

Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

# Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica

Eduardo Yoshimoto

**Banca Examinadora:**

Christiano Lyra Filho - FEEC/UNICAMP

Akebo Yamakami - FEEC/UNICAMP

Raul Vinhas Ribeiro - FEEC/UNICAMP

Marcos Carneiro da Silva - TELEDESIGN

Dissertação de Mestrado apresentada à comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Elétrica

Campinas, 31 de julho de 2003

SP-Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Yoshimoto, Eduardo

Planejamento de redes secundárias de distribuição de energia  
elétrica/Yoshimoto, Eduardo.-Campinas, SP:[s.n.], 2003.

**Y83p**

Orientador: Christiano Lyra Filho

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Programação heurística.  
3.Otimização combinatória. 4. Redes elétricas - Planejamen-  
to. 5. Redes elétricas. 6. Inteligência artificial. I. Lyra Filho,  
Christiano. II. Universidade Estadual de Campinas.Faculade  
de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título

# Resumo

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para o Problema de Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica. A metodologia visa a minimização dos custos através de métodos heurísticos de otimização, tendo o compromisso de atendimento da demanda do consumidor final.

A metodologia foi desenvolvida para um cenário onde se planeja a construção de um novo loteamento ("greenfield"). Divide-se a metodologia em três etapas, utilizando-se técnicas formais de otimização baseadas em heurísticas construtivas e de melhoria.

Inicialmente, localiza-se os transformadores, utilizando-se o método das *p*-medianas. Em seguida, através do algoritmo de obtenção de caminhos mínimos, é feita a ligação dos consumidores finais aos transformadores. Por fim, utilizando-se de um problema de Steiner, é feito o condutoramento da rede primária aos transformadores. Esta divisão é a fase construtiva do método GRASP. Na fase de melhoria é aplicada uma Busca em Vizinhança Variável (VNS).

O trabalho propõe também uma nova metodologia para consideração adequada dos requisitos de potência e energia nas redes.

Estudos de casos detalhados ilustram a aplicação das metodologias propostas.

# Abstract

This work presents a new methodology for the planning problem of secondary networks in power distribution systems. The approach aims to minimize the compromise between facility costs and technical losses in secondary systems. The methodology was mainly developed for greenfield problems, where a new network must be built completely. It comprises three main phases, based on formal optimization techniques and heuristics.

The first phase deals with transformers allocation, using a *p-median* optimization model. The second phase solves the secondary network routing problem. Finally, a Steiner tree problem defines the connections of transformers with the existing primary network. The three phases comprise the constructive part of a Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP). Following, a Variable Neighborhood Search (VNS) process is applied to improve the solution.

The work also presents a new approach to deal with loads, separating power and energy demands.

Case studies illustrate the possibilities of the approach.

Dedico esta dissertação aos meus pais, Arlindo e Sarah

*Este trabalho teve o suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - (CAPES).*

# Agradecimento Especial

Ao Prof. Christiano Lyra Filho

Pela orientação, paciência, amizade e momentos de descontração. Um exemplo de pessoa, sendo fonte inesgotável de incentivo e entusiasmo em todos os momentos deste trabalho.

# Agradecimentos

Primeiramente, a Deus, por permitir a realização deste grande sonho. Por todas as graças que tem me dado, desde o momento de minha concepção junto a minha querida família, até meus dias presentes.

Aos meus queridos pais e irmãos, Arlindo e Sarah, Rosane e Lucas, por serem prova viva de que tudo que é feito com amor e carinho rendem bons frutos, e que não existe distância que separe a união de uma família.

Aos meus avós, tios e primos que muito me incentivaram quando sai de casa atrás de meus sonhos, e também ao apoio que deram aos meus pais no momento de minha partida.

À Iraídes, pelo amor, carinho, companhia, incentivo e principalmente paciência em todos os momentos de nossa vida em conjunto.

Aos meus amigos Allyson, Edilson, Luiz, José, Marcelo, Cristiane, Vinícius, Luciano, Aníbal, André, Irênio, Rubia, Tatiane e todos os amigos do Densis, que tornam o ambiente de trabalho e a convivência em grupo algo extremamente agradável.

Ao apoio dos Professores Paulo Morelato França e Celso Cavellucci, que com muita experiência e sabedoria, forneceram valiosas discussões e contribuições para a conclusão do trabalho.

Ao Engenheiro Francisco Bassotelli (CPFL) pelas discussões sobre a validação dos dados utilizados e resultados obtidos.

À secretária Márcia, que sempre com muita paciência e atenção ajudou a solucionar os problemas burocráticos.

À Miriam, do suporte técnico e aos estagiários, profissionais sempre presentes e imprescindíveis, para o bom funcionamento de nosso trabalho.

À Companhia Paulista de Força e Luz - (CPFL) pela colaboração financeira ao trabalho.



# Sumário

Resumo . . . . .	ii
Abstract . . . . .	iv
<b>Agradecimento Especial</b>	<b>vii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>viii</b>
<b>1 Apresentação</b>	<b>1</b>
<b>2 Planejamento de Redes de Distribuição de Energia Elétrica</b>	<b>3</b>
2.1 Introdução . . . . .	3
2.2 Planejamento de Redes de Distribuição . . . . .	5
2.2.1 Planejamento de Redes Primárias . . . . .	7
2.2.2 Planejamento de Redes Secundárias . . . . .	7
2.3 Formulação Matemática do Problema de Planejamento de Redes Secundárias	10
2.4 Representação de Aspectos Dinâmicos do Problema . . . . .	13
<b>3 Breve Revisão Bibliográfica</b>	<b>14</b>
3.1 Introdução . . . . .	14
3.2 Análise de Publicações para o Planejamento de Redes Secundárias . . . . .	15
3.3 Síntese das Contribuições . . . . .	17
<b>4 Abordagens para o Problema de Planejamento de Redes Secundárias</b>	<b>18</b>

4.1	Introdução . . . . .	18
4.2	Métodos Exatos . . . . .	19
4.3	Métodos Aproximados . . . . .	21
4.3.1	Método Aproximado de Carneiro e colaboradores . . . . .	24
4.3.2	Heurística de Carneiro Estendida . . . . .	29
4.4	Heurística Híbrida . . . . .	31
4.5	Discussão . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Métodos GRASP e VNS para Otimização Combinatória</b>	<b>35</b>
5.1	Introdução . . . . .	35
5.1.1	Método GRASP . . . . .	35
5.1.2	Método GRASP com Memória . . . . .	37
5.2	Busca em Vizinhança Variável . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Método Holístico</b>	<b>40</b>
6.1	Introdução . . . . .	40
6.2	Decomposição do PPRSD . . . . .	40
6.3	Método Holístico . . . . .	41
6.3.1	Aplicação do Método Grasp para Fase Construtiva . . . . .	41
6.3.2	Fase de Melhoria com o Método VNS . . . . .	43
6.3.3	Síntese do Método Holístico . . . . .	44
6.4	Informações de Entrada e Resultados Fornecidos . . . . .	47
6.4.1	Dados Iniciais . . . . .	48
6.4.2	Informações de Saída . . . . .	49
6.5	Algoritmos . . . . .	50
6.5.1	Leitura de Dados (ReadInstance) . . . . .	51
6.5.2	Criação de Matrizes (CriaMatrizes) . . . . .	52
6.5.3	Localização dos Transformadores (GulosaDemanda) . . . . .	53

6.5.4	Verificação das Cargas (TransfereCargas) . . . . .	54
6.5.5	Cálculo de Fluxos (CalculaFluxos) . . . . .	55
6.5.6	Determinação dos Arcos da Rede Primária (CalculaArcosPrimários) . . . . .	56
6.5.7	Conexão com a Rede Primária (Primário) . . . . .	57
6.5.8	Calculo dos Custos (CalculaCustos) . . . . .	58
6.5.9	Atualização da Melhor Solução (Atualiza) . . . . .	59
6.5.10	Troca de Posição de Transformador (MudaVizinho) . . . . .	60
6.6	Consideração da Relação entre Demanda de Energia e Potência . . . . .	60
6.6.1	Utilização da curva kVAs na metodologia de Planejamento de Redes Secundárias . . . . .	61
<b>7</b>	<b>Estudos de Casos</b>	<b>63</b>
7.1	Introdução . . . . .	63
7.2	Primeiro Conjunto de Estudos de Casos . . . . .	63
7.2.1	Definição dos Custos . . . . .	64
7.2.2	Resultados . . . . .	67
7.3	Aplicação do Método Holístico no Planejamento Detalhado de Redes Secundárias . . . . .	70
7.3.1	Definição dos Custos . . . . .	71
7.3.2	Curva kVAs . . . . .	74
7.3.3	Resultados . . . . .	78
7.4	Discussão . . . . .	81
<b>8</b>	<b>Conclusões</b>	<b>82</b>

# Lista de Figuras

2.1	Sistema de Energia Elétrica . . . . .	3
2.2	Representação de um Sistema de Distribuição . . . . .	6
2.3	Sistema de Distribuição . . . . .	7
2.4	Dados iniciais de entrada: traçado das ruas, posicionamento dos postes e delimitação dos lotes. . . . .	8
2.5	Dados de entrada trabalhados: postes com demanda associada e conexões possíveis entre os postes já definidas. Círculo em volta do nó indica que o poste associado recebe a rede primária. . . . .	9
2.6	Dados de saída para o problema: localização dos transf. e traçado da rede primária . . . . .	10
2.7	Dados de saída para o problema: conexão dos postes com demanda aos transformadores e potência alocada a cada transformador . . . . .	10
2.8	Modelo de dois níveis para rede primária e secundária . . . . .	11
4.1	Heurística de Carneiro <i>et al.</i> . . . . .	28
4.2	Diagrama esquemático da busca local . . . . .	31
4.3	Algoritmo Híbrido . . . . .	33
5.1	Método GRASP . . . . .	36
5.2	Método VNS . . . . .	38
6.1	Diferentes soluções encontradas pelo método GRASP . . . . .	43

6.2	Estrutura de vizinhanças utilizadas pelo VNS . . . . .	44
6.3	Fluxograma do Algoritmo Holístico . . . . .	46
6.4	Legenda . . . . .	47
6.5	Solução obtida pelo método GRASP . . . . .	47
6.6	Solução melhorada pelo método VNS . . . . .	47
6.7	Algoritmo Holístico . . . . .	50
6.8	ReadInstance() . . . . .	51
6.9	CriaMatrizes() . . . . .	52
6.10	GulosaDemanda() . . . . .	53
6.11	TransfereCargas() . . . . .	54
6.12	CalculaFluxos() . . . . .	55
6.13	CalculaArcosPrimários() . . . . .	56
6.14	Primário() . . . . .	57
6.15	CalculaCustos() . . . . .	58
6.16	Atualiza() . . . . .	59
6.17	MudaVizinho() . . . . .	60
6.18	kVAs Ilustrativa . . . . .	61
6.19	Fluxograma da Curva kVAs no método proposto . . . . .	62
7.1	Custos dos alimentadores secundários (US\$) segundo o fluxo de potência (kVA). . . . .	66
7.2	LoteTeste . . . . .	71
7.3	Característica dos Cabos Utilizados . . . . .	74
7.4	Curva kVAs . . . . .	75
7.5	Legenda . . . . .	75
7.6	kVAs - Aproximação 1 . . . . .	76
7.7	kVAs - Aproximação 2 . . . . .	76
7.8	kVAs - Aproximação 3 . . . . .	77

7.9	kVAs - Aproximação Final . . . . .	77
7.10	Cabos Secundários - Teste 1 . . . . .	79
7.11	Cabos Primários - Teste 1 . . . . .	79
7.12	Cabos Secundários - Teste 2 . . . . .	80
7.13	Cabos Primários - Teste 2 . . . . .	81

# Lista de Tabelas

4.1	Principais dificuldades encontradas pelas abordagens exata e heurística. . .	32
7.1	Custos para as instâncias dos grupos 1 e 2 . . . . .	65
7.2	Custos para as instâncias do grupo 3 . . . . .	65
7.3	Resultados das heurísticas para as instâncias geradas aleatoriamente . . . .	68
7.4	Resultados das heurísticas para as instâncias geradas ordenadamente . . .	68
7.5	Instância real 1 . . . . .	69
7.6	Instância real 2 . . . . .	69
7.7	Instância real 3 . . . . .	69
7.8	Custo dos Equipamentos . . . . .	72
7.9	Custo dos Itens Novos . . . . .	72
7.10	Carregamento Máximo dos Cabos . . . . .	73
7.11	Custo de cada item - Teste 1 . . . . .	78
7.12	Carregamento dos Transformadores Utilizados . . . . .	78
7.13	Custo de cada item - Teste 2 . . . . .	80

# Capítulo 1

## Apresentação

Este trabalho propõe uma metodologia para o Problema de Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição em Sistemas de Potência (PPRSD). O subsistema de distribuição é dividido em duas partes: rede primária e a rede secundária. A rede primária vai das subestações abaixadoras até os transformadores de rua; a rede secundária, dos transformadores até os consumidores finais. Este trabalho concentra-se no planejamento das redes secundárias de distribuição de energia elétrica. Em particular, concentra-se no problema de planejamento de redes secundárias novas (*greenfield*).

Um planejamento adequado das redes de distribuição secundárias deve encontrar a melhor relação entre o ganho com a redução de perdas e os investimentos na aquisição e instalação de equipamentos.

Além dos ganhos financeiros diretos, o planejamento das redes de distribuição pode permitir a consideração de questões adicionais, como qualidade da energia elétrica, confiabilidade da rede, limitações nos orçamentos e flexibilidade para expansão (Vaziri et al., 2000).

A expansão do sistema de distribuição é necessária sempre que a demanda de uma região apresenta um crescimento que a aproxima dos limites de operação dos equipamentos, ou quando se deseja atender uma nova área. A expansão pode envolver a construção



e/ou ampliação de subestações, instalação de postes, instalação e/ou recondutoramento de trechos de alimentadores, entre outras operações—todas elas com altos custos de investimentos associados.

Neste trabalho é proposto um novo método de otimização para a resolução deste problema. O método consiste na utilização de conceitos heurísticos dos métodos GRASP (Feo and Resende, 1995) e VNS (Hansen and Mladenovic, 2001). Estes métodos vêm sendo utilizados em aplicações registradas na literatura e tratam o problema de forma global, o que leva a uma maior chance de encontrar boas soluções - no caso, soluções que encontram um bom compromisso entre custo de implantação e redução de perdas.

Na abordagem proposta foi levado em consideração aspectos de atendimento de energia e de demanda máximas, pontos que não foram analisados em abordagens anteriores. Esses aspectos permitem uma avaliação de melhor qualidade da relação investimento/perdas.

O Capítulo 2 discute os principais aspectos para representação de Redes de Distribuição em problemas de planejamento. Uma revisão bibliográfica é apresentada no Capítulo 3. Alguns métodos de resolução e heurísticas para o tratamento do problema são abordadas nos Capítulos 4 e 5. O modelo proposto é descrito detalhadamente no Capítulo 6. Estudos de caso para avaliação da heurística desenvolvida são apresentados no Capítulo 7. O Capítulo 8 apresenta conclusões, finalizando o trabalho.

# Capítulo 2

## Planejamento de Redes de Distribuição de Energia Elétrica

### 2.1 Introdução

Um sistema de energia elétrica, também conhecido como sistema de potência, pode ser dividido em três grandes partes : geração, transmissão e distribuição. As perdas de energia ocorrem em todo o sistema, porém são maiores no sistema de distribuição (Bueno, 2000).

A Fig. 2.1 apresenta uma síntese ilustrativa de um sistema de energia elétrica. A

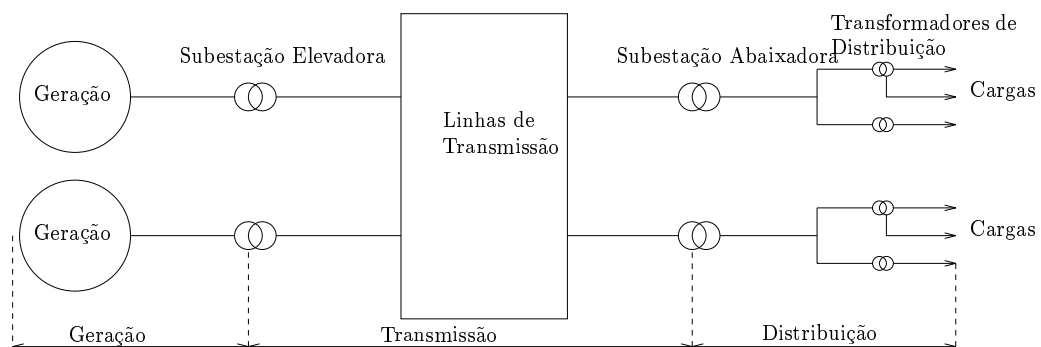


Figura 2.1: Sistema de Energia Elétrica

geração de energia é realizada nas centrais geradoras de energia, que transformam a energia primária (por exemplo: mecânica, térmica, nuclear, eólica ou hidráulica) em energia motriz, e em seguida, em energia elétrica.

A energia elétrica passa por uma subestação elevadora, onde se eleva a tensão e inicia-se a fase de transmissão. A energia é transportada do centro produtor até os centros consumidores. A necessidade de elevação dos níveis de tensão se dá por dois fatores: níveis de tensões altos permitem reduzir perdas e viabilizam o transporte de grandes blocos de energia. Quando a energia chega aos centros consumidores, ela passa por estações abaixadoras, onde as tensões são reduzidas.

Os sistemas de distribuição são compostos de todos os equipamentos e acessórios instalados a partir das subestações abaixadoras até os pontos de consumo. São usualmente subdivididas em redes de distribuição primária e redes de distribuição secundária.

Como já vimos, a transmissão da energia elétrica é feita em alta tensão. Para distribuir esta energia é necessário reduzir a tensão, normalmente para valores em torno de 13.8 kV. Esta redução é feita por transformadores instalados nas subestações abaixadoras. Após a redução, a energia elétrica é transmitida através das linhas de distribuição que formam a rede primária.

A distribuição da energia elétrica para os consumidores finais é feita normalmente por redes secundárias que operam em torno de 220 V ou 127 V (entre fase e neutro). A redução de tensão da rede primária para a tensão da rede secundária é feita pelos transformadores de distribuição (instalados nos postes).

A operação usual de um sistema de distribuição (primário e secundário) é da forma radial, ou seja, não são permitidos ciclos. Esta configuração visa adequar o custo e requisitos de proteção para a operação da rede. Os alimentadores primários, no entanto, podem ser conectados a seus vizinhos através de chaves de interligação, normalmente abertas. Estas chaves têm a função de aumentar a confiabilidade do sistema, no caso de falhas. Podem também ser usadas para reconfigurações com objetivo de redução de

perdas.

Um sistema de energia elétrica deve suprir adequadamente as necessidades de energia em todos os pontos de consumo de energia. A qualidade do fornecimento é caracterizada pelo fornecimento de energia a estes pontos de forma contínua com constância na frequência e nível de tensão. O fornecimento de energia com o menor custo possível e baixo impacto ambiental também são indicativos de qualidade.

## 2.2 Planejamento de Redes de Distribuição

O planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser resumido à seguinte forma: conhecendo-se a magnitude e localização das cargas para um ano horizonte, procura-se expandir o sistema de forma a garantir o atendimento da demanda de energia, ano a ano, dentro de padrões técnicos de atendimento e de operação, ao menor custo total possível. Vale lembrar que o planejamento da rede de distribuição envolve a definição dos equipamentos e a alocação destes dentro da rede.

A expansão de um sistema de distribuição é necessária sempre que exista uma nova região habitada (novo loteamento), ou ainda quando a demanda de uma região apresenta crescimento significativo. Envolve a construção de subestações, instalação de postes, alimentadores e de todos os outros equipamentos necessários para o bom funcionamento da rede.

Os níveis de tensão das redes de distribuição são normalmente usados para subdividir o problema do planejamento. Em um primeiro plano, temos o problema de planejamento da rede de distribuição primária (por exemplo, tensão de 13.8 kV). Em um segundo plano temos o problema de planejamento da rede de distribuição secundária (por exemplo, tensão de 220V). A Fig. 2.2 ilustra esquematicamente esses dois níveis.

A maioria das publicações encontradas na literatura sobre o tema da “expansão do sistema de distribuição” ignora a rede secundária, tratando apenas de encontrar configu-

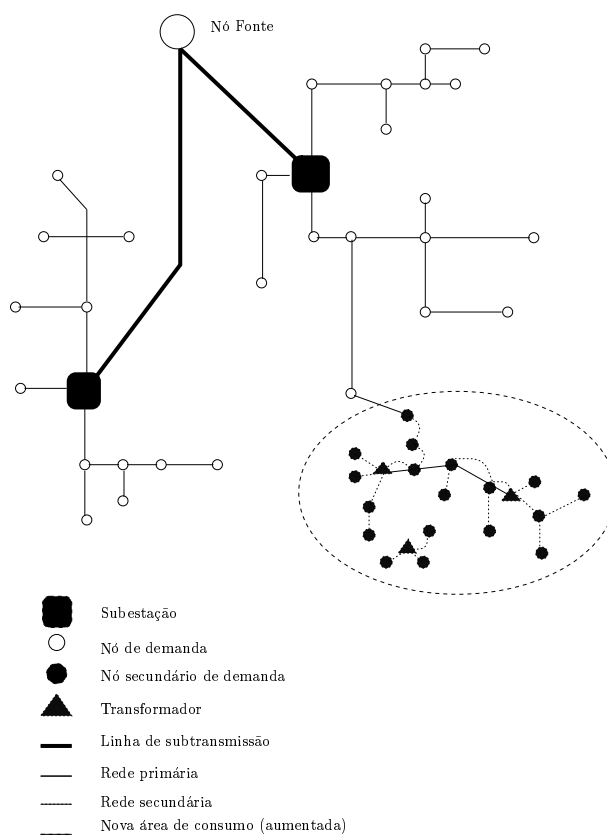


Figura 2.2: Representação de um Sistema de Distribuição

rações ótimas ou sub-ótimas para as subestações e para o roteamento dos alimentadores primários.

Em grandes linhas, o planejamento de redes de distribuição secundárias consiste em encontrar a melhor relação custo/benefício para levar energia através de redes secundárias para um conjunto pré-definido de consumidores, com definição dos seguintes componentes:

- número, capacidade e localização dos transformadores secundários;
- definição de todos os trechos das redes secundárias, incluindo-se a topologia (traçado), tipo e bitola dos cabos.
- definição dos trechos de rede primária para fazer a conexão da rede secundária em estudo ao sistema de distribuição já existente.

## 2.2.1 Planejamento de Redes Primárias

O planejamento do sistema primário define os seguintes componentes: o número, a localização e o dimensionamento das subestações de distribuição; o roteamento e bitola dos cabos de alimentação primários; equipamentos de manobra, reguladores de tensão e capacitores para correção de reativos. Em comparação com as redes secundárias, as redes primárias trabalham com maiores blocos de energia.

## 2.2.2 Planejamento de Redes Secundárias

No planejamento do sistema secundário procura-se definir o número, os locais de instalação e as potências dos transformadores de distribuição, bem como a rota e a bitola dos cabos secundários. Também devem ser definidas as ampliações das redes primárias, necessárias para fazer a interligação entre as redes secundárias e as redes primárias existentes. A Fig. 2.3 ilustra estes componentes.

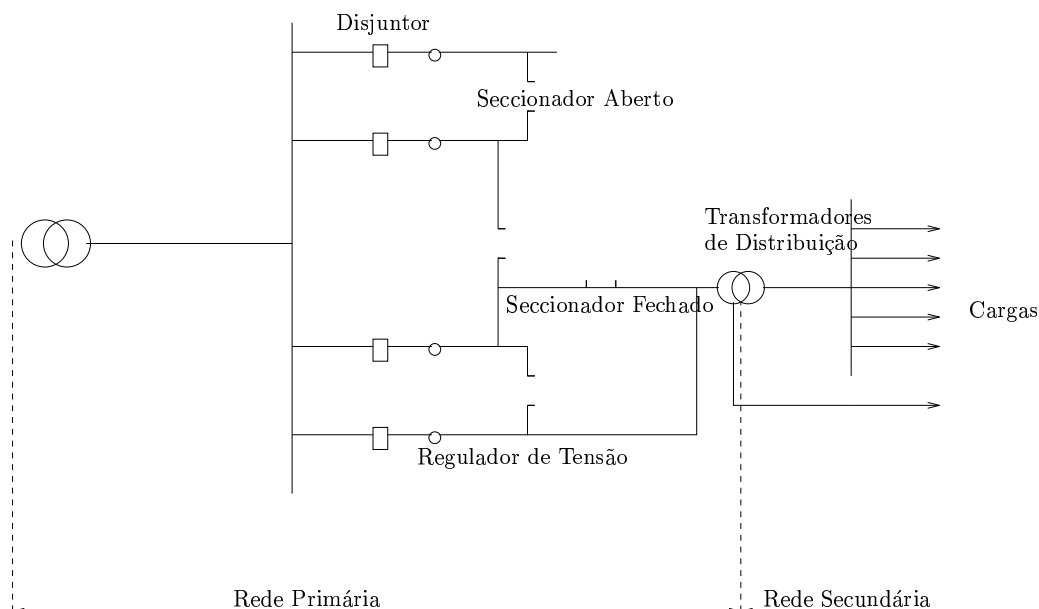


Figura 2.3: Sistema de Distribuição

Assim como no problema de expansão da rede primária, o objetivo é encontrar o

melhor compromisso entre os custos de expansão e redução de perdas. Como mencionado no Capítulo 1, este trabalho concentra-se no problema de implantação de redes novas (*greenfield*).

A Figura 2.4 mostra esquematicamente os principais componentes para definição do problema de planejamento de redes secundárias:

1. traçado das ruas;
2. posição dos postes;
3. postes já abastecidos com rede primária.

A cada poste estão associadas demandas de energia e potência.

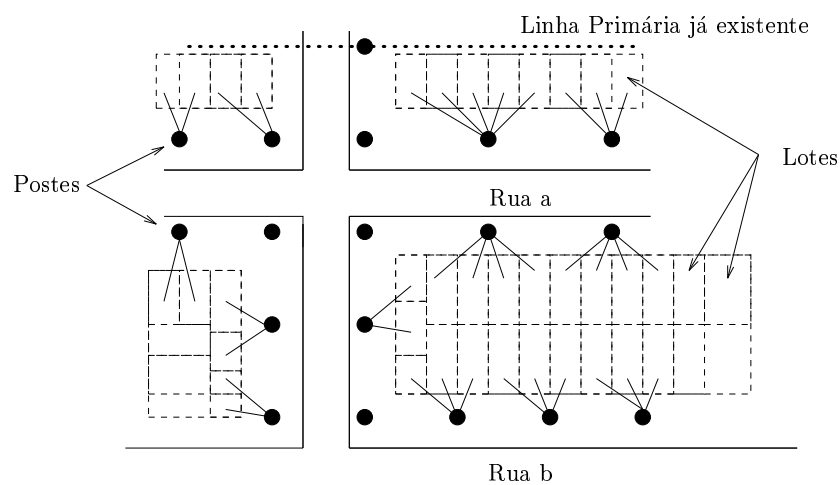


Figura 2.4: Dados iniciais de entrada: traçado das ruas, posicionamento dos postes e delimitação dos lotes.

Adota-se um modelo de grafos (Ahuja et al., 1993) para representação do problema de planejamento de redes secundárias. A Figura 2.5 apresenta um modelo de grafos para o problema de expansão ilustrado na Figura 2.4. O traçado das ruas foi convertido em arcos, que fazem as conexões entre os nós, que representam postes - nem todos os postes

vizinhos podem ser conectados. O nó marcado duplamente indica a presença de tensão primária.<sup>1</sup>

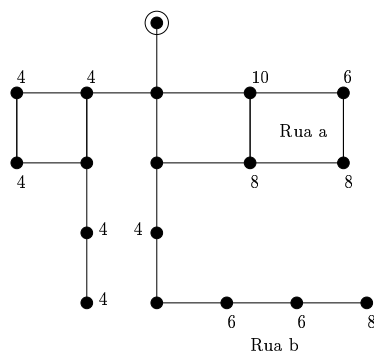


Figura 2.5: Dados de entrada trabalhados: postes com demanda associada e conexões possíveis entre os postes já definidas. Círculo em volta do nó indica que o poste associado recebe a rede primária.

A partir das informações de entrada, o método proposto para solução do problema deve ser capaz de indicar a solução de planejamento que atenda a demanda da forma mais econômica. Ou seja, o método deve ser capaz de apresentar a solução que represente o melhor compromisso entre os custos de instalação de equipamentos e os custos de perdas.

O conjunto de informações obtidas pela metodologia adotada para abordar o problema de planejamento deve incluir os seguintes elementos:

1. postes que devem receber transformadores;
2. capacidade de cada transformador instalado;
3. traçado da rede secundária;
4. ligação dos transformadores instalados com a rede primária existente.

---

<sup>1</sup>Importante ressaltar que esta figura é meramente didática, apresentando simplificações para facilitar a visualização. Por exemplo, em redes reais, os postes são normalmente colocados em apenas um dos lados da rua e não nos dois, como expresso na figura.



As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram um conjunto de informações obtidas pelo processo de planejamento. A Figura 2.6 mostra as conexões da rede primária aos transformadores enquanto a Figura 2.7 mostra as conexões destes aos pontos de demanda. Os transformadores, representados na figura como triângulos, têm suas demandas associadas conhecidas - o planejador deve escolher transformadores com capacidade nominal suficiente para atender essas demandas.

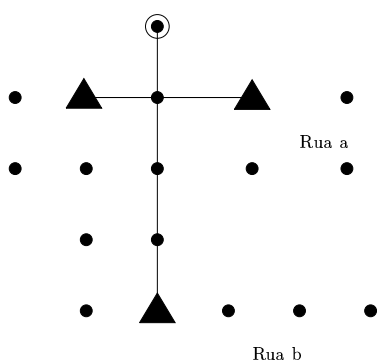


Figura 2.6: Dados de saída para o problema: localização dos transf. e traçado da rede primária

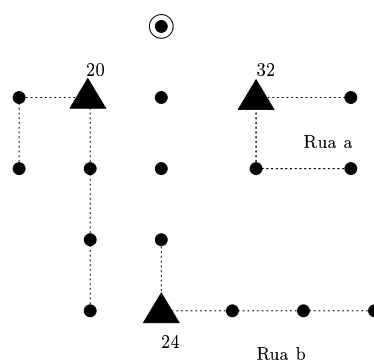


Figura 2.7: Dados de saída para o problema: conexão dos postes com demanda aos transformadores e potência alocada a cada transformador

## 2.3 Formulação Matemática do Problema de Planejamento de Redes Secundárias

Este trabalho adota a formulação matemática do problema de planejamento de redes secundárias proposto por Carneiro e colaboradores (1996). Esses autores expressam o problema como um grafo de dois níveis, conforme pode ser visto na Figura 2.8. Conectando os dois níveis, estão os arcos que representam os locais onde há transformadores. Observe que, fisicamente, os caminhos associados aos alimentadores primários podem ser os mesmos que os dos alimentadores secundários.

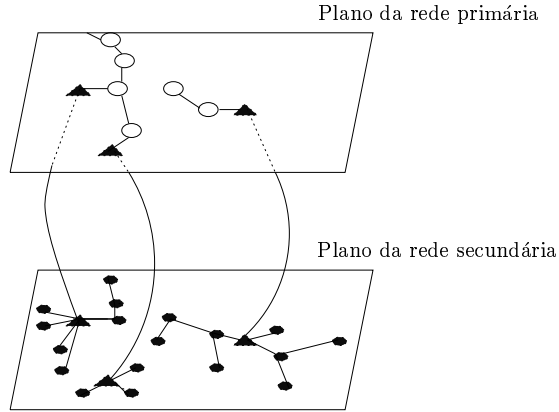


Figura 2.8: Modelo de dois níveis para rede primária e secundária

O modelo ilustrado na Figura 2.8 duplica os nós do grafo, criando explicitamente os níveis primário e secundário (na realidade, sabe-se que os postes que sustentam a rede primária, sustentam também a rede secundária, sendo o desmembramento em dois níveis um artifício matemático). Usando-se a representação em dois níveis, Carneiro e colaboradores(1996) propõem a formulação(2.1)-(2.8).

$$Min \sum_{j \in M} (\varphi_j(x_j) + F_j y_j) \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$Ax = b \quad (2.2)$$

$$-y_j \bar{x}_j \leq x_j \leq y_j \bar{x}_j \quad \forall j \in M_1 \quad (2.3)$$

$$0 \leq x_j \leq y_j \bar{x}_j \quad \forall j \in M_2 \quad (2.4)$$

$$\sum_{j \in S_k} y_j \leq 1 \quad \forall k \in N \quad (2.5)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in N \quad (2.6)$$

$$\text{Restrições de radialidade} \quad (2.7)$$

$$\text{Restrições de queda de tensão} \quad (2.8)$$

Onde:

- A função objetivo (2.1) representa o custo total anualizado composto dos custos fixos ( $F_j y_j$ ) e variáveis ( $\varphi_j(x_j)$ ), sendo  $F_j$  o custo fixo do elemento  $j$ ,  $y_j$  uma variável binária associada com o elemento  $j$ ,  $\varphi_j$  o custo variável do elemento  $j$  e  $\bar{x}_j$  o limite de fluxo de potência no arco  $j$ ;
- O conjunto de equações (2.2) garante o atendimento da demanda e a conservação dos fluxos de potências nos nós, sendo  $A$  a matriz de incidência nó-arco associada ao grafo que representa a rede,  $x_j$  o fluxo de potência no arco  $j$  e  $b$  o vetor de demanda de potência;
- As restrições (2.3) e (2.4) fazem com que apenas elementos existentes ou a serem construídos ( $y_i = 1$ ) apresentem fluxos de potências, além de garantir o respeito às capacidades dos elementos, sendo  $M$  o conjunto de arcos ( $M = M_1 \cup M_2$ ),  $M_1$  o conjunto de arcos pertencentes ao plano superior (rede primária) ou plano inferior (rede secundária) e  $M_2$  o conjunto de arcos conectando os dois planos;
- As restrições (2.5) impedem que mais de um transformador seja instalado em um nó, enquanto as restrições (2.6) garantem a integralidade da solução, sendo  $N$  o conjunto de nós e  $S_k$  o conjunto de arcos de  $M_2$  associados ao nó  $k$ .

A formulação apresentada caracteriza o PPRSD como um problema de otimização não linear, com variáveis reais e inteiras. Estas propriedades o tornam um problema de solução difícil, para o qual não é possível obter soluções ótimas em instâncias grandes.

Abordagens que procuram contornar esta dificuldade, obtendo soluções de boa qualidade, mas não necessariamente “ótimas”, são discutidas no próximo capítulo.

## 2.4 Representação de Aspectos Dinâmicos do Problema

A formulação (2.1)-(2.8) caracteriza o problema de planejamento de redes secundárias de distribuição para uma situação de demandas conhecidas, em um ano horizonte. Modelos deste tipo são chamados de modelos estáticos.

Pode-se também caracterizar um problema mais complexo, que procure trabalhar não apenas com a demanda de um ano horizonte, mas sim com as previsões de demandas para todos os estágios do período de planejamento. Modelos que lidam com este problema são chamados de modelos dinâmicos.

Uma abordagem de compromisso é utilizar a solução obtida através de um modelo estático para gerar um novo problema: como programar o cronograma das obras necessárias para atender a demanda do ano horizonte, de maneira a atender da melhor forma possível os anos intermediários. Esta abordagem é chamada de pseudodinâmica.

Este trabalho concentra-se na solução do problema de planejamento para redes com demandas conhecidas no ano horizonte, na forma caracterizada pelas equações (2.1)-(2.8).

# Capítulo 3

## Breve Revisão Bibliográfica

### 3.1 Introdução

Neste capítulo serão analisadas publicações sobre o planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica. Esta revisão é fortemente apoiada na discussão realizada no relatório “Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica - Levantamento do Estado do Conhecimento (Costa et al. (2001))”, posteriormente atualizada na dissertação de Mestrado de Costa (2002).

Deve-se destacar que a bibliografia sobre planejamento de redes secundárias é pequena. Por isso, Costa e colaboradores (2001) e Costa (2002) discutem também problemas relacionados com o planejamento de redes primárias e problemas semelhantes em outras áreas - por exemplo, nas áreas de telecomunicações e transporte.

Neste capítulo discute-se apenas trabalhos relacionados com o planejamento de redes secundárias. Para avaliação mais detalhada, incluindo trabalhos em outras áreas com formulação semelhantes, sugere-se consultar o trabalho de Costa (2002).

## 3.2 Análise de Publicações para o Planejamento de Redes Secundárias

Embora as primeiras referências na área de técnicas de planejamento de sistemas de baixa tensão datem da década de 60, a bibliografia na área registra um número reduzido de trabalhos.

A primeira referência encontrada sobre o assunto é o artigo de Davies (1965), descrevendo uma abordagem analítica para o projeto de redes de baixa tensão. O trabalho apresenta uma metodologia para reduzir o custo total de instalação e de perdas ao longo da vida útil dos cabos, respeitando restrições de quedas de tensões e fluxos máximos. No entanto, não faz qualquer referência ao problema da localização de transformadores.

Snelson and Carson (1970) estenderam o trabalho de Davies (1965), considerando o caso em que já existe uma rede instalada. Esses autores procuram ampliar a capacidade das redes, ou apenas reconfigurar os cabos para minimização dos custos.

Backlund and Bubenko (1979) propuseram a metodologia que procura obter uma rede inicial através de um algoritmo de construção de “árvores de pesos mínimos” (Ahuja et al., 1993). A partir da solução inicial, melhorias são obtidas por troca de arcos da árvore. No entanto, uma vez que a solução inicial despreza aspectos importantes, como o custo das perdas, a metodologia tem limitações em relação à capacidade de obter soluções próximas a otimalidade.

Aoki et al. (1990) propuseram um método heurístico para integrar o planejamento da rede primária e da rede secundária. Seu método se baseia na construção de uma rede inicial e, a partir daí, numa heurística de troca de arcos orientada por um algoritmo do tipo Simplex (Luenberger, 1984). As instâncias apresentadas, entretanto, limitam os locais candidatos a receberem transformadores aos pontos vizinhos às subestações, o que simplifica excessivamente o problema (diminuindo muito o número de variáveis 0-1 e praticamente eliminando a necessidade de roteamento dos alimentadores primários).

Carneiro e colaboradores (1996) utilizam uma metodologia que se baseia na decomposição do problema em três subproblemas:  $p_1$ , a definição da localização dos transformadores;  $p_2$ , o roteamento dos alimentadores secundários ligando os transformadores aos consumidores;  $p_3$ , o roteamento dos alimentadores primários, ligando os transformadores à rede primária. Para cada subproblema, um método heurístico clássico foi escolhido. Assim,  $p_1$  foi resolvido através da solução de um problema de *p-medianas*,  $p_2$  através de um problema de caminho mínimo e  $p_3$  através de um problema de árvores de peso mínimo. A grande vantagem do método é a sua rapidez - em poucos segundos redes reais são estudadas. A desvantagem recai no fato de não ser possível garantir-se a obtenção de soluções ótimas; de fato, os três problemas são tratados de forma independente quando, na realidade, não o são.

A mais recente publicação sobre o assunto é a tese de mestrado de Costa (2002), defendida em 2002. O problema é resolvido através de quatro diferentes abordagens: abordagem exata, heurística, híbrida e meta-heurística. A abordagem exata resolve de forma ótima, mas com alto custo computacional, as formulações matemáticas desenvolvidas — o custo computacional inviabiliza a aplicação da técnica para o planejamento de redes reais com dimensões não-triviais. A abordagem heurística estende desenvolvimentos feitos por Carneiro et al. (1996), baseando-se na divisão do problema em subproblemas, isto permite obter resultados sub-ótimos com pouco esforço computacional. A abordagem híbrida procura aplicar a abordagem exata a um problema reduzido, construído a partir da solução encontrada com a abordagem heurística. A abordagem meta-heurística é uma estratégia alternativa, baseada em algoritmos de computação evolutiva (Costa (1999)). As abordagens citadas são avaliadas em aplicações a três grupos de instâncias: dois grupos formados por instâncias de pequeno e médio porte, onde o método exato consegue obter a solução ótima, e um grupo de instâncias reais.

### 3.3 Síntese das Contribuições

Da avaliação realizada sobre os trabalhos disponíveis até o momento, pode-se destacar os trabalhos de Carneiro e colaboradores (1996), Carneiro (1990) e Costa (2002) como as contribuições mais significativas para o problema de planejamento de redes secundárias.

Este trabalho utiliza, em linhas gerais a abordagem desenvolvida por Carneiro et al. (1996) e Costa (2002), incluindo a divisão do problema em três sub-problemas inter-relacionados. Suas principais contribuições em relação a esses trabalhos de referência podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- Proposta de alternativas de otimização que permitem melhorar a qualidade das soluções;
- Tratamento de forma individualizada dos requisitos de potência e energia dos consumidores.

Esses aspectos são detalhados nos próximos capítulos.



# Capítulo 4

## Abordagens para o Problema de Planejamento de Redes Secundárias

### 4.1 Introdução

No Capítulo 2 foi apresentado um modelo matemático algébrico para o “problema de planejamento de redes secundárias de distribuição” (PPRSD). Usando-se essa representação é possível, em tese, encontrar uma solução ótima global para o problema, através da aplicação de algoritmos exatos de otimização; ou seja, em certas circunstâncias é possível encontrar uma solução que satisfaça as restrições representadas no modelo e que otimize a função objetivo.

Há uma vasta gama de algoritmos desenvolvidos para o fim específico de resolver modelos algébricos de otimização. A conjunção de conhecimentos provenientes de vários campos da ciência, principalmente da matemática e da computação, deu origem a métodos especializados para cada tipo de modelo—métodos eficientes precisam tirar proveito das estruturas próprias de cada tipo de modelo. É assim que apareceram os métodos específicos para resolver, por exemplo, os modelos lineares (programação linear), os modelos não-lineares (programação não-linear), os dinâmicos (programação dinâmica), os discre-

tos (programação inteira) e os probabilísticos (programação estocástica). Esses métodos são conhecidos como *métodos exatos*, que contrastam com os chamados *métodos aproximados*. O propósito deste capítulo é analisar a aplicabilidade e delinear a estrutura geral de métodos bem sucedidos, tanto exatos como aproximados, para resolução do PPRSD, com ênfase nas contribuições de Carneiro (1990) e Costa (2002).

A discussão a seguir, na parte que se refere as contribuições de Carneiro (1990), segue as mesmas linhas do relatório “Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica—Caracterização da Abordagem Metodológica” (Costa et al., 2002) e da tese de Costa (2002).

## 4.2 Métodos Exatos

Algoritmos exatos são procedimentos matemáticos iterativos fundamentados em uma teoria matemática capaz de provar a convergência dos algoritmos para a solução ótima global do modelo. Uma solução é caracterizada como um *ótimo global* quando não há solução melhor do que ela dentro do espaço de soluções factíveis do modelo. Uma solução é reconhecida como um *ótimo local* se não há solução melhor do que ela em sua vizinhança. A noção de vizinhança deve ser definida; corresponde a soluções que podem ser alcançadas a partir de uma solução dada, através da aplicação de um mecanismo de perturbação.

Um exemplo de algoritmo exato capaz de resolver qualquer modelo linear de otimização descrito por meio de variáveis reais é o algoritmo Simplex da programação linear (Luenberger, 1984). O Simplex está associado a um arcabouço teórico, composto de um conjunto de teoremas e suas provas; esses resultados garantem que, se o algoritmo consegue achar uma solução ao final do procedimento, esta solução é um ótimo global do modelo linear.

Quando se trata de modelos inteiro-mistos, como no caso do problema de planejamento de redes secundárias de distribuição (PPRSD), existem também procedimentos exatos

para se alcançar um ótimo global. Porém, a complexidade dos modelos que utilizam variáveis inteiras é muito maior, quando comparada a modelos somente com variáveis reais. Em termos práticos, essa constatação implica na limitação de se usar algoritmos exatos para solucionar o PPRSD, com exceção das instâncias de pequeno porte—essa limitação não permite a resolução de instâncias com as dimensões encontradas na maior parte dos problemas reais.

Para alguns tipos de modelos inteiro-mistos é tolerável a prática de se relaxar a integralidade das variáveis inteiras e executá-los usando um algoritmo como o Simplex; ao final do processo de solução, aproxima-se as soluções fracionárias para o valor inteiro mais próximo. Esta abordagem é particularmente válida, e bastante utilizada na prática, quando os modelos têm um caráter inteiro pouco pronunciado; por exemplo, quando as variáveis inteiras relaxadas assumem valores grandes na solução ótima—nesses casos, as aproximações para o valor inteiro mais próximo (ou seja, os arredondamentos) não introduzem erros significativos. Entretanto, em situações onde as representações têm muitas variáveis binárias, como é o caso do PPRSD, os erros introduzidos por relaxação da integralidade de variáveis podem não ser aceitáveis.

Pelo que foi discutido, ao contrário do que acontece no universo dos modelos lineares com variáveis reais, onde algoritmos exatos são capazes de resolver de forma ótima instâncias numéricas com dezenas de milhares de variáveis e restrições, o mundo dos espaços discretos é bem mais espinhoso. Porém, o enfoque exato de se resolver modelos algébricos é muito útil, pois aumenta o conhecimento do problema tratado e permite o conhecimento de soluções ótimas para algumas instâncias, normalmente pequenas; o conhecimento dessas soluções ótimas pode ser usado como referência para testar a qualidade de soluções alcançadas por métodos aproximados. Por esta razão, é conveniente a tentativa de abordar um “conjunto-referência” de instâncias através de um algoritmo exato.

A alternativa mais prática (e de implantação mais simples) é a utilização de *solvers*

comerciais—por exemplo, MPL <sup>1</sup>, GAMS <sup>2</sup> e CPLEX <sup>3</sup>. Outra possibilidade seria desenvolver um método exato de solução especializado para o PPRSD. É provável que o aproveitamento da estrutura particular do problema levasse a um método mais eficiente do que aqueles disponíveis nos *solvers* comerciais—esses, por serem concebidos como métodos de propósitos gerais, não têm condições de explorar todas as especificidades dos problemas. No entanto, pelo que foi discutido em relação à complexidade do PPRSD, não acreditamos que um método exato *ad-hoc* consiga resolver em tempo razoável (e de forma satisfatória em termos de representação) instâncias reais do problema de planejamento de redes secundárias de distribuição.

Pelo exposto, a intenção de se explorar a alternativa de solução do Problema de Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição através de métodos exatos aplica-se apenas a instâncias pequenas e médias—usando-se um dos *solvers* disponíveis no mercado. Com isso, foi possível obter um conjunto de instâncias de teste com soluções ótimas conhecidas, como referência para comparação com outras alternativas de solução. As comparações permitirão avaliar a qualidade dos algoritmos aproximados, desenvolvidos para tratar instâncias de tamanho realista.

### 4.3 Métodos Aproximados

Os chamados métodos de otimização aproximados são procedimentos iterativos que procuram encontrar “boas” soluções para o problema. Em geral, a propriedade mais relevante que se busca em um método aproximado é a capacidade de encontrar soluções próximas a ótima global.

Além da capacidade de obter soluções “quase-ótimas”, outras características devem ser obedecidas por um “bom” método. Por exemplo, esforço computacional para alcançar

---

<sup>1</sup><http://www.maximal-usa.com/index.html>

<sup>2</sup><http://www.gams.com>

<sup>3</sup><http://www.ilog.com/products/cplex>

uma solução próxima da ótima deve ser compatível com a disponibilidade de tempo e equipamentos para executar a tarefa de otimização em consideração. Outro aspecto importante é a robustez, pois a gama de instâncias pode ser ampla e o método deve ser capaz de resolver bem a maior parte delas.

Nas últimas duas décadas houve um grande desenvolvimento no campo dos métodos aproximados, principalmente no ramo da otimização discreta e combinatória. No início, havia apenas a singeleza dos chamados algoritmos construtivos, onde pouca inteligência era usada para gerar uma solução construída passo-a-passo, através da adição de elementos constitutivos da solução (por exemplo, nós e arcos, quando o problema era representado por grafos).

Num patamar mais avançado encontram-se as chamadas heurísticas de melhoramento, que devem ser inicializadas por uma solução factível do problema (obtida, por exemplo, por uma heurística de construção); sucessivamente, através da exclusão, adição ou troca de componentes da solução, exploram soluções vizinhas. Dentro do conjunto de soluções vizinhas, escolhe uma que seja de melhor qualidade do que a anterior. A heurística pára quando nenhum movimento de melhora pode ser executado. Diz-se, então, que a heurística atingiu um ótimo local. Por isso, essas heurísticas também são denominadas “heurísticas de busca local” (ou de vizinhança).

Nas últimas duas décadas, a pesquisa na área de métodos heurísticos deu um grande salto, com a proposição de um conjunto de técnicas novas, capazes de abordar problemas complexos e procurando explorar todo o espaço de soluções. Técnicas conhecidas por nomes estranhos, como Algoritmos Evolutivos (AE) ou Genéticos (AG), *Simulated Annealing* (SA), Busca Tabu (BT), GRASP, *Adaptive Multi-Start*, *Ant Systems*, *Artificial Immune Systems* e outras menos populares, formam o conjunto de técnicas que hoje se convencionou chamar de *metaheurísticas* (Pardalos and Resende, 2001). A principal característica presente em todas essas técnicas é a capacidade de ultrapassar a barreira da otimalidade local, conhecido problema dos métodos baseados apenas em buscas

locais—mecanismos determinísticos ou estocásticos são usados pelas metaheurísticas para escaparem dos ótimos locais. Estruturas de dados sofisticadas, desenvolvidas com fins específicos, e a velocidade crescente dos computadores têm possibilitado a resolução, através de metaheurísticas, de uma vasta gama de problemas práticos de grande dimensão, em todas as áreas de engenharia.

Outra característica interessante que acompanha quase todos os enfoques metaheurísticos é a de recorrer a analogias com o comportamento de sistemas complexos da natureza. Os *Algoritmos Genéticos* (Ags) são uma tentativa de matematizar os sistemas evolutivos das espécies vivas; métodos baseados em *Simulated Annealing* (SA) buscam analogias com processos de tratamento térmico de sólidos, usados para alcançar estados de baixa energia; a *Busca Tabu* (BT) recorre a estruturas de memória de curto e longo prazos para guiar a busca para regiões promissoras ou inexploradas; *Ant Systems* tentam copiar a “inteligência” das colônias de formigas, nas estratégias de buscas por alimentos; *Artificial Immune Systems* tentam copiar a estrutura dos sistemas imunológicos dos mamíferos.

Para resolução do PPRSD, uma alternativa ao uso de metaheurísticas é o enfoque aproximado de decomposição proposto por Carneiro et al. (1996), já mencionado no capítulo anterior. A denominação de “aproximado” para o método de Carneiro e colaboradores vem do fato dele dividir o PPRSD em 3 subproblemas, abordados de forma hierárquica. Primeiramente ocupa-se em achar a melhor localização para  $k$  transformadores na rede; o segundo subproblema calcula, para cada transformador, o roteamento otimizado dos cabos secundários; o último estágio escolhe os pontos de conexão da rede primária com os transformadores. Na realidade resolvem-se  $K$  instâncias do problema ( $k = 1, \dots, K$ ) e escolhe-se a solução de menor custo. Obviamente, este procedimento não pode garantir a obtenção da solução ótima, mas trata-se de um método que alia duas características bastante desejáveis: representação fina do problema e rapidez de execução. A próxima seção detalha esta abordagem.

### 4.3.1 Método Aproximado de Carneiro e colaboradores

Como já mencionado na Seção 4.3, o método de Carneiro e colaboradores divide o PPRSD em três fases distintas, resolvidas de maneira hierárquica. Em cada uma das fases, usa-se uma função objetivo composta dos custos relacionados com a fase em questão. Na *Fase 1* é solucionado o problema de localizar de forma otimizada um determinado número de transformadores na rede—este número deve ser tal que a soma das capacidades dos transformadores seja suficiente para atender a soma das demandas dos nós. Na *Fase 2*, considerando-se a solução dos transformadores escolhidos na *Fase 1*, os nós de demanda da rede secundária são conectados aos transformadores mais adequados, ou seja, define-se o roteamento dos cabos secundários. Na *Fase 3* os transformadores são interligados à rede primária, através do roteamento dos alimentadores primários. Executadas as três fases, calcula-se o custo da solução encontrada, incrementa-se o número de transformadores e repete-se o processo—até um limite “razoável” para o número de transformadores na rede. Ao final, adota-se a solução de menor custo.

Baseado nestes informações, temos:

- Localização e dimensionamento dos transformadores ( $p_1$ );
- Roteamento da rede secundária ( $p_2$ );
- Roteamento dos alimentadores primários ( $p_3$ ).

A seguir, discute-se a solução de cada um dos subproblemas.

#### Localização e Dimensionamento dos Transformadores

Uma boa solução para o  $p_1$  é fundamental pra a obtenção de uma boa solução para o problema de planejamento de redes secundárias de distribuição. Na heurística de Carneiro *et al.*,  $p_1$  é formulado como um problema de  $p$ -medianas, que consiste em achar a localização dos  $p$  transformadores, de modo que cada nó de demanda seja conectado

ao transformador mais próximo, e que a soma dos momentos elétricos seja minimizada. Momento elétrico entre um dado transformador e um dado nó da rede é o produto da demanda deste nó pela distância mínima que os separa. Despreza-se a capacidade dos transformadores, pois o problema não-capacitado é bem mais simples de resolver.

Carneiro et al. (1996) utilizam um método heurístico construtivo, seguido de uma fase de melhoria, para obtenção da solução do problema de *p*-medianas. O método construtivo consiste, basicamente, em um procedimento iterativo que insere uma mediana por vez na solução. Primeiramente, insere-se na solução a melhor mediana (aquela que seria escolhida no problema de *p*-medianas com  $p = 1$ ). Estando esta mediana fixa, busca-se a segunda melhor mediana, inserindo-a na solução. O procedimento é repetido até que *p* medianas tenham sido escolhidas.

### **Roteamento da Rede Secundária**

Uma vez localizada a posição dos transformadores através do problema das *p*-medianas, o próximo passo será a determinação da rede secundária e a área de cobertura de cada transformador. Esta fase irá estabelecer a potência de cada transformador e o fluxo de energia em sua área de abrangência.

A técnica utilizada é a do *problema de caminhos mínimos*. Tenta-se conectar cada nó de demanda ao transformador mais próximo. De fato, trata-se apenas da idéia de minimização dos momentos elétricos, já explicitada em  $p_1$ . Um ponto interessante nesta escolha é que ela tende a respeitar as restrições de limites nas quedas de tensão do PPRSD, não abordadas diretamente—a minimização de momento elétrico tende a reduzir as quedas de tensões.

De acordo com o fluxo presente em cada trecho, determina-se o cabo necessário para suprir o atendimento, escolhendo-se sempre a solução mais econômica. O processo de factibilização de trechos com fluxos acima do permitido ocorrerá na medida em que se realizem os movimentos de trocas de arcos onde, substitui-se arcos que pertencem à so-



lução por outros que estejam fora dela. Este procedimento distribui as cargas entre os transformadores, deslocando cargas dos mais carregados para os menos carregados.

Outra forma de factibilização é a troca de posição dos transformadores. Para cada transformador que pode ser movido, todos os nós candidatos são analisados, redefinindo-se também as melhores redes secundárias e primárias associadas aos transformadores.

### **Roteamento da Rede Primária**

As perdas elétricas nos trechos (pequenos) de ampliação das redes primárias que fazem a conexão da rede existente com os transformadores da rede secundária não são muito significantes, em relação às perdas na rede secundária. Assim, os custos fixos desses trechos são predominantes, permitindo que os custos das perdas sejam desprezados na solução do problema  $p_3$ , de roteamento primário.

A minimização dos custos fixos é obtida através da minimização do comprimento total da rede primária. A melhor formulação para este problema é através do *Problema de Steiner*, que consiste em conectar com menor custo possível alguns dos nós de um grafo, podendo ou não utilizar os nós restantes (que se usados serão conhecidos como nós de Steiner).

O Problema de Steiner é resolvido através de uma metodologia heurística baseada no algoritmo de Prim (Ahuja et al., 1993). Primeiramente, monta-se um grafo completo não-orientado com os nós onde já existem redes primárias e com os nós onde serão instalados transformadores. O custo de um arco ligando o nó  $i$  ao nó  $j$  deste grafo é dado pelo caminho mínimo entre os arcos  $i$  e  $j$ .

Após a obtenção deste subgrafo completo (de cardinalidade  $n' < n$ ), aplica-se o algoritmo de Prim, obtendo-se a árvore de menor custo que conecta estes pontos (caso não existissem outros nós no grafo). É feita então uma busca por pontos de Steiner no grafo original (cardinalidade  $n$ ). Como pontos de Steiner têm grau  $\geq 3$ , o que se faz é uma lista com todos os nós  $n'$  mais os nós com grau  $\geq 3$ . Então, avalia-se o custo de se adicionar

um nó candidato a Steiner na árvore obtida anteriormente com o algoritmo de Prim. O nó que apresenta maior ganho é inserido e o procedimento reiniciado, até que nenhum nó de Steiner apresente ganho ao ser inserido na árvore.

### Algoritmo Completo

Considere a Figura 4.1. É dada uma rede secundária composta de  $n$  nós com demandas conhecidas. Os  $n$  nós são conectados por arestas, que representam possíveis rotas por onde os alimentadores secundários podem passar. Sabe-se o comprimento de cada aresta.

Para um número inicial  $p_0$  de transformadores, resolve-se o problema clássico de otimização combinatória, chamado de  $p$ -medianas, que consiste em achar a localização dos  $p$  transformadores, de modo que cada nó de demanda seja conectado ao transformador mais próximo e que a soma dos momentos elétricos seja minimizada—como observado anteriormente, o momento elétrico entre um dado transformador e um dado nó da rede é o produto da demanda deste nó pela distância mínima que os separa. Despreza-se a capacidade dos transformadores, pois o problema não-capacitado é bem mais simples de resolver e eventuais violações de capacidade são tratadas posteriormente. Num processo de pós-otimização, é utilizada uma busca local para melhorar a solução encontrada. A vizinhança é constituída das soluções obtidas pela troca de um nó mediana por um outro não-mediana. Se a troca resulta num decréscimo do momento total, ela é efetuada e reinicia-se o processo de busca. O processo termina quando nenhuma melhoria adicional é conseguida dentro da vizinhança.

A capacidade de cada transformador é ajustada para uma capacidade nominal disponível, imediatamente acima da soma das demandas dos nós conectados àquele transformador. Caso não exista um transformador com tal capacidade, alguns consumidores são transferidos para transformadores vizinhos ociosos. Se ainda assim verifica-se uma infactibilidade, a solução corrente é descartada, o número de transformadores é aumentado de 1 e o método retorna à *Fase 1*. Se a solução é factível, passa-se à *Fase 2*. Vale lembrar

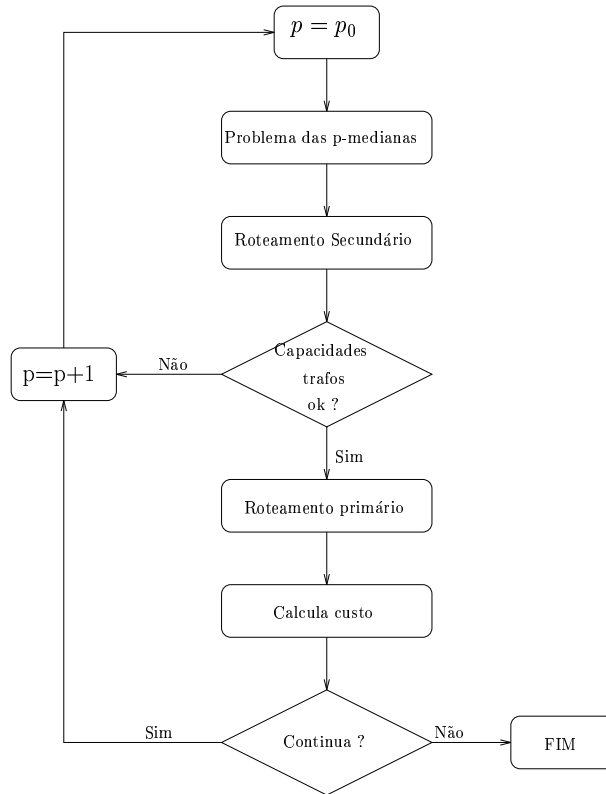


Figura 4.1: Heurística de Carneiro *et al.*

que a solução obtida ao se resolver o problema das  $p$ -medianas minimizando o momento elétrico total já contempla, de forma indireta, os requisitos de queda de tensão e perdas mínimas nos condutores.

A *Fase 2* consiste em carregar a rede para a configuração de transformadores determinada na *Fase 1*. A partir dos nós de demanda, calculam-se os fluxos nos trechos de condutores até alcançar o transformador correspondente. Em seguida, escolhe-se a bitola do condutor de acordo com o fluxo no trecho.

Na *Fase 3* faz-se a ligação entre os pontos de chegada da rede primária e os transformadores instalados na *Fase 1*. Note que o roteamento dos alimentadores primários deve ser realizado sobre os mesmos caminhos utilizados para fazer o roteamento dos alimentadores secundários. Esta situação caracteriza o chamado problema da árvore de Steiner, onde se quer conectar a mínimo custo, e de forma radial, um conjunto de nós de um subgrafo (aqui

constituído pelos nós de chegada da rede primária, mais os nós com transformadores)—se necessário, podem também ser usados outros nós, não pertencentes ao subgrafo (pode-se considerar todos os nós da rede, excetuando-se os nós com transformadores).

A solução exata do problema de Steiner pode ser custosa. Por isso, Carneiro *et al.* preferiram usar uma heurística que inicia com a árvore geradora de distância mínima e prossegue tentando descobrir pontos de Steiner, percorrendo-se cada ponto candidato (deve ter grau maior que 3) e verificando-se quando a solução melhora de valor. O procedimento termina se nenhum ponto candidato consegue melhora adicional na solução corrente.

Para a solução completa encontrada, é calculado o custo real, que compreende os custos fixos anualizados dos transformadores e alimentadores, primários e secundários, adicionados aos custos variáveis. Os custos variáveis estão associados às perdas nos alimentadores secundários (despreza-se o custo de perdas nos alimentadores primários).

O número de transformadores é então incrementado de 1 unidade e o controle do algoritmo retorna à *Fase 1*. Nas primeiras iterações, a função de custo total tende a diminuir quando cresce o número de transformadores—a diminuição dos custos de rede secundária e de perdas é mais significativa que o aumento dos custos em transformadores e rede primária. Essa tendência tende a se inverter a partir de um determinado número de transformadores instalados—quando se atinge este limite, o aumento do custo de transformadores e da rede primária é maior do que a diminuição de custos verificada na rede secundária. Evidentemente, deve-se escolher como solução final aquela em que o número de transformadores fornece a solução de menor custo real.

### 4.3.2 Heurística de Carneiro Estendida

A heurística estendida desenvolvida por Costa (2002), chamada de heurística Lagrangeana, é um aprimoramento da heurística de Carneiro e colaboradores (seção 4.3.1). Uma possível limitação da heurística de Carneiro e colaboradores, é o fato dos subproblemas

serem resolvidos de maneira míope, i.e., embora as decisões tomadas em  $p_1$  afetem diretamente  $p_2$  e  $p_3$  (problemas detalhados na seção 4.3.1), elas são tomadas sem levar em conta este fato. A heurística proposta por Costa (2002) contorna esta limitação de duas formas: o aumento da eficiência do método de resolução do  $p$ -medianas e a inserção de uma fase de busca local após a solução completa, considerando o custo global do problema.

### **Novo método para abordagem do problema de $p$ -medianas:**

O aumento da eficiência da resolução do  $p$ -medianas é realizado resolvendo-se o problema não mais através de uma busca gulosa seguida de melhoria, como em Carneiro e colaboradores (1996), mas através de uma heurística mais sofisticada, baseada em Relaxação Lagrangeana (Fisher, 1981; Fisher, 1985). A resolução do problema de  $p$ -medianas de uma forma mais elaborada permite, em princípio, encontrar melhores soluções para o PPRSD, pois os resultados da abordagem de Carneiro e colaboradores (1996) são amplamente dependentes dos resultados de  $p_1$ .

### **Busca Local**

A busca local implementada tenta atacar uma das principais dificuldades do método de Carneiro et al. (1996): a falta de consideração do problema como um todo. Ela atua após a solução dos sub-problemas  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$ , alterando a posição das medianas e recalculando o custo global. Para o cálculo do novo custo global, é necessário redefinir a rede secundária e a rede primária.

A Figura 4.2 mostra esquematicamente o funcionamento da busca local. Primeiramente, entrega-se ao algoritmo a melhor solução obtida. A partir desta solução, efetuam-se trocas na posição dos transformadores. As trocas são efetuadas da seguinte maneira: para cada mediana, tenta-se trocar a posição desta para todas as outras posições que não contêm medianas. Para cada troca efetuada, calcula-se o valor da nova solução. Caso esta nova solução tenha menor custo que a melhor solução armazenada, guarda-se a nova

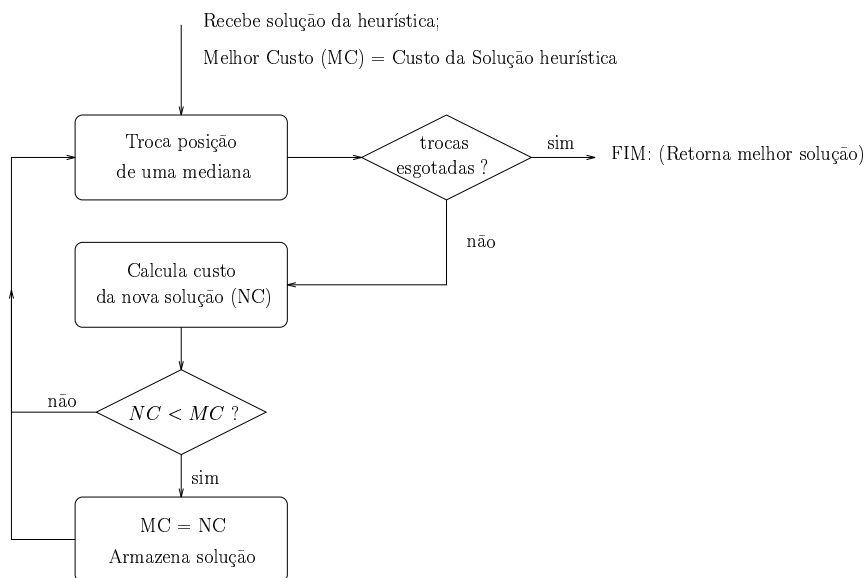


Figura 4.2: Diagrama esquemático da busca local

solução. O procedimento é interrompido quando todas as trocas possíveis foram testadas, desde a última melhoria encontrada.

## 4.4 Heurística Híbrida

Esta abordagem, também desenvolvida por Costa (2002) trata o problema de forma híbrida, procurando utilizar as vantagens do método exato e do método heurístico, a fim de obter melhores soluções com tempos computacionais aceitáveis.

As vantagens e desvantagens da abordagem exata de resolução são muitas claras. Como vantagem principal, a obtenção de soluções ótimas para o modelo de representação utilizado — vale lembrar que há sempre aproximações na elaboração desses modelos. Como desvantagem, o grande esforço computacional (normalmente em termos do tempo necessário para se obter as soluções), que leva a impossibilidade de resolver grandes instâncias do problema.

A presença de muitas variáveis inteiras (ou binárias) nas formulações dos problemas é possivelmente o principal aspecto para o aumento do esforço computacional. De fato,

uma maneira de se reduzir o tempo computacional é a eliminação de algumas destas variáveis. Para isto, pode-se, por exemplo, diminuir o número de postes candidatos a receber transformadores. Obviamente, tal redução não pode ser feita à esmo, sob pena de se perderem boas soluções. É necessário um critério que garanta que boas soluções continuarão presentes no espaço de busca reduzido.

A grande vantagem das abordagens heurísticas é a velocidade de execução. A desvantagem recai na menor qualidade das soluções obtidas, em comparação com os métodos exatos. Em particular, para o caso do problema de planejamento de redes secundárias de distribuição, as soluções obtidas através dos métodos heurísticos, discutidos neste trabalho, apresentam boa qualidade. Em especial, o método das *p*-medianas mostra-se muito eficaz para o problema de localização de transformadores. A dificuldade consiste em unir este método aos outros métodos heurísticos, de forma a reduzir eventuais perdas de qualidade da solução, decorrente da separação do problema em sub-problemas (simplificação do modelo).

Costa (2002) resume na Tabela 4.1 as principais dificuldades encontradas nas abordagens exatas e heurísticas, e possíveis alternativas para contorná-las. Essas idéias motivaram a proposta do seu método híbrido, onde procura explorar aspectos complementares das duas abordagens.

Abordagem	Principal dificuldade	Possível Solução
Exata	Tempo de resolução	Diminuição do espaço de busca com a eliminação de algumas variáveis inteiras
Heurística	Interligação entre as subheurísticas	Aproveitamento da solução do <i>p</i> -medianas em métodos mais sofisticados de cálculo das redes

Tabela 4.1: Principais dificuldades encontradas pelas abordagens exata e heurística.

A idéia do algoritmo híbrido de Costa é realizar inicialmente o cálculo da posição dos transformadores através do problema das *p*-medianas e determinar a rede primária através do Problema de Steiner. Após a solução desses sub-problemas define-se um novo problema global num espaço reduzido. Para isso, considera-se como locais permitidos

para instalação de transformadores apenas uma *nuvem* de posições em torno da localização definida pela solução do sub-problema de *p-medianas*. Este novo problema é resolvido pela abordagem exata descrita na seção 4.2. A Figura 4.3 apresenta de forma esquemática a estrutura do algoritmo.

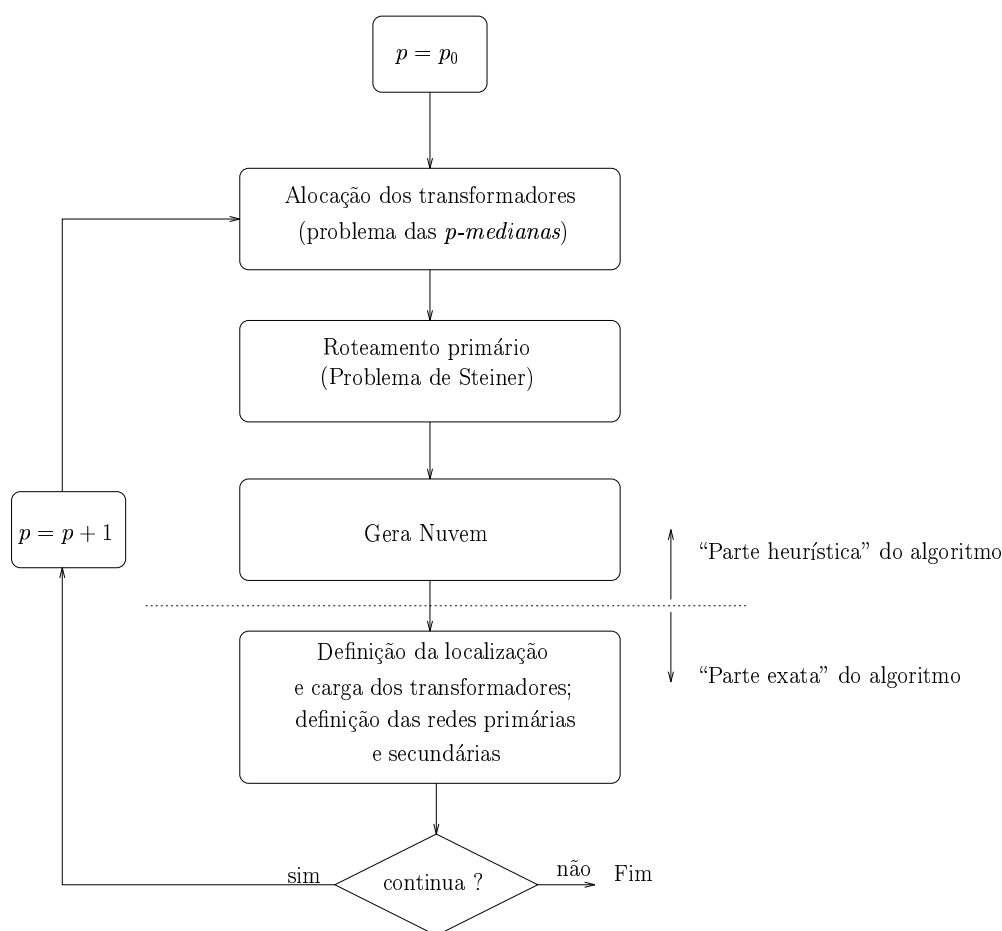


Figura 4.3: Algoritmo Híbrido

A “parte heurística” do algoritmo consiste na determinação da posição dos transformadores e na determinação da interligação entre estes transformadores e a rede primária existente. A “parte exata” corresponde a solução do problema no espaço reduzido.



## 4.5 Discussão

Como vimos neste capítulo, o problema de planejamento de redes secundárias de distribuição é tratado de diferentes maneiras. Embora a solução exata do problema seja possível em instâncias de pequeno porte, esta será utilizada apenas como métrica para as heurísticas — mesmo o método híbrido projetado por Costa(2002) tem limitações para aplicações em problemas reais de maior porte.

Vale destacar que os menores requisitos computacionais das abordagens heurísticas proporcionam também alternativas relativamente simples para o tratamento das curvas kVAs e análise de sensibilidade nas instâncias. Estas considerações motivaram o desenvolvimento do método proposto neste trabalho, denominado “Holístico”, baseado na associação do “Greedy Randomized Adaptive Search Procedures” (GRASP) com o “Variable Neighborhood Search” (VNS).

O próximo capítulo apresenta os principais conceitos dos métodos GRASP e VNS. O Capítulo 6 discute a junção desses métodos na abordagem “Holística”.

# Capítulo 5

## Métodos GRASP e VNS para Otimização Combinatória

### 5.1 Introdução

Neste capítulo serão descritas os dois métodos de otimização combinatória que compõem a essência do método “Holístico”, descrito no próximo capítulo. Primeiramente será apresentado o Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP) e sua variante com a utilização de memória. Na seção seguinte (5.2) serão apresentados os conceitos de busca em vizinhança variável (Variable Neighborhood Search - VNS).

#### 5.1.1 Método GRASP

O GRASP pode ser caracterizado de forma bem simples, como um processo iterativo onde cada iteração consiste de duas fases: construção e melhoria. A fase de construção fornece soluções iniciais factíveis, que posteriormente são submetidas a um procedimento de busca local (fase de melhoria). A melhor solução obtida durante o processo corresponde ao resultado final. Para caracterizar o método de forma objetiva, precisamos especificar o procedimento construtivo, descrevendo os tipos e quantidades de informações que ele

utiliza. Deve-se também definir o tipo de vizinhança para a busca local, bem como a estratégia de exploração da vizinhança.

Feo and Resende (1989) propuseram uma heurística probabilística para problemas complexos de recobrimento de conjuntos. Esta heurística já continha os ingredientes básicos da meta-heurística GRASP, proposta formalmente em Feo and Resende (1995).

O método GRASP possui uma fase construtiva e uma fase de melhoria, caracterizada por uma busca local. A cada iteração da fase construtiva, uma função gulosa avalia o conjunto de elementos candidatos a serem incorporados na solução parcial. O método GRASP necessita de dois parâmetros para apoiar o processo de busca: o número máximo de iterações e um parâmetro que controla o nível de aleatorização das soluções geradas.

```
Procedure Grasp (MaximoIteracoes,FatorAleatorizacao){  
    MelhorSolucao ← {};  
    for k ← MaximoIteracoes do  
        Solucao ← GeraSolucao(FatorAleatorizacao);  
        Solucao ← BuscaLocal(Solucao);  
        AtualizaSolucao(Solucao,MelhorSolucao);  
    end for  
    return MelhorSolucao;  
}
```

Figura 5.1: Método GRASP

A Figura 5.1 ilustra as linhas gerais de um pseudo-código para o procedimento GRASP. O método *GeraSolucao()* é responsável pela construção das soluções iniciais, que posteriormente são submetidas ao procedimento de busca local, denotado aqui por *BuscaLocal()*. O parâmetro *FatorAleatorizacao* é responsável pelo controle do grau de aleatorização na fase construtiva. A função *AtualizaSolucao()* é responsável apenas pela atualização e ar-

mazenamento da melhor solução encontrada durante o processo. O processo é repetido até que o número máximo de iterações seja atingido.

### 5.1.2 Método GRASP com Memória

O método GRASP, em sua forma clássica, não dispõe de nenhum mecanismo de aprendizado a partir das soluções obtidas ao fim de cada iteração. Fleurent and Glover (1999) propõem, para a fase construtiva de métodos de múltiplos reinícios, a incorporação de estratégias de memória adaptativa, propostas inicialmente no contexto da Busca Tabu (Glover and Laguna, 1998). O objetivo desta proposta é prover um mecanismo de realimentação de informação para guiar a fase construtiva, de forma a torná-la mais eficiente.

Com a implementação da memória, a possibilidade de se fixar em um mínimo local na fase construtiva é diminuída. Durante o processo de reinício é atribuído um valor de tempo a cada nó visitado na árvore de busca. Este tempo tem a função de impedir a seleção do nó durante os reinícios. Caso o nó seja selecionado, o algoritmo irá selecionar um outro nó próximo ao nó escolhido, que também não esteja com a sua seleção proibida. O tempo de proibição é decrescido a cada reinício, pois, sem este processo, o algoritmo poderia proibir todos os nós da rede, ficando sem opção para encontrar uma solução factível.

## 5.2 Busca em Vizinhança Variável

A Busca em Vizinhança Variável (Hansen and Mladenovic, 2001), ou “Variable Neighborhood Search” (VNS) é uma meta-heurística recente, baseada na troca sistemática de vizinhanças durante a fase de melhoria. Hansen and Mladenovic (2001) defendem as vantagens do VNS de forma eloquente. Esses autores atribuem ao método um grande conjunto de boas propriedades:

1. *Simplicidade*—o método é baseado em um princípio simples e claro;

2. *Coerência*—todos os passos do método seguem naturalmente o princípio das metaheurísticas;
3. *Qualidade*—em vários problemas testados o método atingiu o ótimo ou soluções próximas ao ótimo;
4. *Eficiência*—o método, em problemas testados, apresenta tempos computacionais moderados, para obtenção de soluções ótimas ou próximas a estas.

Podemos ilustrar o funcionamento do método VNS básico no pseudo-código representado a na Figura 5.2.

**Inicializacao.** Selecione o conjunto de vizinhanças que será usado na busca; encontre uma solução inicial  $x$ ; escolha o  $k_{max}$ ;

*Repetir até que o critério de parada seja encontrado;*

Selecione  $k \leftarrow 1$ ; Até  $k = k_{max}$ ;

Gerar um ponto  $x$  aleatório na vizinhança analisada;

Aplicar uma busca local em  $x$ ;

Caso a solução obtida na busca local seja melhor que a armazenada, atualizar a solução;

Caso contrário, incrementar o  $k$ .

Figura 5.2: Método VNS

O método VNS vem sendo aplicado com 3 variações:

1. *Variable Neighborhood Decomposition Search (VNDS)*—o método estende o VNS simples para um VNS de dois níveis, baseado na decomposição do problema;
2. *Skewed VNS (SVNS)*—a principal característica deste método é a exploração de regiões distantes da melhor solução encontrada até um determinado momento;

3. *Parallel VNS (PVNS)*—o paralelismo em VNS vem sendo aplicado na realização de múltiplas buscas locais e na geração de várias soluções iniciais, para inicializar as buscas locais.

O método VNS pode ser aplicado tanto de forma isolada, como associado a outros métodos heurísticos. Entre estas formas híbridas, podemos citar VNS e Busca Tabu e VNS e GRASP, que formam o método “Holístico” apresentado no próximo capítulo.

# Capítulo 6

## Método Holístico

### 6.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o método “Holístico” para a resolução do PPRSD. A denominação “Holístico” foi motivada pela característica da abordagem, ao explorar boas propriedades dos métodos GRASP (Pitsoulis and Resende, 2001) e VNS (Hansen and Mladenovic, 2001).

### 6.2 Decomposição do PPRSD

O método Holístico é baseado na decomposição do PPRSD em três subproblemas, como propostos por Carneiro et al. (1996):

- Localização e dimensionamento dos transformadores ( $p_1$ );
- Roteamento da rede secundária ( $p_2$ );
- Roteamento dos alimentadores primários ( $p_3$ ).

Como discutido no capítulo 4, Carneiro et al. (1996) resolvem  $p_1$  através de um método de  $p$ -medianas,  $p_2$  através de um método para abordagem do problema de ca-

minhos mínimos e  $p_3$  através de um problema de Steiner, seguindo a hierarquia  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$ . A hierarquia se dá pelo fato dos dois subproblemas do nível inferior só poderem ser resolvidos após a localização dos transformadores. Assim, um método de resolução baseado nesta decomposição consiste em encontrar uma solução para  $p_1$  e, a partir desta solução, encontrar soluções para  $p_2$  e  $p_3$ . Vale lembrar que a união das soluções dos três subproblemas constitui uma solução heurística do PPRSD, dado que o problema foi decomposto e cada sub-problema é resolvido de forma independente. Assim, não é possível garantir que a otimalidade global seja alcançada.

## 6.3 Método Holístico

Embora o método Holístico adote a decomposição do PPRSD proposto por Carneiro e colaboradores (Carneiro et al., 1996), ele procura aumentar a possibilidade de obter ótimos globais através de duas estratégias interrelacionadas: aumentando o número de soluções do problema de  $p$ -medianas e com a inserção de uma fase de busca local, considerando o custo global do problema.

**Novo método para o  $p$ -medianas.** Aumenta-se o número de soluções do problema de  $p$ -medianas pela utilização de uma heurística mais elaborada, baseada no método Grasp com memória. Este procedimento é detalhado na Seção 6.3.1.

**Fase de busca local.** A fase de busca local é realizado com o método VNS, considerando todos os custos envolvidos no problema. A Seção 6.3.2 discute esta fase de busca.

### 6.3.1 Aplicação do Método Grasp para Fase Construtiva

O método desenvolvido utiliza um processo de múltiplos reinícios com memória para a criação de soluções iniciais para o problema de  $p$ -medianas, como discutido na seção 5.1.2.



Este processo é utilizado para que, na obtenção das soluções iniciais para o  $p_1$ , o programa varie o espaço de busca, aumentando a probabilidade de obter as melhores soluções.

O método fixa um número inicial de transformadores  $p$ , achando as melhores localizações para os  $p$  transformadores na rede, através de uma heurística construtiva para o problema de *p-medianas não capacitado*. Em seguida, resolve  $p_2$  e  $p_3$  através de *problema de caminhos mínimos* e *Problema de Steiner*, respectivamente. Após a abordagem de todos os sub-problemas, o método faz um “reinício”, procurando encontrar outra solução para o problema de *p-medianas não capacitado*. O reinício é realizado  $n$  vezes.

Dentro do looping de reinícios existe um procedimento que armazena a melhor solução encontrada até aquele momento. Com isto, garante-se que a melhor solução não será perdida durante o processo. Na Figura 6.1 podemos ver diferentes soluções fornecidas pelo método GRASP.

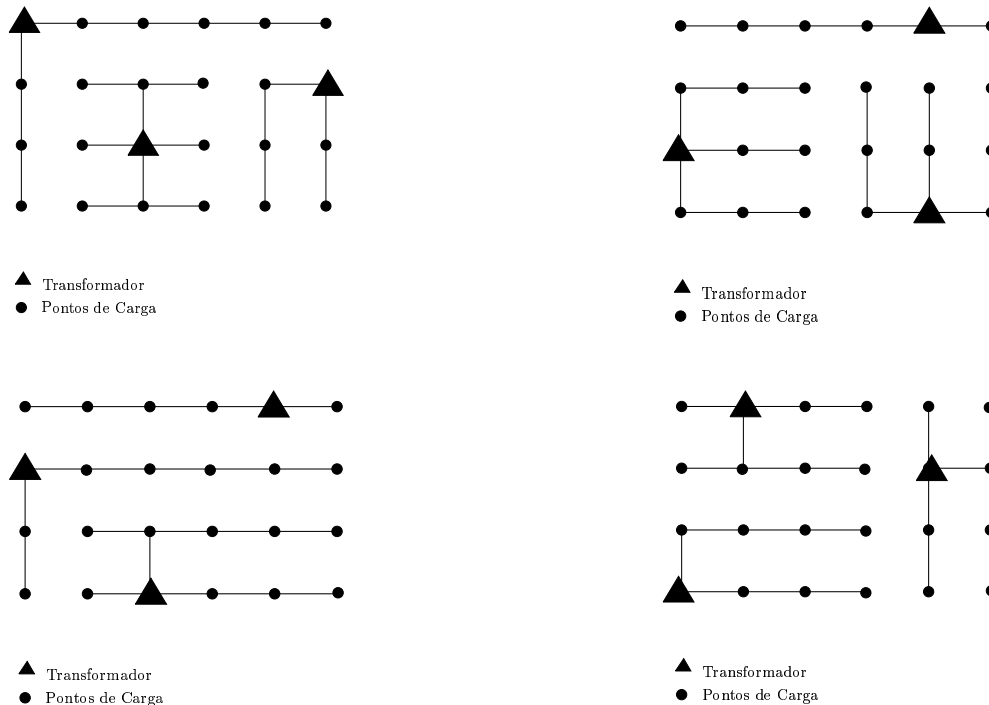


Figura 6.1: Diferentes soluções encontradas pelo método GRASP

Após os  $n$  reinícios, e com a melhor solução encontrada, passa-se para fase de melhoria da solução inicial. Veremos na próxima seção o funcionamento deste processo.

### 6.3.2 Fase de Melhoria com o Método VNS

O objetivo da “fase de melhoria” através do VNS é procurar melhorar as soluções, considerando simultaneamente a localização dos transformadores, o roteamento da rede secundária e o roteamento da rede primária. Em outras palavras procura-se resolver o problema sem a decomposição em sub-problemas, mas restringindo-se o espaço de busca a uma vizinhança da solução encontrada pelo GRASP.

O método de Busca em Vizinhança Variável (VNS) consiste em avaliações sistemáticas de melhorias nas vizinhanças de uma solução. No algoritmo implementado, são executadas trocas de posições dos transformadores (*medianas*) para suas vizinhanças. Após a troca, calcula-se novamente os custo totais, resolvendo-se  $p_2$  e  $p_3$ , para as novas posições dos transformadores. Caso exista uma melhoria na solução, esta nova solução é armazenada

e o processo de troca de *medianas* é reiniciado. O VNS é executado até que todas as medianas tenham sido testadas e nenhuma melhoria tenha sido encontrada.

A Figura 6.2 ilustra a estrutura de vizinhanças utilizada pela busca em vizinhança variável. Lembramos que somente depois de definida a posição dos transformadores será executada a definição das vizinhanças.

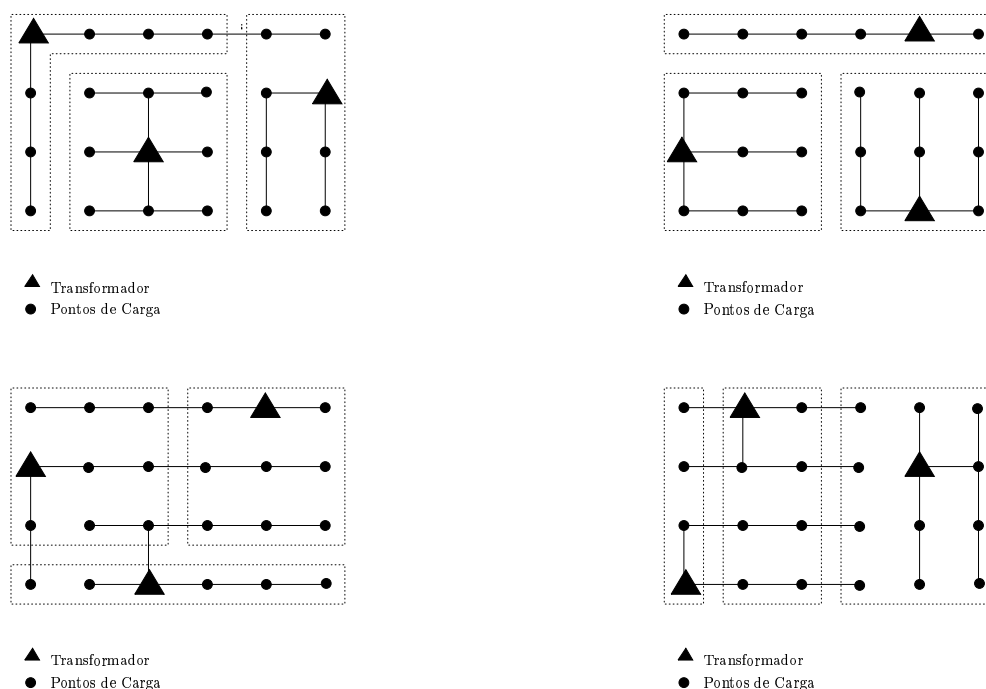


Figura 6.2: Estrutura de vizinhanças utilizadas pelo VNS

### 6.3.3 Síntese do Método Holístico

Na Figura 6.3 resume-se o Método Holístico através de um fluxograma.

A fase construtiva do método GRASP é definida até o passo “Atingiu  $n$ ?”. Nesta fase, um conjunto de soluções é gerado pela abordagem sucessiva dos sub-problemas  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$ ; a melhor entre as soluções encontradas é armazenada para a fase de melhoria do método. Para maior diversidade no espaço de busca, foi adicionada uma “memória” para cada posição de mediana escolhida durante o processo. A “memória” é decrescida a cada reinício da fase construtiva, permitindo que uma mediana possa ser escolhida novamente.

A fase de melhoria resume-se ao passo “Muda Vizinho”. Após a fase construtiva realizada, cada mediana é trocada de posição. É calculada a rede secundária e a rede primária para a nova posição da mediana. Em seguida, compara-se o custo desta nova configuração com a melhor configuração encontrada até o momento, armazenando-se a melhor solução. Este procedimento é repetido até que todas as medianas tenham sido analisadas e não seja possível melhorias adicionais.

O algoritmo tem início com o primeiro valor do intervalo de possibilidades para o número de medianas  $p_0$ . O término do Algoritmo acontece quando o  $p_{final}$  é alcançado, ou seja, quando é testado o último número deste intervalo de possibilidades. A variável  $p_{atual}$  indica o número de medianas que estão sendo testadas, dentro do intervalo de possibilidades definido inicialmente.

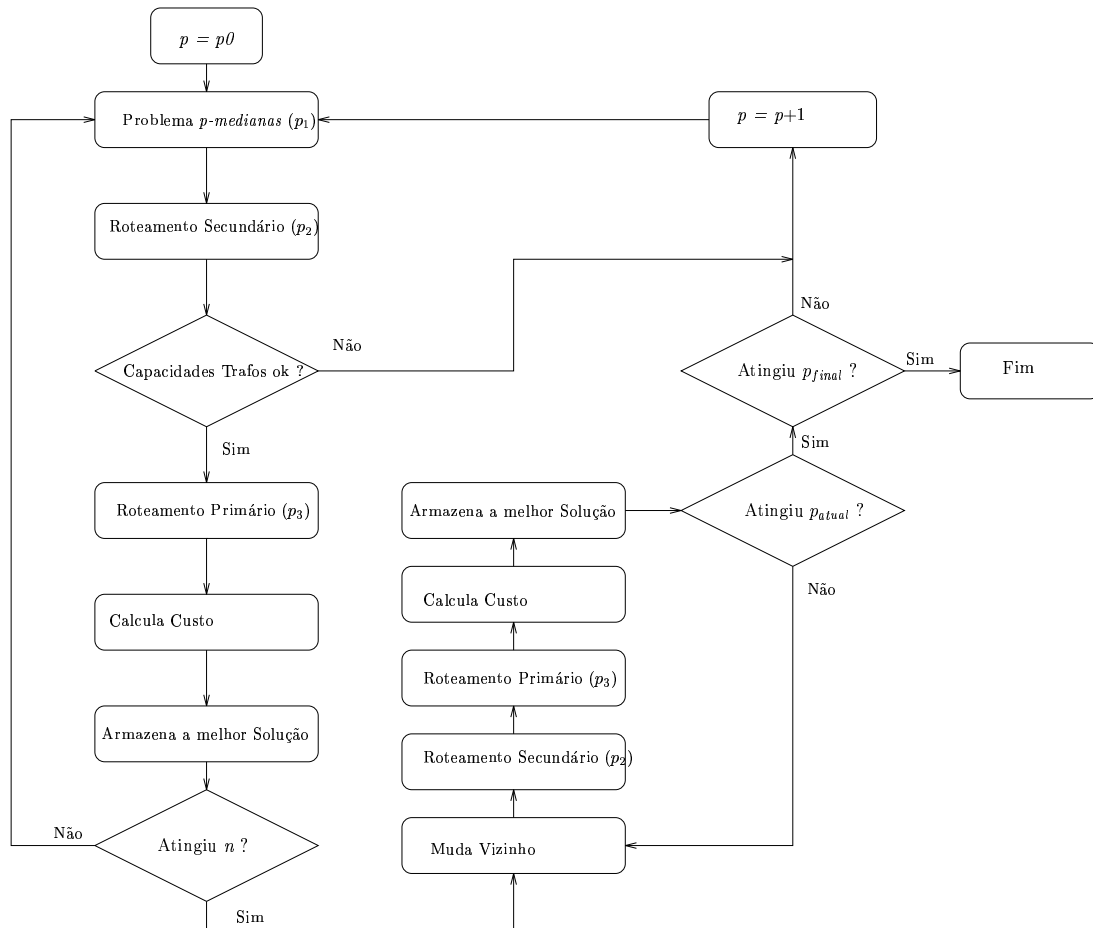


Figura 6.3: Fluxograma do Algoritmo Holístico

A Figura 6.5 apresenta um exemplo de solução obtida pelo método GRASP para uma rede real. Essas informações foram melhoradas pelo método VNS, obtendo as soluções ilustradas na Figura 6.6. Estas figuras seguem a legenda apresentada na Figura 6.4.

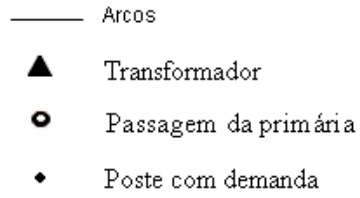


Figura 6.4: Legenda

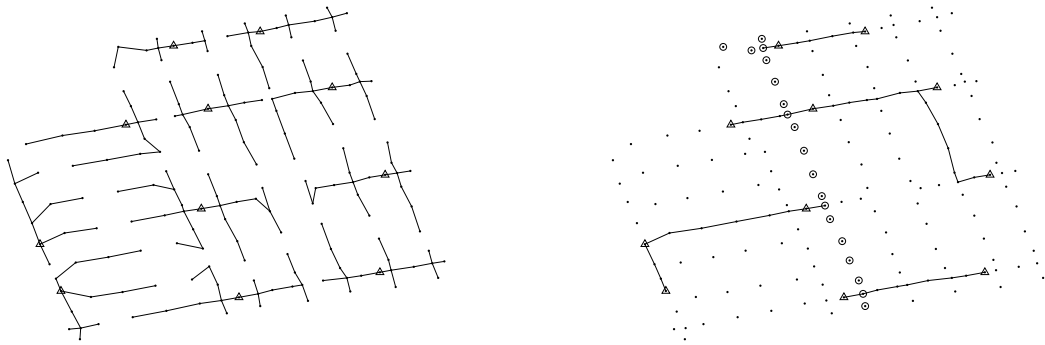


Figura 6.5: Solução obtida pelo método GRASP

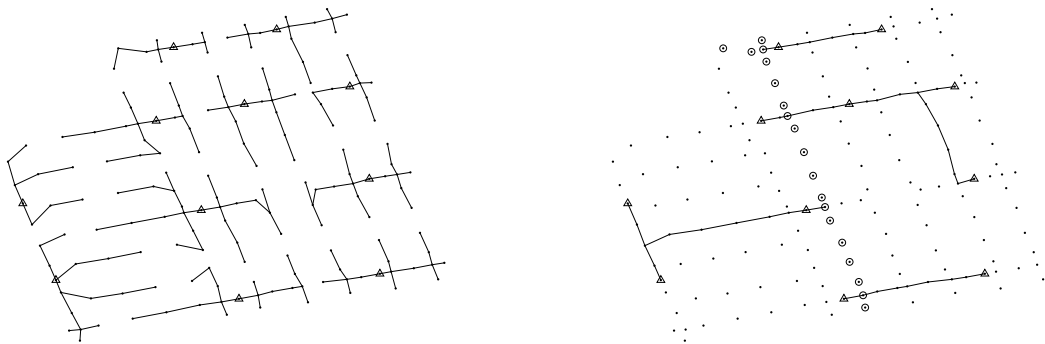


Figura 6.6: Solução melhorada pelo método VNS

## 6.4 Informações de Entrada e Resultados Fornecidos

Esta seção apresenta as informações utilizadas pelo método Holístico, para solução do problema de planejamento de redes de distribuição (Dados Iniciais). Apresenta também

as informações fornecidas pela aplicação da metodologia, denominadas “Informações de Saída”.

### 6.4.1 Dados Iniciais

Os dados iniciais são fornecidos por um arquivo com extensão *txt* (ex. *baurusec.txt*), divididos em 3 grupos de dados: Matriz de dados, Matriz de Nós e Matriz de Arcos. Segue a estrutura do arquivo de entrada de dados.

- PARTE 1 - Dados Gerais

- coluna 1 - número de nós (pontos onde estão agrupadas os consumos na rede secundária);

- coluna 2 - número de arcos (especifica as ligações entre os nós, onde serão instalados os cabos);

- coluna 3 - consumo total da rede analisada.

- PARTE 2 - Matriz dos nós

- coluna 1 - número do nó;

- coluna 2 - posição *X* do nó;

- coluna 3 - posição *Y* do nó;

- coluna 4 - número de consumidores por nó;

- coluna 5 - Consumo do nó em kWh;

- coluna 6 - Iluminação Pública em watts;

- coluna 7 - se igual a 1, o nó é um “*flying tap*” (cruzamento de cabos aéreos); se igual a 0, o nó é um poste;

- coluna 8 - Indica se o poste já existe ou poderá ser construído;

- coluna 9 - Tipo do poste: 1 para primário e 2 para secundário.

- PARTE 3 - Matriz dos arcos

coluna 1 - índice do arco;

coluna 2 - nó de origem do arco;

coluna 3 - nó de destino do arco;

coluna 4 - tamanho do arco em dm;

Através destes 3 conjuntos de dados a entrada inicial do algoritmo é executada.

#### **6.4.2 Informações de Saída**

O programa fornece como saída as seguintes informações:

- Posição e carga dos transformadores;
- Ligação do poste ao transformador que o está atendendo;
- Ligações com a rede primária;
- Especificações da rede secundária;
- Custo dos postes (primários, secundários e primário/secundário);
- Custo dos “flying taps” (primário e secundário);
- Custos dos transformadores;
- Custo variável dos alimentadores secundários (custo de perdas);
- Custo fixos dos alimentadores secundários (equipamentos);
- Custo dos acréscimos necessários aos alimentadores primários;
- Custo TOTAL.



## 6.5 Algoritmos

Esta seção, apresenta pseudo-códigos para os principais procedimentos utilizados pelo Método Holístico, para a resolução do problema de planejamento de redes de distribuição.

A Figura 6.7 apresenta a estrutura do programa principal.

```
1. Programa Principal(){
2.  ReadInstance();
3.  CriaMatrizes();
4.    for  $p \leftarrow p_{inicial}$  até  $p_{final}$ 
5.      for  $k \leftarrow 0$  até  $k_{final}$ 
6.        GulosaDemanda();
7.        TransfereCargas();
8.        CalculaFluxos();
9.        Primario();
10.       CalculaArcosPrimarios();
11.       CalculaCusto();
12.       Atualiza(MelhorSolucao);
13.     end for
14.     for  $m \leftarrow 0$  até  $p$ 
15.       MudaVizinho(posicao);
16.       Factibiliza();
17.       TransfereCargas();
18.       CalculaFluxos();
19.       Primario();
20.       CalculaArcosPrimarios();
21.       CalculaCusto();
22.       Atualiza(MelhorSolucao);
23.     end for
24.   end for
25.   return MelhorSolucao;
26. }
```

Figura 6.7: Algoritmo Holístico

Na Figura 6.7, podemos notar a divisão entre as duas heurísticas. No primeiro laço (*for...end*) é aplicado o GRASP. O segundo laço corresponde ao VNS. Ao final do laço principal, o melhor resultado obtido durante todo o processo é visualizado (6.4.2).

Para a resolução do VNS é necessário que todas as posições das *p-medianas* já estejam fixas (Figura 6.2), pois somente desta forma as vizinhanças serão definidas.

As demais rotinas que compõem o algoritmo Holístico são especificados nas seções a seguir.

### 6.5.1 Leitura de Dados (ReadInstance)

Esta rotina executa a leitura dos dados da instância e a armazena em três diferentes estruturas: Instance, Nó e Arco.

```
1. ReadInstance(){
2.    $Nós_{total} \leftarrow Nós;$ 
3.    $Arcos_{total} \leftarrow Arcos;$ 
4.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
5.      $Nó.número \leftarrow$  número;
6.      $Nó.x \leftarrow x;$ 
7.      $Nó.y \leftarrow y;$ 
8.      $Nó.demanda \leftarrow$  demanda;
9.      $Nó.recebePrimário \leftarrow$  recebePrimário;
10.     $Nó.flytap \leftarrow$  flytap;
11.  end for
12.  for  $k \leftarrow 0$  até  $Arcos_{total}$ 
13.     $Arco.origem \leftarrow$  origem;
14.     $Arco.destino \leftarrow$  destino;
15.     $Arco.tamanho \leftarrow$  tamanho;
16.  end for
17. }
```

Figura 6.8: ReadInstance()

### 6.5.2 Criação de Matrizes (CriaMatrizes)

Rotina que cria as matrizes L, P e LM, descritas no algoritmo apresentado na Figura 6.9. Essas matrizes são utilizadas durante a execução do programa, para a alocação dos transformadores, construção da rede secundária e roteamento primário.

```
1. CriaMatrizes(){
2.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Arcos_{total}$ 
3.      $L \leftarrow$  Distância entre cada par de nós;
4.   end for
5.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
6.      $P \leftarrow$  Predecessor de cada nó;
7.   end for
8.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
9.      $LM \leftarrow$  Produtos distâncias*cargas entre cada par de nó;
10.  end for
11. }
```

Figura 6.9: CriaMatrizes()

### 6.5.3 Localização dos Transformadores (GulosaDemanda)

Esta rotina encontra uma solução para localização dos transformadores (resolve um problema de  $p$ -medianas).

```
1. GulosaDemanda(){
2.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
3.     if  $Nó \neq flyTap$ 
4.       if  $Nó = MelhorDistância$ 
5.          $Nó \leftarrow Mediana\ Inicial;$ 
6.       end if
7.     end if
8.   end for
9.   for  $k \leftarrow 1$  até  $patual$ 
10.    for  $i \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
11.      if  $Nó \neq flyTap$ 
12.        if  $Nó = MelhorDistância$ 
13.           $Nó \leftarrow Mediana;$ 
14.        end if
15.      end if
16.    end for
17.  end for
18. }
```

Figura 6.10: GulosaDemanda()

### 6.5.4 Verificação das Cargas (TransfereCargas)

Esta rotina verifica as cargas dos transformadores e se algum entre eles está acima do limite. Caso esteja, tenta transferir cargas para outro transformador, procurando tornar a solução factível.

```
1. TransfereCargas(){
2.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
3.     carga[transformador]  $\leftarrow$  demandadoNó[k];
4.   end for
5.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Arcos_{total}$ 
6.     Arcosdeligação  $\leftarrow$  arco[k];
7.   end for
8.   for  $k \leftarrow 0$  até  $p_{atual}$ 
9.     if trafo[k] = trafoOrigem
10.      if trafo[k] > Capacidadesdetrafos
11.        carga[trafoDestino]  $\leftarrow$  +demandadoNó;
12.        carga[trafoOrigem]  $\leftarrow$  -demandadoNó;
13.        remove Arcosdeligação[trafoDestino];
14.      end if
15.    end if
16.    if trafo[k] = trafoDestino
17.      if trafo[k] > Capacidadesdetrafos
18.        carga[trafoOrigem]  $\leftarrow$  +demandadoNó;
19.        carga[trafoDestino]  $\leftarrow$  -demandadoNó;
20.        remove Arcosdeligação[trafoOrigem];
21.      end if
22.    end if
23.  end for
24. }
```

Figura 6.11: TransfereCargas()

### 6.5.5 Cálculo de Fluxos (CalculaFluxos)

Esta rotina calcula o fluxo nos arcos, considerando uma determinada alternativa de instalação de transformadores.

```
1. CalculaFluxos(){
2.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
3.      $NóOrigem \leftarrow k$ ;
4.      $NóDestino \leftarrow AlocadosnoNó[k]$ ;
5.      $NóAtual \leftarrow NóOrigem$ ;
6.      $j = 1$ ;
7.     while  $NóAtual \neq NóDestino$ 
8.        $NóAtual \leftarrow ElementodeP(NóDestino, NóAtual)$ ;
9.        $caminho[j] \leftarrow NóAtual$ ;
10.       $j = j + 1$ ;
11.    end while
12.  end for
13. }
```

Figura 6.12: CalculaFluxos()

### 6.5.6 Determinação dos Arcos da Rede Primária (CalculaArcosPrimários)

Rotina que determina os arcos que fazem parte da rede primária. Esta rotina trabalha em conjunto com a rotina descrita na próxima seção.

```
1. CalculaArcosPrimários(){
2.   for  $k \leftarrow 0$  até  $ArcosPrimários_{total}$ 
3.      $NóOrigem \leftarrow OrigemPrimário(k)$ ;
4.      $NóDestino \leftarrow DestinoPrimário(k)$ ;
5.      $NóAtual \leftarrow NóOrigem$ ;
6.      $NovoAtual \leftarrow \emptyset$ ;
7.     while  $NóAtual \neq NóDestino$ 
8.        $NovoAtual \leftarrow P(NóDestino, NóAtual)$ ;
9.        $Arco \leftarrow Arcoqueligadoisnós(NóAtual, NovoAtual)$ ;
10.       $NóAtual = NovoAtual$ ;
11.    end while
12.  end for
13. }
```

Figura 6.13: CalculaArcosPrimários()

### 6.5.7 Conexão com a Rede Primária (Primário)

Após a execução do algoritmo anterior, esta rotina executa a heurística para conexão da rede primária aos transformadores.

```
1. Primário(){
2.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
3.      $Nó \leftarrow Nós_{Primário}$ ;
4.   end for
5.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Arcos_{total}$ 
6.      $Arcos \leftarrow SubArcos[k]$ ;
7.   end for
8.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
9.      $Nó \leftarrow PontosdeSteiner[k]$ ;
10.  end for
11.   $j = 1$ ;
12.  while  $MelhoraSubArcos[j]$ 
13.    if  $SubArcos[k] > Arcos[k]$ 
14.       $SubArcos[k] \leftarrow Arcos[k]$  ;
15.    end if
16.     $j = j + 1$ ;
17.  end while;
18.  for  $k \leftarrow 0$  até  $p_{atual}$ 
19.     $Arcos_{Primários} \leftarrow SubArcos[k]$ ;
20.  end for
21. }
```

Figura 6.14: Primário()



### 6.5.8 Cálculo dos Custos (CalculaCustos)

Rotina que calcula o custo total da rede para uma determinada configuração de instalação de transformadores.

```
1. CalculaCustos(){
2.   for  $k \leftarrow 0$  até  $p_{atual}$ 
3.      $CTTrafo \leftarrow CustoTrafo[k]$ ;
4.   end for
5.   for  $k \leftarrow 0$  até  $Arcos_{total}$ 
6.      $CTArcos \leftarrow CustoArco[k]$ ;
7.   end for
8.   for  $k \leftarrow 0$  até  $ArcosPrimários_{total}$ 
9.      $CTArcosPri \leftarrow CustoArcoPri[k]$ ;
10.  end for
11.  for  $k \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
12.    if(Nó[k] = Poste Primário)
13.       $CTPostePrimário \leftarrow CustoPostePrimário$ ;
14.    if(Nó[k] = Poste Secundário)
15.       $CTPosteSecundário \leftarrow CustoPosteSecundário$ ;
16.    if(Nó[k] = Poste Primário/Secundário)
17.       $CTPostePriSec \leftarrow CustoPostePrimárioSecundário$ ;
18.    if(Nó[k] = Flying Tap)
19.       $CTFlyingTap \leftarrow CustoFlyingTap$ ;
20.    end if
21.     $CustoTotal \leftarrow CTTrafo + CTArcos + CTArcosPri + CTPoste-$ 
     $Primário + CTPosteSecundário + CTPostePriSec + CTFlyingTap$ ;
22.  return  $CustoTotal$ ;
23. }
```

Figura 6.15: CalculaCustos()

### 6.5.9 Atualização da Melhor Solução (Atualiza)

Rotina que verifica se a solução atual tem menor custo do que a melhor solução encontrada até então. Em caso positivo, a variável “M”, externa a rotina, recebe o valor zero, fazendo com que o VNS retorne ao início do processo de mudança de medianas, possibilitando uma variação do espaço de busca.

```
1. Atualiza(MelhorSolucao){
2.   if MelhorSolucao > SolucaoAtual
3.     for  $k \leftarrow 0$  até  $p_{atual}$ 
4.        $melhorMediana[k] \leftarrow medianaAtual[k]$ ;
5.     end for
6.     for  $k \leftarrow 0$  até  $Nós_{total}$ 
7.        $melhorNó[k] \leftarrow NóAtual[k]$ ;
8.     end for
9.     for  $k \leftarrow 0$  até  $Arcos_{total}$ 
10.       $melhorArco[k] \leftarrow ArcoAtual[k]$ ;
11.    end for
12.    M  $\leftarrow 0$ ;
13.  end if
14. }
```

Figura 6.16: Atualiza()

### 6.5.10 Troca de Posição de Transformador (MudaVizinho)

Rotina que faz a troca de local do transformador, em sua vizinhança.

```
1. MudaVizinho(posicao){
2.   if MedVizinha[VetMed[posicao]] ≠ flyingTap
3.     VetMed[posicao] ← MedVizinha[VetMed[posicao]];
4.   end if
5.   else
6.     VetMed[posicao] ← MedVizinha[VetMed[posicao]+1];
7.   end else
8. }
```

Figura 6.17: MudaVizinho()

## 6.6 Consideração da Relação entre Demanda de Energia e Potência

Normalmente, quando se planeja a instalação de redes secundárias existe uma previsão sobre requisitos de energia. Para qualificar os requisitos de potência, utiliza-se funções aproximadas, construídas a partir de informações estatísticas. As curvas que relacionam requisitos de energia e demanda recebem frequentemente a denominação de curvas “kVAs”, para enfatizar que calculam os requisitos de potência (em kVA) a partir de informações estatísticas (a letra “s”, ao final de kVA, é associado a palavra estatística, em inglês).

As curvas kVAs são funções côncavas, consequência da diversidade temporal dos requisitos de potência, que fazem com que os requisitos de potência aumentem em proporções inferiores aos requisitos de energia. A Figura 6.18 ilustra uma curva kVAs, onde a concavidade está dramatizada para enfatizar esse aspecto — curvas reais podem não se afastar muito da linearidade.

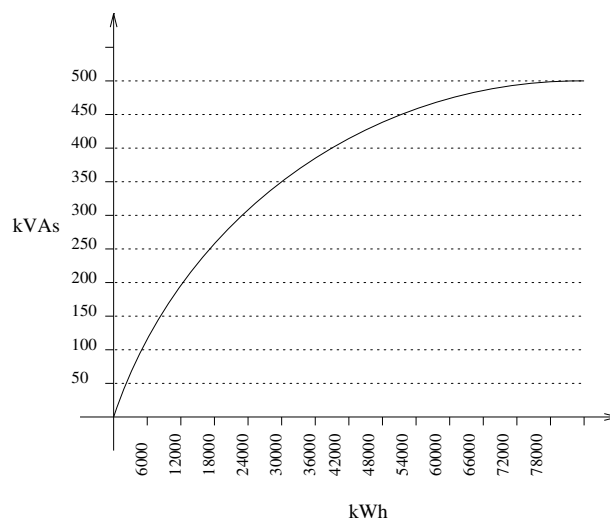


Figura 6.18: kVAs Ilustrativa

### 6.6.1 Utilização da curva kVAs na metodologia de Planejamento de Redes Secundárias

A utilização das curvas kVAs no planejamento de redes secundárias está ilustrada na Figura 6.19. Primeiramente, obtêm-se o consumo total da rede analisada. Tendo este total, distribui-se o consumo igualmente entre os transformadores instalados. Em seguida, usando-se a curva kVAs, faz-se uma estimativa da demanda por circuito—initialmente, as demandas dos circuitos serão idênticas.

Após esta aproximação inicial das demandas para os circuitos, obtemos a demanda por nó, multiplicando-se a demanda total do circuito ao qual este nó está conectado pela relação entre o consumo total do circuito e o consumo do nó.

Tendo-se definidas as demandas por nó, aplica-se o método Holístico. O método define a capacidade dos transformadores e suas posições, a rede secundária, a rede primária e o custo desta configuração. Ao término do método “Holístico” é feita a verificação da relação entre os requisitos de potência e energia em cada circuito. Se em algum circuito a diferença entre os requisitos totais de potência inicialmente estimadas e os requisitos calculados após a aplicação do método Holístico for significativa, refaz-se o processo de

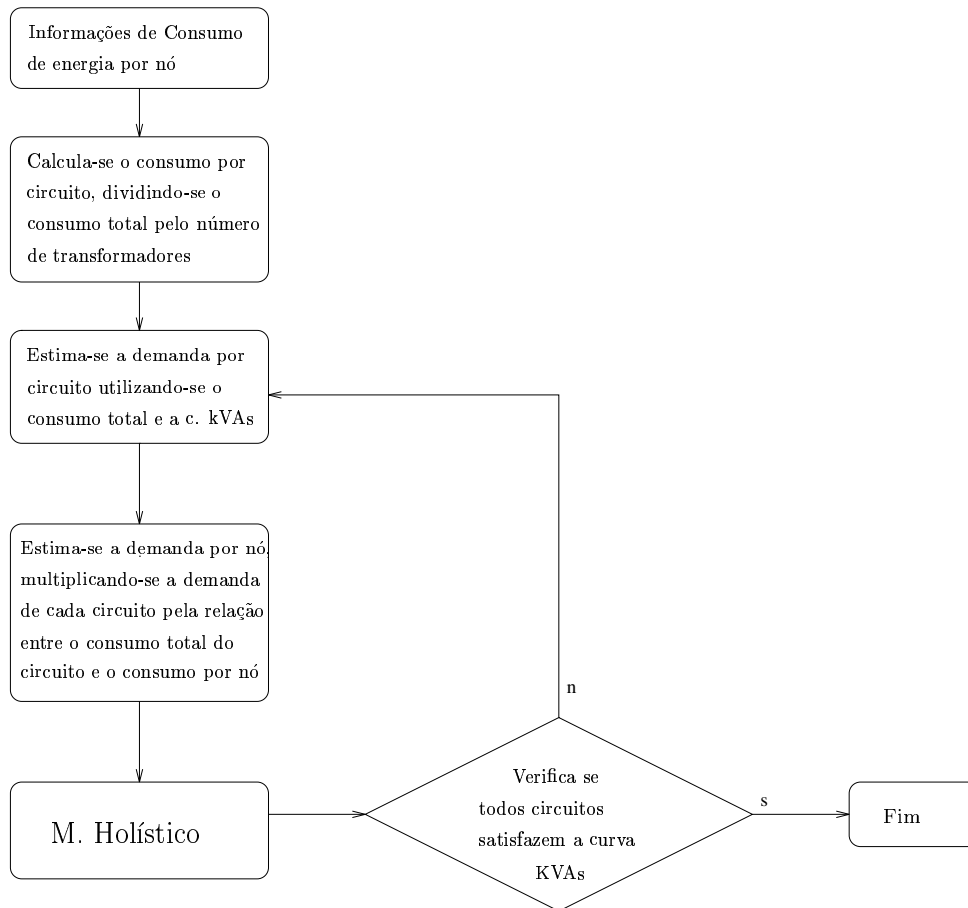


Figura 6.19: Fluxograma da Curva kVAs no método proposto

otimização (pelo Método Holístico), usando-se a nova estimativa. Esta sequência de procedimentos é repetida, até a convergência das estimativas com os valores obtidos após a otimização.

Vale ainda lembrar que a estimativa das demandas de potência é realizada antes da solução do problema de *p-medianas*; de fato, sem esta informação, o problema não pode ser abordado.

# Capítulo 7

## Estudos de Casos

### 7.1 Introdução

Este capítulo apresenta dois conjuntos de estudos de casos. O primeiro conjunto tem o objetivo de comparar o método holístico com outras abordagens bem sucedidas para solução do PPRSD, propostas por Carneiro et al. (1996) e Costa (2002) — este primeiro conjunto de instâncias não utiliza a curva kVAs. O segundo conjunto ilustra a aplicação do método holístico para o planejamento detalhado de redes secundárias, usando informações de situações reais.

### 7.2 Primeiro Conjunto de Estudos de Casos

Trabalhou-se com três grupos de instâncias. As instâncias do primeiro grupo, propostos por Costa (2002), foram geradas aleatoriamente da seguinte maneira: escolhem-se  $N$  nós em uma grade  $100 \times 100$ . Os nós são ligados de forma a se ter uma árvore e, em seguida, arcos complementares são adicionados até o número de arcos desejado na instância ( $A$ ). Esta metodologia é similar à proposta por Aneja (1980), amplamente usada na literatura. Foram geradas 20 instâncias, indexadas como aleat $xx$  ( $xx$  é o número da instância).

O segundo grupo de instâncias foi criado de forma que representem redes com características reais, mas com um número reduzido de nós. Este grupo foi nomeado  $ordxxnos$  ( $xx$  é o número de nós da instância).

O terceiro grupo de instâncias foi proposto por Carneiro (1990), com dados de três problemas reais. Essas instâncias têm dimensão de 100, 156 e 173 nós ( $real1$ ,  $real2$  e  $real3$ ) — a  $real3$  pode também ser encontrado em Carneiro et al. (1996).

O método Holístico é comparado com os seguintes métodos: Exato, Carneiro et al. (1996), Carneiro Estendido (Costa (2002)) e Algoritmos Genéticos. No entanto, o método Exato foi aplicado somente nos dois primeiros grupos de instâncias, pois sua aplicação não é possível para os problemas de maior porte que constituem o terceiro grupo. O método de Carneiro Estendido, proposto por Costa (2002), trabalha com a utilização do método de relaxação Lagrangeana na obtenção das medianas (seção 4.3.2).

Os testes foram efetuados em uma estação de trabalho Sun Ultra 1, rodando Solaris. Utilizou-se o pacote comercial Cplex versão 6.6.0 para o método exato. Para os demais métodos, utilizou-se um micro Pentium 4 1.7 GHz, com codificação em JAVA 1.3.1, no sistema operacional Windows.

### 7.2.1 Definição dos Custos

Para fins de otimização, os custos precisam ser tratados de modo a expressar grandezas comparáveis. Para os custos fixos, considera-se valores atualizados, definidos a partir da vida útil dos equipamentos. Para os custos variáveis, considera-se o montante de perdas ao longo de um ano de operação. Desta forma, ambos os custos estão expressos em referências anuais.

O custo de um transformador depende de sua potência nominal. Um aspecto a ser observado nestes custos é a forte economia de escala, visto que o custo por kVA tende a ser bem menor nos transformadores maiores. Assim, para redução dos custos de transformadores, é melhor ter poucos transformadores de alta capacidade nominal. Entretanto, em

termos de minimização de custos e perdas nas linhas, é melhor ter muitos transformadores de pequena capacidade, perto dos pontos de demanda. A metodologia para abordagem do problema de planejamento de redes secundárias de distribuição deve encontrar o melhor compromisso entre esses custos.

Os custos utilizados para os alimentadores e transformadores são representados nas Tabelas 7.1 (instâncias do grupo 1 e 2) e 7.2 (instâncias reais do grupo 3).

Elemento	Custo (US\$)
transformador (20kVA)	150
transformador (30kVA)	180
transformador (40kVA)	200
transformador (70kVA)	280
alimentador 1ario (por metro)	1,00
alimentador 2ario (por metro)	0,30
alimentador 2ario (por metro · unidade de fluxo na faixa 0–10kVA)	0,050
alimentador 2ario (por metro · unidade de fluxo na faixa 5–16kVA)	0,075
alimentador 2ario (por metro · unidade de fluxo na faixa 16–20kVA)	0,100
alimentador 2ario (por metro · unidade de fluxo acima de 20kVA)	0,125

Tabela 7.1: Custos para as instâncias dos grupos 1 e 2

Elemento	Custo (US\$)
transformador (15kVA)	178,8
transformador (30kVA)	240,6
transformador (45kVA)	276,7
transformador (75kVA)	348,9
transformador (112,5kVA)	468,3
alimentador 1ario (por metro)	0,81
alimentador 2ario (por metro)	0,22
alimentador 2ario (por metro · unidade de fluxo na faixa 0–5kVA)	0,012
alimentador 2ario (por metro · unidade de fluxo na faixa 5–16kVA)	0,054
alimentador 2ario (por metro · unidade de fluxo acima de 16kVA)	0,092

Tabela 7.2: Custos para as instâncias do grupo 3

A Figura 7.1 apresenta os custos (já considerando os custos fixos e variáveis) de um



conjunto padrão de cabos utilizados em alimentadores secundários. Nota-se que há sempre uma escolha mais econômica de condutor, segundo o fluxo que o atravessa. Um aspecto interessante é que esta avaliação econômica é suficiente para determinar que cabo deve ser usado. Observa-se também que a envoltória inferior das curvas apresentadas na Figura 7.1 caracteriza a função de custo ótimo das linhas, em função dos fluxos (em kVA); para a utilização de métodos de programação linear na solução do problema de planejamento de redes secundárias de distribuição é necessária a linearização por partes dessas informações de custos.

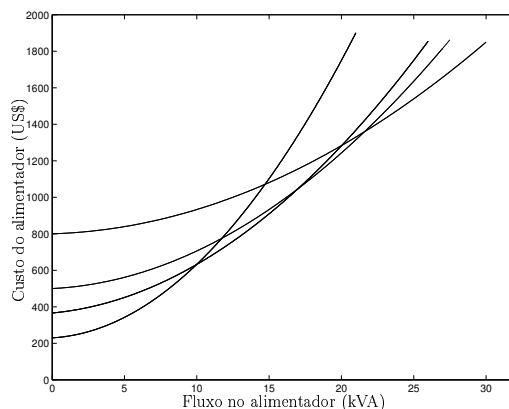


Figura 7.1: Custos dos alimentadores secundários (US\$) segundo o fluxo de potência (kVA).

Para os alimentadores primários, adotou-se um único tipo de cabo — seu custo é também anualizado. Além disso, quando se considera apenas os pequenos trechos de alimentadores primários, que fazem a conexão das redes primárias existentes com as redes secundárias, as perdas dos alimentadores primários são desprezíveis em relação aos custos fixos de instalação. Pode-se, portanto, considerar apenas os custos fixos.

## 7.2.2 Resultados

A Tabela 7.3 apresenta os resultados obtidos pelas heurísticas na resolução do conjunto de instâncias aleatórias. O valor ótimo do problema, obtido pelo método exato, é usado para comparação. Os valores percentuais nas colunas da tabela caracterizam a relação entre o valor de solução obtido com o método associado a coluna e o valor da solução ótima.

A primeira coluna da Tabela 7.3 contém o nome atribuído a instância. A segunda coluna fornece informações sobre o número de nós e o número de arcos das instâncias (N,A, respectivamente). A terceira coluna apresenta os valores das soluções ótimas (em US\$). A quarta coluna apresenta os resultados obtidos pelo método de Carneiro e colaboradores. A quinta coluna e sexta coluna apresentam os resultados obtidos por Costa (2002), com aplicação do Método de Carneiro Estendido (Lagrangeano) e do Algoritmo Genético, respectivamente. A sétima coluna apresenta os resultados obtidos pelo método Holístico.

Inst.	(N,A)	ótimo	Carneiro <i>et al.</i>	C. Estendido	Al. Genético	Holístico
aleat01	(4,4)	251.74	<b>0.0%</b>	<b>0.0%</b>	<b>0.0%</b>	<b>0.0%</b>
aleat02	(4,6)	261.53	10.21%	7.73%	<b>0.0%</b>	<b>0.0%</b>
aleat03	(8,8)	526.16	2.84%	<b>1.27%</b>	<b>1.27%</b>	<b>1.27%</b>
aleat04	(8,12)	389.96	2.15%	<b>0.13%</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.13%</b>
aleat05	(8,16)	511.79	1.66%	6.30%	<b>0.0%</b>	<b>0.0%</b>
aleat06	(12,12)	758.43	4.11%	<b>0.80%</b>	<b>0.80%</b>	<b>0.80%</b>
aleat07	(12,18)	846.50	3.72%	3.72%	0.09%	<b>0.03%</b>
aleat08	(12,24)	655.15	0.11%	<b>0.11%</b>	<b>0.11%</b>	<b>0.11%</b>
aleat09	(16,16)	1134.53	1.02%	1.02%	<b>0.70%</b>	1.02%
aleat10	(16,24)	759.05	3.40%	5.39%	<b>1.89%</b>	3.40%
aleat11	(16,32)	1134.59	1.05%	<b>0.97%</b>	1.35%	<b>0.97%</b>
aleat12	(20,20)	1694.57	1.51%	<b>0.27%</b>	0.28%	<b>0.27%</b>
aleat13	(20,30)	1240.70	4.97%	3.41%	2.81%	<b>1.41%</b>
aleat14	(20,40)	1380.57	3.32%	3.32%	<b>2.72%</b>	<b>2.72%</b>
aleat15	(24,24)	2151.42	0.56%	<b>0.38%</b>	0.85%	0.56%
aleat16	(24,34)	1641.10	2.70%	<b>1.18%</b>	3.58%	<b>1.18%</b>
aleat17	(24,48)	1396.60	5.62%	<b>2.26%</b>	2.58%	<b>2.26%</b>
aleat18	(30,30)	2666.29	2.64%	<b>0.99%</b>	1.20%	2.07%
aleat19	(30,45)	1889.40	3.15%	<b>1.75%</b>	2.27%	2.02%
aleat20	(30,60)	2106.99	1.69%	3.70%	2.68%	<b>0.78%</b>

Tabela 7.3: Resultados das heurísticas para as instâncias geradas aleatoriamente

A Tabela 7.4 apresenta os resultados obtidos com o segundo grupo de instâncias.

Novamente o valor ótimo do problema é usado para comparação.

Inst.	ótimo	Carneiro <i>et al.</i>	C. Estendido	Al. Genético	Holístico
ord04nos	164.00	2.29%	2.29%)	<b>0.0%</b>	<b>0.0%</b>
ord09nos	448.50	0.56%	<b>0.28%</b>	0.29%	<b>0.28%</b>
ord12nos	686.50	1.18%	<b>1.18%</b>	1.19%	<b>1.18%</b>
ord16nos	824.25	12.95%	<b>0.61%</b>	0.61%	1.36%
ord20nos	613.75	3.67%	3.95%	3.67%	<b>0.81%</b>
ord25nos	1026.29	1.83%	1.83%	<b>1.22%</b>	<b>1.22%</b>
ord30nos	935.25	7.85%	6.76%	<b>2.02%</b>	2.34%
ord35nos	1057.75	19.40%	8.27%	3.11%	<b>1.04%</b>

Tabela 7.4: Resultados das heurísticas para as instâncias geradas ordenadamente

As Tabelas 7.5 a 7.7 apresentam os resultados obtidos pelas heurísticas na resolução do conjunto de instâncias Reais.

Os resultados apresentados na Tabela 7.3 permitem qualificar as heurísticas, sob o

Inst.	Carneiro <i>et al.</i>	C. Estendido	Holístico
Transformador	517.30	517.30	517.30
Cab. Secundários	676.59	676.59	676.59
Cab. Primários	0.0	0.0	0.0
Perdas	425.01	425.01	425.01
Total	<b>1618.90</b>	<b>1618.90</b>	<b>1618.90</b>

Tabela 7.5: Instância real 1

Inst.	Carneiro <i>et al.</i>	C. Estendido	Holístico
Transformador	3740.70	3740.70	3812.90
Cab. Secundários	1675.47	1687.52	1723.67
Cab. Primários	931.85	895.08	840.74
Perdas	2769.29	2724.78	2577.53
Total	<b>9117.31</b>	<b>9048.08</b>	<b>8.954.84</b>

Tabela 7.6: Instância real 2

Inst.	Carneiro <i>et al.</i>	C. Estendido	Holístico
Transformador	3571.30	3499.10	3368.60
Cab. Secundários	1582.00	1618.94	1646.51
Cab. Primários	1989.47	1653.03	1571.44
Perdas	2475.18	2843.58	2715.21
Total	<b>9617.95</b>	<b>9614.65</b>	<b>9301.76</b>

Tabela 7.7: Instância real 3

ponto de vista de proximidade das soluções obtidas com as heurísticas em relação a solução ótima. É fácil observar que, a heurística de Carneiro Estendido obteve melhores resultados em relação a Heurística de Carneiro e, na média dos resultados, esteve a 2.24% da solução ótima, enquanto a heurística de Carneiro esteve a 2.82%. O Alg. Genético obteve melhores resultados sobre o método de Carneiro Estendido, ficando na média a 1.27% da solução ótima. O método Holístico obteve os melhores resultados, com média de 1.05% de proximidade da otimalidade.

A Tabela 7.4 permite observações semelhantes. O método de Carneiro *et al.* obteve média de 6.22% de distância da otimalidade, Carneiro Estendido 3.15%, Alg. Genético 1.51% e o método Holístico 1.03%. Novamente, o método Holístico apresentou melhores resultados.

Nos testes com a Instância real 1, registrados na Tabela 7.5, ocorreu um empate entre as heurísticas. Isto ocorreu pelo fato das variações das posições dos transformadores não proporcionarem ganhos nos resultados finais.

Nos testes com as Instâncias reais 2 e 3, registrados nas Tabelas 7.6 e 7.7, verifica-se que o método Holístico obteve melhores resultados que os demais. O método obteve esses ganhos por visualizar o problema de forma global, o que permitiu verificar que uma mudança de posição dos transformadores, aproximando-os das redes primárias, permitia uma economia nos alimentadores primários sem um grande acréscimo nos custos de perdas nas redes secundárias.

### **7.3 Aplicação do Método Holístico no Planejamento Detalhado de Redes Secundárias**

Neste estudo de caso avalia-se a aplicação da metodologia em um caso hipotético com características reais de planejamento de novos loteamentos (“greenfield”). Este loteamento hipotético será denominado “LoteTeste”.

Para a realização do estudo, foram utilizados as seguintes informações:

- Características gerais do Loteamento;
- Definição do Arruamento;
- Lotes (quantidade, tamanho, classe de consumo);
- Posição dos Postes;
- Ligação dos consumidores aos seus postes;
- Definição inicial dos circuitos dos alimentadores (Rede Primária).

Utiliza-se também uma curva kVAs com características reais, para considerar os requisitos de energia e potência dos consumidores.

Elaborada a planta do novo loteamento, a heurística tem que encontrar a configuração que atenda a demanda prevista da forma mais econômica possível, satisfazendo os requisitos técnicos. A planta é dividida em duas partes distintas: uma parte a ser construída e a parte existente. A parte existente corresponde as informações sobre redes primárias existentes nas proximidades do loteamento. A Figura 7.2 apresenta a planta “LoteTeste”.

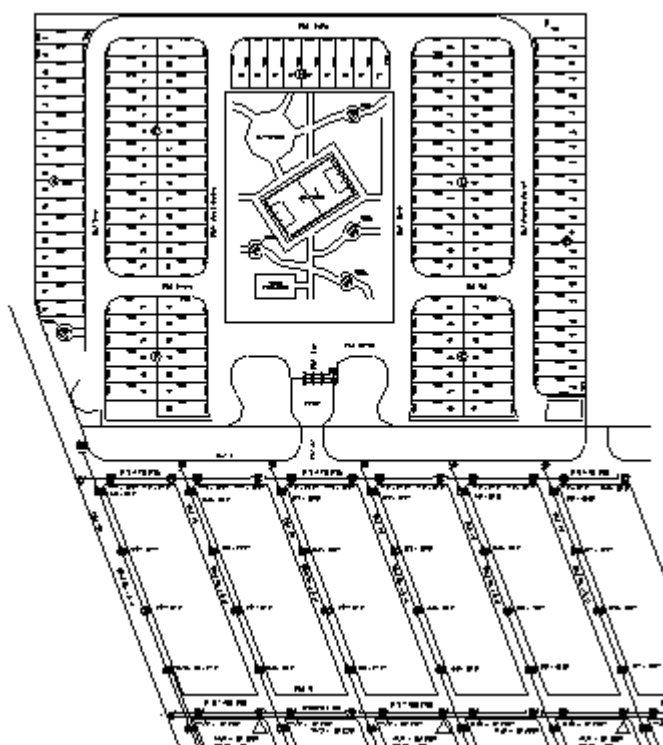


Figura 7.2: LoteTeste

A posição dos postes (nós) e as possibilidades de ligação (arcos) caracterizam a topologia da rede, modelada por uma estrutura de grafos.

### 7.3.1 Definição dos Custos

Os principais custos considerados na caracterização do PPRSD são apresentados nas Tabelas 7.8 e 7.9. Estes custos correspondem aproximadamente a valores praticados no Estado de São Paulo, no segundo semestre de 2002.

Elemento	Custo (R\$)
Transformador (30kVA)	1250,00
Transformador (45kVA)	2044,48
Transformador (75kVA)	2806,39
Transformador (112,5kVA)	3102,08
Alimentador 2ario (P12)(por metro)	10,94
Alimentador 2ario (P50)(por metro)	5,67
Alimentador 2ario (P35)(por metro)	4,71

Tabela 7.8: Custo dos Equipamentos

Deve-se destacar que os custos resumidos na Tabela 7.9 não foram considerados no primeiro grupo de estudos de casos. Por isso, estão caracterizados como “Itens Novos”.

Elemento	Custo (R\$)
Poste Secundário	247.32
Poste Primário/Neutro	421.32
Poste Primário/Secundário	439.97
Flying Tap Primário	329.95
Flying Tap Secundário	66,22

Tabela 7.9: Custo dos Itens Novos

As curvas de perdas de energia nos cabos foram obtidas através da fórmula 7.1 (Carneiro, 1990).

$$C_{pe} = C_e * 3RI^2 * 8,76 * F_p \quad (7.1)$$

Onde :

- $C_{pe}$  = Custo de Perdas de Energia
- $C_e$  = Custo da Energia (R\$ 0.25 KWh)
- R = Resistência do trecho em  $\Omega$ /KWh
- I = Corrente elétrica no trecho
- 8760 = número de horas do ano
- $F_p$  = Fator de perdas

O fator de perdas pode ser definido como a razão entre a perda média e a perda no pico de carga, durante um intervalo de tempo especificado (Gonen, 1986).

Neste trabalho, para o cálculo de  $F_p$  utilizou-se a fórmula 7.2.

$$F_p = 0,25F_c + 0,75F_c^2 \quad (7.2)$$

Onde :

- $F_c =$  Fator de Carga — é a relação entre a demanda média utilizada por um consumidor num determinado período de tempo e a demanda máxima ocorrida neste mesmo período. O valor utilizado para o fator de carga neste trabalho foi de 0.6.

Através da fórmula 7.1, foi obtida a curva de cabos utilizada nas instâncias reais, apresentada na Figura 7.3. Um aspecto importante na construção dessas curvas foi a consideração das corrente máximas suportadas pelos cabos. Esses dados são apresentados na Tabela 7.10.

Tipo do Cabo	Corrente Máxima (A)
P35	129
P50	168
P12	311

Tabela 7.10: Carregamento Máximo dos Cabos

Usado as informações apresentadas, encontra-se a capacidade ideal de utilização de cada tipo de cabo, considerando as correntes máximas e os custos de perdas. Através de uma linearização por partes, sabendo-se a corrente que irá passar em um determinado trecho da rede, encontra-se o tipo ideal do cabo a ser instalado, com o menor custo de perdas para o fluxo que passa pelo cabo.

Em relação ao carregamento máximo dos transformadores, considera-se que um transformador suporta (por um pequeno intervalo de tempo), sem uma grande perda de sua



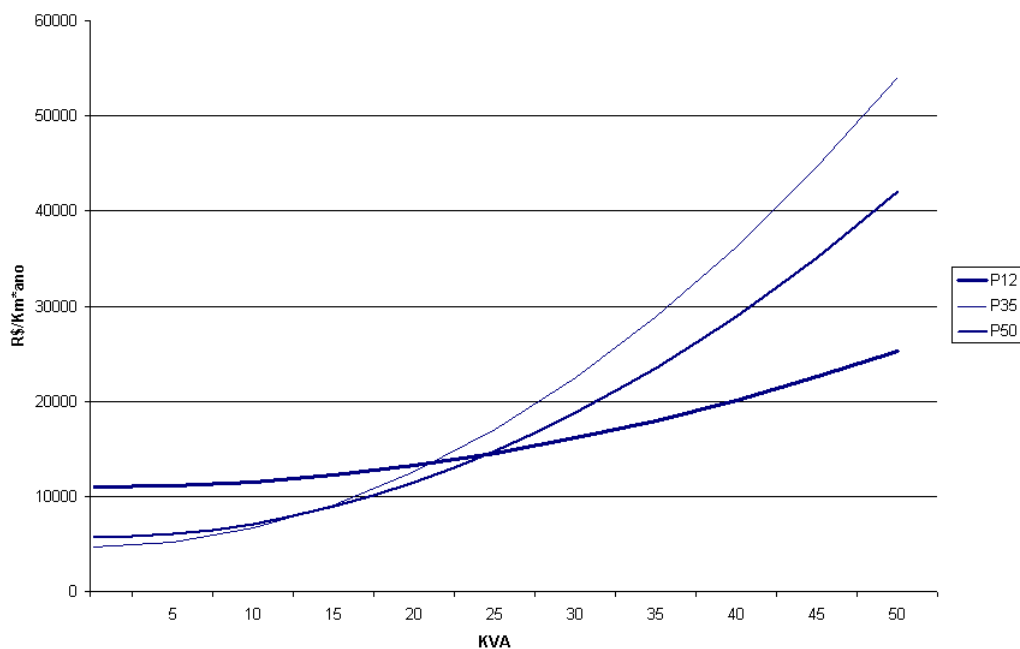


Figura 7.3: Característica dos Cabos Utilizados

vida útil, uma carga acima do seu valor nominal. Adotou-se neste estudo de caso o carregamento de até 50% acima do valor nominal do transformador.

### 7.3.2 Curva kVAs

A curva kVAs utilizada, apresentada na Figura 7.4 foi gerada a partir da Fórmula 7.3.

$$kVAs = 0,037 * kWh^{0,803} \quad (7.3)$$

Onde :

- $kVAs$  = Demanda estatística dos consumidores de um circuito, obtida a partir dos consumos;
- $kWh$  = Energia consumida pelos consumidores do circuito;
- 0,037 e 0,803 = Constantes.

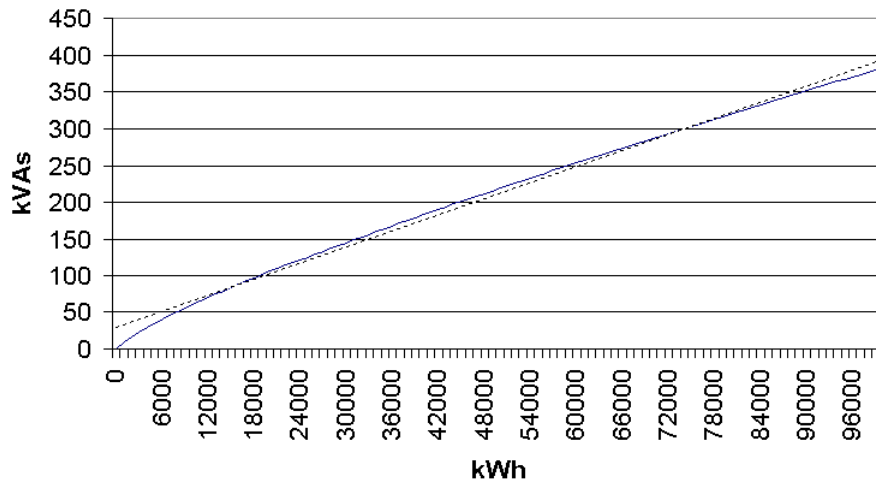


Figura 7.4: Curva kVAs

As Figuras 7.6, 7.7, 7.8 e 7.9 mostram a aplicação do método Holístico ao estudo de caso “LoteTeste”, com utilização da curva kVAs na forma ilustrada no fluxograma 6.19. Podemos notar as mudanças nas demandas de cada nó. A cada iteração, as demandas se aproximam dos seus valores reais, diminuindo os erros de aproximações.

As figuras 7.6-7.9 utilizam a legenda apresentada na Figura 7.5.

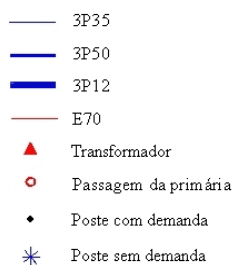


Figura 7.5: Legenda



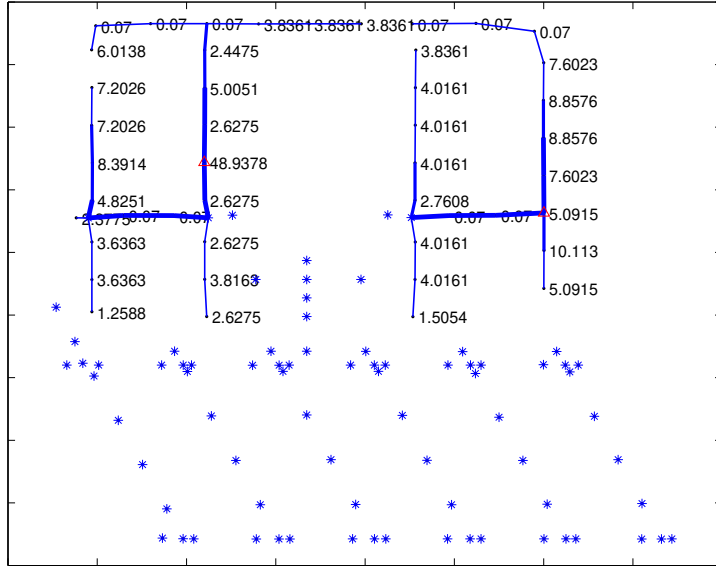


Figura 7.8: kVAs - Aproximação 3

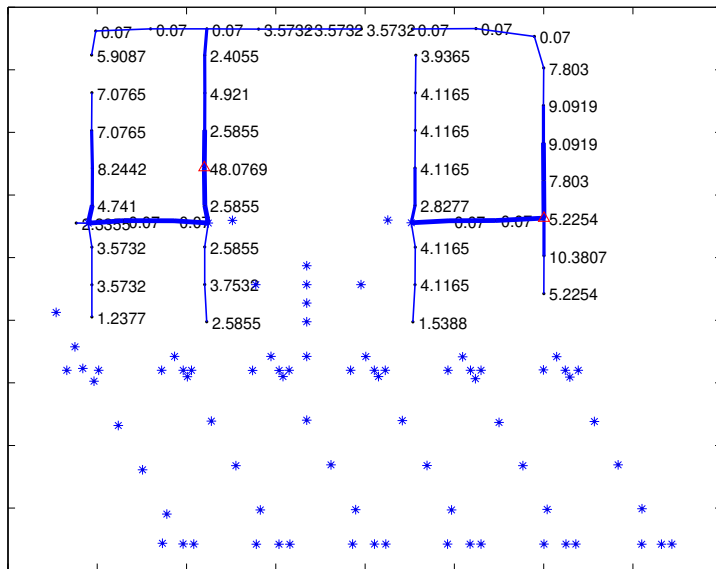


Figura 7.9: kVAs - Aproximação Final

### 7.3.3 Resultados

Nesta seção, os valores de cada parcela que compõem o resultado da execução do método serão discriminados. Desta forma, poderemos verificar claramente o peso de cada item dentro da solução final. A Tabela 7.11 apresenta estes custos.

Item Analisado	Valor (R\$)
Poste Secundários	8904
Poste Pri/Sec.	7479
Flying Tap Primários	1650
Flying Tap Secundários	200
Transformadores	6175
Perdas no Secundário	4789
Fixo Secundário	8290
Fixo Primário	6388

Tabela 7.11: Custo de cada item - Teste 1

A melhor configuração encontrada tem o custo total de R\$ 43.875,00. Podemos notar que a parcela de perdas nos condutores secundários representa 10.92% do montante final. Esta configuração utiliza dois transformadores, sendo um de 75 KVA e o outro de 112,5 KVA. A Tabela 7.12 apresenta o carregamento dos transformadores.

Transformador	Atendimento kVA	Atendimento kWh	Demanda Necessária (kWh)
75	81.1969	14489.95	14490.00
112,5	121.295	23909.92	23910.00

Tabela 7.12: Carregamento dos Transformadores Utilizados

As Figuras 7.10 e 7.11 apresentam visualizações das redes secundárias e extensões da rede primária. A Figura 7.10 ilustra também os diferentes tipos de cabos utilizados para o transporte da energia dos transformadores até os consumidores finais. Na segunda figura temos a ligação da rede primária existente aos transformadores. Estas figuras utilizam a mesma legenda apresentada na Figura 7.5.

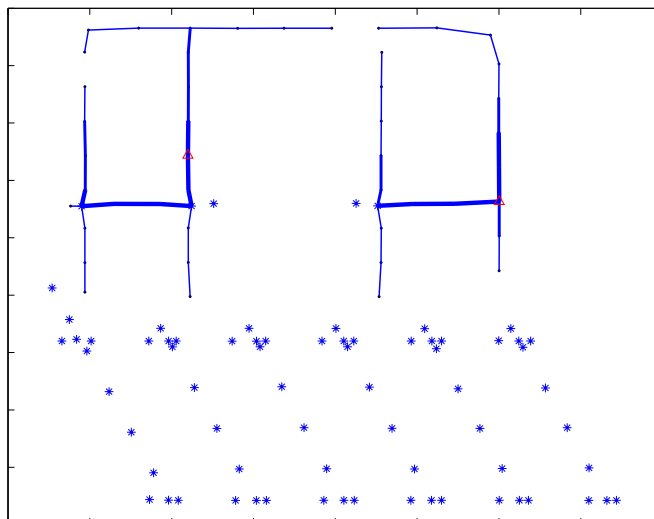


Figura 7.10: Cabos Secundários - Teste 1

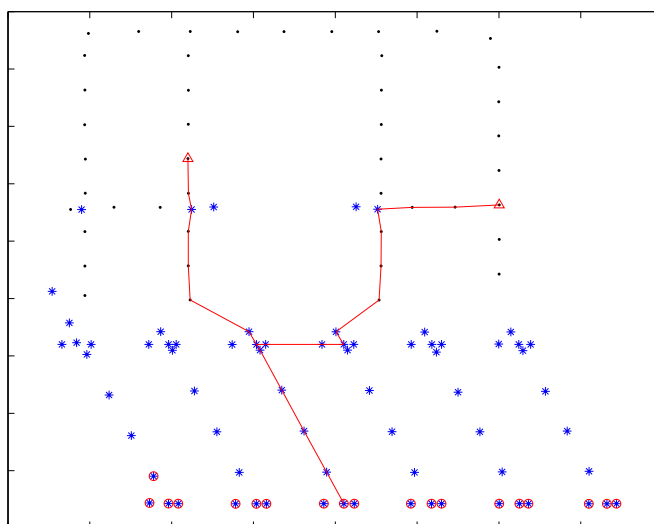


Figura 7.11: Cabos Primários - Teste 1

Em outro estudo, para o mesmo loteamento, força-se a entrada da rede primária pela portaria do loteamento. Para isso, foram acrescentados os postes necessários. Os custos desta nova configuração são apresentados na Tabela 7.13.

Item Analisado	Valor (R\$)
Poste Primários	2528
Poste Secundários	9398
Poste Pri/Sec.	5280
Flying Tap Primários	1650
Flying Tap Secundários	200
Transformadores	6175
Perdas no Secundário	4789
Fixo Secundário	8290
Fixo Primário	6243

Tabela 7.13: Custo de cada item - Teste 2

Nesse segundo estudo, o custo total alcançado foi de R\$ 44.553,00. A parcela das perdas neste caso foi de 10.75% dos custos totais. Os carregamentos dos transformadores, bem como os postes atendidos por estes, foi o mesmo do primeiro teste (Tabela 7.12). Nas Figuras 7.12 e 7.13 podemos verificar a nova configuração da rede. A principal modificação foi no novo traçado da rede primária; a posição dos transformadores, bem como o cabeamento secundário não foram modificados.

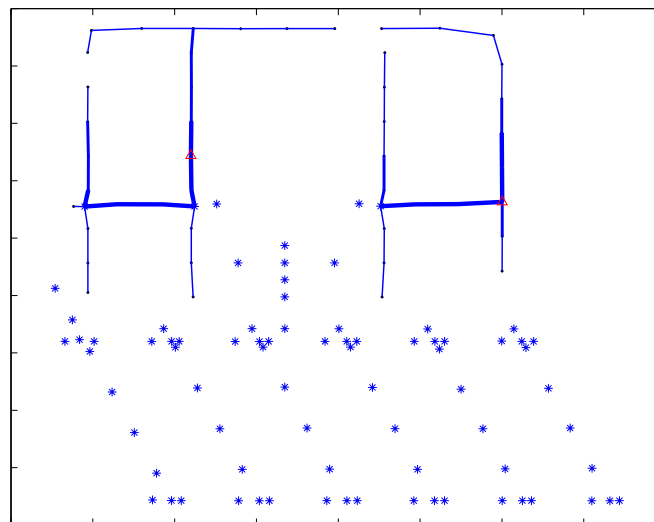


Figura 7.12: Cabos Secundários - Teste 2

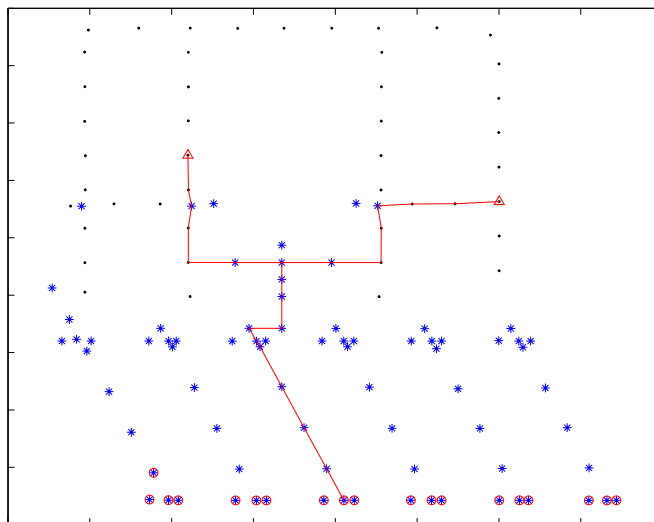


Figura 7.13: Cabos Primários - Teste 2

## 7.4 Discussão

Os resultados apresentados permitem verificar o bom funcionamento do método Holístico.

O primeiro conjunto de estudos de casos mostram que o método Holístico representa um aperfeiçoamento, em relação aos melhores métodos heurísticos propostos anteriormente — por Carneiro et al. (1996) e Costa (2002). Deve-se ressaltar, no entanto, que essa melhoria requer maiores tempos de processamento.

O segundo conjunto de estudos de casos demonstra que a metodologia baseada no método Holístico é capaz de resolver problemas de planejamento de redes secundárias com todas as características de situações reais. Em particular, ilustra o uso da metodologia para considerar adequadamente os requisitos de energia e potência dos consumidores.



# Capítulo 8

## Conclusões

O trabalho apresentou uma nova metodologia para o Problema de Planejamento de Redes Secundárias com dois componentes principais : o método Holístico e uma abordagem para consideração dos requisitos de energia e potência dos consumidores.

O método Holístico é um aperfeiçoamento das abordagens propostas por Carneiro et al. (1996) e Costa (2002). Sua principal característica é a exploração da sinergia decorrente da utilização seletiva dos métodos “Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP)” e “Variable Neighborhood Search (VNS)”, para integrar os subproblemas de localização de transformadores, definição de redes secundárias e definição de redes primárias.

A abordagem para consideração dos requisitos de energia e potência utiliza um procedimento de correções sucessivas, baseado no uso seletivo da curva kVAs — as curvas kVAs fornecem estimativas das potências máximas dos circuitos a partir de informações sobre requisitos de energia.

Estudos de casos mostraram que o método Holístico apresentou melhores resultados que as heurísticas desenvolvidas por Costa (2002), que aprimorou os estudos de Carneiro et al. (1996). Um dos estudos de casos ilustra a aplicação da metodologia em um cenário que considera o conjunto de aspectos presentes em redes reais. A consideração

dos requisitos de energia e demanda foi ilustrada no estudo deste cenário.

Embora o método Holístico tenha apresentado melhores resultados que as abordagens anteriores, deve-se mencionar que os métodos propostos por Carneiro e colaboradores (1996) e Costa (2002) levam também a resultados de boa qualidade. Por outro lado, a utilização de mais de um método de resolução pode gerar um conjunto de soluções úteis no processo de análise de sensibilidade.

O trabalho enfatiza o planejamento de redes secundárias novas (“greenfield”). Nesses estudos, procura-se encontrar o melhor compromisso entre o valor dos investimentos em equipamentos e os recursos provenientes das reduções de perdas. Os investimentos em equipamentos são colocados em bases anuais, levando em consideração o tempo de amortização, que deve estar associado a vida útil dos equipamentos e às taxas de juros praticadas no mercado.

Os desdobramentos do trabalho devem incluir o estudo de situações de ampliação de redes existentes. Outros aspectos a serem considerados nos desdobramentos do trabalho são refinamentos na representação da rede (incluindo um processo mais elaborado para avaliação das quedas de tensões) e o estudo de implantações por etapas, para loteamentos com crescimento lento das cargas.

# Referências Bibliográficas

- Ahuja, R., Magnanti, T. and Orlin, J. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Aneja, Y. P. (1980). An integer linear programming approach to steiner problems in graphs, *Networks* **10**: 167–178.
- Aoki, K., Nara, K., Satoh, T., Kitagawa, M. and Yamanaka, K. (1990). New approximate optimization method for distribution system planning, *IEEE Transactions on Power Systems* **5(1)**: 126–132.
- Backlund, Y. and Bubenko, J. A. (1979). Computer-aided distribution system planning, *Electrical Power & Energy Systems* **121**: 35–45.
- Bueno, E. A. (2000). *Redução de Perdas na Distribuição de Energia Elétrica pelo Método GRASP*, Tese de Mestrado.
- Carneiro, M. S. (1990). *Planejamento a longo prazo em sistemas de distribuição de energia elétrica*, Tese de Doutorado - FEEC/UNICAMP.
- Carneiro, M. S., França, P. and Silveira, P. D. (1996). Long-range planning of power distribution systems: secondary networks, *Computers and Electrical Engineering* **22(3)**: 179–191.
- Costa, A. M. (2002). *Otimização do Planejamento da Rede Secundária de Distribuição de Energia Elétrica*, Tese de Mestrado - FEEC/UNICAMP.

- Costa, A. M., Lyra, C., Yoshimoto, E. and França, P. M. (2001). Planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica—levantamento do estado do conhecimento, *Technical report*, preparado pela Universidade Estadual de Campinas para a Companhia Paulista de Força e Luz, Relatório Técnico R1 - Redes Secundárias.
- Costa, A. M., Lyra, C., Yoshimoto, E. and França, P. M. (2002). Planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica—caracterização da abordagem metodológica, *Technical report*, preparado pela Universidade Estadual de Campinas para a Companhia Paulista de Força e Luz, Relatório Técnico R2 - Redes Secundárias.
- Costa, M. F. N. (1999). *Computação evolutiva para minimização de perdas resistivas em sistemas de distribuição de energia elétrica*, Tese de Mestrado - FEEC/UNICAMP.
- Davies, M. (1965). Design of l. v. distributors from standard cable sizes, *Proceedings of the IEE* **112(5)**: 949–956.
- Feo, T. and Resende, M. (1989). A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem, *Operations Research Letters* **8**: 67–71.
- Feo, T. and Resende, M. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures, *Journal of global Optimization* **2**: 1–27.
- Fisher, M. L. (1981). The lagrangian relaxation method for solving integer programming problems, *management Science* **27 (1)**: 1–18.
- Fisher, M. L. (1985). An applications oriented guide to lagrangian relaxation, *Interfaces* **15 (2)**: 10–21.
- Fleurent, C. and Glover, F. (1999). Improved constructive multistart strategies for the quadratic assignment problem using adaptive memory, *INFORMS Journal on Computing* **11**: 198–204.

- Fourer, R., Gay, D. M. and Kernighan, B. W. (1993). *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*, Duxbury Press, Cole Publishing Company.
- Garey, M. R. and Johnson, D. S. (1979). *Computers and intractability*, W. H. Freeman.
- Glover, F. and Laguna, M. (1998). *Tabu Search*, Kluwer.
- Gonen, T. (1986). *Electric Power Distribution System Engineering*, McGraw-Hill.
- Hansen, P. and Mladenovic, N. (2001). Variable neighborhood search: Principles and applications, *European Journal of Operations Research* **130**: 449–467.
- Luenberger, D. (1984). *Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley.
- Pardalos, P. M. and Resende, M. G. C. (2001). *Handbook of Applied Optimization*, Oxford University Press.
- Pitsoulis, L. and Resende, M. G. C. (2001). *Handbook of Applied Optimization*, Oxford University Press.
- Snelson, J. K. and Carson, M. J. (1970). Logical design of branched l. v. distributors, *Proceedings of the IEE* **117(2)**: 415–420.
- Vaziri, M., Tomsovic, K. and Gonen, T. (2000). Distribution expansion problem revisited: Part 1 categorical analysis and future directions, *Proceedings of the Fourth IASTED International Conference on Power and Energy Systems (PES 2000), Marbella, Spain*.
- Wolsey, L. (1998). *Integer Programming*, John Wiley & Sons.