

GLEICY APARECIDA CABRAL

**UMA ARQUITETURA PARA OTIMIZAÇÃO DO ACESSO À
INTERNET EM REDES EM MALHA SEM FIO**

Belo Horizonte
04 de julho de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**UMA ARQUITETURA PARA OTIMIZAÇÃO DO ACESSO À
INTERNET EM REDES EM MALHA SEM FIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

GLEICY APARECIDA CABRAL

Belo Horizonte
04 de julho de 2008



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Uma Arquitetura para Otimização do Acesso à Internet em Redes em
Malha Sem Fio

GLEICY APARECIDA CABRAL

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída por:

Dr. GERALDO ROBSON MATEUS – Orientador
Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais

Dr. CÉLIO VINICIUS NEVES DE ALBUQUERQUE
Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal Fluminense

Dr. RODNEY REZENDE SALDANHA
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais

Dr. ANTÔNIO ALFREDO FERREIRA LOUREIRO
Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 04 de julho de 2008

Resumo

Redes em malha sem fio (*wireless mesh networks*) são redes dinamicamente auto-organizadas e auto-configuráveis cujos nós automaticamente estabelecem e mantêm a conectividade entre eles. As redes em malha sem fio possuem três tipos de nós: clientes, roteadores e *gateways*. Os roteadores e os *gateways* têm pouca ou nenhuma mobilidade. Os roteadores formam a espinha dorsal (*backbone*) das redes em malha sem fio. A comunicação em uma rede em malha sem fio é multi-salto (*multi-hop*), e as funcionalidades de *gateway/bridge* dos nós possibilitam a integração de diferentes redes, tais como, Internet, Wi-Fi, celular etc.

O planejamento de redes em malha sem fio envolve muitas variáveis como topologia, mobilidade, tráfego, custo e capacidade. Neste trabalho é proposto um modelo matemático para o problema de planejamento de redes em malha sem fio. A solução do modelo consiste em determinar os caminhos de roteamento entre clientes e *gateways* que minimizam os custos de instalação dos roteadores utilizados e os custos dos enlaces que fazem parte das rotas. São realizados experimentos para validação do modelo utilizando o pacote de otimização comercial CPLEX. Os experimentos mostram que o problema de planejamento de redes em malha sem fio é um problema computacionalmente difícil. Neste trabalho também é desenvolvido um simulador para redes em malha sem fio sobre os arcabouços de simulação JiST e SWANS. O algoritmo de roteamento proposto encontra rotas que também minimizam os custos de instalação dos roteadores utilizados e os custos dos enlaces que fazem parte das rotas. As soluções apresentadas pelo simulador são comparadas com as soluções encontradas pelo CPLEX. O simulador é robusto e eficiente. Ele encontra boas soluções para os cenários de simulação, além de conseguir simular redes de tamanho razoável.

Palavras-chave:

Redes em malha sem fio

Otimização

Modelo matemático

Solução ótima

Simulação

Roteamento

Abstract

Wireless mesh networks are dynamically self-organized and self-configured, with the nodes in the network automatically establishing and maintaining mesh connectivity among themselves. Wireless mesh networks consist of three types of nodes: clients, routers and gateways. Routers have minimal or no mobility. Routers form the backbone of mesh networks. Multi-hop communication is used in wireless mesh network and the gateway/bridge functionalities in nodes enable the integration of wireless mesh networks with various existing wireless networks such as Internet, Wi-Fi, cellular, etc.

Wireless mesh networks planning involves several variables as network topology, mobility, traffic, cost and capability. This paper presents a mathematical model for the planning of wireless mesh networks. The model solution determines the routes between clients and gateways that minimize the installation costs of the routers and the costs of links that are part of the routes. Experiments are conducted for model evaluation using optimization software CPLEX. Experiments show that the planning of wireless mesh networks is a computationally difficult problem. In this work is also developed a simulator for wireless mesh networks over the simulation frameworks JiST and SWANS. The proposed routing algorithm finds routes that also minimize the installation costs of the routers and the costs of links that are part of the routes. The simulation solutions are compared with the solutions found by CPLEX. The simulator is robust and efficient. It finds good solutions and it is able to simulate large networks.

Keywords:

Wireless mesh networks

Optimization

Mathematical model

Optimal solution

Simulation

Routing

*Dedico este trabalho aos meus pais Jaime e
Aparecida.*

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais pela dedicação e apoio em todos os momentos. Agradeço ao prof. Geraldo Robson Mateus pelos preciosos direcionamentos ao longo da execução deste trabalho e pela oportunidade de desenvolver um trabalho de pesquisa em conjunto. Agradeço a todos os professores e funcionários do departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais pela acolhida e pelo compromisso em manter a qualidade associada aos cursos e trabalhos do departamento. Quero agradecer também aos membros da banca por terem aceito o convite e colaborado com o enriquecimento do trabalho.

Agradeço a todos os alunos do LaPO (Laboratório de Pesquisa Operacional) pelas contribuições dadas a este trabalho, pelo companherismo e por estarem sempre dispostos a ajudar. Agradeço também a todas as pessoas que trabalham comigo no laboratório Synergia por colaborarem continuamente com o meu crescimento profissional e pessoal. Finalmente, agradeço aos meus irmãos, à minha família e a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para concretização deste trabalho.

Sugestões, dúvidas e comentários sobre este trabalho são bem-vindos e podem ser enviados para gleicy.cabral@gmail.com.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Arquitetura das redes em malha sem fio	2
1.2	Características das redes em malha sem fio	4
1.3	Cenários de aplicação	5
1.4	Objetivo do trabalho	6
1.5	Organização do texto	8
2	Trabalhos Relacionados	9
2.1	Conceitos e padrões	9
2.2	Topologia	9
2.3	Propagação de sinal	10
2.4	Múltiplos canais e múltiplas interfaces	10
2.5	Atribuição de canais	11
2.6	Camada MAC	11
2.7	Roteamento	12
2.8	Qualidade de serviço	13
2.9	Modelos	13
2.10	Simulação	13
2.11	Aplicações	14
3	Definição do Problema	16
3.1	Planejamento de redes em malha sem fio	16
3.2	Formulação matemática	17
4	Desenvolvimento	23
4.1	Simulador para redes em malha sem fio	23
4.1.1	JiST	24
4.1.2	Swans	25
4.2	Os componentes do simulador para redes em malha sem fio	27
4.2.1	Entrada de dados	27
4.2.2	Cenário	28
4.2.3	Nós da rede	29
4.2.4	Aplicação do cliente	29

4.2.5	Aplicação do roteador sem fio	30
4.2.6	Aplicação do <i>gateway</i>	31
4.2.7	Modelo TCP/IP	31
4.2.8	Roteamento	31
4.2.9	Mobilidade	32
4.2.10	Energia	32
4.2.11	Probabilidade	33
4.2.12	Estatísticas	33
4.2.13	<i>Logger</i>	33
4.2.14	Gerador de arquivos para o CPLEX	34
4.2.15	Dados de saída	34
5	Resultados Computacionais	35
5.1	Solução ótima	35
5.1.1	Gerador de instâncias	36
5.1.2	Cenários dos testes com o CPLEX	37
5.1.3	Resultados do CPLEX	37
5.2	Simulação	43
5.3	Discussão dos resultados	52
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	54
6.1	Trabalhos futuros	55
	Referências Bibliográficas	57

Lista de Figuras

1.1	Rede em malha sem fio com arquitetura infra-estruturada.	3
1.2	Rede em malha sem fio com arquitetura cliente.	3
1.3	Rede em malha sem fio com arquitetura híbrida.	4
1.4	Exemplo de rede de vizinhança.	6
1.5	Exemplo de rede metropolitana.	7
4.1	Arquitetura do arcabouço de simulação JiST.	25
4.2	Arquitetura do SWANS.	26
4.3	Arquitetura do simulador de redes em malha sem fio.	28
5.1	Primeiro cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.	45
5.2	Segundo cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.	47
5.3	Terceiro cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.	47
5.4	Quarto cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.	48
5.5	Quinto cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.	48
5.6	Sexto cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.	49
5.7	Sétimo cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.	50
5.8	Oitavo cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.	51

Lista de Tabelas

5.1	Cenários definidos para os testes com o CPLEX.	37
5.2	Variações de características consideradas para as instâncias.	38
5.3	<i>Gap</i> e tempo de execução para as instâncias do tipo <i>p</i>	39
5.4	<i>Gap</i> e tempo de execução para as instâncias do tipo <i>m</i>	39
5.5	<i>Gap</i> e tempo de execução para as instâncias do tipo <i>g</i>	40
5.6	Resultados para as instâncias do tipo <i>p</i>	41
5.7	Resultados para as instâncias do tipo <i>m</i>	41
5.8	Resultados para as instâncias do tipo <i>g</i>	42
5.9	Informações sobre os roteadores para os experimentos de simulação.	44
5.10	Demanda dos clientes para o primeiro experimento de simulação.	45
5.11	Demanda dos clientes para o segundo experimento de simulação.	46
5.12	Demanda dos clientes para o terceiro experimento de simulação.	47
5.13	Demanda dos clientes para o oitavo experimento de simulação.	50
5.14	Descrição dos cenários dos testes de capacidade do simulador.	51
5.15	Comparação dos dados dos testes de capacidade do simulador.	52

Capítulo 1

Introdução

O sucesso comercial das redes Wi-Fi [Wi-Fi Alliance (1997)] e os avanços em muitas tecnologias sem fio têm em parte estimulado o desenvolvimento das redes em malha sem fio (*wireless mesh networks*). Esta tecnologia ainda está se desenvolvendo e visa complementar a infraestrutura cabeada com um *backbone* sem fio para prover acesso à Internet para nós móveis ou usuários em áreas residenciais e de escritórios.

As redes em malha sem fio possuem três tipos de nós: clientes, roteadores e *gateways*. Ao contrário das redes Wi-Fi, com cada ponto de acesso conectado com a rede cabeada, nas redes em malha sem fio somente um subconjunto de pontos de acesso estão conectados à rede cabeada. Todos os pontos de acesso conectados à rede cabeada são chamados de *gateways*. Os pontos de acesso que não possuem conexões com a rede cabeada diretamente são chamados roteadores. Os roteadores se conectam aos *gateways* por meio do paradigma da comunicação multi-salto (*multi-hop*). Em uma rede em malha sem fio, os roteadores repassam o tráfego uns para os outros a fim de estabelecer e manter a conectividade na rede.

Para aumentar a flexibilidade das redes em malha sem fio, os roteadores são, geralmente, equipados com múltiplas interfaces de rede sem fio que possuem uma ou mais tecnologias de acesso. As funcionalidades de *gateway/bridge* nos nós possibilitam a integração das redes em malha sem fio com redes existentes como Internet, Wi-Fi, celular etc.

As redes em malha sem fio são uma tecnologia promissora para a próxima geração de redes sem fio. Muitos cenários de aplicação estão estimulando seu rápido desenvolvimento. Uma rede em malha sem fio objetiva prover conexões banda larga para uma comunidade com um número elevado de usuários requisitando acesso à Internet. Assim, capacidade é um conceito chave para as redes em malha sem fio. Nestas redes, a capacidade é impactada por vários fatores, tais como, a topologia, o padrão de tráfego, a densidade de nós da rede, o número de canais e o valor de potência de transmissão utilizado.

Apesar das aplicações das redes em malha sem fio parecerem atraentes, um trabalho considerável nas camadas do modelo de comunicação em rede é ainda requerido antes da implantação em larga escala destas redes. Prover acesso banda larga para uma comunidade requer mínima largura de banda e requisitos de qualidade de serviço (QoS). Entretanto, os protocolos da camada física, enlace e roteamento existentes não satisfazem completamente

estes requisitos. Assim, para garantir o sucesso das redes em malha sem fio, é preciso investir em pesquisas e remodelar os protocolos de comunicação para aumentar a capacidade destas redes.

Vários consórcios de indústrias estão agora ativamente envolvidos na pesquisa sobre redes em malha sem fio, e vários grupos de padronização do IEEE vêm trabalhando na definição de novos padrões para estas redes. O conceito de redes em malha sem fio com multi-saltos é aplicável de redes pessoais (*Personal Area Networks* - PAN), em que as distâncias entre os nós da rede é de no máximo 10 metros, a redes metropolitanas (*Metropolitan Area Networks* - MAN), em que a distância entre os nós da rede pode chegar a 5 quilômetros. Muitas empresas como Notel Networks e Strix Systems estão oferecendo soluções de redes em malha sem fio para automação predial, acesso à Internet de pequena e larga escala etc. Desde sua concepção, as redes em malha sem fio têm atraído a atenção de vários grupos de pesquisadores. Alguns exemplos são o projeto *Roofnet* do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) [Bicket et al. (2005)], o projeto de rede em malha sem fio da Microsoft [Microsoft (2005)] e o projeto brasileiro *ReMesh* [UFF (2006)].

As próximas seções discutem aspectos como a arquitetura, as características e os cenários de aplicação das redes em malha sem fio.

1.1 Arquitetura das redes em malha sem fio

As redes em malha sem fio possuem três diferentes tipos de nós: clientes, roteadores e *gateways*. Um roteador é equipado com múltiplas interfaces de rede que podem ter diferentes tecnologias de acesso sem fio. Comparado com um roteador sem fio convencional, os roteadores das redes em malha sem fio podem atingir a mesma cobertura utilizando uma potência de transmissão menor através da comunicação multi-salto. Apesar desta diferença, os roteadores convencionais e os roteadores de redes em malha sem fio são construídos com um *hardware* bem similar.

Nas redes em malha sem fio, somente os *gateways* estão conectados à rede cabeada, provendo acesso à Internet. Os roteadores conectam-se aos *gateways* através do paradigma da comunicação multi-salto. Os roteadores repassam o tráfego uns para os outros para estabelecer e manter a conectividade. Note que os roteadores e *gateways* têm um projeto similar, com a exceção de que os *gateways* conectam diretamente com a rede cabeada e os roteadores não.

Os clientes das redes em malha sem fio demandam acesso à Internet e também podem trabalhar como roteadores. Entretanto, as funcionalidades de *gateway/bridge* não estão presentes nestes nós. Além disso, os clientes normalmente possuem somente uma interface de rede. Como consequência, o *hardware* e o *software* dos nós clientes podem ser bem mais simples do que dos roteadores. Há uma grande variedade de dispositivos clientes em comparação com os roteadores. Os clientes podem ser *laptops*, *desktops*, PDAs, celulares etc.

Akyildiz et al. (2005) propõe a diferenciação de três tipos de arquiteturas para as redes em malha sem fio: arquitetura infra-estruturada, arquitetura cliente e arquitetura híbrida. A

Figura 1.1 mostra a arquitetura infra-estruturada de uma rede em malha sem fio. As linhas sólidas e pontilhadas indicam, respectivamente, enlaces com e sem fio.

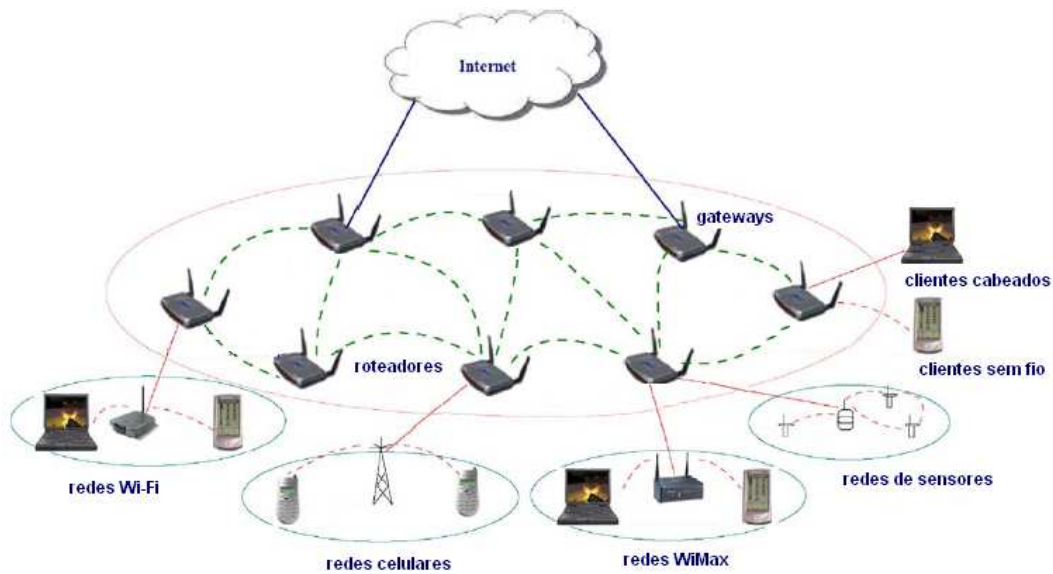


Figura 1.1: Rede em malha sem fio com arquitetura infra-estruturada.

[Fonte: Akyildiz et al. (2005)]

A arquitetura infra-estruturada possui roteadores formando uma infra-estrutura para os clientes. O *backbone* das redes infra-estruturadas pode ser construído utilizando vários tipos de tecnologias sem fio. Entretanto, o padrão mais utilizado é o IEEE 802.11. Por meio dos *gateways*, os roteadores podem ser conectados à Internet. Esta arquitetura permite a integração das redes em malha sem fio com outras redes sem fio existentes, através das funcionalidades de *gateway/bridge* dos nós. Clientes convencionais com interface ethernet podem ser conectados aos roteadores por meio de enlaces ethernet.

A arquitetura infra-estruturada é o tipo mais comumente utilizado. Por exemplo, redes de vizinhança (*neighborhood networks*) podem ser construídas utilizando esta arquitetura. Nestas redes, os roteadores são colocados nos telhados das casas em uma vizinhança e eles servem como pontos de acesso para os usuários nas casas e ruas.



Figura 1.2: Rede em malha sem fio com arquitetura cliente.

[Fonte: Akyildiz et al. (2005)]

A Figura 1.2 mostra a arquitetura cliente. Esta arquitetura provê redes *peer-to-peer* entre

dispositivos clientes. Nesta arquitetura, os nós clientes possuem funcionalidades de roteamento e configuração que possibilitam a disponibilização de aplicações para os clientes da rede. Nas redes em malha sem fio com arquitetura cliente, um pacote é repassado pelos nós até que alcance o nó de destino. A arquitetura cliente normalmente utiliza somente uma tecnologia de rádio nos dispositivos clientes.

A Figura 1.3 mostra a arquitetura híbrida. Esta arquitetura é a combinação das arquiteturas infra-estruturada e cliente. Os clientes podem acessar a rede por meio dos roteadores ou através de outros clientes. Enquanto a infra-estrutura da rede (*backbone*) provê conectividade com outras redes, tais como, Internet, Wi-Fi, celular etc; a capacidade de roteamento dos clientes possibilita aumentar a conectividade e a cobertura dentro da rede em malha sem fio.

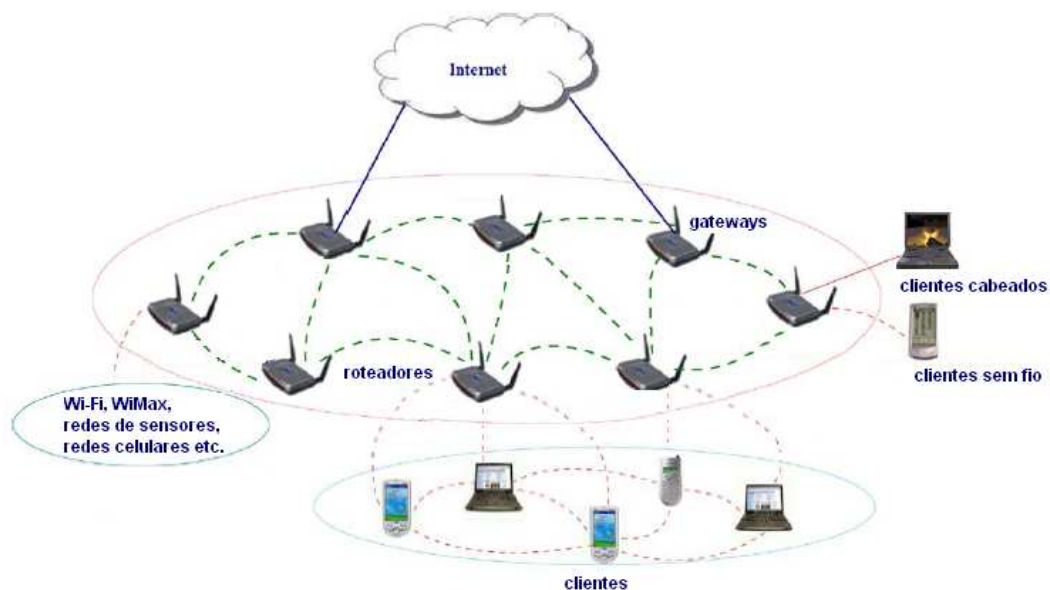


Figura 1.3: Rede em malha sem fio com arquitetura híbrida.

[Fonte: Akyildiz et al. (2005)]

1.2 Características das redes em malha sem fio

As principais características das redes em malha sem fio são apresentadas a seguir.

Auto-organização e auto-configuração: o *backbone* das redes em malha sem fio provê larga cobertura, conectividade e robustez para a rede. A arquitetura da rede é flexível, possibilitando que a implantação e configuração sejam fáceis. Nas redes em malha sem fio, não existe um nó do qual dependa toda a rede. Os nós enviam mensagens *broadcast* uns para os outros e a rede é auto-organizada. Se houver problemas com um nó qualquer, os outros nós descubrem um caminho de roteamento alternativo. Dessa forma, as redes em malha sem fio são tolerantes a falhas.

Comunicação multi-salto: um objetivo das redes em malha sem fio é estender a cobertura das redes sem fio já existentes, mantendo a interferência na rede em níveis mais baixos e

fazendo um reuso das frequências de transmissão mais eficiente. Outro objetivo é prover conectividade entre clientes que não possuem enlaces com visada direta. Para atender a estes objetivos, a comunicação nas redes em malha sem fio é multi-salto.

Interoperabilidade com redes sem fio existentes: as funcionalidades de *gateway/bridge* dos *gateways* e roteadores das redes em malha sem fio permitem a integração de várias redes existentes como Wi-Fi, Internet, redes celulares etc. Usuários de uma destas redes podem utilizar serviços providos pelas outras redes através da infra-estrutura sem fio das redes em malha.

Nós clientes atuando como roteadores: nas redes em malha sem fio, os nós clientes também podem trabalhar como roteadores, repassando tráfego de outros nós clientes para os roteadores sem fio. A capacidade de roteamento dos nós clientes aumenta a conectividade e a cobertura da rede, uma vez que os nós clientes que estão fora do alcance dos roteadores podem utilizar outros nós clientes para terem acesso à Internet.

Número de usuários e volume de tráfego: as redes em malha sem fio têm por objetivo prover conexões banda larga à Internet para comunidades com tamanhos razoáveis. Assim, a rede tem que ser capaz de acomodar um grande número de usuários. Em uma rede em malha sem fio, o volume de tráfego é alto, principalmente por causa da transmissão de dados multimídia. Por isso, os algoritmos de roteamento precisam ser escaláveis, favorecendo o balanceamento de carga.

Concentração de tráfego ao longo de certos caminhos: nas redes em malha sem fio, o tráfego está concentrado ao longo dos caminhos que seguem diretamente para os *gateways*.

Mobilidade e consumo de energia dependentes do tipo de nó: os roteadores têm pouca ou nenhuma mobilidade e não possuem restrições de energia. Já os clientes possuem restrições de energia e um modelo de mobilidade associado.

Múltiplos rádios: a capacidade das redes em malha sem fio pode ser incrementada com a utilização de múltiplos rádios pelos roteadores sem fio. Assim, é possível transmitir e receber informação simultaneamente através de uma atribuição de canais que minimize a interferência na rede.

Protocolo de roteamento adaptativo: em razão das diferenças de mobilidade e consumo de energia entre os nós clientes e roteadores, é necessário definir um protocolo de roteamento adaptativo que suporte clientes e roteadores sendo utilizados para repassar tráfego na rede.

1.3 Cenários de aplicação

Há vários cenários de aplicação para as redes em malha sem fio. Aqui são apresentados dois exemplos: redes de vizinhança e redes metropolitanas.

A Figura 1.4 mostra um exemplo de rede de vizinhança (*neighborhood network*). Nestas redes, não há um ponto de acesso à Internet para cada usuário. A rede possui alguns pontos de conexão com a Internet que são compartilhados pelos usuários. Com isso, os recursos são utilizados com mais eficiência e os custos são menores para cada usuário.

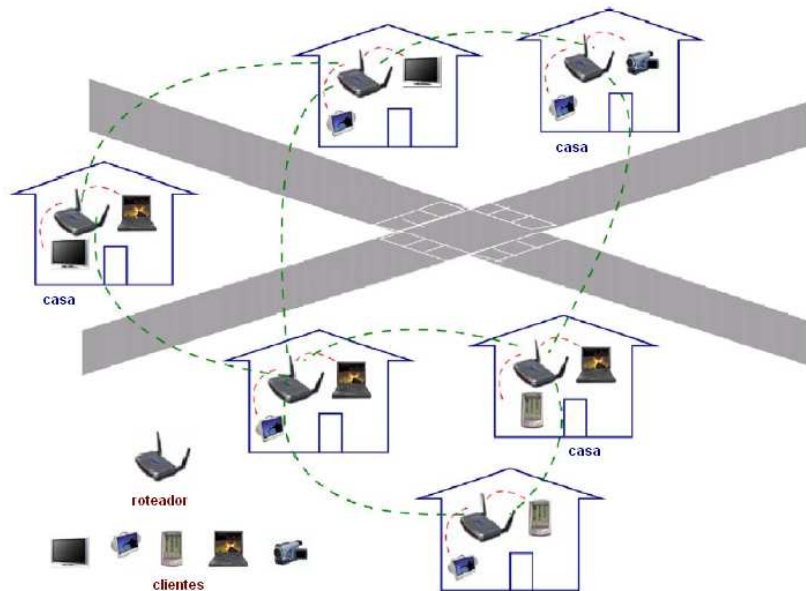


Figura 1.4: Exemplo de rede de vizinhança.

[Fonte: Akyildiz et al. (2005)]

A Figura 1.5 mostra um exemplo do conceito de rede em malha sem fio aplicado às redes metropolitanas. A capacidade de auto-organização de uma rede em malha sem fio reduz a complexidade de implantação e manutenção da rede. E o *backbone* da rede provê uma solução viável para os usuários de acesso à Internet em qualquer lugar, a qualquer hora. Além da implantação de redes para acesso à Internet, é possível construir cidades digitais, oferecendo infra-estrutura de comunicação sem fio, em ambiente metropolitano, a todos os cidadãos.

1.4 Objetivo do trabalho

As redes em malha sem fio consistem em uma área de pesquisa recente com vários tópicos que ainda precisam ser explorados. As redes em malha sem fio introduzem um novo paradigma de acesso à Internet. A informação disponível em qualquer lugar, a qualquer momento. Neste novo cenário, o principal objetivo é aumentar a capacidade e a confiabilidade da rede, reduzindo o custo para o usuário final. Assim, para alcançar este objetivo, o planejamento cuidadoso da rede é uma tarefa muito importante.

O planejamento de uma rede consiste em determinar a quantidade de recursos necessária para atender à demanda por comunicação dos clientes. E ainda, como deve ser feita a alocação dos recursos para o atendimento da demanda dos clientes de forma a respeitar as restrições estabelecidas. O planejamento de redes em malha sem fio envolve muitas variáveis como:

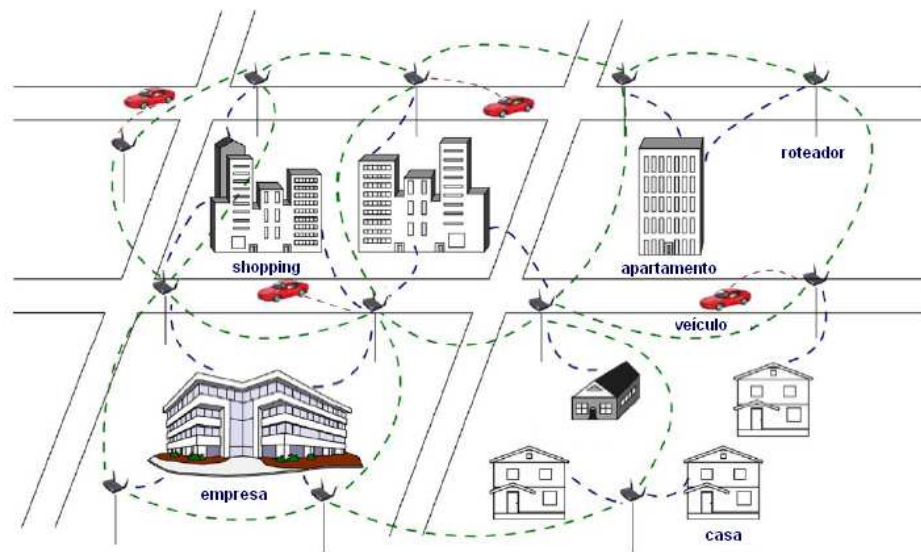


Figura 1.5: Exemplo de rede metropolitana.

[Fonte: Akyildiz et al. (2005)]

topologia, mobilidade, tráfego, custo e capacidade.

Neste trabalho é examinado o problema de planejamento de redes em malha sem fio. Este problema visa atender a demanda dos clientes por acesso à Internet. A solução do problema consiste na escolha de um subconjunto de roteadores sem fio para compor o roteamento entre os clientes e os *gateways*. A proposta do trabalho não é estudar com profundidade algum aspecto deste problema, mas sim, apresentar uma visão geral e correlacionar vários aspectos envolvidos com o problema.

O problema abordado neste trabalho possui a estrutura típica de um problema de otimização: um ou mais objetivos que devem ser minimizados, sujeitos a um conjunto de restrições. Assim, na primeira parte do trabalho, é proposto um modelo matemático para o problema de planejamento de redes em malha sem fio. No modelo, um subconjunto de roteadores sem fio com mínimo custo de instalação deve ser escolhido para atender à demanda dos clientes. Também são escolhidos os enlaces com os menores custos de comunicação para compor o roteamento entre os clientes e os *gateways*. Além disso, os clientes podem ser utilizados como roteadores no modelo proposto. As restrições do modelo estão relacionadas com a capacidade dos enlaces entre os nós e a energia dos clientes. Experimentos para validação do modelo são realizados. Para abordar o problema de uma forma mais próxima do mundo real, é desenvolvido um simulador para redes em malha sem fio na segunda parte do trabalho. Na simulação, os mesmos critérios da otimização (escolha dos roteadores com os menores custos de instalação e dos enlaces com os menores custos de comunicação) são utilizados para o planejamento, a implantação e a operação da rede em malha sem fio. Porém, o problema é abordado considerando os protocolos de comunicação em rede do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), um modelo de mobilidade para os clientes e um modelo de tráfego em que as demandas dos clientes (requisições) estão distribuídas ao longo do tempo. Também

são realizados experimentos para testar o desempenho do simulador construído. As soluções apresentadas pelo simulador são comparadas às soluções encontradas com a resolução do modelo matemático. O objetivo é avaliar os resultados obtidos com a ferramenta de simulação construída com a incorporação dos critérios da otimização.

1.5 Organização do texto

O restante deste trabalho está organizado da maneira descrita a seguir. O Capítulo 2 lista os principais trabalhos da literatura e apresenta um panorama sobre o estado da arte. O Capítulo 3 define o problema de planejamento de redes em malha sem fio e apresenta um modelo matemático para este problema. O simulador para redes em malha sem fio desenvolvido neste trabalho é descrito no Capítulo 4. No Capítulo 5, são mostrados os resultados dos experimentos realizados. Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta um panorama sobre redes em malha sem fio. Para facilitar o entendimento, os trabalhos foram agrupados por assunto e são apresentados a seguir.

2.1 Conceitos e padrões

Em Akyildiz et al. (2005) e Nandiraju et al. (2007), há uma ampla discussão sobre as características, arquiteturas e cenários de aplicação das redes em malha sem fio. Também são discutidos os principais desafios relacionados com as camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) para as redes em malha sem fio.

Em Lee et al. (2006), são apresentados os padrões propostos para os diferentes tipos de redes em malha sem fio. O padrão para as redes MAN (*Metropolitan Area Networks*) é o IEEE 802.16. A família de padrões 802.11 é a mais utilizada para redes LAN (*Local Area Networks*). E para redes PAN (*Personal Area Networks*), estão sendo adotados os padrões IEEE 802.15.5, Bluetooth e ZigBee.

2.2 Topologia

A questão da topologia das redes em malha sem fio é abordada em So e Liang (2006). Neste trabalho, os nós vizinhos cooperam e repassam pacotes uns aos outros para permitir a utilização de um mesmo acesso à Internet e distribuir os custos de instalação entre a vizinhança. Por causa do tamanho da área de cobertura, várias estações repetidoras são instaladas para repassar o tráfego dos usuários finais para a estação rádio-base e vice-versa. Diferentes tecnologias de comunicação sem fio são utilizadas na transmissão de informação entre os usuários finais e as estações repetidoras, bem como entre as estações repetidoras e a estação rádio-base. O foco do trabalho é minimizar o número de estações repetidoras instaladas e o algoritmo de decomposição de Benders foi utilizado para encontrar soluções ótimas para as instâncias do problema. Comparando o problema que acabou de ser descrito com o problema tratado nesta dissertação, observa-se que, em ambos os trabalhos, os nós vizinhos cooperam para que todos os clientes tenham acesso à Internet. O modelo matemático proposto aqui nesta dissertação

também considera que os clientes podem possuir diferentes tecnologias de comunicação sem fio. Entretanto, as estações repetidoras (roteadores sem fio) sempre utilizam uma mesma tecnologia de comunicação sem fio no repasse de pacotes de informação entre eles. Além disso, o foco do trabalho é minimizar os custos de instalação das estações repetidoras e os custos dos enlaces utilizados para atendimento da demanda. Aqui nesta dissertação, também são encontradas soluções ótimas para as instâncias, mas para isso é utilizado o pacote de otimização comercial CPLEX.

Em Tang et al. (2005), é estudado o controle de topologia considerando a interferência e o roteamento com QoS (*Quality of Service*) em redes em malha sem fio com múltiplos canais e tráfego dinâmico. Diferentes atribuições de canais podem levar a diferentes topologias de rede. No trabalho, é apresentada uma heurística para o problema de controle de topologia considerando a interferência. A heurística procura uma atribuição de canal para a rede que leva a uma topologia com mínima interferência. O trabalho também define o problema de roteamento considerando largura de banda. Este problema consiste em encontrar rotas para requisições de conexões com requisitos de largura de banda. Uma heurística para este problema também é apresentada. O algoritmo de roteamento proposto aqui nesta dissertação também encontra rotas considerando a largura de banda das requisições dos clientes. A interferência na rede não é considerada no problema abordado aqui neste trabalho.

Em Peters et al. (2007), é apresentada uma classificação de vários tipos de topologia e a influência destas topologias em termos de latência e perda de pacote em cenários com *handoff*. Vários esquemas de *handoff* são estudados, e os pontos positivos e negativos são identificados. O problema abordado aqui nesta dissertação não considera o *handoff*.

2.3 Propagação de sinal

A simulação atua em um importante papel na avaliação de protocolos de redes sem fio. Enquanto os protocolos são simulados com razoável realismo, a propagação do sinal em transmissões sem fio e a mobilidade dos nós não são. Atualmente, a propagação de sinal em simulações é feita considerando os modelos *free-space* e *2-ray* [Rappaport, T. (1996)]. Tais modelos são válidos somente para espaços abertos que não possuem colinas e edifícios muito altos. Em Sridhara e Bohacek (2007), são discutidas técnicas para propagação de sinal em áreas urbanas para ambientes de simulação.

No trabalho apresentado aqui nesta dissertação, é utilizado o modelo de propagação de sinal *2-ray*, uma vez que o arcabouço de simulação de rede sem fio utilizado (SWANS) disponibiliza apenas os modelos de propagação *free-space* e *2-ray*.

2.4 Múltiplos canais e múltiplas interfaces

Múltiplos canais estão disponíveis para uso no padrão IEEE 802.11. Múltiplos canais podem incrementar a capacidade da rede disponível, mas requerem novos protocolos para explorar a capacidade disponível. O trabalho de Kyasanur e Vaidya (2005) estuda o problema de

umentar a capacidade das redes sem fio com múltiplos canais usando múltiplas interfaces. Neste trabalho, considera-se que múltiplas interfaces estão disponíveis, mas o número de interfaces disponíveis é menor que o número de canais disponíveis. Também é proposta uma classificação de heurísticas de roteamento que possuem uma boa estratégia de atribuição de interface. No trabalho ainda é proposta uma nova heurística de atribuição de interface que não requer modificações no padrão IEEE 802.11. Heurísticas de roteamento que podem ser utilizadas com a estratégia de atribuição de interfaces proposta também são identificadas.

A formulação matemática apresentada aqui nesta dissertação considera que os clientes podem possuir diferentes interfaces de comunicação e apresentarem demanda para cada uma delas. Entretanto, o problema tratado aqui não aborda a questão da atribuição de interfaces.

2.5 Atribuição de canais

Em Marina e Das (2005), o problema de atribuição de canais em redes em malha sem fio com múltiplos rádios é abordado. Neste trabalho, a formulação para o problema de atribuição de canais é comparada ao problema de controle de topologia, mostrando que o problema abordado é NP-completo. Os autores propõem uma heurística gulosa para o problema de atribuição de canais. Os resultados mostram que a interferência na rede é reduzida consideravelmente.

O problema de atribuição de canais em redes em malha sem fio é, geralmente, formulado como um problema de programação inteira determinístico. Em Papadaki e Friderikos (2008), é apresentada uma formulação para o problema baseada em programação dinâmica com componentes estocásticos. A decomposição temporal é utilizada para reduzir o tamanho do problema inteiro. Além disso, um método de programação dinâmica aproximado (*approximate dynamic programming* - ADP) é usado para atacar o problema da dimensionalidade. Os resultados numéricos revelam que o algoritmo é melhor do que as melhores heurísticas conhecidas para o problema para diferentes topologias de redes.

Roteadores com múltiplos rádio podem aumentar significativamente o desempenho das redes em malha sem fio. Entretanto, uma atribuição de canais estática pode degradar o desempenho da rede por causa da interferência. Em Ramachandran et al. (2006), é proposto um algoritmo de atribuição de canais que considera a interferência denominado BFS-CA (*Breadth First Search Channel Assignment*). O BFS-CA aumenta o desempenho da rede minimizando a interferência entre roteadores.

Assim como a interferência e o *handoff*, o problema de atribuição de canais não é tratado aqui nesta dissertação.

2.6 Camada MAC

Em Acharya et al. (2004), é apresentado o projeto detalhado e a análise de desempenho do protocolo MACA-P (*Multiple Access Collision Avoidance with Parallelism*), um RTS/CTS (*Request to Send / Clear to Send*) que habilita transmissões simultâneas em redes em malha sem fio. O MACA-P é baseado no protocolo IEEE 802.11 DCF MAC (*Distributed Coordination*

Function / Media Access Control). O protocolo IEEE 802.11 DCF MAC não permite qualquer transmissão paralela na vizinhança de um nó transmissor ou receptor (para uma transmissão em andamento). O protocolo MACA-P é um conjunto de aprimoramentos do protocolo 802.11 que permite transmissões em paralelo quando dois nós vizinhos são ambos transmissores ou receptores, sendo que, cada par (transmissor e receptor) não são vizinhos. O desempenho do MACA-P é avaliado através de simulação. A carga da rede (*throughput*) utilizando o MACA-P é comparada à carga utilizando o protocolo 802.11 RTS/CTS MAC.

Na simulação apresentada aqui nesta dissertação, os nós possuem apenas um rádio e a camada MAC da rede consiste em uma implementação do padrão 802.11b. Neste padrão, a cada momento, ou o nó está enviando dados ou recebendo. Além disso, não ocorrem transmissões paralelas na vizinhança de um nó transmissor ou receptor (para uma transmissão em andamento).

2.7 Roteamento

Em Draves et al. (2004), o foco está no roteamento em redes em malha sem fio. Neste trabalho, são consideradas redes sem fio com nós estacionários, como exemplo as redes sem fio de comunidade (*Community Wireless Networks*). O objetivo é escolher um caminho com alto *throughput* entre uma origem e um destino. A métrica utilizada atribui pesos para os enlaces baseado no tempo de transmissão esperado (Expected Transmission Time - ETT) de um pacote sobre o enlace. O ETT é uma função da taxa de perda e largura de banda do enlace. É estudado o desempenho da métrica através de uma rede sem fio com 23 nós, sendo que cada nó está equipado com a tecnologia 802.11.

No trabalho Bejerano et al. (2007), considera-se que os nós clientes não têm mobilidade e se conectam diretamente aos roteadores. Neste caso, o algoritmo de roteamento deve computar o caminho entre cada roteador sem fio e um *gateway* e alocar a largura de banda necessária para atender à demanda associada ao roteador. O algoritmo de roteamento proposto procura maximizar a utilização da rede através do balanceamento do tráfego na rede. Neste trabalho, os resultados da simulação ficam bem próximos das soluções ótimas.

Na simulação apresentada aqui nesta dissertação, diferentemente dos trabalhos citados acima, há um modelo de mobilidade associado aos nós clientes. No roteamento das demandas entre clientes e *gateways*, o caminho de roteamento é completamente determinado antes do início da transmissão dos dados. O algoritmo de roteamento proposto encontra as rotas que levam à utilização dos roteadores com os menores custos de instalação e dos enlaces com os menores custos de comunicação e com maior capacidade (largura de banda) não utilizada. Uma rota somente é escolhida se a largura de banda que não está sendo utilizada para os enlaces pertencentes a rota é maior que a demanda a que se pretende atender.

2.8 Qualidade de serviço

Em Hilario (2006), é proposto um arcabouço de suporte à qualidade de serviço (*QoS*) em redes em malha sem fio. O arcabouço é formado por um conjunto de mecanismos que juntos permitem que a mídia transmitida apresente a qualidade desejada pelo usuário. O arcabouço possui mecanismos de especificação de requisitos de qualidade de serviço por parte da aplicação, um mecanismo de reserva de recursos que fornece garantias de largura de banda e priorização de fluxos multimídia e um mecanismo de monitoramento e adaptação do fluxo que permite que a transmissão dos dados se adapte às condições da rede e apresente o desempenho desejado pelo usuário. Neste trabalho, são feitas simulações no ambiente ns-2 e os resultados são comparados com os resultados do arcabouço de *QoS* para redes *ad hoc* INSIGNIA.

No trabalho apresentado aqui nesta dissertação, não há nenhum suporte à qualidade de serviço em redes em malha sem fio.

2.9 Modelos

Muitos dos trabalhos encontrados na literatura concentram-se em resolver problemas relacionados a algum aspecto das redes em malha sem fio. Há poucos trabalhos dedicados na definição de um modelo que caracterize, simultaneamente, vários aspectos das redes em malha sem fio.

A determinação da localização dos *gateways* é um fator crítico para o desempenho das redes em malha sem fio. Em Qiu et al. (2004), é apresentado um modelo matemático para o problema de localização dos *gateways*. Os algoritmos de solução propostos consideram o *layout* da rede, as demandas dos usuários, características dos enlaces sem fio, propagação e interferência. Os algoritmos também são projetados para prover tolerância a falhas e tratar variações da carga de trabalho na rede. Os algoritmos propostos são avaliados analiticamente e através de simulação.

No trabalho apresentado aqui nesta dissertação, a localização dos *gateways* é definida de forma aleatória.

2.10 Simulação

O simulador ns-2 tem suporte limitado para simular redes em malha sem fio que utilizam o padrão 802.11. No trabalho Mhatre (2007), são acrescentadas novas funcionalidades às camadas física e MAC do ns-2. As novas funcionalidades são: computação da interferência cumulativa em SINR (*Signal to Interference and Noise Ratio*), um módulo de *fading* e um arcabouço para a estimativa da qualidade de um enlace.

A simulação apresentada aqui nesta dissertação é desenvolvida utilizando os arcabouços de simulação JiST e SWANS. O SWANS possui implementações de modelos de *fading* e *path loss* e possui também dois modelos para a interferência. Contudo, o SWANS não disponibiliza

um mecanismo para estimativa da qualidade de um enlace.

2.11 Aplicações

Em Bicket et al. (2005), é avaliada a habilidade de uma arquitetura para redes em malha sem fio prover acesso à Internet de alto desempenho enquanto demanda pouco planejamento de implantação e gerenciamento de operação. Este trabalho apresenta o projeto e a avaliação de desempenho de uma rede em malha sem fio real denominada *Roofnet*. Os roteadores da rede são colocados nos telhados de edifícios em uma área de quatro quilômetros quadrados próximo ao *campus* do MIT em Cambridge, Massachusetts. O projeto conta com 37 roteadores que demandam pouco esforço de instalação e manutenção por parte dos pesquisadores. Uma avaliação do desempenho mostra que a rede *Roofnet* trabalha bem. O *throughput* médio da rede é igual a 627 Kbps.

O *MeshNet* [University of California, Santa Barbara (2005)] trata-se de uma rede sem fio instalada no campus da universidade com 25 nós equipados com rádios 802.11a/b/g. Os nós são distribuídos em cinco andares dentro do prédio da engenharia. A rede está sendo utilizada para o desenvolvimento de protocolos e sistemas para operações robustas de redes sem fio multi-salto. Especificamente, a rede está sendo utilizada para conduzir pesquisas sobre protocolos de roteamento escaláveis, gerenciamento eficiente de redes e soluções de *QoS* para redes sem fio multi-salto.

A Microsoft Research tem um projeto de pesquisa em redes em malha sem fio denominado *Self-Organizing Neighborhood Wireless Mesh Networks*. O foco deste projeto é pesquisar tecnologias que viabilizem esse tipo de rede a médio e longo prazo. A Microsoft disponibiliza no seu site [Microsoft (2005)] sua implementação de rede em malha sem fio com distribuição gratuita para ser utilizado principalmente por instituições acadêmicas. Esta solução foi implementada através de uma camada chamada *Mesh Connectivity Layer* ou simplesmente MCL. A MCL é um *driver* que implementa um adaptador virtual de rede. A rede em malha sem fio que estiver disponível para conexão irá aparecer para o usuário como um enlace adicional de rede, porém virtual. A MCL é implementada entre as camadas de enlace e de rede. Para as camadas mais altas, ela é vista como mais um enlace Ethernet, embora seja virtual. Para as camadas mais baixas, a MCL aparece apenas como um outro protocolo que está sendo executado acima do nível físico. O protocolo de roteamento utilizado foi desenvolvido pela Microsoft e é chamado de *Link Quality Source Routing Protocol* ou LQSR. Ele é uma versão modificada do protocolo *Dynamic Source Routing*. O DSR foi estendido para que pudesse suportar várias métricas de qualidade de enlace e múltiplos rádios.

O trabalho de Kashyap et al. (2007) apresenta um estudo sobre o problema de suporte a chamadas VoIP (*Voice-over-Internet*) em uma rede em malha sem fio. Neste trabalho são propostas soluções para o controle de admissão de chamadas (CAC) e a seleção de rota para as chamadas de VoIP. A abordagem apresentada avalia se as restrições de capacidade (ou métricas de QoS) serão satisfeitas se uma nova chamada é admitida com uma dada rota. Os experimentos com uma rede 802.11a que possui 6 nós demonstram precisão do modelo e alto

desempenho.

O *ReMesh* [UFF (2006)] foi a primeira experiência universitária brasileira bem sucedida na construção de redes em malha sem fio. Neste projeto foi desenvolvido um protótipo de roteador sem fio com o objetivo de demonstrar na forma de prova de conceito a viabilidade de uma rede de acesso universitário faixa larga sem fio. Além dos componentes de *hardware*, foram desenvolvidas soluções em *software* para gerência da rede em malha sem fio, autenticação de usuários e suporte à qualidade de serviço. Duas redes em malha sem fio independentes foram implantadas: uma rede interna às instalações do prédio da engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF) e outra externa na vizinhança de São Domingos, próximo ao campus da Praia Vermelha da UFF. A rede de acesso universitária da UFF está em operação desde o final de março de 2006.

Capítulo 3

Definição do Problema

As redes em malha sem fio possuem várias características, e há um vasto conjunto de aspectos relacionados com o planejamento, a implantação e a operação destas redes. Neste capítulo o problema de planejamento de redes em malha sem fio será delineado utilizando a linguagem matemática. Assim, espera-se obter uma definição acurada para o problema abordado neste trabalho. Com a formulação matemática do problema, é possível resolvê-lo utilizando o ferramental matemático disponível na literatura, e assim, começar uma investigação sobre o problema. Além disso, o modelo matemático será utilizado para apoiar o desenvolvimento do simulador para redes em malha sem fio. A seção 3.1 descreve o problema de planejamento de redes em malha sem fio, e a seção 3.2 apresenta o modelo matemático proposto para este problema.

3.1 Planejamento de redes em malha sem fio

As redes em malha sem fio surgem como uma tecnologia promissora para a próxima geração das redes sem fio e estão inspirando vários cenários de aplicação, tais como, as redes de vizinhança e as redes metropolitanas. Há ainda muitos tópicos de pesquisa em aberto sobre este assunto. Neste trabalho, é abordado o problema de planejamento de redes em malha sem fio.

O planejamento é uma tarefa realizada antes da implantação da rede e consiste em determinar a quantidade de recursos necessária para atender à demanda estimada para os clientes. O planejamento de uma rede não é uma tarefa simples, uma vez que envolve muitas variáveis como: topologia da rede, mobilidade, modelo de tráfego, custo e capacidade. A falta de planejamento pode ocasionar a não alocação dos recursos necessários para o completo atendimento da demanda dos clientes, ou, do contrário, a alocação de mais recursos que o necessário, acarretando em desperdício de recursos e elevação de custos.

O problema de planejamento de redes em malha sem fio visa atender à demanda dos clientes por acesso à Internet, considerando a minimização de custos. Neste trabalho, considera-se que deve ser feito o planejamento de uma rede em malha sem fio cujos nós são equipados com diferentes tecnologias de comunicação sem fio. Além disso, a comunicação na rede é

multi-salto e os nós clientes podem atuar como roteadores. Há um valor associado à capacidade máxima de cada enlace de comunicação da rede. Também há restrições de energia associadas aos nós clientes.

A solução do problema de planejamento de redes em malha sem fio consiste na escolha de um subconjunto de roteadores sem fio com mínimo custo de instalação para fazer o atendimento da demanda dos clientes por acesso à Internet. Além disso, a solução também deve apresentar os caminhos de roteamento entre os clientes e *gateways*. Os caminhos de roteamento são escolhidos considerando a minimização dos custos de comunicação entre os nós.

A próxima seção apresenta a formulação do problema abordado neste trabalho em termos das variáveis, parâmetros, critérios de otimização e restrições.

3.2 Formulação matemática

Dada uma área D onde deve ser disponibilizado o serviço (área de cobertura), um conjunto de nós clientes I , um conjunto de roteadores sem fio J e um conjunto de *gateways* L com a função de disponibilizar acesso à Internet, sendo todos nós sem mobilidade, com coordenadas de localização (x,y) dentro da área D e com um determinado número de interfaces de rede K e canais de comunicação disponíveis por interface; o problema de planejamento de redes em malha sem fio consiste em selecionar um subconjunto de roteadores sem fio de mínimo custo que maximize a cobertura e a conectividade dentro da área D , isto é, o subconjunto de roteadores selecionados deve atender a demanda dos clientes para cada interface de rede disponível. O problema de planejamento de redes em malha sem fio deverá informar o roteador sem fio $j \in J$ que atende a demanda do cliente $i \in I$ pela interface de rede $k \in K$. Além disso, deverá existir um caminho de comunicação entre o roteador j e pelo menos um *gateway* $l \in L$.

O problema de planejamento de redes em malha sem fio deve gerar a solução minimizando a soma dos custos dos enlaces da rede utilizados, respeitando sempre os limites de capacidade de cada enlace. Além disso, deve respeitar as restrições de energia dos nós clientes. E ainda, se existirem clientes $i \in I$ que não estejam no alcance de comunicação de nenhum roteador sem fio $j \in J$, a demanda destes clientes é atendida utilizando-se como roteador algum outro cliente $o \in I$ que esteja no raio de comunicação de i e no alcance de comunicação de pelo menos um roteador sem fio $j \in J$. O cliente o deve possuir energia suficiente para o atendimento da sua própria demanda e da demanda do cliente i associado a ele. Na modelagem sendo feita aqui, considera-se que a demanda dos clientes já é conhecida.

Antes de continuar a descrição do modelo, serão apresentadas algumas notações.

$\mathbf{A}^{Cli-Cli}$: conjunto de enlaces que conectam nós clientes.

$\mathbf{A}^{Cli-Rot}$: conjunto de enlaces que conectam nós clientes e nós roteadores sem fio.

$\mathbf{A}^{Rot-Rot}$: conjunto de enlaces que conectam nós roteadores sem fio.

$\mathbf{A}^{Rot-Gat}$: conjunto de enlaces que conectam nós roteadores sem fio e *gateways*.

As variáveis do problema de planejamento de redes em malha sem fio são descritas a seguir.

$$x_{ij}^k \begin{cases} 1 & \text{se o nó cliente } i \text{ é atendido pelo roteador sem fio } j \text{ utilizando a interface } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x'_{ij}^k \begin{cases} \text{demanda do nó cliente } i \text{ para a interface } k \text{ que é atendida pelo roteador sem fio } j \end{cases}$$

$$y_j \begin{cases} 1 & \text{se o roteador sem fio } j \text{ atende a demanda de pelo menos um cliente } i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y'_j{}^k \begin{cases} 1 & \text{se o roteador } j \text{ atende a demanda de pelo menos um cliente } i \text{ pela interface } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$z_{j pq} \begin{cases} 1 & \text{se o enlace } pq \in (A^{Rot-Rot} \cup A^{Rot-Gat}) \text{ faz parte da rota entre o nó roteador } j \text{ e} \\ & \text{um gateway qualquer da rede} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$z'_{j pq} \begin{cases} \text{demanda atendida pelo roteador } j \text{ que passa pelo enlace } pq \in (A^{Rot-Rot} \cup A^{Rot-Gat}) \end{cases}$$

$$w_{io}^k \begin{cases} 1 & \text{se a demanda do cliente } i \text{ pela interface } k \text{ é atendida através do cliente } o \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$w'_{io}{}^k \begin{cases} \text{demanda do cliente } i \text{ pela interface } k \text{ que é atendida através do cliente } o \end{cases}$$

$$t_i^k \begin{cases} 1 & \text{se o cliente } i \text{ está no alcance de comunicação de pelo menos um roteador } j \in J \\ & \text{utilizando a interface } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A seguir são definidos os parâmetros do modelo.

$$a_{ij}^k \begin{cases} 1 & \text{se o nó cliente } i \text{ está no alcance de comunicação do roteador sem fio } j \text{ utilizando} \\ & \text{a interface } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$a'_{io}{}^k \begin{cases} 1 & \text{se o nó cliente } i \text{ está no alcance de comunicação do cliente } o \text{ utilizando a} \\ & \text{interface } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$b_j^k \begin{cases} 1 & \text{se o roteador sem fio } j \text{ possui a interface de comunicação } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$d_i^k \begin{cases} \text{demanda do nó cliente } i \text{ para a interface } k \end{cases}$$

$$c_j \begin{cases} \text{custo de instalação do roteador sem fio } j \end{cases}$$

$$v_{pq} \begin{cases} \text{custo do enlace entre os nós } p \text{ e } q, \text{ tal que, } pq \in (A^{\text{Rot-Rot}} \cup A^{\text{Rot-Gat}}) \end{cases}$$

$$u_{pq} \begin{cases} \text{capacidade máxima do enlace entre os nós } p \text{ e } q, \text{ tal que,} \\ pq \in (A^{\text{Rot-Rot}} \cup A^{\text{Rot-Gat}}) \end{cases}$$

$$h_{ij}^k \begin{cases} \text{custo do enlace entre o nó cliente } i \text{ e o nó roteador } j \text{ para a interface } k \end{cases}$$

$$g_{io}^k \begin{cases} \text{custo do enlace entre os nós clientes } i \text{ e } o \text{ para a interface } k \end{cases}$$

$$n_j^k \begin{cases} \text{número máximo de nós clientes que podem ser atendidos pelo roteador } j \text{ utilizando a} \\ \text{interface } k \end{cases}$$

$$\varepsilon_{tij}^k \begin{cases} \text{quantidade de energia gasta na transmissão de 1 unidade de demanda utilizando a} \\ \text{interface } k \text{ do nó cliente } i \text{ até o nó } j \text{ (nó cliente ou nó roteador)} \end{cases}$$

$$\varepsilon_r^k \begin{cases} \text{quantidade de energia gasta na recepção de 1 unidade de demanda utilizando a} \\ \text{interface } k \end{cases}$$

$$\xi_i \begin{cases} \text{quantidade total de energia do nó cliente } i \end{cases}$$

Sobre os parâmetros c_j , v_{pq} , h_{ij}^k e g_{io}^k , há observações a serem feitas. O parâmetro c_j pode representar o custo monetário de instalação dos roteadores ou um outro valor que diferencie os roteadores, como exemplo, uma medida da facilidade de instalação e manutenção dos dispositivos. Os parâmetros v_{pq} , h_{ij}^k e g_{io}^k podem representar tanto o custo monetário da comunicação entre dois nós da rede quanto a distância entre dois nós, ou ainda, algum valor relacionado com a qualidade do enlace entre dois nós.

Os parâmetros a_{ij}^k e a'_{io}^k indicam se um dado nó está no alcance de comunicação de outro. Estes valores podem ser definidos através de uma função que considere diferentes componentes como, por exemplo, a distância, a interferência, a propagação do sinal, a potência máxima de transmissão etc.

A formulação matemática que será apresentada a seguir ainda possui outros três parâmetros: α , β e γ . Estes parâmetros são utilizados no ajuste de unidades de medida na função objetivo. Eles também podem ser utilizados na ponderação dos diferentes custos presentes na função objetivo.

Antes de apresentar a formulação matemática, é preciso descrever algumas outras notações.

$\mathbf{E}^q(A)$: conjunto de enlaces que chegam ao nó roteador ou *gateway* $q \in (J \cup L)$ e pertencem ao conjunto A .

$\mathbf{S}^q(A)$: conjunto de enlaces que deixam o nó roteador ou *gateway* $q \in (J \cup L)$ e pertencem ao conjunto A .

\mathbf{U} : valor bem grande comparado aos demais valores do problema.

A formulação matemática para o problema é apresentada a seguir.

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{j \in J} c_j y_j + \alpha \sum_{j \in J} \sum_{pq \in (A^{Rot-Rot} \cup A^{Rot-Gat})} v_{pq} z_{jpq} \\ & + \beta \sum_{ij \in A^{Cli-Rot}} \sum_{k \in K} h_{ij}^k x_{ij}^k + \gamma \sum_{io \in A^{Cli-Cli}} \sum_{k \in K} g_{io}^k w_{io}^k \end{aligned} \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J} a_{ij}^k x_{ij}^k = d_i^k t_i^k + \sum_{oi \in A^{Cli-Cli}} w_{oi}^k, \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (3.2)$$

$$x_{ij}^k \leq y_j^k, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in I} a_{ij}^k x_{ij}^k \leq n_j^k y_j^k, \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{pq \in E^q(A^{Rot-Rot})} z'_{jpq} - \sum_{qr \in S^q(A^{Rot-Rot} \cup A^{Rot-Gat}), r \neq j} z'_{jqr} = 0, \quad (3.5)$$

$\forall j \in J, \forall q \in (J - j)$

$$\sum_{qr \in S^q(A^{Rot-Rot} \cup A^{Rot-Gat})} z'_{jqr} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^k, \quad (3.6)$$

$q = j, \forall j \in J$

$$z'_{jpq} \leq u_{pq} y_p, \quad \forall j \in (J - q), \forall pq \in A^{Rot-Rot} \quad (3.7)$$

$$z'_{jpq} \leq u_{pq} y_q, \quad \forall j \in (J - q), \forall pq \in A^{Rot-Rot} \quad (3.8)$$

$$\sum_{j \in J} (z'_{jpq} + z'_{jqp}) \leq u_{pq}, \quad \forall pq \in (A^{Rot-Rot} \cup A^{Rot-Gat}) \quad (3.9)$$

$$z'_{jpq} \geq z_{jpq}, \quad \forall j \in J, \forall pq \in (A^{Rot-Rot} \cup A^{Rot-Gat}) \quad (3.10)$$

$$z'_{jpq} \leq U z_{jpq}, \quad \forall j \in J, \forall pq \in (A^{Rot-Rot} \cup A^{Rot-Gat}) \quad (3.11)$$

$$y_j'^k = b_j^k y_j, \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.12)$$

$$x_{ij}'^k \leq U a_{ij}^k x_{ij}^k, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.13)$$

$$\sum_{io \in A^{Cli-Cl_i}} w_{io}'^k = (1 - t_i^k) d_i^k, \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (3.14)$$

$$w_{io}'^k \geq w_{io}^k, \quad \forall io \in A^{Cli-Cl_i}, \forall o \in (I - i), \forall k \in K \quad (3.15)$$

$$w_{io}'^k \leq U a_{io}^k w_{io}^k, \quad \forall i \in I, \forall io \in A^{Cli-Cl_i}, \forall k \in K \quad (3.16)$$

$$t_i^k \leq \sum_{j \in J} a_{ij}^k, \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (3.17)$$

$$U t_i^k \geq \sum_{j \in J} a_{ij}^k, \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k \in K} \sum_{io \in A^{Cli-Cl_i}} \varepsilon_{tio}^k w_{io}'^k + \sum_{k \in K} \sum_{oi \in A^{Cli-Cl_i}} \varepsilon_r^k w_{oi}'^k \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \varepsilon_{tij}^k x_{ij}'^k \leq \xi_i, \quad \forall i \in I \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} & x_{ij}^k, y_j, z_{jppq}, w_{io}^k, t_i^k \in \{0, 1\}, x_{ij}'^k, y_j'^k, z_{jppq}', w_{io}'^k \geq 0, \quad \forall i \in I, \\ & \forall j \in J, \forall k \in K, \forall io \in A^{Cli-Cl_i}, \forall pq \in (A^{Rot-Rot} \cup A^{Rot-Gat}) \end{aligned}$$

O problema de planejamento de redes em malha sem fio consiste em minimizar a função objetivo f (equação 3.1) composta pela soma dos custos de instalação dos roteadores sem fio escolhidos e dos custos dos enlaces entre clientes, entre roteadores e entre clientes e roteadores utilizados para atender as demandas dos clientes.

A equação 3.2 garante que a demanda do cliente i e as demandas dos clientes $o \in I$ que não estão no alcance de comunicação de nenhum roteador e que repassam suas demandas para o cliente i são atendidas pelos roteadores.

Um cliente i somente pode ter sua demanda pela interface de rede k atendida pelo roteador j , se o roteador j possui a interface de rede k e foi escolhido para ser instalado (restrição 3.3). Além disso, o número de clientes atendidos por um roteador j deve ser menor ou igual ao número máximo de clientes que podem ser atendidos pelo roteador j , considerando a interface k (restrição 3.4).

As equações 3.5 e 3.6 garantem que a demanda que chega a um nó roteador q é igual à demanda que sai deste roteador e que a demanda dos clientes atribuídos a um roteador j é igual à demanda que sai deste roteador. As restrições 3.7 e 3.8 asseguram que somente há demanda

diferente de zero passando pelo enlace pq , se os roteadores sem fio p e q foram instalados. A soma das demandas que passam pelo enlace pq tem que ser menor que a capacidade do enlace (restrição 3.9). As restrições 3.10 e 3.11 indicam que somente pode haver demanda atribuída ao roteador j passando pelo enlace pq , se o enlace pq foi escolhido para fazer parte do roteamento entre o roteador j e um *gateway*.

A equação 3.12 define o valor da variável y_j^k . A restrição 3.13 garante que somente haverá demanda do cliente i pela interface k atendida pelo roteador sem fio j , se o cliente i está no alcance de comunicação do roteador j e i foi atribuído a j .

A demanda total de um cliente i repassada para outros clientes é igual à sua demanda original (equação 3.14). As restrições 3.15 e 3.16 asseguram que somente passará demanda pelo enlace io , se o cliente i está no alcance de comunicação do cliente o e o cliente i repassará parte ou toda a sua demanda para o cliente o .

As restrições 3.17 e 3.18 garantem um valor binário para a variável t_i^k . A inequação 3.19 está relacionada com a restrição de energia dos dispositivos clientes. A soma da energia gasta na transmissão da demanda do cliente i para outros clientes, da energia gasta na recepção da demanda de outros clientes e da energia gasta na transmissão da demanda do cliente i para roteadores sem fio deve ser menor ou igual à energia total do dispositivo cliente i . É interessante notar que um cliente i ou envia sua demanda para outros clientes ou para roteadores sem fio. Entretanto, foi modelada apenas uma inequação para a restrição de energia.

As variáveis $x_{ij}^k, y_j^k, z'_{j pq}, w'_{io}$ foram definidas como variáveis não negativas porque as restrições do modelo asseguram que estas variáveis somente podem assumir valores inteiros. A redução do número de variáveis inteiras facilita a resolução do problema.

Agora que o problema abordado neste trabalho já foi melhor definido, é o momento de propor métodos de solução para este problema. O modelo matemático proposto pode ser resolvido utilizando algum pacote de otimização. Neste trabalho, o modelo é resolvido utilizando o CPLEX [Ilog, Inc. (2008)]. O Capítulo 5 descreve em detalhes a resolução do problema com o uso do CPLEX. Analisando a formulação matemática apresentada nesta seção, verifica-se que importantes aspectos das redes em malha sem fio não são tratados nesta abordagem. Aspectos como mobilidade dos nós clientes, modelos e protocolos de comunicação etc. também devem ser considerados em uma abordagem que se aproxima do mundo real. Assim, no próximo capítulo, são descritos os componentes e o funcionamento do simulador para redes em malha sem fio desenvolvido neste trabalho.

Capítulo 4

Desenvolvimento

Este capítulo descreve o funcionamento do simulador para redes em malha sem fio desenvolvido neste trabalho.

Uma simulação consiste em imitar, durante determinado período de tempo, a operação de um sistema ou de um processo do mundo real. A simulação é desenvolvida a partir de um modelo para o sistema sendo estudado. O modelo, normalmente, toma a forma de um conjunto de considerações relacionadas a operação do sistema. A simulação pode ser usada tanto como uma ferramenta de análise para prever o efeito de mudanças em sistemas já existentes, quanto como uma ferramenta para prever o desempenho de novos sistemas antes mesmo que estes sejam construídos e implantados.

A seção 4.1 apresenta a proposta do simulador, e a seção 4.2 detalha os principais componentes do simulador para redes em malha sem fio desenvolvido neste trabalho.

4.1 Simulador para redes em malha sem fio

O Capítulo 3 descreve o problema de planejamento de redes em malha sem fio e apresenta um modelo matemático para este problema. Até aqui, o problema em estudo foi tratado de forma estática. Todos os parâmetros são conhecidos antes de iniciar a procura por uma solução para o problema. Para abordar o problema de uma forma mais dinâmica e próxima do mundo real, é desenvolvido um simulador para redes em malha sem fio.

Para o projeto do simulador, considera-se que há um conjunto de nós roteadores e *gateways* que podem ser utilizados para o atendimento da demanda dos clientes. O objetivo é simular uma rede em malha sem fio com nós clientes requisitando acesso à Internet. O simulador tem que ser capaz de escolher um subconjunto de nós roteadores e *gateways* para compor o roteamento das demandas entre clientes e *gateways*. A escolha dos roteadores e *gateways* é feita com base nos mesmos critérios de otimização (escolha dos roteadores com os menores custos de instalação e dos enlaces com os menores custos de comunicação) do modelo matemático apresentado no Capítulo 3. Porém, na simulação, o problema é abordado considerando os protocolos de comunicação em rede do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), um modelo de mobilidade para os nós clientes e um modelo de tráfego em que as demandas dos

clientes (requisições) estão distribuídas ao longo do tempo.

O simulador foi construído na linguagem Java [Sun microsystems (2008)] utilizando os arcabouços JiST (*Java in Simulation Time*) e SWANS (*Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator*) [Rimon Barr et al. (2005)].

JiST é um simulador de eventos discretos que roda sobre uma máquina virtual Java padrão. Ele é um protótipo de uma nova abordagem de propósito geral para construção de simuladores de eventos discretos, chamada simulação baseada em máquina virtual. A plataforma de simulação resultante é muito eficiente. O JiST é flexível e transparente. A transparência é um benefício chave: não é necessário escrever o código em uma linguagem específica de simulação. O JiST modifica o código escrito em Java, no nível de *bytecode*, acrescentando semântica de tempo de simulação. Assim, simulações JiST são escritas em Java, compiladas usando um compilador padrão Java e rodam sobre uma máquina virtual padrão Java.

O SWANS é um simulador de rede sem fio escalável construído sobre a plataforma JiST. Ele foi criado para validar a construção de simuladores que utilizam a abordagem baseada em máquina virtual e ser uma alternativa em relação às ferramentas de simulação de rede existentes. O SWANS é organizado como componentes independentes de software que podem ser combinados para formar uma rede sem fio completa. O SWANS tem as mesmas características dos simuladores de rede ns2 [DARPA et al. (1995)] e GloMoSim [UCLA (1999)]. O SWANS é eficiente e apresenta baixo consumo de memória.

As subseções a seguir apresentam uma descrição mais detalhada dos arcabouços de simulação JiST e SWANS.

4.1.1 JiST

O JiST (*Java in Simulation Time*) é um arcabouço de simulação baseado em Java que executa simulações de eventos discretos de forma eficiente e transparente. O JiST consiste em uma nova abordagem para construção de simuladores em que a semântica da simulação é introduzida na execução pela máquina virtual.

A principal distinção entre o JiST e outros sistemas de simulação é que com o JiST não é preciso escrever o código da simulação em uma linguagem específica. O JiST introduz a semântica de execução por tempo de simulação em programas escritos em Java padrão e eles são executados sobre uma máquina virtual padrão. O JiST converte uma máquina virtual padrão em um sistema de simulação de forma transparente.

A arquitetura do JiST, mostrada na Figura 4.1, consiste de quatro componentes: um compilador, um modificador de *bytecode*, um *kernel* de simulação e uma máquina virtual. Os programas de simulação são escritos em Java padrão e compilados utilizando o compilador padrão da linguagem Java. As classes compiladas são modificadas pelo modificador de *bytecode* para incorporar a semântica de tempo de simulação e serem executadas sobre o *kernel* de simulação. O programa de simulação, o modificador de *bytecode* e o *kernel* são escritos em Java padrão. Assim, todo este processo pode ocorrer dentro de uma máquina virtual Java padrão.

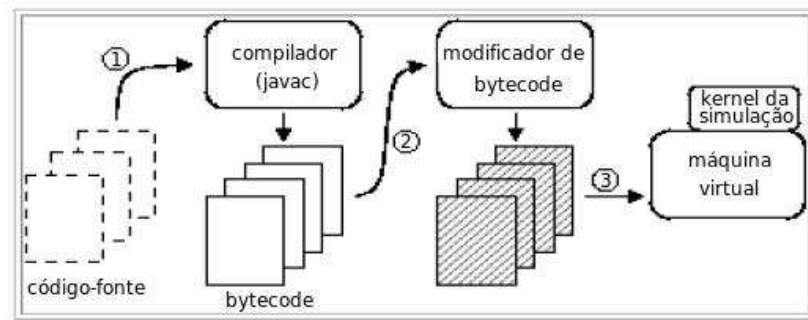


Figura 4.1: Arquitetura do arcabouço de simulação JiST.

[Fonte: Rimón Barr et al. (2005)]

São vários os benefícios desta abordagem de construção de simuladores sobre linguagens e sistemas tradicionais. Embutir a semântica de simulação dentro da linguagem Java permite o reuso do trabalho, incluindo a própria linguagem Java, bibliotecas e compiladores existentes. Esta abordagem também apresenta uma curva de aprendizado menor para os usuários e facilita o reuso de código de simulações desenvolvidas. O uso da máquina virtual padrão provê uma plataforma de execução portátil e eficiente. Além disso, como o *kernel* e a simulação estão ambos sendo executados dentro do mesmo espaço, são reduzidos os *overheads* com serialização e troca de contexto. Em suma, o benefício chave da abordagem JiST é que ela permite a execução eficiente de programas dentro do contexto de uma linguagem moderna e popular.

Para desenvolver um programa de simulação, é preciso incluir a biblioteca do JiST ao código-fonte do programa. A biblioteca do JiST implementa conceitos como tempo de simulação, *proxy* de entidades, eventos blocantes, agendamento de métodos e funções para serem executados em determinado tempo de simulação etc. E todos estes conceitos são implementados seguindo a sintaxe e semântica da linguagem Java.

4.1.2 Swans

O SWANS (*Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator*) é um arcabouço para simulação de redes sem fio construído sobre a plataforma JiST. O SWANS foi criado primeiramente porque as ferramentas de simulação de redes sem fio não são suficientes para as atuais necessidades de pesquisa. O SWANS também serve como uma validação da abordagem que utiliza máquina virtual para construção de simuladores.

O SWANS é organizado como componentes de software independentes que podem ser combinados para formar completas simulações de redes sensores ou redes sem fio em geral. A capacidade do SWANS é similar à capacidade de simuladores populares como ns2 e GloMoSim. A Figura 4.2 mostra a organização dos componentes do SWANS.

A interação entre os componentes do SWANS segue o padrão do modelo de camadas. O componente de uma camada tem acesso apenas aos componentes das camadas imediatamente superior e inferior. A divisão de responsabilidades na transmissão é a mesma do modelo TCP/IP.

o próximo salto dos pacotes. A camada de roteamento também faz chamadas para a camada de rede quando a informação sobre o próximo salto está disponível. O SWANS tem a implementação de três algoritmos de roteamento: ZRP (*Zone Routing Protocol*), DSR (*Dynamic Source Routing*) e AODV (*ad hoc On-demand Distance Vector Routing*).

A camada de transporte do SWANS recebe chamadas da camada de rede e repassa para a camada de aplicação. Ela também recebe chamadas da camada de aplicação e repassa os dados para a camada de rede. Há duas implementações de protocolos de transporte: TCP e UDP.

No topo do modelo de camadas está a camada de aplicação. Ela faz chamadas para a camada de transporte e recebe chamadas desta, normalmente através de *sockets*. A camada de aplicação também possibilita que uma aplicação de rede em Java padrão possa ser executada sobre a plataforma do SWANS.

4.2 Os componentes do simulador para redes em malha sem fio

A Figura 4.3 mostra a arquitetura definida para o simulador de redes em malha sem fio. Basicamente, o simulador lê o arquivo de entrada que contém os parâmetros da simulação e cria o cenário. O cenário é definido por uma área de cobertura e suas dimensões, um modelo de propagação de sinal e um conjunto de nós clientes, roteadores e *gateways*. O modelo de comunicação em rede utilizado na simulação é o TCP/IP. O simulador também permite definir um modelo de mobilidade e um modelo de consumo de energia para os nós clientes. A demanda e a energia inicial dos nós clientes são definidas de acordo com diferentes distribuições de probabilidade. Cada nó da rede tem o seu papel: o cliente demanda acesso à Internet, o roteador encaminha a demanda do cliente para o *gateway* e o *gateway* é o elemento que provê acesso à Internet. Assim, o simulador possui uma aplicação para cada tipo de nó da rede. No simulador, há um módulo de estatísticas responsável por computar dados da simulação como tempo de execução, número médio de saltos, quantidade de mensagens transmitidas na rede etc. O sistema também possui um módulo para gerar *logs* e outro para gerar arquivos com informações sobre o cenário da simulação. Estes arquivos são usados para criar problemas para o CPLEX resolver. A saída do simulador é composta pelo arquivo com os resultados da simulação, o arquivo com os *logs* do sistema e os arquivos utilizados para gerar problemas para o CPLEX.

As subseções a seguir detalham cada um dos componentes do simulador.

4.2.1 Entrada de dados

No arquivo de entrada, são definidos vários parâmetros. Para a simulação, deve-se informar o tempo de duração da simulação; a largura e o comprimento, em metros, da área de cobertura; o modelo de *fading* (*Rayleigh* ou *Rician*); o modelo de *path loss* (*free space* ou *2-ray*); o modelo de mobilidade dos nós clientes (*static*, *teleport*, *random walk* ou *random waypoint*) e

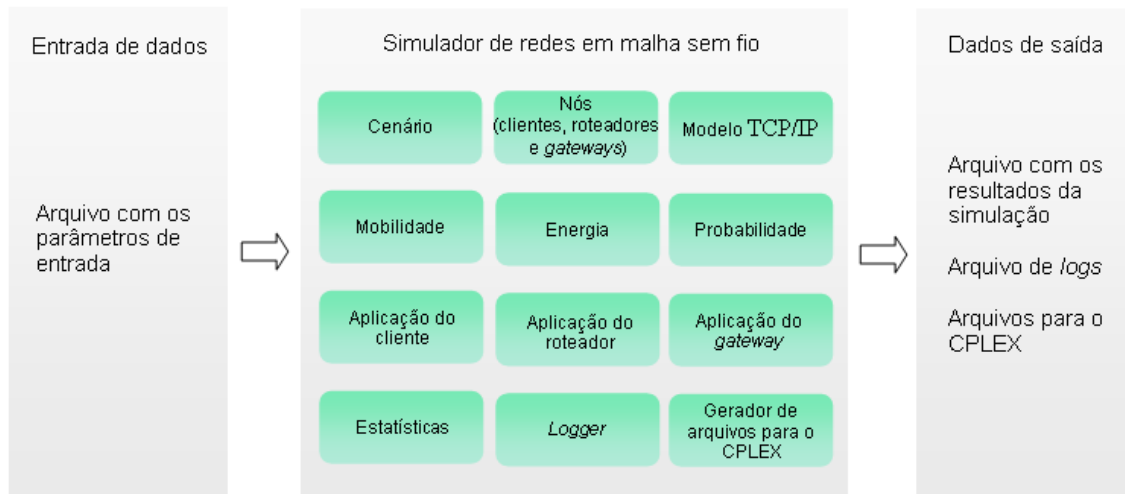


Figura 4.3: Arquitetura do simulador de redes em malha sem fio.

o limite de propagação do sinal, em dBm. Outros parâmetros da simulação também precisam ser informados: número de nós clientes; número de roteadores; número de *gateways*; o valor máximo para o custo de instalação, o valor máximo para o custo do enlace; a capacidade (largura de banda) máxima para um enlace, em Kbps; os parâmetros da distribuição de poisson utilizada para gerar o número total de demandas (requisições) dos clientes; os parâmetros da distribuição de pareto utilizada para obter o valor, em Kbps, de cada demanda (requisição) e o tempo de duração de cada demanda e os parâmetros da distribuição de weibull utilizada para obter a energia inicial de cada cliente da rede. Além disso, deve-se informar se serão ou não gerados os arquivos para o CPLEX e em qual tempo de simulação eles serão gerados.

4.2.2 Cenário

O cenário da simulação define uma área de cobertura para a rede. Cada nó da rede está associado a uma coordenada (x, y) dentro da área de cobertura. A área de cobertura é criada a partir de um componente do SWANS denominado *field*. Ao *field* pode ser associado um modelo de *fading* e um modelo de *path loss*. O *fading* refere-se à distorção que um sinal experimenta sobre um certo meio de propagação. Em redes sem fio, o *fading* é devido à propagação em múltiplos caminhos. O *path loss* é uma atenuação do sinal eletromagnético quando ele propaga pelo espaço. Na transmissão de uma mensagem, a camada física de um nó da rede faz uma chamada a um método do elemento *field* para que seja simulada a transmissão do sinal.

A implementação do SWANS para a camada física dos nós permite considerar ou não interferência entre transmissões na rede. Nos experimentos realizados neste trabalho, sempre que um cenário é criado, é informado um parâmetro para que a interferência não seja considerada. Assim, sempre que um nó de origem envia uma mensagem e o nó de destino está no alcance do nó de origem, o nó de destino recebe a mensagem corretamente, exceto se o

rádio do nó de destino estiver ocupado no mesmo instante recebendo ou transmitindo alguma mensagem.

4.2.3 Nós da rede

Há três tipos de nós em uma rede em malha sem fio: cliente, roteador e *gateway*. Na fase de inicialização do simulador, o arquivo de entrada é lido, e é criado o número de clientes, roteadores e *gateways* especificado no arquivo de entrada. Cada nó possui uma camada física, uma camada de enlace, uma camada de rede, uma camada de roteamento, uma camada de transporte e uma camada de aplicação. O número de demandas de cada cliente é gerado utilizando a distribuição de probabilidade de poisson. Cada demanda é composta por uma taxa de transmissão (em Kbps), o tempo de simulação inicial da demanda e sua duração. Para cada cliente, as taxas de transmissão e durações das demandas são gerados utilizando a distribuição de pareto. A energia inicial dos clientes segue a distribuição de weibull. Os custos de instalação dos roteadores e os custos dos enlaces da rede são escolhidos aleatoriamente entre 0 e o valor máximo informado no arquivo de entrada.

4.2.4 Aplicação do cliente

A arquitetura do arcabouço de simulação JiST facilita a simulação de sistemas com características intrínsecas de paralelismo. Com o JiST, é possível definir quando uma tarefa deve ser executada durante a simulação. Uma tarefa é um método escrito na linguagem Java. Além disso, uma ou mais tarefas podem ser executadas em um mesmo tempo de simulação. Neste ponto, é preciso estar atento à diferença entre tempo de execução e tempo de simulação. O tempo de execução corresponde ao intervalo entre o tempo de início e fim de execução do programa. Ele é calculado utilizando o relógio da máquina. Já o tempo de simulação depende do progresso do programa. Quando se está simulando um sistema, há um conjunto de tarefas que precisam ser executadas ao longo da simulação. É preciso definir em que momento da simulação cada tarefa será executada. Em uma simulação construída com o JiST, para que o sistema avance para o tempo de simulação $t+1$, todas as tarefas agendadas para o tempo t já devem ter sido concluídas.

No mundo real, uma rede em malha sem fio possui vários nós executando tarefas simultaneamente. Assim, por exemplo, em um mesmo momento, alguns nós clientes da rede podem estar transmitindo dados enquanto os demais estão ociosos. Alguns nós roteadores podem estar recebendo dados dos clientes enquanto outros estão transmitindo dados para os *gateways* e assim por diante. O JiST permite a definição de vários conjuntos de tarefas e a simulação da execução destes conjuntos. No contexto da simulação de uma rede em malha sem fio, este conjunto de tarefas pode ser entendido como uma aplicação a ser executada por um nó (dispositivo) da rede.

O simulador desenvolvido aqui neste trabalho possui três diferentes aplicações, uma para cada tipo de nó (cliente, roteador e *gateway*). A aplicação executada pelos nós clientes é descrita a seguir.

Na simulação, cada nó da rede possui uma lista de nós vizinhos. Assim, quando uma aplicação de cliente ou de roteador ou de *gateway* é iniciada, a primeira tarefa a ser executada é enviar uma mensagem de *hello* para descobrir quais são os nós vizinhos. Quando o nó recebe uma resposta para a mensagem de *hello*, ele atualiza sua lista de vizinhos.

Dessa maneira, quando a aplicação do cliente é iniciada, ele envia uma mensagem de *hello* para atualizar sua lista de vizinhos. A aplicação espera por um tempo pela resposta. O tempo máximo que o cliente espera pela resposta corresponde a um parâmetro de simulação. Enquanto o cliente espera por respostas para sua mensagem de *hello*, ele verifica se recebeu alguma mensagem de *hello* com origem em outro nó. Se sim, ele a responde enviando informações sobre sua capacidade e o custo associado ao enlace de comunicação entre ele e o nó de origem da mensagem de *hello*. Em seguida, se o cliente recebeu alguma resposta para sua mensagem de *hello*, ele atualiza sua lista de vizinhos com as informações sobre a capacidade e o custo associadas ao nó vizinho. Depois a localização do nó cliente é alterada de acordo com o modelo de mobilidade que está sendo utilizado, e o cliente entra no modo de espera. O tempo que o cliente fica no modo de espera (tempo ocioso) também é um parâmetro de simulação. Quando sai do modo de espera, ele volta a executar as mesmas tarefas descritas anteriormente. E este processo se repete, sucessivamente, durante toda a simulação. Quando o sistema chega ao tempo de simulação igual ao tempo inicial de uma demanda, o cliente encontra uma rota, utilizando o algoritmo de roteamento proposto neste trabalho, e inicia a comunicação com o protocolo TCP. O tempo inicial de uma demanda pode coincidir com o tempo em que o cliente está no modo de espera como com qualquer outro tempo da simulação, sendo que, para todos os casos, o cliente sempre dispara o procedimento de descoberta de rota.

4.2.5 Aplicação do roteador sem fio

Quando a aplicação do roteador é iniciada, ele envia uma mensagem de *hello* para atualizar sua lista de vizinhos. A aplicação espera por um tempo pela resposta. O tempo máximo que o roteador espera pela resposta corresponde a um parâmetro de simulação. Enquanto o roteador espera por respostas para sua mensagem de *hello*, ele verifica se recebeu alguma mensagem de *hello* com origem em outro nó. Se sim, ele a responde enviando informações sobre sua capacidade e o custo associado ao enlace de comunicação entre ele e o nó de origem da mensagem de *hello*. Em seguida, se o roteador recebeu alguma resposta para sua mensagem de *hello*, ele atualiza sua lista de vizinhos com as informações sobre a capacidade e o custo associadas ao nó vizinho. Depois o roteador entra no modo de espera. O tempo que o roteador fica no modo de espera (tempo ocioso) também é um parâmetro de simulação. Quando sai do modo de espera, ele volta a executar as mesmas tarefas descritas anteriormente. E este processo se repete, sucessivamente, durante toda a simulação. Enquanto o roteador está no modo de espera, ele pode ser utilizado para compor o roteamento de demandas entre clientes e *gateways*.

4.2.6 Aplicação do *gateway*

Um *gateway*, basicamente, somente precisa receber as demandas encaminhadas para ele pelos roteadores sem fio. Assim, quando a aplicação do *gateway* é iniciada, ele envia uma mensagem de *hello* para que sua lista de vizinhos seja atualizada. A aplicação espera por um tempo pela resposta. O tempo máximo que o *gateway* espera pela resposta corresponde a um parâmetro de simulação. Enquanto o *gateway* espera por respostas para sua mensagem de *hello*, ele verifica se recebeu alguma mensagem de *hello* com origem em outro nó. Se sim, ele a responde enviando informações sobre sua capacidade e o custo associado ao enlace de comunicação entre ele e o nó de origem da mensagem de *hello*. Em seguida, se o *gateway* recebeu alguma resposta para sua mensagem de *hello*, ele atualiza sua lista de vizinhos com as informações sobre a capacidade e o custo associadas ao nó vizinho. Depois o *gateway* entra no modo de espera. O tempo que o *gateway* fica no modo de espera (tempo ocioso) também é um parâmetro de simulação. Quando sai do modo de espera, ele volta a executar as mesmas tarefas descritas anteriormente. E este processo se repete, sucessivamente, durante toda a simulação. Enquanto o *gateway* está no modo de espera, ele pode receber demandas encaminhadas para ele pelos roteadores em fio.

4.2.7 Modelo TCP/IP

O modelo de comunicação em rede utilizado pelo simulador é o TCP/IP. No simulador, foram aproveitadas as implementações das camadas física, enlace, rede, transporte e aplicação do SWANS. A camada física dos nós pode ser definida para considerar interferência ou não. A camada de enlace consiste em uma implementação do protocolo 802.11b [IEEE (1999)]. A camada de rede utiliza o protocolo IPv4 [IETF (1981)]. A camada de roteamento não foi aproveitada do SWANS. A próxima subseção descreve o algoritmo de roteamento proposto neste trabalho. Para a camada de transporte, o SWANS possui implementações dos protocolos TCP [DARPA (1981)] e UDP [J. Postel (1980)]. E dois nós, origem e destino, se conectam para receber/transmitir informações através de *sockets* (camada de aplicação) [Socket (2008)].

4.2.8 Roteamento

Como descrito anteriormente, deseja-se que na simulação a demanda dos clientes seja atendida selecionando um subconjunto de nós roteadores e *gateways* com mínimo custo de instalação. Também deseja-se escolher os enlaces com os menores custos de comunicação para compor as rotas entre nós clientes e *gateways*. Estes critérios de otimização são os mesmos critérios definidos para o modelo matemático proposto no Capítulo 3.

Para que o atendimento da demanda dos clientes seja feito de acordo com os critérios de otimização definidos neste trabalho, é utilizado o algoritmo de roteamento descrito a seguir. No algoritmo de roteamento proposto neste trabalho, o caminho de roteamento entre clientes e *gateways* é determinado antes do início da transmissão dos dados. Quando o cliente tem uma demanda para ser transmitida, ele escolhe um nó da sua lista de vizinhos para enviar uma mensagem de descoberta de rota. Se há roteadores na lista de vizinhos, a demanda será

repassada para o roteador com o menor valor para a relação [custo de instalação (se possuir) + custo do enlace]/capacidade. Se não há nenhum roteador na lista de vizinhos, o vizinho escolhido é o cliente que apresenta o menor valor para [custo do enlace]/capacidade. Neste trabalho, optou-se por não permitir que um cliente conecte-se diretamente a um *gateway*. A mensagem de descoberta de rota carrega o valor da taxa de transmissão, em kbps, da demanda do cliente, e um nó só é escolhido para compor a rota se sua capacidade disponível é maior ou igual a taxa de transmissão em kbps requerida pelo cliente. Quando um nó (cliente ou roteador) recebe uma mensagem de descoberta de rota, ele escolhe um nó da lista de vizinhos e repassa a mensagem de descoberta de rota. O nó é escolhido sempre a partir da relação [custo de instalação (se possuir) + custo do enlace]/capacidade. Se um roteador recebe a mensagem de descoberta de rota e há *gateways* na sua lista de vizinhos, ele repassa a mensagem para o *gateway* com o menor valor para a relação [custo do enlace]/capacidade.

Quando um nó *gateway* recebe uma mensagem de descoberta de rota, ele envia uma mensagem para o nó cliente de origem da mensagem de descoberta de rota com a informação sobre a rota descoberta. Esta mensagem de resposta é enviada pela rota que acabou de ser descoberta.

Quando o cliente recebe a mensagem com a rota, ele inicia a transmissão de dados. Se o cliente não recebe a mensagem de resposta com a rota ou, se no momento da transmissão ocorre alguma indisponibilidade dos nós da rota, a demanda é considerada como não atendida. Não há nenhuma tentativa de redefinir a rota no momento da transmissão.

4.2.9 Mobilidade

O simulador utiliza as implementações de modelo de mobilidade do SWANS. Assim, os nós clientes da rede podem utilizar um dos seguintes modelos de mobilidade: *static*, *teleport*, *random walk* ou *random waypoint*. Entretanto, o simulador foi desenvolvido para que seja fácil a implementação e utilização de outro modelo de mobilidade por parte dos nós clientes.

No modelo de mobilidade *static*, os nós não se movimentam. Este é o modelo de mobilidade dos roteadores e *gateways*. No modelo de mobilidade *teleport*, é escolhida uma nova localização para o nó e este é teletransportado para ela. Então, espera-se algum tempo e o procedimento é repetido novamente. O modelo de mobilidade *random walk*, como o nome sugere, consiste em escolher uma direção e caminhar uma certa distância nesta direção, com algum componente fixo e outro aleatório. Então, espera-se algum tempo e o procedimento é repetido. No modelo de mobilidade *random waypoint*, cada nó se move ao longo de uma linha em ziguezague de um ponto para outro. Os pontos são distribuídos uniformemente sobre uma dada área convexa. O modelo possui como parâmetros a velocidade mínima e máxima dos nós.

4.2.10 Energia

O simulador possui um modelo bem simples de consumo de energia. Quando um nó cliente envia uma mensagem, é decrescida da quantidade de energia remanescente do nó uma fração de energia correspondente àquela transmissão. O valor decrescido é calculado com base na

taxa de transmissão e na duração da demanda. Quando um nó cliente recebe uma mensagem, é decrescido da sua quantidade de energia remanescente um valor proporcional ao tempo gasto na recepção da mensagem. Assim como para a mobilidade, é possível implementar e utilizar outros modelos de consumo de energia.

4.2.11 Probabilidade

O módulo de probabilidade permite obter um conjunto de números que seguem alguma das seguintes distribuições de probabilidade: bernoulli, binomial, erlang, gamma, geometric, normal, pareto, pascal, poisson, uniform ou weibull. As implementações destas distribuições foram obtidas em Projeto HASE (2002).

4.2.12 Estatísticas

O módulo de estatísticas é responsável por computar o tempo de execução da simulação; o custo total da solução (calculado de acordo com a equação 3.1 apresentada no Capítulo 3); o número de roteadores sem fio utilizados para o atendimento da demanda dos clientes; o número de mensagens de atualização da lista de vizinhos e de descoberta de rota que foram enviadas; o número de mensagens de atualização da lista de vizinhos e de descoberta de rota que foram recebidas; o número médio de saltos; a demanda total dos clientes em Kbps; a demanda atendida efetivamente pela rede em Kbps; a demanda em Kbps que não foi atendida porque não havia uma rota disponível e a demanda em Kbps não atendida pela rede por falta de energia dos nós clientes. Com as informações computadas pelo módulo de estatísticas, é possível gerar o arquivo de saída com os resultados da simulação.

4.2.13 *Logger*

O simulador gera um arquivo de saída que detalha as principais operações realizadas ao longo da simulação. O arquivo de *logs* é escrito com o auxílio do arcabouço *log4j* [Apache (1999)]. O *log4j* é uma ferramenta utilizada em aplicativos escritos na linguagem de programação Java. O *log4j* é um software livre de código aberto desenvolvido pela Apache Software Foundation. Ele fornece uma API para que o desenvolvedor de software possa fazer *log* de dados na sua aplicação.

No arquivo de *logs* do simulador estão informações como as dimensões da área de cobertura, os modelos de *fading*, *path loss* e mobilidade utilizados, os protocolos de comunicação da rede (802.11b, Ipv4, TCP etc.), as informações sobre as demandas de cada cliente (taxa de transmissão, tempo inicial e duração), os custos de instalação de cada roteador, o custo e capacidade de cada enlace da rede, o número de *gateways* da rede e o registro das mensagens enviadas e recebidas por cada nó.

4.2.14 Gerador de arquivos para o CPLEX

Este módulo é responsável por gerar arquivos com informações sobre o cenário da simulação para que possam ser criadas instâncias para o CPLEX. Assim, é possível fazer uma comparação entre as soluções apresentadas pelo simulador e as soluções encontradas pelo CPLEX.

No arquivo de entrada é definido em que tempo de simulação serão escritos os arquivos para o CPLEX. Para exemplificar, suponha que o tempo total de simulação seja igual a 120 e no arquivo de entrada tenha sido especificado que o simulador deve gerar os arquivos para o CPLEX no tempo 60 da simulação. Dessa forma, quando o sistema atingir o tempo de simulação igual a 60, um conjunto de arquivos para o CPLEX será gerado. Este conjunto de arquivos descreve o cenário no tempo de simulação 60, isto é, o número de clientes, roteadores e *gateways* existentes neste momento da simulação, bem como os custos de instalação dos roteadores, o custo e capacidade de cada enlace e as demandas dos clientes com tempo inicial igual a 60.

4.2.15 Dados de saída

O simulador registra os resultados da simulação em um arquivo. Neste arquivo são escritos todos os dados coletados pelo módulo de estatísticas. Exemplos destas informações são: o tempo total da simulação, o número de mensagens para atualização da lista de vizinhos e de descoberta de rota que foram enviadas e o número de mensagens de atualização da lista de vizinhos e de descoberta de rota que foram recebidas, o número médio de saltos nas rotas entre clientes e *gateways*, a demanda total dos clientes em KB etc.

O simulador também gera um arquivo de *logs* do sistema. Exemplos de informações de *log* são: a criação de cada nó da rede, a definição do cenário, o registro de todas as mensagens enviadas e recebidas pelos nós da rede etc.

O Capítulo 5 mostra uma comparação entre as soluções apresentadas pelo simulador e as soluções encontradas pelo CPLEX. Esta comparação é possível porque o simulador gera alguns arquivos com informações sobre o cenário da simulação, e estes arquivos são utilizados para criar instâncias a serem resolvidas pelo CPLEX.

No próximo capítulo, são apresentados os resultados do CPLEX para o modelo matemático proposto no Capítulo 3 e os resultados da simulação de redes em malha sem fio.

Capítulo 5

Resultados Computacionais

Este capítulo apresenta os resultados dos experimentos realizados com o pacote de otimização comercial CPLEX e com o simulador de redes em malha sem fio desenvolvido neste trabalho. Na seção 5.1, são apresentados os resultados obtidos nos testes de validação do modelo proposto no Capítulo 3 para o problema de planejamento de redes em malha sem fio. Na seção 5.2, são apresentados os resultados da simulação de diferentes cenários de redes em malha sem fio. A última seção (5.3) apresenta uma discussão dos resultados relatados nas seções anteriores.

5.1 Solução ótima

Um modelo matemático consiste em um conjunto de símbolos e relações matemáticas que representam de forma simplificada algum problema do mundo real. O modelo matemático facilita a compreensão do fenômeno estudado e possibilita que problemas sejam resolvidos com o ferramental matemático já conhecido. Com o problema descrito por meio de relações matemáticas, fica mais fácil entender como as diferentes variáveis do problema se relacionam e como podem ser feitas previsões e análises sobre situações reais.

No Capítulo 3, foi proposto um modelo matemático para o problema de planejamento de redes em malha sem fio. Esta seção apresenta os testes de validação do modelo proposto. O modelo foi validado resolvendo-se diferentes instâncias do problema utilizando o pacote de otimização comercial CPLEX [Ilog, Inc. (2008)]. Dada uma instância, o CPLEX tentará encontrar uma solução que possua o menor custo para a função objetivo entre todas as possíveis soluções e que respeite todas as restrições do problema. Tal solução é denominada solução ótima do problema.

Com o CPLEX, problemas comerciais complexos representados através de modelos matemáticos são solucionados de forma muito eficiente com o auxílio de algoritmos de otimização avançados. O CPLEX é capaz de resolver problemas de programação linear, programação quadrática, programação com restrições quadráticas e programação inteira mista. O CPLEX é um software robusto e de alto desempenho que resolve problemas com milhões de restrições e variáveis.

As instâncias utilizadas nos testes de validação do modelo proposto são artificiais e foram

obtidas através do gerador de instâncias descrito a seguir.

5.1.1 Gerador de instâncias

Na fase de testes do modelo matemático, não foram encontrados trabalhos na literatura que caracterizassem, simultaneamente, todos os aspectos das redes em malha sem fio tratados neste trabalho. Até mesmo em trabalhos com ênfase em algum aspecto de redes em malha sem fio, não foi possível extrair valores de referências para parâmetros do modelo matemático. Também não foi encontrado na literatura um conjunto de instâncias para o problema de planejamento de redes em malha sem fio que pudesse ser usado na validação do modelo proposto. Dessa forma, para os testes com o CPLEX, foi desenvolvido um gerador aleatório de instâncias.

Nos problemas produzidos pelo gerador de instâncias, a área de cobertura é quadrada, e os possíveis locais candidatos para instalação dos roteadores sem fio estão distribuídos de forma equidistante, formando um quadriculado. Os possíveis locais candidatos para instalação dos *gateways*, bem como os enlaces entre estes e os roteadores sem fio são definidos aleatoriamente. Nas instâncias geradas, não há enlaces que conectem diretamente clientes e *gateways*.

Valores como custo e capacidade de cada enlace, demanda e energia de cada nó cliente são obtidos escolhendo-se, de forma aleatória, um valor em um intervalo de valores previamente definido para cada tipo de informação do modelo. O custo de instalação dos roteadores sem fio (c_j) varia entre 1 e 10 unidades de custo. O custo de cada enlace da rede (g_{io}^k , h_{ij}^k e v_{pq}) varia entre 1 e 10 unidades de custo. A capacidade dos enlaces entre roteadores sem fio (u_{pq}) varia entre 1 e 10 unidades de capacidade, e a capacidade dos enlaces entre roteadores sem fio e *gateways* (u_{pq}) está entre 1 e 3 vezes o número de clientes em unidades de capacidade. Os enlaces entre clientes e roteadores sem fio não possuem limites de capacidade. A demanda de cada cliente por uma interface (d_i^k) varia entre 1 e 3 unidades de demanda. A quantidade inicial de energia de um nó cliente (ξ_i) varia entre 1 e 100 unidades de energia. Além disso, a energia gasta na transmissão de 1 unidade de demanda entre dois clientes (ε_{tio}^k) ou entre um cliente e um roteador sem fio (ε_{tij}^k) varia entre 1 e 5 unidades de energia. Já a energia gasta na recepção de 1 unidade de demanda por um cliente (ε_r^k) é constante e igual a 1 unidade de energia.

O alcance de comunicação dos nós da rede depende muito das características do ambiente. Os obstáculos físicos (árvores, edifícios etc.) e a interferência podem prejudicar a transmissão e recepção de dados. No modelo matemático, os parâmetros a_{ij}^k e a'_{io}^k são utilizados para indicar se um nó está no alcance de comunicação de outro. No gerador de instâncias, estes parâmetros são definidos de forma aleatória. Não foi realizado nenhum trabalho para definir os parâmetros a_{ij}^k e a'_{io}^k a partir da modelagem de um ambiente com obstáculos e do cálculo da interferência na rede.

Em todos os testes, os valores dos parâmetros α , β e γ são iguais a 1 unidade de custo/unidade de energia.

O gerador aleatório de instâncias foi desenvolvido na linguagem C, utilizando o compilador GCC versão 4.2.3 [Free Software Foundation, Inc. (2008)].

5.1.2 Cenários dos testes com o CPLEX

Algumas informações do modelo, como número de roteadores sem fio, *gateways* e clientes, estão relacionadas com o tamanho do problema a ser solucionado. Para analisar o comportamento do modelo em cenários variados, foram realizados testes com instâncias de três diferentes tamanhos. Na Tabela 5.1, são apresentadas as características de cada tipo de instância.

Tipo de instância	Características
p	9 roteadores sem fio 1 <i>gateway</i> 10 clientes 1 interface de rede 10 canais por interface de rede
m	25 roteadores sem fio 2 <i>gateways</i> 55 clientes 2 interfaces de rede 15 canais por interface
g	64 roteadores sem fio 4 <i>gateways</i> 161 clientes 4 interfaces de rede 20 canais por interface de rede

Tabela 5.1: Cenários definidos para os testes com o CPLEX.

Para cada tipo p , m ou g , foram criadas instâncias que variam alguma característica do modelo. Todas as variações consideradas estão listadas na Tabela 5.2. O objetivo desta estratégia é avaliar, separadamente, cada característica das redes em malha sem fio que está presente no modelo. Assim, é possível verificar como o custo de instalação dos roteadores sem fio, a capacidade dos enlaces, o alcance de comunicação entre os nós da rede etc. afetam a solução final do problema.

Os valores dos parâmetros do modelo que aparecem na descrição das variações das características das instâncias foram escolhidos arbitrariamente em razão do desconhecimento de referências com valores reais. O objetivo dos testes especificados neste trabalho é validar o modelo proposto através da comparação do comportamento esperado (que pode ser obtido analiticamente) e do comportamento real observado durante a execução dos testes.

5.1.3 Resultados do CPLEX

Os testes foram executados em máquinas com sistema operacional Linux (kernel 2.6), processador Intel Pentium 4 de 2,40 GHz e 1 GB de RAM.

A seguir, serão apresentados os resultados dos testes com o CPLEX. Primeiramente, será analisada a capacidade do CPLEX de resolver instâncias do problema abordado. Quanto a

Variação	Descrição
1	<ul style="list-style-type: none"> - Custos de instalação dos roteadores sem fio iguais e unitários; - Custos dos enlaces entre nós iguais e unitários; - A capacidade dos enlaces entre roteadores sem fio variando entre 1 e 10 unidades de capacidade; - A capacidade dos enlaces entre roteadores sem fio e <i>gateways</i> podendo ser 1, 2 ou 3 vezes o número de clientes; - A demanda de um cliente para um tipo de interface de rede variando entre 1 e 3 unidades de demanda; - A energia inicial dos clientes igual a 100 unidades de energia; - A energia gasta na recepção de 1 unidade de demanda é igual a 1 unidade de energia; - A energia gasta na transmissão de 1 unidade de demanda variando entre 1 e 5 unidades de energia; - Cada cliente está no raio de comunicação de todos os roteadores sem fio; - Cada cliente está no raio de comunicação de todos os outros clientes.
2	- Igual à variação 1, mas com os custos de instalação dos roteadores sem fio variando entre 1 e 10 unidades de custo.
3	- Igual à variação 1, mas com os custos dos enlaces entre roteadores sem fio variando entre 1 e 10 unidades de custo.
4	- Igual à variação 1, mas com os custos dos enlaces entre clientes e roteadores sem fio variando entre 1 e 10 unidades de custo.
5	- Igual à variação 1, mas com os custos dos enlaces entre clientes variando entre 1 e 10 unidades de custo. Para instâncias do tipo p , todos os roteadores estão no alcance de comunicação de cada cliente. Para instâncias do tipo m e g , 10 e 20 clientes, respectivamente, não estão no alcance de comunicação de nenhum roteador.
6	- Igual à variação 1, mas com o número de roteadores no alcance de comunicação de cada cliente sendo definido de forma aleatória;
7	- Igual à variação 1, mas com o número de clientes no alcance de comunicação de cada cliente sendo definido de forma aleatória;
8	- Igual à variação 1, mas com a quantidade de energia de cada cliente variando entre 1 e 100 unidades de energia.
9	- Igual à variação 1, mas com a presença simultânea das variações 2 a 8.

Tabela 5.2: Variações de características consideradas para as instâncias.

este aspecto, serão mostrados os tempos de execução do CPLEX e a qualidade das soluções obtidas. Posteriormente, as soluções encontradas serão apresentadas e analisadas no contexto do problema de planejamento de redes em malha sem fio.

Muitas técnicas de otimização utilizam o conceito de *gap de dualidade* para garantir que uma dada solução encontrada é ótima. Nestas técnicas, a cada iteração do algoritmo, são encontradas duas soluções: uma solução a partir da relaxação de algumas restrições (limite

inferior) e uma solução viável para o problema (limite superior). A diferença entre o limite superior e o limite inferior dividida pelo limite superior corresponde ao percentual de *gap*. Quando os limites superior e inferior são iguais, ou seja, *gap* igual a zero, significa que a solução encontrada é ótima.

As Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 mostram a média e, entre parêntesis, o desvio padrão da execução de 5 instâncias diferentes geradas para cada problema. A primeira coluna das tabelas contém o identificador do tipo da instância, a segunda coluna apresenta o *gap de dualidade* e a terceira coluna mostra o tempo médio de execução do CPLEX. Em todos os testes realizados, o tempo de execução do CPLEX foi limitado em 10 horas.

Instância	Gap em %	Tempo em s
p_1	0 (0)	0,03 (0)
p_2	0 (0)	0,06 (0,01)
p_3	0 (0)	0,03 (0)
p_4	0 (0)	0,10 (0,03)
p_5	0 (0)	0,03 (0,01)
p_6	0 (0)	0,06 (0,02)
p_7	0 (0)	0,07 (0,01)
p_8	0 (0)	0,03 (0,01)
p_9	0 (0)	0,16 (0,05)

Tabela 5.3: *Gap* e tempo de execução para as instâncias do tipo *p*.

Instância	Gap em %	Tempo em s
m_1	0 (0)	1,84 (1,01)
m_2	0 (0)	1,17 (0,10)
m_3	0 (0)	2,36 (1,20)
m_4	0 (0)	62,08 (20,18)
m_5	0 (0)	4.457,29 (3.463,67)
m_6	0 (0)	135,27 (13,39)
m_7	1,71 (0,03) ¹	36.000,07 (0,01) ¹
m_8	0 (0)	0,91 (0,12)
m_9	0 (0)	2.398,43 (1.422,11)

Tabela 5.4: *Gap* e tempo de execução para as instâncias do tipo *m*.

Nas Tabelas 5.3 e 5.4, o *gap de dualidade* é sempre igual a zero, ou seja, em todos os casos, a solução encontrada é a solução ótima para o problema (exceto para a instância *m_7*, pois o CPLEX não conseguiu encontrar a solução ótima no tempo limite). O tempo de execução para as instâncias do tipo *p* foi baixo, não sendo superior a 0,16 s. Já o tempo de execução para as instâncias do tipo *m* variou muito, partindo de alguns poucos segundos e chegando até o tempo limite de processamento de 10 horas. Na Tabela 5.5, o *gap de dualidade* é maior que zero para todas as instâncias. E ainda, para a maioria das instâncias, o tempo de execução não

¹O CPLEX não conseguiu encontrar a solução ótima no tempo limite de 10 horas.

Instância	Gap em %	Tempo em s
g_1	1,67 (0,15) ¹	36.000,76 (0,47) ¹
g_2	0,99 (0,01)	3.949,02 (1.489,31)
g_3	0,99 (0,02)	3.451,82 (2.803,00)
g_4	0,85 (0,25)	9.116,19 (1.851,58)
g_5	0,91 (0,01)	7.967,94 (770,27)
g_6	2,57 (0,59) ¹	36.000,27 (0,12) ¹
g_7	0,89 (0,03)	784,63 (157,83)
g_8	0,67 (0,58)	3.847,49 (4.171,07)
g_9	13,42 (2,81) ¹	36.000,28 (0,12) ¹

Tabela 5.5: Gap e tempo de execução para as instâncias do tipo g .

excedeu o tempo limite previamente definido, sendo as soluções encontradas ótimas, apesar do *gap* ser diferente de zero. A justificativa para este fato é que, em uma iteração do algoritmo de solução, o limite inferior encontrado difere do limite superior, entretanto, como se trata de um problema de programação inteira mista, é possível afirmar que não há uma solução melhor que a melhor solução encontrada. Assim, o programa termina antes de atingir uma iteração onde o limite inferior seja igual ao limite superior. Para o tipo g , o CPLEX não conseguiu encontrar a solução ótima para três instâncias g_1 , g_6 e g_9 . Para as instâncias que o CPLEX encontrou a solução ótima, a variação do tempo de execução do CPLEX foi menor se comparada com a variação dos tempos de execução das instâncias do tipo m , o tempo de execução esteve entre 1 e 3 horas.

O tempo de execução aumenta das instâncias do tipo p para as instâncias do tipo m e destas para as instâncias do tipo g . É interessante notar que, para as instâncias correspondentes entre os tipos p , m e g (exemplo: p_4 , m_4 e g_4), o tempo de execução aumenta consideravelmente com o aumento do número de clientes e locais candidatos para a instalação de roteadores sem fio, evidenciando que o planejamento de redes em malha sem fio é um problema computacionalmente difícil. E ainda que, provavelmente, não seja conhecido um algoritmo determinístico polinomial para o problema.

Além do tempo de execução, há um outro dado que reforça que o planejamento de redes em malha sem fio é um problema computacionalmente difícil. O *gap de dualidade* serve como uma medida de quão próxima uma solução encontrada está da solução ótima do problema. A solução ótima somente é encontrada quando o *gap* é igual a zero. Assim, uma boa solução é aquela que possui o *gap* mais próximo de zero. Para a instância g_9 , o *gap de dualidade* é igual a 13,42%. Este é um valor considerado alto para o *gap* depois de 10 horas de processamento.

Nas Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8, a primeira coluna contém o identificador do tipo da instância, a segunda coluna contém o valor da função objetivo, a terceira e a quarta colunas das tabelas mostram, respectivamente, o número de roteadores sem fio instalados para o roteamento da demanda dos clientes e o número *gateways* utilizados.

Observando os dados da Tabela 5.6, é possível verificar que o número de roteadores sem

¹O CPLEX não conseguiu encontrar a solução ótima no tempo limite de 10 horas.

Instância	Função objetivo	Número de roteadores	Número de <i>gateways</i>
p_1	12 (0)	1 (0)	1 (0)
p_2	20 (1)	1 (0)	1 (0)
p_3	14 (1)	1 (0)	1 (0)
p_4	33 (3)	5 (1)	1 (0)
p_5	12 (0)	1 (0)	1 (0)
p_6	17 (0)	3 (0)	1 (0)
p_7	12 (0)	1 (0)	1 (0)
p_8	12 (1)	1 (0)	1 (0)
p_9	78 (18)	3 (1)	1 (0)

Tabela 5.6: Resultados para as instâncias do tipo p

sem fio instalados foi pequeno, sendo que, para a maioria das instâncias, apenas um roteador foi necessário para atender toda a demanda dos clientes. O número de *gateways* utilizados foi constante e igual a um. Este resultado já era esperado, uma vez que havia somente um elemento de rede deste tipo disponível.

Instância	Função objetivo	Número de roteadores	Número de <i>gateways</i>
m_1	59 (0)	2 (0)	2 (1)
m_2	62 (2)	2 (0)	2 (1)
m_3	60 (2)	2 (0)	2 (1)
m_4	98 (4)	11 (1)	2 (0)
m_5	59 (1)	2 (0)	1 (1)
m_6	65 (3)	4 (1)	2 (0)
m_7	59 (0) ¹	2 (0) ¹	2 (1) ¹
m_8	59 (0)	2 (0)	1 (1)
m_9	243 (49)	7 (1)	2 (0)

Tabela 5.7: Resultados para as instâncias do tipo m

Na Tabela 5.7, verifica-se que o número de roteadores sem fio instalados nas instâncias do tipo m foi maior que o número de roteadores instalados nas instâncias correspondentes do tipo p , em razão do aumento das dimensões do problema. Todavia, a solução para as instâncias m_5 e m_8 utiliza somente um dos dois *gateways* disponíveis para este tipo de instância.

Considerando o número de roteadores sem fio instalados, as instâncias do tipo g possuem um valor igual ou maior que as instâncias correspondentes do tipo m (Tabela 5.8). Além disso, na maioria das soluções, somente dois dos quatro *gateways* disponíveis foram utilizados.

Analisando as Tabelas 5.6, 5.7, 5.8, é possível verificar que o valor da função objetivo aumenta com o crescimento das dimensões das instâncias do problema. Este fato ocorre porque o valor da função objetivo é obtido somando-se os custos de instalação dos roteadores sem fio escolhidos e os custos dos enlaces utilizados no roteamento da demanda entre os clientes

¹O CPLEX não conseguiu encontrar a solução ótima no tempo limite de 10 horas.

Instância	Função objetivo	Número de roteadores	Número de <i>gateways</i>
g_1	167 (0) ¹	3 (0) ¹	2 (1) ¹
g_2	170 (3)	3 (0)	2 (1)
g_3	169 (2)	3 (0)	2 (1)
g_4	221 (8)	18 (1)	4 (0)
g_5	165 (0)	2 (0)	2 (0)
g_6	171 (1) ¹	5 (0) ¹	3 (1) ¹
g_7	165 (0)	2 (0)	2 (1)
g_8	168 (2)	3 (1)	2 (1)
g_9	423 (12) ¹	14 (1) ¹	4 (0) ¹

Tabela 5.8: Resultados para as instâncias do tipo g

e os *gateways*; e as instâncias do tipo p possuem o menor número de clientes e roteadores instalados, enquanto as instâncias do tipo g são as que possuem o maior número de clientes e roteadores instalados.

Para algumas instâncias, a exemplo a instância g_8 , observa-se que o valor do desvio padrão encontrado para o tempo de execução e o *gap de dualidade* é alto se comparado ao valor médio obtido para estas medidas. Isto ocorre devido ao caráter aleatório dos problemas gerados. Dessa forma, para um mesmo tipo de problema, algumas instâncias podem ser mais fáceis de serem resolvidas do que outras.

Para a maioria das instâncias, o desvio padrão obtido para o número de roteadores sem fio instalados é igual a zero. Isto significa que, para as cinco instâncias geradas para cada tipo de problema, foi instalado o mesmo número de roteadores sem fio. Assim, pode-se concluir que há um número ideal de roteadores sem fio a ser instalado para cada tipo de instância considerada.

Analisando em conjunto as Tabelas 5.6, 5.7, 5.8, nota-se que, para todos os tipos de instância (p , m e g), as variações 2 e 3 diferem da variação 1 com relação ao valor da função objetivo, a justificativa é que trata-se do mesmo problema, entretanto, nas variações 2 e 3, o custo de instalação dos roteadores e o custo dos enlaces entre roteadores variam entre 1 e 10 unidades de custo.

As instâncias da variação 4 apresentam um número de roteadores sem fio instalados bem elevado, isto ocorre porque os custos dos enlaces entre clientes e roteadores sem fio variam entre 1 e 10 unidades de custo e isto faz com que a demanda de cada cliente seja atendida pelo roteador cujo enlace de comunicação entre eles seja o de menor custo, aumentando assim o número de roteadores instalados.

O valor da função objetivo e o número de roteadores sem fio instalados para as instâncias da variação 5 são menores ou iguais aos valores para as instâncias da variação 1 porque, neste caso, alguns clientes não estão no alcance de comunicação de nenhum roteador e as demandas destes clientes são atendidas pelos clientes que estão no alcance de comunicação de pelo menos

¹O CPLEX não conseguiu encontrar a solução ótima no tempo limite de 10 horas.

um roteador sem fio. Por esta razão, há um agrupamento da demanda de alguns clientes e ocorre economia de escala.

As instâncias da variação 6 possuem um valor de função objetivo e um número de roteadores sem fio instalados maior que as instâncias da variação 1. Este fato ocorre porque os roteadores que podem atender a demanda de um dado cliente são escolhidos aleatoriamente, isto faz com que se tenha que instalar um determinado conjunto de roteadores para que toda a demanda dos clientes seja atendida. Já para as instâncias da variação 7, os clientes que podem atender a demanda de outros clientes também são escolhidos aleatoriamente, entretanto, neste caso, o valor da função objetivo e o número de roteadores instalados são menores ou iguais aos valores das instâncias da variação 1 por causa do agrupamento de demanda e, conseqüente, economia de escala.

A variação da quantidade de energia de cada cliente (p_8, m_8, g_8) não impactou significativamente no valor da função objetivo e no número de roteadores instalados.

As instâncias da variação 9 reúnem todas as características das variações 2 a 8 e possuem os maiores valores para a função objetivo. Além disso, utilizam todos os *gateways* disponíveis e apresentam o segundo maior valor para o número de roteadores sem fio instalados.

Os resultados mostrados até o momento foram obtidos através dos testes de validação do modelo matemático proposto no Capítulo 3. Até aqui, o problema de planejamento de redes em malha sem fio foi abordado de forma estática. Na próxima seção, são apresentados os resultados obtidos com a simulação de redes em malha sem fio. Na simulação, os cenários dos experimentos são mais próximos aos do mundo real e também são considerados aspectos dinâmicos do problema como mobilidade dos clientes.

5.2 Simulação

Como descrito no Capítulo 4, neste trabalho foi desenvolvido um simulador para redes em malha sem fio. Os testes foram executados em uma máquina com processador Intel Core 2 Duo de 3,0 GHz, com 4 GB de memória. O sistema operacional utilizado é o Linux (kernel 2.6.27-7-generic).

A seguir, são apresentados os resultados da simulação de diferentes cenários. Salvo nas situações em que for ressaltada alguma alteração, em todos os testes, a área de cobertura é quadrada (650 m x 650 m), os nós são dispostos inicialmente de forma aleatória dentro da área de cobertura, o modelo de *fading* utilizado é o *rayleigh* [Sklar (1997)] e o modelo de *path loss* é o *2-ray* [Rappaport, T. (1996)]. O modelo de mobilidade dos nós clientes é o *random walk*. A rede é baseada no modelo TCP/IP sendo composta por uma camada MAC 802.11b, uma camada de rede que utiliza o protocolo IPv4 e faz uso do protocolo de roteamento proposto neste trabalho e descrito no Capítulo 4 e uma camada de transporte TCP.

Nos testes, todos os nós da rede possuem 1.024 Kbps de capacidade cada um. Todos os clientes possuem inicialmente 8.000 unidades de energia. Na simulação, a interferência não é considerada. Como o modelo matemático também não trata a questão da interferência, é mais fácil estabelecer uma comparação entre as soluções encontradas pelo CPLEX e os resultados

da simulação.

A quantidade de nós e as dimensões da rede foram definidas com base na rede externa do projeto *ReMesh* [UFF (2006)]. No *ReMesh*, foi desenvolvido um protótipo de roteador sem fio e implantado um primeiro projeto piloto de rede em malha sem fio de acesso banda larga utilizando o protótipo desenvolvido. A rede está localizada nas proximidades do campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em Niterói, RJ, Brasil.

Antes de apresentar os resultados da simulação, é importante ressaltar que no simulador há dois conceitos sobre o tempo. Nas simulações, é registrado o tempo de execução do programa, isto é, o intervalo entre o tempo de início e fim da execução. Este tempo é computado com base no relógio da máquina. Outro conceito está relacionado com as tarefas e o tempo em que elas serão executadas pelo simulador, isto é, o tempo de simulação. Assim, se é informado que a simulação terá duração de 60 tempos, isto significa que será preciso definir quais tarefas serão executadas no tempo 1, tempo 2, tempo 3 etc. Em um mesmo tempo de simulação, é possível executar mais de uma tarefa. O conceito tarefa deve ser entendido como qualquer método definido no programa Java que consiste o simulador. Dado que o tempo de simulação atual é t , o sistema só atingirá o tempo de simulação $t+1$ depois que todas as tarefas agendadas para o tempo t tiverem sido executadas. Para os experimentos descritos a seguir, o tempo de simulação é igual a 120. No restante do texto, caso não seja feito algum comentário, o tempo referenciado é o tempo de simulação.

Nos experimentos, o tempo que cada nó da rede espera por respostas para uma mensagem de *hello* enviada é igual a 1 tempo de simulação. O tempo que cada nó espera para receber uma mensagem de resposta com a informação sobre uma rota é igual a 2 tempos de simulação. E o tempo que cada nó permanece no modo de espera é igual a 10 tempos de simulação.

O primeiro cenário utilizado na simulação consiste de 1 *gateway*, 5 roteadores sem fio e 4 clientes. A Tabela 5.9 detalha as informações dos roteadores da rede. A primeira coluna contém o identificador do roteador e a segunda coluna mostra o custo de instalação.

Roteador	Custo de instalação
R1	36
R2	20
R3	45
R4	30
R5	41

Tabela 5.9: Informações sobre os roteadores para os experimentos de simulação.

A Tabela 5.10 detalha as informações sobre as demandas dos clientes. Na Tabela 5.10, a primeira coluna contém um identificador do cliente, a segunda coluna contém a taxa de transmissão da demanda do cliente em Kbps, a terceira e quarta colunas mostram, respectivamente, o tempo inicial e a duração da demanda.

No primeiro experimento, o custo de comunicação entre quaisquer dois nós da rede é igual a 10 unidades de custo. A exceção é o custo de comunicação entre um nó qualquer da rede e o *gateway*. Neste experimento, este custo é igual a zero.

Cliente	Demanda (Kbps)	Tempo inicial	Duração
C1	256	60	1
C2	256	60	1
C3	256	60	1
C4	256	60	1

Tabela 5.10: Demanda dos clientes para o primeiro experimento de simulação.

Na Tabela 5.10, os tempos iniciais das demandas de todos os clientes são iguais. Isto significa que todos os clientes demandam acesso à Internet ao mesmo tempo, e eles iniciarão a transmissão de dados para o *gateway* no mesmo tempo de simulação. O valor 60 foi escolhido para o experimento porque corresponde a metade do tempo total da simulação (120). Neste momento, todos os nós já surgiram na rede e trocaram mensagens de *hello* para atualização das listas de vizinhos. Os tempos iniciais das demandas precisam ser iguais para facilitar a comparação entre as soluções do simulador e do CPLEX, uma vez que o modelo matemático não considera a variável tempo. No modelo, somente a demanda total do cliente é representada. Diferentemente da simulação, quando as demandas (requisições) de cada cliente estão distribuídas ao longo do tempo de simulação.

O valor para o tempo de duração da transmissão de dados poderia ser qualquer valor menor ou igual à diferença entre o tempo total de simulação e o tempo inicial da transmissão. No primeiro experimento, a duração da transmissão é igual a 1 tempo de simulação para todas as demandas.

A Figura 5.1 (a) mostra como foi feito o atendimento da demanda na simulação. Para avaliar a qualidade da solução do simulador, o mesmo problema foi resolvido com o CPLEX. Na Figura 5.1 (b), é mostrada a solução encontrada pelo CPLEX.

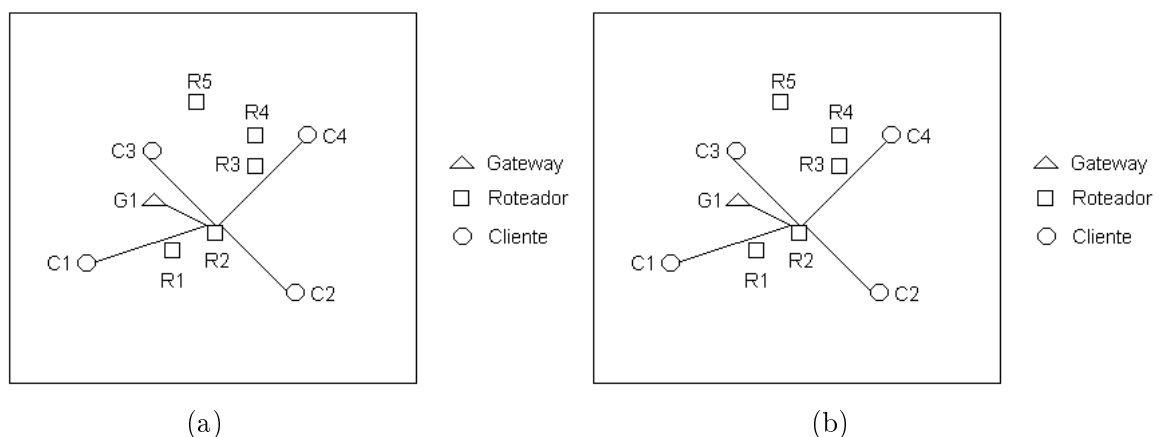


Figura 5.1: Primeiro cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.

A solução apresentada pelo simulador é igual à solução encontrada pelo CPLEX. Isto significa que o simulador foi capaz de encontrar a melhor solução dentre todas as possíveis

soluções para o problema. Neste primeiro experimento, somente um roteador é capaz de atender todas as demandas dos clientes. O roteador escolhido é o roteador com menor custo de instalação ($R2$). Como há somente um nó *gateway* na rede e este tem capacidade suficiente para atender todas as demandas, todos os nós clientes têm acesso à Internet por meio do nó *gateway* $G1$.

No segundo experimento, a capacidade do nó *gateway* é igual a 1.280 Kbps, e a capacidade de todos os outros nós da rede é igual a 1.024 Kbps. A Tabela 5.11 detalha as informações sobre as demandas dos clientes para o próximo experimento.

Cliente	Demanda (Kbps)	Tempo inicial	Duração
C1	320	60	1
C2	320	60	1
C3	320	60	1
C4	320	60	1

Tabela 5.11: Demanda dos clientes para o segundo experimento de simulação.

A Figura 5.2 apresenta os resultados da simulação e do CPLEX para o cenário do segundo experimento. A solução apresentada pelo simulador difere da solução encontrada pelo CPLEX. Na simulação, as demandas dos clientes $C1$, $C2$ e $C3$ são atendidas pelo roteador com menor custo de instalação ($R2$). A demanda do cliente $C4$ não é atendida. A explicação para este fato é que o tempo inicial da demanda por acesso à Internet é igual para todos os clientes (tempo inicial igual a 60). Assim, o que ocorre é que no tempo 60 todos os clientes tentam descobrir uma rota até o *gateway*. Como a demanda dos clientes (320 Kbps) é menor que a capacidade do roteador $R2$ (1.024 Kbps) e do *gateway* (1.280 Kbps), todos os nós clientes encontram a rota ($R2, G1$). O tempo de descoberta da rota tem a mesma duração para todos os clientes. Dessa forma, os clientes iniciam a transmissão dos dados ao mesmo tempo. Entretanto, a soma das demandas dos clientes é igual a 1.280 Kbps e a capacidade máxima do roteador $R2$ é igual a 1.024 Kbps. Assim, o roteador $R2$ somente consegue atender a demanda de três clientes simultaneamente. Na solução ótima encontrada pelo CPLEX, o roteador com o menor custo de instalação é utilizado para o atendimento das demandas dos clientes $C1$, $C2$ e $C4$. A demanda do cliente $C3$ é atendida pelo roteador com o segundo menor custo de instalação ($R4$).

Na Tabela 5.12, é caracterizada as demandas de todos os clientes para o terceiro experimento. Neste experimento, há 5 nós clientes, 5 nós roteadores e 1 nó *gateway*. A capacidade dos nós roteadores e do *gateway* é igual a 1.024 Kbps.

A Figura 5.3 mostra o resultado para o terceiro experimento. As soluções do simulador e do CPLEX são iguais. No terceiro experimento, nenhum roteador está no alcance de comunicação do cliente $C5$. Neste cenário, a demanda do cliente $C5$ é atendida utilizando o cliente $C4$ como roteador. Para o atendimento de toda a demanda, somente foi necessária a instalação de um roteador. O roteador escolhido foi o $R2$, pois possui o menor custo de instalação.

A seguir é mostrado o resultado do quarto experimento. Para o próximo experimento, a

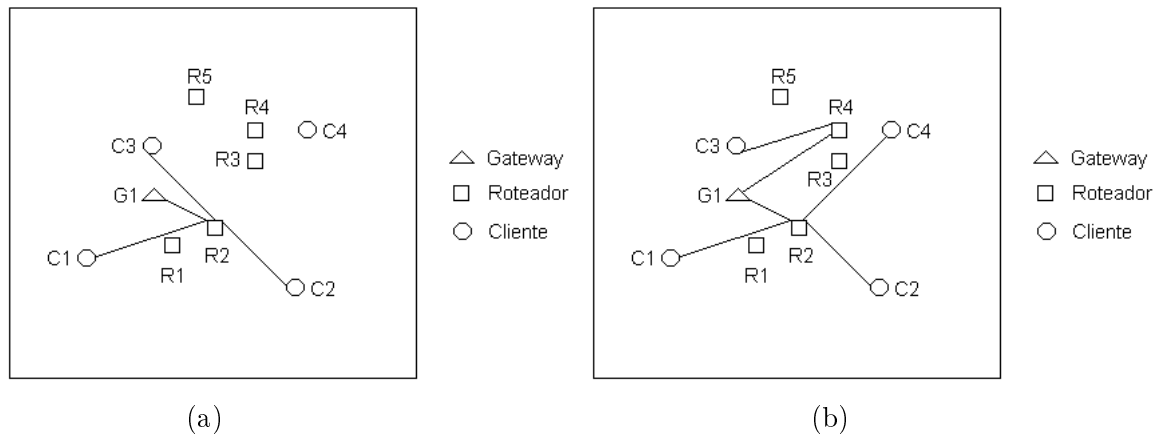


Figura 5.2: Segundo cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.

Cliente	Demanda (Kbps)	Tempo inicial	Duração
C1	192	60	1
C2	192	60	1
C3	192	60	1
C4	192	60	1
C5	192	60	1

Tabela 5.12: Demanda dos clientes para o terceiro experimento de simulação.

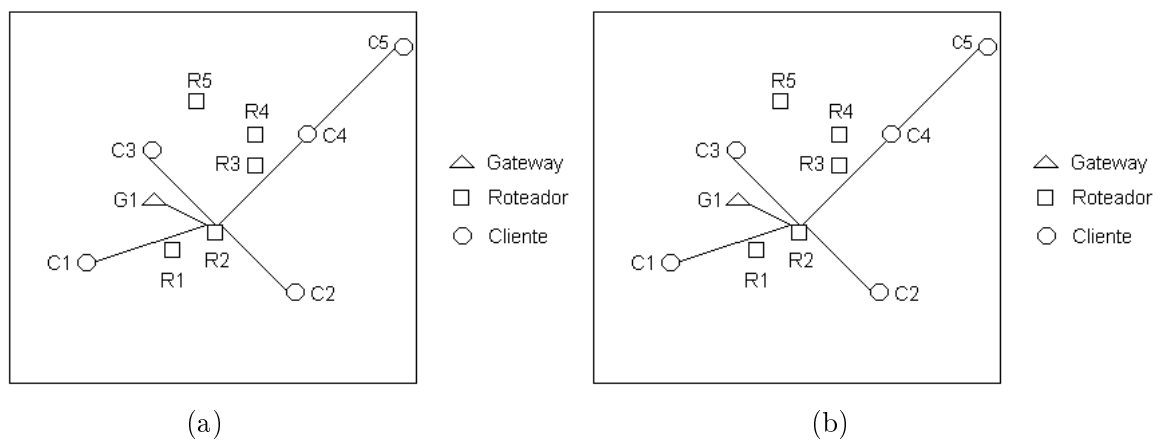


Figura 5.3: Terceiro cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.

capacidade de todos os nós da rede é igual a 1.024 Kbps, exceto o roteador $R2$ cuja capacidade é igual a 768 Kbps. Há somente um nó cliente e sua demanda é igual a 896 Kbps.

A Figura 5.4 mostra o resultado para o quarto experimento. A solução apresentada pelo simulador é igual à solução encontrada pelo CPLEX. Para atender a demanda do cliente $C1$ foi preciso instalar dois roteadores. O roteador $R2$ possui o menor custo de instalação. Porém,

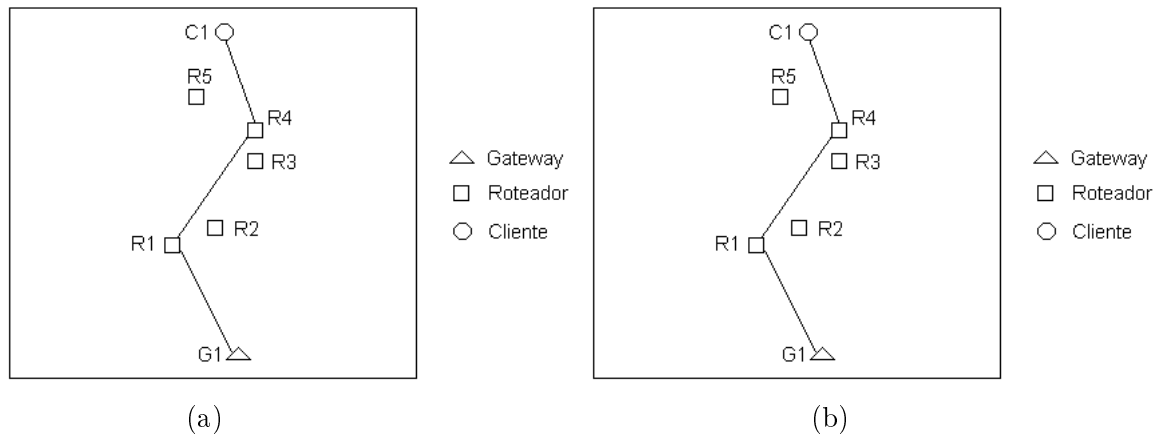


Figura 5.4: Quarto cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.

ele não está no alcance de comunicação do cliente $C1$. Assim, a demanda do cliente $C1$ é repassada para o roteador com o segundo menor custo de instalação ($R4$). E, como o roteador $R4$ não está no alcance de comunicação do *gateway*, a demanda é repassada para o roteador $R1$ antes de ser encaminhada para $G1$.

No próximo experimento, deseja-se verificar as soluções encontradas pelo simulador e pelo CPLEX quando os custos de instalação de todos os roteadores são iguais a zero. A Figura 5.5 mostra o resultado para o quinto experimento.

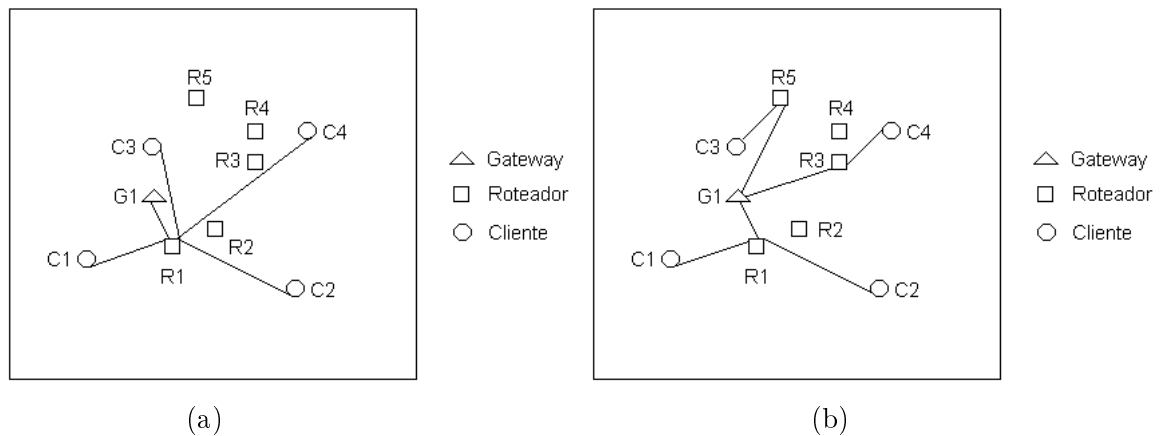


Figura 5.5: Quinto cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.

A Figura 5.5 (a) mostra a solução encontrada pelo simulador. Como apenas um roteador é suficiente para atender toda a demanda e os custos de instalação dos roteadores são iguais a zero, o simulador instalou o roteador com o menor identificador ($R1$). Como o custo de instalação é igual a zero, o valor da função objetivo não aumenta se mais de um roteador for instalado. Assim, na solução apresentada pelo CPLEX, a demanda dos clientes $C1$ e $C2$ são atendidas pelo roteador $R1$. A demanda do cliente $C4$ é atendida pelo roteador $R3$, e a demanda do cliente $C3$ é atendida pelo roteador $R5$.

Não é possível dizer qual solução é melhor para o quinto experimento. Se é a solução do simulador com a instalação de apenas um roteador ou se a solução do CPLEX com a instalação de três roteadores. Dependendo do critério de avaliação, uma solução pode ser melhor que a outra. Quando o critério de avaliação for a instalação do menor número possível de roteadores, a solução do simulador é melhor. Entretanto, a solução do CPLEX é melhor quando o critério de avaliação for, por exemplo, o aumento da tolerância a falhas. É importante ressaltar que o custo total (calculado de acordo com a equação 3.1 apresentada no Capítulo 3) de ambas as soluções é igual a 40 unidades de custo.

A Figura 5.6 mostra o resultado para o sexto experimento. Neste experimento, os custos de instalação dos roteadores são todos iguais a 50 unidades de custo.

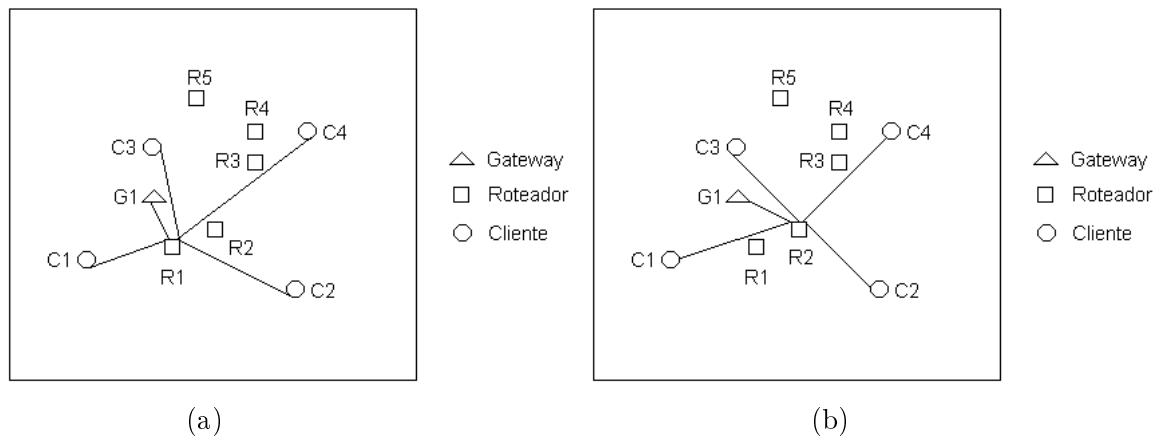


Figura 5.6: Sexto cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.

A solução apresentada pelo simulador é semelhante à solução encontrada pelo CPLEX. Nos dois casos, apenas um roteador é instalado. Contudo, o simulador escolheu o roteador com o menor identificador ($R1$), e o CPLEX escolheu o roteador $R2$. O custo total de ambas as soluções é igual a 90 unidades de custo.

No sétimo e oitavo experimentos, a rede será composta de 4 clientes, 5 roteadores e 2 gateways. Para o sétimo experimento, a demanda de cada cliente é igual a 256 Kbps, os custos de instalação dos roteadores são os mesmos da Tabela 5.9, a capacidade de cada nó da rede é igual a 1.024 Kbps e os custos de comunicação entre os nós da rede é igual a 10 unidades de custo. A exceção é para o custo de comunicação entre um nó qualquer da rede e o gateway $G1$. Este custo é igual a 20 unidades de custo.

A Figura 5.7 mostra o resultado para o sétimo experimento. As soluções do simulador e do CPLEX são iguais. Neste experimento, é suficiente a instalação de um roteador e a utilização de apenas um nó gateway. Assim, foi instalado o roteador com o menor custo de instalação ($R2$) e utilizado o nó gateway que apresenta o menor custo de comunicação ($G2$).

No oitavo experimento, a capacidade dos nós da rede é igual a 1.664 Kbps, exceto a capacidade do gateway $G2$ que é igual a 768 Kbps. O custo de comunicação entre um nó qualquer da rede e o gateway $G1$ é igual a 20 unidades de custo, e entre um nó qualquer da

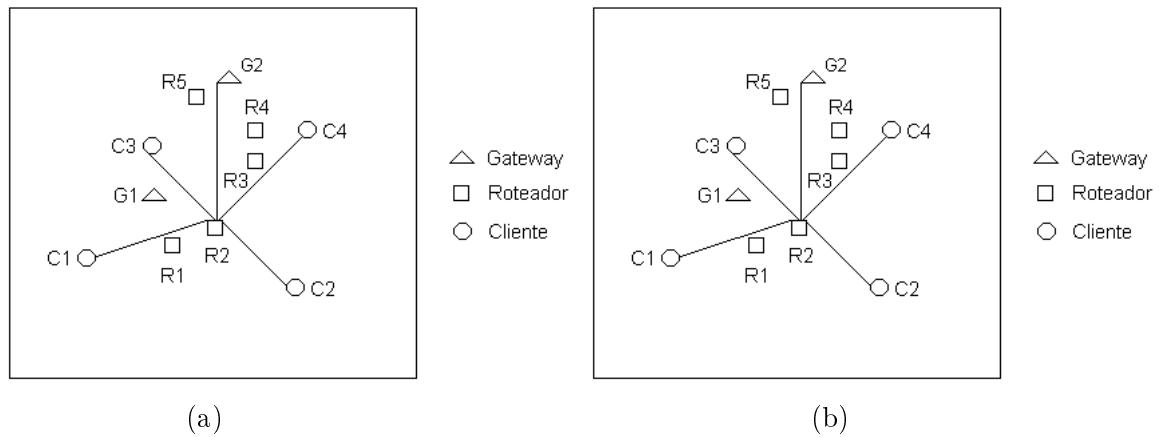


Figura 5.7: Sétimo cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.

rede e o *gateway* $G2$ é igual a 10 unidades de custo.

A Tabela 5.13 detalha as informações sobre as demandas dos clientes para o próximo experimento.

Cliente	Demanda (Kbps)	Tempo inicial	Duração
C1	256	60	1
C2	256	60	1
C3	896	60	1
C4	256	60	1

Tabela 5.13: Demanda dos clientes para o oitavo experimento de simulação.

A Figura 5.8 mostra o resultado para o oitavo experimento. A solução apresentada pelo simulador é igual à solução encontrada pelo CPLEX. O *gateway* $G2$ é o *gateway* com o menor custo de comunicação para os nós da rede. Entretanto, a capacidade de $G2$ não é suficiente para atender a demanda de todos os clientes. Como a demanda do cliente $C3$ é maior que a capacidade do *gateway* $G2$, a demanda do cliente $C3$ é encaminhada para o *gateway* $G1$. Já as demandas dos clientes $C1$, $C2$ e $C4$ são encaminhadas para o *gateway* $G2$.

Neste trabalho também foram realizados testes para avaliar a capacidade do simulador. A Tabela 5.14 apresenta as informações sobre quatro diferentes cenários utilizados nos experimentos.

Nos testes, a capacidade dos nós da rede é igual a 10.240 Kbps. Este valor foi escolhido porque está próximo da capacidade máxima (11 Mbps) de uma rede 802.11b. Ao longo da simulação, cada cliente demanda 7 vezes acesso à Internet. Cada uma destas demandas tem uma taxa de transmissão de 640 Kbps e duração igual a 10 tempos de simulação.

A Tabela 5.15 compara as informações sobre o tempo de execução, o tempo de simulação, o número de mensagens para atualização da lista de vizinhos e de descoberta de rota que foram enviadas, o número de mensagens para atualização da lista de vizinhos e de descoberta de rota

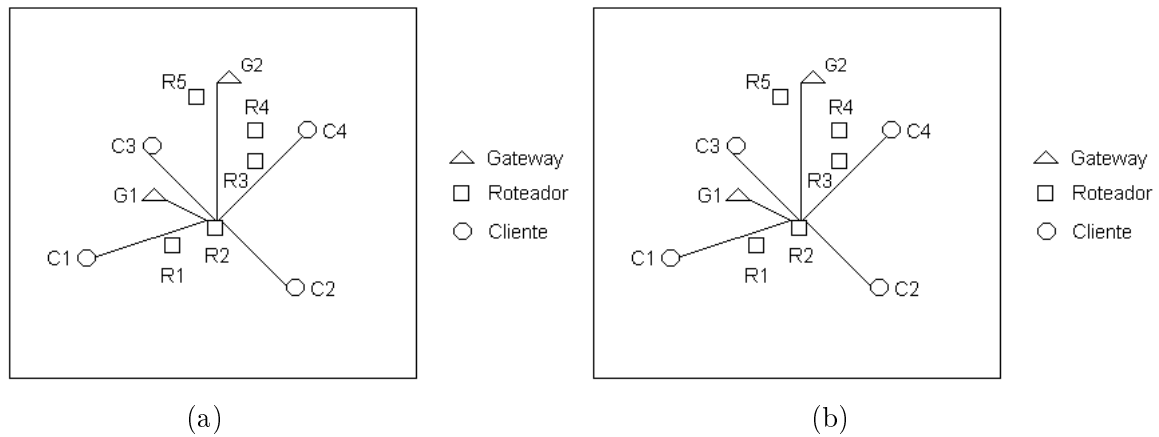


Figura 5.8: Oitavo cenário de simulação. Em (a), é apresentado o resultado da simulação. Em (b), a solução ótima encontrada pelo CPLEX.

Cenário	Características
1	16 roteadores sem fio 4 <i>gateways</i> 120 clientes
2	16 roteadores sem fio 6 <i>gateways</i> 120 clientes
3	20 roteadores sem fio 4 <i>gateways</i> 120 clientes
4	16 roteadores sem fio 4 <i>gateways</i> 140 clientes

Tabela 5.14: Descrição dos cenários dos testes de capacidade do simulador.

que foram recebidas, o número de roteadores utilizados para o atendimento das demandas dos clientes, o número médio de saltos, a demanda total dos clientes, a demanda efetivamente atendida pela rede, a demanda que não foi atendida porque não havia uma rota disponível e a demanda não atendida pela rede por falta de energia dos nós clientes.

O tempo de simulação é igual para todos os cenários. O tempo de execução varia entre 30 e 40 minutos, aproximadamente, para os diferentes cenários. O número de mensagens para atualização da lista de vizinhos e de descoberta de rota enviadas e recebidas não sofre grandes variações entre os quatro cenários. Como esperado, este número é maior para o cenário 4, uma vez que este é o cenário com maior número de nós na rede trocando mensagens de *hello* e maior número de clientes descobrindo rotas para os *gateways*.

No cenário 1, 41% da demanda (272.800 KB / 672.000 KB) não foi atendida porque não havia uma rota disponível. Isto pode ter acontecido porque os nós da rede não tinham capacidade disponível para o atendimento da demanda ou porque houve algum problema na

Métrica	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Tempo de execução (s)	2.040	1.740	2.460	2.340
Tempo de simulação	10.800	10.800	10.800	10.800
Número de mensagens enviadas	1.929.559	1.879.701	1.992.621	2.245.844
Número de mensagens recebidas	3.736.918	3.619.297	3.848.776	4.342.262
Número de roteadores instalados	3	5	3	5
Número médio de saltos	2	2	2	2
Demanda total dos clientes (KB)	672.000	672.000	672.000	784.000
Demanda total atendida (KB)	399.200	414.400	586.400	392.960
Demanda não atendida por rota não disponível (KB)	272.800	257.600	85.600	391.040
Demanda não atendida por falta de energia (KB)	0	0	0	0

Tabela 5.15: Comparação dos dados dos testes de capacidade do simulador.

comunicação e a mensagem com a informação sobre a rota não chegou ao nó de origem. No cenário 2, 38% da demanda não foi atendida. A redução deste valor em relação ao cenário 1 já era esperada, uma vez que, no cenário 2, há dois *gateways* a mais que no cenário 1. O número de roteadores utilizados no atendimento da demanda no cenário 2 foi maior que o número utilizado no cenário 1. No cenário 2, são utilizados 5 roteadores. Enquanto, no cenário 1, são utilizados apenas 3 roteadores. Como há mais *gateways* disponíveis, mais roteadores foram instalados. Com isso, foi possível aumentar a demanda atendida no cenário 2. Para o cenário 3, apenas 13% da demanda total não foi atendida. Neste cenário, há 4 roteadores a mais que no cenário 1. É interessante notar que o número de roteadores utilizados para o atendimento da demanda nos cenários 1 e 3 é o mesmo (igual a 3). Isto ocorre porque os nós são dispostos dentro da área de cobertura aleatoriamente. Com um número maior de roteadores disponíveis (cenário 3), aumenta-se a probabilidade de conseguir que alguns roteadores estejam localizados em pontos centrais da rede, próximos aos nós clientes e *gateways*. No cenário 4, 49,8% da demanda não é atendida. Um valor maior que o cenário 1 já era esperado, uma vez que o cenário 4 possui o mesmo número de roteadores e *gateways* do cenário 1 para atender uma demanda maior. O número médio de saltos é igual a 2 para todos os cenários.

O valor da demanda não atendida por falta de energia é igual a zero em todos os cenários. Este fato mostra que todos os clientes possuem energia suficiente para a transmissão dos dados.

5.3 Discussão dos resultados

Os resultados apresentados na seção 5.1 mostram que o modelo matemático proposto consegue tratar o problema de planejamento de redes em malha sem fio satisfatoriamente. Os resultados da seção 5.2 revelam que o simulador é capaz de proporcionar uma visão geral sobre a operação de uma rede em malha sem fio, sendo possível analisar a rede sob diferentes aspectos.

Nos resultados obtidos com o CPLEX, a complexidade do problema é consideravelmente

incrementada com um pequeno aumento das dimensões do problema. Como exemplo, enquanto o número de clientes passou de 55 para 161 (2,93 vezes maior) e o número de locais candidatos para instalação dos roteadores sem fio passou de 25 para 64 (2,56 vezes maior) da instância *m_8* para a instância *g_8* (Tabelas 5.4 e 5.5), o tempo de execução do CPLEX foi de 0,91 s para 3.847,49 s (aproximadamente, 4.228 vezes maior). Dessa forma, dependendo das dimensões da rede em malha sem fio, torna-se necessária a utilização de heurísticas para determinar o roteamento da demanda entre os clientes e os *gateways*.

A formulação matemática proposta no Capítulo 3 não contempla aspectos dinâmicos do problema como mobilidade dos nós clientes e demanda dos clientes distribuídas ao longo do tempo. Dessa forma, neste trabalho foi desenvolvido um simulador específico para redes em malha sem fio. Na simulação, os cenários de teste são mais próximos do mundo real e aspectos como protocolos de comunicação em rede, mobilidade, demanda distribuída ao longo do tempo etc. são considerados.

Neste trabalho, também foi proposto um algoritmo de roteamento, baseado nos mesmos critérios de otimização do modelo matemático, que determina as rotas entre clientes e *gateways* considerando a minimização dos custos de instalação e dos custos de comunicação entre os nós. Esta estratégia de roteamento se mostrou satisfatória, apresentando um número pequeno de roteadores instalados e um número médio de saltos baixo. A demanda não atendida pela rede também foi pequena. No cenário 3 (120 clientes, 20 roteadores e 4 *gateways*), apenas 13% (84 MB aproximadamente) da demanda total dos clientes (656 MB aproximadamente) não é atendida.

Em todos os experimentos de simulação realizados, considera-se que a rede ainda não foi implantada. Dessa maneira, à medida que os clientes demandam acesso à Internet, o simulador precisa definir quais os nós da rede (clientes, roteadores e *gateways*) serão utilizados para compor o roteamento das demandas entre clientes e *gateways*. Contudo, é possível considerar que a rede já está implantada criando os nós (roteadores e *gateways*) disponíveis para o atendimento das demandas com custo de instalação igual a zero. Assim, o algoritmo de roteamento determina as rotas considerando as restrições de capacidade e a minimização dos custos de comunicação entre os nós.

O algoritmo de roteamento encontra as rotas a partir dos mesmos critérios de otimização do modelo matemático proposto neste trabalho. Entretanto, o algoritmo é flexível e permite que outros aspectos sejam considerados para a determinação das rotas entre clientes e *gateways*. Por exemplo, o roteamento pode ser definido considerando a maximização da taxa de transferência (*throughput*) ou de alguma medida da qualidade dos enlaces.

A capacidade do simulador também foi avaliada neste trabalho. Em um experimento realizado, foi feita a simulação de uma rede com um tamanho considerável (120 clientes, 16 roteadores e 4 *gateways*) por, aproximadamente, 40 minutos. Os resultados extraídos deste experimento revelam que o simulador é capaz de simular redes de tamanho razoável e apresenta um baixo consumo de memória. Para este experimento, o consumo de memória foi inferior a 27% da memória total do computador.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

O interesse pela utilização de redes em malha sem fio como solução de baixo custo para acesso à Internet vem crescendo nos últimos anos. A característica de auto-organização das redes em malha sem fio reduz a complexidade de implantação e manutenção da rede. Além disso, o *backbone* de uma rede em malha sem fio possibilita aos usuários terem acesso à Internet em qualquer lugar, a qualquer hora. Assim, surgiram nos últimos anos vários cenários de aplicação das redes em malha sem fio. Elas podem ser utilizadas para a implantação de redes domésticas, redes corporativas e redes metropolitanas. Um outro cenário para aplicação de redes em malha sem fio é a construção de cidades digitais, oferecendo infra-estrutura de comunicação sem fio, em uma área metropolitana, a todos os cidadãos.

A área de pesquisa relacionada com redes em malha sem fio é relativamente recente. Há poucos trabalhos na literatura que apresentam uma visão geral sobre o assunto. Também não são conhecidos trabalhos que abordam, simultaneamente, diferentes aspectos das redes em malha sem fio como roteamento, mobilidade etc. Além disso, não é comum ser feita uma comparação entre abordagens estática e dinâmica de um problema em um mesmo trabalho. Uma contribuição deste trabalho é a discussão sobre vários aspectos das redes em malha sem fio, além do levantamento de trabalhos na literatura que estão relacionados com estes diferentes aspectos. Os dois primeiros capítulos deste trabalho apresentam uma visão geral sobre a área de pesquisa relacionada com redes em malha sem fio.

Outra contribuição do trabalho diz respeito a definição de um modelo matemático para o problema de planejamento de redes em malha sem fio. Este problema consiste em escolher um conjunto de roteadores sem fio para fazer parte do roteamento das demandas por acesso à Internet entre os nós clientes e os *gateways*. Não foi encontrado na literatura um modelo que aborde o problema de planejamento de redes em malha sem fio, considerando custos de instalação para os roteadores sem fio, custos e capacidade para os enlaces da rede, energia e possibilidade de utilizar nós clientes como roteadores. Além disso, o modelo proposto foi validado com a realização de um conjunto de testes utilizando o pacote de otimização comercial CPLEX.

O modelo matemático proposto tem algumas limitações. Não aborda aspectos dinâmicos do problema como mobilidade e demanda dos clientes distribuídas ao longo do tempo. Dessa

forma, para trabalhar com cenários mais próximos do mundo real, foi desenvolvido um simulador para redes em malha sem fio. Outro simulador específico para redes em malha sem fio não é conhecido. O simulador é capaz de simular redes de tamanho razoável. Na simulação, aspectos como mobilidade dos nós clientes, propagação de sinal, modelo de tráfego, roteamento, energia etc. são considerados. Com o simulador, é possível delinear um cenário e acompanhar a operação da rede em malha sem fio no cenário escolhido. Os nós da rede utilizam o modelo de comunicação TCP/IP.

Neste trabalho também foi proposto um algoritmo de roteamento que considera os mesmos critérios de otimização do modelo matemático. Foram feitos alguns experimentos que comparam as soluções apresentadas pelo simulador e as soluções ótimas encontradas pelo pacote de otimização comercial CPLEX. Os experimentos realizados mostram que o simulador apresenta boas soluções. Os experimentos com redes de maiores dimensões reafirmam que o algoritmo de roteamento é eficiente, encontrando boas soluções com um número pequeno de saltos.

6.1 Trabalhos futuros

Neste trabalho, vários aspectos do problema de planejamento de redes em malha sem fio foram abordados. A partir deste trabalho, é possível ter uma visão geral sobre o assunto. Entretanto, o tratamento dado a alguns aspectos ainda pode ser melhorado, bem como, outros aspectos podem ser incorporados ao problema.

Como trabalho futuro, o modelo matemático pode ser alterado para abordar novos aspectos relacionados com o problema. A formulação matemática, por exemplo, poderia considerar um modelo de interferência para a rede. Além disso, heurísticas para o problema de planejamento de redes em malha sem fio podem ser propostas, uma vez que, conforme evidenciam os testes realizados, este é um problema computacionalmente difícil.

Há vários trabalhos futuros relacionados com a simulação e abordagem dinâmica do problema. O simulador pode ser modificado para que os nós da rede possam ser compostos de mais de um rádio. Na versão atual do simulador, os nós clientes possuem apenas um rádio e, a cada momento, ou o nó está recebendo ou enviando dados. Com dois rádios, por exemplo, os nós poderiam receber e transmitir dados simultaneamente. Experimentos podem ser definidos para avaliar o impacto da utilização de mais de um rádio na quantidade total de demanda atendida pela rede. A simulação também pode ser alterada para considerar a interferência entre as transmissões na rede.

Outras estratégias de roteamento também podem ser avaliadas na simulação. Uma possibilidade é utilizar a mesma estrutura do algoritmo de roteamento proposto neste trabalho, mas considerando outras métricas para determinação das rotas. Novos algoritmos de roteamento pode ser propostos, assim como algoritmos de roteamento existentes podem ser adaptados para redes em malhas sem fio. Um trabalho interessante consiste na comparação entre diferentes algoritmos de roteamento.

Considerando as características das redes em malha sem fio, há vários desafios sob o

ponto de vista de comunicação em rede. Os protocolos de comunicação utilizados nas redes em malha sem fio podem ser adaptados para aumentar o desempenho destas redes. Assim, outros protocolos para as camadas física, de enlace e rede que considerem características específicas das redes em malha sem fio podem ser propostos e implementados. Além disso, outros modelos de mobilidade e propagação de sinal podem ser avaliados no contexto das redes em malha sem fio.

Também será interessante comparar os resultados obtidos aqui com os resultados de outros trabalhos da literatura.

Referências Bibliográficas

- Acharya, A.; Misra, A. e Bansal, S. (2004). Design and analysis of a cooperative medium access scheme for wireless mesh networks. *Broadband Networks, 2004. BroadNets 2004. Proceedings. First International Conference on*, pp. 621–631.
- Akyildiz, I.; Wang, X. e Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: A survey. *Computer Networks*, 47:445–487.
- Apache (1999). log4j. <http://logging.apache.org/log4j/> (acessado em 21 de junho de 2008).
- Bejerano, Y.; Han, S.-J. e Kumar, A. (2007). Efficient load-balancing routing for wireless mesh networks. *Comput. Netw.*, 51(10):2450–2466.
- Bicket, J.; Aguayo, D.; Biswas, S. e Morris, R. (2005). Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network. In *MobiCom '05: Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 31–42, New York, NY, USA. ACM Press.
- DARPA (1981). Tcp. <http://www.ietf.org/rfc/rfc0793.txt> (acessado em 21 de junho de 2008).
- DARPA et al. (1995). ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (acessado em 21 de junho de 2008).
- Draves, R.; Padhye, J. e Zill, B. (2004). Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In *MobiCom '04: Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 114–128, New York, NY, USA. ACM.
- Free Software Foundation, Inc. (2008). Gcc. <http://gcc.gnu.org/> (acessado em 15 de junho de 2008).
- Hilario, L. E. N. (2006). Qualidade de Serviço em Redes *Mesh*. Master's thesis, Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- IEEE (1999). 802.11b. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html> (acessado em 21 de junho de 2008).

- IETF (1981). Ipv4. <http://tools.ietf.org/html/rfc791> (acessado em 21 de junho de 2008).
- Ilog, Inc. (2008). Solver cplex. <http://www.ilog.com/products/cplex/> (acessado em 14 de junho de 2008).
- J. Postel (1980). Udp. <http://tools.ietf.org/html/rfc768> (acessado em 21 de junho de 2008).
- Kashyap, A.; Ganguly, S.; Das, S. e Banerjee, S. (2007). Voip on wireless meshes: Models, algorithms and evaluation. *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 2036–2044.
- Kyasanur, P. e Vaidya, N. (2005). Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless networks. *Wireless Communications and Networking Conference, 2005 IEEE*, 4:2051–2056 Vol. 4.
- Lee, M.; Zheng, J.; Ko, Y.-B. e Shrestha, D. (2006). Emerging standards for wireless mesh technology. *Wireless Communications, IEEE [see also IEEE Personal Communications]*, 13(2):56–63.
- Marina, M. e Das, S. (2005). A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks. *Broadband Networks, 2005 2nd International Conference on*, pp. 381–390 Vol. 1.
- Mhatre, V. (2007). Enhanced wireless mesh networking for ns-2 simulator. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 37(3):69–72.
- Microsoft (2005). Microsoft mesh networking academic resource toolkit. <http://research.microsoft.com/mesh/> (acessado em 26 de junho de 2008).
- Nandiraju, N.; Nandiraju, D.; Santhanam, L.; He, B.; Wang, J. e Agrawal, D. (2007). Wireless mesh networks: Current challenges and future directions of web-in-the-sky. *Wireless Communications, IEEE [see also IEEE Personal Communications]*, 14(4):79–89.
- Papadaki, K. e Friderikos, V. (2008). Approximate dynamic programming for link scheduling in wireless mesh networks. *Comput. Oper. Res.*, 35(12):3848–3859.
- Peters, L.; Moerman, I.; Dhoedt, B. e Demeester, P. (2007). Impact of the access network topology on the handoff performance. *Wirel. Netw.*, 13(2):203–220.
- Projeto HASE (2002). Universidade de edinburgo. <http://www.icsa.inf.ed.ac.uk/research/groups/hase/simjava/distributions/> (acessado em 21 de junho de 2008).
- Qiu, L.; Chandra, R.; K., J. e Mahdian, M. (2004). Optimizing the placement of integration points in multihop wireless networks. In *Twelfth IEEE International Conference on Network Protocols*.

- Ramachandran, K. N.; Belding, E. M.; Almeroth, K. C. e Buddhikot, M. M. (2006). Interference-aware channel assignment in multi-radio wireless mesh networks. *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, pp. 1–12.
- Rappaport, T. (1996). *Wireless communications, principles and practice*. Prentice Hall.
- Rimon Barr et al. (2005). Jist e swans. <http://jist.ece.cornell.edu/> (acessado em 21 de junho de 2008).
- Sklar, B. (1997). Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems.i. characterization. *Communications Magazine*, 35(7):90–100.
- So, A. e Liang, B. (2006). Optimal placement of relay infrastructure in heterogeneous wireless mesh networks by bender's decomposition. In *QShine '06: Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks*, p. 22, New York, NY, USA. ACM Press.
- Socket (2008). Sun microsystems. <http://java.sun.com/docs/books/tutorial/networking/sockets/definition.html> (acessado em 25 de junho de 2008).
- Sridhara, V. e Bohacek, S. (2007). Realistic propagation simulation of urban mesh networks. *Comput. Netw.*, 51(12):3392–3412.
- Sun microsystems (2008). Java. <http://java.sun.com/> (acessado em 21 de junho de 2008).
- Tang, J.; Xue, G. e Zhang, W. (2005). Interference-aware topology control and qos routing in multi-channel wireless mesh networks. In *MobiHoc '05: Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp. 68–77, New York, NY, USA. ACM.
- UCLA (1999). Glomosim. <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/> (acessado em 21 de junho de 2008).
- UFF (2006). Remesh. <http://mesh.ic.uff.br/> (acessado em 17 de junho de 2008).
- University of California, Santa Barbara (2005). Meshnet. <http://moment.cs.ucsb.edu/meshnet> (acessado em 26 de junho de 2008).
- Wi-Fi Alliance (1997). Wi-fi. <http://www.wi-fi.org/> (acessado em 22 de junho de 2008).