

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Planejamento da infra-estrutura de redes FWA com algoritmos
genéticos

Aline Paulino Domingos

Tese de Mestrado

Campinas
2005

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Engenharia de Sistemas

Planejamento da infra-estrutura de redes FWA com algoritmos
genéticos

Aluna:

Aline Paulino Domingos

Orientadores:

Prof. Dr. Carlos Magnus Carlson Filho

Prof. Dr. Raul Vinhas Ribeiro

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Raul Vinhas Ribeiro

Prof. Dr. Akebo Yamakami

Prof. Dr. Takaaki Ohishi

Dra. Maria Silvina Medrano

Tese Apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

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

D713p Domingos, Aline Paulino
Planejamento da infra-estrutura de redes FWA com
algoritmos genéticos / Aline Paulino Domingos. --
Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Raul Vinhas Ribeiro, Carlos Magnus Carlson
Filho

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

1. Algoritmos genéticos. 2. Otimização combinatória. 3.
Análise de redes (Planejamento). I. Ribeiro, Raul Vinhas.
II. Carlosn Filho, Carlos Magnus. III. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. IV. Título.

Titulo em Inglês: Planning of the infrastructure of networks FWA with genetic algorithms

Palavras-chave em Inglês: Genetic Algorithms, Optimization, Network FWA planning

Área de concentração: Otimização

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Akebo Yamakami, Maria Silvina Medrano e Takaaki Oshimi

Data da defesa: 21/10/2005

Resumo

As novas tecnologias de transmissão trazem maior flexibilidade e eficiência à rede de acesso, tornando-a capaz de atender o contínuo crescimento de demanda por serviços de telecomunicações. Uma alternativa de evolução conveniente em muitos casos é o provimento de serviços através de redes *wireless* fixas. Estas redes, conhecidas genericamente como *FWA* (*Fixed Wireless Access*), podem reduzir os investimentos da infra-estrutura de acesso. Neste trabalho apresentamos uma nova abordagem para o planejamento de sistemas *FWA* utilizando um modelo de programação linear mista baseado na representação em grafos. Devido à alta complexidade associada à resolução de problemas deste tipo através de métodos exatos, propomos um tratamento baseado em algoritmos genéticos (*GA*). A partir de uma formulação exata, mostramos como especificar os componentes principais de um *GA*: cromossomo, codificação da solução, avaliação de *fitness*, estrutura da população e operadores genéticos (processo de cruzamento e mutação). No problema tratado, as variáveis de decisão foram codificadas para um cromossomo especializado e eficiente. Além disto, o problema da infactibilidade de alternativas geradas foi contornado por um método de descarte. Garante-se também para cada alternativa a maximização da demanda atualizada (o que proporciona maior rentabilidade). Uma aplicação do método é relatada.

Palavras-chaves: Algoritmo Genético, Otimização, Planejamento de rede *FWA*

Abstract

New transmission technologies give more flexibility and efficiency to the Access network, which is supposed to deal with the continuous growth of demand for telecommunication services. Operator companies need to innovate their networks in order to provide broadband services. Therefore, the network planning is essential to achieve the best performance under minimum cost. An alternative of evolution that seems to be interesting is the provision of services through fixed wireless networks. These networks, generically known as *FWA* (*Fixed Wireless Access*), can reduce the infrastructure access cost. In this paper, we present a new approach to the planning of *FWA* systems. First, we develop an optimization model with binary decision variables. The mathematical formulation to the model is also stated. Because solving mixed integer problems through exact methods is a complex task, we adopt a strategy based on genetic algorithms (*GA*). Thus, we show how to specify the main components of a *GA*: chromosome, solution coding, fitness assessment, population structure, and genetic operators (crossover and mutation process), in order to specialize the technique to the *FWA* planning problem. Besides, chromosome feasibility is ensured. An application of the proposed method is also reported.

Key words: Genetic Algorithms, Optimization, *FWA* networks planning

“Uma mente que se abre para uma nova idéia jamais volta a seu tamanho normal”.

Albert Einstein

Este trabalho contou com o apoio financeiro da CAPES.

Agradecimentos

A Deus por permitir a realização de tudo e pela benção recebida a cada dia.

“O semear é sozinho, a colheita é coletiva”. A todos aqueles que tornaram agradável o amadurecimento e o crescimento, o meu muito obrigado!

Ao Carlos e Raul, por apostarem e acreditarem no meu trabalho. Carlos, o seu incentivo e confiança, dedicação incondicional e orientação em cada detalhe fez-me aprender muito.

Aos que estiveram sempre à disposição, e em especial ao Vinícius, que sempre me ajudou a expressar computacionalmente os meus problemas. Sua ajuda foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho. Você foi o meu anjinho.

Aos colegas e profissionais que me guiaram e ensinaram a não cometer os erros pelos quais já haviam passado: Marcos, Joana, Ítalo, Aníbal. Aqueles que se tornaram mais que amigos, foram minha família: Rubia, Luiz e Vânia, Eduardo e Iraídes, Edílson, Aníbal, Alysson, Murilo, Ramon, Rafael, Hugo, Vinicius. O carinho de vocês foi muito importante. Nunca me esquecerei de vocês.

Às meninas da secretária e à Márcia por me ajudarem até no último instante. Beijos carinhosos.

Finalmente, mas não menos importante, agradecer a vocês não seria o bastante - dedico:

Ao meu marido, Rodrigo, pelos sacrifícios, dedicação e pleno amor. Você traz mais leveza e segurança à minha vida.

Aos meus pais, Nair e Osmar e à Tia Zilda por me fazerem sentir maior do que sou.

À avó Cida pelas orações, carinho e confiança.

Aos meus irmãos: Alessandro, Alan e Regiane e à querida Amanda, espero ser exemplo para vocês.

À Rubinha, minha irmãzinha, por todos os momentos alegres e tristes que passamos juntas. Que Deus te abençoe muito.

Sumário

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos e aspectos importantes deste trabalho	2
1.3 Organização do texto	3
Capítulo 2 – Sistemas de Telecomunicações	5
2.1 Introdução	5
2.2 Rede de Telecomunicações	6
2.3 Rede de acesso baseada em cabos metálicos (rede externa)	8
2.4 Rede Wireless	9
2.4.1 Redes Móveis – rede celular	10
2.4.2 Redes FWA – rede sem fio fixa	11
2.5 Serviços	12
2.6 Conclusão	14
Capítulo 3 – Formulação Matemática	15
3.1 Introdução	15
3.2 Hipóteses principais	17
3.3 Formulação do tipo nó-arco	18
3.3.1 Modelo de grafos	18
3.3.2 Estrutura de custos	19
3.3.3 Formulação matemática	19
3.4 Formulação do tipo arco-caminho	26
3.4.1 Modelo de grafos	27
3.4.2 Formulação matemática	28
3.4.3 Extensões	31
3.5 Comparações entre as duas formulações	31
3.6 Conclusão	32
Capítulo 4 – Abordagens de Resolução para o Problema	33
4.1 Introdução	33
4.2 Fluxo em Rede	34
4.3 Métodos Heurísticos	34
4.4 Algoritmos Genéticos	37
4.4.1 Componentes básicos do Algoritmo Genético	39
4.5 Conclusão	47
Capítulo 5 – Aplicações e Resultados	48
5.1 Introdução	48
5.2 Adaptação do Algoritmo Genético	48
5.3 Dados da Rede exemplo	55
5.4 Resultados	57
5.4.1 Análise das soluções	58
5.5 Conclusão	60

Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros	61
Referências	64

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Esquema de uma rede de telecomunicações	7
Figura 2.2 – Elementos da Rede de Acesso Externa.....	9
Figura 2.3 – Componentes de uma rede celular	11
Figura 3.1 – Modelo de grafos para uma rede <i>FWA</i>	19
Figura 3.2 – Modelo detalhado de um site <i>FWA</i> candidato.....	20
Figura 3.3 – Detalhe de um modelo de grafo para um nó de demanda	24
Figura 3.4 – Grafo da rede com abordagem arco-caminho.....	27
Figura 4.1 – Estrutura do Algoritmo genético	38
Figura 4.2 – População Estruturada.....	41
Figura 4.3 – Operador de <i>Crossover</i>	43
Figura 4.4 – Operadores de Mutação Inversiva	44
Figura 5.1 – Representação simbólica de um cromossomo.....	49
Figura 5.2 – População homogênea – sem diversidade populacional	50
Figura 5.3 – População heterogênea – com maior diversidade populacional	51
Figura 5.4 – Representação do PFCM.....	53
Figura 5.5 – Etapas do programa.....	55
Figura 5.6 – Modelo de Rede <i>FWA</i>	56
Figura 5.7 – Rede testada	59

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 – Custo de equipamentos.....	57
Tabela 5.2 – Custos extras de cada site candidato e tipo de antena	57
Tabela 5.3 – Comparação entre métodos e resultados.....	58
Tabela 5.4 – Diferenças entre Prog. SGA1 e Prog. SGA2	59

Lista de Abreviações

ACTS	<i>Advanced Communication Technologies and Services</i>
AG	Algoritmo Genético
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
CATV	<i>Community Antenna Television</i>
CCC	Central de Comutação e Controle
CL	Central local
CRABS	<i>Cellular Radio Access to Broadband Services</i>
CS	<i>Control Station</i>
CT	Central telefônica
ERB	Estação Rádio Base
ETA	Estação Terminal do Assinante
FWA	<i>Fixed Wireless Access</i>
GRASP	<i>Greed Randomized Adaptive Search Procedure</i>
ITU - T	<i>International Telecommunications Union</i>
IU	<i>Central de Comutação Interurbana</i>
LGT	Lei Geral da Telecomunicação
LMDS	<i>Local Multipoint Distribution System</i>
LP	Linhas Privadas
PFCM	Problema de Fluxo com Custo Mínimo
PLIM	Problema Linear Inteiro Misto
PSTN	<i>Public Switching Telephone Network</i>
RNT	Rede Nacional de Telefonia
SMC	Sistema Móvel Celular
UCS	Unidade de Controle do Sistema
USG	Unidade de Supervisão e Gerenciamento
VoD	<i>Vídeo on demand</i> – Vídeo sob demanda
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WLL	Wireless Local Loop

xDSL

Digital Subscriber Line

Notação utilizada nos modelos matemáticos

Formulação nó-arco (Item 3.3)

I	: Conjunto dos nós candidatos a site FWA
l_i	: Comprimento da ligação do site i à CS
φ_i^n	: Custo fixo do equipamento óptico do tipo n para as duas “pontas” do enlace $i - CS$
N_i	: Conjunto dos equipamentos ópticos candidatos no site i
v_i^n	: Custo por unidade de comprimento do enlace $i - CS$ para o equipamento óptico do tipo n
X_i^n	: Variável binária de decisão (implantação do equipamento óptico de tipo n no site i)
R_i	: Conjunto dos equipamentos rádio candidatos no site i
ρ_i^n	: Custo fixo do equipamento rádio do tipo n quando instalado no site i
V_i^r	: Variável binária de decisão (implantação de equipamento rádio do tipo n no site i)
T_i	: Conjunto das torres candidatas no site i
θ_i^t	: Custo fixo da torre do tipo t quando instalada no site i
Z_i^t	: Variável binária de decisão (implantação da torre do tipo t no site i)
M_i^n	: n.º máximo de equipamentos ópticos do tipo n que podem ser instalados no site i
M_i^r	: n.º máximo de equipamentos rádio do tipo r que podem ser instalados no site i
Cd_{max_i}	: Capacidade máxima <i>downstream</i> do site i
Cu_{max_i}	: Capacidade máxima <i>upstream</i> do site i
$Capd_i^n, Capu_i^n$: Capacidade <i>downstream/upstream</i> do equipamento óptico tipo n quando candidato no site i
$Capd_i^r, Capu_i^r$: Capacidade <i>downstream/upstream</i> do equipamento rádio tipo r quando candidato no site i
J_i^t	: Conjunto dos nós de demanda cujo atendimento pode se realizar pela torre t candidata no site i
$y_{j_i}^t$: Fluxo (demanda) que é atendida pela torre t candidata no site i vinda do nó de demanda $j^t \in J_i^t$
fd_j	: Fator multiplicador <i>up-down</i> (superior/inferior) do nó de demanda $j \in J$
y_{i0}	: Fluxo (atendimento da demanda) que sai do site i em direção à CS
yd_{i0}	: Fluxo de demanda saindo do CS para o site i
I_j	: Conjunto dos sites que podem atender o nó de demanda j
d_j	: Demanda total <i>upstream</i> no nó de demanda j
esc_j	: Demanda <i>upstream</i> não atendida no nó de demanda j
μ_j^t	: Máximo da demanda do nó j que pode ser atendida pela torre t candidata no site i

β_j^t	: Custos fixo dos equipamentos necessários no nó de demanda
W_{ji}^t	: Variável binária de decisão (utilização da torre t , site i , para escoamento de demanda do nó j)
J_p	: Conjunto de nós de origem que requerem proteção de tráfego ($J_p \subseteq J$)
j'	: Irmão do nó protegido $j \in J_p$

Formulação arco-caminho (Item 3.4)

S	: Conjunto de sites candidatos
T_s	: Conjunto de antenas candidatas em cada site $s \in S$
P_{st}	: Conjunto de caminhos candidatos (configuração de equipamentos rádio/ópticos) em cada site $s \in S$ para a antena $t \in T_s$
Z_{stp}	: Variável de decisão binária utilizada, em cada site $s \in S$, antena $t \in T_s$, para representar o caminho (configuração) $p \in P_{st}$
C_{stp}	: Custo da configuração $p \in P_{st}$
θ_{st}	: Custo fixo da antena $t \in T_s$
R_s	: Conjunto de equipamentos rádio candidatos em cada site $s \in S$
ρ_{sr}	: Custo fixo de equipamento rádio $r \in R_s$
O_s	: Conjunto de equipamentos ópticos candidatos em cada site $s \in S$
ϕ_{so}	: Custo fixo de equipamento óptico $o \in O_s$
v_{so}	: Custo, por unidade de distância, do <i>link</i> entre o site $s \in S$ e a CS (Estação de Controle) usando o equipamento óptico
l_s	: Comprimento do <i>link</i> óptico entre cada site $s \in S$ e a CS
V_{sr}	: Quantidade de equipamentos rádio $r \in R_s$ instalados no site $s \in S$
X_{so}	: Quantidade de equipamentos ópticos $o \in O_s$ instalados no site $s \in S$
J	: Conjunto de nós de demanda
S_j	: Conjunto de sites onde há uma antena que pode servir a demanda $j \in J$
T_{sj}	: Conjunto de antenas em cada site $s \in S_j$
Y_{jst}	: Fluxo (de demanda) que vem do nó $j \in J$ e é atendido pela antena $t \in T_{sj}$ (Y_{jst} é uma variável real, isto é, $Y_{jst} \geq 0$)
Y_{stp}	: Fluxo (de demanda) que é conduzido para a CS através do caminho $p \in P_{st}$ (Y_{stp} é uma variável real, isto é, $Y_{stp} \geq 0$)
J_{st}	: Conjunto de nós de demanda que pode ser servido pela antena $t \in T_s$ ($J_{st} \subseteq J$)
U_{jst}	: Demanda máxima $j \in J$ que pode ser atendida pela antena $t \in T_{sj}$ direto da antena
Cap_{stp}	: Capacidade do caminho (configuração) $p \in P_{st}$
Cap_{sr}	: Capacidade do equipamento rádio $r \in R_s$
Cap_{st}	: Capacidade da antena $t \in T_s$

- fd_j : Fator multiplicador *up-down* (superior/inferior) da demanda do nó $j \in J$
- $Cap_{d_{stp}}$: Capacidade *downstream* do caminho $p \in P_{st}$
- W_{jst} : Variável de decisão binária que indica a possibilidade de atendimento da demanda do nó $j \in J$ pelo site $s \in S_j$, utilizando a antena $t \in T_s$

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

A privatização do setor de telecomunicação, o surgimento de novos serviços, o crescimento do número de usuários e o aumento da competição entre empresas operadoras vêm impondo mudanças no mundo das Telecomunicações. As empresas têm destinado uma parte de seus orçamentos para inovar e melhorar as suas redes, de modo a prepará-las para o fornecimento destes serviços de maneira abrangente e barata.

Uma das principais restrições no desempenho dos sistemas de telecomunicações está relacionada à capacidade de transmissão na porção denominada *rede de acesso*. A infra-estrutura de grande parte dessas redes não permite que elas suportem as taxas de transmissão exigidas por novos serviços, bem mais elevadas que as taxas dispensadas para o serviço de voz.

Para contornar essa limitação, têm sido usadas alternativas baseadas em cabos metálicos (xDSL – Linhas Digitais de Assinante), fibra óptica (FTTx – Fibra até a esquina, ou até o prédio) ou híbridos (HFC – Fibra e cabo coaxial). Em alguns casos, utilizam-se sistemas via satélite (LEO – satélites de órbita baixa).

Uma alternativa que tem se tornado mais comum são os sistemas *Wireless* (sem fio) celulares fixos, capazes de fornecer serviços de banda larga a usuários residenciais, agrupamentos (condomínios), além de pequenas e médias empresas. Estes sistemas são denominados genericamente de FWA (*Fixed Wireless Access*, ou Acesso Sem Fio Fixo).

O crescimento impressionante da demanda por serviços de Internet e multimídia, bem como a tendência para as redes convergentes, vem criando um ambiente competitivo entre as empresas operadoras e impondo a expansão e evolução de suas redes. A rede de acesso é um dos elementos mais afetados, pois ela é a responsável pela conexão entre o usuário e sua respectiva central, além de ser a maior parte dentre os componentes do sistema de telecomunicações.

Em qualquer caso, o planejamento da rede de acesso é sempre importante, pois ela concentra boa parte dos investimentos em infra-estrutura. Além disso, trata-se de um problema complexo, com várias questões simultâneas. Em geral, o planejamento da infra-estrutura de acesso consiste em determinar a localização e a dimensão de equipamentos, bem como especificar quais usuários serão servidos por esses equipamentos.

1.2 Objetivos e aspectos importantes deste trabalho

Este trabalho tem como objetivo geral propor um método de apoio ao planejamento da parcela da rede de acesso constituída por sistemas FWA. Especificamente, os objetivos são:

- a) desenvolver e validar uma formulação eficiente para o problema de planejamento de infra-estrutura de redes FWA;
- b) adaptar o modelo para resolução por meio de um Algoritmo Genético (AG);
- c) melhorar o AG, adicionando-lhe características específicas do problema tratado;

d) aplicar o método heurístico a redes de tamanho real, comparando as soluções obtidas, em termos de desempenho computacional e de qualidade, com aquelas provindas da resolução por método exato.

Dois aspectos importantes deste trabalho podem ser imediatamente destacados. O primeiro refere-se ao desenvolvimento do modelo matemático de otimização. Em geral, problemas que envolvem redes são modelados de maneira que as variáveis de decisão estejam associadas aos nós e arcos. Esta abordagem costuma produzir formulações de interpretação direta, mas cuja resolução pode ser bastante difícil, dada a enorme quantidade de combinações possíveis. Neste trabalho, desenvolve-se uma formulação do tipo arco-caminho, que acaba por economizar variáveis de decisão. O segundo aspecto diz respeito ao método heurístico elaborado para a resolução do problema. A heurística, baseada em AG, precisa contornar a existência de restrições. Para isso, o método incorpora conhecimento sobre o problema, além de propor uma codificação especializada que traduz o vetor de variáveis de decisão em um cromossomo hierarquizado. As abordagens estão co-relacionadas, ou seja, o método heurístico é aplicado ao problema matemático produzido a partir da modelagem “econômica” em variáveis.

1.3 Organização do texto

A apresentação da rede de acesso e seus componentes, para a porção tradicional e para a porção FWA, é feita no capítulo 2. Também são apresentadas neste capítulo comparações entre as redes convencionais e as redes *wireless*, os serviços oferecidos e a tecnologia de acesso. O objetivo do capítulo é situar o leitor com respeito ao ambiente e seus componentes principais.

No capítulo 3, formulações matemáticas para o problema central deste trabalho são desenvolvidas. As formulações originam problemas do tipo linear misto (PLIM). O critério de otimização é o de minimização de custo.

Os aspectos teóricos das abordagens de resolução para o problema são relatados no capítulo 4. Os fundamentos de algoritmos genéticos e dos seus componentes, que servem de base ao método heurístico proposto, são discutidos.

As redes que servem de exemplo para validação da proposta, especializações da heurística e outras alterações são descritas no capítulo 5. Os resultados de planejamento obtidos pela resolução das formulações exatas e pela aplicação do método heurístico são também comparados.

O capítulo 6 conclui o trabalho, discutindo os resultados obtidos e apontando direções de futuras pesquisas.

Capítulo 2

Sistemas de Telecomunicações

O objetivo deste capítulo é a descrição geral do sistema de telecomunicações, com ênfase na rede de acesso sem fio, que é o tema principal deste trabalho.

São relacionados também os principais serviços que podem ser fornecidos por meio da rede de telecomunicações.

2.1 Introdução

A palavra telecomunicação é derivada de dois radicais gregos: “*tele*”, que significa “distância”, e “*communicatio*”, que significa “comunicação”. Por isto, telecomunicação é a “comunicação à distância” (MICHAELIS, 1998).

Segundo a Lei Geral da Telecomunicação - LGT, a telecomunicação “é a transmissão, emissão ou recepção, por fio, radioeletricidade, meios ópticos ou qualquer outro processo eletromagnético, de símbolos, caracteres, sinais, escritos, imagens, sons ou informações de qualquer natureza” (LGT, ART. 60, § 1º, LEI Nº 9.472/97, 1997).

Os meios de transmissão empregados em telecomunicações constituem o que se denomina uma “rede de telecomunicações”.

2.2 Rede de Telecomunicações

De forma genérica, a rede de telecomunicações fornece diversos serviços, dentre eles a transmissão de dados, voz, imagem e serviços digitais, a transmissão de dados a velocidades maiores, serviços de linhas privadas não comutadas (LP), sinais de TV de alta definição, vídeo sob demanda, videoconferências, acesso remoto de dados e transferência de informações via multimídia.

As redes tradicionais, baseadas em cabos metálicos, não suportam grande parte dos serviços listados acima. Além disto, apresentam alto custo de instalação. As limitações quanto ao acesso a serviços de banda larga vêm sendo contornadas pelo uso de xDSL (*Digital Subscriber Line*), que permite a transmissão de taxas mais elevadas.

O sistema de fibra óptica é um modelo adequado para o acesso a serviços de banda larga, pois a fibra permite tráfego simultâneo de grande quantidade de sinais em elevada velocidade, sendo o custo de implantação e manutenção equivalente ao dos cabos metálicos.

Os sistemas sem fio (*wireless*), tanto os de acesso fixo como os de acesso móvel, apresentam facilidade e rapidez de instalação e expansão. Um dos atrativos destes sistemas é a variedade de novos serviços que podem ser oferecidos ao usuário. Como limitação, pode-se citar a dificuldade de propagação em ambientes com obstáculos e interferências.

A figura 2.1 apresenta os principais componentes de uma rede de telecomunicações.

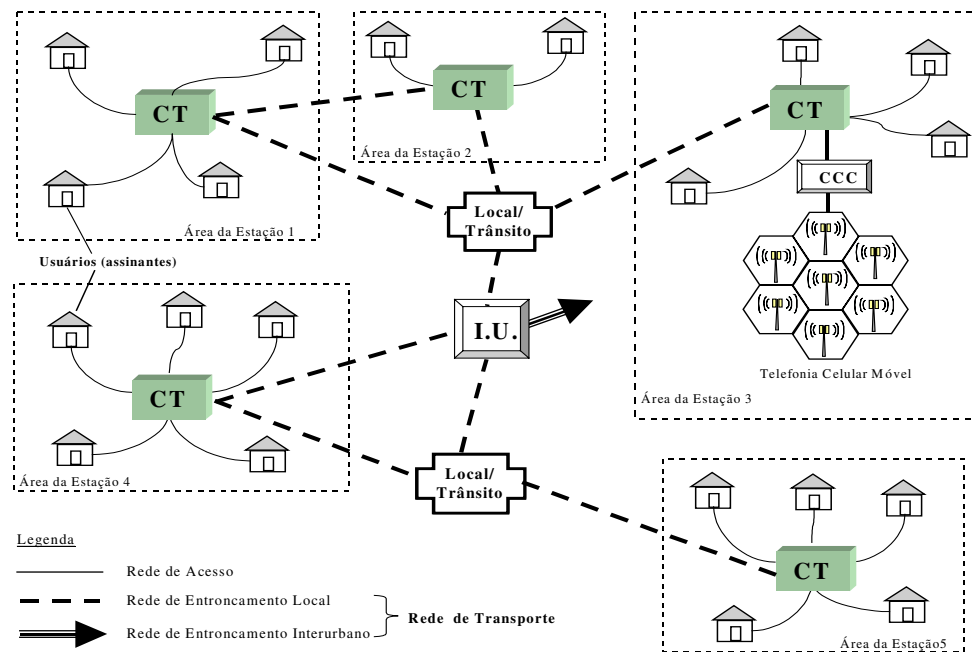


Figura 2.1: Esquema de uma Rede de Telecomunicações (BANOV, 2004).

Em função da capacidade de processamento, tecnologia empregada e critérios de planejamento, a rede pode ser dividida em três níveis hierárquicos: *Rede de Acesso*, *Rede de Entroncamento Local* e *Rede de Entroncamento Interurbano*, conforme mostrado na figura 2.1. A seguir descrevemos cada um destes segmentos.(DESOUZA (1999)).

A Rede de Acesso conecta o usuário à sua respectiva central local, geralmente por meios de cabos metálicos (de cobre). Uma central local conecta usuários de uma mesma região. Para que usuários de regiões distintas se comuniquem são estabelecidas ligações entre estas centrais locais – são os circuitos-troncos. Uma central telefônica abriga uma ou mais centrais locais.

A Central de Comutação localiza-se nas centrais telefônicas. Ela realiza a conexão entre os usuários: identifica e encaminha a chamada, supervisiona e controla a comutação.

A Rede de Transporte é responsável pela conexão física entre centrais telefônicas. Ela se subdivide em rede de entroncamento local e interurbana.

Em um sistema que possui uma elevada quantidade de usuários torna-se necessária a aplicação de uma central de trânsito, que agrupa o tráfego (fluxo) das outras centrais locais (de uma região, cidade, estado, ou país) antes de encaminhá-la. Desta forma, será otimizada a transmissão.

Hierarquicamente classificadas por sua cobertura, as centrais de trânsito podem ser internacionais ou interurbanas. Diversos sistemas de transmissão podem ser usados, dependendo das distâncias e do tráfego. Podem ser usadas fibras ópticas, enlaces de microondas e até mesmo conexões por satélite.

2.3 Rede de acesso baseada em cabos metálicos (rede externa)

A Rede Externa, juntamente com os sistemas sem fio de telefonia celular, fixa ou móvel, compõe a Rede de Acesso, que conecta cada usuário à sua central de comutação.

A rede externa liga o usuário às suas respectivas estações telefônicas através de cabos metálicos. Ela é subdividida em duas redes, o que pode ser visto na figura 2.2.

Uma das redes é chamada de “primária” (ou rede de alimentação). Ela é composta por cabos de maior capacidade, e liga as centrais a pontos de distribuição intermediários, os “nós de acesso”.

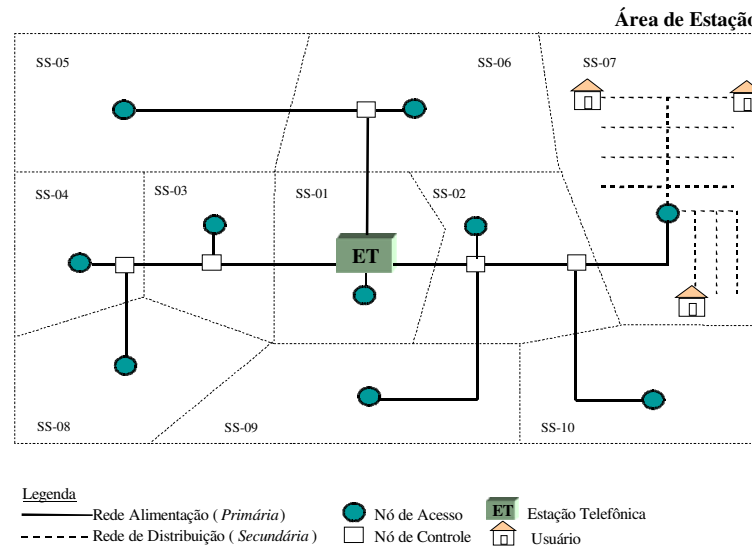


Figura 2.2 – Elementos da Rede de Acesso Externa (DESOUSA E CARLSON, 2000).

A rede de distribuição (ou secundária) interliga o usuário, com fios e cabos de menor capacidade, ao nó de acesso e, por conseguinte, à rede de alimentação.

2.4 Rede *Wireless*

Uma alternativa de evolução conveniente para as redes de acesso é o uso de redes *wireless*. Estas redes reduzem os investimentos da infra-estrutura de acesso, pois não exigem que os usuários finais estejam conectados por meio de cabos de cobre ou ópticos.

As redes *wireless* distinguem-se das convencionais em alguns aspectos. Por exemplo, a área de cobertura é dividida em áreas menores denominadas “células”, que contêm antenas, transmissores de baixa potência e equipamentos rádio e óptico. A divisão das células proporciona aumento da capacidade e reduz a interferência. A transmissão normalmente efetuada é a *omnidirecional* - cobertura circular que atinge todas as direções.

2.4.1 Redes Móveis – rede celular

Redes de acesso celular móvel, por sua vez, adicionam a prerrogativa de mobilidade não suportada pelas redes “cabeadas” ou *wireless* fixas (SALLES, 1998).

Características básicas da rede, como reuso de freqüência, mobilidade, flexibilidade e limitações por interferências são discutidas em (GUIMARÃES (1998)):

- Reuso de freqüência da célula: as freqüências designadas para uma célula são aplicadas em células diferentes, desde que a uma distância que evite a chamada *interferência cocanal* (interferência entre canais que usam a mesma faixa de freqüência).
- Mobilidade: é a capacidade de deslocamento do usuário. Quando o usuário ultrapassa o limite de transmissão da sua célula (isto é, quando o nível de sinal da célula torna-se inferior ao da célula vizinha), o sistema imediatamente conecta a BSC (*Base Station Controller*) para identificar a nova célula de auxílio ao usuário. A troca de BSC responsável pelo sinal só será efetuada se a célula a ser trocada tiver canais disponíveis para que a chamada seja transferida. Esta transferência é conhecida como *handoff* ou *handover*. O deslocamento entre distintas células atendidas por duas diferentes operadoras é chamado de *roaming*.
- Interferência: é o limitante de desempenho da rede *wireless*, podendo ser causada por uma célula vizinha que opere na mesma freqüência. Em redes *wireless* há dois tipos de interferências: *interferência cocanal* (o mesmo conjunto de canais, devido ao reuso de freqüências) e *interferência de canal adjacente* (sinais de canais adjacentes, em freqüência, ao canal considerado, podendo ocorrer dentro de um mesmo grupo).

Segundo WEBB, 1998, várias arquiteturas são possíveis para os sistemas *celulares*, sendo os seus elementos básicos:

- Central de Comutação e Controle – CCC : controla o acesso fixo sem fio e a conexão com a rede telefônica fixa PSTN (*Public Switching Telephone Network*).
- Estação Rádio Base – ERB: é a responsável pela conversão entre a infra-estrutura de fibra óptica e a infra-estrutura *wireless*. Também permite que os usuários conectados à estação base possam se comunicar com os outros sem precisar entrar na infra-estrutura de fibra óptica.

Os componentes da rede celular são mostrados na figura 2.3.

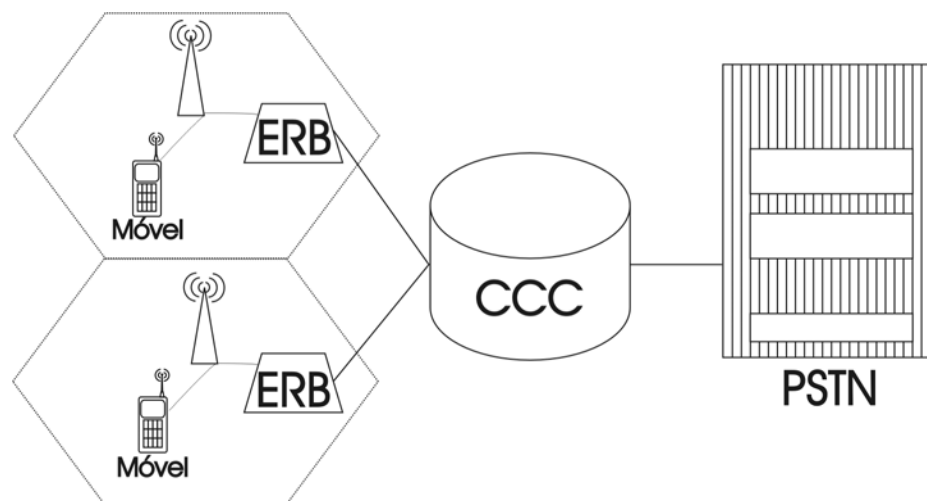


Figura 2.3 –Componentes da rede celular

2.4.2 Redes FWA – rede sem fio fixa

Diferentemente do telefone celular, com o qual o usuário pode mover-se de célula a célula, o usuário de uma rede FWA permanece em um lugar fixo dentro de uma única célula DORN (2001).

Numa rede FWA, os *usuários* (nós de demanda) são filiados a *sites* (ERBs) por meio de interface aérea. Os sites, por sua vez, são conectados a uma *estação de controle* (CS – *Station Control*, com função análoga à das BSC em sistemas celulares móveis), normalmente utilizando cabos ópticos (ACTS (1999b)). No *site*

existem antenas, transceptores e equipamentos ópticos: todos devem ser dimensionados de acordo com a demanda pela qual o *site* é responsável.

As grandes limitações do sistema estão relacionadas à interferência, à necessidade de uma linha de visada direta, e aos fenômenos atmosféricos, em especial a chuva, que afetam consideravelmente a propagação nas faixas de frequência utilizadas. Outra desvantagem da FWA é o uso de um grande número de transmissores, principalmente quando se atendem grandes áreas. Além disso, existe falta de padronização internacional e indefinição quanto ao espectro de frequência a ser utilizado¹ (ACTS (1999a)).

Redes FWA permitem o oferecimento de serviços de telecomunicações tradicionais (voz) até os de banda larga para uso residencial e de pequenas empresas. Uma das aplicações mais comuns é a Internet sem fio. Neste caso, o tráfego na FWA é geralmente maior numa das direções do enlace, o *upstream* (sentido do usuário para a CS).

Dentre as principais vantagens do sistema, encontram-se (ACTS (1999c)):

- baixos custos de infra-estrutura e de manutenção do sistema;
- rápida implementação e rápido retorno do investimento;
- crescimento do sistema de acordo com a demanda de usuários.

2.5 Serviços

O serviço de telecomunicações ocorre através da transmissão de voz e de outros sinais entre pontos determinados. É oferecido por um provedor ao usuário.

¹ Conforme definido pela ITU-T e FCC.

A velocidade de transmissão é um dos atributos primordiais do serviço, sendo normalmente expressa em *Quilobits* ou *Megabits por segundo*. Quando a taxa de transmissão *downstream* (da CT para o usuário) e *upstream* (do usuário para a central) são iguais, o serviço é “simétrico”; caso contrário, o serviço é “assimétrico”.

Os serviços de banda estreita possuem taxa de transmissão baixa, para os serviços de voz e de dados em velocidade baixa. São exemplos: telex, Internet discada, fax, comunicação móvel. Alguns têm a forma de serviços de mensagens (transmissão de textos). Os telefones celulares digitais utilizam-se dos serviços de mensagens SMS (*Short Message Service*) e CBS (*Cell Broadcast Service*) (BANOV (2005)).

Os serviços de banda larga exigem que a rede tenha capacidade elevada na sua taxa de transmissão. Incluem-se nesta categoria os serviços:

- CATV (*Community Antenna Television*): serviço de propagação de sinais, onde vários canais de imagem e som estão simultaneamente à disposição do usuário;
- Internet de alta velocidade: os provedores oferecem o serviço com conexão de alta velocidade;
- VoD (vídeo sob demanda): o serviço a ser transmitido é pré-definido e sua programação é controlada pelo usuário;
- Teleworking: é uma forma flexível de trabalho que pode atender a um leque enorme de atividades, principalmente aquelas que possam apresentar um vínculo remoto do empregado com o empregador ou com o tradicional lugar de trabalho. *Desktops on-line* são instalados na residência do empregado disponibilizando telefonia, fax, e-mail, vídeo-conferência, etc.;
- Tele-Educação: a rede deve ser de alta velocidade para transmitir textos, figuras, animação, vídeos, clipes e pesquisas, pois seu objetivo é a educação à distância;
- Dados a alta velocidade: serviços de acesso interativo pelos quais o usuário pode executar compras (*home shopping*), movimentações bancárias (*home banking*) e outras operações;

- Tele-jogos: serviços com capacidade de suportar animação em 3D, são jogos disponíveis em *sites da Internet*;
- Vídeo-fone: além da transmissão de voz, no vídeo-fone ocorre a transmissão da imagem dos dois usuários envolvidos na conexão. A comunicação é ponto-a-ponto, bidirecional e em tempo real.

É preciso observar que nem todos os serviços de banda larga citados são suportados pelas redes FWA (aqueles envolvendo imagens, como CATV, VoD e vídeo-fone).

2.6 Conclusão

Este capítulo apresentou os elementos que compõem a Rede de Telecomunicações, seja ela convencional ou sem fio. A rede de acesso, particularmente aquela que utiliza tecnologia sem fio, foi discutida com maior ênfase.

Capítulo 3

Formulação Matemática

Este capítulo apresenta as principais hipóteses adotadas para a modelagem do problema de planejamento de redes FWA. Em seguida, desenvolvem-se duas formulações matemáticas (nó-arco e arco-caminho), listando-se as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

3.1 Introdução

Planejar a evolução da rede de acesso é sempre uma tarefa complexa, uma vez que existem diversos problemas simultâneos. No caso de redes FWA, o planejamento da infra-estrutura consiste em resolver, sob o critério de mínimo custo, as seguintes questões:

- a) localização: considerado o universo de locais candidatos à instalação de sites, quais serão os escolhidos ?
- b) filiação: cada site escolhido será responsável pelo atendimento de quais usuários ?
- c) dimensionamento: qual a capacidade dos equipamentos a serem instalados em cada site ?

O tratamento destas questões por meio de técnicas de otimização requer a resolução de problemas matemáticos combinatórios. As técnicas tradicionais de resolução desses problemas não costumam ser eficientes, pois são muito sensíveis à quantidade de variáveis de decisão (que rapidamente chega à ordem de centenas). Em outras palavras, obter uma alternativa de planejamento para a rede pode consumir muito tempo.

Assim, é importante trabalhar com um modelo de otimização no qual haja economia de variáveis de decisão. A modelagem usual deste tipo de problema apóia-se em formulações do tipo linear misto, buscando aproveitar a estrutura de grafo inerente às redes. As formulações costumam ser denominadas “nó-arco”, sendo as variáveis binárias de decisão associadas aos arcos.

Neste trabalho, elabora-se uma formulação alternativa, do tipo “arco-caminho”. Neste caso, pode-se estabelecer uma variável binária de decisão para cada configuração completa de equipamentos. Dependendo das características do problema, a formulação arco-caminho pode necessitar de menor quantidade de variáveis.

Na literatura, o planejamento de sistemas *wireless* tem sido objeto de distintas abordagens. Uma boa análise de aspectos econômicos, sem focar nenhuma tecnologia em particular, é encontrada em (GAVISH E SRIDHAR (1995)). A interconexão de *base stations* com o restante do sistema de telecomunicações também tem sido estudada (DESOUZA *et al.*, (2000a)); (FENTE *et al.*, (1997)). Existem trabalhos voltados especificamente a uma das tecnologias típicas de redes FWA: o LMDS. Sob o consórcio europeu ACTS (*Advanced Communication Technologies and Services*), o grupo de trabalho CRABS (*Cellular Radio Access to Broadband Services*) realizou variados estudos prospectivos, inclusive em nível tecnológico, com resultados publicados sob a forma de “Deliverables” (ACTS 1999a, 1999b e 1999c). Em (STAMATELOS E KOUKOULIDIS (2000)), possibilidades de interligação de sites LMDS ao *core network* são analisadas, enquanto em (UFONGENE (1999)) um modelo de custos é desenvolvido e exemplificado pela aplicação ao planejamento de células LMDS.

3.2 Hipóteses principais

Serão adotadas as seguintes hipóteses para a elaboração dos modelos matemáticos:

a) serviços: considera-se aqui a prestação de um único perfil de serviço, do tipo simétrico;

b) demandas: as demandas são supostas já calculadas, sendo expressas em quantidade de canais (de 2 Mb/s ou de 8 Mb/s, por exemplo). Sendo o perfil de serviço simétrico, os valores de demanda no sentido *downstream* são iguais aos daqueles no sentido *upstream*;

c) candidatos a site: constituem dado de entrada para o modelo, em quantidade livre;

d) cobertura, *availability* e outros aspectos de propagação: são supostos quantificados previamente, sendo expressos no modelo por um valor percentual associado a cada par (ponto de demanda, site candidato). Assim, um mesmo ponto de demanda pode ser coberto por mais de um candidato a site, cada um com a sua “eficiência”, caracterizando o *overlapping*;

e) alocação de freqüências: é suposta já realizada, de maneira que as capacidades totais (máximas) de cada candidato a site são conhecidas e fixas para o modelo. Se o resultado da escolha efetiva dos sites exigir realocação de freqüências, o modelo poderá ser reutilizado com as capacidades atualizadas;

f) equipamentos do site: admitem-se dois tipos: rádio e ópticos. Além disso, o modelo considera a presença da torre. O equipamento rádio é usado para a ligação site-usuário, em ambos os sentidos. Têm suas capacidades expressas na mesma unidade que a demanda. Sob a hipótese de perfil simétrico único, apenas a maior entre as capacidades *dowstream* e *upstream* (normalmente esta última) precisa ser considerada. O modelo deve admitir a instalação de uma quantidade variável de equipamentos rádio por site, limitada à capacidade total do site, bem como o uso de diferentes equipamentos rádio num mesmo site. Os equipamentos ópticos são utilizados para a ligação do site com o restante do sistema. Para este trabalho, essa

ligação ocorrerá através de fibras ópticas. Assim como no caso acima, equipamentos ópticos em quantidade variável e/ou distintas capacidades podem ser instalados em um site. Já a torre representa, genericamente, a infra-estrutura do próprio site e também sua capacidade de atendimento (expressa na mesma unidade que a demanda). O modelo admite que torres de diferentes alturas (e portanto, possivelmente, de diferentes capacidades e possibilidades de atendimento de usuários) sejam candidatas à implantação, mas apenas uma delas será efetivamente adotada se o site for escolhido como abrigo de sistemas FWA. Assim, o atendimento de um ponto de demanda por um determinado site pode ser possível ou não, dependendo da torre adotada.

g) interligação com o restante do sistema: as ligações do site à estação de controle (CS) serão ópticas, ponto-a-ponto (estrela simples). O modelo assume conhecida a distância entre cada site e a CS e, portanto, assume conhecida a quantidade de fibra óptica necessária (por equipamento) a essa interligação.

h) outras hipóteses:

h.1) não há discretização de equipamento rádio por setor (de círculo) em cada célula. Assim, a capacidade de cada equipamento pode ser usada para o atendimento de qualquer usuário da célula (em outras palavras, não se sabe qual usuário de um site usa qual equipamento desse site);

h.2) não é considerada a existência de equipamentos do tipo repetidores/refletores.

3.3 Formulação do tipo nó-arco

3.3.1 Modelo de grafos

Redes de telecomunicações podem geralmente ser representadas por meio de grafos (AHUJA, MAGNANTI E ORLIN, (1993)). Para o problema aqui tratado, o grafo pode ser como o da Figura 3.1.

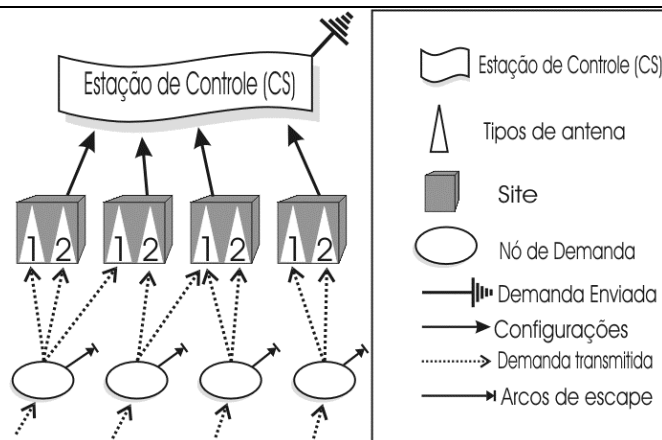


Figura 3.1 – Modelo de grafos para uma rede FWA.

No grafo, os nós de demanda oferecem seu fluxo à rede; o fluxo, utilizando e respeitando as capacidades dos equipamentos instalados (limitantes impostos aos arcos), atinge a estação de controle CS (ou seja, a demanda é atendida).

Objetiva-se selecionar a alternativa de menor custo que garanta o atendimento da demanda no nível desejado (ou maior).

3.3.2 Estrutura de custos

Admite-se que todas as demandas são inteiramente apresentadas e que todos os equipamentos e infra-estrutura são implantados num único estágio de planejamento. Assim, trabalha-se com os valores presentes de todos os custos, os quais podem ser calculados a partir dos valores associados à aquisição, implantação, operação e manutenção.

3.3.3 Formulação matemática

De uma maneira geral, o modelo pode ser descrito como:

Minimizar:

Custo total do atendimento da demanda por sistemas FWA (torres, equipamentos rádio, equipamentos ópticos, equipamentos nos usuários, ligação sites – CS)

Sujeito a:

Restrições de capacidade de atendimento dos sites

Restrições de capacidade dos equipamentos ópticos e rádio

Restrições de balanço de fluxo em cada nó do grafo (sites e nós de demanda)

Restrições de controle de filiação usuário – site

Restrições adicionais

Os custos estão associados à implantação de equipamentos em cada site, na CS e nos usuários. Entende-se que os custos na CS podem ser, por sua vez, repassados para o site (considerando como custo do equipamento óptico as duas “pontas”) e para o usuário (custo de comutação, por exemplo) (CARLSON E AUTHIÉ (2001b)).

A Figura 3.2 detalha os componentes de um site candidato.

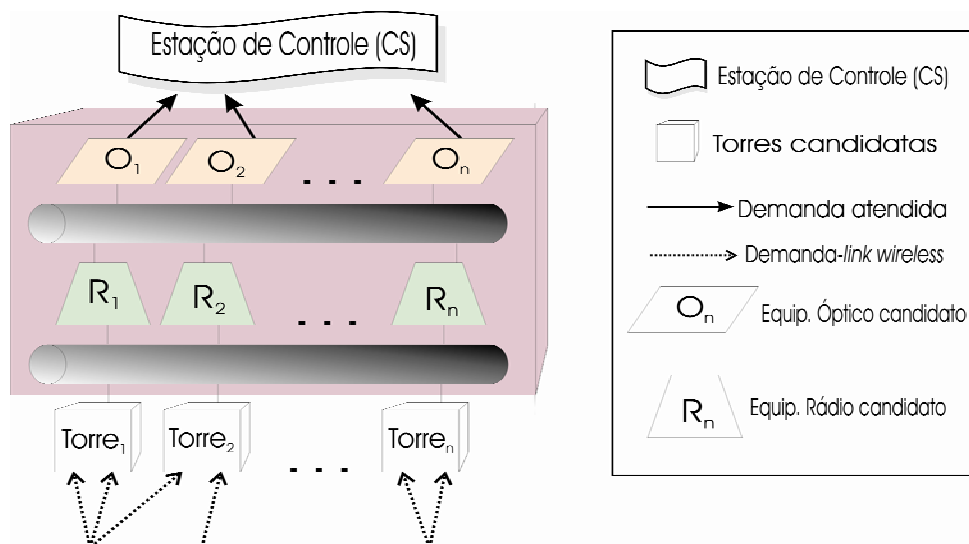


Figura 3.2 – Modelo detalhado de um site FWA candidato.

Para os equipamentos ópticos em cada site, computam-se os seus custos (somente fixos). Para a ligação com a CS, computa-se o custo da ligação (por meio de fibras ópticas) de cada equipamento. Então, o custo total dos equipamentos ópticos é dado por²:

$$\sum_{i \in I} \sum_{n \in N_i} \{ \varphi_i^n + (v_i^n \cdot l_i) \} \cdot X_i^n \quad 3-1$$

O custo dos equipamentos rádio em cada site também deve ser computado. Então o custo total dos equipamentos rádio é:

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R_i} (\rho_i^r \cdot v_i^r) \quad 3-2$$

A infra-estrutura do site tem seus custos computados através da torre a ser instalada para transmissão e recepção. Assim, em última análise a existência de uma torre significa a existência do próprio site.

Então o custo total de implantação dos sites é:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (\theta_i^t \cdot z_i^t) \quad 3-3$$

É possível também computar os custos dos equipamentos instalados nas dependências dos usuários.

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I_j} \sum_{t \in T_i} (\beta_{j_i} \cdot y_{j_i}) \quad 3-4$$

As principais *restrições* impostas na busca da solução de mínimo custo estão relacionadas a:

² A notação utilizada nesta e em todas as demais expressões é definida na Lista de Notações no início deste texto.

- Equipamentos (limitações na quantidade de torres, de equipamentos ópticos e rádio, capacidades dos equipamentos);
- Balanço de fluxo em cada nó do grafo (sites e nós de demanda);
- Controle de filiação dos nós de demanda aos sites.

Para cada site candidato, o modelo entende que no máximo uma torre será escolhida, dentre as candidatas à instalação naquele site:

$$\sum_{t \in T_i} z_i^t \leq 1, \quad \forall i \in I \quad 3-5$$

Por outro lado, é preciso garantir que só existe equipamento óptico (um ou mais) no site se ele existir. No modelo, a existência do site está associada à implantação de uma torre. Assim:

$$\sum_{t \in T_i} z_i^t \geq x_i^n, \quad \forall n \in N_i, \quad \forall i \in I \quad 3-6$$

Da mesma maneira, é preciso garantir que só existe equipamento rádio (um ou mais) no site se ele (uma torre) existir:

$$\sum_{t \in T_i} z_i^t \geq v_i^r, \quad \forall r \in R_i, \quad \forall i \in I \quad 3-7$$

A capacidade dos equipamentos ópticos a instalar num site deve ser suficiente para suportar o tráfego enfrentado pelo site. Sob a hipótese de perfil de serviço único simétrico, a capacidade de um site é a soma das capacidades de seus equipamentos rádio.

A capacidade total dos equipamentos ópticos não pode ser inferior à capacidade total dos equipamentos rádio:

$$\sum_{n \in N_i} (\text{Cap}_i^n \cdot X_i^n) \geq \sum_{r \in R_i} (\text{Cap}_i^r \cdot V_i^r), \quad \forall i \in I \quad 3-8$$

Na verdade, basta que a capacidade óptica supere a demanda efetivamente atendida pelo site. Tem-se portanto:

$$\sum_{n \in N_i} (\text{Cap}_i^n \cdot X_i^n) \geq y_{i0}, \quad \forall i \in I \quad 3-9$$

Embora exista a possibilidade de instalar vários equipamentos rádio no mesmo site, é preciso obedecer ao limite de quantidade desses equipamentos no mesmo site. A formulação aqui apresentada entende que esse valor-limite é um dado de entrada, fornecido em termos de capacidade do site (em Mb/s, por exemplo). Assim, é possível modelar a restrição de banda de cada operador licenciado. Deste modo:

$$\sum_{r \in R_i} (\text{Cap}_i^r \cdot V_i^r) \leq C_{\max_i}, \quad \forall i \in I \quad 3-10$$

Naturalmente, a capacidade dos equipamentos rádio de um site deve ser suficiente para atender a demanda que lhe é oferecida:

$$\sum_{r \in R_i} (\text{Cap}_i^r \cdot V_i^r) \geq \sum_{t \in T_i} \sum_{j' \in J_i'} y_{j'i}, \quad \forall i \in I \quad 3-11$$

O balanço (conservação) de fluxo em cada site e em cada nó de demanda é obrigatório num modelo de grafos. Em acordo com a hipótese de que mais de uma torre pode ser candidata em cada site, tem-se:

$$\sum_{t \in T_i} \sum_{j' \in J_i'} y_{j'i} - y_{i0} = 0, \quad \forall i \in I \quad 3-12$$

Para os nós de demanda, há que se pensar que, devido aos problemas de cobertura, propagação e outros, reunidos no modelo sob a denominação genérica de

“eficiência”, nem toda a demanda é obrigatoriamente atendida. É preciso portanto contar com um “arco de escape” para a demanda não-atendida. A Figura 3.3 apresenta em detalhe a idéia de “escape” para um nó de demanda.

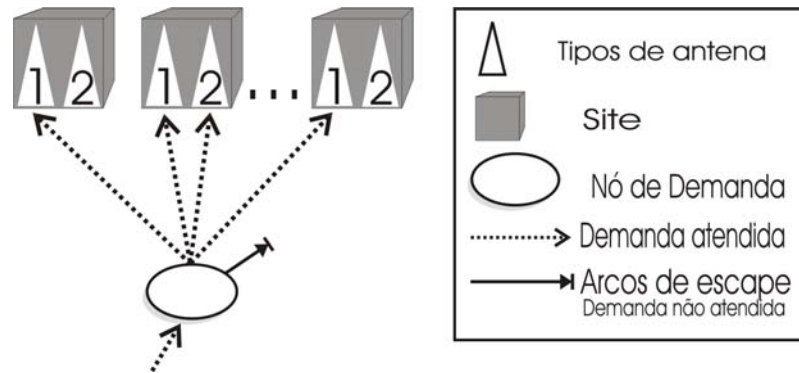


Figura 3.3 – Detalhe do modelo de grafos para um nó de demanda.

Esta abordagem permite que a “eficiência” no atendimento do nó por um site qualquer seja variável (por exemplo, de acordo com o tipo de torre a ser instalada). Permite também que um mesmo nó de demanda possa ser atendido por mais de um site (caracterizando o *overlapping*), possivelmente com valores distintos de “eficiência”. Mais ainda, libera o planejador de forçar o atendimento de toda a demanda; isto pode ser controlado por limitantes inferiores e/ou superiores de capacidade nos arcos de escape ou através de restrições adicionais (por exemplo, garantir uma receita mínima ou impor um limitante de orçamento). Finalmente, permite computar o custo de instalação de equipamentos em cada usuário.

Assim, o modelo supõe que um nó de demanda pode ser atendido (ao menos no momento das candidaturas) por mais de um site. Para maior generalidade, admite também que em cada site pode haver mais de uma torre candidata à instalação.

Assim, as equações de balanço de fluxo ficam:

$$\sum_{i \in J} \sum_{t \in T_i} y_{ji} + esc_j = d_j, \quad \forall j \in J \quad 3-13$$

Ao assumir que cada nó de demanda pode em princípio ser atendido por mais de um site FWA, o modelo entende que esse atendimento é aditivo, isto é, a demanda de um nó j que é atendida pelo site 1 não é a mesma que é atendida pelo site 2. Esta é uma consequência do modelo de grafos utilizado. Em outras palavras, cada unidade de demanda é atendida uma só vez. Entretanto, é preciso representar a “eficiência” de atendimento para cada par nó-site (ou, mais exatamente, nó-torre). A “eficiência” é representada por meio de limitantes de capacidade nos arcos de escoamento da demanda para os sites (torres).

Então:

$$(\mu_{j_i} \cdot Z_i^t) \geq y_{j_i}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T_i, \forall i \in I \quad 3-14$$

Se o *overlapping* entre sites não é desejável, pode-se modificar o modelo de maneira a obter o controle da filiação de cada nó de demanda no sentido de garantir que apenas um site FWA atenda cada nó de demanda. Isto significa considerar que, dos arcos de escoamento da demanda, apenas um (para cada nó) será efetivado na solução final. Ou seja, é preciso também decidir qual dos arcos candidatos em cada nó será usado. Assim:

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{t \in T_i} W_{j_i} = 1, \quad \forall j \in J \quad 3-15$$

É preciso lembrar também que cada arco de escoamento só pode ser utilizado se o site for efetivado (isto é, se o site possui uma torre instalada):

$$Z_i^t \geq W_{j_i}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T_i, \forall i \in I \quad 3-16$$

Os limitantes dos arcos de escoamento da demanda são também dependentes da decisão sobre a sua utilização. Assim:

$$\left(\mu_{j_i} \cdot W_{j_i}\right) \geq y_{j_i}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T_i, \forall i \in I \quad 3-17$$

Finalmente, o modelo pode ser acrescido de outras restrições, mais específicas. Tais restrições podem dizer respeito a:

- *Topologia da rede*: caso sejam admitidas outras topologias para a ligação site – CS, diferentes daquela aqui assumida;
- *Controle de fluxo*: atribuição de valores específicos aos limitantes superiores e/ou inferiores dos arcos (escape ou o atendimento de alguma demanda em particular);
- *Solução final*: obrigatoriedade da presença/ausência de algum equipamento, torre ou atendimento na solução final, ou limitante no número total de sites, por exemplo;
- *Restrições orçamentárias ou de receita*: atribuição de patamares ao objetivo de custo ou de receitas advindas do fornecimento dos serviços (associadas no modelo ao uso dos arcos de escoamento da demanda).

3.4 Formulação do tipo arco-caminho

A formulação nó-arco desenvolvida tem interpretação direta com relação ao problema tratado. Entretanto, apresenta algumas desvantagens. A principal delas é a enorme quantidade de variáveis que pode ser produzida até mesmo para instâncias relativamente pequenas do problema. Pior ainda, sabe-se que muitas combinações dessas variáveis resultam em soluções ineficazes, mas nada se pode fazer a respeito, além das restrições originais do problema.

Assim, busca-se neste item uma formulação mais “inteligente” e “econômica” para o problema, baseada no conceito de “caminhos” em redes.

Como se verá adiante, a abordagem arco-caminho assegura que as configurações possíveis de equipamentos são representadas por meio de um conjunto

pré-definido de caminhos, o que permite descartar *a priori* configurações inactiváveis e dominadas, as quais são eliminadas em tempo de pré-processamento (CARLSON E AUTHIÉ, 2001a).

3.4.1 Modelo de grafos

O site é composto por uma antena (que será escolhida dentre as várias candidatas) e um ou vários equipamentos dos tipos rádio e óptico. Esta composição antena, equipamento rádio e equipamento óptico é aqui denominada *configuração*.

A cada configuração corresponde uma capacidade de envio, para a CS, do total de demanda atendida pelo site. Somente uma configuração (no máximo) será utilizada por um site candidato, isto é, dentre as configurações possíveis apenas uma (ou nenhuma) será escolhida.

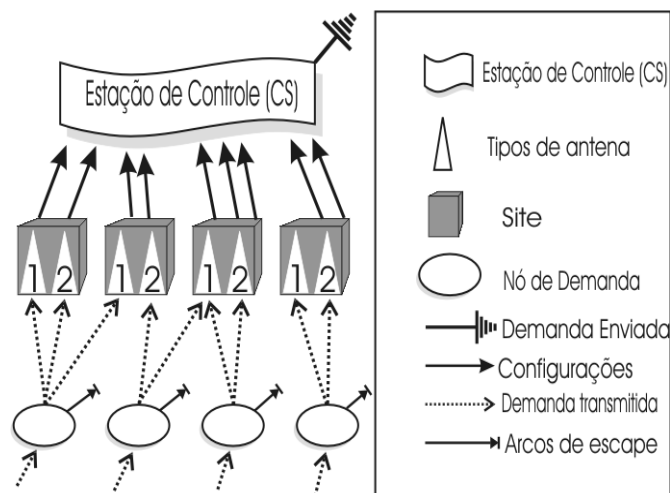


Figura 3.4: Grafo da rede com abordagem arco-caminho (DOMINGOS, CARLSON E RIBEIRO, (2003))

Na figura 3.4, os nós de demanda estão ligados a sites candidatos por meio de arcos que representam a conexão sem fio. Não mais que uma antena pode ser instalada em cada site, o qual é ligado à CS através de cabos (neste trabalho, admite-se que sejam fibras ópticas).

Os nós de demanda representam o agrupamento de usuários, com valor expresso por um intervalo. Os arcos de escape são usados no caso de a capacidade dos equipamentos não ser capaz de atender totalmente a demanda. Pode haver vários nós de demanda ligados a um determinado site.

As configurações (antena, equipamento rádio e óptico) correspondem aos caminhos entre cada site e a CS. Elas são capacitadas e têm um custo associado. Somente uma configuração será usada em cada site, no máximo.

3.4.2 Formulação matemática

Trata-se ainda de um problema de Programação Linear Inteiro Misto com variáveis binárias de decisão, cada uma associada a um caminho (configuração site, equipamento rádio e óptico).

O custo de cada caminho é dado por:

$$C_{stp} = \theta_{st} + \sum_{r \in R_s} \rho_{sr} \cdot V_{sr} + \sum_{o \in O_s} (\varphi_{so} + v_{so} \cdot 1_s) \cdot X_{so} \quad 3-18$$

Objetivo

O custo total deve ser minimizado:

$$Min = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T_s} \sum_{p \in P_{st}} C_{stp} * Z_{stp} \quad 3-19$$

Unicidade de caminho no site

Em cada site candidato somente uma configuração (no máximo) pode ser adotada:

$$\sum_{t \in T} \sum_{p \in P} Z_{stp} \leq 1, \forall s \in S \quad 3-20$$

Balanceamento do fluxo em cada nó de demanda

Para cada nó de demanda, a somatória de demanda atendida com a demanda não atendida deve ser igual à demanda total:

$$\sum_{s \in S} \sum_{t \in T_s} Y_{jst} + esc_j = d_j, \forall j \in J \quad 3-21$$

Balanceamento do fluxo em cada site

Entende-se que o fluxo de demanda que é levado para a CS deve ser igual à demanda que chega no site:

$$\sum_{p \in P_{st}} Y_{stp} = \sum_{j \in J_{st}} Y_{jst}, \forall s \in S, \forall t \in T_s \quad 3-22$$

Capacidade de cada arco de demanda

A demanda atendida respeita a eficiência do *link* aéreo:

$$Y_{jst} \leq U_{jst}, \forall j \in J, \forall s \in S_j, \forall t \in T_{sj} \quad 3-23$$

Capacidade de cada configuração (caminho)

A capacidade da configuração é limitada pelos equipamentos que a compõem:

$$Cap_{stp} = \min \left(\sum_{r \in R_s} Cap_{sr} \cdot V_{sr}, Cap_{st} \right), \forall s \in S, \forall t \in T_s, \forall p \in P_{st} \quad 3-24$$

A demanda atendida respeita a capacidade da configuração:

$$Y_{stp} \leq (Cap_{stp} \cdot Z_{stp}) \quad , \quad \forall s \in S, \quad \forall t \in T_s, \quad \forall p \in P_{st} \quad 3-25$$

A demanda pode ser assimétrica e as capacidades devem ser respeitadas em qualquer sentido de fluxo:

$$\sum_{j \in J} (fd_j \cdot Y_{jst}) \leq \sum_{p \in P_{st}} (Cap_{stp} \cdot Z_{stp}) \quad , \quad \forall s \in S, \quad \forall t \in T_s \quad 3-26$$

Controle da unicidade de atendimento

As restrições a seguir são aplicadas sempre que o *overlapping* não é permitido. Neste caso, cada nó de demanda é atendido por um único site, desde que esse site tenha sido implantado:

$$\sum_{s \in S_j} \sum_{t \in T_{sj}} W_{jst} = 1 \quad , \quad \forall j \in J, \quad 3-27$$

$$\sum_{p \in P_{st}} Z_{stp} \geq W_{jst} \quad , \quad \forall s \in S, \quad \forall t \in T_s, \quad \forall j \in J_{st} \quad 3-28$$

O respeito à eficiência do *link* aéreo é sutilmente diferente quando o *overlapping* não é permitido:

$$Y_{stp} \leq (U_{jst} \cdot W_{jst}) \quad , \quad \forall j \in J, \quad \forall s \in S_j, \quad \forall t \in T_{st} \quad 3-29$$

3.4.3 Extensões

O modelo, com algumas modificações, pode ainda atender novas restrições referentes a:

- *Topologia da rede*: caso sejam admitidas outras topologias para ligação site-CS;
- *Controle de fluxo*: atribuição de valores especificados aos limitantes superiores e/ou inferiores dos arcos (escape ou atendimento de alguma demanda em particular).

3.5 Comparações entre as duas formulações

Foram apresentadas, para o planejamento da infra-estrutura de redes FWA, uma formulação do tipo nó-arco e uma do tipo arco-caminho. Ambas têm vantagens e desvantagens.

No caso da modelagem do tipo nó-arco, a rede é vista como um grafo no qual os nós representam os sites e pontos de demanda, enquanto os arcos representam os enlaces. As variáveis de decisão podem referir-se tanto aos nós como aos arcos. Embora bastante natural e intuitiva, uma formulação deste tipo tem geralmente como desvantagem a utilização de excessiva quantidade de variáveis. Estas variáveis, no problema aqui tratado, são indexadas por nós origem e destino de tráfego, enlace e respectivo tipo de tecnologia. Mesmo em redes de pequeno porte, a quantidade de variáveis pode ser substancial. Quando estas variáveis são inteiras ou binárias, o problema matemático dificilmente pode ser resolvido em tempos polinomiais.

Entretanto, nas formulações nó-arco, muitas das combinações não são aceitáveis. Isso é conhecido pelo planejador, mas este tem dificuldade em informar isso ao modelo. Na prática somente se consegue incorporar restrições à “base de conhecimentos” do modelo, aumentando ainda mais o tamanho dos problemas.

Numa formulação do tipo arco-caminho, as variáveis de decisão referem-se aos caminhos utilizados para escoamento do tráfego. Durante a resolução do problema, não há preocupação direta com os nós (elementos intermediários do caminho). Em outras palavras, nos problemas aqui tratados, o tráfego entre o site e a

CS flui através de um caminho, formado por um único “arco” entre o site (origem) e a CS (destino). Essa parte da rede é vista como um conjunto de caminhos. A questão é escolher o subconjunto de caminhos que respeite as restrições técnicas do problema e atinja o objetivo (por exemplo, mínimo custo).

No caso geral, o grafo que representa a rede é constituído de nós e arcos, mas não de caminhos. Assim, o conjunto de caminhos deve ser construído a partir dos nós, arcos e, para o problema aqui tratado, dos equipamentos. Esta é precisamente a maior dificuldade na aplicação deste tipo de formulação, uma vez que a quantidade de caminhos possíveis pode ser imensa. Por outro lado, o “conhecimento” sobre o problema pode ser incorporado durante a construção do conjunto de caminhos, ou seja, restrições técnicas podem ser verificadas antes da etapa de resolução do problema matemático. Além disso, certas escolhas de caminho, embora factíveis do ponto de vista das restrições, são reconhecidamente dominadas (isto é, não são competitivas quanto aos valores da função-objetivo) e podem ser descartadas *a priori*.

3.6 Conclusões

Neste capítulo desenvolveram-se duas formulações para o problema de planeamento da infra-estrutura de redes *FWA*, uma do tipo nó-arco e uma do tipo arco-caminho.

Os dois modelos propostos dão origem a problemas matemáticos de otimização de fluxo em redes com restrições adicionais e variáveis binárias. Um método exato de otimização para resolver este tipo de problema é o *Branch-and-Bound* (NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A, (1988)), encontrado freqüentemente em pacotes computacionais.

Capítulo 4

Abordagem de Resolução para o Problema

Neste capítulo são descritos os métodos utilizados para a resolução do Problema de Rede de Acesso Fixo Sem Fio, que são problemas de otimização combinatória modelada por PLIM, buscando soluções sob o critério de minimização de custo.

Os principais aspectos do método heurístico são descritos, desde os fundamentos dos algoritmos genéticos e sua estrutura básica, incluindo ainda a codificação de soluções, a estrutura da população inicial, o conceito de população estruturada, a avaliação de *fitness* e os operadores genéticos.

4.1 Introdução

Do ponto de vista da otimização, os problemas de localização de facilidades, incluindo o caso particular do problema de rede de acesso, são conhecidos como *NP-Completo* (AHUJA, MAGNANTI E ORLIN (1993)), por terem elevada complexidade computacional.

A complexidade dos problemas de localização de facilidades motiva o constante interesse em busca de novas estratégias de solução, resultando em um número expressivo de artigos publicados na literatura especializada.

Os métodos especializados solucionam modelos lineares (programação linear), modelos não-lineares (programação não-linear), os dinâmicos (programação dinâmica), os discretos (programação inteira) e os probabilísticos (programação estocástica), sendo classificados como *métodos exatos*.

4.2 Fluxo em Rede

Os problemas de fluxo abordam o processo de distribuição de produtos originados em pontos de oferta e consumidos em pontos de demanda dentro de uma rede de interligações possíveis (GOLDBARG E LUNA (2000)).

Dentre os modelos de fluxo, os mais importantes e que são relacionados de alguma forma com o presente trabalho são os *problemas de transporte*, o problema de Fluxo Máximo e o problema de Fluxo a Custo Mínimo (PFCM), que possuem uma estrutura especial que permite o desenvolvimento de algoritmos eficientes (AHUJA, MAGNANTI E ORLIN (1993); BAZARAA, JARVIS E SHERALI (1990)).

Como será visto no próximo capítulo, o PFCM foi empregado no trabalho como um método de descarte, verificação de factibilidade e atendimento das capacidades máximas e mínimas.

4.3 Métodos Heurísticos

A principal dificuldade encontrada para a resolução dos problemas de otimização combinatorial está no esforço computacional empregado para alcançar a solução ótima. Os problemas de grande porte possuem maior dificuldade na sua resolução quando se utilizam os métodos exatos. Para resolver os problemas de otimização combinatorial de grande porte, os métodos heurísticos ou de aproximação fornecem soluções próximas da ótima com maior rapidez e flexibilidade de implementação.

As heurísticas (do grego *heuriske* – descobrir) não têm prova de convergência e não garantem a obtenção de uma solução ótima (OSMAN (1991)); são procedimentos para resolver problemas através de um enfoque intuitivo, em geral racional, onde a estrutura do problema é interpretada e explorada para a obtenção de uma boa solução.

Os métodos heurísticos são constituídos por etapas ou procedimentos decorrentes da observação das características do problema. O processo de encontrar uma boa solução consiste em aplicar a cada passo uma heurística que tenha sido projetada para cada problema particular.

Uma heurística eficiente deve dar boa qualidade às soluções geradas e requerer pouco esforço computacional. Algumas das características de uma heurística eficiente são:

- Boa capacidade de representação do problema original;
- Capacidade de encontrar soluções de boa qualidade;
- Relativa independência do tamanho da instância tratada;
- Rapidez de processamento;
- Adequação e flexibilidade de implementação computacional;
- Construção de uma função de adaptação (*fitness*) que permite expressar a eficiência de uma solução.

De acordo com o modo em que buscam e constroem soluções, as heurísticas são classificadas como segue:

Método Construtivo: fornece uma solução inicial que é construída passo a passo para que haja a aplicação de outros tipos de métodos conjuntamente.

Método de Decomposição: O problema principal é dividido em subproblemas, sendo a saída de um a entrada do seguinte. Assim, quando todos os subproblemas forem resolvidos tem-se a solução do problema original.

Método de Redução: Através da identificação de algumas características da solução ótima, conseguindo simplificar o problema. Neste método é possível fixar o valor de algumas variáveis do problema.

Manipulação de Modelo: Baseado no comportamento esperado da solução ótima, pode ser modificada a estrutura do modelo com o objetivo de obter um modelo mais simples de resolver, aumentando ou diminuindo o número de restrições.

Método de busca em vizinhança: A partir de uma solução inicial, e repetidamente através de alterações desta solução, as vizinhanças são modificadas até que seja satisfeito o critério de parada ou que não haja mais possibilidades de busca.

Entre as heurísticas com aplicações bem sucedidas podem ser destacadas: Busca Tabu por (GLOVER E LAGUNA (1997)), *Simulated Annealing* (KIRKPATRICK et al (1983)), GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) (FEO & RESENDE (1995)) e Algoritmos Genéticos (GOLDBERG (1989)). Abordagens evolutivas mais recentes são a programação genética e os sistemas classificadores. Revisões completas sobre a pesquisa em computação evolutiva desde seu surgimento são encontradas em (BÄCK, FOGEL E MICHALEWICZ (2000a e 2000b)). Uma coletânea de métodos heurísticos podem ser encontrada em (ZANAKIS, S. H.; EVANS, J. R.; VAZACOPOULOS (1989)).

Foi escolhido o método heurístico neste trabalho porque o planejamento da rede de acesso fixo sem fio tem uma complexidade alta, pois envolve problemas de otimização combinatorial de difícil resolução.

4.4 Algoritmos Genéticos

Segundo (GOLDBERG (1989)), “os algoritmos genéticos são técnicas de busca baseado no mecanismo de seleção natural e da genética”.

Apesar de terem sido desenvolvidos de forma independente, os diversos algoritmos evolutivos possuem uma estrutura comum, baseada na evolução natural. O que os torna diferentes, em geral, são os operadores genéticos empregados no processo evolutivo de procriação (MICHALEWICZ, Z.; SCHOENAUER, M (1996b)). Os operadores implementam mecanismos de reprodução tais como recombinação, mutação e imigração.

HOLLAND (1975), com o intuito de conseguir soluções satisfatórias para problemas de grande complexidade, desenvolveu uma linha de pesquisa baseada na evolução e adaptação dos sistemas naturais.

Os algoritmos, que no início eram simples, vêm adotando mecanismos cada vez mais sofisticados para resolver um grupo mais complexo e diversificado de problemas

O que distingue os algoritmos genéticos de outras heurísticas é o número de soluções geradas. Enquanto as outras heurísticas geram uma única solução em cada iteração os algoritmos genéticos produzem um conjunto de soluções. Outra característica importante é que os algoritmos genéticos não utilizam outras informações a respeito do problema durante o processo de evolução, além da função de avaliação (*fitness*) (BÄCK, FOGEL E MICHALEWICZ (2000b)).

É necessário o agrupamento de vários indivíduos para a formação de uma população, na qual os indivíduos mais adaptados têm maior chances de sobreviver e/ou de se reproduzir. Esses indivíduos selecionados pela natureza vão produzir uma

nova geração. As características hereditárias de uma espécie são passadas para outras gerações através do cruzamento entre os indivíduos, de modo a preservar suas qualidades.

Para cada cromossomo é atribuído um valor de adaptação que está relacionado com a função-objetivo. Este valor caracteriza cada cromossomo como um ponto do espaço de busca do problema de otimização, sendo também conhecido como valor de fitness.

O valor de *fitness* pode ser escolhido como um dispositivo de seleção. Na seleção, cromossomos da população inicial dão origem, por meio dos operadores de reprodução (*crossover* e *mutação*), a novos cromossomos. Repetições deste processo formam um novo conjunto de cromossomos, que substitui o anterior através do melhor valor de *fitness*. Em uma população, a evolução corresponde à substituição dos indivíduos com valor de *fitness* pior por novos cromossomos gerados a partir da evolução desta população, criando-se assim uma população mais recente e, a princípio, mais evoluída. Este é um modelo de evolução que incorpora os conceitos de sobrevivência e seleção dos mais aptos.

Apesar das diversas variações do algoritmo genético, todos possuem uma estrutura comum, tal como apresentada na Figura 4.1.

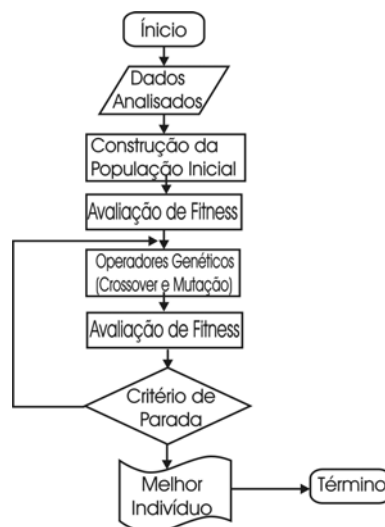


Figura 4.1: Estrutura do Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos têm encontrado aplicação em problemas de otimização combinatorial: problema do caixeiro viajante, problema da mochila, problemas de telecomunicação, problema de localização de facilidades capacitado, cobertura de conjuntos (*set covering*), programação não-linear, coloração de grafos, *scheduling*, e ainda em problemas das mais variadas áreas como: Biofísica, Geofísica e Fisiológica; (RODRIGUES (2000)).

4.4.1 Componentes Básicos do Algoritmo Genético

Um AG possui características que permitem sua particularização para aplicação ao problema em estudo, definindo o seu modo de funcionamento.

a) Codificação da solução

A representação das características de uma solução através de um indivíduo (cromossomo) é o principal fator que influenciará a execução do algoritmo. O ideal é que essa representação contenha uma estrutura de dados eficiente que permita trabalhar com um grande número de variáveis, processando as informações do problema sem prejudicar o processo evolutivo.

Na linguagem computacional, o cromossomo é codificado por uma seqüência numérica. Cada cromossomo representa uma solução completa, sendo implementado como um conjunto de atributos (os quais são denominados *genes*). Os valores atribuídos para estes genes são conhecidos como *alelos*.

b) Avaliação do fitness

O *fitness* de um cromossomo representa o grau da capacidade de adaptação ao meio ambiente. O *fitness* deve refletir a qualidade de um elemento em solucionar o problema.

A obtenção de bons resultados baseados no uso de AG depende do equilíbrio entre uma busca rápida e uma diversificada. Quando os indivíduos possuem

valores muito próximos ou muito diferentes, isso pode ocasionar a convergência da população, isto é, não há progresso no valor da solução durante muitas iterações, impedindo a identificação dos melhores indivíduos ou ocorrendo a convergência prematura para um ponto de ótimo local (COSTA (2002)).

Ao optar por uma função de *fitness*, as restrições do problema devem ser consideradas. Os indivíduos que violarem estas restrições devem ser descartados; desta forma não são gerados indivíduos inactíveis.

Quando um indivíduo atual supera o *fitness* do individuo anterior este valor é armazenado na memória como a melhor solução encontrada (esse valor deve estar armazenado sem que seja obrigatória a sua presença na população final).

c) População Inicial e População Estruturada

Inicialização da população: Cada indivíduo representa um cromossomo e o seu conjunto inicial é denominado população inicial. Normalmente esta população é criada randomicamente ou de forma estruturada. Em problemas de otimização que envolvam restrições, a aleatoriedade dificulta a obtenção de soluções factíveis. Serão expostas duas alternativas desenvolvidas para melhor trabalhar a inactibilidade da solução. Se considerada a primeira forma, enfrentam-se dificuldades para obter indivíduos factíveis, demandando maior esforço computacional para uma pequena melhoria. Se considerada a segunda forma, ao direcionar a construção de uma população por meio de uma heurística, pode-se limitar o espaço de busca; isto pode se traduzir em uma convergência prematura do algoritmo, eliminando a chance de explorar outras regiões do espaço de busca.

Porém, utilizar uma solução inicial que leva em conta as características do problema permite a obtenção de uma solução factível. O tamanho da população inicial também deve ser considerado, pois há interferência no desempenho do algoritmo. Quando a população possui um número pequeno de indivíduos o espaço de busca é reduzido, o que dificulta o alcance da população em atingir o ótimo global.

Quando o número de indivíduos da população é elevado, exigem-se mais recursos computacionais.

População Estruturada:

Uma maneira de auxiliar a organização da população é através da população estruturada. A população é distribuída dentro de uma árvore ternária de maneira organizada, onde os indivíduos com melhor *fitness* ficaram nos níveis superiores da árvore. A árvore ternária tem um número fixo de 13 agentes.

Cada agente na população representa dois indivíduos (ou duas soluções), um chamado *pocket* e o outro *current*. O *pocket* é sempre melhor que o *current*, isto é, a solução representada por aquele indivíduo possui melhor valor para o problema. Quando um *current* é melhor que um *pocket*, então é efetuada a troca de papéis entre o *current* e o *pocket*.

Conforme a figura 4.2 abaixo, a população é formada hierarquicamente por líderes e subordinados. Esta estrutura foi aplicada por BERETTA (1999) na resolução do problema de partição de números.

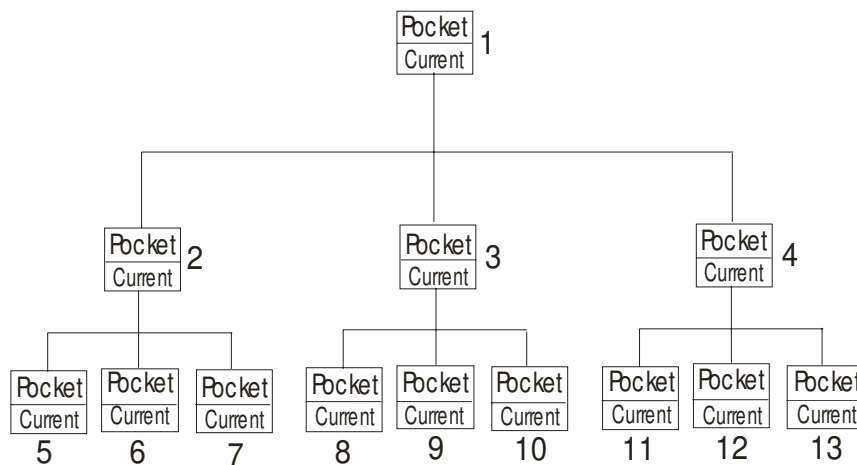


Figura 4.2: População Estruturada

Esta classificação é feita de acordo com o valor de *fitness* que este agente representa no problema, ou seja, o líder possui sempre melhor valor em relação

aos seus subordinados. A estrutura ordenada é dada de acordo com a qualidade das soluções que estes agentes representam, e o agente 1 sempre irá armazenar a melhor solução encontrada na população.

A árvore contém quatro subpopulações, sendo que cada subpopulação tem um líder e três subordinados. Assim, o primeiro agente é líder da subpopulação que tem como subordinados os agentes 2, 3 e 4. O agente 2 tem como subordinados os elementos 5, 6 e 7; o agente 3 tem como subordinados os indivíduos 8, 9 e 10, e assim por diante.

O mecanismo de seleção de uma população estruturada é feito a partir da reestruturação dos indivíduos dentro da árvore ternária. Sabe-se que cada indivíduo *pocket* de um líder deve possuir melhor valor que os indivíduos *pockets* de seus subordinados. Quando esta hierarquia não é respeitada, ou seja, quando um *pocket* do subordinado é melhor que o *pocket* líder, então os indivíduos destes agentes são trocados de posição. Nesse caso há comparação e troca somente de indivíduos *pockets*, pois nesta fase já foram efetuadas as comparações entre *pockets* e *currents* para garantir que os melhores indivíduos sejam armazenados nos *pockets*. Com isso, é garantido que todo líder tem a melhor solução que da sua subpopulação, e conseqüentemente o agente 1 (ou raiz da árvore), tem no indivíduo *pocket* sempre a melhor solução da população.

Logo, sempre que uma solução sofrer alterações, é necessário efetuar comparações e trocas, para garantir esta hierarquia. A árvore estará sempre ordenada de acordo com a qualidade dos indivíduos.

d) Processo de Reprodução

Outro aspecto do AG é dado pelo processo de reprodução que representa a convergência de uma solução. A seleção deve favorecer os bons indivíduos e conseqüentemente melhores indivíduos são produzidos a cada geração. O

mecanismo de seleção estabelece um critério para escolha dos indivíduos, e será descrito adiante.

O objetivo dos operadores genéticos é operar sobre os indivíduos que foram selecionados para produzirem "descendentes". O cruzamento (*crossover*) entre cromossomos é fundamental para a transformação da população. É através do operador de *crossover* que é promovida uma recombinação de material genético dos pais, gerando os filhos e a troca de partes do cromossomo pode ser efetuada de várias formas. A manipulação genética é realizada pelos operadores genéticos de cruzamento (*crossover*) e pela mutação.

Segundo MICHALEWICZ (1996b), cada *crossover* possui melhores resultados para classes de problemas específicos. O *crossover* produz um novo indivíduo através da combinação de dois ou mais indivíduos, esperando que haja troca de informações entre diferentes soluções candidatas.

Como há vários tipos de *crossover*, são descritos aqui os mais usuais: *crossover OX*, *two-point*, aritmético e uniforme.

O *crossover OX* é o mais comum para codificação binária, e está representado na figura 4.3.

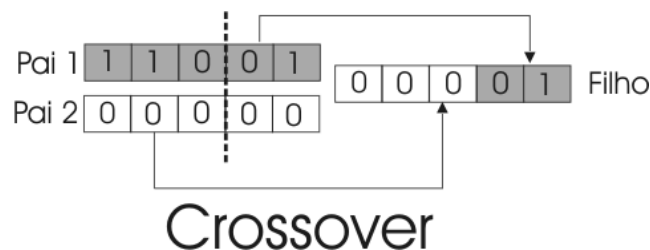


Figura 4.3: Operador de *Crossover*

1. *Crossover OX (um ponto)* - sorteiam-se dois pontos de corte aleatoriamente para os dois cromossomos pais, e em seguida trocam-se os genes entre estes pais, obtendo-se um novo filho;

2. *Two-point crossover* (dois pontos) - o procedimento é parecido com o anterior, porém o cruzamento ocorre duas vezes;

3. *Crossover Aritmético* - gera descendentes através de operações aritméticas (combinações lineares sobre os pais). Este *crossover* tem como princípio a força de seleção: pais bons geram filhos bons. Podem-se gerar descendentes baseados em média aritmética e média geométrica. Este tipo de *crossover* é específico para problemas de otimização numérica com restrições, MICHALEWICZ (1996).

4. *Crossover Uniforme* – dois cromossomos são emparelhados e cada gene do cromossomo tem 50% de chance de ser trocado.

A tendência deste operador é promover a convergência durante as gerações, realizando combinações com as melhores qualidades de cada indivíduo a fim de obter indivíduos melhores.

Outro operador, conhecido como operador de mutação, é também aplicado e irá produzir indivíduos através de pequenas alterações de um ou mais genes de um indivíduo, com o intuito de dar maior variabilidade à população. Uma qualidade da mutação é a possibilidade de recuperar boas características que são perdidas devido às sucessivas recombinações e dar maior diversidade. Outro fator importante é a probabilidade de se efetuar uma mutação; ela deve ser relativamente baixa, para não dificultar a convergência da solução. A figura 4.4 ilustra a mutação inversiva.

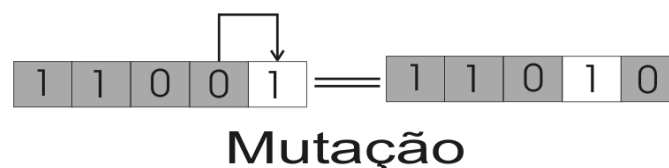


Figura 4.4 : Operador de Mutação Inversiva

As principais alterações de mutação mais freqüentemente utilizadas são mutação simples, inversiva e translação:

1. Mutação Inversiva – sorteia-se um gene no cromossomo que será trocado com seu subsequente;
2. Mutação Simples - são sorteados dois genes de modo aleatório, que em seguida são trocados de posição.
3. Mutação Translação – parte do cromossomo   retirada e colocada em outra posição, guardando a mesma ordem em que foi retirada.

e) Funcionamento dos Operadores Genéticos

Os operadores genéticos podem ser aplicados em toda ou parte da população sorteada para compor o processo que vai gerar a nova população.

A probabilidade de ocorrer mutação é sempre bem menor que a de ocorrer cruzamento, na maioria das aplicações.

Após o cruzamento, que é feito por pares de indivíduos, a cada novo indivíduo gerado verifica-se a mutação. Ao final é obtida uma nova geração que em média (mas não certamente) tem melhor adaptação que a anterior e assim sucessivamente.

As populações seguintes têm o mesmo número de indivíduos, mas sua composição pode ser bem distinta da população inicial. Isto é obtido pela manipulação genética da população inicial.

f) Mecanismos de Seleção

É o modo como é escolhido o indivíduo para fazer parte da próxima geração. Há várias maneiras de ser feita esta escolha. O que deve ser observado   qual delas melhor se adapta à estrutura do algoritmo.

Na Seleção por Roleta (*Roulette Wheel*) (MICHALEWICZ (1996b)), os indivíduos de uma geração são escolhidos para fazer parte da próxima geração através

de um sorteio de roleta, onde cada indivíduo da população tem chance proporcional ao seu valor de *fitness*.

Os indivíduos com valor de *fitness* elevado terão maior probabilidade de seguir para a próxima geração, mas a roleta não garante que o melhor indivíduo seja sorteado para a próxima geração.

Há outras opções de seleção tais como: seleção elitista; por diversidade; salvacionista; bi-classista; aleatória, entre outras, baseadas na avaliação de *fitness*.

Seleção Elitista (FOGEL (1994)) e (MICHALEWICZ (1996b)) – quando uma nova população é criada através dos operadores de *crossover* e mutação, o melhor indivíduo da geração atual simplesmente é mantido na geração seguinte. O elitismo pode aumentar rapidamente o desempenho do Algoritmo Genético por evitar a perda da melhor solução, mas pode convergir para mínimo local.

Seleção por diversidade – são selecionados todos os tipos de indivíduos, sejam eles os piores ou os melhores dentro da população;

Seleção bi-classista – são selecionados uma porcentagem dos melhores indivíduos e os $(100 - \text{os melhores indivíduos})\%$ dos piores indivíduos;

Seleção Aleatória – serão selecionados aleatoriamente n indivíduos da população. Este mecanismo pode ser subdividido em:

Salvacionista: onde o melhor indivíduo é mantido e os outros serão selecionados aleatoriamente.

Não Salvacionista: todos os indivíduos são escolhidos aleatoriamente.

Seleção baseada no valor de *fitness* – o objetivo é aumentar o número de membros da solução que represente boas soluções para o problema.

4.5 Conclusão

Este capítulo abordou métodos de aplicação dos Algoritmos Genéticos ao planejamento de rede de telecomunicação.

O problema de infactibilidade da alternativa proposta foi contornado por um método de descarte.

Utilizando métodos heurísticos podem-se obter resultados quase tão bons quanto os encontrados pelos métodos exatos, embora não se garanta a otimalidade. A vantagem do método heurístico é reduzir o tempo computacional e também gerar uma população de soluções, enquanto os métodos exatos geram apenas uma solução.

Capítulo 5

Aplicações e Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados encontrados a partir da aplicação da heurística proposta a instâncias do problema de planejamento de redes FWA.

5.1 Introdução

A validação do método heurístico aqui proposto exige a sua aplicação para problemas envolvendo redes de tamanho real. Os resultados obtidos devem ser comparados com aqueles produzidos pelo método exato (se estes estiverem disponíveis). Essa comparação visa avaliar o esforço computacional necessário para alcançar a solução factível em cada caso, mas também aferir a eficiência da heurística em termos dos valores encontrados para o custo.

A aplicação da heurística exige, por sua vez, adaptações e calibrações de parâmetros do Algoritmo Genético básico, as quais são descritas a seguir.

5.2 Adaptação do Algoritmo Genético

Algumas das características fundamentais do AG devem ser particularizadas para tratamento do problema de planejamento de redes FWA.

a) Codificação da Solução

O cromossomo é composto de genes; cada gene possui um lugar fixo no cromossomo. No trabalho em questão, as soluções candidatas para o problema são denotadas por variáveis binárias associadas a caminhos, os quais representam respectivamente: sites (instalado ou não instalado), tipos de antenas (tipo adotado, ou não-instalação) e configuração de equipamentos.

A figura 5.1 representa um cromossomo que possui 8 sites candidatos a instalação, cada um deles com dois tipos de antena possíveis. Com a antena t1 é possível escolher uma dentre 8 configurações. Com a antena t2 é possível escolher uma configuração entre as 12 possíveis. Portanto, o número total de configurações é 20. Na figura 5.1, as informações sobre site, *fitness* e antenas são apenas para fins de referência (o cromossomo em si é constituído apenas da parcela denominada “configurações”, uma vez que quando é instalada uma configuração os dados de site, antena e *fitness* automaticamente estão embutidos no resultado).

	Site		Fitness	Antenas		Configurações			
1	Instala	Não instala	Valor de <i>Fitness</i>	Não instala	Tipo 1	Tipo 2	1	...	20
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
N	Instala	Não instala	Valor de <i>Fitness</i>	Não instala	Tipo 1	Tipo 2	1	...	20

Figura 5.1: Representação simbólica de um cromossomo

b) População Inicial

Como já se observou, a população inicial pode ser criada randomicamente ou não. Duas formas de inicialização foram testadas. Seguem-se explicações e comentários sobre o efeito de cada forma.

1) inicialização randômica: percebeu-se neste caso a tendência da população, com o passar das iterações, ficar homogênea. A maior parte dos cromossomos utilizava a capacidade máxima de seus equipamentos para atender o mínimo possível de usuários, característica que importava em maiores custos. Além disto, as soluções “ficavam presas” em mínimos locais.

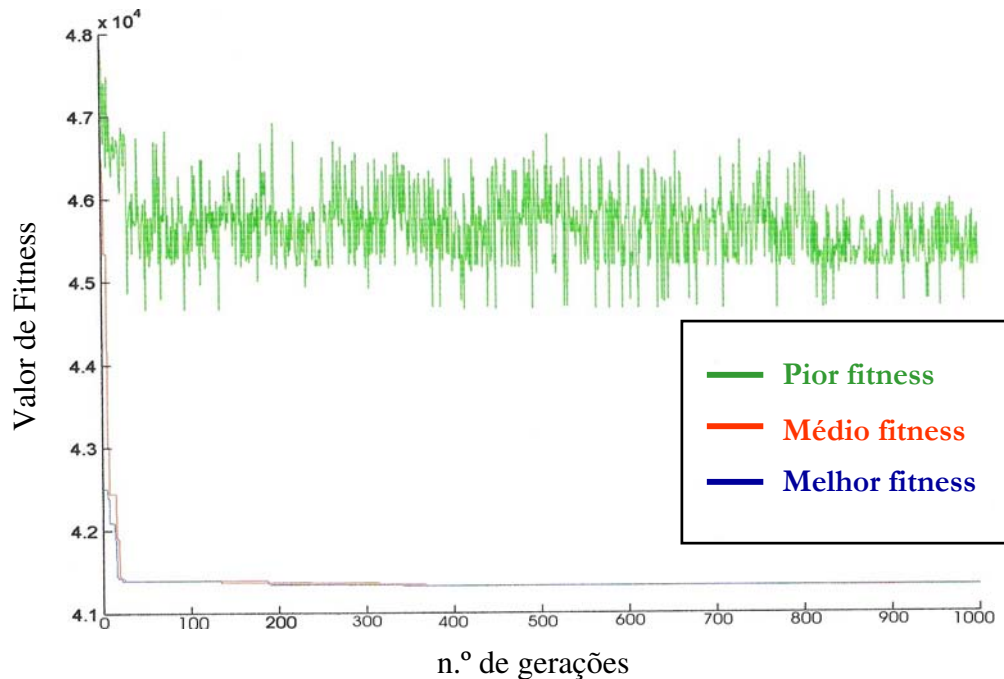


Figura 5.2: População homogênea – sem diversidade populacional

A figura 5.2 classifica os indivíduos de acordo com o seu valor de *fitness* para um dos exemplos testados. Indivíduos com *fitness* “ruim” são apresentados sob a cor verde, indivíduos com melhor *fitness* possuem cor azul e o *fitness* médio tem cor vermelha. Pode-se concluir pela figura que a população tende a ser homogênea, com valores ruins para o *fitness*.

2) inicialização heurística: neste caso, o objetivo foi controlar a diversidade da população inicial. A heurística adotada foi a de criar inicialmente uma população de indivíduos que, embora utilizando equipamentos em sua capacidade máxima (para minimizar a ineficiência), apresentassem grande variação com respeito

aos sites instalados e aos tipos de antenas utilizados. Como resultado prático, obteve-se boa variabilidade genética e as soluções não ficaram “presas” em mínimos locais, conforme sugere a figura 5.3 (que associa indivíduos e respectivos valores de *fitness*).

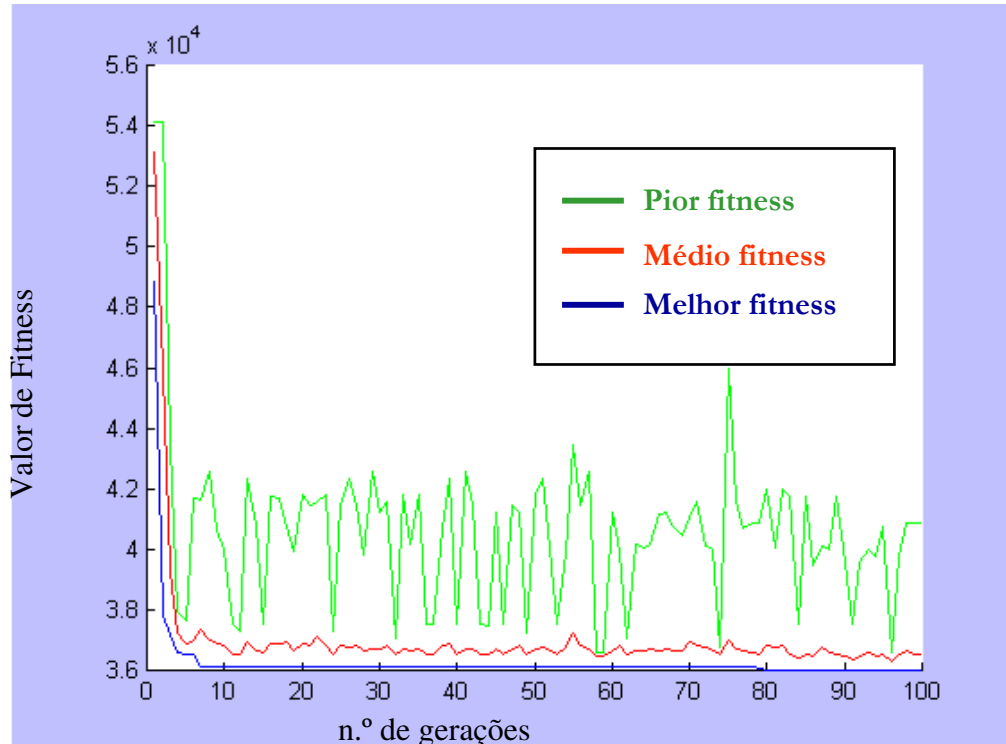


Figura 5.3 : População heterogênea – com maior diversidade populacional

Tratamento dos Indivíduos Ineficazes

As restrições do problema de otimização devem ser obedecidas pelos indivíduos do AG. Como este tem métodos baseados em componentes aleatórios, os indivíduos gerados podem ser ineficazes, prejudicando a evolução da solução. Para contornar o problema, é possível:

- penalizar os indivíduos ineficazes, mantendo-os como parte integrante da população;
- desenvolver métodos especializados de geração dos indivíduos proibindo a violação das restrições;
- reparar os indivíduos ineficazes gerados, tornando-os válidos; ou
- descartar os indivíduos ineficazes.

No trabalho optou-se por simplesmente descartar os indivíduos inactiváveis.

O método PFCM é aplicado para que haja a preservação da factibilidade da solução, ou seja, para que soluções inviáveis sejam descartadas antes de concorrerem à solução candidata e também para atender a restrição do problema, impedindo que flua na rede maior volume de demanda do que a capacidade dos equipamentos nela instalados. Logo, a somatória das demandas mínimas deve ser menor ou igual à somatória da demanda máxima de atendimento dos sites. Desta forma será garantida a factibilidade da solução candidata. Para restabelecer ou penalizar os indivíduos inactiváveis opta-se por duas hipóteses: a) desenvolver métodos especializados de geração dos indivíduos proibindo a violação das restrições, pois o esforço para validar o indivíduo pode ser muito alto, além de convergência prematura para um mínimo local ou b) descartar os indivíduos inactiváveis. No trabalho optou-se pela segunda hipótese, pois o tratamento destes indivíduos inactiváveis demandaria maior tempo computacional, além da convergência prematura para um mínimo local.

Fluxo Máximo com Custo Mínimo

Além de verificar a factibilidade de uma solução (indivíduo), o PFCM, apresentado dentre outros por BAZARAA, JARVIS E SHERALI (1990), pode ser adaptado para resolver o problema de Fluxo Máximo. Permitir o atendimento do máximo de demanda possível é sempre interessante, pois aumenta a receita do prestador de serviços. Em outras palavras, se o objetivo principal é a minimização de custo, o Fluxo Máximo é uma ferramenta para se atingir o objetivo secundário.

Na adaptação do PFCM, o nó fantasma (f) é responsável pela distribuição da demanda mínima de cada nó de demanda; o nó sumidouro (s) tem a função de controlar se a quantidade de demanda que entrou no nó fantasma é a mesma que se consegue passar por ele. O arco que liga os dois nós tem custo negativo, estimulando ao máximo a passagem de fluxo. Na rede, aplicam-se as

restrições de capacidade associadas aos equipamentos cuja instalação é prevista no indivíduo analisado.

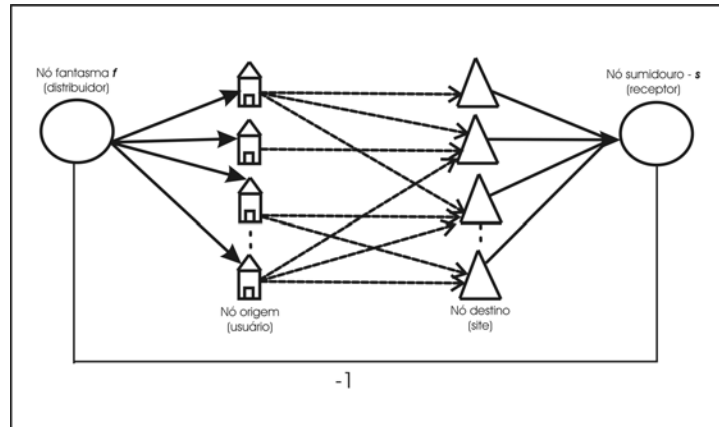


Figura 5.4: Representação do PFCM

No grafo, somente os nós f e s possuem respectivamente oferta e demanda de fluxo, onde é possível verificar a Primeira Lei de *Kirchoff* (a soma de todos os fluxos que entram em um nó da rede é igual à soma dos fluxos que saem). Não há perda do fluxo já que todos os nós da rede são conservativos, exceto os nós s e t .

c) População Estruturada

A população é formada hierarquicamente por uma árvore ternária com 3 níveis composta por 13 agentes, líderes e subordinados. Esta classificação é realizada de acordo com o valor de *fitness* do indivíduo representado no problema. O agente na população representa dois indivíduos, um chamado de *pocket* e outro de *current*. Um *pocket* sempre será melhor que o *current*, porém se acontecer o inverso deve-se trocar os indivíduos (*current* torna-se *pocket* e vice-versa). Pela estrutura ordenada, a melhor solução encontrada estará sempre armazenada na raiz (no líder da árvore).

O tamanho da população em questão é portanto de 26 indivíduos. Os indivíduos gerados na população inicial somente entrarão na população estruturada se tiverem características distintas. Logo, no indivíduo deve haver algum gene distinto dos

indivíduos que fazem parte da população estruturada. Esta simples restrição dará maior diversidade e dificultará a convergência prematura da solução.

d) Avaliação de Fitness

O valor de *fitness* neste trabalho representa a adaptação do indivíduo ao seu meio e está relacionado com o valor da função objetivo, sendo representado por:

$$Min = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T_s} \sum_{p \in P_{st}} C_{stp} * Z_{stp} \quad (5.1)$$

e) Processo de Reprodução e Mutação

Os operadores podem ser aplicados em toda ou parte da população sorteada para compor o processo que vai gerar a nova população. Mas deve-se observar que é preciso manter correspondência entre os genes afetados, a fim de respeitar as restrições do problema original. Por exemplo, uma mutação feita no site só deve envolver sites, e assim respectivamente.

Adotou-se como processo de cruzamento o *Crossover OX*. Para a mutação, elegeu-se a *Mutação Simples*. Embora outros métodos tenham sido testados, estes apresentaram melhor desempenho.

f) Mecanismo de Seleção

O mecanismo de seleção utilizado no trabalho está relacionado ao valor de *fitness* do indivíduo.

g) Critério de Parada

Neste trabalho a avaliação de *fitness* é a condição analisada para saber o momento de interromper o algoritmo. Quando a melhor solução tiver convergido para

um valor, isto é, mantiver-se constante por um número fixo de gerações sem nenhuma alteração, aceita-se que a solução chegou a um ponto (mínimo ou máximo) de convergência.

A figura 5.5 demonstra as etapas da execução do algoritmo.

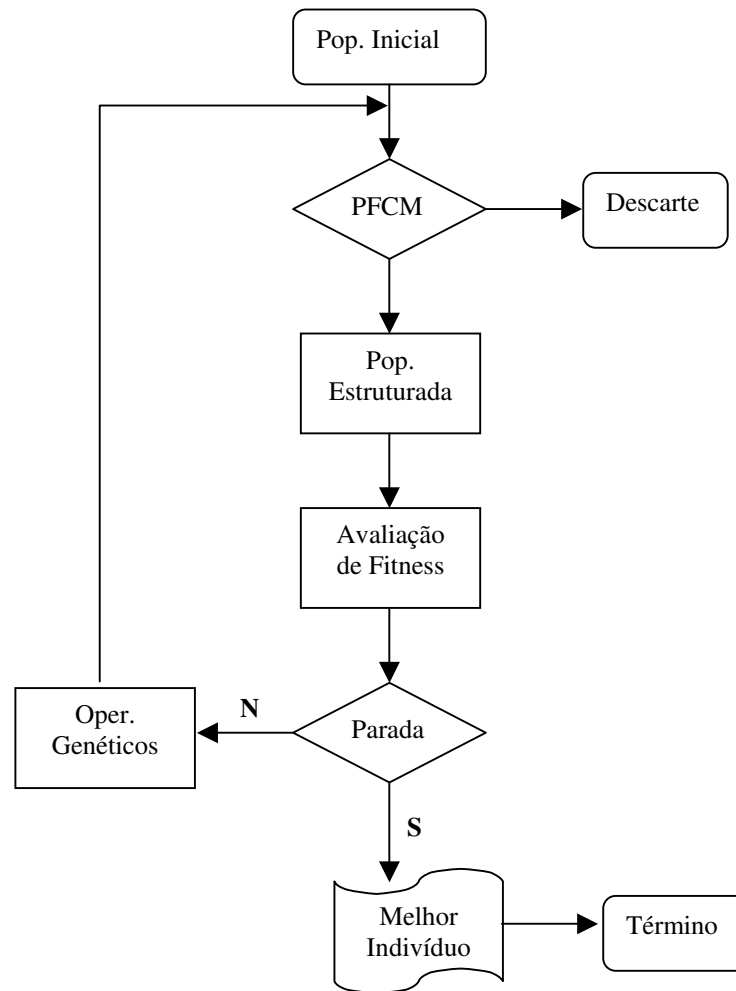


Figura 5.5: Etapas do programa

5.3 Dados da rede-exemplo

A instância de rede FWA utilizada na aplicação do método proposto apresenta 8 candidatos a site e 16 nós de demanda.

Através da figura 5.6 pode-se observar a disposição física dos elementos da rede-exemplo. Embora não haja correspondência direta com nenhuma rede real, os valores dos dados seguiram informações publicadas por outros grupos de pesquisa (UFONGENE (1999)).

A demanda é colocada sob a forma de intervalo. A demanda mínima deve obrigatoriamente ser atendida na solução; o atendimento da demanda máxima é desejável.

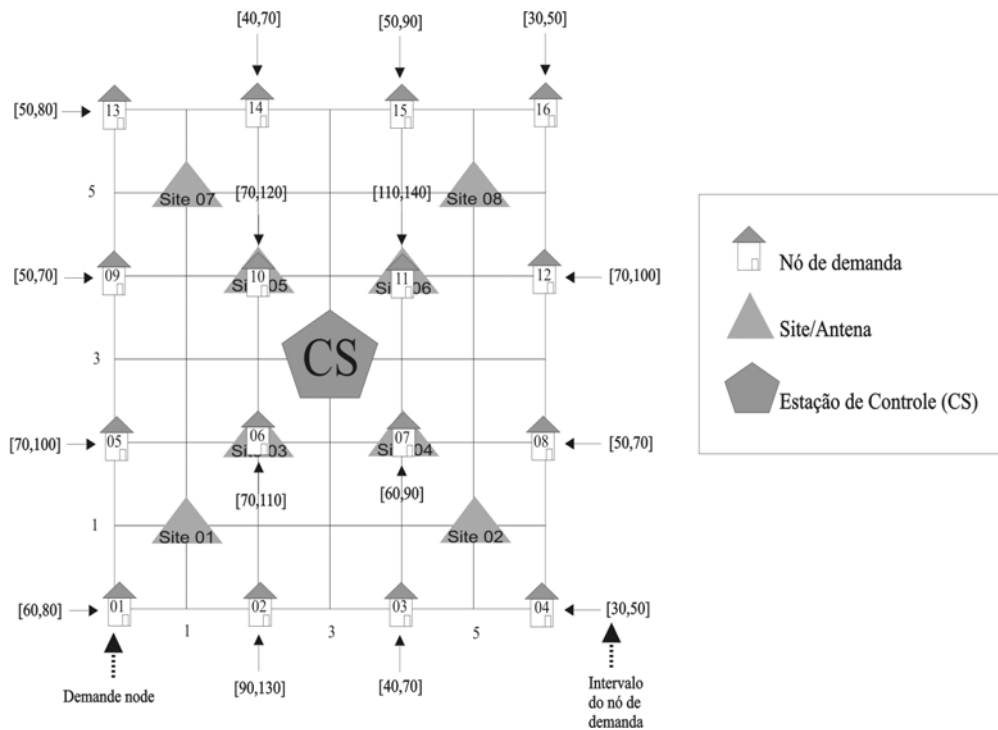


Figura 5.6 : Modelo de Rede FWA

Denomina-se “eficiência” o fator de cobertura, visto que nem sempre um site é capaz de atender a demanda total, mesmo que ela esteja em sua área de influência. A abordagem permite que a “eficiência” no atendimento do nó de demanda por um site qualquer seja variável.

As tabelas 5.1 e 5.2 informam respectivamente os custos utilizados para os equipamentos (os quais podem ser calculados a partir dos valores associados à aquisição, implantação, operação e manutenção) e os custos específicos da implantação de cada site.

Equipamentos	Capacidade Upstream	Custo	Informações Adicionais
Antena T0	160	500	Alcança 3 unidades de distância
Antena T1	240	750	Alcança 4 unidades de distância
Rádio R0	20	150	-
Rádio R1	40	220	-
Óptico O0	155	350	Custo da Fibra : 300/unid. dist.
Óptico O1	622	850	Custo da Fibra: 300/ unid. dist.

Tabela 5.1 : Custos de equipamentos

	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8
Antena T0	50	60	80	70	75	80	65	75
Antena T1	70	85	100	90	100	100	90	95

Tabela 5.2: Custos extras de cada site candidato e tipo de antena

5.4 Resultados

Os dados obtidos são analisados em dois aspectos: comparações do modelo matemático e comparações de resolução.

A comparação do modelo matemático visa avaliar o tempo computacional necessário para alcançar a solução factível; a comparação de resolução compara o esforço computacional e a função custo de acordo com a eficiência dos métodos.

5.4.1 Análise das Soluções

Os testes computacionais resultantes para o método exato foram obtidos com os recursos computacionais: Sun SparcStation 10 incluindo o Sun OS Release 5.5, ambiente em desenvolvimento modelos de otimização ILOG-PLANNER, compiladores C++ e o pacote de otimização CPLEX ® (CPLEX (1994)). Os testes visam analisar a qualidade do método e sua robustez.

Para o método heurístico, foi desenvolvido um software específico.

Na tabela 5.3 apresentam-se comparações entre os resultados de custo do método exato e do método heurístico proposto. Salienta-se que o método heurístico SGA1 corresponde à utilização de população inicial randômica, enquanto o SGA2 refere-se à inicialização heurística da população (DOMINGOS, A. P; CARLSON, C. M. F; RIBEIRO, R. V (2004)).

Os casos tratados equivalem a diferentes multiplicadores para a demanda apresentada. O intuito é analisar, de maneira simplificada, a qualidade do modelo no que diz respeito à evolução das demandas ao longo do tempo.

Casos	Multiplicadores de demanda	Custo exato	Custo SGA1	Gap	Custo SGA2	Gap
1	0,25	27.282	31.253	14,55 %	27.282	0 %
2	0,50	29.102	29.102	20,98 %	29.102	0 %
3	0,75	31.244	37.604	20,02 %	31.244	0 %
4	1,00	35.948	40.219	11,54 %	36.334	1,07 %
5	1,25	41.137	43.826	6,54 %	41.457	0,78 %
6	1,50	43.504	46.638	7,20 %	43.504	0 %
7	1,75	48.638	48.638	0 %	48.638	0 %
8	2,00	53.902	54.122	0,41 %	54.122	0,41 %

Tabela 5.3: Comparação entre métodos e resultados

A tabela 5.4 distingue as características do programa SGA1 e do SGA2.

Características	Programa SGA1	Programa SG2
Pop. inicial	Inicializada de forma aleatória	Inicializada com uma heurística.
Após o PFCM	Todos os cromossomos automaticamente entram na população estruturada	O cromossomo ainda passa por uma restrição. Somente entrará na população estruturada se for diferente de todos os cromossomos que já estiverem na população estruturada
Operadores Genéticos	Crossover: OX e Aritmético Mutação: Simples e Uniforme	Crossover: OX Mutação: Simples

Tabela 5.4: Diferenças entre os Programas SGA1 e SGA2

Observou-se que a heurística SGA1 possuía uma convergência muito rápida, mas seus resultados ficavam distantes do valor ótimo da solução.

A população possuía muitos indivíduos com a mesma “carga genética”, o que forçava a solução a sempre ficar “presa” a um mínimo local.

A heurística SGA2 não apresentou esses problemas, produzindo resultados substancialmente melhores.

Na figura 5.6 é mostrada a rede resultante para o caso 3, por ser o caso que tem o pior resultado.

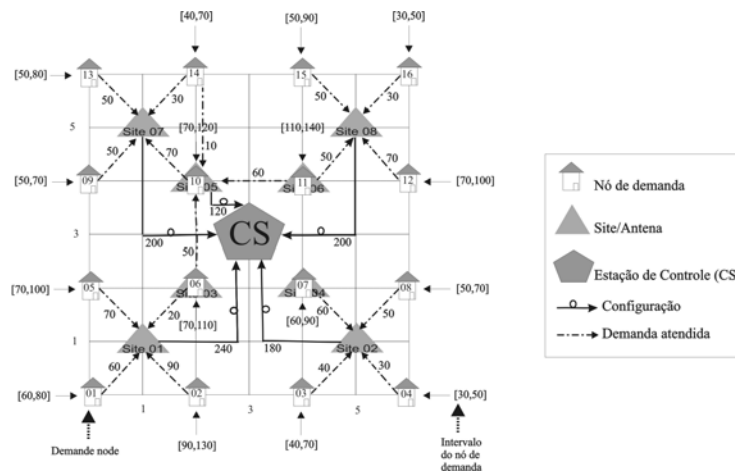


Figura 5.7: Rede testada

5.5 Conclusões

Discutiram-se neste capítulo as adaptações das características particulares do AG tradicional para uso na resolução do problema de planejamento da infra-estruturada de acesso fixo sem fio.

Ressaltou-se o cuidado na geração da população inicial. Excessiva aleatoriedade poderia prejudicar a busca por soluções adequadas. As figuras 5.2 e 5.3 permitem perceber como o problema é sensível à questão de diversidade. O problema de infactibilidade de indivíduos foi contornado por um método de descarte.

Evidenciou-se a necessidade de examinar também rigorosamente o tipo de *crossover* e mutação implementados, a fim de evitar que a solução fique presa a ótimos locais ou tenha convergência prematura.

A tabela 5.3 demonstra que os resultados heurísticos alcançam a solução ótima em vários casos. Mesmo nos piores casos, os resultados da heurística ficam a 1,07% da solução ótima. São resultados significativos, principalmente quando comparado o recurso computacional e tempo de execução entre os respectivos métodos: da ordem de uma hora no método exato, e da ordem de poucos minutos no método heurístico.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Redes FWA são alternativas bastante atraentes para a evolução de redes de acesso aos serviços de telecomunicações. Assim como nas redes cabeadas tradicionais, entretanto, as decisões referentes à sua implantação (envolvendo a localização, dimensionamento e atendimento) também são complexas. Muitos dos modelos matemáticos cuja solução podem ajudar nestas decisões não encontram ferramentas capazes de solucioná-los de forma simples.

Este trabalho apresenta uma alternativa para a resolução do problema de planejamento da infra-estrutura de rede de acesso fixa sem fio, através da aplicação de métodos heurísticos, especificamente baseados em Algoritmos Genéticos.

Na primeira parte, tratou-se de estabelecer uma formulação matemática convencional, do tipo nó-arco. Em seguida, o modelo foi melhorado por meio da abordagem arco-caminho, na qual cada configuração possível para um site (localização e equipamentos) é entendida como um caminho para o fluxo, estando associada a uma única variável de decisão. Embora o processo de geração de caminhos não seja simples, ele permite descartar *a priori* configurações infactíveis ou dominadas.

A formulação arco-caminho, por si só, não é capaz de eliminar as dificuldades de resolução do problema por meio de algoritmos exatos. Assim, o próximo

passo do trabalho foi desenvolver um método heurístico. Os Algoritmos Genéticos foram adotados como base para o método.

A codificação do cromossomo buscou idéias diretamente na formulação arco-caminho, em que apenas variáveis binárias são exigidas para decidir a respeito das configurações. O método heurístico foi enriquecido pela adição de mecanismos de tratamento de restrições específicos do problema original. Trata-se de uma questão crítica para os Algoritmos Genéticos. Duas alternativas de geração de elementos factíveis foram estudadas. Optou-se por descartar os indivíduos inactíveis.

Outros fatores importantes que foram considerados são: a combinação de operadores genéticos, a população iniciada com uma heurística, o uso de população estruturada, a restrição imposta a todos os indivíduos para que possam fazer parte da população estruturada, a importância do fluxo para verificar se a demanda mínima é atendida.

A metodologia proposta foi aplicada a redes de tamanho real, comparando-se ainda as soluções obtidas, em termos de desempenho computacional e de qualidade, com aquelas advindas da resolução por métodos exatos. A heurística visa obter uma solução de boa qualidade e que exige um menor tempo computacional para ser alcançada. Enquanto o método exato precisa de um *solver* baseado na técnica de *branch-and-bound*, sendo freqüentemente necessária quase que uma hora para a obtenção do resultado ótimo nas redes testadas, o método heurístico consegue produzir boas soluções (por vezes as ótimas) em poucos minutos.

Algumas questões particulares do problema não foram trabalhadas, sendo deixadas para o futuro. Uma delas é a proibição do *overlapping*, que exige o controle da filiação dos nós de demanda no sentido de garantir que apenas um site atenda cada nó de demanda. Isto significa considerar que, dentre os arcos de escoamento da demanda, apenas um para cada nó deve-se efetivado na solução final.

Outras condições mais específicas podem ser tratadas em trabalhos futuros, tais como: considerar outras topologias ou tecnologias para a ligação site-CS, diferentes daquela considerada neste trabalho; atribuição de valores específicos aos limitantes superiores e inferiores dos arcos (escape ou atendimento de alguma demanda em particular); obrigatoriedade de ausência ou presença de algum equipamento especial; atribuição de patamares ao objetivo de custo ou de receitas associadas ao escoamento da demanda.

Finalmente, esta pesquisa constitui uma alternativa para a resolução de problemas de otimização associados à evolução de redes. Outras redes com características semelhantes podem ser tratadas da mesma maneira. Um exemplo é dado pelas redes *wireless indoor*, cujos aspectos técnicos são muito semelhantes aos das redes FWA.

Referências

ACTS Project AC215 CRABS. "Propagation planning procedures for LMDS". *Deliverable D3P1B*, <http://www.fou.telenor.no/english/crabs/crabs.html>, 1999a.

ACTS Project AC215 CRABS. "Specification of next-generation of LMDS architecture". *Deliverable D2P1B*, <http://www.fou.telenor.no/english/crabs/crabs.html>, 1999b.

ACTS Project AC215 CRABS. "User and service aspects of LMDS". *Deliverable D1P2*, <http://www.fou.telenor.no/english/crabs/crabs.html>, 1999c.

AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, B. *Network Flows: theory, algorithms and applications*. Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall, 1993. Prentice-Hall, 1993.

ANATEL. *Plano Geral de Metas para Universalização*. Disponível em: www.anatel.gov.br. Acesso em: 30/06/2005.

BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. (eds.). *Evolutionary Computation 1: Algorithms and Operators*. Institute of Physics Publishing, 2000a.

BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. (eds.). *Evolutionary Computation 2: ADVANCED and Operators*. Institute of Physics Publishing, 2000b.

BANOV, Joana T. M., "Abordagem evolutiva para o planejamento multi-período da expansão da rede de acesso aos serviços de telecomunicações" Tese de Doutorado. FEEC/UNICAMP, 2005.

Referências.

- BAZARAA, Mokhtar S.; JARVIS, John J.; SHERALI, Hanif D. *Linear Programming and Network Flows*, 2nd ed., Wiley, New York, 1990.
- BEASLEY, J. E. “Algorithms for unconstrained two-dimensional guillotine cutting”. *Journal of the Operational Research Society*, 36(4), p. 297–306, 1985.
- BERETTA, R.; MOSCATO, P. “The Number Partitioning Problem: An Open Challenge for Evolutionary Computation”. In: D. Corne, M. Dorigo e F. Glover (eds.), *New Ideas in Optimization*, (chapter 17). Washington: McGraw-Hill, 1999.
- CARLSON, C. M. F.; AUTHIÉ, G. “Optimized Design of LMDS Cells: Site Location, Equipment Sizing and Users Homing”, *Procs. of the Third IEEE International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks - MWCN'2001*, Recife, p. 111-118, 2001b .
- CARLSON, C. M. F.; AUTHIÉ, G. A Model with Link-efficiency Parameters for Optimal. Location and Sizing of LMDS Cells, *Procs. of the Third International Workshop on Design of Reliable Communication Networks - DRCN'2001*, Budapeste, p.42-49, 2001a.
- CHRISTOFIDES, N.; WHITLOCK, C. “An algorithm for two dimensional cutting problems”. *Operations Research* 25, p. 30-44, 1977.
- COMBELLES, P., I. Siaud and P. Antoine. “Fixed wireless access: an overview”. *Annales des Télécommunications* 54 (9-10), 452-463, September-October 1999.
- COSTA, Alysson M. *Otimização de Planejamento da Rede Secundária de Distribuição de Energia Elétrica*. Tese de Mestrado FEEC/UNICAMP, 2000.
- CPLEX. *Using the CPLEX (Callable Library)*. CPLEX Optimization, Inc., 1994.
- DESOUSA, M. A., *et alii*. “Planejamento Otimizado da Infra-estrutura de Redes Celulares”. *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, p.53-65, 2000.
- DESOUSA, M.; CARLSON, C.M.F. “Avaliação do risco técnico-econômico no planejamento da rede de acesso multi-serviço – Uma abordagem Fuzzy”. *Anais do XVIII CBA*, Florianópolis, p. 2192-2197, 2000.

- DESOUZA, M. A., "Planejamento de rede de Acesso: Maximização de Receita num ambiente multi-serviço". Tese de Mestrado FEEC/UNICAMP, 1999.
- DOMINGOS, A. P; CARLSON, C. M. F; RIBEIRO, R. V. "A Genetic Approach for Network FWA". *XVII SBIA – Brazilian Symposium on Artificial Intelligence*, MA – São Luís, 2004.
- DOMINGOS, A. P; CARLSON, C. M. F; RIBEIRO, R. V. "Uma Abordagem Genética para o Modelo de FWA". *XXXV SBPO - Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional – Workshop*. RN, Natal, 2003.
- DORN, A. *Wireless Communication – O guia essencial de comunicação sem fio*. Rio de Janeiro: Campus, 2001.
- FENTE, F. J. J., *et alii*. "Planning of the base station interconexion network". *Comunicaciones de Telefónica I+D 8 (1&2)*, 30-40, January-December 1997.
- FEO, T.; REZENDE, M. "A greed randomized adaptive search procedure for maximum independent set". *Operations Research* 42, p. 860-879, 1994.
- FOGEL, D. B. "An Introduction to Simulated Evolutionary Computation", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 5, no. 1, p. 3-14, 1994.
- GAVISH, B.; SRIDHAR, S. "Economic aspects of configuring cellular networks". *Wireless Networks* 1, 115-128, 1995.
- GLOVER, F.; LAGUNA, M. "Tabu Search". In: Colin Reeves (ed.), *Modern Heuristic Techniques*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, p. 70-150, 1993.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. *Otimização Combinatória e Programação Linear - Modelos e Algoritmos*. Rio de Janeiro: Campus, 2000.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- GUIMARÃES, D. A. *Introdução aos sistemas celulares & WLL*. Inatel, 1998.

HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

KIRKPATRICK, S.; GELATTI, C. D.; VECCHI Jr., M. P. "Optimization by Simulated Annealing". *Science* 220, p. 671-679, 1983.

LÄHTEENOJA, M.; OLSEN, B. T.; IMS, L. A. "Technical and economical analyses of broadband radio access systems". *ACTS AC215 CRABS International Workshop* (Lillhammer, Norway), <http://www.fou.telenor.no/prosjekter/crabs/Workshop.html>, March 1999.

LGT. Lei Geral da Telecomunicação: n.º 9472/97 art. 60 § 1º, 1997.

MICHAELIS. *Moderno dicionário da língua portuguesa*. Companhia Melhoramentos. São Paulo, 1998.

MICHALEWICZ, Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer, 1996b.

MICHALEWICZ, Z.; SCHOENAUER, M. "Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems", *Evolutionary Computation*, vol. 4, no. 1, p. 1-32, 1996a.

MOLTÓ, M. P., *et alii*. "Radio coverage prediction and frequency allocation optimization". *Comunicaciones de Telefónica I+D* 8 (1&2), 53-65, January-December 1997.

NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. *Integer and Combinatorial Optimization*. New York, John Wiley, 1988.

NORDBOTTEN, A.. "LMDS Systems and their Application". *IEEE Communications Magazine* 38 (6), 150-154, June 2000.

OSMAN, I. "Heuristics for Combinatorial Optimization Problems: Developments and New Directions". In: *Proceedings of the First Seminar on Information Technology and Applications*, Marfield Conference Centre, September 1991.

PAIVA, Ítalo A. *Planejamento Otimizado para Infra-Estrutura de Redes de Comunicações Móveis*. Tese de Mestrado FEEC/UNICAMP, 2002.

- RODRIGUES, L. F. *Meta-Heurística evolutiva para o dimensionamento de lotes com restrições de capacidade em sistemas multi-estágios*. Tese de mestrado – ICMC – USP, 2000.
- SALLES, R. M. *Protocolos de Múltiplo Acesso para Redes sem Fio*. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 1998.
- SHIN, H. W.; WASSELL, I. J. “Dynamic Channel Allocation Using a Genetic Algorithm for a TDD Broadband Fixed Wireless Access Network”, *Procs. of the IASTED International Conference in Wireless and Optical Communications*, July 17-19, Banff, Alberta, Canada, p. 521-526, 2002.
- STAMATELOS, G. M.; KOUKOULIDIS, V. N. “LMDS/LMCS hub interconnection alternatives and multiple access issues”. *Wireless Networks* 6, 201-209, 2000.
- UFONGENE, C. M. “A Model for the Cost Analysis of Wireless Access Architectures”. *Bell Labs Technical Journal*, 134-154, July-September 1999.
- WEBB, William, “*Introduction to Wireless Local Loop*”. Artech House Publishers, Inc.: Boston, London, 1998.
- ZANAKIS, S. H.; EVANS, J. R.; VAZACOPOULOS, A. A. Heuristic Methods and Applications: A Categorized Survey. *European Journal of Operational Research*, 43, p. 88-110, 1989.