

HIDESON ALVES DA SILVA

Algoritmo de Otimização Multinível

Aplicado a Problemas de Planejamento de Redes

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Informática da Pontifícia Universidade Católica do
Paraná como requisito parcial para obtenção do título de
Doutor em Informática.

CURITIBA

2012

HIDESON ALVES DA SILVA

Algoritmo de Otimização Multinível
Aplicado a Problemas de Planejamento de Redes

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Informática da Pontifícia Universidade Católica do
Paraná como requisito parcial para obtenção do título de
Doutor em Informática.

Área de concentração: Métodos e Técnicas de Computação.

Orientador: Prof. Alceu Soares de Britto Jr.
Co-orientador: Prof. Luiz Eduardo Soares de Oliveira

CURITIBA

2012

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central

Silva, Hideson Alves da
S586a Algoritmo de otimização multinível aplicado a problemas de planejamento de
2012 Redes. / Hideson Alves da Silva ; orientador, Alceu Soares Brito Jr. ; co-orientador, Luiz Eduardo Soares. – 2012.
105 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2012.

Bibliografia: f. 81-93

1. Algoritmos. 2. Otimização combinatória. 3. Redes de computadores.
4. Análise de redes (Planejamento). 5. Telecomunicações – Sistema de computação. I. Brito Junior, Alceu Soares de, 1966-. II. Oliveira, Luiz Eduardo Soares de. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Informática. IV. Título.

CDD 20. ed. – 005.1



Pontifícia Universidade Católica do Paraná
 Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
 Programa de Pós-Graduação em Informática

ATA DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

DEFESA DE TESE DE DOUTORADO Nº 012/2012

Aos 06 dias de Junho de 2012 realizou-se a sessão pública de Defesa da Tese de Doutorado intitulada **“Algoritmo de Otimização Multinível Aplicado a Problemas de Planejamento de Redes”** apresentada pelo aluno **Hideson Alves da Silva** como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Informática, perante uma Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Alceu de Souza Britto Junior
 PUCPR (Orientador)

(assinatura)

APROVADO
 (aprov/reprov.)

Prof. Dr. Luiz Eduardo Soares de Oliveira
 UFPR (co-orientador)

APROV

Prof. Dr. Julio César Nievoia
 PUCPR

Julio Cesar Nievoia APROV

Prof. Dr. Alessandro Lameiras Koerich
 PUCPR

APROV.

Prof. Dr. Marcos Pessoa
 COPEL

APROV.

Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
 UFPR

APROVADO

Conforme as normas regimentais do PPGEI e da PUCPR, o trabalho apresentado foi considerado APROVADO (aprovada/reprovado), segundo avaliação da maioria dos membros desta Banca Examinadora. Este resultado está condicionado ao cumprimento integral das solicitações da Banca Examinadora registradas no Livro de Defesas do programa.

Prof. Dr. Mauro Sérgio Pereira Fonseca
 Diretor do Programa de Pós-Graduação em Informática



O temor do Senhor é o princípio do conhecimento;
mas os insensatos desprezam a sabedoria e a instrução.

Provérbios 1:7

Dedicado à minha amada esposa Luciana,
que participou desta jornada ao meu lado;
e aos meus filhos Samuel e Elise.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Alceu de Souza Britto Jr. e ao Prof. Luiz Eduardo Soares de Oliveira pela supervisão desta pesquisa nestes anos.

Sinceros agradecimentos à equipe do PPGIA da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR).

Obrigado à COPEL pelo suporte financeiro e obrigado aos engenheiros que contribuíram com as discussões sobre redes de telecomunicações.

Obrigado aos meus pais, irmão e irmã, que sempre me apoiaram nos meus estudos.

E muito obrigado aos meus amigos pela motivação e apoio.

Conteúdo

AGRADECIMENTOS	VII
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XV
ABREVIACÕES	XVII
RESUMO	XIX
ABSTRACT	XXI
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. Definição do Problema	2
1.2. Objetivos da Pesquisa	4
1.3. Desafios	6
1.4. Contribuições	6
1.5. Estrutura da tese	7
CAPÍTULO 2	9
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1. Problemas Clássicos de Projeto de Redes na Literatura	9
2.1.1. Problema de Projeto de Rede (<i>Network Problem Design - NDP</i>)	10
2.1.2. Problema da Árvore de Steiner (<i>Steiner Tree Problem - STP</i>)	10

2.1.3. Problema das p -Medianas (<i>p-Median Problem</i>)	11
2.2. Infraestrutura de Redes de Telecomunicações	12
2.2.1. Redes baseadas em fibras ópticas	16
2.2.2. Redes Ópticas Passivas	16
2.2.3. Topologia	18
2.3. Problemas de Otimização	19
2.3.1. Otimização com único objetivo	19
2.3.2. Otimização Multiobjetivo	19
2.4. Técnicas para problemas de único e multiobjetivo abordados nesta pesquisa	23
2.4.1. Heurísticas	24
2.4.2. Meta-heurísticas	24
2.4.3. Algoritmos de Otimização de Objetivo Único	24
a) Algoritmos Genéticos (<i>Genetic Algorithm - GA</i>)	24
b) Otimização por Enxame de Partículas (<i>Particle Swarm Optimization - PSO</i>)	25
2.4.4. Algoritmos de Otimização Multiobjetivos	26
a) Algoritmo NSGA-II (<i>Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithms</i>)	27
b) Algoritmo MOPSO (<i>MultiObjective Particle Swarm Optimization</i>)	28
Considerações Finais do Capítulo	30
 CAPÍTULO 3	 31
 ESTADO DA ARTE	 31
3.1. Problemas de Projetos de Redes	31
3.2. Problema da Árvore de Steiner	34
3.3. Problema das p-Medianas	35
3.4. Principais Técnicas Aplicadas a Projetos de Redes	36
3.4.1. Técnicas para otimização de objetivo único	36
3.4.2. Técnicas para otimização multiobjetivo	39
Considerações Finais do Capítulo	41

CAPÍTULO 4	43
ALGORITMO PROPOSTO	43
4.1. Formulação do Problema	45
4.2. Algoritmo Multinível aplicado a Projetos de Redes (MAND)	47
4.3. Processamento de um nível	51
4.3.1. Definição do caminho entre os nós	52
4.3.2. Otimização de Objetivo Único	53
4.3.3. Otimização Multiobjetivo	53
Considerações Finais do Capítulo	53
CAPÍTULO 5	55
RESULTADOS EXPERIMENTAIS	55
5.1. Base de Dados para Testes	57
5.2. Projeto da Rede com um Processo Individual de Cada Nível	59
5.3. Experimentos com Otimização de Objetivo Único	60
5.5. Experimentos com Otimização Multiobjetivo	67
5.6. Projetando Infraestrutura de Rede com Ferramentas Básicas	69
5.7. Discussão	72
5.8. Considerações Finais do Capítulo	74
CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	75
Vantagens do novo algoritmo	77
Desvantagens do novo algoritmo	77
Trabalhos Futuros	77

REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A	95
PROCESSANDO OS NÍVEIS	95
Processamento com um único cromossomo	95
APÊNDICE B	97
IMPLEMENTAÇÕES	97
B.1. Protótipo no ArcGIS®	97
B.2. Algoritmo MAND	100
APÊNDICE C	103
TESTES DE “TOMADOR DE DECISÃO”	103
C.1. Base de testes	104
C.2. Resultados	104
APÊNDICE D	105
LISTA DE PUBLICAÇÕES	105

Lista de Figuras

Figura 1.1	Exemplo de dados para projetar uma rede de telecomunicações	3
Figura 1.2	Estágios para projetar uma rede	4
Figura 1.3	Fluxograma do novo algoritmo	5
Figura 2.1	Exemplo de grafo (a) e árvore geradora mínima (b)	11
Figura 2.2	Modelo de implantação de rede de telecomunicações baseada em cabos [TEL10]	13
Figura 2.3	Esquema visual do <i>splitter</i>	17
Figura 2.4	Exemplo da utilização de um <i>splitter</i>	17
Figura 2.5	Exemplo de Rede Óptica Passiva [TEL09]	18
Figura 2.6	Topologia de Rede de Telecomunicações	19
Figura 2.7	Soluções da Fronteira de Pareto	20
Figura 2.8	Disposição das soluções conforme a abordagem de Pareto [DEB01])	22
Figura 2.9	Diagrama do procedimento de otimização multiobjetivo [DEB01]	23
Figura 2.10	Fluxograma básico do GA	25
Figura 2.11	Algoritmo básico do PSO	26
Figura 2.12	Diagrama (a) e <i>crowding distance</i> (b) do algoritmo NSGA-II [DEB00]	28
Figura 2.13	Fluxograma do MOPSO	29
Figura 4.1	Diferenças de custo encontrado entre os métodos. (a) Forma sequencial (b) Forma interativa.	44
Figura 4.2	Treliça do MAND	45
Figura 4.3	Representação de uma solução em um vetor	50
Figura 4.4	Exemplo de soluções	51
Figura 4.5	Resumo da otimização de um nível	51

Figura 5.1	Exemplo de cálculo, sendo (a) o diagrama da rede e (b) valores de custo	56
Figura 5.2	Localização geográfica da base de testes na cidade de Curitiba	58
Figura 5.3	Exemplo de processamento individual	60
Figura 5.4	Gerações executadas com o GA	65
Figura 5.5	Gerações executadas com o PSO	65
Figura 5.6	Exemplo de uma solução encontrada por MAND	66
Figura A.1	Exemplo da utilização de um vetor para todos os níveis	96
Figura B.1	Formulário para exportação de dados	98
Figura B.2	Formulário para exportar os dados para o mapa	98
Figura B.3	Opções de desenho no mapa	99
Figura B.4	Formulário para informar nomes de arquivos	99
Figura B.5	Diagrama de classes para implementação do MAND	100

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Resumo da Rede de Telecomunicações	14
Tabela 3.1	Resumo dos Trabalhos Relacionados	37
Tabela 3.2	Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos	40
Tabela 5.1	Dimensão da Base de Dados de Testes	57
Tabela 5.2	Resultados dos Experimentos com Redes de Três Níveis	62
Tabela 5.3	Resultados de Experimentos com Redes de Cinco Níveis	63
Tabela 5.4	Comparação entre MAND e o Processamento Individual	67
Tabela 5.5	Resultados dos Experimentos com Algoritmos Multiobjetivo	68
Tabela 5.6	Comparação de resultados obtidos pelo desenvolvimento de dois projetistas utilizando ferramentas básicas.	71
Tabela 5.7	Resumo do Percentual de Redução de Custo para Três Níveis	72
Tabela 5.8	Resumo do Percentual de Redução de Custo para Cinco Níveis	73

Abreviações

ACO	Ant colony optimization
ADH	Average distance heuristic
CH	Clustering heuristic
CNDP	Continuous network design problem
DCH	Directed convergence heuristic
DNH	Distance network heuristic
DPSO	Discrete particle swarm optimization
DST	Dynamic Steiner tree
EDNH	Extended distance network heuristic
EGA	Enhanced genetic algorithm
EMPH	Extended minimum cost paths
FTTa	Fiber to the apartment
FTTb	Fiber to the building
FTTc	Fiber to the curb or fiber to the cabinet
FTTd	Fiber to the desk
FTTh	Fiber to the home
FTTn	Fiber to the node
FTTx	A generic term for FTTa, FTTb, FTTh, ...
GA	Genetic algorithm
GHEST	Genetic heritage evolution by stochastic transmission
GIS	Geographic information systems
GRASP	Greedy randomized adaptive search procedure
HD IPTV	High-definition Internet protocol television
HMCOL	Hierarchy method of choosing optimum lines for public traffic network design
INDT	Integrated network design tools
INPE	Instituto nacional de pesquisas espaciais

IP	Internet protocol
KanGAL	Kanpur genetic algorithms laboratory
LDS	Limited discrepancy search
MADM	Multiple attribute decision making
MAND	Multilevel algorithm for network design
MOGA	Multi-objective genetic algorithm
MOOP	Multi-objective optimization problem
MOPSO	Multi-objective particle swarm optimization
MST	Minimum spanning tree
NDP	Network design problem
NP-Difícil	“Nondeterministic Polynomial” Difícil
NP-Completo	“Nondeterministic Polynomial” Completo
NSGA	Non-dominated sorting genetic algorithm
NSGA-II	Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithms
NTD	Network topology design
ODN	Optical distribution network
OLGA	Online genetic algorithm
OLT	Optical line terminal
ONT	Optical network terminal
ONU	Optical network unit
PGRASP	Parallel greedy randomized adaptive search procedure
PGS	Parallel genetic algorithm for Steiner problem
PON	Passive optical network
PSO	Particle swarm optimization
SA	Simulated annealing
SPH	Shortest path heuristic
SS	Scatter search
STP	Steiner tree problem
TS	Tabu search
VoIP	Voice over IP

Resumo

Estudos sobre infraestrutura de redes têm sido realizados e aplicados em várias indústrias de serviços públicos, tais como telecomunicações, distribuição de energia, água e gás. Entretanto, o planejamento de infraestrutura de redes em vários níveis é um problema em aberto, pois geralmente, a literatura apresenta soluções nas quais somente um nível é processado.

O planejamento da distribuição e conexão de equipamentos em vários níveis de uma infraestrutura de rede é uma tarefa árdua, pois é necessário avaliar a quantidade e a melhor distribuição geográfica em cada nível da rede, e que também sejam observados os níveis adjacentes. O resultado que um projetista obtém ao realizar manualmente o planejamento torna-se superficial, devido à inviabilidade de analisar todos os cenários que podem ser obtidos com as informações de quantidades e de distribuição dos equipamentos na região do projeto. Ainda mais complexo é alterar um nível já projetado, visto que é necessário rever a quantidade, localização e caminho entre os equipamentos, refazendo os cálculos do nível alterado, e, conseqüentemente, o nível anterior e todos os níveis subsequentes.

As abordagens que trabalham com cada nível de forma independente não mostram resultados satisfatórios quando o objetivo é planejar a rede completa, isto é, quando é necessária uma solução final que atenda todos os níveis da rede.

Esta pesquisa apresenta um novo algoritmo capaz de encontrar uma solução ótima para o planejamento de infraestrutura de redes multiníveis. O objetivo do novo algoritmo é trabalhar com vários níveis interativamente e considerar o impacto dos resultados de cada nível nos níveis adjacentes, cujos dados são utilizados nas iterações. Este novo algoritmo é uma ferramenta de apoio para aperfeiçoar o planejamento de infraestrutura de redes em indústrias de serviços públicos.

Uma infraestrutura de rede de telecomunicações, baseada em fibras ópticas, é utilizada como um estudo de caso, utilizando bases de dados georreferenciadas. Os resultados obtidos com o novo algoritmo são promissores, com uma redução de custo de até 40% sobre o método tradicional utilizado nas comparações.

Para complementar, esta pesquisa aborda tópicos de interesse na área de otimização de redes, em que é realizada uma revisão da literatura dos problemas clássicos: *Network Design Problem*, *Steiner Tree Problem* e o problema das p-Medianas com as abordagens propostas para solucioná-los.

Palavras-chaves: Otimização, planejamento de redes, algoritmos multinível.

Abstract

Studies about network infrastructure have been carried out and applied in several utility industries, like telecommunications, power, water and gas distribution. However, the planning of network infrastructures in many levels is an open problem, as in generally, the literature presents solutions in which only one level is processed.

Planning the distribution and the connections of equipment in many levels is an arduous job, as it is necessary to evaluate the quantity and the best geographical distribution in each level of the network, and also, to observe the adjacent levels. The result that a designer obtains developing the planning manually becomes superficial, due to the impracticability to analyze every scenario which could be obtained with the information on the quantity and the distribution of the equipment in the design area. Even more complex, is to modify a level which has been already designed, since it is necessary to review the quantity, location and paths between the equipment, recalculating the numbers of the modified level, and consequently, the previous level and all the subsequent levels.

The approaches which work with each level independently do not show satisfactory results when the objective is to plan a complete network, that is, when a final solution which attends all levels of the network is necessary.

This research presents a new algorithm capable of finding an optimal solution for the planning of multilevel network infrastructures. The objective of this new algorithm is to work with several levels interactively and to consider the impact of the results of each level on the adjacent levels, whose data are utilized in the iterations. This new algorithm is a support tool to improve the planning of network infrastructures in utility industries.

A telecommunication network infrastructure, based on optical fibers, is utilized as a case study, using georeferenced databases. The results obtained with the new algorithm are promising. They show a cost reduction of up to 40% over the traditional method used in the comparisons.

To complement, this research addresses topics of interest in the area of network optimization, with a review of literature on classic problems: *Network Design Problem*, *Steiner Tree Problem*, *p-Median Problem*, with the proposed approaches to solve them.

Keywords: Optimization, Network Planning, Multilevel Algorithms.

Capítulo 1

Introdução

O planejamento de infraestrutura de redes é um desafio presente em diferentes áreas de negócio e empresas de serviços públicos, tais como telecomunicações, distribuição de energia, gás e água. O problema é frequentemente o mesmo: otimizar a instalação de equipamentos em uma região geográfica com o objetivo de reduzir custos. Este problema tem sido modelado e estudado na literatura como Problema de Planejamento de Redes (*Network Design Problem-NDP*), Problema de Steiner (*Steiner Tree Problem-STP*) e como o problema das p-Medianas, todas abordagens clássicas que permitem o estudo de problemas reais para o desenvolvimento de novas ferramentas.

No entanto, o planejamento de infraestrutura de uma rede com vários níveis é um problema em aberto. Em resumo, o planejamento do primeiro nível da rede consiste em encontrar a quantidade e a localização de equipamentos que atendam os clientes. Considerando que a rede é planejada com mais níveis, para melhorar a distribuição e flexibilidade da rede, no próximo nível (nível 2), devem ser definidos a quantidade e a localização dos equipamentos para atender o nível 1. O procedimento, de que nos próximos níveis devem ser definidos os equipamentos que atendam o nível anterior, se repete para todos os níveis da rede a partir do segundo nível. Portanto, o planejamento deve ser otimizado de forma interativa entre os níveis da rede, e os métodos atuais encontrados na literatura não são satisfatórios para realizar essa tarefa.

A área escolhida para o estudo de caso desta pesquisa é a de telecomunicações. Os produtos e serviços oferecidos pelas companhias de telecomunicações diferem em quantidade e tecnologia, e estão sendo constantemente atualizados. A infraestrutura de rede é utilizada para diferentes propósitos e, portanto, ela deve ser dinâmica, especialmente porque os

serviços e produtos mudam com o passar do tempo. Por exemplo, redes de telefone baseadas em cabos de pares metálicos foram, inicialmente, construídas somente para telefones, sendo hoje também utilizadas para prover a rede mundial de computadores (Internet). Assim, os projetos de redes devem ser desenvolvidos independentemente dos serviços e produtos do momento, para que se possa otimizar e dar flexibilidade para novas tecnologias.

A telecomunicação é necessária para todas as áreas da sociedade, seja na pesquisa, entretenimento, indústrias ou comércio. A infraestrutura de redes de telecomunicação pode ser construída com fibras ópticas, e, no Brasil, os investimentos com infraestrutura começaram a crescer após a privatização das companhias de telecomunicações. Essas companhias, que antes eram majoritariamente controladas pelo governo, passaram a ser controladas pela iniciativa privada, as quais, por um longo período após as privatizações, somente exploraram as redes de fio já existentes [TAT03]. As redes antigas baseadas em cabos de pares metálicos não mais atendem os requisitos atuais de telecomunicações, tornando-se necessário construir novas redes, mais flexíveis e robustas.

1.1. Definição do Problema

As empresas têm desafios relacionados à construção de infraestrutura de redes em áreas urbanas, pois devem ter baixo custo. Por isto, é necessária a otimização dos equipamentos e dos cabos. Este problema consiste em definir o conjunto de equipamentos, que atendam a um conjunto de demandas, as quais são um conjunto de clientes ou um conjunto de equipamentos, dependendo do nível da rede. “Definir” significa encontrar a localização de cada equipamento e a ligação entre estes equipamentos com as demandas a serem atendidas.

O problema de infraestrutura de redes é comumente estudado na literatura como NDP, STP e problema das p-Medianas. Entre os estudos pesquisados e listados no Capítulo 3 de revisão bibliográfica, não foram identificados trabalhos que abordem o projeto de redes de forma interativa entre os níveis de uma mesma rede. No caso da construção de infraestrutura de redes de telecomunicações, alguns pontos precisam ser observados:

- a) Quantidade de clientes a serem atendidos (nós de demanda);
- b) Quantidade de níveis na rede;
- c) Quantidade e localização dos equipamentos em cada nível (nós facilitadores);
- d) O caminho entre os nós considerando a área geográfica;

e) A flexibilidade da rede em atender novas demandas.

Um exemplo de projeto de rede de telecomunicação pode ser visualizado na Figura 1.1. Esta Figura mostra um conjunto de clientes (1.1a) que devem ser atendidos em uma região geográfica (1.1b) e a junção dessas duas situações é vista em 1.1c.

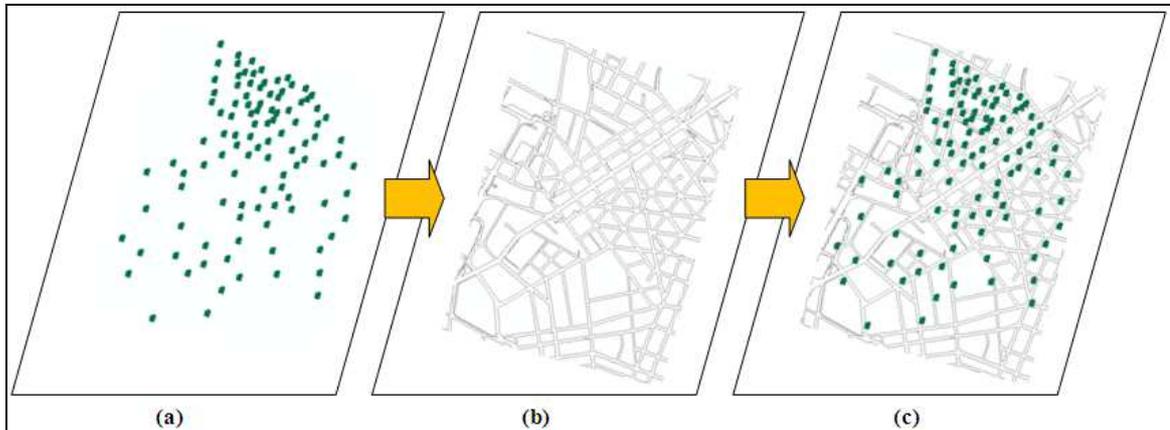


Figura 1.1. Exemplo de dados para projetar uma rede de telecomunicação.

(a) Demandas a serem atendidas. (b) Área geográfica.

(c) Demandas na área geográfica

A Figura 1.2 mostra uma solução para cada nível de um projeto de infraestrutura de rede de telecomunicação, a qual é necessária para atender os clientes previamente apresentados na Figura 1.1. Para cada nível, é encontrado um conjunto específico de nós facilitadores. Na Figura 1.2a, estão os nós facilitadores (círculos na cor roxa) do primeiro nível, que atendem os clientes. No próximo passo, Figura 1.2b, estão os nós facilitadores (quadrados na cor vermelha) do segundo nível, que atendem os nós facilitadores do primeiro nível, e, finalmente, o terceiro nível, Figura 1.2c, com o nó facilitador (losango na cor laranja) que atende os nós facilitadores do segundo nível. A Figura 1.2d mostra o projeto completo da infraestrutura de rede para atender os clientes da Figura 1.1.

Para cada nível da rede apresentada na Figura 1.2, o planejamento dos nós facilitadores é uma tarefa árdua, pois é necessário avaliar a quantidade e a melhor distribuição geográfica dos nós. Se um projetista realiza um trabalho manual, o resultado é superficial, pois é inviável (devido principalmente a restrição de tempo) analisar todos os cenários que podem ser obtidos com as informações de quantidades e distribuição dos nós no mapa. Ainda mais complexo é alterar um nível já projetado (quando é alterado um dado de um nível anterior), visto que é necessário rever a quantidade, localização e caminho entre os nós, e

refazer os cálculos do próximo nível, e, conseqüentemente, todos os níveis subsequentes ao alterado são revistos.

Mas, ainda que seja utilizada uma abordagem automatizada, em que os níveis são processados individualmente sem interação, o melhor resultado não é atingido. Isto porque é necessário considerar como as particularidades em um projeto de um nível interferem no projeto dos níveis adjacentes.

É importante observar que o conjunto de nós facilitadores de um nível é o conjunto de nós de demanda do próximo nível e o conjunto de nós ascendentes do nível anterior. Então, para se obter um projeto completo da rede, é necessário realizar um processo interativo entre os níveis.

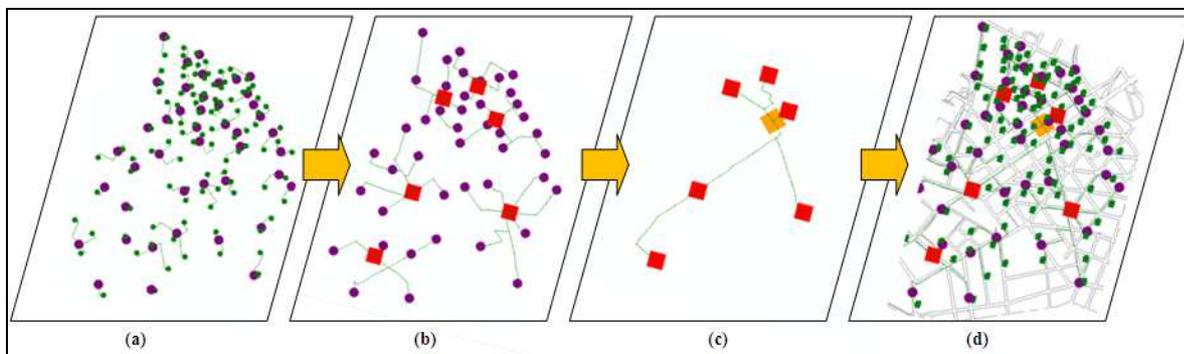


Figura 1.2. Estágios para projetar uma rede.

A maioria dos trabalhos existentes hoje na literatura realiza o projeto individual de cada nível, gerando soluções subótimas, pois a relação entre os níveis não é considerada. A hipótese principal desta pesquisa é considerar os níveis interativamente, e propor um novo algoritmo que realize o projeto otimizado da rede de forma interativa e com menor custo.

1.2. Objetivos da Pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é propor um novo algoritmo que considere os níveis da rede interativamente, possibilitando projetar infraestrutura de redes, as quais, em geral, são utilizadas nas indústrias de serviço público. O algoritmo proposto é desenvolvido para projetar redes que possuem três ou mais níveis, realizando uma interação entre os níveis.

Um estudo de caso em telecomunicações é usado para explicar e avaliar sua eficiência. O algoritmo também pode ser aplicado em outras indústrias além de telecomunicações, como distribuição de energia elétrica, gás e água. Na presente pesquisa, observa-se, com frequência,

a menção a trabalhos sobre redes de distribuição de energia elétrica, devido ao fato de que a maioria dos estudos na literatura de serviços públicos considera redes de energia.

O algoritmo proposto permite otimizar o projeto de infraestrutura de redes multinível, uma vez que a otimização é realizada iterativamente entre os níveis da rede, utilizando informações de níveis adjacentes. Na Figura 1.3, é possível observar que três níveis são processados pela iteração principal, e as iterações internas processam dois níveis cada. O processamento inicia pelo nível 1 ($\ell \leftarrow 1$), executando na primeira iteração interna os níveis ℓ e o nível $\ell + 1$. Na segunda iteração mais interna são processados os níveis $\ell + 2$ e $\ell + 1$. O algoritmo controla na iteração externa a quantidade de níveis a serem processados.

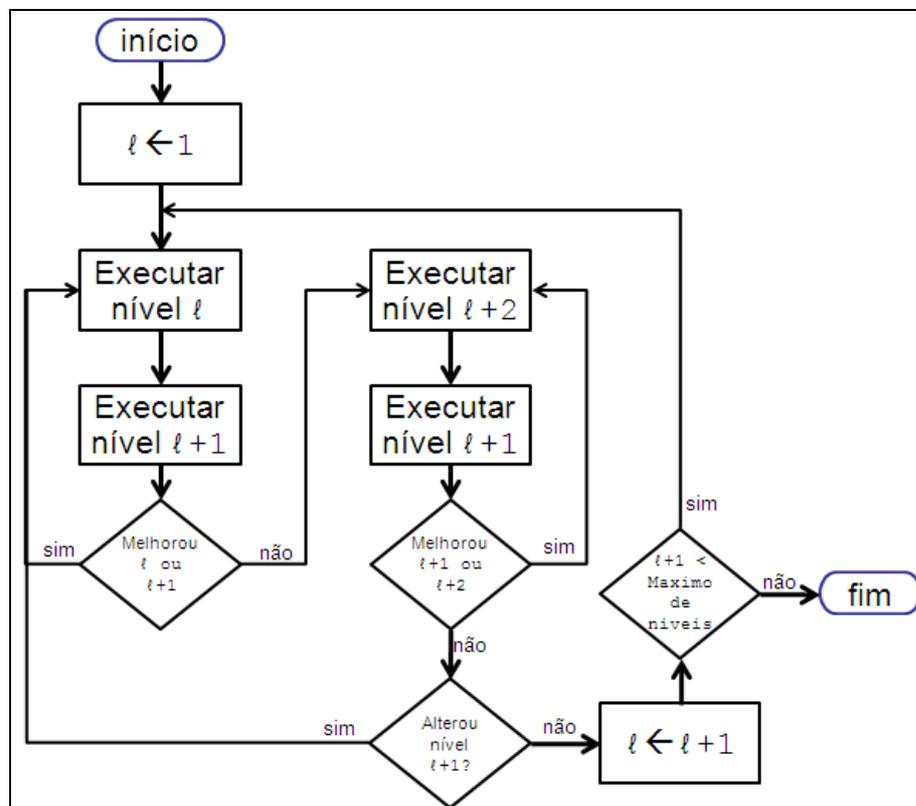


Figura 1.3. Fluxograma do novo algoritmo.

Os clientes (nós de demanda) devem ser atendidos em uma região geográfica, em vista disso, o novo algoritmo deve definir a quantidade e a localização dos equipamentos (nós facilitadores) iterativamente entre todos os níveis da rede. Para alcançar o objetivo principal, é necessário executar as seguintes metas:

1. Desenvolver uma função objetivo que considere não somente os nós de demanda, mas também os nós ascendentes. Esta função é separada em dois estágios:

- Computar as ligações entre os nós;
 - Computar o custo de nós utilizados.
2. Selecionar e analisar os algoritmos evolucionários para comparações e testes.
 3. Selecionar um algoritmo de roteamento em grafos que retorne o melhor caminho entre dois nós.
 4. Construir uma base de dados para os testes a partir de um sistema de informações geográficas.
 5. Definir um protocolo de avaliação.
 6. Avaliar o novo algoritmo comparando-o com um método da literatura.

1.3. Desafios

Para alcançar o objetivo proposto neste trabalho, alguns desafios devem ser vencidos:

- ✓ Selecionar e testar a implementação dos algoritmos auxiliares de otimização;
- ✓ Selecionar e testar a implementação de um algoritmo de melhor caminho para grafos;
- ✓ Desenvolver o novo algoritmo;
- ✓ Construir uma base de dados de testes para a avaliação do novo algoritmo;
- ✓ Realizar um conjunto de experimentos para análise do comportamento do novo algoritmo.

1.4. Contribuições

As contribuições originais desta pesquisa podem ser resumidas em:

- Científicas
 - ✓ Um novo algoritmo para projetar infraestrutura de redes que considera interativamente todos os níveis da rede.
- Tecnológicos
 - ✓ Demonstrar que, com o algoritmo proposto, é possível construir uma ferramenta auxiliar no planejamento de infraestrutura de redes em uma plataforma de geoprocessamento;
 - ✓ Construir uma base de dados para testes com informações de coordenadas geográficas;

- ✓ Comparar os algoritmos auxiliares de otimização do novo algoritmo, possibilitando avaliar os resultados nas estratégias de busca de objetivo único e de multiobjetivo em planejamento de redes.
- Sociais
 - ✓ O algoritmo proposto pode ser utilizado não somente em redes de telecomunicações, como também para várias outras indústrias de serviços públicos, como distribuição de energia, água e gás.

1.5. Estrutura da tese

A pesquisa apresentada neste documento está dividida em seis capítulos (incluindo a introdução e a conclusão), além dos apêndices. O primeiro capítulo delineou o problema e relatou os principais objetivos e as contribuições da tese.

No Capítulo 2, a teoria básica é descrita, iniciando com os conceitos dos problemas clássicos relacionados ao planejamento de infraestrutura de redes, seguido pela definição da infraestrutura de redes de telecomunicações. Posteriormente, os conceitos básicos sobre problemas de objetivo único e multiobjetivo são explicados. No final do capítulo, são apresentadas as principais técnicas da literatura que são usadas para resolver os problemas de planejamento de redes.

O Capítulo 3 é uma revisão do estado da arte. Nesse capítulo, apresenta-se a revisão da literatura do problema abordado na tese, com uma revisão dos algoritmos propostos e utilizados para resolvê-los.

O novo algoritmo proposto é detalhado no Capítulo 4. Esse capítulo apresenta a formulação matemática e como a nova estratégia desenvolvida resolve os problemas NDP, STP e p-Mediana com vários níveis.

O Capítulo 5 apresenta os experimentos e resultados. A primeira seção explica a construção da base de dados de testes. Na segunda e terceira seção estão informações sobre a execução do novo algoritmo para problemas de objetivo único e de multiobjetivo, respectivamente. A abordagem utilizada como parâmetro de comparação é apresentada na seção 4. Em seguida, são demonstrados os resultados obtidos com o novo algoritmo.

Por fim, no último capítulo, encontra-se a conclusão com as considerações sobre a pesquisa realizada e sobre o algoritmo proposto, e também são apresentadas sugestões de trabalhos futuros. Os apêndices incluem uma explicação sobre a utilização da representação

binária de todos os níveis de uma rede em apenas um vetor; uma breve introdução do protótipo usado para exportar e importar dados geográficos utilizados nos testes; e a lista das publicações obtidas no desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo traz uma breve introdução às teorias necessárias para o desenvolvimento do algoritmo proposto. Também são revistos os conceitos de alguns problemas clássicos da literatura, considerando que toda infraestrutura de rede, que pode ser para telecomunicações, distribuição de energia elétrica, água ou de gás, tem necessidades similares: instalar e otimizar os equipamentos e ligações; sendo abordados na literatura por meio dos estudos de:

- Problema de Projeto de Rede (*Network Design Problem - NDP*);
- Problema da Árvore de Steiner (*Steiner Tree Problem - STP*);
- Problema da p-Mediana (*p-Median Problem - p-Median*).

Para solucionar esses problemas, algumas técnicas são usadas, como heurísticas, meta-heurísticas e algoritmos de otimização; seus conceitos básicos são introduzidos neste capítulo. Apesar da ampla aplicação desta pesquisa nas indústrias de serviços públicos, o estudo de caso utilizado para avaliações é sobre infraestrutura de rede de telecomunicação, portanto, este capítulo introduz conceitos sobre infraestrutura de telecomunicações.

2.1. Problemas Clássicos de Projeto de Redes na Literatura

Esta seção apresenta os conceitos sobre os principais problemas clássicos na literatura usados para modelar um projeto de rede. Várias pesquisas têm sido desenvolvidas, nos últimos anos, ilustrando como os problemas são modelados e como as técnicas são aplicadas para solucioná-los. Usualmente, problemas clássicos apresentam características de problemas reais e, portanto, as soluções propostas na literatura podem ser aplicadas no mundo real.

Os problemas de redes em geral são modelados como um grafo, sendo os equipamentos e canais de comunicação representados por meio de nós e arestas, respectivamente. Um exemplo de grafo é demonstrado na Figura 2.1.

2.1.1. Problema de Projeto de Rede (*Network Problem Design - NDP*)

O NDP consiste em minimizar o custo de instalação para definir e dimensionar o trajeto de instalação de uma rede. Geralmente, NDP pode ser modelado em um grafo¹ $G=(V, E)$, e a solução é dada por um subgrafo $G'=(V', E')$, que considera as restrições do problema em análise e $V' \subseteq V$ e $E' \subseteq E$. Este é um problema NP-Completo [JOH78], a formulação matemática usual para este problema está descrita em [BUR85] e em [CAN02].

De acordo com [CHU99], NDP pode ser dividido em:

- Projeto de Topologia de Rede (*Network topology design*);
- Controle de Fluxo e Rota da Rede (*Network routing and flow control*);
- Desempenho da Rede (*Network performance*);
- Confiança da Rede (*Network reliability*).

Geralmente, quando um projeto de rede é modelado em NDP, os vértices representam os equipamentos e as arestas representam as ligações possíveis para conectar os equipamentos.

2.1.2. Problema da Árvore de Steiner (*Steiner Tree Problem - STP*)

O problema da Árvore de Steiner é um problema de otimização clássico proposto por Fermat no século XVII e a primeira solução foi proposta por Torricelli em 1640. O nome Steiner é devido a Jakob Steiner (*1796 +1863), que estudou e relatou esse problema como “Problema da Árvore de Steiner Euclidiana” e as soluções como “Árvore Geradora Mínima”. A primeira referência sobre o problema de Steiner está em [COU41].

O problema é encontrar a árvore de amplitude mínima (*minimum spanning tree - MST*) de um grafo $G=(V, E)$, sendo V o conjunto finito de nós e $V' \subseteq V$ é o conjunto de nós terminais (especiais), o qual que deve ser apresentado na solução final, i.e., após encontrar MST $G'=(V_T, E_T)$, todos os nós terminais devem ser apresentados, e:

- V_T deve conter todos os nós de V' ($V_T \subseteq V'$).

¹ A teoria de Grafo é revisada em [AHU93].

- G' deve ser um grafo conectado.

Quando V é representado por S (nós de Steiner) e T (nós terminais) tem-se:

- $S \subseteq V$ e $T \subseteq V$
- $S \cup T = V$
- $S \cap T = \emptyset$

No exemplo da Figura 2.1(a), o grafo não direcionado é:

- $G = (\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \{1-2, 1-3, 2-3, 2-4, 2-5, 3-5, 4-5, 4-6, 5-6\})$
- $V' = (1, 4, 6)$
- $MST = (1-3, 3-5, 5-4, 5-6)$ com mínimo = 9.

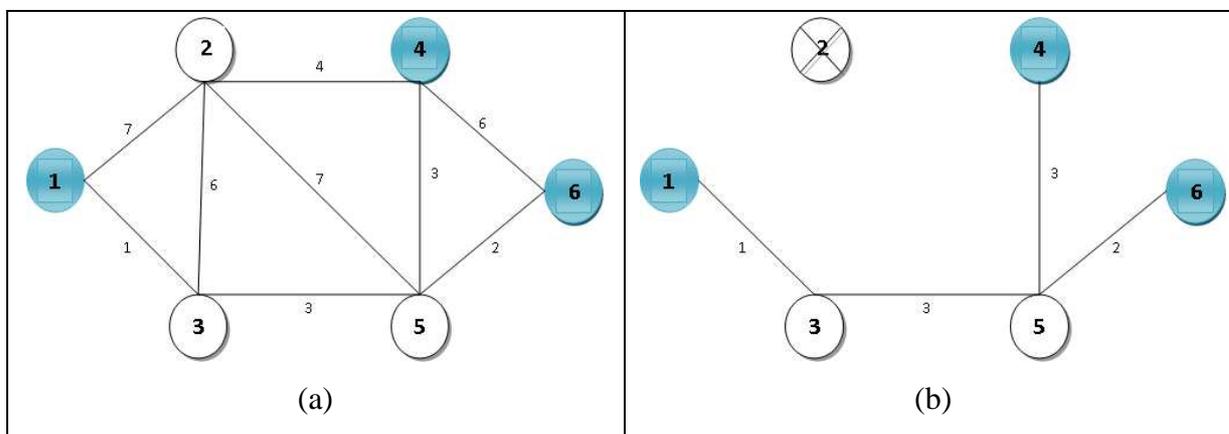


Figura 2.1. Exemplo de grafo (a) e árvore geradora mínima (b).

Esse problema é NP-Difícil [WER01] [GAR77] e tem importância prática, o que justifica as pesquisas realizadas sobre o assunto. Os detalhes desse problema são descritos em [WUB04] e [DUD08]; e uma revisão bibliográfica com métodos para a solução é listada por Werneck em [WER01].

2.1.3. Problema das p -Medianas (p -Median Problem)

O problema das p -Medianas consiste em localizar P facilidades que atendam a um conjunto de demandas, e a somatória das ligações entre facilidades e as demandas deve ser a menor possível, *i.e.*, dado um grafo $G = (V, E)$, encontre $P \subseteq V$, sendo $|P|=p$, e p pode ser fixo ou variável, e a somatória das menores distâncias de cada demanda até o vértice mais próximo em P é mínimo. Uma revisão sobre o problema das p -Medianas e os recentes métodos de solução é realizada em [REE05].

A solução desse problema não é trivial, conforme descrito em [GAR79], porque o número de possíveis soluções para uma dada instância do problema da p-Mediana cresce conforme o número de vértices aumenta. Um exemplo de uma solução para o problema da p-Mediana é apresentado em [LIY06], em que uma heurística é proposta baseada na otimização de colônia de formigas (*Ant Colony Optimization* - ACO).

2.2. Infraestrutura de Redes de Telecomunicações

A evolução da comunicação teve início quando o homem começou a viver em sociedade, partindo de gestos e pinturas à escrita com mensagens gravadas em pedras e argila. Acompanhando as necessidades do homem moderno, a telecomunicação surgiu com a criação do telégrafo, do rádio, da televisão, do telefone e hoje, da Internet, conectando o mundo e as pessoas. Antes, as notícias poderiam levar meses para atravessar o continente, e agora isso ocorre em milissegundos.

A telecomunicação é uma grande conquista do homem moderno e tornou-se um serviço essencial. O desenvolvimento da sociedade atual está diretamente associado com a geração e transmissão de informação, e hoje essa infraestrutura é cada vez mais necessária para esta sociedade “conectada *online*”. Telecomunicação é definida em [BAR95]:

Como um conjunto de equipamentos organizados que permitem coletar, endereçar, transportar e entregar informações de uma fonte para um ou mais destinatários distantes e especificados, com integridade e privacidade das informações.

Para a expansão das redes, as padronizações tornaram-se necessárias, e o governo brasileiro propôs algumas delas. Telecomunicações Brasileiras S.A. [TEL10] e a Agência Nacional de Telecomunicações [ANA10] propuseram um modelo padrão para rede de telefones baseada em cabos que é mostrado na Figura 2.2. Esse modelo propõe uma divisão de rede em redes primária e secundária, e os clientes são atendidos em seções de serviço. Para cada seção, é estudado um número de nós concentradores e nós de acesso. Esse modelo tenta simplificar a estrutura final do serviço do cliente e dá maior flexibilidade à rede inteira. O modelo apresentado na Figura 2.2 foi inicialmente desenhado para redes de telefone baseadas em cabos de pares metálicos, e, posteriormente, foi utilizado para redes de fibra óptica. Os detalhes sobre a história, os serviços, os produtos, a tecnologia e a transmissão das telecomunicações no Brasil estão registrados em [BAN05], [BAS00], [CAR98], [SOU04] e [VIE00].

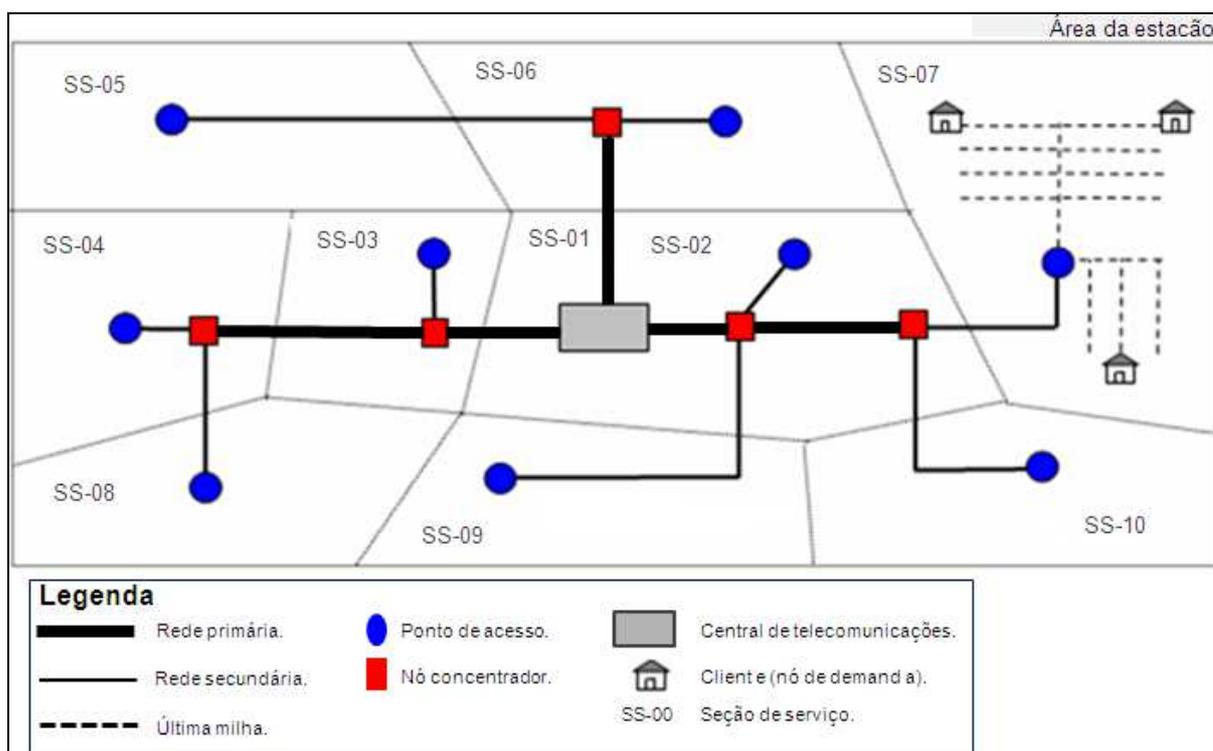


Figura 2.2. Modelo de implantação de rede de telecomunicações baseada em cabos. [TEL10]

O conceito da divisão em rede primária e secundária foi herdado das redes de distribuição de energia; informações dessa divisão de rede são abordados por Fanning em [FAN03]. Redes primárias são estabelecidas das centrais de telecomunicação para os nós concentradores através de cabos alimentadores “principais” (*feeder cables*), e a rede secundária é ligada entre nós de acesso e nós concentradores por meio de cabos alimentadores “secundários” (também chamados de cabos de distribuição). A ligação entre clientes e nós de acesso é conhecida como última-milha² (*last-mile*), através de cabos mais simples (*drop cables*). Redes secundárias se expandem mais e consomem mais recursos financeiros conforme o número de clientes aumenta, necessitando de maiores investimentos em instalações e suporte.

Equipamentos intermediários, como os nós concentradores e pontos de acesso, dão flexibilidade à rede. Mais equipamentos significa mais flexibilidade, entretanto os custos são

² O termo última-milha é usado para identificar a conexão de um cliente com a rede. Entretanto, alguns autores preferem usar o termo primeira-milha (*first-mile*), no qual o cliente é chamado de “primeiro”, pois é a razão pela qual a rede existe. Em [PAI10], são relatadas algumas justificativas de trocar o termo última-milha para primeira-milha.

mais altos também. Flexibilidade é importante para o futuro da rede já que a tecnologia está se aperfeiçoando e requerendo mais infraestrutura de rede de telecomunicações. Na central de telecomunicação, há os níveis “mais altos” de rede, em que se encontram o *hardware* e o *software* utilizados no gerenciamento da rede. A Tabela 2.1 mostra um resumo dos elementos da rede de telecomunicações.

Tabela 2.1. Resumo da Rede de Telecomunicações.

Rede Primária	Central	Equipamentos administradores (nível “mais alto” da rede).
	<i>Backbone</i>	Ligações entre as centrais de telecomunicação.
	Nó Concentrador	Equipamento de flexibilidade na rede primária.
	Cabo Alimentador	Cabos usados para conectar elementos na rede primária.
Rede Secundária	Ponto de Acesso	Equipamento usado para conectar clientes na rede.
	Cliente	Ponto a ser atendido, o qual é a razão da existência da rede.
	<i>Drop cable</i>	Cabos usados para conectar clientes ao ponto de acesso.

Centrais de telecomunicação são geograficamente distribuídas, de acordo com os critérios da companhia, para facilitar a administração e dar maior flexibilidade à rede. Elas são instaladas para atender áreas que podem ser uma quadra, um bairro, uma cidade ou um estado. Nas redes de telecomunicação, há uma estrutura de transmissão na forma de uma espinha de peixe chamada *backbone*, que conecta todas as centrais, geralmente em uma topologia de anel. Se for comparada com uma rede de distribuição de energia elétrica, a central de telecomunicação é uma subestação de transmissão com cabos de alta voltagem, acima de 230kV.

O projeto de centrais de telecomunicação é feito para atender nós concentradores, e o projeto desses nós é feito para atender pontos de acesso, que, por sua vez, são feitos para atender os clientes. Portanto, para atender novos clientes, não é necessário instalar um cabo do cliente à central de telecomunicação, mas somente encontrar o melhor ponto de acesso. A quantidade de centrais de telecomunicação, nós concentradores e pontos de acesso em uma região dependem de um projeto para verificar o investimento financeiro necessário e o quanto a companhia pode dispensar pelo retorno financeiro esperado.

Para construir uma rede de telecomunicação é necessário:

1) Rede Primária

- a. Definir a quantidade, capacidade e localização geográfica das centrais de telecomunicação a serem construídas;

- b. Encontrar a quantidade, capacidade e localização geográfica dos nós concentradores a serem instalados;
- c. Definir a capacidade e o trajeto dos cabos alimentadores para conectar os nós concentradores à central de telecomunicação e entre os nós concentradores;
- d. Definir a ligação entre as centrais de telecomunicação para construir o *backbone*.

2) Rede Secundária

- a. Encontrar a quantidade, capacidade e localização dos pontos de acesso a serem instalados;
- b. Definir a capacidade e o trajeto dos *drop cables* para conectar os clientes aos pontos de acesso;
- c. Definir a capacidade e o trajeto dos cabos para conectar os pontos de acesso aos nós concentradores.

E considerar as seguintes restrições:

- 1) A capacidade máxima de equipamentos em cada nível da rede;
- 2) A capacidade máxima de cabos;
- 3) A distância máxima entre os equipamentos, e dos clientes com equipamentos;
- 4) O custo de equipamentos e cabos;
- 5) O custo de instalação dos equipamentos e cabos;
- 6) A posição geográfica dos equipamentos considerando:
 - a. Estradas;
 - b. Postes de energia;
 - c. Construções civis existentes na área.

Para ilustrar um projeto de rede de telecomunicação, as Figuras 1.1 e 1.2 são usadas. As Figuras apresentam, inicialmente, um conjunto de clientes que devem ser atendidos com uma nova infraestrutura de telecomunicações (Figura 1.1a), observando-se que esses clientes estão distribuídos em uma região geográfica (Figura 1.1b). Em geral, as informações iniciais são um estudo preliminar, (clientes prospectos) de uma região que é considerada como promissora pela companhia de Telecomunicações. Se a rede será projetada com três níveis, o primeiro passo é projetar a localização de pontos de acesso e suas ligações com clientes (Figura 1.2a). Os clientes são representados pelos nós de demanda e os pontos de acesso

encontrados são os nós facilitadores. O próximo passo é projetar os nós concentradores (Figura 1.2b), neste caso, os pontos de acesso são nós de demanda e os nós concentradores encontrados são nós facilitadores. Finalmente, com a mesma lógica, é necessário encontrar as centrais de telecomunicação, nas quais os nós concentradores são nós de demanda e as centrais de telecomunicação encontradas são nós facilitadores. A rede completa dessa ilustração é mostrada na Figura 1.2d. É importante observar que, além de encontrar os nós facilitadores, é necessário construir as ligações entre os nós, que devem respeitar a geografia da região. Em geral, as ferramentas para o projeto de telecomunicações com informações geográficas são implementadas utilizando um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Uma abordagem de utilização de SIG em redes de telecomunicações está em [CAI02].

2.2.1. Redes baseadas em fibras ópticas

O estudo sobre projeto de redes é relativamente antigo, como apontam os autores de [GRO95] e [YOO98], que apresentam estudos da aplicação de fibra óptica em redes de telefone.

As redes de telecomunicação construídas com cabos de pares metálicos (meio de transporte de informação) para transmitir e receber informações são consideradas de tecnologia obsoleta, a opção é a migração da infraestrutura de rede para cabos de fibra óptica. O uso de cabos de fibra óptica se tornou um padrão, e, conforme as informações apresentadas pela organização FTTHCouncil em [COU10], é possível afirmar que somente conexões com fibra óptica suportam demandas como: HD IPTV, jogos pela Internet, *downloads* de vídeos, VoIP, comunicação *peer-to-peer*, vídeos conferência e computação em nuvem (*cloud computing*).

O uso de fibras ópticas apresenta várias vantagens sobre cabos de par metálico:

- Não é suscetível à interferência eletromagnética;
- Tem maior capacidade de transmissão;
- Tem menor peso e diâmetro.

2.2.2. Redes Ópticas Passivas

Com o crescimento do consumo de redes de telecomunicação com utilização de fibras ópticas, surgiu a arquitetura de Redes Ópticas Passivas (*Passive Optical Network – PON*). Isto possibilitou que as companhias de telecomunicação invistam menos recursos financeiros na rede de estrutura para atender os clientes.

A arquitetura PON permite que uma única fibra seja dividida em mais fibras, servindo vários usuários finais. Isto é possível com um aparelho passivo chamado de *splitter*, visto na Figura 2.3. O *splitter* é um acoplador de fibra óptica passiva que divide a “luz” de uma única fibra em dois ou mais canais de fibras. Isto faz com que uma conexão na central de telecomunicação seja capaz de atender vários clientes na última-milha, tornando possível para companhias fornecer o uso de comunicação de fibra óptica para uma grande parte da população (usuários residenciais e/ou comerciais) com menos investimentos financeiros.

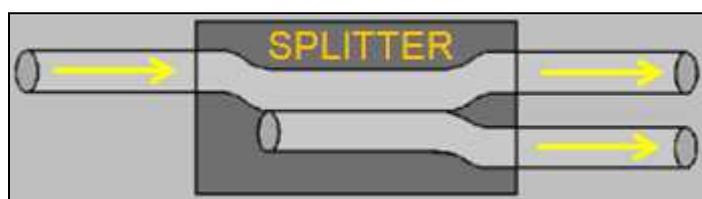


Figura 2.3. Esquema visual do *splitter*.

O sinal de uma fibra pode ser dividido em 2^n fibras, atualmente n varia de 2 a 7. A Figura 2.4 ilustra como o *splitter* separa uma fibra em mais fibras, em um exemplo de uma rede, neste caso, a fibra é capaz de atender oito clientes.

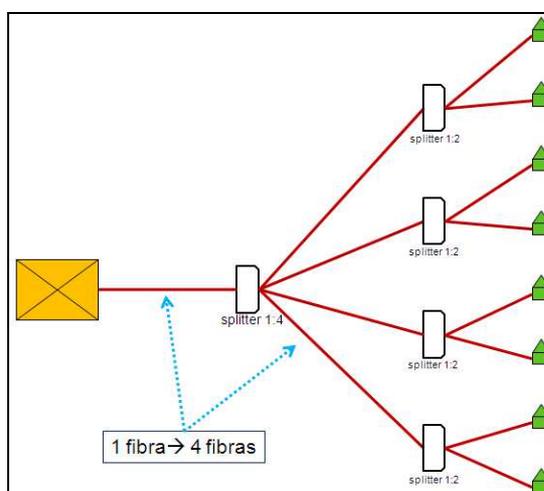


Figura 2.4. Exemplo da utilização de um *splitter*.

As divisões de uma PON são mostradas na rede da Figura 2.5. Os clientes³ estão conectados em uma Unidade de Rede Óptica (ONU) e em um Terminal de Rede Óptica (ONT) de uma fibra, que foi dividida no *splitter* do sistema da Rede de Distribuição Óptica

³ Os clientes são comumente referenciados como FTTx, em que x é um termo genérico para: FTTa, FTTb, FTTc, FTTd, FTTh, FTTn.

(ODN), e conectada ao Terminal de Linha Óptica (OLT). Isto mostrou que é possível conectar vários clientes com somente uma fibra no OLT.

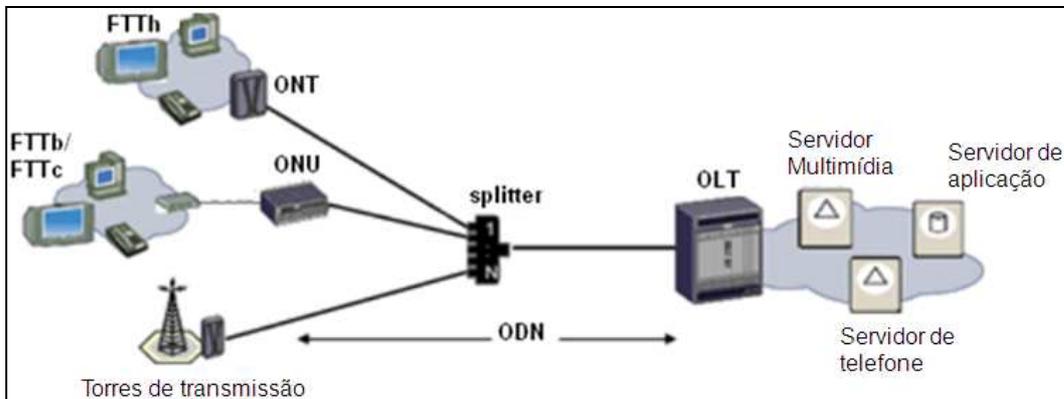


Figura 2.5. Exemplo de Rede Óptica Passiva. [TEL09]

Em [TEL09] e [FUR09] há conceitos e informações comerciais sobre as redes ópticas passivas.

2.2.3. Topologia

Companhias de Redes de Telecomunicação combinam topologias de estrela, barramento e anel para o projeto de rede. Geralmente, para conectar todas as centrais de telecomunicação, é utilizada uma topologia de anel, que é usada para garantir a disponibilidade da transmissão (*backbone*). Comumente, quando é necessário conectar nós concentradores com a central de telecomunicação e com outros nós concentradores, é utilizada uma topologia de barramento, principalmente para economizar investimentos financeiros. Finalmente, para conectar clientes à rede, é utilizada uma topologia de estrela.

A estrutura da topologia em redes de telecomunicação é visualizada na Figura 2.6, a qual mostra as três topologias normalmente utilizadas. As centrais de telecomunicação estão representadas com quadrados maiores em cinza e interligadas por um *backbone* em anel. Os nós concentradores representados em um quadrado menor e em vermelho, mais os pontos de acesso com círculos em azul, estão ligados em uma rede de topologia de barramento, e, finalmente, os clientes representados com “casas” estão ligados em uma topologia anel. Os conceitos básicos sobre topologia de rede estão listados nos trabalhos [USF11] e [WIK11].

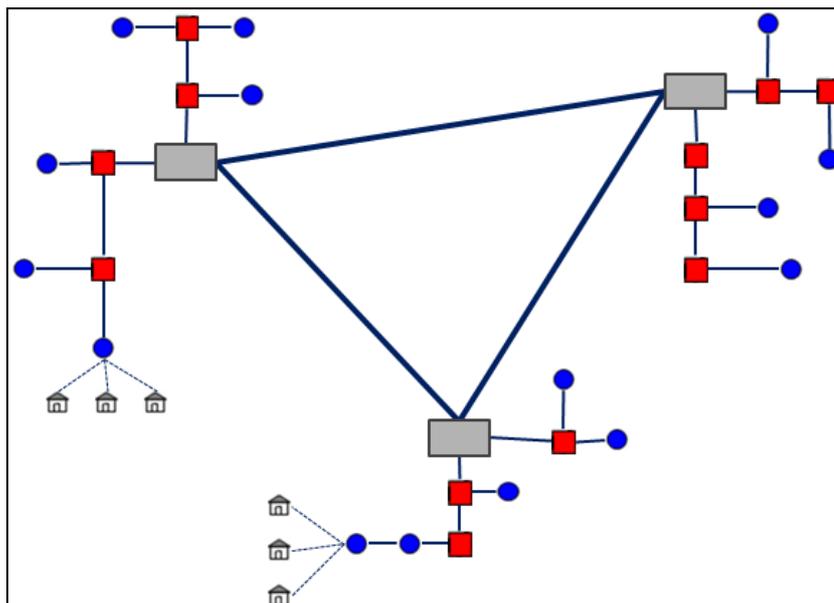


Figura 2.6. Exemplo da utilização de topologias diferentes em rede de telecomunicações.

2.3. Problemas de Otimização

Otimização é uma área da matemática também conhecida como programação matemática, e seu objetivo é minimizar ou maximizar uma solução para uma função objetivo. Estudos de ferramentas são realizados para encontrar uma solução para um problema complexo, sem avaliar todas as soluções existentes, devido às restrições, como tempo, *software* e *hardware*. Estudos de otimização permitem que problemas complexos sejam solucionados, com soluções viáveis, com recursos disponíveis e em um tempo polinomial.

2.3.1. Otimização com único objetivo

A otimização com objetivo único ocorre quando é necessário minimizar ou maximizar uma função objetivo, relacionada a uma variável de restrição. O conceito descrito em [EIB03] é:

Dado uma função $f:A \rightarrow \mathbb{R}$, para encontrar um elemento x_0 em A , tal que $f(x_0) \leq f(x)$ para todos $x \in A$ (se é uma função maximizadora x_0 tal que $f(x_0) \geq f(x)$), sendo o domínio A o espaço de busca (soluções candidatas) definido por um conjunto de restrições. O f é a função objetivo e a solução é conhecida como a solução ótima.

2.3.2. Otimização Multiobjetivo

O problema de Otimização Multiobjetivo (*Multi-objective Optimization problem - MOOP*), também chamado de otimização multicritérios, multidesempenho ou problema de

otimização vetorial, trabalha com duas ou mais funções objetivos, e, geralmente, com objetivos conflitantes. Deb em [DEB01] define MOOP como:

$$\begin{array}{lll} \text{Minimizar / Maximizar} & f_m(x), & m = 1, 2, \dots, M; \\ \text{Subject to} & g_j(x) \geq 0, & j = 1, 2, \dots, J; \\ & h_k(x) = 0, & k = 1, 2, \dots, K; \\ & x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} & i = 1, 2, \dots, n; \end{array}$$

Uma solução x é um vetor de n variáveis de decisão: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$. O último conjunto de restrições é chamado de limites variáveis, restringindo cada variável de decisão x_i para adotar um valor com um limite $x_i^{(L)}$ mais baixo e um $x_i^{(U)}$ mais alto. Esses limites constituem o espaço de variáveis de decisão D , ou simplesmente espaço de decisão.

Os problemas do mundo real são geralmente MOOP. O MOOP não apresenta apenas uma solução que atenda todos os objetivos, os algoritmos encontram várias soluções e quando uma solução é a melhor para um objetivo, ela pode não ser a melhor para outro. Várias soluções são encontradas em MOOP, e, dessas soluções, um subconjunto de soluções é selecionado, chamado de “soluções eficientes”, “soluções não-dominantes” ou “soluções da Fronteira de Pareto”. A Figura 2.7 mostra o espaço de decisão viável e as soluções da Fronteira de Pareto.

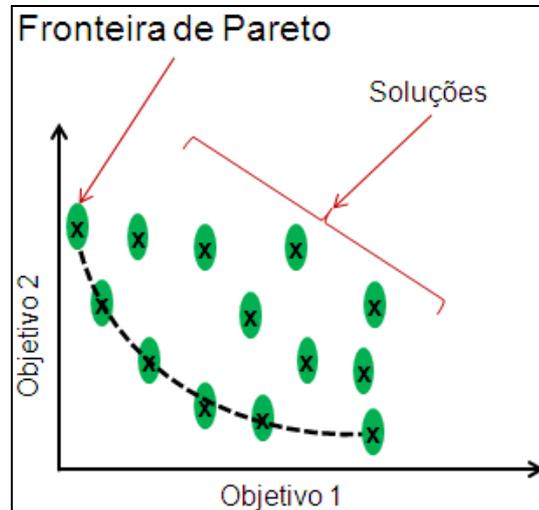


Figura 2.7. Soluções da Fronteira de Pareto.

Não se pode afirmar que uma solução da Fronteira de Pareto é melhor que outra, no entanto, também não existe outra solução melhor do que essa. Esse conceito é originado de Vilfredo Frederico Pareto (1848 – 1923), um economista italiano, no século XIX [PAR96]:

Quando há mais que um objetivo, a zona viável não pode ser completamente ordenada, mas somente parcialmente ordenada.

A principal diferença entre a otimização de objetivo único e MOOP é que a primeira retorna a melhor solução ótima para o objetivo, enquanto MOOP encontra várias soluções ótimas considerando os diversos objetivos. Portanto, é necessário um método de avaliação e seleção, o qual é chamado de “Tomador de Decisão” (em Inglês *decision-maker*) [DEB01, página 47] apropriado para o MOOP. O “Tomador de Decisão” deve implementar uma regra para classificar as soluções, pois todos os objetivos não podem simultaneamente chegar ao seu nível ótimo. Diferentes funções têm sido utilizadas, e são divididas em três principais classes:

a) Abordagem de Ponderação (*Weighted Sum*)

Essa abordagem converte o MOOP em um único objetivo para alcançar uma solução ótima. É eficiente e fácil de implementar, mas apropriada para lidar apenas com poucos objetivos e é incapaz de produzir certas porções da Fronteira de Pareto quando há espaços não-convexos na região de busca [COE02]. A teoria e problemas com essa abordagem são estudados em [DAS97], [MES96], [MES00] e [STE86].

b) Abordagem Lexicográfica (*Lexicography*)

Essa abordagem classifica os objetivos em ordem de importância. A solução ótima é, então, obtida minimizando as funções objetivo, começando com a mais importante e procedendo de acordo com a ordem assinalada de importância dos objetivos [COE01b]. Os autores em [CAS09] e em [CAS10] propõem uma abordagem lexicográfica dinâmica, na qual as prioridades dos objetivos não são fixas, mas são alteradas durante o processo de busca.

c) Abordagem de Pareto

A Abordagem de Pareto é uma técnica para encontrar as soluções na Fronteira de Pareto, conforme a Figura 2.8, com o conceito de dominância (classificação não dominada), no qual as soluções são ordenadas por critérios de dominância. Essa abordagem é estudada em [SRI94], [ZIT98] e [DEB00], e é definida por Deb em [DEB01] como:

Uma solução x^1 domina uma solução x^2 se:

- a) A solução x^1 não for pior que a solução x^2 em todos objetivos;
 - b) A solução x^1 é estritamente melhor que a solução x^2 no mínimo em um objetivo;
- Então, há três opções de dominância entre x^1 e x^2 :

$x^1 \succ x^2$: x^1 domina x^2 ;

$x^2 \succ x^1$: x^2 domina x^1 ;

$x^1 \sim x^2$: x^1 e x^2 são indiferentes.

Considere uma série de P soluções, o conjunto de soluções não-dominantes P' contém todas as soluções não-dominantes para nenhum elemento em P . Quando a série P é representada pela região viável, o conjunto de P' não-dominantes é chamado de Conjunto Ótimo de Pareto.

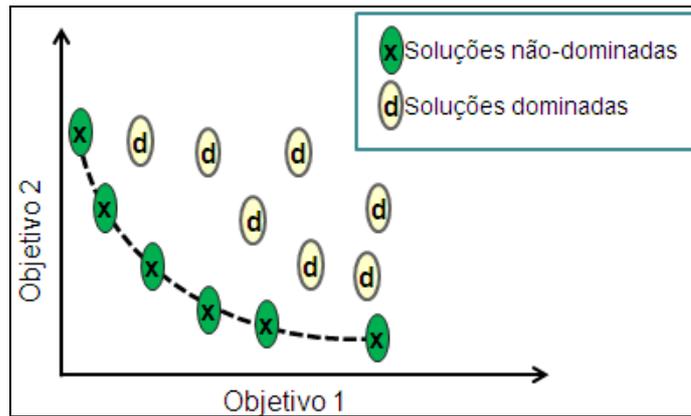


Figura 2.8. Disposição das soluções conforme a abordagem de Pareto.

Quando é necessário escolher uma solução ótima das soluções da Fronteira de Pareto, sendo as soluções geralmente incomparáveis, ocorre um problema estudado na literatura como *multiple attribute decision making* (MADM) [YOO95], e as principais dificuldades são:

- 1) Escolher a solução mais apropriada entre um conjunto de soluções;
- 2) Analisar a qualidade do objetivo entre vários objetivos.

O “Tomador de Decisão” pode ser classificado de acordo com os diferentes momentos do processo de otimização [BEN97], como é mostrado na Figura 2.9. Esses diferentes momentos de otimização são divididos em:

a) *A priori*

O método é envolvido antes da busca. Normalmente, a otimização de único objetivo visa a encontrar a melhor solução de acordo com o conjunto de preferências no “Tomador de Decisão”.

b) *A posteriori*

Do conjunto de soluções, o “Tomador de Decisão” decide a melhor solução ao final da busca.

c) *Interactive*

Nesse caso, o “Tomador de Decisão” está executando ao mesmo tempo em que o trabalho de otimização ocorre, aplicando suas preferências para gerar soluções ótimas de Pareto.

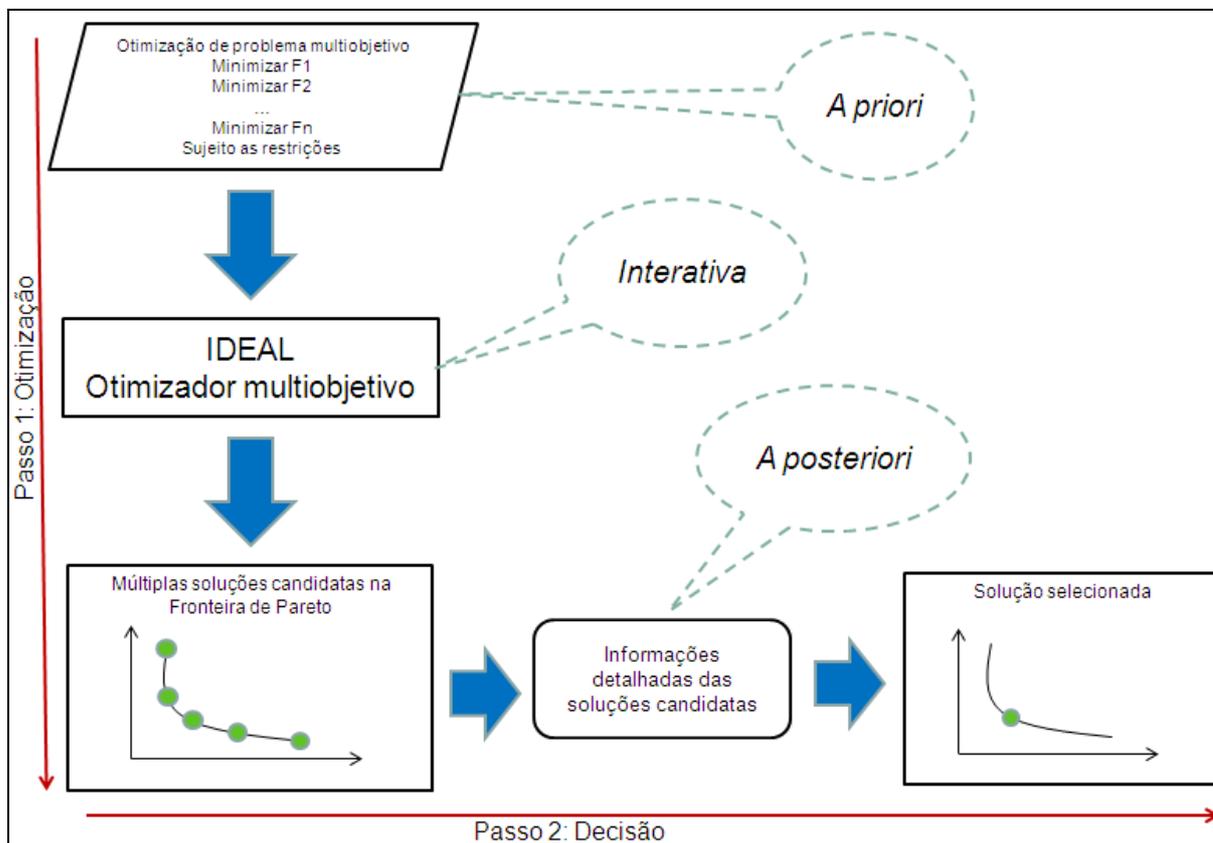


Figura 2.9. Diagrama do procedimento de otimização multiobjetivo. (adaptado de [DEB01])

2.4. Técnicas para problemas de único e multiobjetivo abordados nesta pesquisa

Para resolver problemas de único ou multiobjetivo, há técnicas na literatura que são agrupadas em áreas de estudo: heurísticas, meta-heurísticas, algoritmos de otimização de objetivo único e algoritmos de otimização multiobjetivo. Algumas dessas técnicas são utilizadas nesta pesquisa, sendo os algoritmos GA, PSO, NSGA-II e MOPSO apresentados com alguns detalhes e com as principais referências.

2.4.1. Heurísticas

As heurísticas são métodos para encontrar soluções, e, na computação, esses algoritmos estocásticos são desenvolvidos para encontrar soluções ótimas quando há restrições de tempo. A solução encontrada não é necessariamente a solução exata para o problema em análise. Geralmente, heurísticas são:

- a) Fáceis para entender e implantar;
- b) Rápidas, já que elas devem apresentar soluções em tempo polinomial;
- c) Flexíveis, já que elas podem ser aplicadas em vários tipos de problemas de otimização.

Exemplo de heurísticas: *hill-climbing*.

2.4.2. Meta-heurísticas

As meta-heurísticas avaliam um conjunto maior de soluções possíveis que as heurísticas, melhorando a convergência para soluções ótimas. Elas são uma evolução das heurísticas com o desenvolvimento de técnicas inteligentes, que são capazes de reduzir o espaço de busca, e, ao mesmo tempo, elas não permanecem restritas a um espaço ótimo.

Exemplos:

- Têmpera Simulada (*Simulated annealing* - SA);
- Busca Tabu (*Tabu Search* - TS);
- Busca Dispersa (*Scatter Search* - SS);
- Procedimento de Busca Adaptativa Gulosa e Aleatória (*Greed Randomized Adaptive Search Procedure* - GRASP);
- Religação de Caminhos (*Path-relinking*).

2.4.3. Algoritmos de Otimização de Objetivo Único

Algoritmos de otimização são técnicas utilizadas geralmente para simular o mundo real, como a biologia e sociedades inteligentes. Abaixo são apresentados resumidamente o algoritmo genético e o algoritmo de enxame de partículas.

a) Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm* - GA)

O GA é um método estocástico que simula o mecanismo da evolução de espécies naturais por meio da matemática. Foi inicialmente desenvolvido por John Holland, em 1975, e popularizadas por seu aluno David Edward Goldberg [GOL89]. O GA imita a evolução

natural que ocorre nos cromossomos, na qual as informações hereditárias são transmitidas para os descendentes através genes.

A Figura 2.10 mostra a evolução do cromossomo, e como é possível obter uma solução avaliando os cromossomos através da função de *fitness* nas iterações. Inicialmente, um conjunto de soluções aleatórias é gerado, que é conhecido como população inicial, e cada indivíduo é chamado de cromossomo, o qual é uma solução completa para o problema estudado. O cromossomo é representado por um vetor, no qual cada elemento é um gene. Esse vetor representa os componentes de uma solução, e ele pode ter codificação real ou binária.

Uma nova geração nasce com o processo de seleção, cruzamento e mutação, sendo que as melhores características do cromossomo tem maiores chance de “sobreviver” para as próximas gerações. Uma nova geração (filhos ou descendentes) é produzida combinando dois indivíduos pais. A Figura 2.10 apresenta a estrutura básica, entretanto, há muitas possibilidades de implementações de GA. A descrição completa do GA está elaborada em [GOL89], e outras abordagens e aplicações são listadas nas pesquisas apresentadas no Capítulo 3.

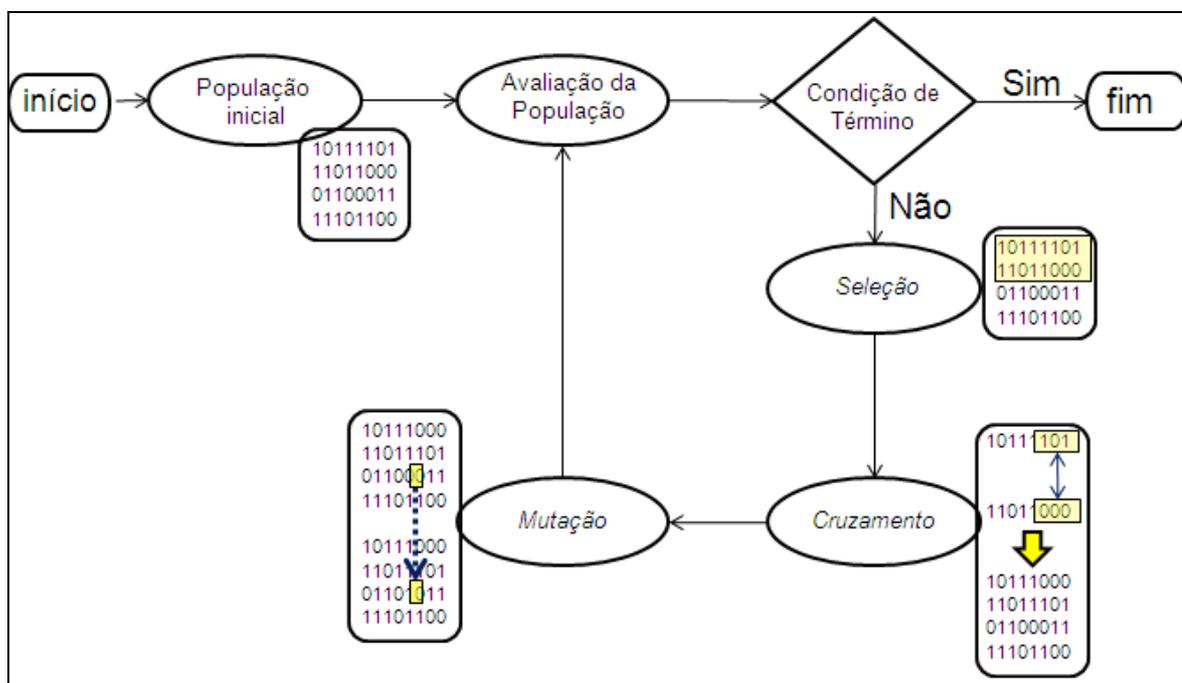


Figura 2.10. Fluxograma básico do GA.

b) Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*)

O PSO foi desenvolvido por Kennedy e Eberhart [KEN95], e é baseada no comportamento dos pássaros na busca de fontes de comida. Inicialmente, o algoritmo foi

proposto para problema contínuo e depois foi adaptado para problemas discretos [KEN01]. O PSO tem demonstrado desempenho melhor em problemas que tem espaço de busca contínuo [KEN99].

Para o PSO, o conjunto de soluções é o conjunto de partículas chamado de enxame (*swarm*), que é a população que se movimenta no espaço de busca dependendo da velocidade da partícula. Cada partícula representa uma solução e tem uma posição, a qual é atualizada por operadores que levam a partícula para um espaço de busca promissor. O movimento ocorre após um operador ajustar a velocidade da partícula, e a computação dessa velocidade é baseada em sua melhor vizinhança e em sua posição.

A Figura 2.11 mostra o fluxograma básico do PSO, no qual no primeiro passo é criado um conjunto de população inicial. Depois, as velocidades das partículas são atualizadas e a partícula é avaliada. O procedimento ocorre enquanto o critério de parada não é atendido.

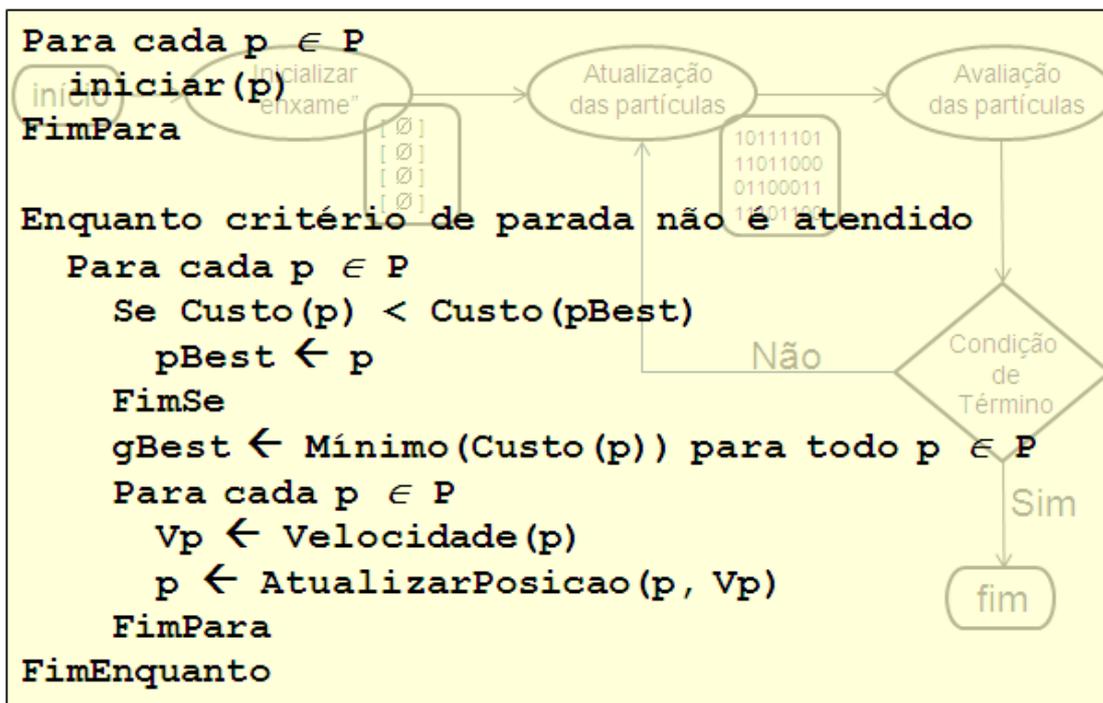


Figura 2.11. Algoritmo básico do PSO, onde 'P' representa um enxame e 'p' uma partícula.

2.4.4. Algoritmos de Otimização Multiobjetivos

Nos últimos anos, foram desenvolvidas várias adaptações dos algoritmos de objetivo único, criando novos algoritmos multiobjetivos, com intenção de:

- a) Procurar a convergência para a Fronteira de Pareto com uma busca eficiente no espaço de soluções;
- b) Procurar a maior diversidade possível, evitando a convergência prematura;
- c) Procurar uma distribuição uniforme de soluções de não-dominância.

O desenvolvimento de algoritmos multiobjetivo é classificado, de acordo com o autor em [DEB00], em:

- a) Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo Não Elitistas (*Non-Elitist Multi-objective Evolutionary Algorithms*);
- b) Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo Elitistas (*Elitist Multi-objective Evolutionary Algorithms*).

Essa classificação depende de um operador de elitismo que é intrínseca aos algoritmos de busca, o qual combina a população antiga com a última população criada, e mantém as melhores soluções da população combinada. O elitismo ocorre por meio da preservação das melhores soluções (não-dominadas) da população anterior em uma próxima população. Este procedimento assegura que a função de *fitness* da melhor solução na população não deteriore conforme a geração avança, porque o uso de pais selecionados aumenta a probabilidade de criar melhores descendentes. Os algoritmos de busca podem ou não implementar o elitismo, por exemplo, o GA converge para uma solução ótima global de algumas funções na presença do elitismo [RUD93].

Os algoritmos NSGA-II e MOPSO são originários dos algoritmos de objetivo único GA e PSO respectivamente, e são resumidamente descritos a seguir.

a) Algoritmo NSGA-II (*Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithms*)

O algoritmo NSGA-II é uma evolução do algoritmo NSGA, mas, apesar dos autores manterem o mesmo nome o algoritmo, não é similar ao antecessor. O NSGA-II é apresentado em [DEB00] para reduzir a complexidade computacional no classificador não-dominado e inserir o elitismo. Ele usa um mecanismo que garante maior extensão de busca no espaço, trazendo mais opções de soluções para alcançar a melhor possível naquele espaço.

Primeiro, a população pai (P_t), Figura 2.12a, é usada para criar uma população descendente (Q_t), e estas duas populações são combinadas para formar uma nova população (R_t) que tem tamanho $2N$. Depois deste primeiro passo, um classificador não-dominado ordena toda a população R_t , posteriormente, a nova população é preenchida com soluções de diferentes fronteiras não-dominadas, uma de cada vez, iniciando da primeira fronteira não-

dominada, depois as soluções da segunda fronteira, da terceira, e assim por diante. Usualmente, o tamanho das populações R_t , é $N/2$, entretanto, algumas “frentes” (F_1, F_2, F_3, \dots conforme Figura 2.12a) podem não ser acomodadas em N posições disponíveis para a nova população, então elas são eliminadas. Quando a última “frente” permitida estiver sendo considerada, pode haver mais soluções do que posições disponíveis na nova população. Neste caso, as soluções desta última “frente” devem ser sabiamente escolhidas, e, para este propósito, a estratégia *crowding distance* é usada, ela provê uma estimativa da densidade das soluções ao redor de uma solução i em particular da população (Figura 2.12b).

A maioria das boas soluções não-dominadas estão incluídas na nova população nos primeiros estágios do procedimento, portanto, as últimas soluções incluídas para preencher a população não têm grande impacto. Entretanto, durante os estágios finais, a maioria das soluções podem estar na melhor “frente” não-dominada, ou o número de soluções na primeira frente não-dominada pode exceder N . Neste momento, o *crowding distance* escolhe um conjunto diverso de soluções da “frente” em análise. Quando toda a população converge para a Fronteira Ótima de Pareto, o uso desse algoritmo garantirá uma melhor distribuição entre as soluções.

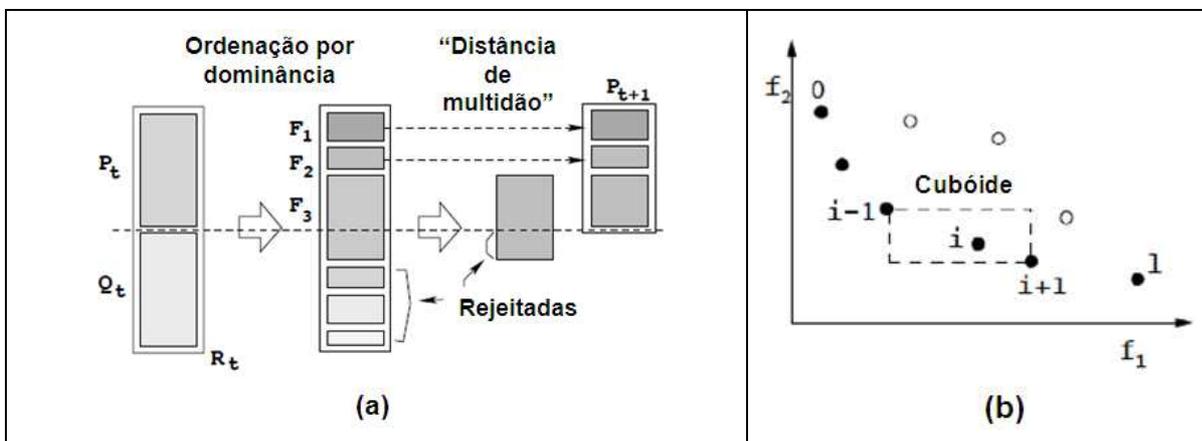


Figura 2.12. Diagrama (a) e *crowding distance* (b) do algoritmo NSGA-II. [DEB00]

b) Algoritmo MOPSO (*MultiObjective Particle Swarm Optimization*)

O algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas Multiobjetivo (MOPSO) é uma extensão do PSO e foi proposto por Moore e Chapman em [MOO99]. MOPSO otimiza simultaneamente um vetor de funções, representado por partículas, e produz soluções ótimas de Pareto. Ele consiste em inicializar a população, avaliação e iterações no “enxame” com os operadores do PSO e com o critério de dominância de Pareto. As partículas são avaliadas e

conferidas pela relação de dominância. As soluções não-dominadas encontradas são guardadas e usadas para guiar as partículas de busca. O esquema de MOPSO está na Figura 2.13.

As partículas mudam suas posições e se movem em direção à área onde as melhores soluções estão; e as soluções não-dominadas das últimas gerações são mantidas em *archive*. O *archive*, como na Figura 2.13, é uma população externa (ou repositório externo que funciona como uma técnica de elitismo), na qual as soluções não-dominadas são mantidas. Quando MOPSO é executado por várias iterações, é possível encontrar um amplo conjunto de soluções ótimas de Pareto.

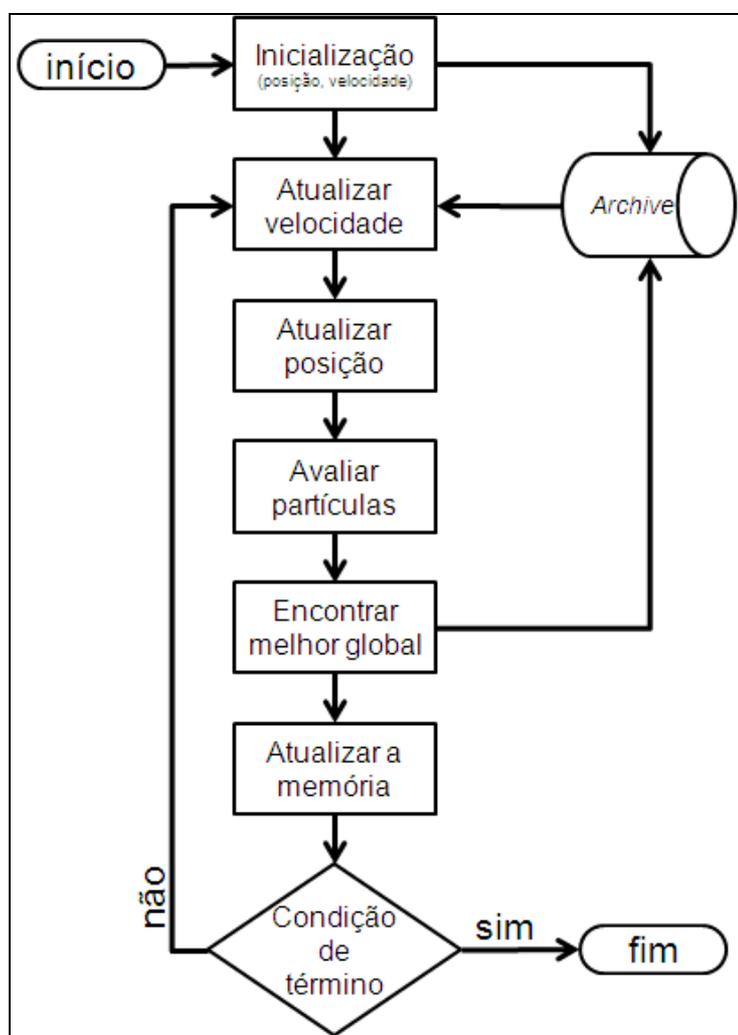


Figura 2.13. Fluxograma do MOPSO.

Considerações Finais do Capítulo

Há várias técnicas na literatura para solucionar problemas de objetivo único e problemas multiobjetivos. Algumas técnicas têm melhor desempenho para alguns problemas do que outras, e é necessário conhecer as características dessas técnicas para melhor utilizar o potencial de cada uma.

Os algoritmos GA, PSO, NSGA-II e MOPSO foram selecionados para os testes do novo algoritmo multinível proposto nesta pesquisa, já que eles representam as características da computação evolucionária e da inteligência coletiva atualmente, e são amplamente utilizados em problemas de redes.

Capítulo 3

Estado da Arte

Na literatura, o projeto de infraestrutura de redes pode ser considerado um caso especial de *Network Design Problem* (NDP), *Steiner Tree Problem* (STP) ou Problema das p-Medianas. As pesquisas desses problemas clássicos auxiliam no desenvolvimento de ferramentas para as indústrias de serviços públicos, como de redes de telecomunicações e redes de distribuição de energia.

Considerando que os problemas de planejamento de redes são estudados na literatura, como NDP, STP ou p-Mediana problema, esse capítulo apresenta as pesquisas relacionadas, com as respectivas abordagens e técnicas propostas para solucionar os problemas. As pesquisas são divididas em seções, sendo inicialmente apresentadas as de problemas de rede, seguindo-se uma revisão das principais técnicas utilizadas para solução desses problemas e, ao final, uma tabela resumindo o estado da arte.

3.1. Problemas de Projetos de Redes

Problemas em diferentes áreas da sociedade podem ser modelados como NDP, assim como projetos de estradas mostrados em [XIA08] e [ZHA08], projetos de ferrovias, em [MAR09], projetos de redes de água em [BOL10], e distribuição de energia, em [CAD10] e [SOU06].

Entre os diversos métodos propostos para resolver o NDP, Bolognesi *et al.*, em [BOL10], desenvolvem um algoritmo evolucionário chamado “*Genetic Heritage Evolution by Stochastic Transmission*” (GHEST). Este algoritmo introduz o conceito de transmissão genética que ocorre enquanto o processamento das gerações está em execução. Testes com

GHEST obtiveram um custo monetário 40% mais baixo comparado ao custo obtido com GA e com SA.

Os autores em [ZHA08] utilizam GA para resolver uma classe de NDP, o *continuous network design problem* (CNDP). Eles formatam um cromossomo do GA com valores de pontos flutuantes ao invés da tradicional representação binária. O trabalho apresenta o modelo do CNDP e os operadores genéticos (*crossover* e *mutation*) para o desenvolvimento de um algoritmo genético. Um estudo de caso em redes de estradas é utilizado para apresentar os resultados com o algoritmo genético desenvolvido, os quais expõem que a variação de parâmetros permite uma redução no custo final.

Na pesquisa realizada por [GAO09], um método para NDP aplicado à rede de tráfego público foi desenvolvido. Neste caso, as linhas de rede de tráfego público foram classificadas em três camadas, buscando uma solução que maximize o fluxo de tráfego integrando a rede. O método chamado de “*Hierarchy Method of choosing Optimum Lines for Public Traffic Network Design*” (HMCOL) é um modelo de programação multiobjetivo que analisa o tráfego em cada junção (cruzamento de estradas) e constrói uma rede com os três níveis propostos. O teste experimental em uma área urbana na Suíça mostra que, com esse método, é possível reduzir o tempo de troca de linhas dos passageiros, uma vez que essa técnica organiza o sistema de tráfego. O método trouxe resultados eficazes, demonstrando uma taxa de cobertura de linhas de 92,44%, ao passo que pesquisas anteriores alcançaram no máximo 87,55%. Esse trabalho aponta um resultado eficiente de um problema real modelado com NDP.

Em um estudo de caso de telecomunicação da companhia Telemig (Telecomunicações de Minas Gerais), a rede foi modelada como um NDP e os autores em [MAT00] propuseram uma solução para a rede secundária com Relaxação Lagrangeana. Nesse trabalho, a função objetivo é definida com uma restrição da quantidade de cabos de fibra óptica e com a fusão em cada nó. Os autores comentam que “as heurísticas são talvez a única metodologia prática para os problemas complexos de redes de telecomunicações”. A heurística proposta nesta pesquisa foi testada em duas redes reais, mostrando-se uma técnica promissora para ser empregada em projetos de redes.

Um estudo de caso de NDP de projetos de rede computacional, da Universidade de Gazi (Ankara/Turquia), foi usado para comparar GA, SA e *Hill climbing* em [ALT03]. A

conclusão foi que técnicas de otimização global, como GA e SA, obtêm melhores resultados quando comparadas com técnicas de otimização local, como *Hill climbing*.

Uma variação de NDP é o MNDP (*Multi-layer Network Design Problem*), que é aplicado em telecomunicações, em que cabos de fibras ópticas são divididos em n redes lógicas. Os autores Knippel e Lardeux em [KNI07] propõem uma formulação matemática para o MNDP sem as variáveis *flow* e *path*, na qual é utilizada uma função discreta baseada na capacidade de ligações entre os nós. A partir da formulação matemática, é desenvolvido um método para projetar redes virtuais que utilizam IP (*Internet Protocol*). Embora esse método aborde redes multicamadas, ele desenvolve uma solução na qual cada camada da rede virtual é otimizada individualmente. Os testes são executados em doze redes; no entanto, são redes de porte reduzido com, no máximo, 10 nós e 45 arestas. O tempo de computação para processar multicamadas é mais baixo quando comparado ao processamento da camada única.

Outra área de telecomunicações em que as pesquisas de NDP são aplicadas é a multiplexação de sinais. Os autores em [DOS95] e [DOS97] apresentam a ferramenta INDT (*Integrated Network Design Tools*) para auxiliar nos projetos de produtos e circuitos baseados na multiplexação de sinais, e esse programa pode ser expandido para implementar algoritmos de projetos de rede híbridas *ring/mesh*. A interface do usuário gráfica na INDT permite que os usuários entrem na base de dados com os dados da rede e as editem.

Para propor metodologias diferentes além da computação evolucionária com suas heurísticas estocásticas, os autores em [HER00] propõe o uso de métodos da Engenharia de Processos e Sistemas (EPS⁴). Esses métodos consideram o processo por meio de um modelo matemático, na tentativa de abstrair o aspecto mais importante e, então, reduzir a complexidade do problema. Os autores demonstraram como eles formularam, analisaram e solucionaram o projeto de uma infraestrutura de rede com os métodos empregados na Engenharia de Processos e Sistemas e na indústria de processos químicos.

Projetos de redes também podem ser modelados e estudados na literatura com o Projeto de Topologia de Redes (*Network Topology Design – NTD*). O uso dos métodos *branch-and-cut*, *clustering heuristic (CH)* e *limited discrepancy search (LDS)* é explorado em [BRU08], e o objetivo é integrar o custo do equipamento em um projeto topológico de redes

⁴ Os conceitos de EPS são revisados em [PER02].

de fibra óptica. Pesquisas mostraram melhores resultados com LDS, embora o método exija maior tempo de processamento quando comparado ao CH.

Um caso especial de NTD é o *shared risk link group (SRLG)*, em que vários canais de comunicação dependem de uma única fibra, portanto, se uma anomalia ocorre com a fibra, todas as dependências perdem comunicação. Os autores Wang e Chang em [WAN08] propuseram um modelo com GA para o SRLG com múltiplos objetivos (custo, confiança e capacidade) e com múltiplos critérios (confiabilidade, capacidade da rede e grau de ligação). O modelo identifica cada fibra como um gene em um cromossomo e computa a *fitness*, deste modo é possível encontrar soluções ótimas para qualquer tipo de restrição para problemas de objetivo único e multiobjetivo. Essa proposta é comparada com outras pesquisas que trabalham individualmente apenas com problemas de objetivo único **ou** multiobjetivo, mostrando-se mais eficiente devido ao seu trabalho com ambos os problemas, de único objetivo e de multiobjetivo.

3.2. Problema da Árvore de Steiner

Os projetos de telecomunicações podem ser modelados como STP. Para lidar com tais problemas, Chu *et al.* em [CHU99] usaram GA para identificar onde os equipamentos podem ser instalados na rede, e a função objetivo foi estimada com algoritmo Prim. Os resultados obtidos foram comparados com a heurística Busca Tabu (*Tabu Search –TS*), porém não apresentou valores relevantes entre as abordagens, considerando que GA gera uma solução de melhor qualidade, mas com um tempo computacional maior. Também utilizando GA, porém para VLSI (*very-large-scale integration*) modelado como STP, os autores em [ESB94] obtiveram melhores resultados com GA quando comparados com a abordagem EDNH (*Extended Distance Network Heuristic*) e EMPH (*Extended Minimum Cost Paths*). O GA apresentou soluções melhores para os problemas testados, no entanto, o tempo computacional é similar em todas as abordagens.

Os autores Huy e Nghia em [HUY08] propõem uma variação de GA, o algoritmo genético paralelo, no qual é usado um código binário com paralelismo, e a *fitness* é avaliada com DNH (*Distance Network Heuristic*). Nos testes com a base de testes da *OR-Library* [BEA10], foram observados melhores resultados quando comparados com PGS (*Parallel Genetic Algorithm for Steiner Problem*), GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search*

Procedure), EGA (*Enhanced Genetic Algorithm*) e PGRASP (*Parallel Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*).

Um caso especial de STP é o DST (*Dynamic Steiner Tree*), no qual um conjunto de nós de Steiner se modifica durante o processo. Para solucionar esse problema específico, o algoritmo OLGA (*Online Genetic Algorithm*) foi desenvolvido em [DIN00]. O OLGA foi executado com a base de testes da *OR-Library* [BEA10] e o desempenho apresentado foi melhor quando comparado com DNH (*Distance Network Heuristics*), SPH (*Shortest Path Heuristic*) e ADH (*Average Distance Heuristic*).

3.3. Problema das p-Medianas

O problema das p-Medianas consiste em localizar p pontos em um dado grafo, que é nomeado de medianas. Uma lista de problemas relacionados, que podem ser modelados como problemas das p-Medianas, é apresentada em [KAR79].

Os projetos de infraestrutura de telecomunicação também podem ser estudados como um problema das p-Medianas, e, na pesquisa [LOU04], é proposta a meta-heurística GRASP com paralelização para localizar os lugares onde os equipamentos de telecomunicação devem ser instalados. Os resultados mostraram que o GRASP paralelo retorna melhores soluções em um curto período de tempo quando comparado com as abordagens encontradas na literatura: VNS (*Variable Neighborhood Search*), VNDS (*Variable Neighborhood Decomposition Search*), LSH (*Lagrangean-Surrogate Heuristic*), CGLS (*Column Generation with Lagrangean/Surrogate Relaxation*) e HYBRID/HYB-SS (*hybridization of GRASP*).

A literatura traz muitos estudos do problema das p-Medianas e suas soluções, e, em [GHO08], o problema da p-Mediana capacitada é solucionada usando GA. É uma abordagem básica em que cada gene do cromossomo representa o índice de uma facilidade. Os resultados obtidos em [GHO08] mostram que GA é mais efetivo quando comparado ao conjunto de problemas proposto pelos autores em [OSM94].

Geralmente o GRASP é aplicado para problemas de objetivo único, porém, entre os trabalhos de multiobjetivo, os autores Ribeiro e Arroyo em [RIB08] propõem um novo método com otimização GRASP multiobjetivo para localizar facilidades. Além do método, é apresentada uma revisão do problema p-Medianas capacitado. Os resultados obtidos apresentam um ganho quando comparados às pesquisas anteriores com GRASP multiobjetivo, porém com um tempo de processamento maior.

Para problemas multiobjetivos de localização de facilidades, os autores Garcia et al. em [GAR11] apresentam a meta-heurística *Scatter Search* [GLO00] para fornecer um conjunto de soluções. No entanto, os resultados não são suficientes para verificar se a *Scatter Search* é apropriada para esse problema. Os autores em [LOR11] mostram um exemplo real de um problema modelado como problema das p-Medianas. Eles implementam uma abordagem da heurística Lagrangeana/surrogate na plataforma GIS: ArcGIS® da companhia ESRI, e na plataforma Spring® do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os testes computacionais foram realizados com dados da cidade de São José dos Campos, em São Paulo, e mostraram a viabilidade de usar as abordagens existentes com um modelo de problema clássico da literatura para desenvolver as aplicações comerciais.

3.4. Principais Técnicas Aplicadas a Projetos de Redes

O estudo dos problemas NDP, STP e a p-Mediana auxiliam o desenvolvimento de novas ferramentas para solucionar os problemas de redes e, nesta seção, são apresentadas algumas técnicas utilizadas. As técnicas são divididas em técnicas para problemas de objetivo único e técnicas para problemas multiobjetivo.

3.4.1. Técnicas para otimização de objetivo único

O PSO é utilizado por Papagianni *et al.* em [PAP08] para solucionar problemas de projetos de redes de comunicação com um nível, com o objetivo de encontrar as localizações e comprimento das arestas que ligam os nós da rede. Uma adaptação para o PSO para problemas de rede é o DPSO (*Discrete PSO*), e, em [ZHO08], um pré-processamento é usado e uma nova variável *de controle* é adicionada no algoritmo tradicional. Os testes com DPSO são executados com dados de testes da *OR-Library* [BEA10] e são apresentados resultados com melhores ganhos que os obtidos com SPH, ADH, DCH (*Directed Convergence Heuristic*) e GA.

O algoritmo de busca tabu (TS) é utilizado para resolver problemas de rede. Os autores Silva e Rodrigues em [SIL04] implementam o TS com técnicas de pré-processamento, e demonstram que esta abordagem reduz o tempo computacional. Os testes foram realizados com dados da base *OR-Library* [BEA10] e indicam a viabilidade da proposta. Ribeiro e Souza em [RIB00] resolvem o STP utilizando TS, no qual são implementados os movimentos *insert*

e *delete* para otimizar o algoritmo. A eficiência desta implementação foi confirmada com os testes na base de dados *OR-Library* [BEA10] e comparações com SPH.

A estrutura de diversificação de memória do TS é modificada em [XUJ95], aperfeiçoando o mecanismo de exploração, sendo que algumas estratégias são incorporadas, tais como: a) memória de longo prazo, b) seleções de movimentos probabilísticos, com avaliação de movimento, c) correção de erros, e d) estratégias de lista de candidatos. Isso melhora a busca no espaço de busca, o que é verificado por testes com uma base de dados construída pelos autores e comparado com outras abordagens de TS.

Na Tabela 3.1, encontra-se um resumo dos algoritmos e suas aplicações em projetos de redes.

Tabela 3.1. Resumo dos Trabalhos Relacionados.

Referência*	Problema	Abordagem/Métodos	Principal Contribuição
[ALT03]	Redes de Computadores	GA, SA and Hill climbing	Comparar o desempenho do <i>Hill climbing</i> , SA e GA nos problemas de projetos de redes de computadores.
[BOL10]	Projetar Redes de Distribuição de Água	Algoritmo Evolucionário GHEST	Um novo algoritmo evolucionário (GHEST) aplicado para solucionar redes de distribuição de água.
[BRU08]	Projeto de topologia de Redes.	Algoritmo <i>Branch-and-cut</i> , <i>Clustering Heuristic (CH)</i> , <i>Limited Discrepancy Search (LDS)</i> .	Avaliação dos algoritmos <i>branch-and-cut</i> , <i>CH</i> e <i>LDS</i> para solucionar problemas de projetos topológicos de redes de acesso.
[CAD10]	Distribuição de Energia Elétrica	MOGA	Um método proposto para solucionar a expansão ótima da rede de transmissão de energia com MOGA.
[CHU99]	Identificar os locais para os equipamentos na rede.	GA	Abordagem usando GA e uma comparação entre GA e TS.
[DIN00]	STP	GA	OLGA é uma variação do GA (online GA), para solucionar os problemas DST.
[DOS95] [DOS97]	Multiplexação de Sinais	Ferramenta de projeto de rede integrada em C++	Um conjunto de ferramentas desenvolvidas na linguagem C++.
[ESB94]	Projetar VLSI	GA	Uma proposta de GA para solucionar o STP, em um estudo de caso de VLSI.
[GAO09]	Rede de Tráfego Público	Modelo de Programação Multiobjetivo: HMCOL	Um novo algoritmo HMCOL para resolver problema de redes de tráfego em uma estrutura hierárquica.
[HER00]	Projeto de Redes	Engenharia de Processos e Sistemas (PSE)	Uma nova abordagem usando PSE no projeto de infraestrutura.
[HRI01]	Melhorar a velocidade de conexão em redes móveis	Protocolos de Internet	Uma revisão do estado da arte para projetar protocolos de redes para melhorar a velocidade em redes móveis.

[HUY08]	STP	GA Paralelo	O novo GA paralelo para solucionar o STP gráfico, e comparações com GA, GRASP, <i>Parallel</i> GRASP e com TS.
[KAM06]	Planejar Redes de Telecomunicações.	Revisão literária	Uma revisão dos Algoritmos Evolucionários aplicados para solucionar os problemas de projetos de telecomunicações.
[KHA97]	Planejar Redes de Distribuição de Energia.	Revisão literária	Uma revisão dos problemas de pesquisas relacionados ao planejamento de subestações e alimentadores de distribuição.
[KNI07]	Redes de telecomunicações lógicas	Formulação Matemática	Uma formulação matemática sem variáveis de fluxo ou variáveis de caminho, baseada em desigualdades métricas, e resolvendo o problema de dois níveis em dois passos.
[LOU04]	Problema da p-Mediana	GRASP	Uma paralelização da heurística GRASP para resolver o problema da p-Mediana.
[MAR09]	Projetos de Ferrovias	Modelo de formulação Matemática	Um modelo de formulação matemático para o problema de projetos de rede de ferrovias.
[MAT00]	Projetar Rede de Telecomunicação	Relaxação Lagrangeana	Uma heurística lagrangeana proposta para o NDP.
[PAP08]	Projeto de Rede de Comunicação	PSO	Análise da eficiência do PSO no projeto de infraestrutura de rede.
[RIB00]	STP	TS	Os movimentos <i>delete</i> e <i>insert</i> em TS para solucionar o STP.
[SIL04]	STP	TS	As técnicas de pré-processamento com TS para solucionar STP.
[SOU06]	Distribuição de Energia Elétrica	MOGA	Uma abordagem com multiobjetivo GA para determinar a configuração para uma rede de distribuição de energia.
[WAN08]	<i>Shared risk link group – fiber dependencies</i>	GA	Uma abordagem usando GA para solucionar o problema NTD com múltiplos objetivos e critérios.
[XIA08]	Projetos de Rodovias	Evolutionary Game Algorithm (EGA)	Um novo modelo de programação binível, e um novo algoritmo-EGA.
[XUJ95]	STP	TS	As modificações na memória de diversificação do TS para solucionar STP.
[ZHA08]	Projetos de Rodovias	GA	Uma revisão literária dos modelos de NDP com aplicação de GA.
[ZHO08]	STP em Grafos	PSO	Um PSO discreto para solucionar o STP em grafos; um algoritmo Prim's modificado para avaliar STP; e comparações com SPH, ADH, DCH e GA.

* Ordem da tabela.

3.4.2. Técnicas para otimização multiobjetivo

As otimizações de objetivo único são mais fáceis de implementar, mas, geralmente, os problemas reais possuem dois ou mais objetivos, e precisam de técnicas de otimização multiobjetivo. Hoje pesquisas sobre problemas de otimização multiobjetivo (MOOP) aumentam e mais estudos são publicados com este tema. Uma lista recente desses estudos publicados é encontrada em [COE11], e uma revisão das pesquisas na área de otimização multiobjetivo é listada nos trabalhos de [DEB01], [COE02] e [EIB03].

Além das técnicas para objetivo único, há estudos sobre problemas multiobjetivos em NDP. Por exemplo, o NSGA-II pode ser aplicado a um NDP, conforme demonstrado em [MOR09] em um trabalho para planejamento de expansão de redes de distribuição de energia, e em [SCH09] em um problema de rotas de veículos. NSGA-II é um algoritmo comumente usado e é observado em pesquisas recentes, como por exemplo, em:

- É comparado a outras abordagens:
[BIN10], [YAN09] e [LUN10];
- É usado para problemas multiobjetivos:
[MOR09], [SCH09] e [HAR09];
- Sua estrutura é adaptada a diferentes propostas:
[JIA10a], [JIA10b], [FER09] e [CAB10].

Outro algoritmo multiobjetivo é MOPSO, derivado do algoritmo PSO. Desde a primeira proposta em [MOO99], vários MOPSO diferentes têm sido reportados na literatura. Os autores em [COE04] propõe um MOPSO que utilize a dominância de Pareto para determinar a direção de voo de uma partícula. As soluções não-dominadas encontradas são guardadas em um *archive* global. Então, um operador de mutação é adaptado para gerar soluções dentro do alcance das variáveis de decisão que não foram previamente utilizadas. A proposta de [JON02] é um operador de “turbulência” e uma estrutura de dados conhecido como “árvore dominante”, que encontra as partículas não-dominadas através de um processo de busca. A pesquisa [MOS03] estudou a influência de uma forma relaxada da dominância de Pareto chamada de ε -dominance. Em [MOS04], é proposto um método chamado de *coveringMOPSO*, que funciona em dois estágios: a) ele opera com um arquivo de tamanho restrito para encontrar uma boa aproximação da Fronteira de Pareto; b) as soluções não-dominadas do estágio *a* são usadas como um arquivo de entrada do *coveringMOPSO*.

Os autores Li e Cao, em [LI03], incorporam os principais mecanismos do NSGA-II no MOPSO. Nessa proposta, depois de uma partícula ter atualizado sua posição, todas as posições *pbest* e as novas posições são combinadas em um conjunto e, posteriormente, as melhores soluções são selecionadas.

Nos últimos anos, vários estudos de algoritmos multiobjetivos foram desenvolvidos com algoritmos evolucionários e, na Tabela 3.2, é mostrada uma lista desses algoritmos, classificadas em grupos Não-Elitistas e Elitistas, de acordo com [DEB01].

Tabela 3.2. Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos.

Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos Não-Elitistas		
Nome	Acrônimo*	Referência
<i>Distributed Reinforcement Learning Approach</i>	DRLA	[MAR00]
<i>Distributed Sharing Genetic Algorithm</i>	DSGA	[HIR99]
<i>Multiple Objective Genetic Algorithm</i>	MOGA	[FON93]
<i>Multi-Objective Neural Evolutional Strategy System</i>	MONESSY	[KOP97]
<i>Nash Genetic Algorithm</i>	Nash GA	[SEF00]
<i>Niched Pareto Genetic Algorithm</i>	NPGA	[HOR94]
<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>	NSGA	[SRI94]
<i>Predator-Prey Evolution Strategy</i>	PPES	[LAU98]
<i>Random Weighted Genetic Algorithm</i>	RWGA	[MUR95]
<i>Vector Evaluated Genetic Algorithm</i>	VEGA	[SCH85]
<i>Vector Optimized Evolution Strategy</i>	VOES	[KUR91]
<i>Weight Based Genetic Algorithm</i>	WBGA	[HAJ92]
Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos Elitistas		
Nome	Acrônimo*	Referência
<i>Distance-Based Pareto Genetic Algorithm</i>	DBPGA	[OSY95]
<i>Multi-Objective Micro-Genetic Algorithm</i>	Micro-GA	[COE01]
<i>Multi-Objective Ant-Q</i>	MOAQ	[MAR99]
<i>Multi-Objective Messy Genetic Algorithm</i>	MOMGA-I / MOMGA-II	[VEL99]
<i>Multi-Objective Particle Swarm Optimization</i>	MOPSO	[MOO99]
<i>Multi-Objective Tabu Search</i>	MOTS	[HAN97]
<i>Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>	NSGA-II	[DEB00]
<i>Pareto-Archived Evolutionary Strategy</i>	PAES	[KNO99]
<i>Pareto Envelope-Base Selection Algorithm</i>	PESA-I	[COR00]
<i>Pareto Envelope-Base Selection Algorithm</i>	PESA-II	[COR01]
<i>Rudolph's Elitist Multi-Objective Evolutionary Algorithm</i>	REMOEA	[RUD01]
<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm 1</i>	SPEA	[ZIT98]
<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2</i>	SPEA2	[ZIT01]
<i>Thermodynamical Genetic Algorithm</i>	TGA	[KIT96]

* Coluna de ordem da tabela.

Uma revisão sobre MOOP é também realizada em [DEB01], e alguns algoritmos multiobjetivos são comparados em [ZIT99a] e [ZIT99b]: FFGA (Algoritmo Genético de Fonseca e Fleming), NPGA, HLGA (Algoritmo Genético de Hajela and Lin), VEGA, NSGA, SPEA e SOEA (Algoritmo Evolucionário de Objetivo Único).

Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou importantes trabalhos relacionados ao planejamento de redes disponíveis na literatura. Há outras revisões sobre problemas de telecomunicação que podem ser vistas em [KAM06], sobre mobilidade na infraestrutura de rede de Internet em [HRI01] e sobre distribuição de energia elétrica em [KHA97].

Como visto nas pesquisas e abordagens citadas, projetos de rede são importantes para a sociedade, e os estudos de problemas clássicos são aplicados em problemas do mundo real, como no caso de estudo de projetos de redes de telecomunicações.

É importante observar que a maioria das pesquisas e abordagens considera individualmente apenas um nível de rede do projeto, e falham em considerar níveis adjacentes na infraestrutura de projeto de rede. Quando vários níveis são considerados, eles são apenas processados individualmente, como em [ALF07].

Capítulo 4

Algoritmo Proposto

Este capítulo apresenta o novo algoritmo para solucionar problemas de infraestrutura de redes, independentemente do número de níveis, o qual pode ser aplicado para as variações de NDP, STP e das p-Mediana quando apresentam mais de um nível na rede. O algoritmo procura as soluções considerando todos os níveis da rede, considerando as informações dos níveis adjacentes, propondo uma solução otimizada do planejamento completo da rede.

O novo algoritmo propõe melhorar as abordagens anteriores na solução de planejamento de redes. Quando é utilizada uma abordagem que verifica cada nível de forma sequencial e única, obtêm-se um custo menor para os níveis, mas pode ocorrer que a solução final para todos os níveis da rede não seja otimizada. Esta situação é observada na Figura 4.1, na qual a solução individual do nível inicial para o processamento hierárquico é menor (Figura 4.1a), mas a solução final da rede é maior que o proposto pelo algoritmo iterativo (Figura 4.1b). A nova solução apresentada tem para o nível 2 um custo maior, mas reflete em uma solução final com custo menor, já que o nível 3 tem menos demandas a serem atendidas. Isto somente é possível quando o processamento ocorre de forma iterativa e o nível 2 é processado com informações de nós ascendentes (nós do nível 3), tal como é realizado pelo novo algoritmo proposto.

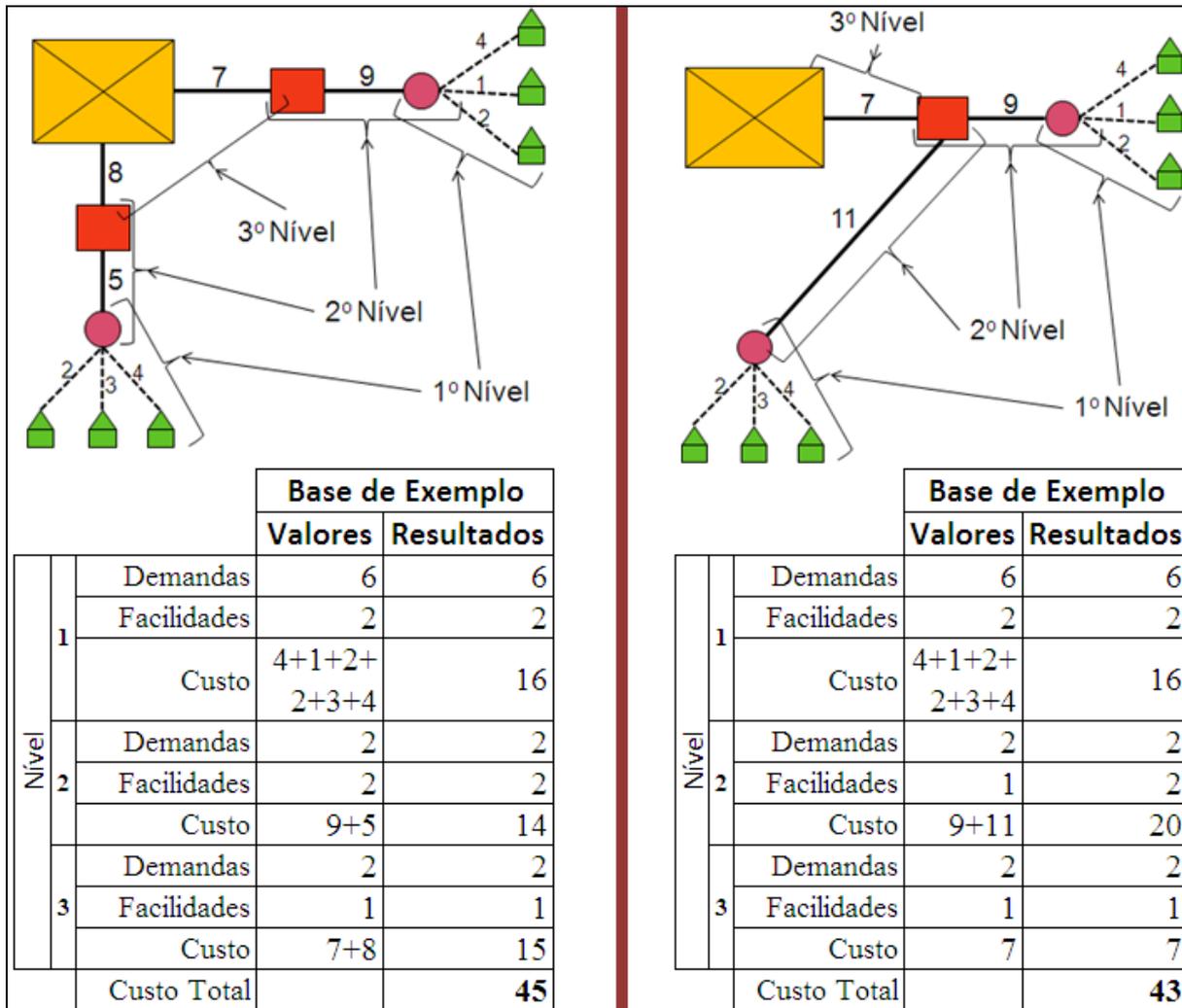


Figura 4.1. Diferenças de custo encontrado entre os métodos.

(a) Forma sequencial (b) Forma interativa.

A execução do algoritmo proposto é ilustrada na Figura 4.2 por meio de uma treliça, que representa as iterações entre os níveis da rede e exemplifica o processamento de 3 níveis. Primeiramente, é gerada a solução 1, sendo que as soluções no nível ℓ atendem as demandas do problema (os clientes), e, depois, é gerada uma solução A que atende os nós facilitadores da solução 1. Agora com os nós facilitadores na solução A (os quais são os nós ascendentes para o nível ℓ), o nível ℓ é processado novamente, gerando a solução 2, e assim por diante. Quando não for possível melhorar a solução para o primeiro bloco mais interno (nível ℓ e $\ell + 1$), o próximo bloco ($\ell + 1$ e $\ell + 2$) é processado com a mesma lógica do processo anterior.

Seguindo o exemplo na Figura 4.2, a solução ‘6’ no nível ℓ é a melhor solução para atender as demandas do problema. O próximo nível ($\ell + 1$) tem a melhor solução ‘J’ para

atender a solução '6'. Finalmente, o nível $\ell + 2$, tem a melhor solução 'V' para atender a solução 'J'.

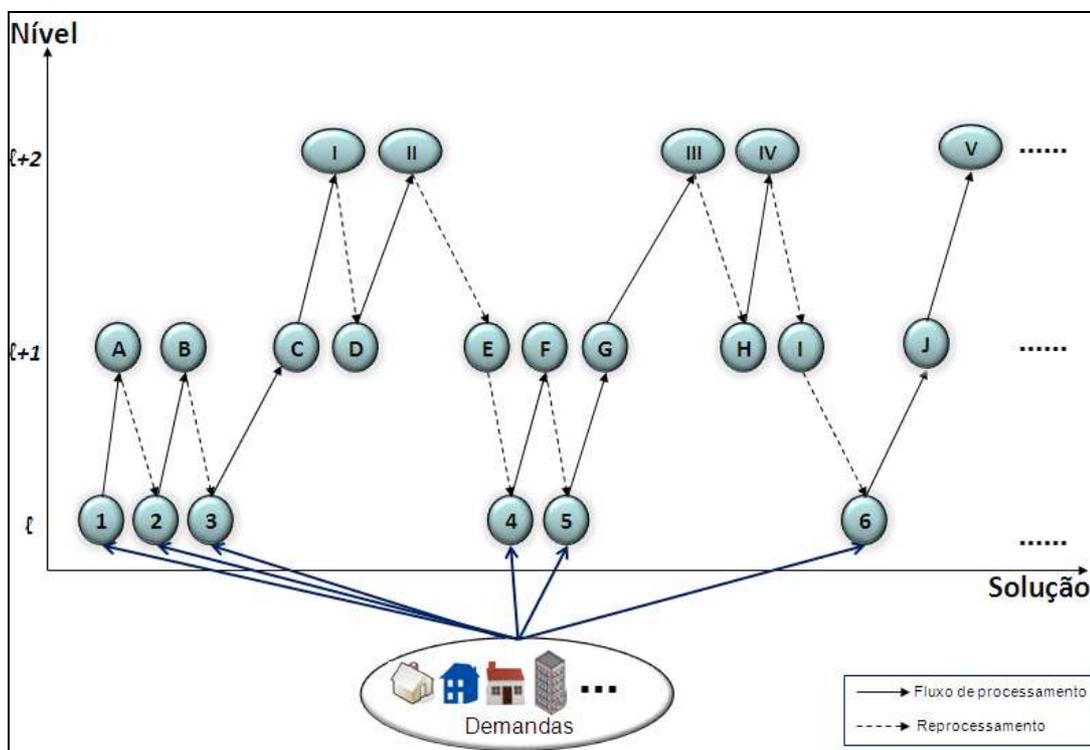


Figura 4.2. Treliça do MAND.

Este capítulo é dividido em duas seções: a Seção 4.1 mostra a formulação matemática utilizada para o desenvolvimento do novo algoritmo, e a Seção 4.2 apresenta a estrutura do Algoritmo Multinível para Projetos de Redes (*Multilevel Algorithm for Network Design - MAND*) e como ela é implementada.

4.1. Formulação do Problema

Esta seção apresenta a formulação matemática que representa o problema de infraestrutura de redes em vários níveis. A representação possibilita a interação de informações entre níveis adjacentes. As funções-objetivo apresentadas abaixo são utilizadas nos algoritmos de otimização auxiliares do MAND.

Variáveis:

ℓ : nível atual;

M_ℓ : conjunto de nós de demanda do nível $\ell^{\text{ésimo}}$;

N_ℓ : conjunto de nós facilitadores do nível $\ell^{\text{ésimo}}$;

E: conjunto de todas arestas possíveis;

A_ℓ : conjunto de nós ascendentes do nível $\ell^{\text{ésimo}}$;

x_{ij} : custo do trajeto entre a demanda $i^{\text{ésimo}}$ ao nó facilitador $j^{\text{ésimo}}$;

y_{ij} : custo do trajeto entre a facilidade $i^{\text{ésimo}}$ ao nó ascendente $j^{\text{ésimo}}$;

n_i : *status* binário do nó facilitador $i^{\text{ésimo}}$: (1-on, 0-off);

a_i : *status* binário do nó ascendente $i^{\text{ésimo}}$: (1-on, 0-off);

t_i : custo do nó facilitador $i^{\text{ésimo}}$ do nível $\ell^{\text{ésimo}}$;

c_i : custo do nó ascendente $i^{\text{ésimo}}$ do nível $\ell^{\text{ésimo}}$.

Funções Objetivo:

$$C_\ell = \text{MIN} \left(\sum_{i \in M} \sum_{j \in N} x_{ij} n_i + \sum_{i \in N} t_i n_i + \sum_{i \in N} \sum_{j \in A} y_{ij} a_i + \sum_{i \in N} c_i a_i \right) \quad (1)$$

$$F_\ell = \text{MAX} \sum_{i \in N} n_i \quad (2)$$

Restrições:

$$n_i \in \{0,1\} \quad i \in N \quad (3)$$

$$a_i \in \{0,1\} \quad i \in A \quad (4)$$

A equação (1) representa a função objetivo que minimiza o custo da construção do nível ℓ da rede. Essa equação é o custo de todos os nós ativados mais o custo do trajeto entre os nós de demanda e os nós facilitadores (soma das arestas). Quando há nós ascendentes, é computado o custo da conexão entre cada nó facilitador com o nó ascendente mais próximo. A equação (2) representa a função objetivo que maximiza o número de nós facilitadores no nível da rede, definindo a flexibilidade. A maximização do número de nós facilitadores procura uma solução com um maior número de equipamentos, que resulta em uma infraestrutura mais flexível, facilitando a expansão, ou seja, a ligação de novas demandas. As restrições (3) e (4) limitam que apenas os nós facilitadores (n_i) e ascendentes (a_i) ativos (quando o *status* é on) são considerados nos cálculos.

Dentro da matriz t e c , estão os custos monetários dos equipamentos correspondentes. Geralmente é considerado um custo proporcional dos equipamentos nos diferentes níveis da rede. O custo monetário dos equipamentos e cabos utilizados na construção dos níveis é progressivo, por exemplo para telecomunicações, na construção do primeiro nível (última-milha), os equipamentos de pontos de acesso têm custo menor que os equipamentos instalados em uma central de telecomunicações.

A relação entre o custo monetário da instalação de equipamentos e cabos define o número de equipamentos na solução. Se equipamentos de custo mais elevados são utilizados, então é viável fazer uso de menos equipamentos e construir mais trajetos, considerando que os cabos são mais acessíveis monetariamente. Na situação contrária, quando os cabos têm custos maiores, será, então, melhor considerar mais equipamentos na solução.

4.2. Algoritmo Multinível aplicado a Projetos de Redes (MAND)

O algoritmo proposto MAND auxilia o planejamento de projetos de infraestrutura de redes com três ou mais níveis. O algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo da implementação do MAND.

Com o MAND, os L níveis de uma rede são processados iterativamente, sendo que os resultados de um nível são utilizados no processamento dos níveis adjacentes. Os dados de entrada são os clientes a serem atendidos, representados pelo conjunto M , linha 1, que contém as demandas do primeiro nível. Esses dados são utilizados para processar o nível ℓ para encontrar um conjunto inicial de facilidades para atender os clientes (construir a última-milha). Inicialmente, além dos custos dos trajetos, a única informação usada para computar os custos é o valor associado com o conjunto de nós facilitadores associados com o nível ℓ . Em uma próxima iteração, quando o nível $\ell+1$ já foi processado, no mínimo, uma vez, é possível reavaliar as facilidades definidas para o nível ℓ , mas agora considerando o custo dos nós ascendentes, que são os nós facilitadores do nível $\ell+1$.

O algoritmo tem quatro blocos de repetição (laços) principais. O primeiro bloco “*while* $(\ell+1) < L$ ”, na linha 8, mais externa, é usado para controlar as iterações de todos os níveis no problema. O próximo bloco “*while* $got_improved[\ell] \text{ or } got_improved[\ell+1] \text{ or } got_improved[\ell+2]$ ”, na linha 9, é usado para controlar os três níveis iterativamente enquanto é possível encontrar melhores soluções. Os dois blocos mais internos processam dois níveis cada, e controlam suas iterações. O primeiro bloco mais interno executa os níveis ℓ e $\ell+1$ (linha 10), e o segundo bloco mais interno executa os níveis $\ell+2$ e $\ell+1$ (linha 26).

Em suma, no algoritmo proposto, há um primeiro controle de repetição que controla a quantidade de níveis da rede. No segundo controle, mais interno, é controlada a evolução dos três níveis em processamento. Os dois controles mais internos do algoritmo controlam dois níveis cada: o nível ℓ e $\ell+1$ no primeiro, e o nível $\ell+2$ e $\ell+1$ (novamente) no segundo

controle. Com estas interações de níveis, é possível utilizar as informações de nós ascendentes do nível em processamento.

Considerando as informações dos níveis ascendentes, é possível buscar melhores soluções considerando a interação entre os níveis adjacentes. Portanto, quando o nível atual é ℓ , é possível usar informações do nível $\ell+1$; se o nível atual for $\ell+1$, é possível utilizar informações do nível $\ell+2$, e assim por diante. Essa interação entre os níveis otimiza toda a infraestrutura de rede.

```

1  MAND ( M )
2  L: number of levels;
3  l: current level;
4  cost_level[L] = {max ,..., max};
5  got_improved[L] = {true, ..., true};
6  Begin
7    l = 1;
8    while ( (l+1) < L )
9      while (got_improved[l] or got_improved[l+1] or got_improved[l+2] )
10     while (got_improved[l] or got_improved[l+1])
11       cost = Level_Processing(l);
12       if (cost < cost_level[l]) then
13         cost_level[l]=cost;
14         got_improved[l]=True;
15       else
16         got_improved[l]=False;
17       endif
18       cost = Level_Processing(l+1);
19       if (cost < cost_level[l+1]) then
20         cost_level[l+1]=cost;
21         got_improved[l+1]=True;
22       else
23         got_improved[l+1]=False;
24       endif
25     endwhile
26     while (got_improved[l+2] or got_improved[l+1])
27       cost = Level_Processing(l+2);
28       if (cost < cost_level[l+2]) then
29         cost_level[l+2]=cost;
30         got_improved[l+2]=True;
31       else
32         got_improved[l+2]=False;
33       endif
34       cost = Level_Processing(l+1);
35       if (cost < cost_level[l+1]) then
36         cost_level[l+1]=cost;
37         got_improved[l+1]=True;
38       else
39         got_improved[l+1]=False;
40       endif
41     endwhile
42   endwhile
43   if (got_improved[l] and l > 1) then
44     l=l-1;
45   else
46     l=l+1;
47   endif
48 endwhile
49 return  $\sum$ cost_level[L];
50 end.

```

Algoritmo 1: Algoritmo Multinível aplicado a Projetos de Redes.⁵ [SIL11]

⁵ As variáveis utilizadas no algoritmo estão declaradas na formulação matemática.

O conjunto de nós ascendentes é somente conhecido após a primeira iteração dos níveis subsequentes. Na primeira iteração de um nível, uma solução é penalizada, pois ela não possui a informação sobre os nós facilitadores do nível subsequente, já que esta não foi executada até então.

Um vetor binário, como apresentado no diagrama da Figura 4.3, representa as soluções processadas pelos algoritmos de otimização. O vetor possui uma quantidade de posições definida conforme as opções de instalação de equipamentos, sendo que o dígito 1 representa os nós facilitadores utilizados, e o dígito 0 representa as posições descartadas. Esse processo encontra uma solução parcial para o projeto da rede, que é a solução do nível sendo processado.

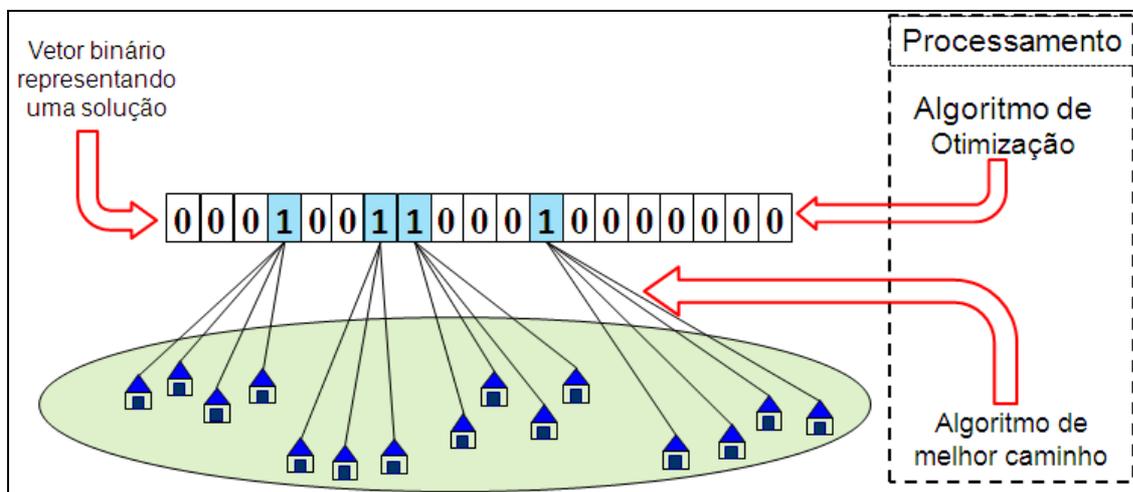


Figura 4.3. Representação de uma solução em um vetor.

Na Figura 4.4, é apresentado um exemplo, em que há duas soluções distintas representadas pelos respectivos vetores. No exemplo (a), o custo estimado é de 74,49 unidades monetárias, já o exemplo (b) tem um custo de 81,12 unidades monetárias. A diferença de custo é que, no exemplo (b), há um custo menor de ligações, pois há nós facilitadores mais próximos das demandas mas, em contrapartida, há mais nós facilitadores a serem instalados.

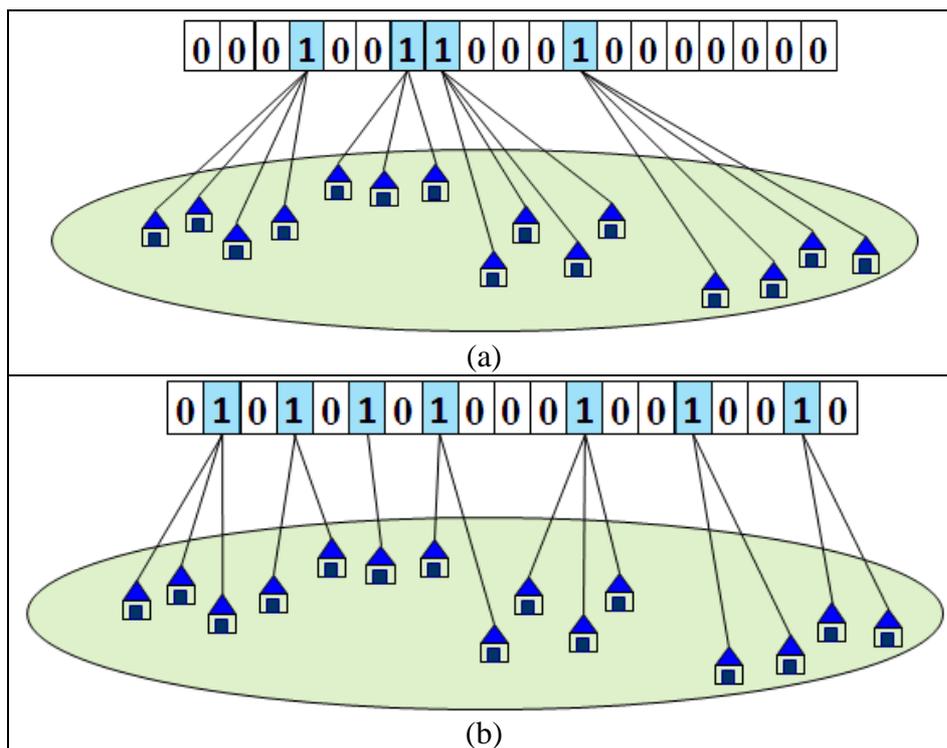


Figura 4.4. Exemplo de soluções. (a) exemplo 1 e (b) exemplo 2.

4.3. Processamento de um nível

Os níveis são processados de forma interativa no algoritmo, sendo que cada nível é processado em dois estágios: a) encontrar os nós facilitadores e b) encontrar as ligações necessárias da rede.

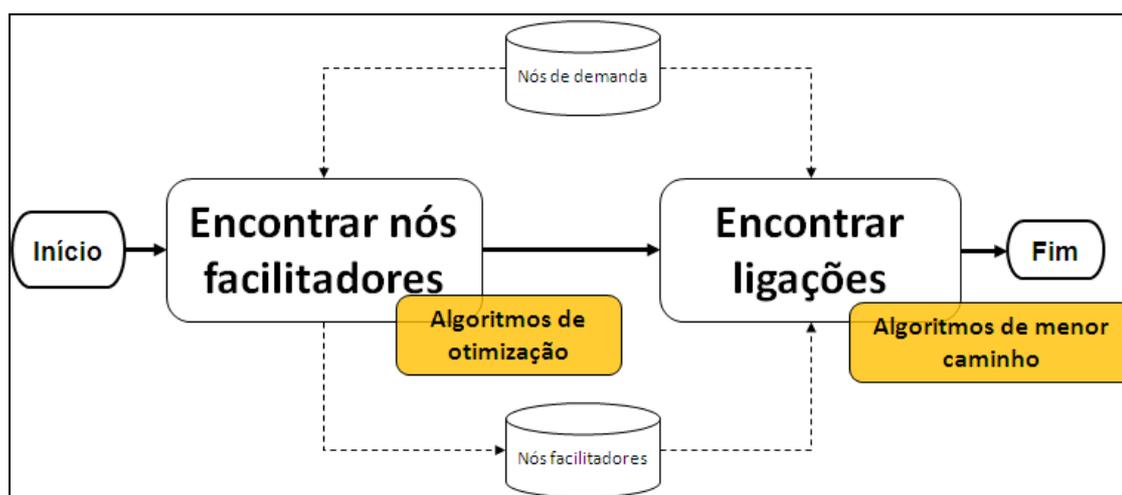


Figura 4.5. Resumo da otimização de um nível.

A Figura 4.5 mostra que, para encontrar nós facilitadores, é necessário conhecer quais nós de demanda devem ser atendidos, e um algoritmo de otimização é usado para esse

primeiro estágio. No próximo estágio, após conhecer os nós de demanda e os nós facilitadores, são necessárias as ligações, e esse processo é executado com um algoritmo de caminho mais curto (*shortest path algorithm*). A otimização de um nível é implementada no Algoritmo 2.

```

1   Level_Processing ( ℓ )
2       if (exist_level(ℓ+1)) then
3           A[ℓ] ← N[ℓ+1]
4           cost_level = Level_cost(ℓ, M, N, E, A)
5       return cost_level;
6   end.
```

Algoritmo 2: Procedimento do *Level_Processing*. [SIL11]

No algoritmo 2, o procedimento *Level_Processing*(ℓ) é executado para cada nível. Ele é responsável por buscar a quantidade e a localização geográfica de equipamentos e por definir o caminho entre os equipamentos, entre equipamentos e demandas, e equipamentos com nós ascendentes, se existirem. O algoritmo pode trabalhar com problemas de objetivo único e com problemas de multiobjetivo na função *Level_Processing*(ℓ). A função *Level_cost* implementa a formulação matemática para cálculo do custo da rede, conforme apresentado na seção “Formulação do Problema”.

4.3.1. Definição do caminho entre os nós

Para encontrar o melhor caminho entre os nós, é necessário um algoritmo de melhor caminho, tal como o Dijkstra[DIJ59], A* (A Estrela)[HAR68] ou o algoritmo Johnson [JOH77]. Nesta pesquisa, é utilizado o algoritmo de Dijkstra para definir o melhor caminho entre os nós.

É comum na literatura a utilização da distância Euclidiana, mas, como observado em [SIL10], em um problema com restrições geográficas, a utilização da distância Euclidiana como parâmetro de cálculo em uma função objetivo pode ocasionar distorções nos resultados. A opção de não utilizar a distância Euclidiana pode ser questionada pelo maior custo computacional do algoritmo Dijkstra, mas este custo pode ser amenizado com técnicas de linguagens de programação, como, por exemplo, utilização de ponteiros e referências para endereçar diretamente endereços de memória; uma estrutura de memória que seja capaz de guardar trajetos realizados, para que não seja necessário repetir duas vezes um mesmo cálculo de caminho.

4.3.2. Otimização de Objetivo Único

Para esse propósito, diferentes algoritmos de otimização podem ser utilizados, tais como GA ou PSO. O algoritmo de otimização utilizado em *Level_Processing* avalia a função objetivo (1) descrita na seção 4.1.

Para o controle da evolução do algoritmo, o procedimento *Level_Processing* recebe um valor do algoritmo de otimização utilizado, o qual é o custo da solução para aquele nível.

4.3.3. Otimização Multiobjetivo

No caso de problemas multiobjetivos, é utilizado como algoritmo de otimização auxiliar o NSGA-II e o MOPSO. Nessas situações, é utilizada também a função objetivo (2), a qual computa a quantidade de nós facilitadores na solução. Portanto, a função objetivo (1) minimiza o custo e a função objetivo (2) maximiza a flexibilidade.

Para o controle de evolução da solução, é utilizado um valor de referência⁶ (que pode ser o custo de um dos objetivos) informado pelo algoritmo de otimização multiobjetivo. A sugestão de implementação para utilização de um valor de referência é apresentada no Apêndice C.

Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo o algoritmo proposto MAND foi descrito em detalhes. O algoritmo trabalha com três blocos principais, Cada bloco mais interno processa dois níveis interativamente, e o bloco mais externo assegura que todos os níveis da rede sejam processados.

A estrutura do algoritmo garante a execução de todos os níveis da rede de forma interativa, retornando uma solução ótima para a rede completa.

A formulação matemática utilizada como função objetivo do algoritmo considera os nós adjacentes e as ligações entre os nós. O custo total é a soma dos nós ativados, mais a soma das ligações entre os nós de demanda com os nós facilitadores e a soma das ligações entre os nós facilitadores com os nós ascendentes.

⁶ O valor de referência pode ser, por exemplo, a menor média entre o custo do objetivo 1 com o objetivo 2 (se o problema tem dois objetivos), a qual pode ser retornada pelo “Tomador de Decisão” implementado de forma “a postiori”.

Os algoritmos de otimização selecionados para trabalhar com o MAND foram escolhidos por representarem as principais características existentes nas ferramentas disponíveis na literatura.

Capítulo 5

Resultados Experimentais

Para avaliação do novo algoritmo, foi executado um conjunto de experimentos, os quais são realizados sobre uma base de testes construída com informações geográficas a partir de um sistema SIG.

O processamento de cada nível da rede é dividido em dois estágios, e cada estágio utiliza diferentes algoritmos. Para o primeiro estágio, os seguintes algoritmos de otimização foram selecionados para definir os nós facilitadores: GA e PSO quando o problema foi tratado como de objetivo único; e NSGA-II e MOPSO quando o problema de infraestrutura foi tratado com multiobjetivos. Para a seleção dos algoritmos GA e PSO foram observados os algoritmos utilizados nas abordagens apresentadas na revisão da literatura, e que apresentaram resultados promissores nessas abordagens.

No segundo estágio, o algoritmo Dijkstra foi escolhido para definir os caminhos. Pois o algoritmo Dijkstra é o melhor algoritmo conhecido para busca de grafo na teoria e o mais robusto na prática [GOL96].

Para comparar o novo algoritmo, é utilizada uma abordagem do projeto da rede com um processo individual e único de cada nível (nível-a-nível) proposto em [ALF07], em que a solução final é construída com o processamento individual de cada nível, sem interações entre os níveis da rede.

O protocolo adotado para a avaliação do MAND é:

- Construção da base de dados de testes;
- Seleção dos algoritmos auxiliares para a definição dos nós;
- Seleção do algoritmo de melhor caminho;
- Processamento dos testes com a abordagem nível-a-nível;

- Exemplificar a construção da rede com ferramentas básicas, utilizando um dos conjuntos de testes;
- Processamento dos testes com o novo algoritmo.

Para realizar os testes e validar o MAND, várias simulações foram executadas utilizando a combinação dos algoritmos auxiliares e das bases de testes, comparando os resultados com o processamento nível-a-nível. Um exemplo do cálculo da função objetivo é mostrado na Figura 5.1, sendo que os valores de cada nível do projeto de rede (Figura 5.1a) são demonstrados na tabela de resultados na Figura 5.1b. Observa-se que a quantidade de facilitadores encontradas no nível 1 é a quantidade de demandas que devem ser atendidas no nível 2, e a quantidade de facilitadores do nível 2 é a quantidade de demandas do nível 3.

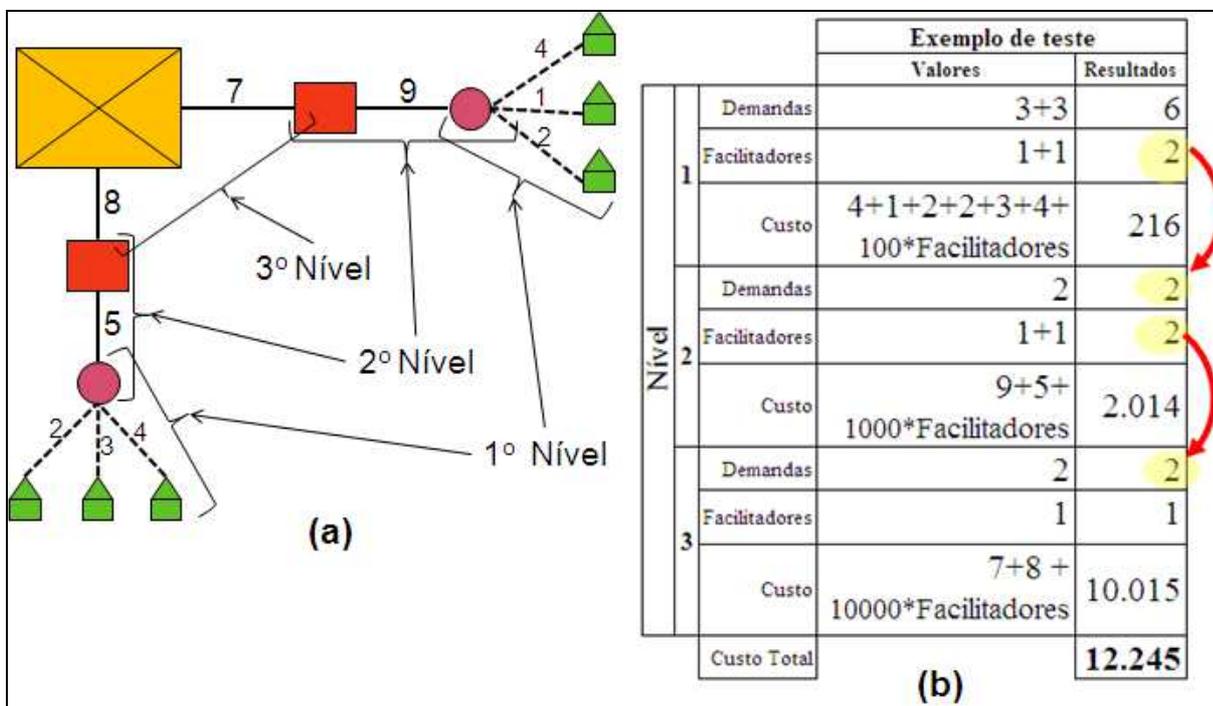


Figura 5.1. Exemplo de cálculos, sendo (a) o diagrama da rede e (b) valores de custo.

Para todos os algoritmos utilizados nos testes, os parâmetros foram obtidos com experimentos empíricos. Inicialmente, foram realizados os testes com valores de parâmetros obtidos nas pesquisas relacionadas no Capítulo 3, e, então, os valores dos parâmetros foram alterados para mais e para menos (“sintonizando”), até encontrar os valores que mostraram melhores resultados e desempenho.

Os códigos-fonte foram implementados na linguagem de programação C++, e os resultados relatados foram obtidos em um PC-Pentium Dual-Core E5300, 2.6 GHz com 2 Gbytes de memória, sistema operacional Ubuntu Linux versão 8.04.04.

5.1. Base de Dados para Testes

Não foi encontrada na literatura uma base de testes com dados geográficos, e com a melhor solução conhecida, então, foi necessário construir as bases de testes com as informações de locais geográficos das demandas a serem atendidas e informações dos possíveis locais geográficos para a instalação de equipamentos. A base de testes existente na literatura em [BEA10] não foi utilizada para os experimentos desta pesquisa, pois o conteúdo não apresenta as coordenadas geográficas com informações dos níveis adjacentes, e nem informações de vários níveis de planejamento de uma rede.

Para os testes de MAND, três exemplos geográficos foram construídos a partir de bairros distintos da cidade de Curitiba, Paraná, Brasil. As dimensões das bases de testes são apresentadas na Tabela 5.1. Estes diferentes conjuntos de dados são utilizados para testar o MAND em diferentes situações, avaliando-o nos resultados e no desempenho obtidos. As regiões selecionadas representam área e quantidade de informações de situações reais no planejamento de redes.

Tabela 5.1. Dimensão da Base de Dados de Testes.

	Demandas (clientes) a serem atendidos	Opções de Coordenadas	Área Aproximada
Base de Dados 1	50	390	2.1 km ²
Base de Dados 2	105	583	2.5 km ²
Base de Dados 3	405	1624	6.1 km ²

A Figura 5.2 mostra a cidade com os bairros selecionados e as demandas geograficamente localizadas. Nesta figura, é possível observar a abrangência geográfica dos testes e a utilização de dados que simulam um planejamento real de rede. As regiões selecionadas proporcionaram obter bases de dados similares a tamanhos reais para projetos de infraestrutura.

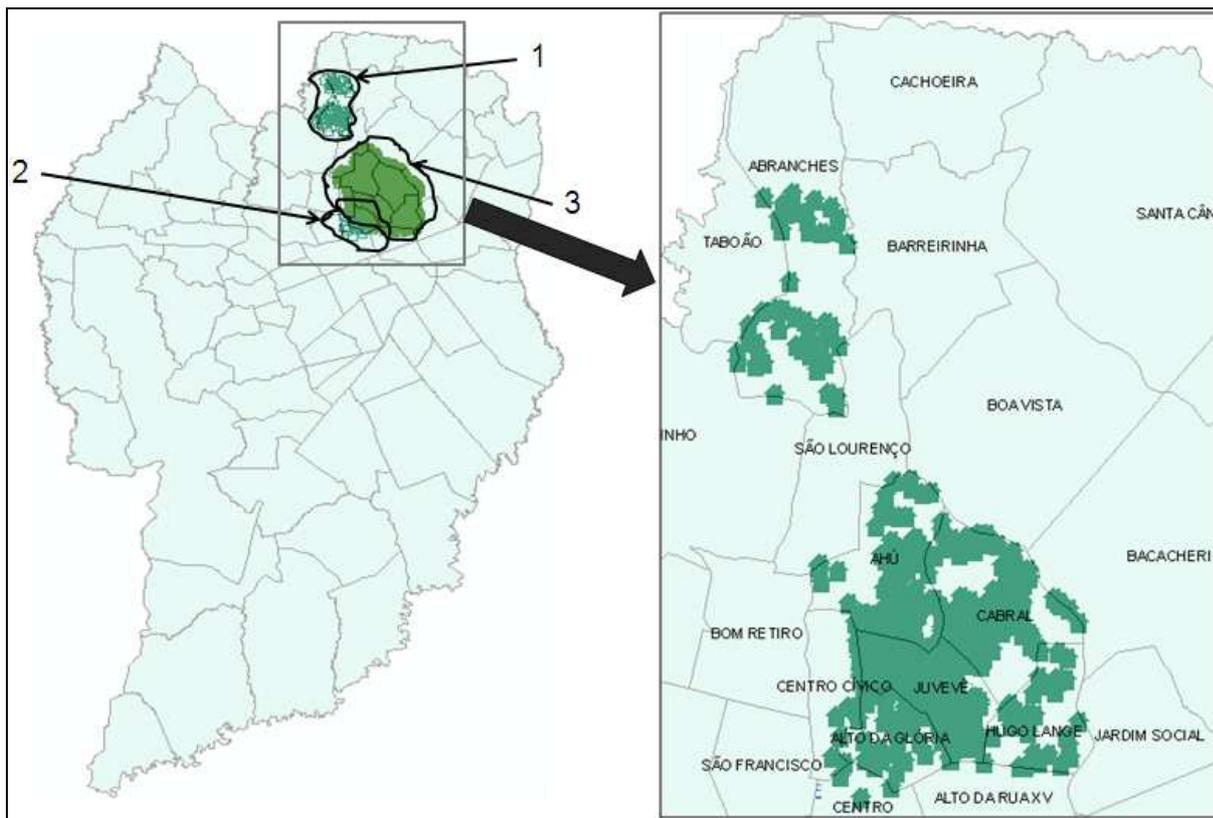


Figura 5.2. Localização geográfica da base de testes na cidade de Curitiba.

Para a construção de cada conjunto de dados, foi selecionado um polígono distinto, conforme visualizado na Figura 5.2. Esses polígonos representam um ou mais bairros da cidade. Para cada polígono, são selecionados pontos geográficos, em que é factível instalar equipamentos de telecomunicações; e são também selecionados os pontos de prospecção de clientes (nós de demandas), os quais devem ser atendidos por uma nova rede. Com estes pontos, foi elaborado um procedimento computacional, baseado em técnicas de geoprocessamento, para criar as arestas que interligam os pontos, considerando os arruamentos existentes na região.

Com essas bases de dados, é possível testar o algoritmo para múltiplos níveis no projeto de redes, como proposto nesta pesquisa. Elas simulam o mundo real da construção de infraestruturas das redes de fibra óptica em ruas urbanas. O conjunto de nós de demanda foi construído com as coordenadas geográficas dos locais onde clientes em potencial (demandas) estão. Essas coordenadas estão distribuídas em várias quadras dos bairros selecionados.

Os nós facilitadores foram definidos como pontos geográficos nas ruas, sendo as opções em que os equipamentos serão instalados. A solução é um subconjunto desses pontos, o qual é encontrado no processo de otimização.

Para a função objetivo, são calculados os valores de custo em unidades monetárias. O custo de instalação de um equipamento é considerado dez vezes maior que o do nível anterior (100, 1000, 10000, ...). Esta relação de valores é utilizada para manter uma compatibilidade com os valores aplicados na implantação de diferentes níveis da infraestrutura. A relação de valor utilizada para cada nível leva em consideração as diferenças de custos existentes entre os equipamentos.

Outro custo considerado na função é a distância do trajeto entre os equipamentos e entre equipamentos e clientes. Geralmente, o custo dessa distância é o custo monetário dos cabos utilizados mais o custo de instalação. Nas redes instaladas nos centros urbanos, esse custo é diferente para cada nível, pois se utilizam cabos diferentes. Para os experimentos, é considerada 1 unidade monetária para o primeiro nível, 2 unidades monetárias para o segundo nível, 3 unidades monetárias para o terceiro nível, e assim por diante.

5.2. Projeto da Rede com um Processo Individual de Cada Nível

A abordagem de processamento individual de cada nível é utilizada como parâmetro de comparação com o MAND. O processamento de cada nível individualmente é utilizado em [ALF07], em que é proposto utilizar o GA para projetar o *Multiprotocol-label Switching* (MPLS). O GA é utilizado separadamente em cada nível com diferentes funções-objetivo. Para esse processo, a rede é dividida em dois níveis: primeiro, o objetivo é encontrar os nós de acesso, e, posteriormente, encontrar *routers*.

Esse processo executa cada nível uma única vez e de forma individual e sequencial (processo individual). É executado uma vez para o primeiro nível, e, então, é processado uma vez para o segundo nível, e assim por diante. Na Figura 5.3, é possível visualizar que os nós facilitadores encontrados no primeiro nível são utilizados como nós de demanda no segundo nível, os nós facilitadores encontrados no segundo nível são utilizados no terceiro nível, e assim por diante. A rede completa encontrada na Figura 5.3 é um exemplo do resultado obtido por uma execução no processamento.

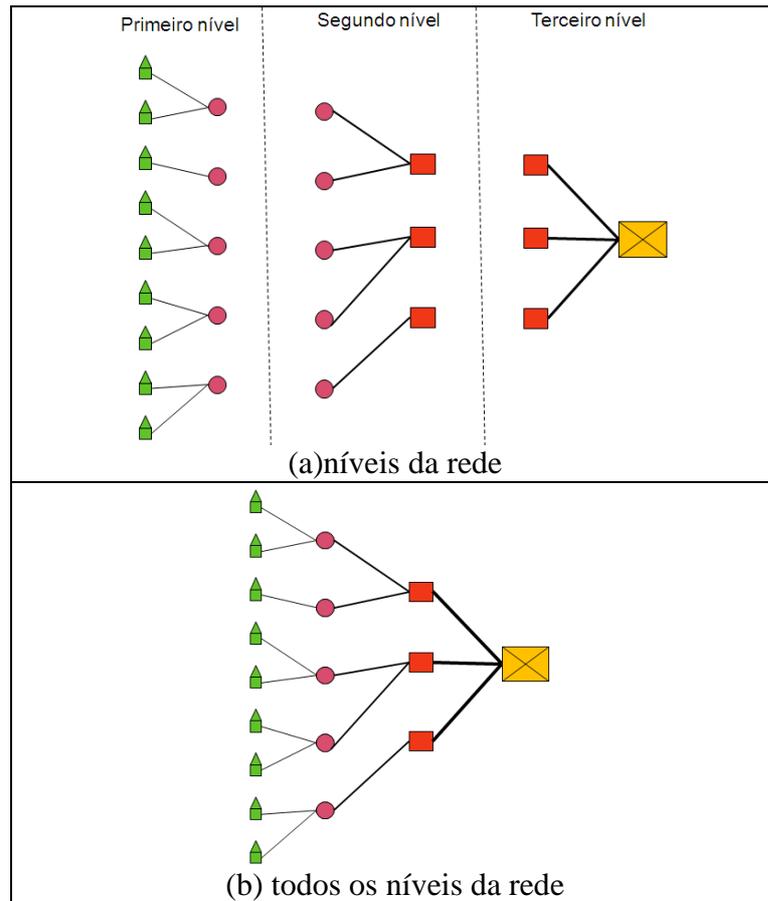


Figura 5.3. Exemplo de processamento individual, apresentando em (a) os níveis separadamente e em (b) todos os níveis.

5.3. Experimentos com Otimização de Objetivo Único

Para testar a resolução de problemas de objetivo único, o MAND pode utilizar um algoritmo auxiliar de otimização proposto na literatura. Para os testes, foram selecionados dois algoritmos para comparações: o GA e o PSO.

A implementação do GA é baseada em representação binária, e o código-fonte usado é adaptado do padrão original do Laboratório de Algoritmos Genéticos de Kanpur (KanGAL) [DEB10], e com os seguintes parâmetros:

- Comprimento do cromossomo: número de coordenadas geográficas⁷;
- Dimensão da População: 60;

⁷ Coordenadas geográficas são possíveis locais onde os nós facilitadores podem ser instalados.

- Gerações: 10000;
- Probabilidade de *crossover*: 0,95;
- Probabilidade de *mutation*: 0,001;
- *Sharing*: false;
- *Selection*: Seleção por torneio (*tournament selection*).

O código-fonte do PSO é adaptado do padrão original de Yuhui em [YUH11], no qual as partículas são baseadas em representação binária. Os parâmetros utilizados são:

- Dimensão: número de coordenadas geográficas;
- Iterações Máximas: 10000;
- Número de partículas: 60;
- Velocidade máxima: 10;
- Peso: 1,0;
- C_1 : 2,0 e C_2 : 2,0.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados de simulação em grupos de colunas, e os resultados com cada algoritmo auxiliar estão em divididos nas Tabelas 5.2a e 5.2b. O resultado representa a média de cinco execuções de cada algoritmo em cada base de dados, e, em cada nível, há somente o custo de nós facilitadores ativos e o custo do caminho dos nós de demandas ao seu respectivo nó facilitador.

Para cada algoritmo de otimização, há duas colunas: uma com resultados do MAND e outra com o processamento individual. Em cada coluna, há os resultados separados em linhas de cada nível. Cada nível tem três linhas: 1) a quantidade de demandas a serem atendidas; 2) a quantidade de facilidades encontradas para atender as demandas; e 3) o custo da solução em unidades monetárias.

As facilidades do primeiro nível são definidas como nós de demandas para o segundo nível; as facilidades do segundo nível são definidas como nós de demanda para o terceiro nível, e assim por diante. Após os resultados dos níveis, há duas linhas, sendo a primeira linha o custo total e a segunda linha o tempo consumido pelo processo. O tempo é obtido com o comando “*time*” no sistema operacional *Linux*, e é o total para planejar todos os níveis do experimento.

Tabela 5.2. Resultados dos Experimentos com Redes de Três Níveis.

(a) com o algoritmo GA e (b) com o algoritmo PSO.

		G A					
		Base 1		Base 2		Base 3	
		MAND	Processo individual	MAND	Processo individual	MAND	Processo individual
1	Demandas	50	50	105	105	405	405
	Facilidades	28	41	46	71	132	184
	Custo	8.273	7.265	13.968	12.175	52.619	47.373
2	Demandas	28	41	46	71	132	184
	Facilidades	6	9	10	16	81	118
	Custo	19.208	25.000	30.023	39.113	122.155	163.191
3	Demandas	6	9	10	16	81	118
	Facilidades	1	2	1	1	75	89
	Custo	24.769	32.588	29.535	42.561	788.608	945.602
Custo Total		52.250	64.854	73.526	93.849	963.382	1.156.166
Redução custo		19,43%		21,65%		16,67%	
Tempo em seg.		5.589	245	17.835	742	213.827	8.746

*o resultado é a média de 5 execuções.

(a)

		P S O					
		Base 1		Base 2		Base 3	
		MAND	Processo individual	MAND	Processo individual	MAND	Processo individual
1	Demandas	50	50	105	105	405	405
	Facilidades	14	40	23	71	67	176
	Custo	11.457	7.803	19.020	13.045	67.700	45.110
2	Demandas	14	40	23	71	67	176
	Facilidades	4	10	4	16	15	40
	Custo	14.902	25.331	19.809	39.287	54.641	101.138
3	Demandas	4	10	4	16	15	40
	Facilidades	1	2	1	1	3	6
	Custo	20.117	33.412	17.837	43.313	62.645	126.015
Custo Total		46.476	66.546	56.666	95.646	184.987	272.262
Redução custo		30,16%		40,75%		32,06%	
Tempo em seg.		5.326	606	13.922	1.575	136.583	14.487

(b)

Ao final da tabela, é apresentado o percentual “redução de custo”, a qual é a diferença de custo entre o MAND e o processo individual. Pode-se observar que o algoritmo proposto fornece uma redução de custo total significativa em cada experimento.

Todas as bases de dados foram testadas com o MAND utilizando os algoritmos de otimização de objetivo único: GA e PSO.

Apesar de ser comum as redes de telecomunicações terem três níveis de equipamentos, em algumas situações, como em PON, pode ser necessário planejar redes com mais níveis. Os experimentos e resultados obtidos com MAND para redes com cinco níveis são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Resultados de Experimentos com Redes de Cinco Níveis.

(a) com o algoritmo GA e (b) com o algoritmo PSO.

		GA					
		Base 1		Base 2		Base 3	
		MAND	Processo individual	MAND	Processo individual	MAND	Processo individual
1	Demandas	50	50	105	105	405	405
	Facilidades	24	41	46	71	126	184
	Custo	8.815	7.265	13.979	12.175	52.585	47.373
2	Demandas	24	41	46	71	126	184
	Facilidades	6	9	11	16	87	118
	Custo	17.565	25.000	27.397	39.113	123.459	163.191
3	Demandas	6	9	11	16	87	118
	Facilidades	1	2	1	1	75	89
	Custo	25.767	32.588	31.241	42.561	795.129	945.602
4	Demandas	1	2	1	1	75	89
	Facilidades	1	1	1	1	68	83
	Custo	100.328	107.450	100.141	100.156	6.854.629	8.358.646
5	Demandas	1	1	1	1	68	83
	Facilidades	1	1	1	1	68	74
	Custo	1.000.279	1.000.065	1.000.169	1.000.195	67.863.019	74.066.648
Custo Total		1.152.755	1.172.368	1.172.926	1.194.200	75.688.821	83.581.460
Redução custo		1,67%		1,78%		9,44%	
Tempo em seg.		7.339	752	26.328	803	390.967	8.768

*o resultado é a média de 5 execuções.

(a)

		P S O						
		Base 1		Base 2		Base 3		
		MAND	Processo individual	MAND	Processo individual	MAND	Processo individual	
Nível	1	Demandas	50	50	105	105	405	405
		Facilidades	20	40	23	71	64	174
		Custo	9.856	7.755	19.316	13.057	69.394	45.101
	2	Demandas	20	40	23	71	64	174
		Facilidades	6	10	6	16	16	41
		Custo	15.562	24.792	17.552	39.599	50.212	101.888
	3	Demandas	6	10	6	16	16	41
		Facilidades	1	2	1	2	3	6
		Custo	24.259	33.457	21.594	42.740	67.094	129.803
	4	Demandas	1	2	1	2	3	6
		Facilidades	1	1	1	1	2	2
		Custo	100.347	104.633	100.180	102.708	207.035	221.049
	5	Demandas	1	1	1	1	2	2
		Facilidades	1	1	1	1	2	2
		Custo	1.000.236	1.000.270	1.000.167	1.000.259	2.000.588	2.001.753
Custo Total		1.150.260	1.170.907	1.158.810	1.198.363	2.394.322	2.499.595	
Redução custo		1,76%		3,30%		4,21%		
Tempo em seg.		7.339	752	19.232	1.806	220.884	11.733	

(b)

Nos algoritmos de otimização utilizados, as melhores soluções para os primeiros níveis são encontradas com um número maior de gerações, isto porque existe um número maior de nós de demandas e nós ascendentes no processamento. As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam a média de iterações utilizadas em que a melhor solução foi encontrada no experimento 2. Pode ser observado que PSO encontrou as melhores soluções com menos que 1000 (um mil) gerações, enquanto GA precisa de, aproximadamente, 10000 (dez mil) gerações nos primeiros níveis.

Para verificar se há uma diferença significativa entre os valores de custos, obtidos com os algoritmos utilizados e apresentados na Tabela 5.3, foi realizada uma avaliação estatística utilizando o teste de Friedman [FRI37, FRI40]. O teste de Friedman aplicado nos resultados da Tabela 5.3 apresentou $p=0,0070$ para a base de testes 1; $p=0,0029$ para a base 2 e $p=0,0018$ para a base 3; sendo $p < 5\%$ para todas as bases demonstra que existem evidências de que os fatores utilizados nestes testes não são todos iguais.

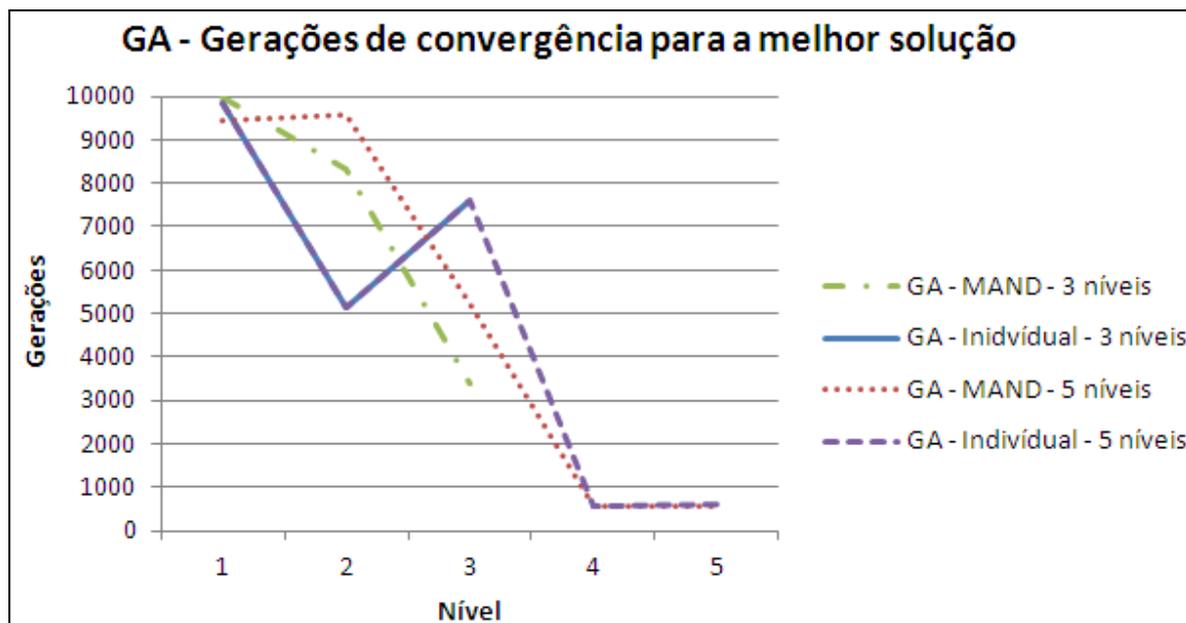


Figura 5.4. Gerações executadas com o GA.

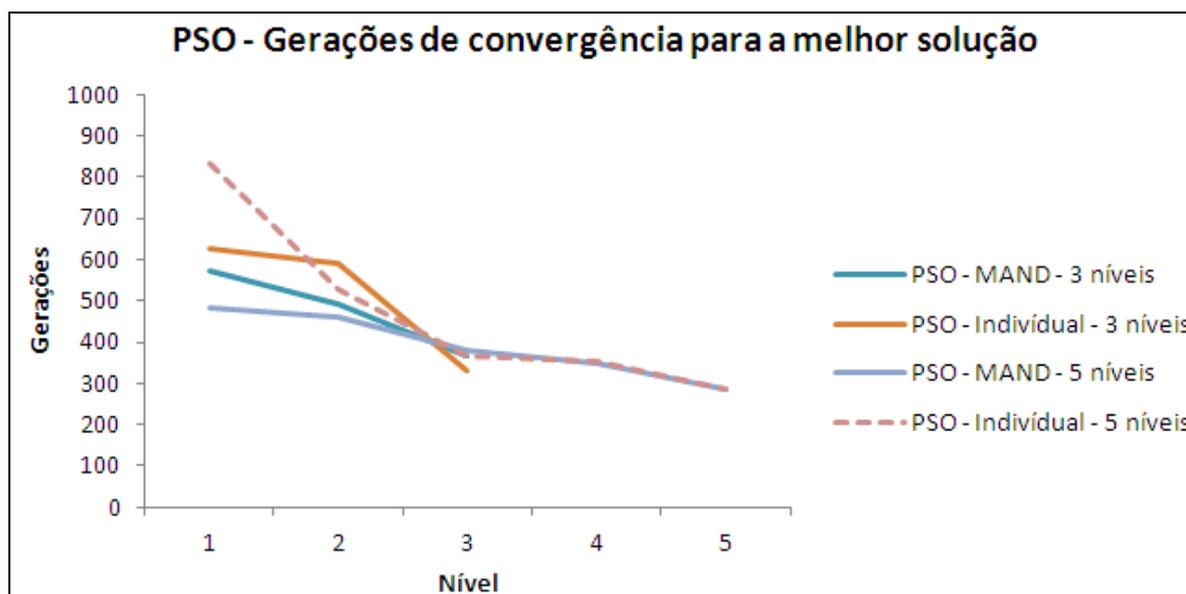


Figura 5.5. Gerações executadas com o PSO.

Observa-se também que o algoritmo proposto mostra um aumento significativo no consumo de tempo quando comparado com a estratégia em que cada nível é processado separadamente. A razão é que, no algoritmo proposto, alguns níveis são processados mais de uma vez, pois as informações dos níveis ascendentes são utilizadas nos níveis anteriores.

Outro fato sobre o aumento no tempo é que esses experimentos consideram a informação geográfica, e, para conectar cada nó, o algoritmo precisa processar o caminho viável entre os nós. Esses caminhos precisam ser conectados por meio de vias urbanas, onde, geralmente, as redes são construídas. Considerando o algoritmo de busca de grafo que é

empregado para encontrar esses caminhos, o MAND requer um maior tempo de processamento.

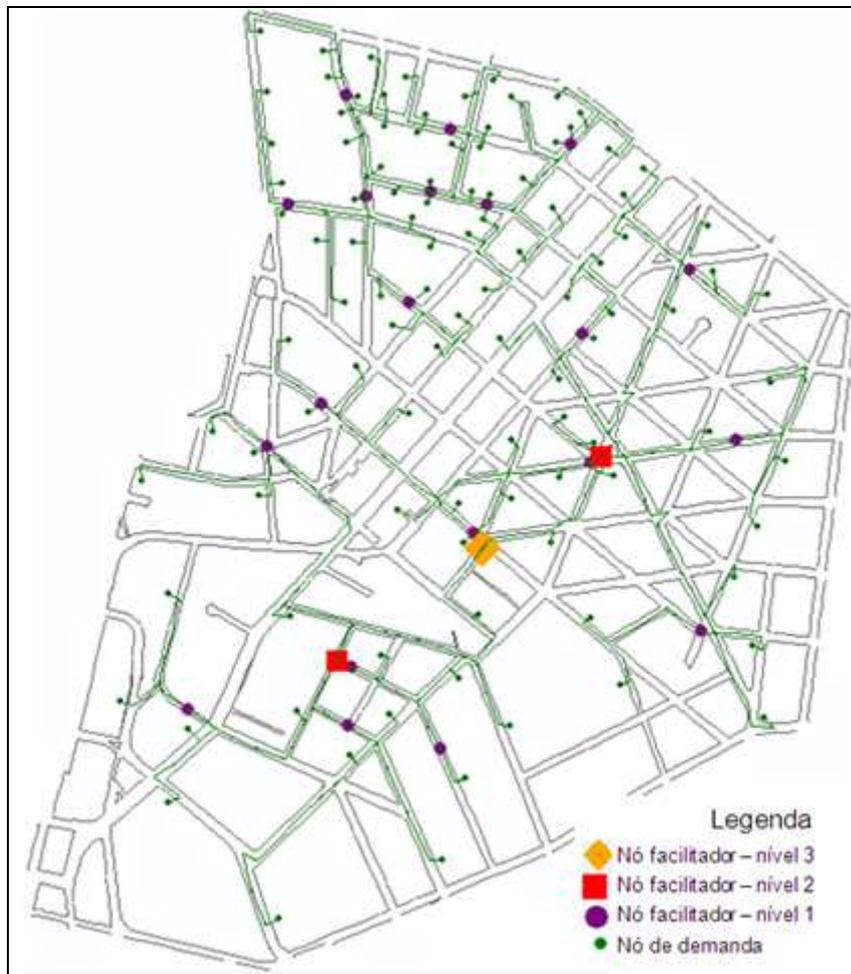


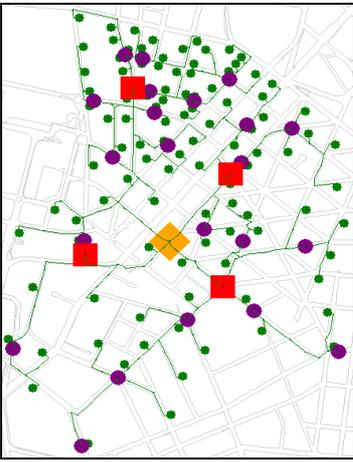
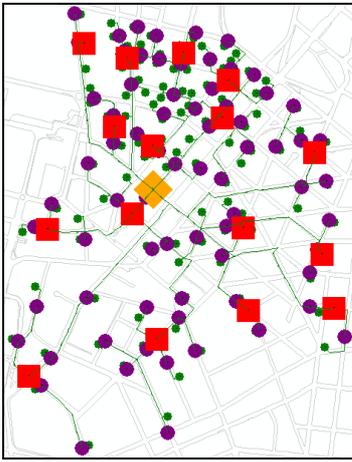
Figura 5.6 Exemplo de uma solução encontrada por MAND.

Uma das soluções fornecidas por MAND, para o conjunto de dados 2, é mostrada na Figura 5.6. Os nós facilitadores no nível um (círculos na cor roxa) atendem os clientes (círculos na cor verde). Os nós do nível um são atendidos pelos nós do segundo nível (quadrados na cor vermelha); e, finalmente, os nós do nível dois são atendidos pelo nó do terceiro nível (losango na cor alaranjada). Esse resultado atende o conjunto de nós de demanda, em que cada nível foi projetado considerando os níveis adjacentes.

Na Tabela 5.4, há uma comparação de um resultado gráfico entre o MAND e o “processamento individual”. É possível observar que o “processo individual” inicia-se com um custo menor no primeiro nível, pois há um número mais alto de nós facilitadores, reduzindo o caminho para demanda. Por outro lado, o número alto de nós facilitadores no

primeiro nível aumenta o custo nos níveis seguintes, pois esses nós facilitadores se tornam nós de demanda que devem ser atendidos.

Tabela 5.4. Comparação entre MAND e o Processamento Individual.

		MAND		Processamento Individual	
1	Demandas	105		105	
	Facilidades	23		72	
	Custo	19.291		13.013	
2	Demandas	23		72	
	Facilidades	4		16	
	Custo	19.149		39.533	
3	Demandas	4	16		
	Facilidades	1	1		
	Custo	15820	42.089		
Custo Total		54.260		94.635	

5.5. Experimentos com Otimização Multiobjetivo

Para testes de planejamento com problemas multiobjetivo, foram selecionados dois algoritmos auxiliares: NSGA-II e o MOPSO. A implementação do algoritmo NSGA-II foi adaptado do código-fonte de KanGAL [DEB10], e utilizados os seguintes parâmetros:

- Comprimento do cromossomo: número de coordenadas geográficas;
- Dimensão da População: 60;
- Gerações: 10000;
- Probabilidade de *crossover*: 0,95;
- Probabilidade de *mutation*: 0,001;
- Número de objetivos: 2⁸.

O código MOPSO foi adaptado de [PUL11] e utilizados os parâmetros:

- Dimensão: número de coordenadas geográficas;
- Iterações Máximas: 10000;
- Número de partículas: 60;
- Limite Inferior (*Lower bound*): -1,0;
- Limite Superior (*Upper bound*): 1,0;

⁸ Objetivo 1: Minimizar o custo; Objetivo 2: Maximizar a flexibilidade.

- Peso: 1,0;
- C_1 : 2,0 e C_2 : 2,0;
- Agrupamentos (*clusters*): 4;
- Número de objetivos: 2⁹.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos com o processamento de algoritmos multiobjetivo, sendo apresentado os resultados do algoritmo NSGA-II na Tabela 5.5a e do algoritmo MOPSO na Tabela 5.5b. Diferentemente dos resultados obtidos com algoritmos de objetivo único, os valores demonstrados na Tabela 5.5 têm soluções com um custo final maior para a rede completa. Isto é reflexo da utilização de dois objetivos: a minimização do custo e a maximização da flexibilidade, com isto, o algoritmo converge para uma solução que contém mais nós facilitadores, aumentando o custo final da solução com o custo da instalação de mais equipamentos no planejamento.

Tabela 5.5. Resultados dos Experimentos com Algoritmos Multiobjetivo.
(a) com o algoritmo NSGA-II e (b) com o algoritmo MOPSO

		NSGA - II					
		Base 1		Base 2		Base 3	
		MAND	Processo individual	MAND	Processo individual	MAND	Processo individual
1	Demandas	50	50	105	105	405	405
	Facilidades	23	35	63	67	159	162
	Custo	10.645	9.775	17.093	16.925	62.998	64.291
2	Demandas	23	35	63	67	159	162
	Facilidades	15	17	34	51	133	132
	Custo	25.015	29.384	52.447	63.613	166.840	165.744
3	Demandas	15	17	34	51	133	132
	Facilidades	12	14	26	44	114	109
	Custo	126.035	147.918	274.462	453.814	1.180.463	1.136.172
Custo Total		161.694	187.077	344.003	534.351	1.410.301	1.366.207
Redução custo		13,57%		35,62%		-3,23%	
Tempo em seg.		5.998	314	14.310	619	98.537	5.031

*o resultado é a média de 5 execuções.

(a)

⁹ Idem nota de rodapé 8.

		M O P S O					
		Base 1		Base 2		Base 3	
		MAND	Processo individual	MAND	Processo individual	MAND	Processo individual
1	Demandas	50	50	105	105	405	405
	Facilidades	39	39	84	88	134	132
	Custo	8.886	9.101	15.452	15.245	53.729	53.807
2	Demandas	39	39	50	88	81	132
	Facilidades	34	34	64	67	101	101
	Custo	41.056	41.186	76.454	80.197	126.625	126.745
3	Demandas	34	34	38	67	61	101
	Facilidades	30	32	57	57	93	93
	Custo	309.880	323.969	581.487	586.590	950.885	956.137
Custo Total		359.822	374.256	673.393	682.032	1.131.239	1.136.689
Redução custo		3,86%		1,27%		0,48%	
Tempo em seg.		21.622	1.646	17.111	2.653	286.445	31.124

(b)

Quanto é utilizado o MAND, para problemas com objetivo único, o custo da melhor solução é retornada pelo algoritmo auxiliar e é avaliada enquanto as iterações ocorrem. Com o algoritmo de objetivo único, é possível utilizar o custo da solução para a avaliação, mas, com o algoritmo multiobjetivo, é necessário selecionar uma solução da Fronteira de Pareto. Para simplificar o processo nesses testes, a solução selecionada da Fronteira de Pareto é a solução com o melhor custo, mas com a tendência do algoritmo propor soluções com uma quantidade maior de nós facilitadores. Observa-se que, para o MAND, o algoritmo utilizado para selecionar uma solução na Fronteira de Pareto não tem impacto no desenvolvimento do novo algoritmo, já que, nesses casos, a implementação do “Tomador de Decisão” deve retornar um “valor de referência” para ser avaliado pelo MAND.

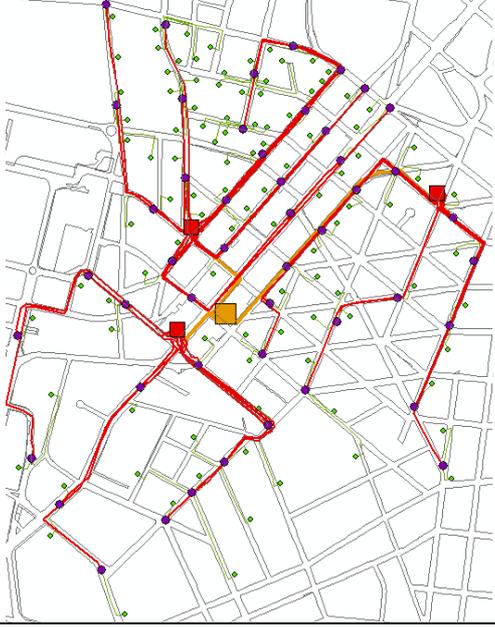
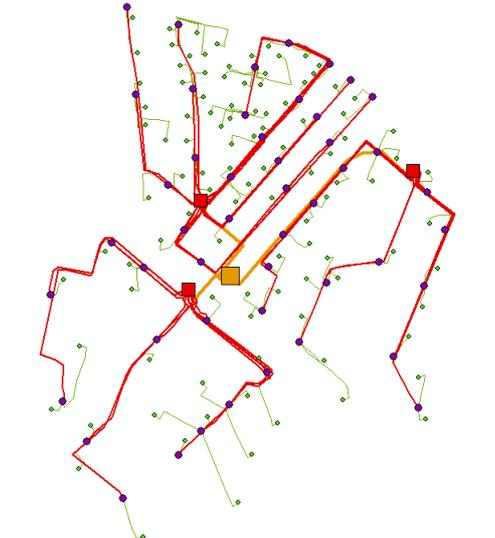
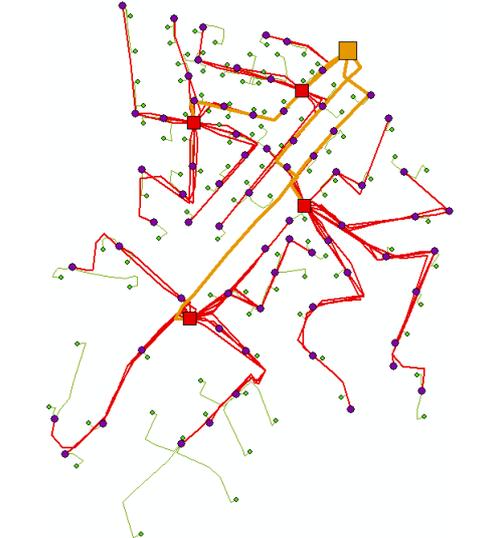
5.6. Projetando Infraestrutura de Rede com Ferramentas Básicas

Para solucionar o NDP, é possível que um engenheiro desenhe a solução com ferramentas básicas, como um lápis e mapas impressos, ou auxiliado por um *software* CAD. Entretanto, esses meios requerem um tempo maior comparado ao MAND, e o engenheiro não consegue verificar os vários cenários e avaliar todos os projetos (para cada nível) após cada mudança nos pontos geográficos.

O tempo necessário para um engenheiro projetar a mesma rede da base de dados 2, auxiliado apenas por um *software* CAD e mapas, pode levar de horas a dias¹⁰, isso depende da experiência do profissional e de quantos cenários serão projetados e avaliados. Além disso, deve ser considerado que, para um engenheiro projetar uma rede manualmente, é difícil analisar os cenários diferentes e calcular o custo de cada mudança no projeto. A Tabela 5.6 mostra os resultados de um projeto de infraestrutura de redes desenhado por dois projetistas distintos para a base de dados 2.

¹⁰ Informação obtida por meio de entrevistas com engenheiros.

Tabela 5.6. Comparação de resultados obtidos pelo desenvolvimento de dois projetistas utilizando ferramentas básicas.

Projetista 1				Projetista 2			
							
							
1	Demandas	105		1	Demandas	105	
	Facilidades	48			Facilidades	70	
	Custo	17.231,63			Custo	17.036,79	
2	Demandas	48		2	Demandas	70	
	Facilidades	3			Facilidades	4	
	Custo	59.781,68			Custo	61.494,02	
3	Demandas	3		3	Demandas	4	
	Facilidades	1			Facilidades	1	
	Custo	14.737,03			Custo	19.093,20	
Custo Total		91.750,34		Custo Total		97.624,20	
Tempo Aproximado		8 horas		Tempo Aproximado		8 horas	

*A legenda adotada é a mesma adotada nas figuras anteriores.

5.7. Discussão

A coleção dos conjuntos de dados para testes em problemas de redes, apresentada em [BEA10], não foi suficiente para esta pesquisa, portanto, novos conjuntos de dados foram construídos com informações geográficas e com uma nova estrutura. As três bases de dados, em regiões geográficas distintas e similares a projetos reais, demonstram a utilidade do novo algoritmo para o planejamento de infraestrutura.

O MAND foi proposto como um novo algoritmo para trabalhar no projeto de redes com vários níveis. Ele é diferente dos métodos indicados na revisão da literatura, pois trata todos os níveis da rede de forma interativa, buscando o melhor resultado do projeto como um todo e não apenas de um nível. Os resultados obtidos mostraram a eficiência de trabalhar com os níveis interativamente.

O MAND apresenta um percentual de redução de custo considerável, como é evidenciado na Tabela 5.7, sendo que os resultados obtidos para problemas de objetivo único (GA e PSO) são melhores que os resultados com os multiobjetivos (NSGA-II e MOPSO).

Os testes do MAND para problemas de objetivo único e para problemas multiobjetivo obtiveram resultados promissores. Considerando que o percentual de comparação dos resultados multiobjetivo baseiam-se no custo, é necessária uma análise adicional por um projetista, ou aplicação de uma regra adicional no desenvolvimento do “Tomador de Decisão”. A melhor solução a ser aplicada na prática também deve considerar a quantidade de nós facilitadores encontrados pelo algoritmo, o que define o maior ou menor grau de flexibilidade da rede.

Tabela 5.7. Resumo do Percentual de Redução de Custo para Três Níveis.

	Três níveis			
	GA	PSO	NSGA-II	MOPSO
base de testes 1	19,43%	30,16%	13,57%	3,86%
base de testes 2	21,65%	40,75%	35,62%	1,27%
base de testes 3	16,67%	32,06%	-3,23%	0,48%

É possível utilizar MAND para redes com mais de três níveis, por exemplo estruturando uma rede PON com cinco níveis. A Tabela 5.8 apresenta os resultados para as bases de dados estruturadas em uma rede de cinco níveis.

Tabela 5.8. Resumo do Percentual de Redução de Custo para Cinco Níveis.

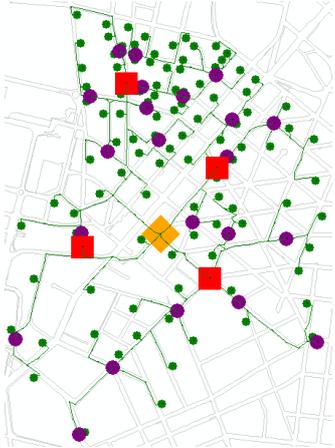
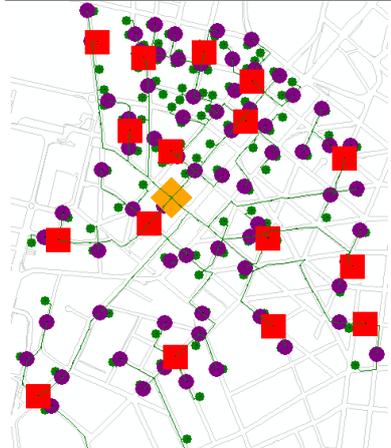
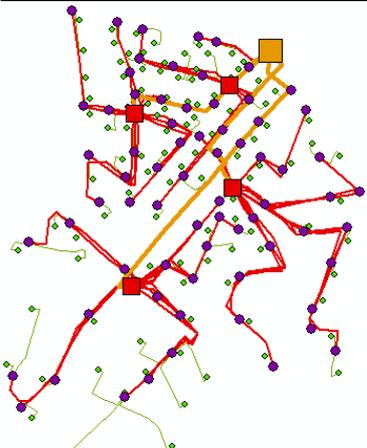
	Cinco níveis	
	GA	PSO
base de testes 1	1,67%	1,76%
base de testes 2	1,78%	3,30%
base de testes 3	9,44%	23,43%

O percentual de redução de custo encontrado por MAND para problemas com cinco níveis é menor que os resultados das redes estruturadas com três níveis, mas, na prática, esse percentual é significativo. Em redes com mais níveis os valores monetários envolvidos são maiores, já que se observa uma utilização de mais equipamentos; e geralmente nos níveis que concentram os equipamentos de gerenciamento os valores envolvidos são mais expressivos.

A Tabela 5.9 apresenta uma comparação dos resultados obtidos com as abordagens no desenvolvimento desta pesquisa: O MAND, o processo individual e com a utilização de ferramentas básicas.

Tabela 5.9. Comparação de resultados entre as abordagens utilizadas.

MAND			Processo Individual			Ferramentas básicas / Projetistas		
1	Demandas	105	1	Demandas	105	1	Demandas	105
	Facilidades	23		Facilidades	72		Facilidades	70
	Custo	19,291		Custo	13,013		Custo	17,037
2	Demandas	23	2	Demandas	72	2	Demandas	70
	Facilidades	4		Facilidades	16		Facilidades	4
	Custo	19,149		Custo	39,533		Custo	61,494
3	Demandas	4	3	Demandas	16	3	Demandas	4
	Facilidades	1		Facilidades	1		Facilidades	1
	Custo	15,820		Custo	42,089		Custo	19,093
Custo Total		54,260	Custo Total		94,635	Custo Total		97,624
Tempo aprox.		4 horas	Tempo aprox.		1 hora	Tempo aprox.		8 horas

O objetivo desta pesquisa não foi comparar a eficiência dos algoritmos de otimização da literatura para os problemas NDP, STP e p-Mediana, mas mostrar a eficiência de realizar o planejamento de redes de forma interativa, como o proposto com o MAND. Outros algoritmos da literatura, além do GA, PSO, NSGA-II, MOPSO e suas variações, podem ser utilizados como auxiliares ao MAND.

5.8. Considerações Finais do Capítulo

As novas bases de dados foram construídas com informações geográficas, e essa estrutura de dados foi adaptada para obter informações sobre nós adjacentes. Essas novas bases de dados e a estrutura tornaram os testes viáveis com o novo algoritmo MAND.

Para auxiliar MAND, dois algoritmos evolucionários (GA e PSO) foram selecionados para os testes em problemas de objetivo único, e, para os problemas multiobjetivos, foram selecionados os algoritmos NSGA-II e MOPSO. Mas este método pode utilizar outros algoritmos auxiliares na definição dos nós facilitadores e outros algoritmos na definição do melhor caminho entre os nós.

Os resultados apresentados são promissores e demonstram que maiores estudos devem ser realizados com o método em problemas e situações diferentes às apresentadas nesta pesquisa.

A partir dos resultados das comparações com um método no qual os níveis são processados individualmente e uma única vez, mostram que o MAND é uma melhor opção para projetar redes com vários níveis do que as opções existentes atualmente na literatura.

Além de ser possível trabalhar com outros problemas que são divididos em níveis ou em estágios além do NDP, isto não foi avaliado neste trabalho, mas avalia-se que a interatividade entre estágios e níveis de um problema pode ser tratada com o MAND.

Conclusão e Trabalhos Futuros

O planejamento dos equipamentos da rede (nós facilitadores) é uma tarefa árdua, pois é necessário avaliar a quantidade e a melhor distribuição geográfica dos equipamentos nos n níveis da rede. Se um projetista realiza um trabalho manual, o resultado é superficial, pois é inviável (principalmente pela restrição de tempo) analisar todos os cenários que podem ser obtidos com as informações de quantidades e distribuição dos equipamentos na região do projeto. Ainda mais complexo é alterar um nível já projetado, visto que é necessário rever a quantidade, localização e caminho entre os equipamentos, refazendo os cálculos do nível alterado, e, conseqüentemente, o nível anterior e todos os níveis subsequentes devem ser revistos.

Mesmo a utilização de abordagens que trabalham com cada nível de forma independente não mostram resultados satisfatórios quando o objetivo é planejar a rede completa, isto é, quando é necessária uma solução que atenda todos os níveis da rede.

Esta pesquisa apresenta um novo algoritmo capaz de encontrar uma solução ótima para o planejamento de infraestrutura de redes multiníveis. Para auxiliar o novo algoritmo, é utilizado um algoritmo “otimizador” para definições de quantidades e localização de equipamentos na rede, sendo que este algoritmo pode ser selecionado entre as opções disponíveis na literatura. Também sendo utilizado um algoritmo de caminhamento em grafos para a ligação de equipamentos e demandas da rede.

O objetivo do novo algoritmo é trabalhar com vários níveis interativamente e considerar o impacto dos resultados de cada nível nos níveis adjacentes, cujos dados são utilizados nas iterações. Portanto, foi possível obter um resultado final melhor para toda a rede, dos resultados apresentados com a abordagem comparada e os resultados obtidos por projetistas com ferramentas básicas.

O MAND é capaz de planejar vários níveis de uma rede. Ao contrário dos algoritmos comumente utilizados, ele processa os níveis interativamente, e os dados dos níveis adjacentes são utilizados no processo. Com esse procedimento, é possível obter projetos de rede melhores para a rede inteira, já que um processo interativo entre os níveis permite uma

exploração melhor das soluções possíveis, o que não ocorre quando o projeto é para somente um nível de cada vez.

Para a avaliação e testes do novo algoritmo não foram encontradas bases de dados na literatura com informações geográficas, informações adjacentes entre os nós e com as soluções conhecidas, então foi estipulado um formato e construídas novas bases de dados.

Os testes e resultados mostraram a eficiência no estudo de caso de telecomunicações com três e cinco níveis. Os resultados apresentados demonstram que o novo algoritmo reduz o custo das redes processadas, porém com um tempo de processamento maior, pois há a necessidade de interação dos níveis e um reprocessamento desses. O tempo computacional de processamento é justificado pelos ganhos financeiros obtidos com o novo algoritmo, e podem ser reduzidos em um primeiro momento com a utilização de computadores com processadores mais velozes do que os utilizados nos experimentos apresentados.

Avaliando a hipótese inicialmente apresentada nesta pesquisa, os resultados obtidos no estudo de caso de infraestrutura de redes de telecomunicações permitem afirmar que o algoritmo proposto obtém resultados com custos menores do que as abordagens apresentadas na literatura.

O tempo computacional do novo algoritmo, mesmo sendo maior em relação a comparação da abordagem utilizada, se justifica pelos melhores resultados encontrados. Na seção abaixo de trabalhos futuros são propostas algumas alternativas para melhorar o desempenho computacional do algoritmo proposto.

As contribuições originais propostas na introdução deste trabalho (apresentadas abaixo em baixo relevo) e obtidas nesta pesquisa podem ser sintetizadas da seguinte maneira:

- Científicos
 - ✓ Um novo algoritmo para projetar infraestrutura de redes que considera interativamente todos os níveis da rede.

A elaboração do MAND.

- Tecnológicos
 - ✓ Demonstrar que, com o algoritmo proposto, é possível construir uma ferramenta auxiliar no planejamento de infraestrutura de redes em uma plataforma de geoprocessamento.

Os conjuntos de dados para os testes foram extraídos de um SIG e um protótipo é descrito no Apêndice B.

- ✓ Construir uma base de dados com informações geográficas.

O conjunto de dados para teste foi construído com a inserção de informações dos nós ascendentes.

- ✓ Comparar os algoritmos auxiliares de otimização do novo algoritmo, possibilitando avaliar os resultados nas estratégias de busca de objetivo único e de multiobjetivo em planejamento de redes.

Os testes utilizaram os algoritmos GA, PSO, NSGA-II e MOPSO como auxiliares ao MAND.

- Sociais

- ✓ O algoritmo proposto pode ser utilizado não somente em redes de telecomunicações, como também para várias outras indústrias de serviços públicos, como distribuição de energia, água e gás.

O MAND pode ser utilizado em outras indústrias de serviços públicos, tais como distribuição de energia, água e gás. Mesmo não tendo sido testado para estas redes, elas apresentam similaridades, permitindo a utilização do novo algoritmo.

Vantagens do novo algoritmo

- Otimização completa da rede.
- Aplicação em problemas reais.
- Arquitetura aberta para outros problemas e outros algoritmos auxiliares.

Desvantagens do novo algoritmo

- Tempo computacional.
- Não testado para as situações de expansão de redes, nos casos de existência de equipamentos que devem permanecer no novo planejamento.

Trabalhos Futuros

Algumas possibilidades do MAND não foram discutidas nesta pesquisa por restrições de tempo, porém merecem ser trabalhadas:

- ✓ Testar o MAND no desenvolvimento de projetos de *smart grid*, auxiliando o planejamento de distribuição de equipamentos na nova rede. Nesse caso estudar a otimização simultânea de redes distintas: redes de telecomunicações e redes de distribuição de energia elétrica;
- ✓ Testar o MAND em redes urbanas onde há equipamentos instalados de uma rede antiga, os quais devem ser utilizados no projeto da nova rede. Essa situação é comum em cidades maiores, em que as novas redes usam a infraestrutura de redes já existentes. Indica-se nesse caso a utilização de variáveis na formulação matemática para indicar equipamentos que obrigatoriamente devem fazer parte da rede;
- ✓ Acredita-se que o uso do algoritmo MOOP no MAND pode ser melhorado; para isso é necessário explorar outros mecanismos para seleção de uma solução na Fronteira de Pareto, ou seja, alteração na implementação do “Tomador de Decisão”;
- ✓ Explorar o desenvolvimento de um novo mecanismo do MAND que salve uma lista de soluções processadas, o que permite ao MAND recuperar esses dados e tentar um novo processamento a partir dessa lista para alcançar uma solução final melhor. Isto pode ser implementado com técnicas de programação dinâmica.
- ✓ Explorar a utilização do MAND utilizando algoritmos auxiliares diferentes para cada nível, variando para cada nível os parâmetros e controle de finalização do algoritmo.
- ✓ Pesquisar e implementar técnicas de linguagens de programação para reduzir o tempo de processamento. Com a evolução dos processadores (p.e. os processadores multi-core) e das linguagens de programação (p.e. a nova especificação do C++/11) é possível melhorar a implementação dos algoritmos.
- ✓ Testar técnicas de computação distribuída para melhorar o tempo de computação.
- ✓ Criar um formato padrão de base de dados para ser utilizado em trabalhos similares a esta pesquisa. Isto pode ser realizado com a definição formal de

uma metodologia para extração de dados de testes em bases geográficas (sistemas SIG).

Referências

- [AHU93] AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B. *Networks Flows-Theory, Algorithms and Applications*. Editora Prentice Hall Publishing, Nova Jersey, 1993.
- [ALF07] EL-ALFY, E. M. *Applications of genetic algorithms to optimal multilevel design of MPLS-base networks*. Computer Communications, Vol. 30, 2007, p. 2010-2020.
- [ALT03] ALTIPARMAK, F.; DENGIZ, B.; SMITH, A. E. *Optimal Design of Reliable Computer Networks: A Comparison of Metaheuristics*. Journal of of Heuristics, 9. Kluwer Academic Publishers Hingham, MA, USA, 2003, p. 471-487.
- [ANA10] <http://www.anatel.gov.br>, accessed in 19/05/2010.
- [BAN05] BANOVA, J. T. M. *Abordagem Evolutiva para o Planejamento Multi-Período da Expansão da Rede de Acesso aos Serviços de Telecomunicações*. Campinas:UNICAMP, 2005. 131p. Tese – Departamento de Sistemas de Engenharia, Universidade de Campinas, São Paulo-Brasil.
- [BAR95] BARRADAS, O. C. M. *Você e as Telecomunicações*. Interciência publishing. Brazil-Rio de Janeiro: 1995.
- [BAS00] BASSETO, F. *Metodologia de Planejamento de Redes de Acesso Full-Service*. Campinas: UNICAMP, 2000. 112p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Campinas, São Paulo-Brasil.
- [BEA10] BEASLEY, J. E. *OR-Library: distributing test problems*. URL: <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>, acessado em Janeiro/2010.
- [BEN97] BENSON, H. P.; SAYIN, S. Towards finding global representations of the efficient set in multiple objective mathematical programming. *Naval Research Logistics*, V. 44, 1997, p. 47-67.
- [BIN10] BIN, X.; HONGGANG, W.; RONGBIN, Q.; FENG, Q. *Differential Evolution Inspired Clone Immune Multi-objective Optimization Algorithm*. International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE). 2010, p. 850-854.
- [BOL10] BOLOGNESI, A.; BRAGALLIA, C.; MARCHIA, A.; ARTINAA, S. *Genetic Heritage Evolution by Stochastic Transmission in the optimal design of water*

distribution networks. Advances in Engineering Software, 41, Elsevier Science, 2010, p. 792-801.

- [BRU08] BRUN, O.; RACHDI, A.; GARCIA, J. *Access network design with capacity-dependent costs*. Source International Conference On Performance Evaluation Methodologies And Tools & Workshops, 23, 2008.
- [BUR85] BURATTINI, E.; MARRA, G.; SFORZA, A. *Network design problem: structure of solutions and dominance relations*. Acta Cybernetica, vol. 7, n. 2, 1985, p. 225-233.
- [CAB10] CABALLERO, F. J.C.; MARTINEZ, F. J.; HERVAS, C.; GUTIERREZ, P. A.; *Sensitivity Versus Accuracy in Multiclass Problems Using Memetic Pareto Evolutionary Neural Networks*. IEEE Transactions on Neural Networks. V.21(5), 2010, p. 750-770.
- [CAD10] CADINI, F.; ZIO, E.; PETRESCU, C. A. *Optimal expansion of an existing electrical Power transmission network by multi-objective genetic algorithms*. Reliability Engineering and System Safety, 95, Elsevier Science, 2010, p. 173-181.
- [CAI02] CAI, G. *A GIS Approach to the Spatial Assessment of Telecommunications Infrastructure*. Networks and Spatial Economics. Vol 2, no. 1, 2002, p. 35-63,
- [CAN02] CANTARELLA, G. E.; PAVONE, G.; VITETTA, A. *Heuristics for the Network Design Problem*. Proceedings of the 9th Mini-Euro Conference, Bari, Italy, 2002.
- [CAR98] CARLSON Filho, C. M. *Sistemas de Telecomunicações: Planejamento da rede externa em situações de incerteza*. Campinas: UNICAMP, 1998. 148p. Dissertação – Departamento de Sistemas de Engenharia. Universidade de Campinas, São Paulo-Brasil.
- [CAS09] GUITIERREZ, J. C.; SILVA, D. L.; PEREZ, J. M. *Dynamic lexicographic approach for heuristic multi-objective optimization*. Proceedings of the Workshop on Intelligent Metaheuristics for Logistic Planning, Seville-Spain, 2009, p. 153-163.
- [CAS10] GUITIERREZ, J. C.; SILVA, D. L.; PEREZ, J. M. *Improved Dynamic Lexicographic Ordering for Multi-Objective Optimization*. Proceedings of PPSN, 2010, p. 31-40.
- [CHU99] CHU, C.; PREMKUMAR, G.; CHOU, H. *Digital data networks design using genetic algorithms*. European Journal of Operational Research, 127, Elsevier Science, 1999, p. 140-158.
- [COE01] COELLO-COELLO, C. A.; PULIDO, G. T. *Multiobjective Optimization using a*

- Micro-Genetic Algorithm*. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference – GECCO, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, California, 2001, p. 274-282.
- [COE01b] COELLO-COELLO, C. A. *A Short Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization*. First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 2001, Springer-Verlag. Lecture Notes in Computer Science, No. 1993, p.21-40.
- [COE02] COELLO-COELLO, C. A.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Springer, 2002.
- [COE04] COELLO-COELLO, C. A.; PULIDO, G. T.; LECHUGA, M. S. *Handling Multiple Objectives With Particle Swarm Optimization*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, V. 8(3), 2004, p. 256-279.
- [COE11] <http://www.lania.mx/~ccoello/EMOO/EMOObib.html>, acessado em Outubro/2011.
- [COR00] CORNE, D. W.; KNOWLES, J. D.; OATES, M. J. *The Pareto Envelope-based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization*. Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference, Springer Lecture Notes in Computer Science, n. 1917, Paris, France, 2000, p. 839-848.
- [COR01] CORNE, D. W.; JERRAM, N. R.; KNOWLES, J. D.; OATES, M. J. *PESA-II: Regionbased Selection in Evolutionary Multiobjective Optimization*. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference – GECCO, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, California, 2001, p. 283-290.
- [COU10] <http://www.ftthcouncil.org/>, accessed in 19/05/2010.
- [COU41] COURANT, R.; ROBBINS, H. *What is Mathematics?: An Elementary Approach to Ideas and Methods*. London: [Oxford University Press](#), 1941
- [DAS97] DAS, I.; DENNIS, J. E. *A closer look at drawbacks of minimizing weighted sums of objectives for Pareto set generation in multicriteria optimization problems*. Struct. Optim. N. 14, 1997, p. 63-69.
- [DEB00] DEB, K.; AGRAWAL, S.; PRATAB, A.; MEYARIVAN, T. *A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II*. Lecture Notes in Computer Science, 2000, Volume 1917/2000, Instituto Indiano de Tecnologia, Kanpur, Índia, 2000, p. 849-858.
- [DEB01] DEB, K. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. John Wiley

& Sons, Nova York, 2001.

- [DEB10] DEB, K. *Source code of GA*. <http://www.iitk.ac.in/kangal/codes.shtml>, accessed in 01/12/2010.
- [DIJ59] DIJKSTRA, E. W. *A Note on Two Problems in Connection with Graphs*. *Numerische Mathematik*, v.1, 1959, p. 269-271.
- [DIN00] DING, S.; ISHII, N. *An Online Genetic Algorithm for Dynamic Steiner Tree Problem*. *IECON-Industrial Electronics Society*, vol. 2, 2000, p. 812-817.
- [DOS95] DOSHI, B. T.; DRAVIDA, S.; HARSHAVARDHANA, P. *Overview of INDT – A New Tool for Next Generation Network Design*. *Proceedings of the IEEE Globecom*, 1995, p. 13-17.
- [DOS97] DOSHI, B. T.; FUNKA-LEA, C. A.; HARSHAVARDHANA, P.; GONG J.; NAGARAJAN, R.; RAVIKUMAR, S.; CHEN, S.; WANG, Y. *Integrated Network Design Tools (INDT): a suite of network design tools for current and next generation networking Technologies*. *II Symposium on Computers and Communications*, 1997, p. 332-338.
- [DUD08] DU, D.; HU, X. *Steiner Tree Problems in Computer Communications Networks*. *World Scientific Publishing*, Singapura, 2008, 359pp.
- [EIB03] EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. *Introduction to evolutionary computing*. Springer, 2003.
- [ESB94] ESBENSEN, H.; MAZUMDER, P. *A Genetic Algorithm for the Steiner Problem in a Graph*. *European Design and Test Conference*, 1994, p. 402-406.
- [FAN03] FANNING, R. P. *Implementation of networked primary and secondary distribution systems for US utilities*. *Power Engineering Society General Meeting*, 4, Vol. 4, 2003, p. 2425-2429.
- [FER09] FERNANDEZ, J. C.; HERVAS, C.; MARTINEZ, F. J.; CRUZ, M. *Design of Artificial Neural Networks Using a Memetic Pareto Evolutionary Algorithm Using as Objectives Entropy versus Variation Coefficient*. *Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA '09)*. 2009, p. 408-416.
- [FON93] FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. *Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization*. *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*. University of Illinois. Morgan Kaufman Publishers, San Mateo, California, 1993, p. 416-423.

- [FRI37] FRIEDMAN, M. *The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance*. Journal of the American Statistical Association, 32, 1937, p.675-701.
- [FRI40] FRIEDMAN, M. *A comparison of alternative tests of significance for the problem of m rankings*. Annals of Mathematical Statistics, 11, 1940, p. 86-92.
- [FUR09] http://www.furukawa.com.br/portal/page?_pageid=393,1365734&_dad=portal&_schema=PORTAL, Acessado em Abril/2009.
- [GAO09] GAO, Z.; PANG, H.; WU, Z.; YANG, X. *Hierarchy method of choosing optimum lines for public traffic network design*. Control and Decision Conference, 2009, p. 4957-4962.
- [GAR11] GARCIA, F.; MELIAN, B.; MORENO, J. A.; VEGA, J. M. M. *Scatter Search for Multiple Objective p -Facility Location Problems*. Universidad de La Laguna. Technical Report. Available in <http://www.lifl.fr/PM2O/Reunions/04112002/garcia.pdf>, Acessado em Outubro /2011.
- [GAR77] GAREY, M. R.; GRAHAM, R. L.; JOHNSON, D.S. *The complexity of computing Steiner minimal trees*. SIAM Journal on Applied Mathematics, 32, 1977, p. 835-859.
- [GAR79] GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*. W. H. Freeman and Company Publisher, San Francisco, 1979.
- [GHO08] GHOSEIRI, K.; GHANNADPOUR, S. F. *An efficient heuristic method for capacitated P -Median problem*. International Journal of Management Science and Engineering Management. Vol. 4, 2009, p. 72-80.
- [GLO00] GLOVER, F.; LAGUNA, M.; MARTÍ, R. *Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking Control and Cybernetics*. Vol. 39, N. 3, 2000, p. 653-684.
- [GOL89] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley. Massachusetts. 1989.
- [GOL96] GOLDBERG, A. V.; TARJAN, R. E. *Expected Performance of Dijkstra's Shortest Path Algorithm*. NEC Research Institute Report, 1996.
- [GRO95] GRÖTSCHEL, M.; MONMA, C. L.; STOER, M. *Design of survivable networks*. 7 (10), Elsevier Science, 1995.
- [HAJ92] HAJELA, P.; LIN, C. Y. *Genetic search strategies in multicriterion optimal design*. Structural Optimization 4, 1992, p. 99-107.

- [HAN97] HANSEN, Michael P. *Tabu Search for Multiobjective Optimization: MOTS*. Thirteenth International Conference on Multiple Criteria Decision Making, 1997, p. 6-10.
- [HAR09] HARIADI, M.; BUDITJAHJANTO, I. G. P. A.; PURNOMO, M. H. *Decision Support Based on Integration of Fuzzy Clustering and Multiobjective Optimization Problem for Non Player Character in Business Game*. International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition. 2009, p. 358-363, 2009.
- [HAR68] HART, P. E.; NILSSON, N. J.; RAPHAEL, B. *A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths*. IEEE Transactions Systems Science and Cybernetics SSC, v.4, n.2, 1968, p.100-107.
- [HER00] HERDER, P. M.; TURKA, A. L.; SUBRAHMANIANB E.; WESTERBERGB, A. W. *Challenges for process systems engineering in infrastructure design*. Computers and Chemical Engineering, 24, Elsevier, 2000, p. 1775-1780.
- [HIR99] HIROYASU, T.; MIKI, M.; WATANABE, S. *Distributed genetic algorithms with a new sharing approach*. Proceedings of the Conference on Evolutionary Computation, Vol. 1, 1999, p. 69-76.
- [HOR94] HORN, J.; NAFPLIOTIS, N.; GOLDBERG, D. E. *A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization*. First IEEE Conference on Evolutionary Computation, Vol. 1, 95, 1994, p. 82-87.
- [HRI01] HRISTEA, C.; TOBAGI, F. *A network infrastructure for IP mobility support in metropolitan áreas*. Department of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 2001.
- [HUY08] HUY, N. V.; NGHIA, N. D. *Solving Graphical Steiner Tree Problem Using Parallel Genetic Algorithm*. IEEE International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future, 2008, p. 29-35.
- [JIA10a] JIASSEN, W.; LONGQIN, G. *Left-Right crowding distance (LRCD) calculation method in NSGA2 to preserve diversity distribution*. Computer Science and Information Tecnology (ICCSIT), 3^a. IEEE International Conference. V.7, 2010, p. 211-215.
- [JIA10b] JIASSEN, W.; HUIYUAN, L.; ZEJIU, Z. *A novel strategy to preserve diversity in solving MOEAs based on artificial emphasis on uniformity*. Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS). V. 3, 2010, p. 812-816.

- [JOH77] JOHNSON, D. B. *Efficient algorithms for shortest paths in sparse networks*. Journal of the ACM, v.24, n.1, 1977, p. 1-13.
- [JOH78] JOHNSON, D. S.; LENSTRA, J. K.; RINNOOV KAN, A. H. G. *The Complexity of the Network Design Problem*. Networks, vol. 8, n. 4, 1978, p. 279-285.
- [JON02] FIELDSSEND, J. E.; SINGH, S. *A Multi-Objective Algorithm based upon Particle Swarm Optimization, an Efficient Data Structure and Turbulence*. Proceedings of the 2002 U. K. Workshop on Computational Intelligence, 2002, p.37-44.
- [KAM06] KAMPSTRA P.; van der MEI R. D.; EIBEN A. E. *Evolutionary Computing in Telecommunication Network Design: A Survey*. Available at: under revision on: <http://www.math.vu.nl/~mei/publications.php>, 2006, p. 1-46.
- [KAR79] KARIVE, O.; HAKIMI, S. *The p-Median problem in: an algorithmic approach to network location problems*. Journal on Applied Mathematic, Philadelphia, V. 37, 1979, p. 539-560.
- [KEN01] KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann. 2001.
- [KEN95] KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. *Particle swarm optimization*. IEEE International Conference on Neural Networks. pp. 1942-1948. IEEE Press 1995.
- [KEN99] KENNEDY, J.; EBERHART, R. *The Particle Swarm: social adaptation in information-processing systems*. In: *New Ideas in Optimization*, McGraw-Hill, Cambridge, 1999, p. 379-388.
- [KHA97] KHATOR, S. K.; LEUNG, L. C. *Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues*. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 12, no. 3, 1997, p. 1151-1159.
- [KIT96] KITA, H.; YABUMOTO, Y.; MORI, N.; NISHIKAWA, Y. *Multi-Objective Optimization by Means of the Thermodynamical Genetic Algorithm*. Parallel Problem Solving from Nature – PPSN IV. Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1996, p. 504-512.
- [KNI07] KNIPPEL, A.; LARDEUX, B. *The multi-layered network design problem*. European Journal of Operational Research, 183, Elsevier Science, 2007, p. 87-99.
- [KNO99] KNOWLES, J. D.; CORNE, D. W. *The Pareto Archived Evolutionary Strategy: A New Baseline Algorithm for Multiobjective Optimization*. Proceedings of Evolutionary Computation, IEEE Service Center, Washington, D.C., 1999, p. 98-105.
- [KOP97] KOPPEN, M.; TEUNIS, M.; NICHOLAY, B. *NESSY – an evolutionary learning*

neural network. Proceedings of the Second International Symposium on Soft Computing, 1997, p. 243-248.

- [KUR91] KURSAWE, F. *A Variant of Evolution Strategies for Vector Optimization*. 1st workshop parallel problem solving from nature – PPSN I, Springer-Verlag, V. 496, 1991, p. 193-197.
- [LAU98] LAUMANN, M. R.; RUDOLPH, G.; SCHWEFEL, H. P. *A Spatial Predator-Prey Approach to Multi-Objective Optimization: A Preliminary Study*. Parallel Problem Solving From Nature – PPSN. Springer-Verlag, Amsterdam, Holland, 1998, p. 241-249.
- [LI03] LI, X. *A Non-dominated Sorting Particle Swarm Optimizer for Multiobjective Optimization*. Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 2723, 2003, p. 37-48.
- [LIY06] LI, Y.; CAO, F. *New heuristic algorithm for capacitated p-median problem*. Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, vol. 1, 2006, p. 1129-1131.
- [LOR11] LORENA, L. A. N.; SENNE, E. L. F.; PAIVA, J. A. C.; MARCONDES, S. P. B. *Integração de um Modelo de p-Mediana a Sistemas de Informações Geográficas*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Brasil, Relatório técnico, disponível em <http://www.lac.inpe.br/~lorena/sbpo99/p-med-SIG.pdf> - Acessado em Outubro/2011.
- [LOU04] LOUÇA Jr, C.; BARROS, C. M. P.; ROCHA, M. L.; *Aplicação de uma Heurística GRASP Paralela ao Problema da P-Mediana*. X Encontro de Iniciação Científica do ITA (X ENCITA), São José dos Campos, 2004.
- [LUN10] LUNA, J. M.; ROMERO, J. R.; VENTURA, S. *G3PARM: A Grammar Guided Genetic Programming algorithm for mining association rules*. IEEE Congresso in Evolutionary Computation (CEC). 2010, p. 1-8.
- [MAR00] MARIANO, C. E.; MORALES, E. F. *Distributed reinforcement learning for multiple objective optimization problems*. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, 2000, p. 188-195.
- [MAR09] MARÍN, Á.; RÓDENAS, R. G. *Location of infrastructure in urban railway networks*. Computers & Operations Research, 36, Elsevier Science, 2009, p. 1461-1477.

- [MAR99] MARIANO, C. E.; MORALES, E. *A multiple Objective Ant-Q Algorithm for the Design of Water Distribution Irrigation Networks*. Relatório técnico HC-9904, Instituto de Tecnologia do México, 1999.
- [MAT00] MATEUS, G. R.; LUNA, H. P. L.; SIRIHAL, A. B. *Heuristics for Distribution Network Design in Telecommunication*. Kluwer Academic Publishers Hingham, 6, Publisher Kluwer Academic Publishers Hingham, MA, USA, 2000, p. 131-148.
- [MES00] MESSAC, A. *From dubious construction of objective functions to the application of physical programming*. AIAA Journal of Aircraft, Vol. 38, N. 1, 2000, p. 155-163.
- [MES96] MESSAC, A.; HATTIS, P. *Physical programming design optimization for high speed civil transport (HSCT)*. AIAA Journal of Aircraft, Vol. 33, N. 2, 1996, p. 446-449.
- [MOO99] MOORE, J.; CHAPMAN, R. *Application of particle swarm to multiobjective optimization*. Technical Report, Department of Computer Science and Software Engineering, Auburn University, 1999.
- [MOR09] MORI, H.; YOSHIDA, T. *An efficient multi-objective memetic algorithm for uncertainties in distribution network expansion planning*. Power & Energy Society General Meeting. PES '09 IEEE. 2009, p. 1-6.
- [MOS03] MOSTAGHIM, S.; TEICH, J. *The Role of ϵ -dominance in Multi Objective Particle Swarm Optimization Methods*. Proceedings of the 2003 Congress on Evolutionary Computation, Canberra, Australia, V. 3, 2003, p. 1764-1771.
- [MOS04] MOSTAGHIM, S.; TEICH, J. *Covering areto-optimal Fronts by Sub-swarms in Multi-objective Particle Swarm Optimization*. Congress on Evolutionary Computation, V. 2, Portland, Oregon, USA, 2004, p. 1404-1411.
- [MUR95] MURATA, T.; ISHIBUCHI, H. *MOGA: Multi-objective genetic algorithms*. Proceedings of the Second IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1995, p. 289-294.
- [OSM94] OSMAN, I.; CHRISTOFIDES, N. *Capacitated clustering problems by hybrid simulated annealing and tabu search*. International Transactions in Operational Research, V.1(3), 1994, p. 317-336.
- [OSY95] OSYCZKA, A.; KUNDU, S. *A new method to solve generalized multicriteria optimization problems using the simple genetic algorithm*. Structural Optimization, V. 10(2), 1995, p. 94-99.

- [PAI10] PAISLEY, L.; RICHARDSON, D. *Why the first mile and not the last?* Disponível in <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/SUSTDEV/CDdirect/CDre0026.htm>, Acessado em Junho/2010.
- [PAP08] PAPAGIANNI, C.; PAPADOPOULOS, C. P. K.; TSELIKAS, N. D. *Communication Network Design Using Particle Swarm Optimization*. Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Tecnology, 2008, p. 915-920.
- [PAR96] PARETO, V. *Cours D'Economie Politique*. Volume 1. Lausanne: F. Rouge, 1896.
- [PER02] PERKINS, J. *Education in Process Systems Engineering: Past, Present and Future*. Computers & Chemical Engineering, 26, 2002, p. 283-293.
- [PUL11] PULIDO, G. T. *Source code of MOPSO*. http://www.adaptivebox.net/CILib/code/psocodes_link.html, accessed in November/2011.
- [REE05] REESE, J. *Methods for Solving the p-Median Problem: An Annotated Bibliography*. Department of Mathematics, Trinity University, San Antonio, Texas, EUA, 2005.
- [RIB00] RIBEIRO, C. C.; SOUZA, M. C. *Tabu Search for the Steiner Problem in Graphs*. Networks 36(2), 2000, p.138-146.
- [RIB08] RIBEIRO, W. S.; ARROYO, J. E. C. *Metaheurística GRASP Bi-Objetivo para um Problema de Localização de Facilidades*. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), Rio de Janeiro, Brasil, 2008, p. 1-10.
- [RUD01] RUDOPH, G. *Evolutionary Search under Partially Ordered Fitness Sets*. Proceedings of the International NAISO Congresso n Information Science Innovations, ICSC Academic Press: Millet/Sliedrecht, 2001, p. 818-822.
- [RUD93] RUDOPH G. *Convergence of Evolutionary Algorithms in General Search Spaces*. Proceedings of the third IEEE Conference on Evolutionary Computation, 1993, p. 50-54.
- [SCH09] SCHEFFERMANN, R.; BENDER, M.; CARDENEO, A. *Robust solutions for vehicle routing problems via evolutionary multiobjective optimization*. IEEE Congresso in Evolutionary Computation. 2009, p. 1605-1612.
- [SCH85] SCHAFFER, J. D. *Multiple Objective Optimization wuth Vector Evaluated Genetic Algorithms*. Genetic Algorithms and their Applications: Proceedings of the First

- International Conference on Genetic Algorithms, 1985, p. 93-100.
- [SEF00] SEFRIOURI, M.; PERIAUX, J. *Nash genetic algorithm: examples and applications*. Proceedings Congress on Evolutionary Computation, IEEE Press, 2000, p. 509-516.
- [SIL04] SILVA, H. A.; RODRIGUES, L. C. A. *Estudo da Otimização de Redes Baseada no Problema de Steiner*. Curitiba: UTFPr, 2004. 172p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica do Paraná – Brasil.
- [SIL10] SILVA, H. A.; OLIVEIRA, L. E. S.; BRITTO Jr., A. S. *Proposta de Planejamento em Etapas para Redes Secundárias de Telecomunicações*. GEOINFO 2010-XI Simpósio Brasileiro de GeoInformática. Campos do Jordão, São Paulo, Brasil, Novembro/2010.
- [SIL11] SILVA, H. A.; BRITTO JR, A. S.; OLIVEIRA, L. E. S.; KOERICH, A. L. A *Multilevel algorithm for the network design problem*. IECON, 2011, p. 2300-2304.
- [SOU04] SOUSA, M. A. *Planejamento Estratégico de Sistemas de Telecomunicações: Avaliação Técnico-Econômica Orientada à Receita*. Campinas: UNICAMP, 2004. 216p. Tese – Departamento de Sistemas de Engenharia, Universidade de Campinas, São Paulo-Brasil.
- [SOU06] SOUZA, A. A. A. de; NEVES Jr, F.; LOPES, H S. *Sistema de Avaliação da Rede Secundária de Distribuição utilizando Algoritmos Genéticos*. Revista Espaço Energia, Curitiba-PR, n. 5, Outubro/2006, p. 34-41.
- [SRI94] SRINIVAS, N.; DEB, K. *Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms*. Evolutionary Computation 2 (3), 1994, p. 221-248.
- [STE86] STEUER, R. E. *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*. John Wiley, New York, 546pp, 1986.
- [TAT03] TATSCH, Cristiano Roberto. *Privatização do Setor de Telecomunicações no Brasil*. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 318p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Economia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS, Porto Alegre-RS.
- [TEL09] http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialpon/pagina_1.asp, Acessado em Abril/2009.
- [TEL10] <http://www.telebras.com.br/>, Acessado em Maio/2010.
- [USF11] <http://fcit.usf.edu/network/>, Acessado em Setembro/2011.

- [VEL99] VELDHUIZEN, D. A. *Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analyses and New Innovations*. Ohio: AFB, 1999. 272p. Doctor Thesis - Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, Ohio.
- [VIE00] VIEIRA Neto, P. *O Desaparecimento de uma Profissão: O Radiotelegrafista de vôo – Evolução Tecnológica e Desemprego nas Telecomunicações*. São Paulo: PUCSP, 2000. Dissertação – Economia Política, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Brasil.
- [WAN08] WANG, C.; CHANG, C. *Integrated genetic algorithm and goal programming for network topology design problem with multiple objectives and multiple criteria*. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 16, IEEE Press Piscataway, MJ, USA. 2008, p. 680-690.
- [WER01] WERNECK, R. F. F. *Problema de Steiner em Grafos: Algoritmos Primais, Duais e Exatos*. Rio de Janeiro: PUCRJ, 2001. 142p. Dissertação-Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.
- [WIK11] http://en.wikipedia.org/wiki/Network_topology, Acessado em Setembro/2011.
- [WUB04] WU, B. Y.; CHAO, K. *Spanning Tree and Optimization problems*. Chapman & Hall/CRC Publishing, Florida, 200p. Chapter 7, Janeiro/2004, p. 147.
- [XIA08] XIAO, H.; WANG, X.; DU, W. *A New Discrete Traffic Network Design Problem with Evolutionary Game Algorithm*. Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), Vol. 1, 2008, p. 3-7.
- [XUJ95] XU, J.; CHIU, S. Y.; GLOVER, F. *Tabu Search Heuristics for Designing a Steiner Tree Based Digital Line Network*. Colorado University, Colorado, Waltham. Relatório Técnico. 35pp., 1995.
- [YAN09] YANG, S.; JUZHONG, J.; YAMIN, W.; CHUNNIAN, L. *A New Evolutionary Algorithm for Solving Multiobjective Optimization*. Fifth International Conference on Natural Computation. V. 4, 2009, p. 563-568.
- [YOO95] YOON, K. P.; HWANG, C. I. *Multiple Attributes Decision Making – An Introduction*. Quantitative Applications in the Social Sciences, V. 104, Sage University, 1995.
- [YOO98] YOON, M.; BAEK, Y.; TCHA, D. *Design of a distributed fiber transport network with hubbing topology*. European Journal of Operational Research, 104, Elsevier

Science, 1998, p. 510-520.

- [YUH11] SHI, Y. *Source code of PSO*. <http://www.engr.iupui.edu/~shi/psa.html>, Acessado em Junho/2011.
- [ZHA08] ZHANG, G.; LU, J.; XIANG, Q. *Application of Genetic Algorithm to Network Design Problem*. International Conference on Intelligent Computation Technology and automation, Vol. 1, 2008, p. 26-29.
- [ZHO08] ZHONG, W.; HUANG, J.; ZHANG, J. *A Novel Particle Swarm Optimization for the Steiner Tree Problem in Graphs*. IEEE-Congress on Evolutionary Computation, 2008, p. 2460-2467.
- [ZIT01] ZITZLER, E.; LAUMANN, M.; THIELE, L. *Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*. Technical Report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory(TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Gloriastrasse 35, CH-8092, Zurich, Switzerland, 2001.
- [ZIT98] ZITZLER, E.; THIELE, L. *An Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization: The Strength Pareto Approach*. Technical Report 43, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland, 1998.
- [ZIT99a] ZITZLER, E. *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. November 11, 1999.
- [ZIT99b] ZITZLER, E.; DEB, K.; THIELE, L. *Comparison of Evolutionary Algorithms: Empirical Results (Revised Version)*. TIK-Report No. 70. Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze. Zürich. December 22, 1999.

Apêndice A

Processando os Níveis

Além das opções discutidas nesta pesquisa, é possível processar os níveis de um projeto de rede com a opção abaixo. Essa opção é desconsiderada na pesquisa, mas merece uma investigação com maiores detalhes em um novo projeto de pesquisa.

Processamento com um único cromossomo

Com esse método, todos os níveis são processados uma vez e controlados por um único vetor no algoritmo. Isto permite que todos os níveis sejam processados em cada iteração do algoritmo. Na Figura A.1, é possível visualizar um exemplo de um vetor que modelou todos os níveis simultaneamente. Esse método provou ser ineficiente nos testes iniciais pois:

- Ele necessita de um tempo computacional maior;
- Ele perde oportunidades de busca em outras regiões, ou seja, houve falhas na diversificação nos testes iniciais;
- As soluções de um nível podem gerar uma influência negativa na solução de outro nível, já que há uma dependência entre as soluções num único vetor.

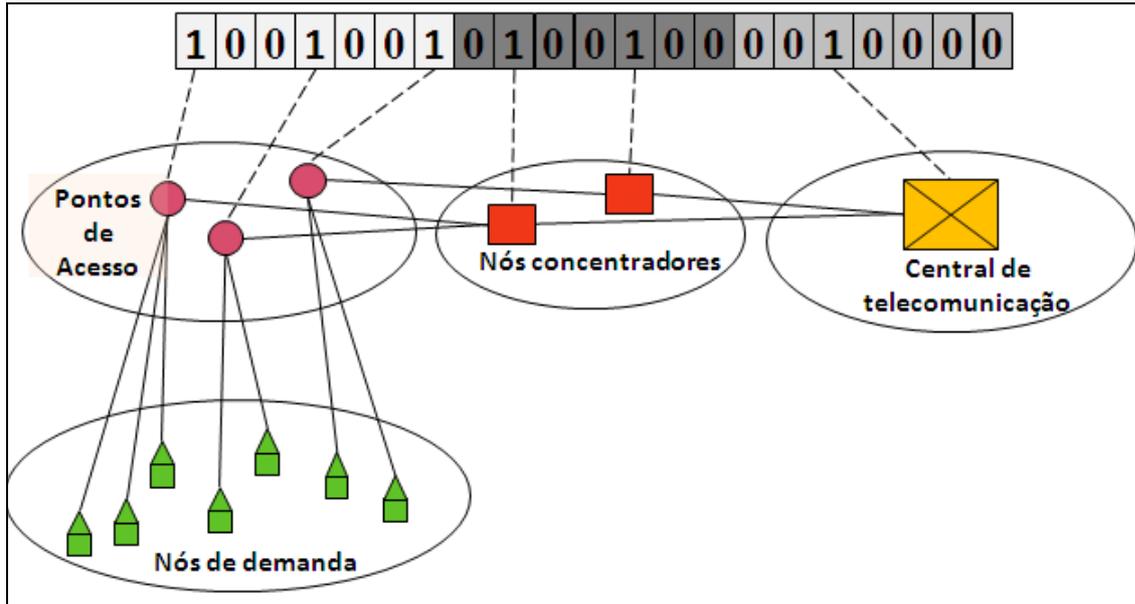


Figura A.1. Exemplo da utilização de um vetor para todos os níveis.

A execução do conjunto de dados com “apenas um processo”, utilizando apenas um vetor, foi desconsiderada, pois ela não se mostrou promissora. Esse tópico está aberto para maiores investigações e análises com outros algoritmos e com mais testes.

Apêndice B

Implementações

B.1. Protótipo no ArcGIS®

Para os testes do MAND, foi necessário construir um protótipo de *software* que permutasse dados entre os algoritmos desenvolvidos e os mapas. O protótipo é desenvolvido na plataforma ArcGIS® e é uma extensão do *software* ArcMap. O ArcGIS® é uma plataforma de SIG importante na indústria de *software* e é desenvolvida por ESRI. Detalhes sobre a plataforma e a empresa ESRI são disponibilizados em www.esri.com.

O objetivo do protótipo é extrair os dados para testes dos mapas, os quais são processados nos algoritmos. O protótipo também tem a função de ler os resultados do processamento e disponibilizá-los em forma gráfica para visualização.

O formulário da Figura B.1 mostra a interface em que os usuários podem selecionar os dados do mapa. Esses dados são exportados para arquivos textos e processados nos testes dos algoritmos. Primeiramente na lista “Nós de demanda” o usuário pode selecionar o grupo de dados que representa os nós de demanda. A lista “Coordenadas para nós facilitadores” é o grupo de dados que representa os pontos geográficos em que os nós facilitadores podem ser instalados. Finalmente, o usuário pode selecionar na lista “Arestas” a opção de construção das possibilidades de ligações entre os nós, as quais podem ser, por exemplo, arruamento, redes já existentes, etc.

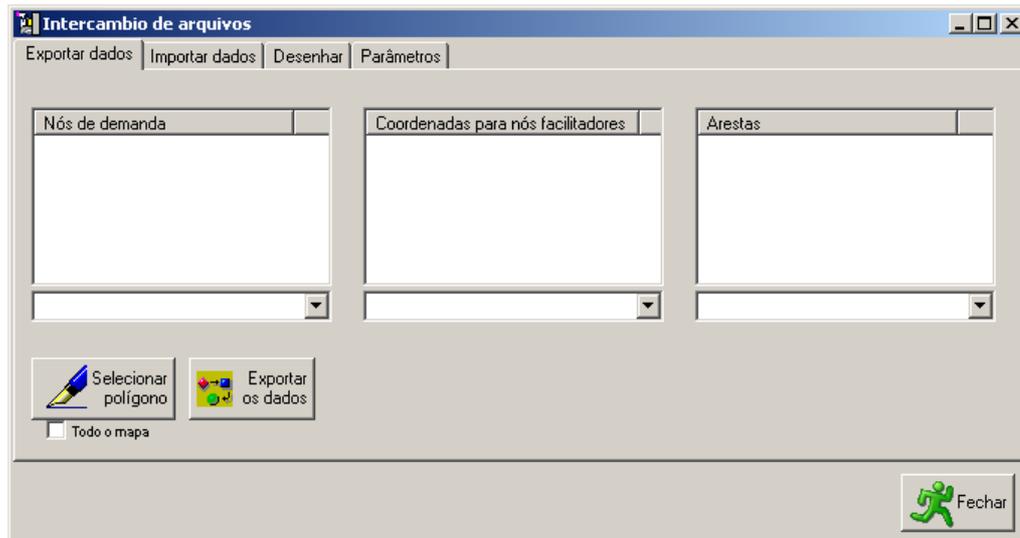


Figura B.1. Formulário para exportação dos dados.

Depois que os algoritmos forem processados, os resultados podem ser exportados para o mapa. Na Figura B.2, estão as opções para exportar os dados para o mapa. A opção “Os nós Terminais são” e a opção “Os nós Facilitadores são” são usadas para desenhar os nós com diferentes símbolos no mapa, de acordo com o respectivo nível, então, os elementos de diferentes níveis podem ser mais bem visualizados como na Figura 1.2. Os dados podem ser salvos no banco de dados do SIG com a opção “Gravar”, e, para este propósito, o usuário deve selecionar as tabelas de armazenamento na respectiva lista na opção do *combobox* “Os dados serão gravados em”.

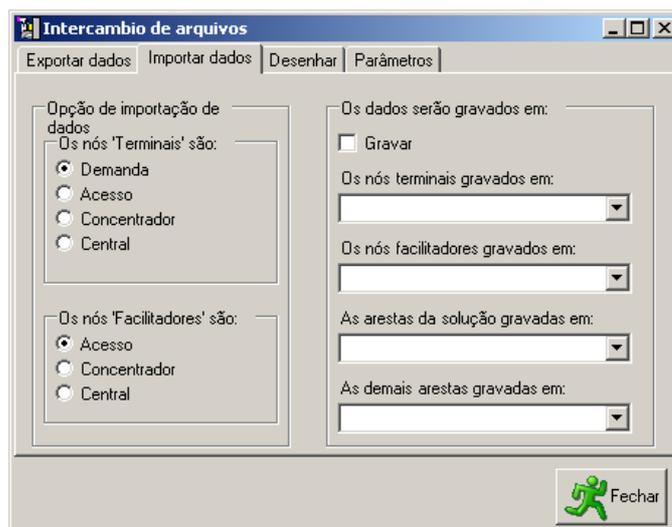


Figura B.2. Formulário para exportar os dados para o mapa.

A Figura B.3 mostra as opções para desenhar os nós e ligações no mapa. As opções “Nós” e “Arestas” são *group Box* que configuram quais os nós serão exportados para a memória, e desenhados no mapa.

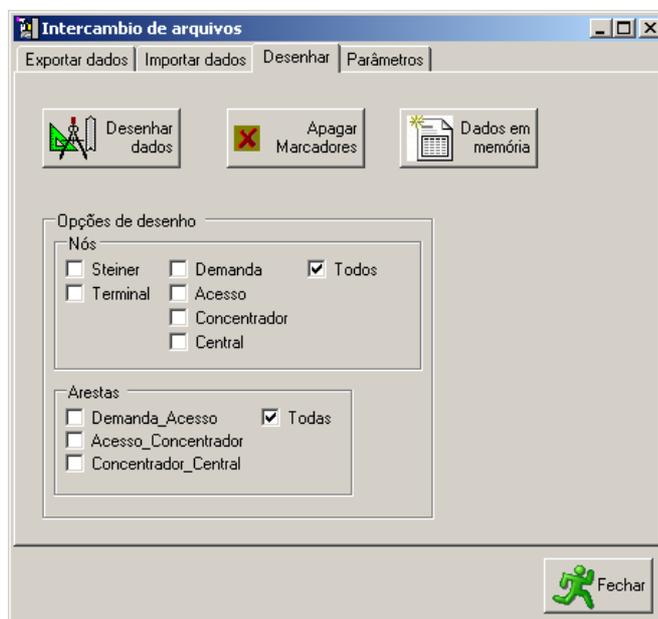


Figura B.3. Opções de desenho no mapa.

O nome do arquivo texto para exportar dados está no campo “Nome do arquivo de destino dos dados”. As configurações de sistema e o nome dos arquivos origem dos dados a serem importados devem estar em um arquivo de configuração INI. O nome deste arquivo INI deve ser informado no campo “Nome do arquivo INI”. O formulário de informação de nomes de arquivos é visualizado na Figura B.4.

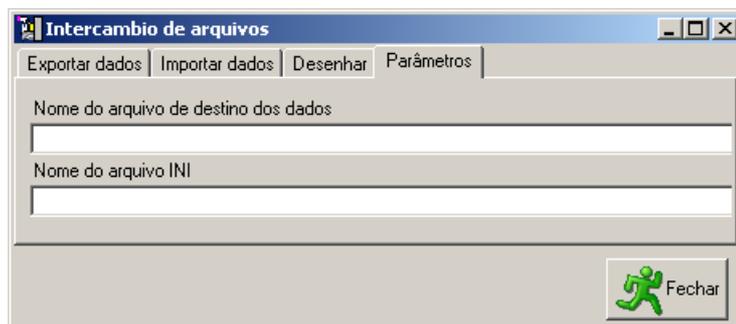


Figura B.4. Formulário para informar nomes de arquivos.

B.2. Algoritmo MAND

Considerando uma linguagem de programação orientada a objetos, é apresentado, resumidamente, na Figura B.5, o diagrama de classes para a implementação do MAND. O diagrama exemplifica de forma esquemática a utilização dos algoritmos de otimização. A classe MAND tem um ou mais níveis (MANDnível), considerando que o nível utiliza um algoritmo otimizador para procurar soluções para o problema proposto. O algoritmo otimizador é representado pela classe Otimizador, a qual é especializada em algoritmos de objetivo único e multiobjetivo. Com esta estrutura, é possível implementar na classe Otimizador um atributo, o qual em um problema de objetivo único se “comporta” como o valor do custo e em um problema multiobjetivo é um valor de referência.

Quando o MAND processa problemas multiobjetivo, utilizando-se a distribuição das soluções não-dominadas na Fronteira de Pareto, o valor de referência é obtido com uma análise das soluções através da definição de uma regra de negócio, e, com isto, selecionando-se apenas uma das soluções. A implementação do “Tomador de Decisão” “*a posteriori*” é na classe MultiObjetivo, a qual é especializada para os algoritmos multiobjetivos utilizados.

Observa-se que o problema tratado pelo algoritmo de otimização é uma especialização da classe Problema, neste caso, um grafo, por ser a estrutura de dados que melhor representa os problemas de rede considerados nesta pesquisa. A classe Grafo calcula a função objetivo por meio de uma associação para a classe Dijkstra.

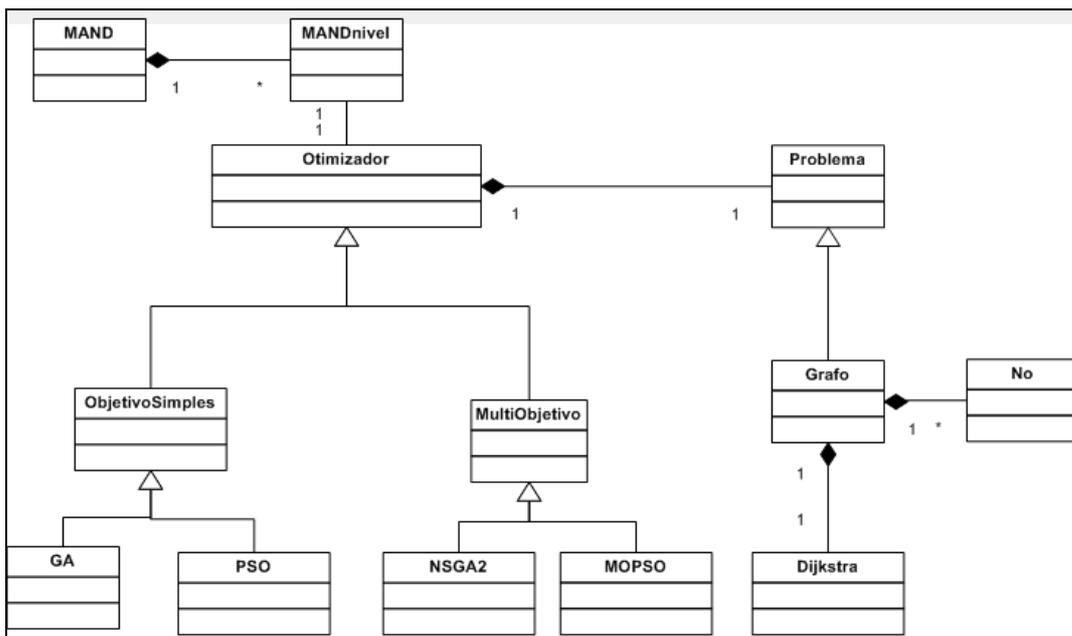


Figura B.5. Diagrama de classes para implementação do MAND.

Esta estrutura do diagrama de classes apresentada atende aos requisitos necessários para testes e implementações do MAND, sendo possível utilizar outros algoritmos auxiliares de otimização com uma especialização da classe Otimizador. Também é possível tratar de outros problemas que porventura não possam ser representados pelo Grafo, isto, é realizado através de uma especialização da classe Problema. Assim, é possível utilizar o MAND com vários algoritmos otimizadores e para buscar soluções a vários problemas de otimização.

Apêndice C

Testes de “Tomador de Decisão”

Para avaliar o algoritmo MAND com algoritmos auxiliares multiobjetivo, e com diferentes “Tomadores de Decisão” foram executados testes com a base de dados abaixo apresentada. Esta base foi construída com menos dados para permitir os diferentes testes dentro do limite de tempo disponível nesta pesquisa. Esses testes foram executados com dois “Tomadores de Decisão” “*a posteriori*”. Os cálculos são executados sobre as soluções da Fronteira de Pareto, as quais são resultantes do processamento do algoritmo multiobjetivo. Após a execução do “Tomador de Decisão”, é retornado o valor de referência encontrado, sendo selecionados para testes os seguintes “Tomadores de Decisão”:

1º.) O primeiro “Tomador de Decisão” define a média de cada objetivo, das soluções da Fronteira de Pareto. Assim, é selecionada a solução mais próxima da média encontrada, e utilizado como valor de referência o valor de custo;

2ª.) No segundo “Tomador de Decisão”, é selecionada a solução com a menor média entre o primeiro e o segundo objetivo (custo por flexibilidade).

C.1. Base de testes

A base de testes criada tem a dimensão apresentada na Tabela C.1. Esta base de dados é menor que as utilizadas nos experimentos, permitindo uma avaliação com mais execuções, pois tem um tempo menor de processamento. Os testes do "Tomador de Decisão" apenas tem o objetivo de demonstrar a utilidade do novo algoritmo com aplicações multiobjetivo.

C.1. Dimensão da Base de Testes.

Demandas (clientes) a serem atendidos	Opções de Coordenadas	Área Aproximada
12	51	0.5 km ²

C.2. Resultados

Os resultados encontrados estão na Tabela C.1, sendo divididos em dois grupos conforme o "Tomador de Decisão" selecionado. Observa-se que não é possível nestes casos apenas comparar as soluções encontradas pelo valor do custo obtido, é necessária a avaliação de ambos os objetivos utilizados. No caso do algoritmo MAND, as soluções encontram-se com um custo maior que o processo individual, pois as soluções tendem a ter mais nós facilitadores (2º. Objetivo), os quais devem proporcionar uma rede mais flexível, mas com um custo mais elevado.

Tabela C.1. Comparação de resultados para diferentes "Tomadores de Decisão". (a) Seleção da solução pela proximidade da média e (b) seleção da solução pela média entre os objetivos.

		Teste 1 - Média próxima				Teste 2 - Melhor média				
		NSGA-2		MOPSO		NSGA-2		MOPSO		
		MAND	Processo Individual	MAND	Processo Individual	MAND	Processo Individual	MAND	Processo Individual	
Level	1	Demandas	12	12	12	12	12	12	12	12
		Facilidades	12	10	12	10	12	12	12	12
		Custo	1.568	1.476	1.593	1.798	4.884	1.429	5.130	1.939
	2	Demandas	12	10	12	10	12	7	12	12
		Facilidades	7	6	7	7	11	7	11	6
		Custo	8.084	6.958	8.612	8.148	22.178	7.528	22.042	7.352
	3	Demandas	7	6	7	7	11	7	11	6
		Facilidades	5	3	6	6	11	7	9	4
		Custo	50.823	31.060	61.212	61.373	122.198	70.767	103.128	53.648
		Custo Total	60.475	39.495	71.417	71.319	149.261	79.724	130.301	62.939
		Tempo CPU seg	1.539,00	245,00	871,00	141,00	899,00	245,00	534,00	143,00

(a)

(b)

Apêndice D

Lista de Publicações

Este apêndice apresenta abaixo a lista das publicações realizadas a partir deste trabalho de pesquisa.

SILVA, H. A.; OLIVEIRA, L. E. S.; BRITTO Jr., A. S. *Proposta de Planejamento em Etapas para Redes Secundárias de Telecomunicações*. GEOINFO 2010-XI Simpósio Brasileiro de GeoInformática. Campos do Jordão, São Paulo, Brasil, Novembro/2010.

SILVA, H. A.; BRITTO JR, A. S.; OLIVEIRA, L. E. S.; KOERICH, A. L. *A Multilevel algorithm for the network design problem*. IECON, 2011, p. 2300-2304.

SILVA, H.A. *Independent Interface for Schematic Diagrams in Geographic Information System*. E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial, Florianópolis, v.4, n.1, 2º. Sem., 2011, p. 82-89.