$
Postes e estruturas(U\$)	$1,83.10^4$
Transformadores (U\$)	$8,67.10^3$
Condutores (U\$)	$1,65.10^4$
Total (U\$)	$4,61.10^4$

4.4 COMENTÁRIOS DOS TESTES

De acordo com testes realizados, observa-se a expansão do sistema secundário para atender os novos consumidores com instalação de condutores, postes, estruturas, transformadores e outros, obedecendo as restrições físicas dos transformadores, níveis adequados de tensão, máximo fluxo de potência nos alimentadores e radialidade.

Os algoritmos de fluxo de potência, cálculo mecânico e estrutural são eficientes e ágeis na determinação da topologia do sistema sob estudo. Embora os postos de transformação estejam definidos, o algoritmo de configuração inicial apresenta solução de boa qualidade mantendo o sistema radial com níveis de tensão adequados.

Comparando-se os resultados obtidos através da experiência prática de projetista de empresas elétricas e os resultados obtidos através da metodologia proposta neste trabalho, verifica-se a superioridade desta última ao encontrar soluções mais atrativas economicamente com a redução da quantidade de homens/horas necessárias para executar o mesmo projeto. Nos testes com o sistema I verifica-se que a redução de custos entre o projeto obtido pela metodologia proposta e executado de forma prática foi da ordem de 5%. Valor suficiente para uma empresa prestadora de serviços ganhar a concorrência de uma obra. É importante salientar que grande parte da economia proporcionada com a ferramenta computacional está nos custos com a aquisição de materiais: transformadores, cabos de redes primárias e secundárias.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, o planejamento de circuitos secundários de distribuição foi formulado como um PNLIM, que incorpora os principais aspectos físicos reais do problema que afetam diretamente os custos de investimentos. Dentre estes aspectos contemplam-se as possibilidades de ligações de novos consumidores com o dimensionamento adequado dos condutores, instalação dos cabos dos circuitos primário e secundário, instalação de postes, instalação de estruturas dos circuitos secundário e primário, posição, capacidade e quantidade de transformadores. Também são levados em conta o balanceamento de cargas e os custos de operação relacionada às perdas elétricas.

Dadas as características dos circuitos secundários onde estão presentes os menores níveis de tensão do sistema elétrico, a análise simultânea da realização destes procedimentos permite obter uma proposta de construção e/ou reforma de rede com menores custos de investimento e operação.

Para solução do PNLIM foi proposto um Algoritmo BT dedicado juntamente com um algoritmo de fluxo de potência trifásico encontrado na literatura e um algoritmo para cálculo mecânico e determinação das estruturas primárias e secundárias. O sistema de codificação adotado permite desenvolver um algoritmo de busca tabu eficiente e seguro para o planejamento de circuitos secundários de distribuição. Ao rotina de cálculo de fluxo de potência trifásico é uma ferramenta eficiente e necessária na solução do problema, uma vez que se trata de redes secundárias de baixa tensão em que os problemas de desequilíbrio de cargas e as

perdas estão presentes em todas as fases e, inclusive no neutro.

O sistema computacional implementado e desenvolvido a partir da metodologia proposta é uma ferramenta para análise e projeto de sistemas secundários de distribuição extremamente útil, tanto para o setor de planejamento das empresas distribuidoras como para as empresas que desenvolvem projetos para o setor elétrico.

Sugestões para trabalhos futuros.

Melhorar o algoritmo de busca tabu através do uso de funções avançadas de busca tabu e especificação de critérios de vizinhanças que permitem explorar melhor o espaço de busca. Dentre esses critérios, pode-se considerar as possibilidades de interligações das redes primária e secundária, número de circuitos secundários, entre outros.

Implementar um algoritmo BT para otimização de alocação de postes com vistas a melhorar a qualidade da solução do problema de planejamento e projetos de distribuição. Contudo, tornaria o problema ainda mais complexo e de maior esforço computacional.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8451**. Postes de concreto armado para redes de distribuição de energia elétrica - Especificação, 1998.

BAZAN, F. A. et al. **Planejamento de Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando um Algoritmo de Busca Tabu**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, Natal, p. 586-592, 2002.

CHENG, C. S. e SHIRMOHAMMADI, D. A. **Three-Phase Power Flow Method For Real-Time Distribution System Analysis**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 10, n.2, p. 671-679, 1995

CIRIC, R. M.; FELTRIN, A. P.; OCHOA, L. F. **Power flow in four-wire distribution networks-general approach**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 18, n. 4, p. 1283-1290, 2003.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 3667**. Projeto de Rede de Distribuição – Cálculo Elétrico, 2006, 20 p. Disponível em:
<http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_normas.asp>
. Acessado em: 23 junho 2006.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 3735**. Projeto – Loteamento e Núcleos Habitacionais, 2004, 27 p. Disponível em:
<http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_normas.asp>.
Acessado em: 23 junho 2006.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 3648**. Projeto de Rede de Distribuição – Cálculo Mecânico, 2005, 27 p. Disponível em:
<http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_normas.asp>.
Acessado em: 23 junho 2006.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 4244**. Rede Primária Compacta 15kV – Montagem Estruturas Básicas, 2005, 40 p. Disponível em:
<http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_padroes.asp>
. Acessado em: 23 junho 2006.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 4260**. Rede Primária Compacta 15kV – Montagem Chave Fusível, 2004, 18 p. Disponível em:
<http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_padroes.asp>
. Acessado em: 23 junho 2006.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 4241**. Rede Primária Compacta 15kV – Montagem Transformador, 2005, 13 p. Disponível em:
<http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_padroes.asp>
. Acessado em: 23 junho 2006.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 3597**. Montagem – Rede Secundária com Cabos Multiplexados, 2005, 23 p. Disponível em:
<http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_padroes.asp>
. Acessado em: 23 junho 2006.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 921**. Cabo Multiplexado 0,6/1kV, 2005, 2 p. Disponível em:
<http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_especificacoes.asp>.
Acessado em: 23 junho 2006.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 920**. Rede Compacta – Cabos cobertos, 2003, 2 p. Disponível em:
<http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_especificacoes.asp>.
Acessado em: 23 junho 2006.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 1347**. Poste de Concreto Circular, 2004, 3 p. Disponível em:
<http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_especificacoes.asp>.
Acessado em: 23 junho 2006.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED 196**. Transformadores de Distribuição para Postes e Cabinas, 2003, 15 p. Disponível em: <http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/inf_publicacao_especificacoes.asp>. Acessado em: 23 junho 2006.

COSSI, A. M.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. **Planning of secondary distribution circuits through evolutionary algorithms**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 1, p. 205-213, 2005.

COSTA, A. M.; FRANÇA, P. M. **Planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 14., Natal, p. 2563-2568, 2002.

GARCIA et al. **GRASP para problema de planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 35., Natal, p. 1427-1437, 2003.

GARCIA et al. **Consideração de perdas técnicas no planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica**. Campinas, 2004. 6 p.

GLOVER, F. **Tabu Search Fundamentals and Uses**. University of Colorado, Boulder, Colorado, 1995.

GLOVER, F e KOCHENBERGER, G.A. **Handbook of Metaheuristics**, Kluwer Academic Publishers, 2003.

GÖNEN, T. **Electric Power Distribution System Engineering**, McGraw-Hill. Series in Electrical Engineering, 1986.

GOSWAMI, S.K. **Distribution System Planning Using Branch Exchange Technique**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 12 n. 2, p. 718-723, USA, 1997.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005, 328 p.

RESENDE, M. G. C.; WERNECK, R. F. **A GRASP with path-relinking for the p-median problem**. Technical Report TD-5E53XL, AT&T Labs Research, Florham Park, NJ 07932 USA, 2002.

PARDALOS, P. M.; RESENDE, M. G. C. **Handbook of applied optimization**. McGraw-Hill, 1986.

PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST. Disponível em: www.aneel.gov.br . Acessado em: 15 abril, 2006.

SOUZA, A. A. A.; JR., F.N. **Otimização de projetos de rede secundária de distribuição**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 33., Campos do Jordão, p. 1203-1212, 2001.