

EDGAR JOSÉ PIACENTINI

**VoIP EM REDES MESH
DE ÚLTIMA MILHA**

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

CURITIBA

2009

EDGAR JOSÉ PIACENTINI

**VoIP EM REDES MESH
DE ÚLTIMA MILHA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática Aplicada.

Área de Concentração: *Redes de Computadores e de Telecomunicações.*

Orientador: Prof. Dr. Mauro Fonseca

CURITIBA

2009

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

P579v
2009 Piacentini, Edgar José
VoIP em redes mesh de última milha / Edgar José Piacentini ; orientador,
Mauro Fonseca. – 2009.
xxi, 90 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
Curitiba, 2009
Bibliografia: f. 85-90

1. Redes de computação - Protocolos. 2. Rede local Sem fio - Normas.
3. Telefonia pela internet. 4. Telecomunicações. I. Fonseca, Mauro Sérgio
Pereira. II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-
Graduação em Informática. III. Título.

CDD 20. ed. – 004.62

Aos meus pais,
minha esposa Alessandra e
meus filhos João Vitor e Leonardo

Agradecimentos

À minha família principalmente a minha esposa Alessandra e meus filhos João Vitor e Leonardo por todo o amor, incentivo e compreensão. Aos meus pais, por toda a orientação, dedicação e apoio durante toda minha vida.

Ao meu orientador Prof. Mauro pela amizade, confiança e orientação durante a execução deste trabalho.

Aos amigos conhecidos durante o mestrado e demais amigos que de alguma maneira colaboraram na realização desta dissertação.

Aos colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada da PUC-PR que me acompanharam nestes mais de dois anos.

À Nokia Siemens Networks pelo apoio financeiro.

Sumário

Agradecimentos	vii
Sumário	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas	xv
Resumo	xvii
Abstract	xix
Capítulo 1	23
Introdução	23
1.1. Motivação	23
1.2. Objetivos.....	26
1.3. Delimitação do Problema	27
1.4. Contribuições Esperadas.....	27
1.5. Estrutura do Documento.....	28
Capítulo 2	29
Redes Mesh	29
2.1. Introdução.....	29
2.2. Redes Mesh IEEE 802.11	29
2.2.1. Classificação das Redes Mesh Quanto a Funcionalidade.....	32
2.2.2. Topologia Mesh com Múltiplos Rádios e Múltiplos Canais	33
2.2.3. Trabalhos Correlatos	33
2.3. VoIP em Redes Mesh	35
2.3.1. Trabalhos Correlatos	36
2.4. Controle de Admissão em Redes Mesh	37
2.4.1. Trabalhos Correlatos	40

Capítulo 3.....	43
Medida de Qualidade de Voz	43
3.1. Introdução	43
3.2. Medida de Qualidade de Voz.....	43
3.3. O Modelo E.....	44
3.4. Trabalhos Correlatos.....	49
Capítulo 4.....	51
Restrições Impostas pelo Enlace de Satélite	51
4.1. Introdução	51
4.2. Topologia utilizando redes <i>mesh</i> com enlace de satélite	51
4.3. Medidas no Enlace de Satélite	54
4.4. Cálculo das Restrições Impostas pelo Enlace de Satélite	55
4.4.1. Considerações sobre os resultados.....	58
4.5. Atraso na Rede <i>Mesh</i> de Acesso	59
4.5.1. Configuração de Simulação	59
4.5.2. Resultados das Simulações	60
4.6. Viabilidade da solução	63
Capítulo 5.....	65
Mecanismo de Controle de Admissão Proposto	65
5.1. Introdução	65
5.2. Definições	65
5.3. Mecanismo de Controle de Admissão	68
5.3.1. Estimativa dos Recursos Consumidos pelo Novo Fluxo	71
5.3.2. Estimativa dos Recursos Disponíveis	73
5.3.3. Determinação da Rota.....	75
5.3.4. Cálculo da Interferência Intra-Fluxo.....	75
5.4. Decisão de Admissão	76
Capítulo 6.....	79
Resultados das Simulações	79
6.1. Introdução	79
6.2. Implementação e Simulação do Algoritmo de Controle.....	79
6.2.1. Implementação do Algoritmo de Controle.....	79

6.2.2. Resultados das Simulações Utilizando o Algoritmo Implementado	81
6.3. Considerações Sobre os Resultados das Simulações.....	82
Capítulo 7	83
Conclusão e Trabalhos Futuros	83

Lista de Figuras

Figura 1.1: <i>Surpass RLU</i> [3].....	25
Figura 2.1: Arquitetura de uma rede <i>mesh</i> [4]	31
Figura 3.1: Relação entre o fator escalar R e o MOS.....	48
Figura 4.1: Sistema DVB-RCS	52
Figura 4.2: Topologia Utilizando Redes <i>Mesh</i> com Enlace Satélite	53
Figura 4.3: Medidas no Enlace de Satélite	54
Figura 4.4: Modelo para cálculo do fator R	56
Figura 4.5: Fator escalar R versus atraso fim-a-fim (T_a).....	57
Figura 4.6: Topologia utilizada na simulação para um salto.....	59
Figura 4.7: <i>Throughput</i> para 13 fluxos no padrão 802.11b com RTS/CTS.	60
Figura 4.8 : Simulação do atraso médio.....	61
Figura 4.9: Topologia utilizada na simulação.....	61
Figura 5.1: Alcance de transmissão e de detecção de portadora.....	66
Figura 5.2: Interferência intra-fluxo.....	67
Figura 5.3: Elementos do Controle de Admissão.....	68
Figura 6.1: Fluxograma simplificado do simulador do CCA implementado.	80

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Fator escalar R versus MOS	48
Tabela 4.1: Resultado das medidas no enlace de Satélite.....	55
Tabela 4.2: Parâmetros utilizados no cálculo do fator R	57
Tabela 4.3: Simulação para vários saltos.....	62
Tabela 4.4: Medida do atraso na rede do projeto <i>Roofnet</i> [55].....	62
Tabela 5.1: Topologia da Rede da Figura 5.3 Configurada no CCA	70
Tabela 5.2: Parâmetros para o cálculo do tempo teórico consumido pelo fluxo [57].....	72
Tabela 6.1: Topologia configurada no Simulador do CCA.....	81
Tabela 6.2: Resultado obtidos pelo Simulador do CCA.....	81

Lista de Abreviaturas

CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Medium Access</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Medium Access / Collision Avoidance</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
DVB-RCS	<i>Digital Video Broadcasting - Return Channel via Satellite</i>
GESAC	Governo Eletrônico – Serviço de Atendimento ao Cidadão
MANET	<i>Mobile Ad-hoc NETWORK</i>
MBAC	<i>Measurement-Based Admission Control</i>
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i>
PBAC	<i>Parameter-Based Admission Control</i>
PGMU	Plano Geral de Metas para a Universalização
POTS	<i>Plan Old Telephone Service</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RLU	<i>Remote Line Unit</i>
RTS	<i>Request to Send</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
SPF	<i>Short Path First</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
VSAT	<i>Very Small Aperture Terminal</i>
WI-FI	<i>Wireless-Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Network</i>

Resumo

A pesquisa de soluções de comunicação de baixo custo para redes de acesso em localidades remotas e de baixa densidade populacional é um tópico importante na área de telecomunicações. Prover serviços de voz e dados para essas localidades é uma tarefa desafiadora. Na maioria dos casos, o uso de tecnologias convencionais de transporte, como fibra óptica e enlaces de rádio, é economicamente inviável. Soluções utilizando enlaces de satélite para o transporte e pares telefônicos convencionais na rede de acesso, têm sido propostas e implantadas com sucesso. Este estudo avalia a utilização de redes *mesh* sem fio padrão IEEE 802.11 como alternativa de custo reduzido para prover infraestrutura de acesso VoIP de última milha para localidades remotas conectadas via enlace de satélite. As redes *mesh* fornecem uma boa margem de confiabilidade, baixo custo e facilidade de instalação e expansão. Entretanto, o alto atraso inerente aos enlaces via satélite, associado à natureza compartilhada das redes *mesh*, exige uma investigação detalhada sobre a viabilidade do uso dessas tecnologias para prover serviços de tempo real, como VoIP, altamente sensíveis a problemas de atraso e perdas de pacotes. Com base em medidas efetuadas em um enlace de satélite e uma metodologia para avaliação da qualidade de voz, é verificada a viabilidade da solução proposta sendo estimado o atraso máximo aceitável na rede de acesso. A partir dos resultados obtidos e de resultados de simulações realizadas na rede *mesh*, é proposto um mecanismo centralizado de controle de admissão capaz de limitar o número de fluxos VoIP na rede de acesso, de forma a garantir os requisitos mínimos de qualidade de serviço requeridos pela solução proposta.

Palavras-Chave: Redes *Mesh*, Controle de Admissão, VoIP, Satélite.

Abstract

The research of low-cost communication solutions for access networks in remote small villages is an important topic in the telecommunications area. Providing voice and data services for these localities is a challenge. In nearly all cases, conventional transport technologies, as optical fiber and radio links, are unfeasible due to the high costs and implementation and maintenance difficulties. Solutions using conventional copper pairs for the access network and satellite links as transport medium have been successfully proposed and used. This study evaluates the use of the IEEE 802.11 Wireless Mesh Networks as a cost reduction alternative to provide last mile VoIP access infrastructure for small villages connected via satellite link. The Wireless Mesh Networks provide good reliability range, low cost, and installation and maintenance facility, being easily extendable. However, the high delay inherent of the satellite links associated with the shared nature of the Wireless Mesh Networks demand a detailed study of the feasibility of the use of these technologies to provide real time services, as VoIP, high sensitive to delay and packet losses. Based on measurements taken in a satellite link and a methodology for assessing voice quality, it's evaluated the feasibility of the proposed solution and estimated the maximum allowed delay in the access network. From these results and results of simulations performed in the Wireless Mesh Network, it's proposed a centralized admission control mechanism, able to limit the number of VoIP flows in the access network assuring a minimum quality of service required by the proposed solution.

Keywords: Wireless Mesh Networks, Admission Control, VoIP, Satellite.

Capítulo 1

Introdução

Prover serviços de voz e dados a um custo reduzido para localidades remotas e economicamente menos favorecidas é uma tarefa desafiadora. Na maioria dos casos, a interligação dessas localidades por meio de tecnologias convencionais de transporte como fibra óptica e enlaces de rádio ponto a ponto é considerada economicamente inviável.

Soluções utilizando enlaces de satélite para o transporte e pares telefônicos convencionais na rede de acesso, têm sido propostas e implantadas com sucesso. Entretanto, soluções utilizando pares telefônicos convencionais na rede de acesso geralmente têm um custo elevado, devido à baixa densidade populacional e aos altos custos de implantação e manutenção.

As redes em malha sem fio (*Wireless Mesh Networks* - WMNs) ou simplesmente redes *mesh*, surgem como uma alternativa de custo reduzido para a rede de acesso, fornecendo uma boa margem de confiabilidade, baixo custo e facilidade de instalação e expansão.

As redes *mesh* são caracterizadas pela presença de um *backbone* estacionário, composto por roteadores sem fio, e a presença de um *gateway* para Internet. A ausência da infraestrutura cabeada e a ubiquidade de acesso reduzem os custos de implementação da rede, fornecendo conectividade aos usuários onde quer que eles estejam.

1.1. Motivação

Promover a inclusão digital como alavanca para o desenvolvimento social auto-sustentável e promoção da cidadania fazem parte de programas sociais do Governo Federal. Algumas soluções têm sido propostas e implantadas através de programas de inclusão social,

como o PGMU - Plano Geral de Metas para Universalização [1] e o GESAC - Governo Eletrônico – Serviço de Atendimento ao Cidadão [2]. Estes programas visam disponibilizar uma infraestrutura de acesso de voz e dados para localidades remotas e economicamente menos favorecidas.

Através do programa GESAC, o Governo tem como meta disponibilizar acesso à internet, e mais um conjunto de outros serviços de inclusão digital a comunidades excluídas do acesso e dos serviços vinculados à rede mundial de computadores.

Na mesma linha do GESAC, o programa PGMU obriga as operadoras de telefonia a disponibilizar acesso de voz, através de telefones públicos, para comunidades com mais de 100 habitantes e acesso a uma linha telefônica convencional em todas as comunidades com mais de 300 habitantes [1]. A maior parte das comunidades atendidas pelo PGMU se localizam em áreas remotas e de difícil acesso, em muitos casos carentes de infraestrutura básica. Nessas localidades, tecnologias convencionais para transporte de voz e dados, como fibra óptica e enlaces de rádio, tornam-se inviáveis devido aos altos custos e dificuldades de implantação e manutenção.

A solução mostrada na Figura 1.1 foi adotada pela operadora de telefonia Oi/Telemar, para disponibilizar acesso de voz para localidades remotas principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Esta solução, conhecida como *Surpass Remote Line Unit - RLU* [3], foi totalmente desenvolvida pela Siemens Ltda. na unidade de desenvolvimento de Curitiba, Paraná. A solução *Surpass RLU* utiliza um enlace de satélite para conectar um *gateway* de acesso remoto, o qual disponibiliza pares telefônicos convencionais para os usuários das localidades atendidas pelo programa PGMU. Atualmente são mais de 2000 localidades no Brasil atendidas pela solução *Surpass RLU* da Siemens.

Em testes práticos realizados na solução *Surpass RLU*, observou-se, devido ao atraso inerente ao enlace via satélite, a inviabilidade do uso de conexão discada via modem convencional para acesso a Internet. A viabilidade desse tipo de solução está condicionada a implementações do tipo *Modem over IP* [5] no *gateway* de acesso do *Surpass RLU* e nos *gateways* remotos, sendo inviabilizada devido aos custos e prazos de desenvolvimento envolvidos.

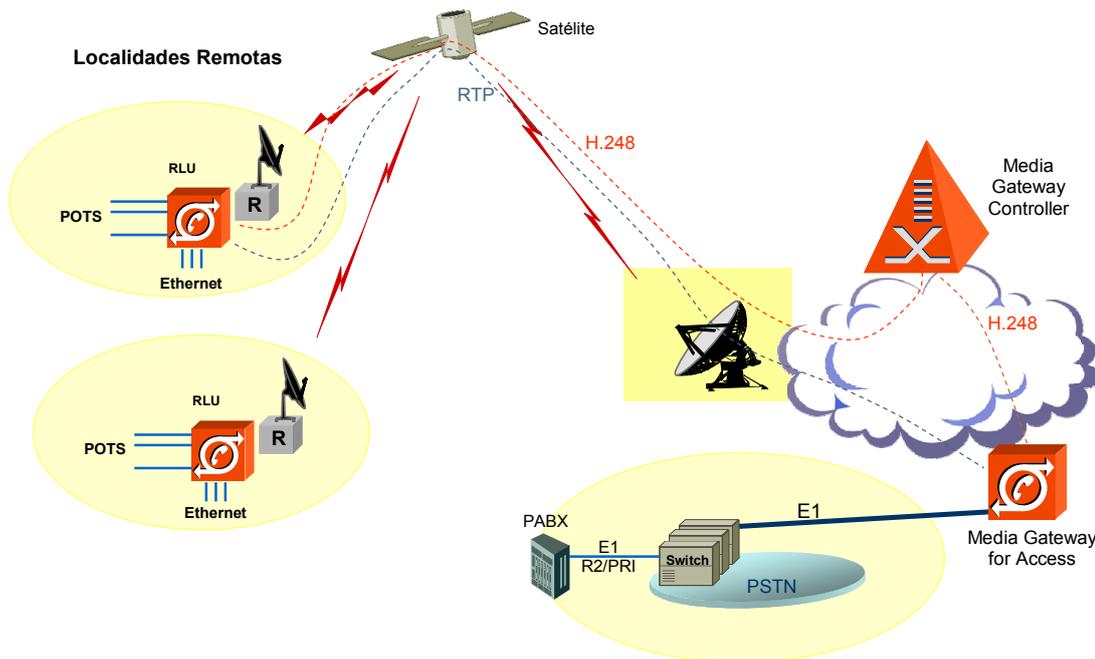


Figura 1.1: *Surpass RLU* [3]

Este cenário motivou a pesquisa de uma alternativa capaz de suprir essa deficiência, provendo acesso de dados e facilitando a expansão de serviços de voz a um custo reduzido e a um curto prazo de implantação.

A utilização de redes *mesh* sem fio associadas a um enlace de satélite, para prover infraestrutura de acesso para serviços de voz e dados para essas localidades, mostra-se como uma alternativa com boa relação custo-benefício. Entre as vantagens da utilização de uma rede *mesh* no acesso, podemos citar:

- Facilidade de instalação e manutenção.
- Facilidade de expansão, pela simples adição de um novo nó/roteador na rede.
- Baixo custo dos dispositivos da rede e grande flexibilidade, visto que os dispositivos são os mesmos utilizados nas redes IEEE 802.11 operando no modo infraestrutura.
- Possibilidade de acesso de voz e Internet utilizando a mesma infraestrutura.
- Redundância inerente às redes *mesh*.
- Possibilidade de expansão de acesso de voz e dados para usuários de áreas rurais vizinhas.

Entretanto, prover serviços de tempo real sensíveis a problemas de atraso, variação do atraso (*jitter*) e perdas de pacotes, como voz sobre IP (VoIP), em redes *mesh* associadas a um enlace de satélite apresentam vários desafios, dos quais podemos citar:

- O alto atraso inerente das conexões via enlace de satélite.
- As transmissões em redes sem fio tendem a sofrer desvanecimento, uma alta atenuação do meio e interferência. Essas características tendem a limitar a banda, se comparadas com as tecnologias via cabo.
- A natureza compartilhada das redes IEEE 802.11, onde cada nó compartilha os seus recursos com todos os outros nós que estão dentro da área de interferência, reduzindo consideravelmente a capacidade da rede.
- O alto *overhead* da pilha de protocolos 802.11/IP/UDP/RTP para cada pacote VoIP.
- A interferência intra-fluxo. Em uma rede *mesh* com vários nós operando em um único canal, o volume de tráfego diminui com o número de nós devido à interferência intra-fluxo produzida por diferentes pacotes do mesmo fluxo competindo pelo meio nos diferentes nós da rede.
- A dificuldade de garantir qualidade dos serviços VoIP em presença de tráfego de melhor esforço. Embora, várias pesquisas vem sendo conduzidas para entender a capacidade de chamadas VoIP e para garantir qualidade de serviços nas redes *mesh* [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13], não existe um consenso sobre qual é a melhor alternativa.

Estes fatores motivaram a investigação dos requisitos básicos e de técnicas de otimização capazes de melhorar o desempenho, para assim propor um mecanismo eficiente de controle de admissão capaz de viabilizar o uso das redes *mesh* como infraestrutura de acesso para localidades remotas conectadas via enlace de satélite.

1.2. Objetivos

Este estudo tem como objetivo propor e avaliar uma arquitetura utilizando um enlace de satélite associado a uma rede *mesh* sem fio para prover acesso VoIP para localidades remotas com baixa densidade populacional. O trabalho divide-se basicamente na:

- Avaliação do impacto causado pelo atraso imposto pelo enlace de satélite na rede de acesso de última milha para o provimento de serviços de voz sobre IP. Esse impacto é avaliado com base em medidas efetuadas em um enlace de satélite e do uso de uma metodologia de avaliação da qualidade de voz. Com base nesse estudo, é estimado o valor máximo aceitável de atraso na rede de acesso que não compromete a qualidade das chamadas de voz sobre IP.
- Proposição e avaliação de um mecanismo de controle de admissão VoIP para a rede *mesh* de acesso capaz de limitar o acesso de usuários, mantendo um nível que qualidade de serviços aceitável para a arquitetura proposta.

1.3. Delimitação do Problema

Este trabalho delimita-se a estudar e definir um método de avaliação da qualidade de voz em redes *mesh* interconectadas via satélite, avaliando a viabilidade do uso dessas redes como meio de acesso para o transporte de voz, propondo um mecanismo de controle de admissão de usuários VoIP conforme requisitos de qualidade pré-estabelecidos.

As localidades atendidas pelo programa PGMU são geralmente pequenos vilarejos e aldeias indígenas com baixa densidade populacional. Com base em dados fornecidos na implantação da solução da Siemens [3], a maior parte das localidades atendidas pelo programa PGMU possui um número de assinantes inferior a 30.

Assume-se que o enlace de satélite possui largura de banda suficiente para alocar todas as chamadas VoIP geradas na rede *mesh* de acesso. Isso é factível, visto que a grande parte dos sistemas via satélite disponíveis no mercado possuem mecanismos de controle de QoS. Parâmetros como atraso e *jitter* relativos ao link de satélite serão considerados conforme medidas práticas realizadas no enlace de satélite da rede *Surpass RLU* [3] discutidas no Capítulo 4

Mecanismos de diferenciação de tráfego para prover serviços de dados em conjunto com serviços de voz não serão abordados nesse trabalho.

1.4. Contribuições Esperadas

As principais contribuições esperadas deste trabalho são:

- Avaliar a viabilidade do uso de redes *mesh* sem fio como meio de acesso de baixo custo, para prover serviços de voz para comunidades remotas e economicamente menos favorecidas.
- Ser o primeiro trabalho encontrado na literatura a abordar a utilização de um enlace de satélite associado a uma rede *mesh* de acesso para transporte de VoIP para localidades remotas e economicamente menos favorecidas.
- Propor um mecanismo de controle de admissão centralizado para redes *mesh* baseado em medidas, capaz de permitir ou não o acesso de novos usuários à rede mantendo um nível aceitável de qualidade dos serviços.
- Promover a inclusão social pela avaliação de soluções alternativas de custo reduzido para prover serviços de voz e dados para pequenas localidades excluídas dos serviços básicos de telefonia.

1.5. Estrutura do Documento

Este trabalho está dividido em sete capítulos. O capítulo dois apresenta os conceitos referentes às redes *mesh* sem fio IEEE 802.11, fazendo referência às principais pesquisas e produtos que estão sendo desenvolvidos atualmente por empresas e universidades. O capítulo três apresenta os principais métodos de avaliação da qualidade de voz em redes IP. O capítulo quatro apresenta um exemplo de topologia utilizando enlace de satélite associada a uma rede *mesh* de acesso, avaliando o impacto causado pelo enlace na rede de acesso para a utilização de VoIP. No capítulo cinco, é descrito o mecanismo de controle de admissão proposto. Finalmente nos capítulos seis e sete são apresentados os resultados das simulações, conclusão e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Redes *Mesh*

2.1. Introdução

Diferentemente de uma rede de infraestrutura, onde todos os nós se comunicam através de um ponto de acesso (*Access Point* – AP), uma rede *mesh* é composta por vários nós (roteadores) que se comportam como uma única rede comunicando-se entre si, possibilitando que o cliente se conecte em qualquer um destes nós. Os nós atuam como repetidores ou roteadores sendo que cada nó está conectado a um ou mais dos outros nós que compõem a rede. Desta maneira, é possível transmitir mensagens de um nó a outro por diferentes caminhos.

Este capítulo apresenta os conceitos básicos das redes *mesh* sem fio padrão IEEE 802.11, bem como os principais trabalhos na área, encontrados na literatura. Também são abordados assuntos referentes à provisão de serviços de voz sobre IP e controle de admissão em redes *mesh*.

2.2. Redes *Mesh* IEEE 802.11

Atualmente, o padrão mais utilizado para as redes sem fio é o IEEE 802.11 [15], comercialmente conhecido como *Wi-Fi* (*Wireless-Fidelity*). O principal uso dessa tecnologia é em redes locais e públicas onde pontos de acesso, ligados diretamente a uma rede fixa cabeada tradicional, permitem que dispositivos móveis tenham acesso, por exemplo, a Internet banda larga. As redes IEEE 802.11 podem ser classificadas como:

- **Infraestrutura:**

Nesse modo, todos os nós se comunicam através de um ponto de acesso (*access point*). Quando um nó necessita enviar uma mensagem para outro nó na mesma rede, a mensagem deve ser enviada para o ponto de acesso, sendo que este encaminha a mensagem para o nó destino.

- **Ad-hoc:**

No modo *ad hoc*, não existe necessariamente uma infraestrutura e os nós se comunicam diretamente uns com os outros. Embora objeto de intensas pesquisas, as redes *ad hoc* têm uso limitado devido ao pouco incentivo de seus participantes no compartilhamento de recursos, como energia, por exemplo, que muitas vezes são limitados [16]. Apenas em certas situações, como a de soldados em campo de guerra ou trabalhos em áreas de desastres, onde não existe uma infraestrutura de comunicação disponível, as redes *ad-hoc* tem seu uso mais difundido, visto ao inerente propósito de trabalho em equipe do grupo.

- **Mesh:**

As redes *mesh*, podem ser consideradas como uma aplicação das redes *ad-hoc*. A principal diferença reside no fato de que os dispositivos ou nós das redes *mesh* possuem localização fixa e geralmente o tráfego converge em direção a um *gateway* que possui conexão com a rede cabeada convencional, melhorando assim a conectividade e fornecendo um rede *backhaul* de acesso para os nós que estão distantes da área de alcance dos *gateways*.

Numa arquitetura *mesh*, alguns dos dispositivos participantes compõem o *backbone* da rede, trabalhando apenas como roteadores e comunicando-se entre si via múltiplos saltos. Outros dispositivos podem se conectar a esses roteadores por cabos, trabalhando apenas como clientes [4, 17]. Esse *backbone* é responsável por estender o alcance do acesso à rede cabeada além do alcance da transmissão de um único ponto de acesso. Os roteadores do *backbone* sem fio são encarregados de encaminhar o tráfego recebido através de múltiplos saltos vindo tanto de clientes quanto de outros roteadores.

As redes *mesh* aumentam a conectividade da rede, interconectam redes isoladas provendo acesso às redes cabeadas de banda larga e, ao mesmo tempo, evitam cabos de rede, o que reduz o custo de infraestrutura.

Nas redes *mesh*, os roteadores do *backbone* são tipicamente estacionários e apenas os usuários da rede são capazes de se deslocar. Conseqüentemente, as limitações de energia ficam restritas aos usuários móveis, pois os roteadores da rede podem ser alimentados por fontes permanentes de energia.

Akyildiz *et al.* [4] apresentam uma análise bem completa sobre as redes *mesh* e sobre o que está sendo desenvolvido na área. Neste trabalho, os autores apontam o principal uso das redes *mesh* como sendo o de prover uma rede comunitária de acesso banda larga com infraestrutura sem fio, oferecendo possibilidade de acesso a Internet para comunidades que, por exemplo, possuem baixas condições econômicas.

Uma rede *mesh* é dinamicamente auto-organizável e auto-configurável com os nós da rede automaticamente comunicando-se entre si em modo *ad-hoc* e admitindo receber novos nós conforme necessário.

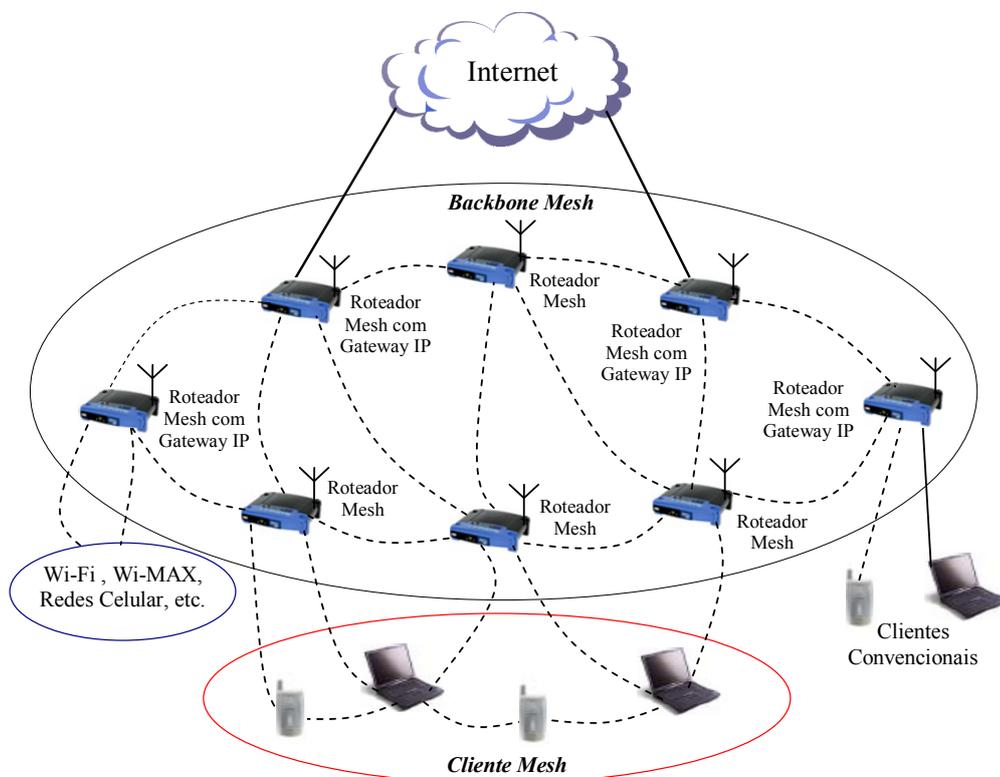


Figura 2.1: Arquitetura de uma rede *mesh* [4]

A Figura 2.1 [4] mostra um exemplo de redes mesh onde os roteadores, que se comunicam entre si, encaminham pacotes de dados para as subredes ou para os *gateways* de acesso a Internet. Juntos, os roteadores formam o *backbone* sem fio da rede *mesh*. Outros nós podem fazer o papel de ponte para subredes sem fio, conectando-se a pontos de acesso que servirão aos dispositivos móveis como porta de entrada para a rede. A idéia principal é que os roteadores sem fio possam fornecer uma infraestrutura de acesso para diferentes grupos de dispositivos como, por exemplo, redes de sensores ou clientes cabeados.

Os roteadores da rede *mesh* (*backbone*) precisam utilizar algum protocolo de roteamento capaz de montar suas tabelas de rotas para encaminhar os pacotes. Os protocolos padrão de roteamento desenvolvidos para a rede fixa podem ser utilizados, como, por exemplo, o OSPF. Entretanto, protocolos de roteamento *ad-hoc*, que são adaptados à alta mobilidade, são recomendados permitindo que as rotas possam ser alteradas a qualquer momento, devido, por exemplo, à inclusão ou remoção de um nó por falha.

2.2.1. Classificação das Redes Mesh Quanto a Funcionalidade

Em termos de arquitetura, uma rede *mesh* pode ser classificada conforme as funcionalidades presentes nos nós em três grupos principais [4]:

- **Infraestrutura/backbone:** nesse tipo de arquitetura, os roteadores *mesh* formam uma malha entre si, servindo de *backbone* para os clientes convencionais. As funcionalidades de *gateway* e ou *bridge*, presentes nos roteadores, permitem a integração com outras redes sem fio e a conexão com a internet. O *backbone* pode ser constituído de várias tecnologias de rádio, sendo que a comunicação entre os roteadores *mesh* pode ser estabelecida utilizando-se técnicas de longo alcance, como o uso de antenas direcionais.
- **Cliente:** esse tipo de arquitetura não requer roteadores *mesh*, sendo que os próprios nós dos clientes desempenham as funcionalidades de roteamento e configuração da rede. Em geral são formados por apenas um tipo de rádio.
- **Híbrida:** é constituída pela combinação das arquiteturas infra-estrutura e cliente, onde os usuários *mesh* podem acessar a rede através dos roteadores *mesh* ou diretamente entre os clientes *mesh*. Um exemplo de rede *mesh* híbrida pode ser visto na Figura 2.1.

A escolha de uma arquitetura depende da finalidade de utilização da rede, entretanto a arquitetura híbrida disponibiliza a melhor forma de utilização das potencialidades da tecnologia *mesh* sem fio [4].

2.2.2. Topologia *Mesh* com Múltiplos Rádios e Múltiplos Canais

Devido à natureza *half-duplex* dos protocolos IEEE 802.11, onde o equipamento não pode enviar e receber pacotes simultaneamente, a capacidade da rede é reduzida. É intrínseco para as redes *mesh* que o tráfego do usuário necessite passar por vários nós até atingir seu ponto de saída da rede ou *gateway*. O número de nós que o tráfego do usuário deve passar para atingir seu destino vai depender da topologia da rede utilizada.

Um ganho considerável de desempenho é obtido pelo uso de múltiplos rádios. Como exemplo, podemos utilizar dois rádios para separar as funcionalidades de roteamento e acesso. Isso permite a separação do tráfego em dois tipos principais, enquanto um rádio fica responsável pelas tarefas de roteamento e configuração realizada entre os roteadores, o outro fica responsável pelo acesso dos clientes sem fio na rede. Também se tem pesquisado a utilização de múltiplos rádios [7, 18, 19, 20] nos roteadores do *backbone*, favorecendo assim caminhos alternativos. Nesse caso, para escolher o melhor caminho entre dois pontos da rede, o algoritmo de roteamento deve se preocupar, também, em selecionar qual é o melhor canal de rádio a ser utilizado em cada nó da rede no caminho a ser percorrido.

Na literatura existem vários trabalhos que discutem a utilização de múltiplos rádios. Niculescu *et al.* [7] investigam vários métodos para melhorar a qualidade de voz em redes *mesh* sem fio. Eles demonstram que o uso de dois rádios, com múltiplos canais devidamente intercalados em linha, visando diminuir a interferência, traz um notável ganho de desempenho. Draves *et al.* [20] abordam o problema do roteamento em redes *mesh* de múltiplos rádios e múltiplos saltos. Essa abordagem envolve estimar, em cada nó, a capacidade de banda disponível, o tempo de transmissão, a carga por canal, entre outros, difundir essas informações pela rede e combiná-las para encontrar um caminho ótimo.

2.2.3. Trabalhos Correlatos

Atualmente existem vários grupos de pesquisa em redes *mesh* ao redor do mundo, tanto na área acadêmica como comercial. Entre esses projetos podemos citar:

- **RoofNet:** O *RoofNet* [21] está sendo desenvolvido no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) em Cambridge Massachusetts. O projeto consiste em

uma rede *mesh* de 38 nós espalhados numa área de aproximadamente seis quilômetros quadrados. Cada nó da rede é composto por um computador pessoal equipado com uma placa de rede sem fio padrão IEEE 802.11 conectada a uma antena omni-direcional. Todos os nós operam em um mesmo canal. Os usuários, voluntários do projeto, ligam seus computadores aos nós da rede *mesh* por meio de cabos *Ethernet*. Cada nó da rede executa o sistema operacional Linux e possui um servidor DHCP e um servidor *web* para endereçamento e monitoramento das máquinas dos clientes da rede, respectivamente. O fornecimento de qualidade dentro da rede é tratado pelo protocolo de roteamento que é uma extensão do protocolo DSR, tendo como diferença principal a métrica utilizada para encontrar o melhor caminho entre dois nós.

- **ReMesh:** O projeto *ReMesh* [22] está sendo desenvolvido na Universidade Federal Fluminense, UFF, tendo como objetivo principal implantar uma rede sem fio de acesso comunitário em um dos *campi* da UFF. Essa rede está sendo desenvolvida com o intuito de fornecer acesso em banda larga, a um preço reduzido para alunos, funcionários e professores que residem ao redor do *campus*. Essa rede utiliza o protocolo de roteamento OLSR com algumas modificações. O protocolo OLSR foi escolhido por ser considerado, pelos desenvolvedores, o mais estável para ser executado nesse tipo de rede.
- **MeshNet:** O projeto *MeshNet* [23] está sendo desenvolvido na Universidade da Califórnia. A rede possui 25 nós, equipados com interfaces 802.11 a/b/g, e distribuídos em cinco andares dentro do edifício da Faculdade de Engenharia. A principal utilização da rede é para o desenvolvimento de protocolos escaláveis, gerenciamento eficiente de rede e QoS. A rede possui um *gateway* para o escoamento do tráfego da rede *mesh* para a Internet. O *gateway* é um computador pessoal equipado com uma interface de rede sem fio 802.11b, utilizada para conectar o *gateway* à rede *mesh*, e uma interface *Ethernet* utilizada para prover acesso a Internet e gerenciamento dos dados.
- **Solução Mesh da Nortel:** A solução *mesh* desenvolvida pela Nortel [24] é composta por pontos de acesso que juntos formam uma rede comunitária, trabalhando como portas de entrada da rede para os dispositivos móveis. Esta

solução possui um robusto sistema de gerenciamento e configuração e está sendo utilizado em projetos nos Estados Unidos, no Canadá e na China.

- **Solução Mesh da Cisco:** A solução *mesh* desenvolvida pela Cisco [25] tem como objetivo fornecer uma rede sem fio desde pequenos espaços empresariais até espaços metropolitanos, fornecendo cobertura sem fio para uma cidade, por exemplo. A solução oferece um protocolo de roteamento inteligente e um sistema de gerenciamento integrado como outros equipamentos da Cisco. A solução possui suporte simultâneo para os padrões IEEE 802.11 a/b/g utilizando um protocolo de roteamento proprietário da Cisco para formar uma rede *mesh* dinâmica entre os pontos de acesso remotos.

Vários outros projetos de redes de acesso comunitárias, mais conhecidas como cidades digitais, vêm sendo realizados em cidades como *Pittsburgh*, *Dublin* e *Taipei*. Akyildiz *et al.* [4] fazem um levantamento bem completo sobre as redes *mesh* e também sobre o que está sendo desenvolvido nesta área.

2.3. VoIP em Redes Mesh

Os sistemas de comunicação baseados em voz sobre IP (VoIP) se consolidaram com a padronização dos protocolos de sinalização e representam hoje uma solução tecnológica viável para a provisão de serviços de voz.

Todavia, o transporte de voz sobre o protocolo IP ainda continua sendo um desafio. O protocolo IP foi inicialmente concebido de forma a oferecer transporte baseado em comutação por pacotes e serviço de melhor esforço (*best effort*), sem estabelecer nenhuma garantia de entrega ou limite de atraso na entrega de pacotes. Em contrapartida, a Rede de Telefonia Fixa, responsável pelo transporte de voz do sistema de telefonia convencional, opera sobre uma infraestrutura TDM, que oferece um serviço de comutação de circuitos com latência limitada e índices de variação de atraso e de perdas extremamente baixos, totalmente adequados para o transporte de voz.

Para suportar a demanda de serviços de operação em tempo real altamente sensíveis ao atraso, ao *jitter* e à perda de pacotes, como VoIP, várias abordagens para prover Qualidade de Serviço (QoS) em redes IP vêm sendo estudadas, tanto no meio acadêmico quanto na

indústria. Dentre as diversas abordagens, destacam-se o *IntServ (Integrated Services)* e o *DiffServ (Differentiated Services)*, que oferecem uma infraestrutura para fornecer, além do tradicional serviço de melhor esforço, tratamento diferenciado e novos serviços aos fluxos associados às aplicações sensíveis a parâmetros de qualidade de serviço. Embora não sejam aplicados amplamente na Internet pública, estas abordagens já se mostram presentes em redes corporativas e em *backbones* de operadoras de serviços de telecomunicações, oferecendo tratamento diferenciado aos fluxos prioritários, ao menos em suas redes privadas.

Com a popularização de equipamentos e soluções de comunicação baseados em VoIP, seja em redes corporativas ou na Internet pública, surge a necessidade de se mensurar a qualidade da voz fim-a-fim, seja para validar a infraestrutura de rede e mecanismos de provisão de QoS implementados, ou mesmo para analisar e acompanhar o nível de satisfação dos usuários quanto ao serviço oferecido.

Devido à alta disponibilidade e relativo baixo custo, as redes IP têm se tornado uma alternativa importante em relação às redes comutadas tradicionais (PSTN) para o transporte de chamadas de voz. Entretanto, as chamadas VoIP são usualmente sensíveis a problemas de atraso, variação de atraso (*jitter*) e perda de pacotes. A qualidade das chamadas geralmente não é satisfatória em uma rede melhor esforço, *best-effort*. Nos *backbones* da rede cabeada, a capacidade da rede geralmente é abundante e assim a provisão de qualidade de serviços para chamadas VoIP pode ser assegurada por meio de esquemas de diferenciação de serviços (*DiffServ*), já largamente empregados e conhecidos.

Entretanto, ambientes sem fio, como os utilizados nas redes *mesh* IEEE 802.11, possuem uma capacidade reduzida de recursos e são suscetíveis a interferências, colisões e bloqueios por obstáculos. Assim prover QoS para VoIP em redes *mesh* torna-se uma tarefa desafiadora. A perda de pacotes e o atraso devido à interferência em uma rede *mesh* de múltiplos nós com capacidade limitada, podem prejudicar de maneira significativa a qualidade de uma chamada VoIP fim-a-fim. Vários estudos abordando este tema são encontrados na literatura, como mostrado na próxima subseção.

2.3.1. Trabalhos Correlatos

Vários estudos têm sido conduzidos na área de redes *mesh* 802.11 com múltiplos nós no sentido de verificar o número máximo de chamadas VoIP suportadas. Li *et al.* [6] apresentam estudos com a finalidade de avaliar e entender a capacidade de uma rede de

múltiplos nós. O autor demonstra que em um único nó IEEE 802.11b, operando em sua taxa efetiva de transmissão máxima de 11 Mbps e utilizando um *codec* G.729 com 20ms de *payload* de áudio, apenas 14 chamadas VoIP simultâneas são suportadas.

Vários outros esquemas de otimização de desempenho têm sido propostos, visando melhorar a qualidade de voz. Wang *et al.* [8] propõem o uso de agregação de pacotes VoIP para aumentar a capacidade. Ganguly *et al.* [9] discutem os requisitos básicos para um transporte eficiente de voz em redes *mesh*, sendo propostas e avaliadas várias técnicas de otimização. Trad *et al.* [12] propõem um modelo analítico para avaliação da capacidade de voz em redes locais sem fio baseado na recomendação IEEE 802.11e [26].

2.4. Controle de Admissão em Redes *Mesh*

O controle de admissão tem como função permitir que um novo fluxo entre na rede somente se os recursos disponíveis sejam maiores que os recursos requeridos pelo novo fluxo a ser admitido. Sem um mecanismo efetivo de controle de admissão, novos fluxos de dados podem entrar na rede mesmo que essa já esteja no seu limite da capacidade. Como consequência, tanto o novo fluxo quanto os fluxos já admitidos passam a sofrer problemas de atrasos e perdas, comprometendo os serviços que necessitam de requisitos de tempo real, como VoIP. Um novo fluxo só pode ser admitido se, por algum critério de decisão previamente estabelecido, não comprometer as garantias de qualidade já oferecidas aos demais fluxos. O controle de admissão tem ainda como objetivo secundário a maximização dos níveis de utilização da rede.

Existem basicamente duas abordagens de controle de admissão encontradas na literatura. O controle de admissão baseado em parâmetros (*Parameter-Based Admission Control* - PBAC) e o baseado em medidas (*Measurement-Based Admission Control* - MBAC). O PBAC utiliza descrições de tráfego que seguem modelos determinísticos ou estocásticos sendo baseados na observação do fluxo por um longo período de tempo no passado e na construção de um modelo que prevê o comportamento dos fluxos futuros devido às observações do passado, sendo este usado para calcular os recursos ainda disponíveis na rede e decidir sobre a admissão de novos fluxos. Geralmente no PBAC, se a requisição de admissão é aceita, uma banda exclusiva é reservada e dedicada para o novo fluxo, não maximizando com isso, os recursos disponibilizados pela rede. Grossglauser e Tse [27] e

Filho [28] apontam dois tipos de problemas na abordagem baseada em parâmetros. O primeiro se refere à dificuldade de se caracterizar o tráfego de fontes com comportamento em rajadas, o que pode levar a um erro de estimativa dos recursos. O segundo se refere à dificuldade de policiar esse tráfego evitando que utilize mais recursos do que os alocados na ocasião da admissão.

No MBAC, efetua-se medidas em tempo real da carga atual da rede e calcula-se a taxa estimada do novo fluxo, sendo que a decisão para admissão de novos fluxos é feita comparando-se os parâmetros do novo fluxo com as medidas efetuadas na rede. A desalocação de banda ou *downside* do MBAC é sensível à exatidão da medida, sendo suscetível a erros de medição do tráfego os quais podem ocorrer, por exemplo, quando um fluxo já admitido está temporariamente inativo o suficiente para provocar uma sub-avaliação do tráfego já admitido, congestionando o link mais tarde pelo envio simultâneo em uma taxa alta [29]. O MBAC é mais imune aos problemas do PBAC, entretanto requer uma carga computacional maior. Breslau *et al.* [30] notam que se comparado com o PBAC, o MBAC é mais apropriado para aplicações de tempo-real.

Em redes sem fio sujeitas a interferências e condições do meio, os parâmetros variam bastante com o tempo. Neste caso, o MBAC é mais indicado por ser capaz de continuamente manter um perfil do tráfego da rede e adaptar o provisionamento de QoS baseado em dados mais precisos.

Em redes sem fio IEEE 802.11 um nó compartilha o meio com todos os outros nós que transmitem dentro de sua área de detecção de portadora (*Carrier Sensing Range - CSN*). A coordenação de acesso ao meio, entre os nós dentro da área de detecção de portadora, não é trivial. Os nós podem ter uma visão diferente do meio, visto que os mesmos estão espacialmente distribuídos. Em outras palavras, um nó pode ser capaz de detectar a transmissão de outro nó, porém não conseguir decodificar os pacotes recebidos. Sendo assim, dois nós que não podem se comunicar diretamente, podem ainda disputar os mesmos recursos.

O mecanismo de controle de admissão deve assegurar que todos os nós dentro da região de detecção de portadora, tenham recursos suficientes para acomodar o novo fluxo. Os recursos disponíveis em um nó dependem do link de transmissão, visto que cada link pode ter diferentes taxas de transmissão e de erro de pacotes.

A taxa de utilização do link, requerida por um fluxo, depende da taxa de geração dos pacotes, do tamanho dos pacotes e da taxa de transmissão do link. Entretanto, devido à

interferência intra-fluxo, a utilização do link também é afetada pela fração de canal que o fluxo consome dos outros links vizinhos. A interferência intra-fluxo pode ser definida como a interferência causada entre os nós que encaminham pacotes pertencentes a um mesmo fluxo em uma comunicação de múltiplos saltos. Um nó da cadeia de encaminhamento terá os seus recursos divididos pelo número de nós situados na cadeia de encaminhamento que estejam situados dentro do seu alcance de detecção de portadora.

O padrão IEEE 802.11 não possui um mecanismo nativo para fornecer QoS às aplicações. Para suprir essa deficiência, foi desenvolvida a recomendação IEEE 802.11e [26], como uma extensão à recomendação original, propondo vários mecanismos de provisão de QoS na camada MAC do IEEE 802.11. A idéia principal é ter um ponto central de coordenação emitindo pacotes especiais contendo parâmetros de QoS capazes de reconfigurar dinamicamente os parâmetros de controle de acesso ao meio das interfaces de rede das demais estações, possibilitando que as estações compartilhem o meio seguindo regras de diferenciação de serviços e prioridades de acesso. Com base nisso, vários algoritmos e protocolos de controle de admissão têm sido propostos. Gao *et al.* [36] fazem uma revisão dos vários mecanismos de provisão de QoS propostos na recomendação 802.11e, bem como um levantamento de vários algoritmos e protocolos de controle de admissão baseados no IEEE 802.11e. É mostrado que os mecanismos de QoS fornecidos pelo 802.11e podem ser utilizados como requisitos para controle de admissão de modo a prover QoS para aplicações multimídia em WLANs. Entretanto, os autores citam que ainda não se tem uma solução completa que preencha todos os requisitos.

Embora a recomendação IEEE 802.11e forneça diferenciação de serviços, ela não define como essa funcionalidade deve ser utilizada em situações particulares de carga na rede. Além disso, é importante notar que a existência de classes de serviço não garante que os fluxos presentes na rede serão servidos com um atraso aceitável para o tipo de aplicação a que pertencem. Dessa forma, faz-se necessária a adoção de mecanismos para monitoramento e controle dos níveis de serviço como complemento à funcionalidade de QoS introduzida pela extensão IEEE 802.11e. O controle de admissão é um mecanismo que permite restringir o número de usuários simultaneamente presentes na rede de forma a evitar a saturação do enlace sem fio, o que resulta em atrasos elevados.

Na próxima subseção são mostrados os principais mecanismos de controles admissão e provisionamento de QoS para redes *mesh* IEEE 802.11 encontrados atualmente na literatura.

2.4.1. Trabalhos Correlatos

O controle de admissão e a garantia de QoS em redes IEEE 802.11 apresentam vários desafios e tem sido tema de várias pesquisas. Kim *et al* [31] propõem um controle de admissão para chamadas VoIP em uma rede *mesh*, baseado em um modelo de interferência. Os autores citam a interferência como o maior fator que limita o desempenho de redes *mesh* sem fio. O modelo proposto baseia-se no fato de que quando um nó transmite, ele interfere em todos os demais nós dentro da zona de interferência, considerada como o sendo o limite que mensagens CTS/RTS (*Clear To Send/Request To Send*) podem ser recebidas corretamente. Cada nó inclui uma variável de estado de interferência, a qual é incrementada sempre que uma nova chamada é admitida dentro da zona de interferência. Com base nisso, são efetuadas simulações para determinar, através do Modelo E [34], o número de chamadas VoIP suportadas com nível de qualidade aceitável, inferindo-se o valor máximo da variável de estado (capacidade de interferência). Depois de estimada a máxima capacidade de interferência, quando uma nova chamada chega à rede, o estado de interferência é avaliado. Se todos os estados estiverem abaixo do valor limite calculado, a chamada é admitida, caso contrário é rejeitada.

Diferentemente do anterior, Zhal *et al* [35] propõem um esquema de controle de admissão e controle de carga do tráfego de melhor esforço, capaz de suportar voz e dados simultaneamente. São propostos dois algoritmos que fazem uso da taxa de ocupação do canal para avaliar os recursos do nó periodicamente. O algoritmo de controle de admissão da chamada é utilizado para regular a admissão do tráfego de tempo real e o algoritmo de controle de carga é usado para controlar a taxa de transmissão do tráfego de melhor esforço. É demonstrado, através de simulações, que o *throughput*, o atraso e o *jitter* são funções da taxa de ocupação do canal. Através de simulações são determinados os limiares de aceitação de novos fluxos com requisito de tempo real em detrimento à do tráfego de melhor esforço.

Os trabalhos apresentados por Yang e Kravets [32] e Chakeres *et al.* [33] procuram resolver os desafios relacionados ao controle de admissão em redes de múltiplos saltos. Os autores focam seus estudos no problema da comunicação com os nós vizinhos na área de detecção de portadora, propondo soluções que não podem ser implementadas com o hardware disponível atualmente. Yang e Kravets [32] propõem um controle de admissão (*Contention-aware Admission Control - CACP*) para redes sem fio, que considera a natureza compartilhada do canal de rádio. Para fazer o controle de admissão, o mecanismo considera

os recursos disponíveis não somente nos vizinhos mais próximos, mas também em todos os nós dentro da área de detecção de portadora. O mecanismo faz a estimativa dos recursos disponíveis em cada nó, pela monitoração passiva da quantidade de tempo que o canal é percebido como ocupado.

Analisando os trabalhos propostos, podemos observar que a maior parte dos mecanismos de controle de admissão propostos não consideram algumas particularidades das redes *mesh*. Entre elas, podemos citar que, ao contrário de uma rede *ad-hoc*, uma rede *mesh* apresenta topologia estável exceto para eventuais falhas e adição de novos nós. Em uma rede *mesh* praticamente todo o tráfego é trocado entre um nó e um *gateway*, enquanto o tráfego nas redes *ad-hoc* flui entre pares de nós arbitrários. No próximo capítulo abordamos os principais métodos utilizados na avaliação da qualidade de voz, definindo uma metodologia a ser empregada na solução proposta neste estudo.

Capítulo 3

Medida de Qualidade de Voz

3.1. Introdução

Serviços de voz baseados em redes de pacotes são extremamente sensíveis a atraso, *jitter* e perda de pacotes que prejudicam a qualidade do serviço fim-a-fim. Com a crescente expansão e popularização do VoIP, surge cada vez mais a necessidade de se mensurar a qualidade de voz percebida pelos usuários, visto que a maioria deles está acostumada com sistemas baseados nas redes comutadas tradicionais, que garantem uma banda reservada e disponível durante toda a chamada. Essas medidas oferecerem estatísticas do nível de satisfação dos usuários, podendo ser utilizadas para validar a infraestrutura de rede e os mecanismos de provisão de QoS implementados.

Neste capítulo são abordados os principais métodos empregados na avaliação da qualidade de voz sendo definida uma metodologia objetiva de avaliação da qualidade de voz baseada no Modelo E. Esta metodologia é utilizada, como base, para avaliação das restrições de QoS impostas pelo enlace de satélite na rede de acesso na arquitetura proposta neste trabalho.

3.2. Medida de Qualidade de Voz

O ITU-T define vários padrões para avaliação da qualidade de voz. O primeiro e mais comum deles é o da Pontuação de Opinião Média (*Mean Opinion Score - MOS*) definido nas recomendações ITU-T P.800 [37] e ITU-T P.830 [38]. O MOS é calculado com base em testes subjetivos, onde um grupo de ouvintes avaliadores atribuem uma nota à qualidade da

voz reproduzida pelo sistema de comunicação em testes. Esta nota vai de um, considerada como ruim, a cinco, considerada como excelente. Apesar de não ser o único, o MOS é atualmente o mais bem aceito e utilizado método subjetivo de avaliação de qualidade de voz.

Os métodos subjetivos são claramente a melhor maneira de se avaliar a percepção dos usuário, pois expressam de forma direta a opinião média dos avaliadores ouvintes. Entretanto, esses métodos são geralmente caros e de difícil implementação [39].

Sucessivas tentativas foram feitas para se definir métricas objetivas e de mais fácil implementação. O dois principais métodos objetivos atualmente recomendados pelo ITU-T são o PESQ (*Perceptual Evaluation of Speech Quality*) e o Modelo E. O PESQ é conhecido como um método perceptivo e está definido na recomendação ITU-T P.862 [40]. Neste método, um sinal de referência previamente gravado é comparado com o sinal do sistema de transmissão a ser avaliado a fim de compor uma medida de distorção do sinal de voz, tornando-o dessa forma um método intrusivo [39].

O Modelo E foi originalmente proposto pelo ETSI [41] e posteriormente padronizado pelo ITU-T através das recomendações G.107 [34] e G.108 [42]. Ele utiliza um método objetivo e não intrusivo com a facilidade de operação em tempo real e da contabilização em separado de cada um dos fatores responsáveis pela degradação da qualidade de voz. Na próxima seção são apresentados detalhes do Modelo E.

3.3. O Modelo E

O Modelo E, definido na recomendação ITU-T G.107 [34], propõe um método não intrusivo de avaliação objetiva da qualidade de voz em sistemas de transmissão. Ele baseia-se no conceito de que “fatores psicológicos numa escala subjetiva são aditivos” [34], ou seja, as contribuições ocasionadas pelos fatores de perda na degradação de um sistema de comunicação de voz podem ser computadas separadamente, embora isso não implique que tais fatores não estejam correlacionados. Como resultado final do cômputo dos fatores de perda, o Modelo E fornece o fator escalar R , que varia de 0 (péssimo) a 100 (excelente). O fator escalar R é composto pela soma de termos que representam distorções na qualidade da voz, tais como atraso médio, *jitter*, *codec* utilizado, perda de pacotes entre outros fatores. Estes fatores são computados com base em parâmetros de entrada para os quais valores

padrões e limites são especificados. A fórmula geral para o cálculo do fator escalar R , conforme especificado pelo ITU-T G.107 [34], é dado pela expressão:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_{e-eff} + A \quad (3.1)$$

onde:

R_0 = representa a relação sinal-ruído básica (SNR).

I_s = representa o fator de perdas simultâneas relativas ao sinal de voz.

I_d = representa o fator de perdas associadas ao atraso fim-a-fim.

I_{e-eff} = representa o fator de perdas associadas ao equipamento utilizado.

A = representa o fator de vantagem ou expectativa do usuário do sistema.

Visto que o cálculo do fator R envolve um grande número de parâmetros, algumas recomendações complementares e apêndices têm sido propostos pelo ITU-T [43]. Essas recomendações sugerem valores para alguns parâmetros, em condições pré-determinadas na qual o modelo foi calibrado.

No cálculo de R_0 são computados o ruído ambiente, o ruído acrescido pelos circuitos de transmissão e o teto de ruído correspondente à sensibilidade do sistema auditivo humano. Na recomendação ITU-T G.107 [34] são apresentadas expressões matemáticas e valores padrões para cada um desses parâmetros os quais resultam em um valor padrão de R_0 igual a 94,77.

Para o cálculo de I_s , o ITU-T [34] considera a soma das perdas que ocorrem mais ou menos simultaneamente ao sinal de voz. Entre elas estão a distorção de quantização causada pela digitalização do sinal de voz, a queda na qualidade devido a uma conexão de volume excessivamente alto e as perdas causadas pela interferência da própria voz do locutor sobre o fone de ouvido. A recomendação ITU-T G.107 [34] também apresenta as expressões e os valores padrões utilizados para o cálculo do fator I_s , definido um valor padrão para o I_s igual a 1,41.

O fator de vantagem A é utilizado para definir o grau de tolerância que um usuário espera de uma determinada tecnologia. Como exemplos de tecnologias podemos citar a telefonia fixa, a telefonia celular e as localidades de difícil acesso que necessitam de enlace de satélite. A recomendação ITU-T G.107 [34] sugere valores iguais a zero para telefonia fixa,

10 para telefonia celular e 20 para localidades de difícil acesso que necessitam de enlace de satélite. No entanto, pode-se considerar que este fator é uma variável com influência cultural que pode variar de um país para outro, sendo que para países que possuem serviço de telefonia precário e caro este fator pode ser aumentado.

Utilizando-se os valores padrão de R_0 e I_s definidos na recomendação ITU-T [34] a Expressão 3.1 pode ser reduzida a:

$$R = 93,36 - I_d - I_{e-eff} + A \quad (3.2)$$

O fatores I_d e I_{e-eff} têm uma estimativa mais complexa. O fator I_d está relacionado às perdas associadas ao atraso do sinal de voz. O cálculo de I_d leva em consideração uma série de equações e parâmetros definidos na recomendação ITU-T G.107 [34, 44]. No trabalho apresentado por Clark [45] é proposta uma expressão simplificada para o cálculo de I_d dependente apenas do atraso absoluto da rede T_a . Existe claramente um erro tipográfico na expressão apresentada por Clark [45] para o cálculo de I_d para $T_a \leq 175$ ms. Calculando-se o ponto de inflexão entre as duas curvas expressas em [45] podemos concluir que a expressão correta deveria ser:

$$\begin{aligned} I_d &= 0.023 * T_a && \text{p/ } T_a \leq 175 \text{ ms} \\ I_d &= 0.111 * T_a - 15,444 && \text{p/ } T_a > 175 \text{ ms} \end{aligned} \quad (3.3)$$

O cálculo do atraso absoluto T_a é dado pela Expressão 3.4 que corresponde ao atraso de codificação (T_{codec}) somado ao atraso do *buffer* de compensação de *jitter* (T_{buffer}) mais o atraso de rede (T_{rede}). O atraso de rede representa o atraso de propagação e o tempo de espera em filas. O atraso T_{buffer} é calculado como sendo a metade do tamanho total do buffer de compensação de *jitter* [46].

$$T_a = T_{codec} + T_{buffer} + T_{rede} \quad (3.4)$$

O fator de perda I_{e-eff} está relacionado às perdas associadas ao equipamento. Seu valor tem relação direta com o *codec* a ser utilizado e depende de resultados de exaustivos testes de pontuação MOS sob diversas taxas de perdas de pacotes.

Conforme a recomendação ITU-T G.107 [34] o cálculo do valor efetivo de perdas associadas ao equipamento I_{e-eff} pode ser obtido por:

$$I_{e-eff} = I_e + \frac{(95 - I_e) * P_{pl}}{P_{pl} + B_{pl}} \quad (3.5)$$

Na Expressão 3.5, I_e representa o fator de perda associado ao equipamento. B_{pl} representa o fator de robustez em relação à perda de pacotes e P_{pl} representa a probabilidade de perda de pacotes, o qual é obtido pela observação do sistema em questão. Os valores de I_e e de B_{pl} dependem diretamente da técnica de codificação inerente a cada *codec* e podem ser obtidos de tabelas divulgadas pelo ITU-T [46].

Considerando-se o *codec* G.729a, os valores de I_e e de B_{pl} são respectivamente 11 e 17 [46]. Substituindo-se esses valores na Expressão 3.5, temos:

$$I_{e-eff} = 11 + \left(\frac{84 * P_{pl}}{P_{pl} + 17} \right) \quad (3.6)$$

Cole e Rosenbluth [10] utilizam os resultados de simulações para o *codec* G729a, apresentados em [43], para derivar a Expressão 3.7, utilizada no cálculo de I_{e-eff} , onde $e\%$ representa as perdas de pacotes na rede. Os resultados são similares aos calculados pela Expressão 3.6.

$$I_{e-eff} = 11 + 40 * \ln(1 + 0.1 * e\%) \quad (3.7)$$

Substituindo-se os valores dados pelas Expressões 3.3 e 3.5 na Expressão 3.2, obtemos uma expressão simplificada para o cálculo do fator escalar R , para o *codec* G.729a, dependente apenas das perdas de pacotes, do atraso fim-a-fim e do fator de vantagem A que é tabelado:

$$\begin{aligned} R &= 82.36 - 0.023 * T_a - 40 * \ln(1 + 0.1 * e\%) + A && \text{p/ } T_a \leq 175 \text{ ms} \\ R &= 97.8 - 0.111 * T_a - 40 * \ln(1 + 0.1 * e\%) + A && \text{p/ } T_a > 175 \text{ ms} \end{aligned} \quad (3.8)$$

O fator escalar R pode ser convertido para a escala de pontuação MOS através da seguinte expressão [34]:

$$\text{Para } R < 0: \text{MOS} = 1$$

$$\text{Para } 0 \leq R \leq 100: \text{MOS} = 1 + 0,035R + R(R-60) \cdot 7 \cdot 10^{-6} \quad (3.9)$$

$$\text{Para } R > 100: \text{MOS} = 4,5$$

A relação entre o fator escalar R e o MOS, dado pela Expressão 3.9 é mostrada, como referência, no gráfico da Figura 3.1.

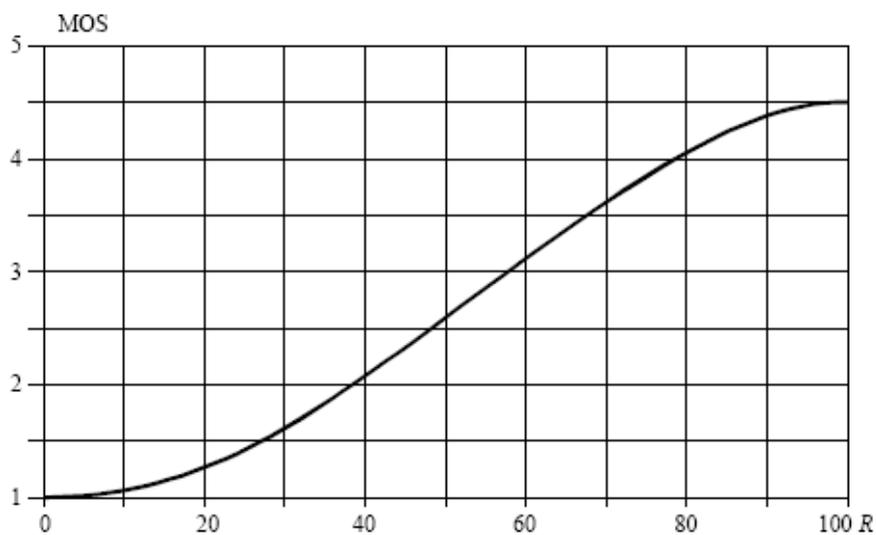


Figura 3.1: Relação entre o fator escalar R e o MOS

A relação entre o fator escalar R e o MOS pode ser dividida em categorias conforme mostrado na Tabela 3.1 [34].

Tabela 3.1: Fator escalar R versus MOS

Fator R	MOS	Satisfação dos usuários
90	4,34	Muito satisfeitos
80	4,03	Satisfeitos
70	3,60	Alguns insatisfeitos
60	3,10	Muitos insatisfeitos
50	2,58	Quase todos insatisfeitos

Observando a Tabela 3.1, podemos verificar que o valor do fator escalar R maior ou igual a 60 é o mínimo aceitável para que um sistema seja recomendável, sendo desejável um R maior ou igual a 70 [34].

3.4. Trabalhos Correlatos

Cole e Rosenbluth [10] descrevem um método para monitoração de aplicações baseadas em VoIP através da redução do Modelo E para valores mensuráveis na camada de transporte. Carvalho *et al* [39] efetuam uma análise do Modelo E sugerindo algumas modificações com base no proposto por Clark [45]. Hall [47] compara três métodos de medida da qualidade de voz, concluindo que o Modelo E é o que tem a melhor correlação com o MOS. Huang *et al* [48] apresentam uma solução para acompanhamento da qualidade oferecida por um ambiente Internet onde vários agentes distribuídos pela rede periodicamente simulam chamadas e disponibilizam informações de atraso, perda de pacotes e *jitter*. Como utiliza agentes distribuídos pela rede, esta solução não levanta estatísticas das chamadas reais do sistema.

No próximo capítulo utilizamos o modelo E para estimar o impacto causado pelo enlace de satélite na rede *mesh* de acesso.

Capítulo 4

Restrições Impostas pelo Enlace de Satélite

4.1. Introdução

Os fatores que afetam a qualidade nas transmissões VoIP para as redes terrestres são geralmente conhecidos e bem entendidos. Entretanto, a utilização de enlaces de satélite geo-estacionários para o transporte de serviços IP com requisitos de tempo real requer algumas considerações adicionais. Um dos principais aspectos a ser considerado é o elevado atraso de propagação inerente dos sistemas via satélite. Outros aspectos importantes como custo de banda, *jitter* e perdas de pacotes podem ser mais bem administrados, entretanto também devem ser considerados.

O atraso e o *jitter* são os principais fatores que determinam a qualidade da telefonia sobre IP. O elevado atraso de propagação imposto pelo enlace de satélite restringe os limites disponíveis para a rede terrestre de acesso associada ao enlace.

Neste capítulo é apresentado um exemplo de topologia de uma rede de acesso *mesh* utilizando um enlace de satélite, abordando os conceitos básicos do sistema de satélite DVB-RCS (*Digital Video Broadcasting Return Channel via Satellite*). Na sequência são utilizados dados de medidas efetuadas em um enlace de satélite para estimar o seu impacto na rede *mesh* de acesso, na arquitetura proposta.

4.2. Topologia utilizando redes *mesh* com enlace de satélite

A padronização e regulamentação do DVB-RCS pelo ETSI (ETSI EN 301.790) permitiu o barateamento dos terminais VSAT, tornando viável a utilização de enlaces de

satélite para o transporte de serviços IP para regiões onde, devido a sua localização geográfica e ou topográfica desfavorável, as tecnologias tradicionais, como fibra ótica ou enlaces de rádio são economicamente inviáveis.

O DVB-RCS é um sistema desenvolvido por um consórcio de empresas [49] que utiliza satélites geo-estacionários com banda compartilhada para prover acesso em banda larga via enlaces de satélite.

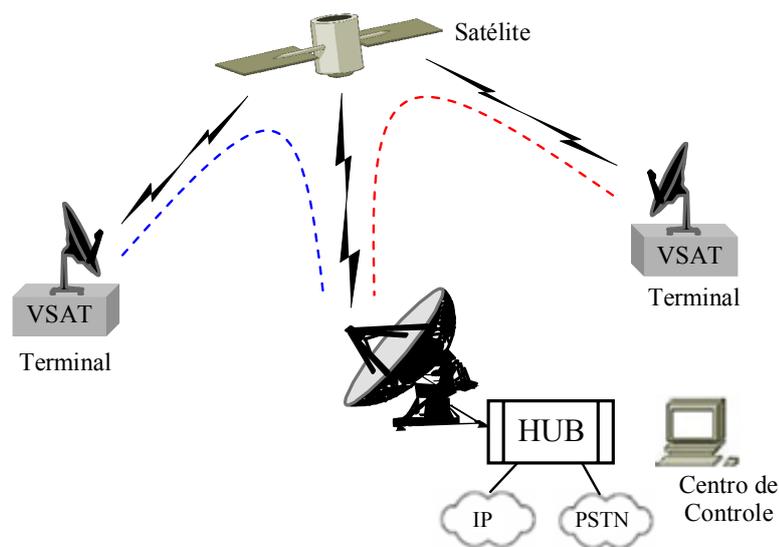


Figura 4.1: Sistema DVB-RCS

O DVB-RCS é composto por uma estação central, chamada de HUB, que se conecta à rede terrestre através dos terminais VSAT ligados aos clientes, conforme mostrado na Figura 4.1. O DVB-RCS utiliza uma topologia em estrela, onde o satélite atua apenas como um *transponder*, não sendo possível a comunicação direta entre os terminais VSAT. As transmissões no sentido do HUB para os terminais utilizam o padrão DVB-S com o tráfego para todos os terminais multiplexado em um mesmo fluxo. No sentido dos terminais para o HUB as transmissões são compartilhadas no padrão TDMA. O centro de controle, conectado ao HUB, configura a capacidade do link de retorno de acordo com as políticas expressas e as requisições efetuadas por cada terminal.

Um dos grandes inconvenientes do sistema DVB-RCS é a necessidade de dois saltos de satélite para conexão entre dois terminais. Nesse caso o atraso de propagação assume valores elevados, comprometendo a qualidade de chamadas VoIP. No próximo capítulo

faremos algumas considerações sobre os resultados obtidos através do fator escalar R para dois saltos de satélite. Neste estudo, consideramos a utilização de apenas um salto de satélite para conexão da rede *mesh* de acesso. Entretanto testes práticos, realizados na solução apresentada em [3], demonstraram ser possível estabelecer uma conversação VoIP inteligível entre dois usuários conectados aos terminais VSAT utilizando dois saltos de satélite.

A Figura 4.2 mostra um exemplo de rede de acesso *mesh* IEEE 802.11 conectada via um enlace de satélite. O *backbone mesh* de acesso é composto por roteadores sem fio estáticos, equipados com um ponto de acesso atuando como concentrador de tráfego, fornecendo conectividade para os dispositivos móveis dos usuários dentro de sua área de cobertura. No exemplo da Figura 4.2 o roteador mais próximo do terminal VSAT agrega a funcionalidade de *gateway* para a rede de transporte via satélite. Todos os recursos de rede necessários, como servidores, autenticadores VoIP e os *gateways* de acesso à rede de telefonia fixa, são acessíveis através do enlace de satélite.

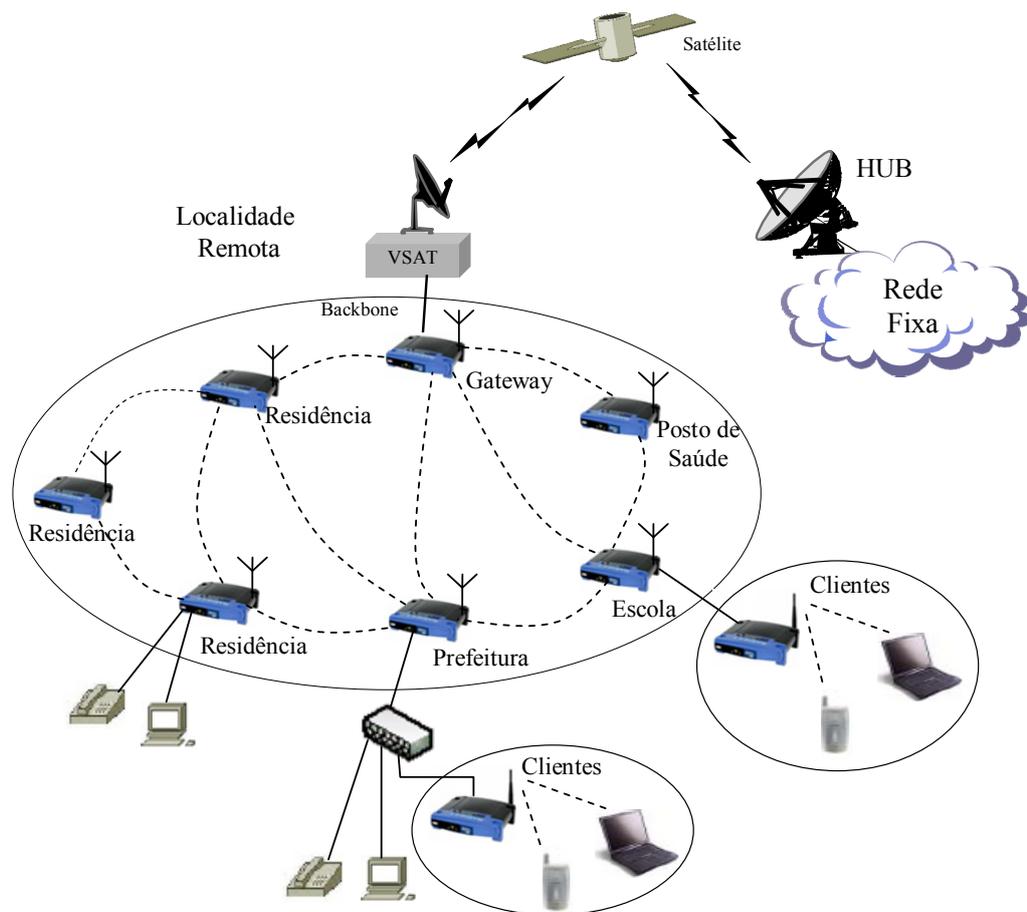


Figura 4.2: Topologia Utilizando Redes *Mesh* com Enlace Satélite

Cada cliente (residência, escola, posto de saúde, etc.) possui um roteador sem fio IEEE 802.11 que faz parte do *backbone mesh*. Os dispositivos desses clientes são conectados a um roteador do *backbone* através de uma interface *Ethernet* padrão. Os pontos de acesso dos clientes são ajustados para utilizar um canal diferente do canal utilizado pelo *backbone mesh*, de forma a produzir a mínima interferência possível.

4.3. Medidas no Enlace de Satélite

Com o objetivo de avaliar o impacto causado pelo enlace de satélite na rede de acesso remota, foram efetuadas medidas práticas na rede de satélite utilizada no PGMU [3]. Foram utilizados dois terminais VSAT modelo *Nera Satlink 1000* [50] em operação, conforme configuração mostrada na Figura 4.3. Para realização das medidas foi utilizado o software IPERF [51], versão 1.7.0, simulando tráfego de dados (VoIP e sinalização) entre os terminais VSAT. Também foi utilizado o software “PING” para medir o atraso médio da comunicação entre os terminais do *Nera SatLink 1000*.

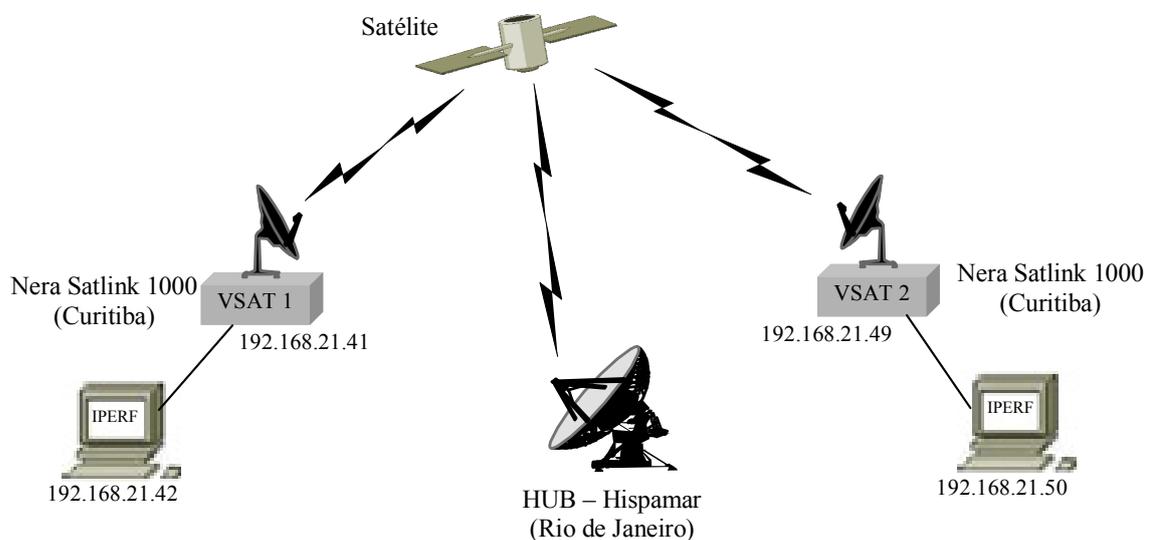


Figura 4.3: Medidas no Enlace de Satélite

Devido a HUB estar em um local diferente da localidade onde foram efetuados os testes, foi necessário efetuar as medidas entre dois terminais VSAT. Isso significa a utilização de dois saltos de satélite (VSAT1 -> HUB -> VSAT2) nas medidas, sendo que um salto foi

considerado como sendo a metade do valor medido para dois saltos. Isso não invalida os testes visto que os resultados em uma condição de um salto tendem a ser melhores. O atraso também foi considerado simétrico e calculado como sendo a metade do RTT (*Round-Trip Time*) medido, que representa o tempo de ida e volta no enlace.

A Tabela 4.1 mostra os resultados das medidas calculadas para um salto. Essas medidas são utilizadas como parâmetros para calcular as restrições que devem ser impostas na rede *mesh* de acesso. As medidas foram efetuadas em condições normais de clima e temperatura, sendo que condições climáticas adversas podem provocar desvanecimento do sinal e eventuais variações nos resultados.

Tabela 4.1: Resultado das medidas no enlace de Satélite

Medida	Média	Desvio padrão
Atraso	283 ms	16 ms
<i>Jitter</i>	6 ms	0,9 ms
Perda de pacotes	0,06 %	0,012 %

Os resultados pressupõem que o terminal VSAT possui capacidade suficiente para alocar e garantir banda para as chamadas VoIP requisitadas [50]. Questões relativas à configuração e ao gerenciamento de QoS na rede do satélite, não fazem parte do escopo desse estudo e devem ser tratadas separadamente. Métodos para melhorar o desempenho como o agrupamento de múltiplas chamadas, supressão do silêncio, compressão de cabeçalho IP entre outros podem trazer ganhos expressivos. Entretanto, também não fazem parte do escopo desse estudo.

4.4. Cálculo das Restrições Impostas pelo Enlace de Satélite

A análise dos resultados das medidas efetuadas no enlace de satélite, mostrados na Tabela 4.1, sugere um estudo mais aprofundado do impacto causado pelo atraso do enlace de satélite na rede *mesh* de acesso proposta nesse trabalho. Esse estudo visa avaliar qual é o atraso máximo aceitável na rede de acesso, que associado ao atraso imposto pelo satélite, seja possível efetuar chamadas VoIP com um nível de qualidade aceitável.

Para analisar esse impacto, utilizamos uma metodologia baseada no Modelo E, descrito na seção 3.3.

Para estimar o valor máximo do atraso que a rede *mesh* de acesso pode impor, algumas considerações e simplificações são necessárias. A Figura 4.4 mostra de maneira simplificada os componentes principais do sistema analisado. Note que possíveis atrasos relativos à rede PSTN foram desprezados.

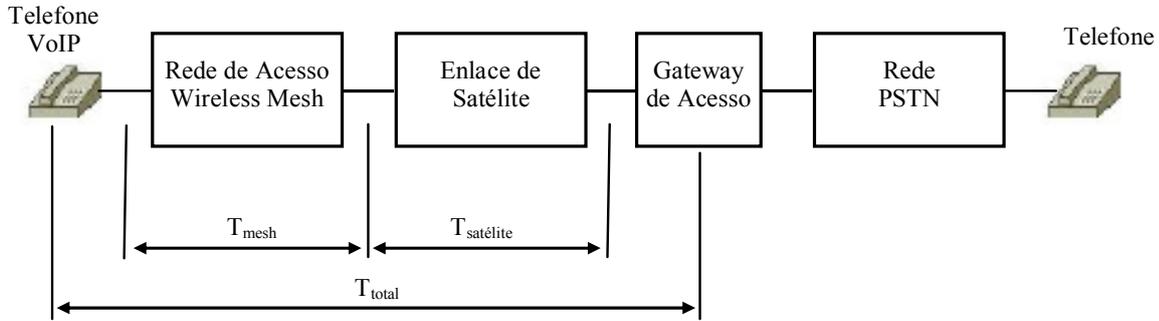


Figura 4.4: Modelo para cálculo do fator R

Pela análise da Figura 4.4 podemos concluir que o atraso da rede T_{rede} , definido na Expressão 3.4, pode ser expresso como a soma do atraso na rede *mesh* com o atraso no enlace de satélite:

$$T_{rede} = T_{satélite} + T_{mesh} \quad (4.1)$$

Substituindo a Expressão 4.1 na Expressão 3.4 temos:

$$T_a = T_{total} = T_{codec} + T_{buffer} + (T_{satélite} + T_{mesh}) \quad (4.2)$$

Na Expressão 4.2, são conhecidos os parâmetros T_{codec} que depende do *codec* utilizado, T_{buffer} que depende da implementação e $T_{satélite}$ que obtemos das medidas efetuadas no enlace de satélite mostrados na Tabela 4.1. Para calcular o atraso máximo na rede *mesh* (T_{mesh}) utilizamos a Expressão 3.8 para inferir o valor máximo de T_a que mantenha o valor do fator escalar R dentro de limites aceitáveis de qualidade. Neste estudo definimos que o nível mínimo de qualidade das chamadas VoIP possuem um MOS superior a 3,6. Assim pela Tabela 3.1, o valor do fator escalar R , dado pelo Modelo E, deve ser igual ou superior a 70.

A Figura 4.5 mostra a relação entre o fator escalar R e o atraso fim-a-fim (T_a). Para o cálculo foi considerado um *codec* G.729a e o tamanho do *buffer* de compensação de *jitter* igual a 60 ms. A taxa de perda de pacotes na rede foi definida como sendo a soma das perdas no enlace de satélite, obtido na Tabela 4.1, e a taxa de perdas na rede *mesh*, considerada igual a 1%. Esses parâmetros estão sumarizados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados no cálculo do fator R

Parâmetro	Valor
<i>Codec</i>	G.729a
Atraso do <i>codec</i> (T_{codec})	25 ms [52]
Tamanho total do <i>buffer</i> de compensação de <i>jitter</i>	60 ms
Atraso do <i>buffer</i> de compensação de <i>jitter</i> (T_{buffer})	30 ms [46]
Perda de pacotes ($e\%$)	1.06 %
Fator de vantagem (A)	20 (satélite)
Atraso do enlace de satélite ($T_{satélite}$)	283 ms (Tabela 1)

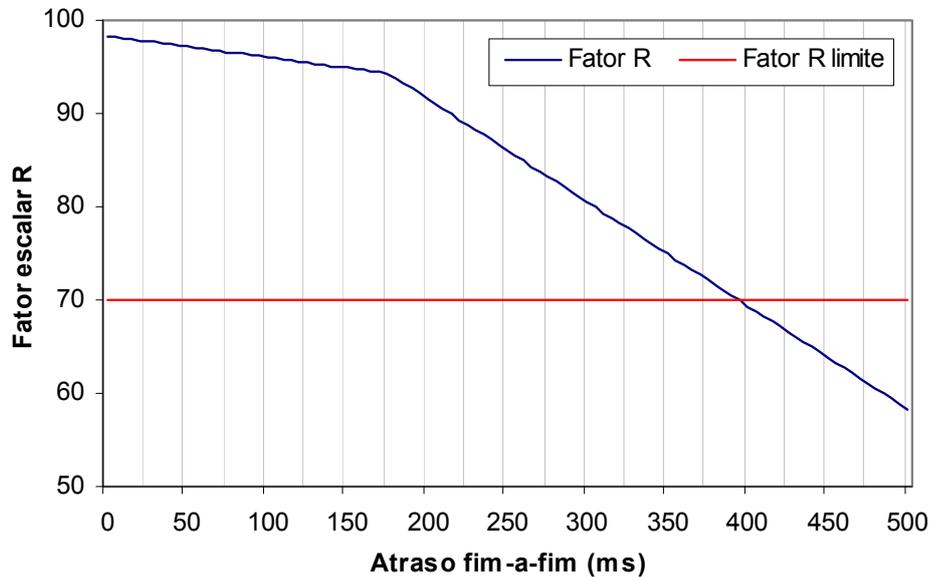


Figura 4.5: Fator escalar R versus atraso fim-a-fim (T_a)

Analisando a curva do gráfico mostrado na Figura 4.5, podemos observar que, para manter um padrão de qualidade de voz considerado satisfatório pela maioria dos usuários ($R \geq$

70), o valor máximo do atraso fim-a-fim (T_a) não deve ser superior a aproximadamente 395 ms.

Com base nesse resultado e nos valores definidos na Tabela 4.2, podemos, utilizando a Expressão 4.2, estimar o atraso máximo aceitável na rede *mesh* T_{mesh} :

$$\begin{aligned}
 T_a = T_{total} &= T_{codec} + T_{buffer} + (T_{satélite} + T_{mesh}) \\
 395 &= 25 + 30 + (283 + T_{mesh}) \\
 T_{mesh} &\cong 57ms
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Com base nesse resultado concluímos que para manter um padrão de qualidade de voz com MOS superior a 3.6, o atraso máximo estimado aceitável na rede *mesh* de acesso deve ser inferior a aproximadamente 57 ms.

Baseados nesse resultado, verificamos que, para ser viável a utilização das redes *mesh* como infraestrutura de acesso VoIP para localidades conectadas via enlace de satélite, estritos requisitos de QoS devem ser respeitados.

4.4.1. Considerações sobre os resultados

A análise dos resultados obtidos sugere algumas considerações. A primeira refere-se ao sistema DVB-RCS que necessita de dois saltos de satélite para interconexão de duas localidades remotas [49]. Nesse caso o atraso de rede assume valores bastante elevados. Considerando-se as medidas efetuadas no enlace de satélite descritas na seção 4.3, obtemos um atraso médio, para dois saltos, de aproximadamente 566 ms. Utilizando-se a Expressão 3.8 para o cálculo do fator escalar R e considerando-se os demais valores iguais aos da Tabela 4.2, obtemos o fator R aproximadamente igual a 45. Com isso concluímos que, sem considerar o atraso da rede de acesso, a qualidade de uma chamada VoIP através de um enlace de satélite de dois saltos, baseado nos parâmetros da Tabela 4.2, fica comprometida. Nesse estudo, assumimos a utilização de apenas um salto de satélite para conexão da rede *mesh* de acesso.

A segunda consideração refere-se aos parâmetros de perdas de pacotes, tipo de *codec* e tamanho do *buffer* de compensação de *jitter*, utilizados nos cálculos mostrados na Tabela 4.2. Pela análise da Expressão 3.8 observamos que esses parâmetros têm uma influência

significativa no cálculo do fator escalar R e, conseqüentemente, no resultado final obtido. Os valores foram definidos com base em valores padrões utilizados para o *codec G.729a*, amplamente empregado no mercado. Entretanto, esses parâmetros podem variar com o tipo de implementação, sendo objeto de vários estudos científicos encontrados na literatura, não fazendo parte do escopo deste trabalho.

Na próxima seção verificamos através de simulações que se mantendo o canal sem fio abaixo do nível de saturação, o requisito de atraso máximo aceitável estimado para a rede *mesh* é satisfeito.

4.5. Atraso na Rede *Mesh* de Acesso

Em redes sem fio CSMA 802.11, a vazão cai drasticamente assim que o canal atinge o ponto de saturação [53]. Para manter níveis aceitáveis de perda e atraso, o canal sem fio deve ser mantido abaixo do ponto de saturação. Com o objetivo de verificar o comportamento do canal sem fio e estimar o atraso e perdas na rede *mesh* de acesso, foram realizadas simulações, utilizando o simulador NS-2 [54].

4.5.1. Configuração de Simulação

O objetivo dessa simulação é verificar o atraso médio imposto pela rede *mesh* de acesso, mantendo-se o canal sem fio abaixo do nível de saturação. Na primeira etapa da simulação utilizamos a configuração mostrada na Figura 4.6. Os fluxos foram configurados para *CBR*, com o tamanho dos pacotes igual a 64 bytes e taxa de 50 pacotes por segundo, o que representa aproximadamente um fluxo VoIP com *codec G.729* sem supressão de silêncio.

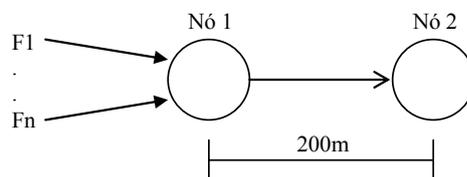


Figura 4.6: Topologia utilizada na simulação para um salto.

O NS-2 foi alterado para suportar roteamento estático, eliminando-se assim o *overhead* causado pelo descobrimento e manutenção das rotas. O alcance de transmissão foi

configurado para 250 metros e o alcance de detecção de portadora para 550 metros, com RTS/CTS habilitado. Os demais parâmetros foram configurados para o padrão IEEE 802.11b.

4.5.2. Resultados das Simulações

Em uma primeira simulação verificamos o limite de fluxos admitidos por um nó até atingir o limite de capacidade do canal. Os fluxos foram sendo admitidos seqüencialmente até o canal atingir o limite de saturação. Na seqüência os fluxos são sequencialmente retirados. O gráfico da Figura 4.7 mostra o *throughput* medido no nó dois da Figura 4.6. Note que o *throughput* máximo para um salto com o tráfego mostrado acima fica aproximadamente igual 317 Kbps, capacidade limite do canal para o padrão de tráfego especificado.

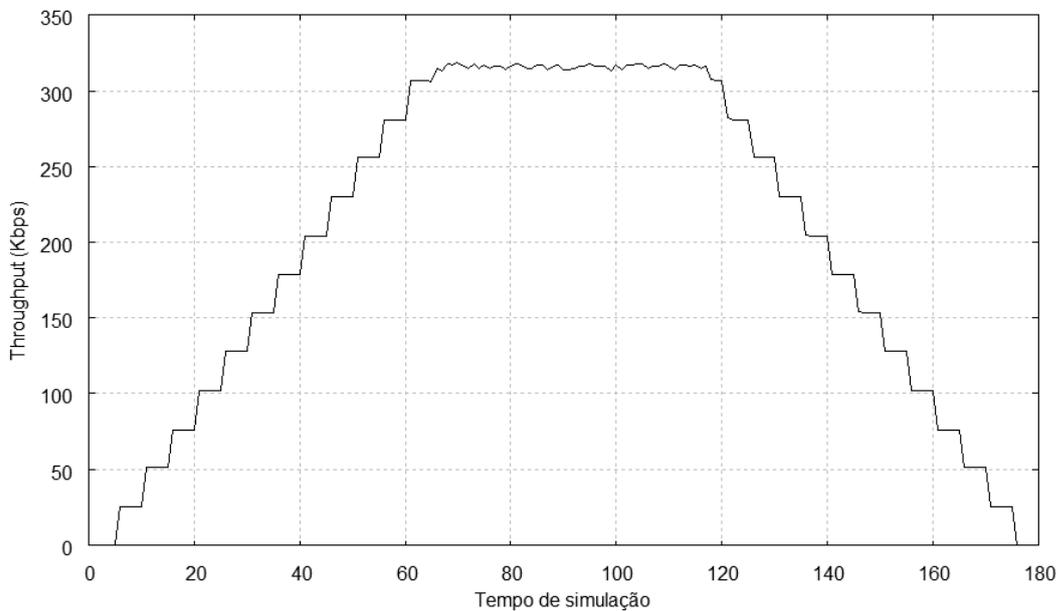


Figura 4.7: *Throughput* para 13 fluxos no padrão 802.11b com RTS/CTS.

O gráfico da Figura 4.8 mostra o atraso medido nas mesmas condições. Note que assim que o fluxo 13 entra na rede, o atraso médio cresce drasticamente para valores acima de 70 ms, o qual já supera o valor máximo aceitável na rede *mesh*, calculado pela Expressão 4.3. Comportamento similar ocorre com a perda de pacotes e com o *jitter*. Esse comportamento se deve ao fato de que a capacidade nominal máxima do canal foi excedida e a rede entrou em saturação.

Através da Expressão 3.8, podemos calcular o fator escalar R considerando-se também as perdas.

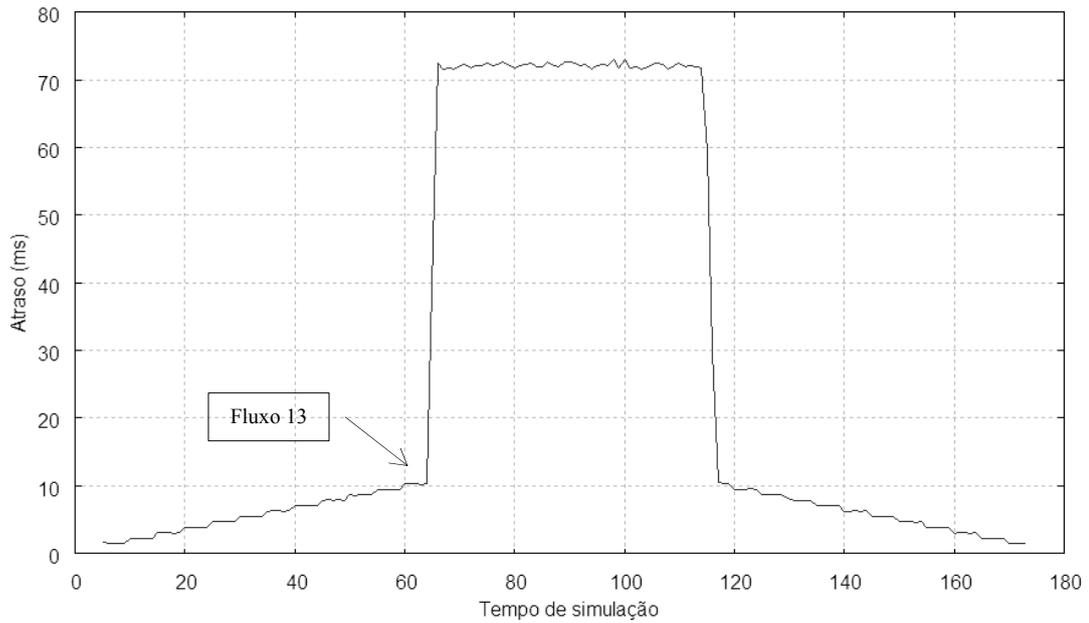


Figura 4.8 : Simulação do atraso médio.

Considerando-se os parâmetros do *codec* conforme os mostrados na Tabela 4.2 e os valores medidos no enlace de satélite mostrados na Tabela 4.1, temos:

$$T_a = T_{\text{codec}} + T_{\text{buffer}} + T_{\text{rede}} = 25 + 30 + (11 + 283) = 349$$

$$e\% = e_{\text{mesh}} + e_{\text{sat}} = 0.2 + 0.06 = 0.26$$

$$A = 20$$

Substituindo-se esses valores na Expressão 3.8 obtemos o fator escalar $R \approx 78$, o qual fica acima do valor mínimo requerido para se obter uma qualidade de voz aceitável, igual a 70.

Na seqüência, são efetuadas simulações para avaliar o atraso, a perdas e o número de fluxos admitidos em configurações de múltiplos saltos, nas mesmas condições da simulação anterior.

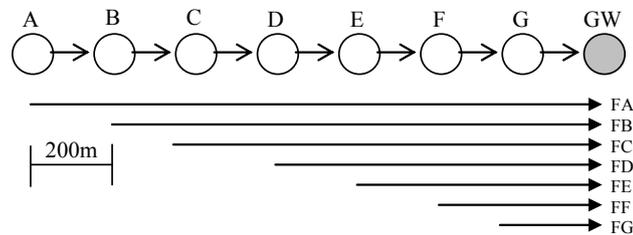


Figura 4.9: Topologia utilizada na simulação.

A configuração utilizada na simulação é mostrada na Figura 4.9, onde, para simulação de dois saltos, os fluxos foram injetados no nó F, para três saltos no nó E e assim sucessivamente. Para cada simulação, o número de fluxos é incrementado seqüencialmente até se obter a saturação, sendo computado nos resultados o número de fluxos suportados antes de atingir a saturação. Os resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Simulação para vários saltos.

Número de Saltos	Vazão máx (Kbps)	Atraso (ms)	Perdas (%)	Jitter (ms)	Número de Fluxos
1	317	10.3	0.2	2.9	12
2	153	13.5	0.4	5.3	6
3	107	12.9	0.5	6.2	4
4	78	14.1	0.6	7.3	3
5	70	13.9	0.5	5.6	2
6	64	15.1	0.8	6.2	2
7	62	16.7	0.9	6.5	2

No trabalho apresentado por Bicket *et al.* [55] são apresentados resultados de medidas efetuadas na rede *mesh* do projeto *Roofnet* [21], conforme mostrado na Tabela 4.4. A rede do projeto *Roofnet* utilizada nas medidas opera no padrão 802.11b com configuração similar à utilizada nas simulações com uma condição de carga abaixo do nível de saturação.

Tabela 4.4: Medida do atraso na rede do projeto *Roofnet* [55]

Número de saltos	Atraso (ms)
1	9
2	19
3	27
4	43
5	39
média = 2.3	média = 22

Comparando-se os valores mostrados na Tabela 4.3 com os mostrados na Tabela 4.4, verificamos que os valores medidos na rede do projeto *Roofnet* são proporcionalmente maiores que os obtidos nas simulações. Isso se deve ao fato da rede do projeto *Roofnet* estar instalada em um ambiente urbano mais suscetível à interferência e ao *overhead* causado pelo protocolo de roteamento, não considerado nas simulações. Entretanto, observamos que para

um diâmetro de rede de até cinco saltos os valores em ambas as tabelas permanecem abaixo do valor máximo de atraso aceitável, de 57 ms, na rede *mesh* de acesso.

4.6. Viabilidade da solução

Com base nesses resultados, verificamos que para uma condição de diâmetro da rede de até cinco saltos os níveis de atraso e perdas observados ficam dentro dos parâmetros compatíveis com um fator escalar $R > 70$. Esses resultados demonstram que controlando-se a admissão de fluxos de forma a não saturar a rede, os valores do atraso, *jitter* e perda de pacotes são mantidos em valores toleráveis que viabilizam a utilização da arquitetura via satélite utilizando redes *mesh* como infra-estrutura de acesso para VoIP.

Entretanto, manter o canal abaixo do nível de congestionamento não é uma tarefa fácil. Devido à natureza compartilhada do meio, as transmissões sem fio consomem banda de todos os nós dentro da área de alcance de detecção de portadora do nó que está transmitindo, mesmo que esses nós não consigam se comunicar diretamente. Para assegurar isso, os nós precisam passivamente determinar a utilização da rede e conseqüentemente a quantidade de banda disponível. Com isso, os nós podem então adaptar seus tráfegos de forma a manter o canal abaixo do nível de congestionamento.

No próximo capítulo, é proposto um mecanismo de controle de admissão para a rede *mesh* de acesso que tem como objetivo limitar o número de fluxos VoIP na rede de forma manter o canal sem fio abaixo do nível de saturação.

Capítulo 5

Mecanismo de Controle de Admissão Proposto

5.1. Introdução

No capítulo anterior verificamos que se mantendo o canal sem fio, na rede *mesh* de acesso, abaixo do nível de saturação, o atraso imposto pela rede *mesh* fica dentro do limite máximo aceitável de 57 ms estimado.

Neste capítulo é proposto um controle de admissão centralizado para a rede *mesh* de acesso. Nosso objetivo é controlar a quantidade de tráfego na rede *mesh* de forma que o canal sem fio permaneça abaixo do nível de saturação.

5.2. Definições

Nesta subseção, são mostradas várias definições utilizadas no mecanismo de controle de admissão proposto neste trabalho.

Conforme mostramos na seção 2.4, devido à natureza compartilhada do meio, as transmissões sem fio, nas redes IEEE 802.11, consomem banda de todos os nós dentro da área de alcance de detecção de portadora do nó que está transmitindo. Considere o exemplo mostrado na Figura 5.1, quando o nó 1 transmite para o nó 2, os demais nós dentro do seu alcance de transmissão (nós 2 e 3) e dentro do seu alcance de detecção de portadora (nós 4, 5, 6 e 7) não podem transmitir simultaneamente. Isso faz com que a capacidade da rede fique limitada.

O alcance de transmissão pode ser definido como a distância na qual os pacotes recebidos referentes à transmissão de um outro nó podem ser decodificados. Enquanto que o

alcance de detecção de portadora (*Carrier Sensing Range - CSN*) pode ser definido como a distância na qual um nó é capaz de detectar a transmissão de outro nó, porém não consegue decodificar os pacotes recebidos. Yang e Kravets [32] demonstram em detalhes o efeito da detecção de portadora na estimativa de recurso disponíveis em uma rede IEEE 802.11.

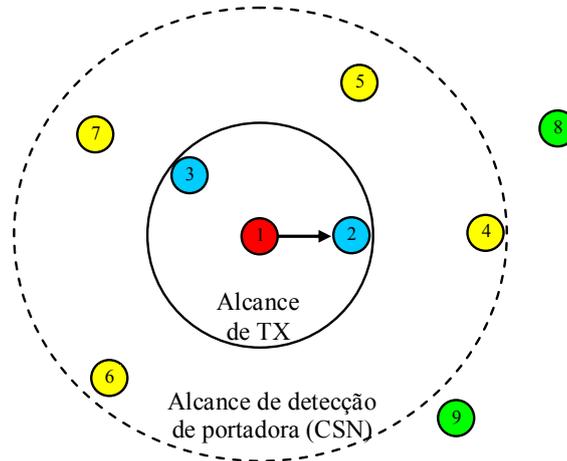


Figura 5.1: Alcance de transmissão e de detecção de portadora

Outro fator importante a ser considerado, na estimativa de recurso disponíveis, é a chamada interferência intra-fluxo (*intra-flow contention*). Yang e Kavets [32] definem a interferência intra-fluxo como sendo a interferência causada entre nós que encaminham pacotes pertencentes a um mesmo fluxo em uma comunicação de múltiplos saltos. Como a área de alcance de detecção de portadora é maior que a área de alcance de transmissão, um nó da cadeia de encaminhamento terá os seus recursos divididos pelo número de nós que pertencem à cadeia de encaminhamento situados dentro do seu alcance de detecção de portadora.

Para exemplificar, suponha um fluxo entre os nós 2 e 10, conforme mostrado na Figura 5.2. Tomando-se como exemplo o nó 5, que está dentro do alcance de transmissão dos nós 3 e 6 e dentro do CSN dos nós 2 e 8, ele não pode efetuar transmissões simultâneas com os nós 2, 3, 6 e 8, tendo desta forma seus recursos reduzidos em 5 vezes, considerando que ele também precisa encaminhar os pacotes. Yang e Kravets [32] definem esse valor como contagem de contenção (*Contention Count – CC*).

A banda efetiva consumida por um fluxo em cada nó é CC vezes a banda requisitada pela aplicação. Isso faz com que a interferência intra-fluxo gere um impacto significativo no

consumo de banda do fluxo, sendo seu cálculo importante para um correto controle de admissão.

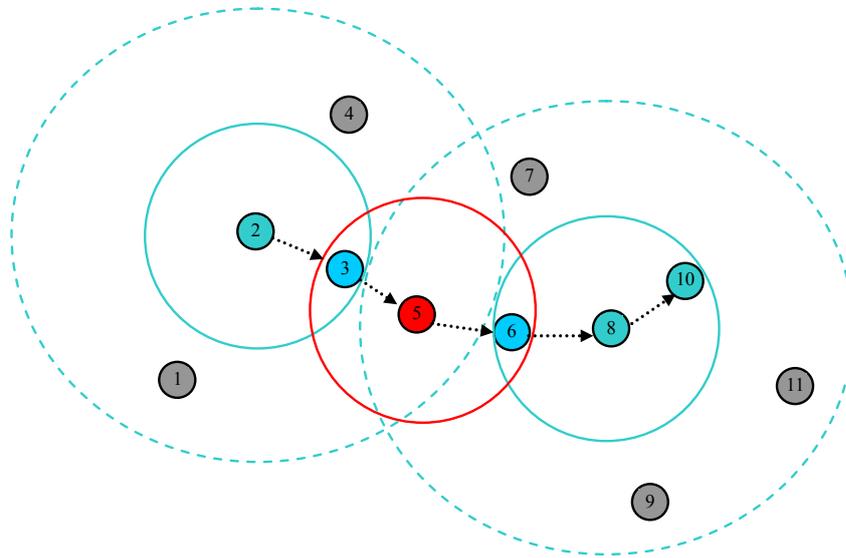


Figura 5.2: Interferência intra-fluxo

A estimativa da banda local disponível em cada nó da rede é baseada no chamado tempo de ocupado do canal (T_o). O tempo de ocupado do canal é uma medida direta da utilização do canal pela monitoração passiva da atividade do meio, utilizando-se da detecção física da portadora [32, 33].

O mecanismo proposto em [32] monitora passivamente a quantidade de tempo que o canal é percebido como ocupado durante um determinado intervalo de tempo. O tempo de ocupado inclui o tempo gasto em transmissão (T_{tx}), em recepção (T_{rx}) e detecção de portadora (T_{cs}).

$$T_o = T_{tx} + T_{rx} + T_{cs} \quad (5.1)$$

Considerando o intervalo de tempo igual a um segundo, podemos definir o tempo livre do canal (T_L) como:

$$T_L = 1 - T_o \quad (5.2)$$

Se o nó detecta uma portadora, ele percebe que o canal está ocupado, entretanto não consegue decodificar os pacotes. Pela medida da quantidade de tempo que o canal é percebido como transmitindo, recebendo ou detectando portadora, um nó pode determinar não somente

as transmissões que ocorrem dentro de sua área de recepção, mas também dentro de sua área de detecção de portadora.

5.3. Mecanismo de Controle de Admissão

O Controle de Admissão permite que novos fluxos VoIP entrem na rede somente se a largura de banda disponível for maior que a requerida pelo novo fluxo a ser admitido. Assim, a decisão de admissão requer uma estimativa da largura de banda disponível na rede e uma estimativa da largura de banda requerida pelo novo fluxo a ser admitido. Na rede, o controle de admissão deve assegurar uma largura de banda disponível em toda a rota a ser percorrida pelo fluxo, visto que a largura de banda pode ser diferente em cada link da rota.

No controle de admissão proposto, o objetivo é controlar a quantidade de fluxos VoIP na rede *mesh* de acesso, de forma que o canal sem fio fique abaixo do limite de saturação. Conforme verificamos no Capítulo 4, mantendo-se o canal sem fio abaixo do limite de saturação, as restrições impostas pelo enlace de satélite são satisfeitas.

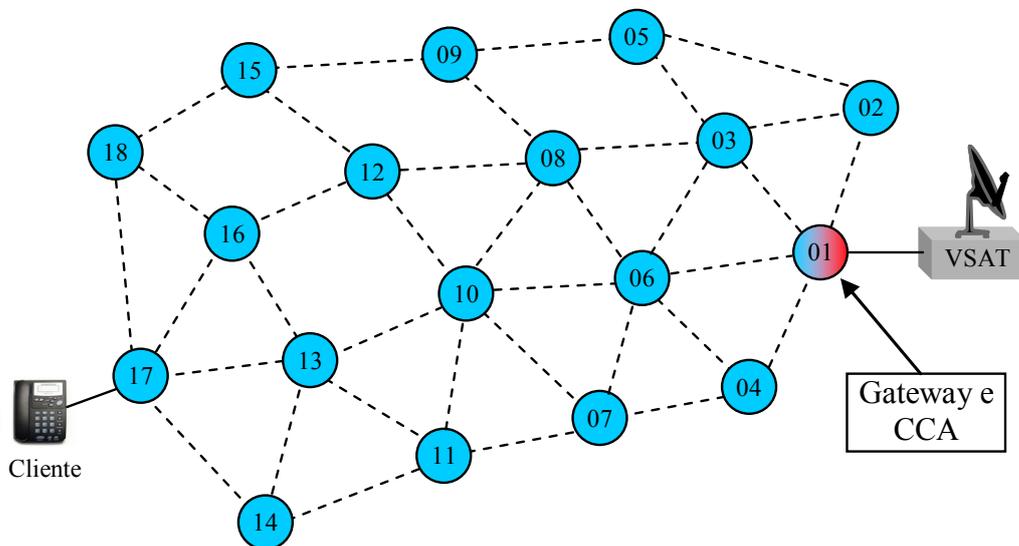


Figura 5.3: Elementos do Controle de Admissão

No exemplo da Figura 5.3, são mostrados os elementos que compõem o controle de admissão proposto. O Controle Central de Admissão (CCA) tem como função executar o algoritmo de controle de admissão proposto. Todo cliente que necessita efetuar uma chamada VoIP, envia uma mensagem de requisição para o CCA. Cada nó da rede fornece ao CCA

informações relativas ao tempo de ocupado e a taxa de transmissão dos *links*, os quais são usados como parâmetros de entrada para o algoritmo de controle de admissão. O CCA pode estar localizado em qualquer nó a rede.

O *gateway* (GW) é utilizado para interligar a rede *mesh* de acesso à rede do satélite. No exemplo, o nó 1 acumula também as funcionalidades do CCA e do GW.

Os Clientes se conectam aos roteadores/nós do *backbone mesh* via cabo *Ethernet*. Isso garante que o canal sem fio seja compartilhado apenas pelos roteadores do *backbone mesh*.

Dada uma requisição de um cliente, o objetivo do CCA é tomar uma decisão de controle de admissão do tipo aceita ou rejeita, determinando o melhor caminho entre a origem e o destino do fluxo.

Supondo B_{user} ser a banda requisitada pelo cliente, então a decisão do controle de admissão será de aceitar o fluxo se o algoritmo encontrar uma rota entre a origem e o destino que, para cada nó da rota encontrada, a seguinte condição seja satisfeita:

$$B_{user} < B_{avl} * p \quad (5.3)$$

ou seja, a banda requisitada pelo cliente (B_{user}) deve ser menor que a banda mínima disponível em cada nó da rota e seus vizinhos (B_{avl}), multiplicada por um fator de utilização (p) pré-definido. O fator de utilização p é um valor entre zero e um, usado como margem de segurança, tornando o esquema proposto mais conservativo. B_{avl} é calculado como sendo a menor banda disponível no nó e em todos os nós vizinhos dentro da área de detecção de portadora.

Se a condição acima não for satisfeita, significa que a rede não tem recursos suficientes disponíveis para suportar o novo fluxo e que a requisição será rejeitada.

Para decidir se existe uma rota com recursos disponíveis, o controle central deve estar a par da topologia da rede, da taxa de cada link e de qualquer mudança que eventualmente ocorra na topologia da rede, como a adição ou exclusão de determinados nós.

O mecanismo proposto assume que a topologia da rede e a área de interferência de cada nó são previamente conhecidas e configuradas numa tabela no CCA. Isso pode ser assumido visto que, na arquitetura proposta, o *backbone mesh* serve como infraestrutura estática de acesso para os clientes. O inconveniente desse tipo de concepção está no fato de que quando um novo cliente/nó for admitido, a tabela do CCA precisa ser atualizada. A

definição da topologia da rede *mesh* e o levantamento da área de interferência de cada nó é tema de vários estudos [13, 56], não fazendo parte do escopo desse trabalho.

No exemplo da Figura 5.3, supondo que o alcance de transmissão de cada nó seja igual a um salto e que o alcance de detecção de portadora (*CSN*) seja de dois saltos, a topologia da rede seria configurada no CCA conforme mostrado na Tabela 5.1. O valor dois, na tabela, indica que o nó está dentro da área de transmissão. Um valor maior que zero e menor ou igual a um indica que o nó está dentro da área de detecção de portadora. O valor um significa que o nó interfere 100% e o valor zero indica que o nó está fora da região de detecção de portadora (*CSN*).

Tabela 5.1: Topologia da Rede da Figura 5.3 Configurada no CCA

Nó	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1	2	2	2	1	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1	2	1	2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
4	2	1	1	1	0	2	2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	1	2	2	0	1	1	0	1	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	1	0	0	0	0	0
7	1	0	1	2	0	2	1	1	0	2	2	1	1	1	0	0	0	0
8	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	0	1	1	0	0
9	0	1	1	0	2	1	0	2	1	1	0	1	0	0	2	0	0	1
10	1	0	1	1	0	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	0
11	0	0	0	1	0	1	2	1	0	2	1	1	2	2	0	1	1	0
12	0	0	1	0	0	1	1	2	1	2	1	1	1	0	2	2	1	1
13	0	0	0	0	0	1	1	1	0	2	2	1	1	2	0	2	2	1
14	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	2	1	0	1	2	1
15	0	0	0	0	1	0	0	1	2	1	0	2	0	0	1	1	1	2
16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	2	2	1	1	1	2	2
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	1	2	1	2
18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	2	2	2	1

Uma segunda tabela, no CCA, mantém as informações do tempo de ocupado do canal e da taxa do link de cada nó da rede. O tempo de ocupado é armazenado na diagonal principal. Os valores dessa tabela são atualizados periodicamente através de mensagens enviadas pelos nós ao controle central. Essas mensagens são enviadas através das rotas de controle previamente configuradas.

O mecanismo proposto compreende a estimativa dos recursos que o novo fluxo requisitado pelo cliente vai consumir, a estimativa dos recursos disponíveis em cada nó da rede, o cálculo da interferência intra-fluxo e a determinação da rota a ser seguida pelo fluxo.

5.3.1. Estimativa dos Recursos Consumidos pelo Novo Fluxo

Ao receber a requisição de um novo fluxo, o controle central faz uma estimativa do tempo que será consumido por esse fluxo em um intervalo de um segundo. A estimativa é feita com base no cálculo da capacidade teórica máxima do canal tendo como parâmetros: o tamanho dos pacotes, a taxa de envio e a taxa do link. Esses parâmetros são fornecidos na mensagem de requisição de recursos, enviada pelo cliente ao CCA.

Para o cálculo da capacidade teórica máxima do canal, utilizamos como base os trabalhos apresentados por Jun *et al.* [13, 57], onde é feito um estudo das camadas físicas e de acesso ao meio (MAC) do padrão IEEE 802.11. Nesse estudo é derivada uma expressão para o cálculo da capacidade teórica máxima do canal (*Theoretical Maximum Throughput - TMT*) na ausência de erros e perdas:

$$TMT = \frac{8 * (ps + 14)}{T_{pc}} \quad (5.4)$$

onde, ps representa o tamanho do pacote IP da aplicação em bytes e T_{pc} o tempo total gasto para a transmissão do pacote de dados. A Expressão 5.5 é utilizada para calcular o tempo total gasto para a transmissão de um pacote de dados nos esquemas de acesso ao meio CSMA/CA e CSMA/CA com RTS/CTS definidos no padrão IEEE 802.11.

$$\begin{aligned} T_{pc[csma_ca]} &= T_{sifs} + T_{ack} + T_{difs} + T_{bo} + T_{plcp} + T_{data} \\ T_{pc[rst_cts]} &= T_{rts} + T_{cts} + 3 * T_{sifs} + T_{ack} + T_{difs} + T_{bo} + T_{plcp} + T_{data} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Os parâmetros utilizados na Expressão 5.5 são apresentados na Tabela 5.2, onde $MSDU$ representa o tamanho do pacote da aplicação, incluindo MAC mais IP, em bytes. Tomando-se como exemplo o padrão IEEE 802.11b utilizando RTS/CTS, o tempo, em segundos, para transmissão de um pacote de dados pode ser expresso como:

$$T_{packet[rst_cts]} = \left(1542 + \frac{8 * (ps + 48)}{ldr} \right) * \frac{1}{1000000} \quad (5.6)$$

onde, ps representa o tamanho do pacote IP da aplicação em bytes e ldr representa a taxa do link em Mbps. Note que o 14 bytes referentes ao MAC da aplicação já foram adicionados na expressão.

Considerando-se uma taxa de geração de pacotes (pdr), o tempo gasto pelo fluxo no intervalo de 1 segundo, para o padrão IEEE 802.11b com RTS/CTS, pode ser expresso como:

$$T_{fluxo[rts_cts]} = \left(1542 + \frac{8 * (ps + 48)}{ldr} \right) * \frac{pdr}{1000000} \quad (5.7)$$

onde, pdr é a taxa de geração de dados em pacotes por segundo.

Tabela 5.2: Parâmetros para o cálculo do tempo teórico consumido pelo fluxo [57]

Esquema de acesso ao meio	Esquema de espalhamento espectral	Parâmetros (10^{-6} s)							
		T _{DIFS}	T _{SIFS}	T _{BO}	T _{RTS}	T _{CTS}	T _{ACK}	T _{PLCP}	T _{DATA}
CSMA/CA	FHSS-1	128	28	375	N/A	N/A	240	128	33/32 x 8 x (34 + MSDU)/1
	FHSS-2	128	28	375	N/A	N/A	240	128	33/32 x 8 x (34 + MSDU)/2
	DSSS-1	50	10	310	N/A	N/A	304	192	8 x (34 + MSDU)/1
	DSSS-2	50	10	310	N/A	N/A	304	192	8 x (34 + MSDU)/2
	HR-5.5	50	10	310	N/A	N/A	304	192	8 x (34 + MSDU)/5.5
	HR-11	50	10	310	N/A	N/A	304	192	8 x (34 + MSDU)/11
	OFDM-6	34	9	67.5	N/A	N/A	44	20	4 x [(16 + 6 + 8 x (34 + MSDU))/24]
	OFDM-12	34	9	67.5	N/A	N/A	32	20	4 x [(16 + 6 + 8 x (34 + MSDU))/38]
	OFDM-24	34	9	67.5	N/A	N/A	28	20	4 x [(16 + 6 + 8 x (34 + MSDU))/96]
OFDM-54	34	9	67.5	N/A	N/A	24	20	4 x [(16 + 6 + 8 x (34 + MSDU))/216]	
RTS/CTS	FHSS-1	128	28	375	288	240	240	128	33/32 x 8 x (34 + MSDU)/1
	FHSS-2	128	28	375	288	240	240	128	33/32 x 8 x (34 + MSDU)/2
	DSSS-1	50	10	310	352	304	304	192	8 x (34 + MSDU)/1
	DSSS-2	50	10	310	352	304	304	192	8 x (34 + MSDU)/2
	HR-5.5	50	10	310	352	304	304	192	8 x (34 + MSDU)/5.5
	HR-11	50	10	310	352	304	304	192	8 x (34 + MSDU)/11
	OFDM-6	34	9	67.5	52	44	44	20	4 x [(16 + 6 + 8 x (34 + MSDU))/24]
	OFDM-12	34	9	67.5	36	32	32	20	4 x [(16 + 6 + 8 x (34 + MSDU))/38]
	OFDM-24	34	9	67.5	28	28	28	20	4 x [(16 + 6 + 8 x (34 + MSDU))/96]
OFDM-54	34	9	67.5	24	24	24	20	4 x [(16 + 6 + 8 x (34 + MSDU))/216]	

Como base na Expressão 5.7, o controle de admissão estima a quantidade de recursos que o fluxo requisitado pelo cliente vai consumir.

Por exemplo, para um fluxo VoIP com taxa de 50 pacotes por segundo, tamanho do pacote de 64 bytes e taxa do link de 11 Mbps, o tempo gasto pelo fluxo, dado pela Expressão 5.7 é igual a 0,081 segundos.

5.3.2. Estimativa dos Recursos Disponíveis

As medidas mais comuns utilizadas para avaliar a utilização de uma rede sem fio são baseadas no comprimento de fila, número de colisões, janela de utilização da camada MAC, atraso e tempo de ocupado do canal. As medidas de comprimento de fila, número de colisões e janela de utilização da camada MAC fornecem informações relevantes somente se a rede estiver congestionada [33], assim estes métodos não podem ser utilizados para estimar com nível suficiente de precisão a utilização da rede. O atraso é um dos métodos mais utilizados, entretanto, para redes sem fio onde a banda é limitada, a principal desvantagem é o *overhead* causado, uma vez que para se obter uma média confiável é necessário repetir várias vezes a medida.

Com base na medida do tempo livre percebido pelo canal (T_L) e na taxa de transmissão do link, é possível estimar a banda disponível percebida pelo nó:

$$B_{local} = T_L * CapacidadeCanal \quad (5.8)$$

onde, *CapacidadeCanal*, pode ser entendido como a taxa de transmissão do link utilizado pelo nó.

Visto que cada nó percebe o estado do canal de maneira diferente, a banda disponível na rede não é simplesmente um conceito local. Os autores em [32] introduzem o conceito de banda disponível local e banda disponível na vizinhança. A banda disponível na vizinhança é definida como sendo a banda máxima que um nó pode usar para transmitir sem deteriorar a banda reservada de nenhum fluxo em sua área de detecção de portadora.

A banda disponível local é a banda não consumida observada pelo nó. Visto que o nó pode consumir banda dos nós que estão dentro de sua área de detecção de portadora, a banda disponível na vizinhança de um determinado nó é dada como sendo a menor banda local disponível entre todos os nós dentro de sua área de detecção de portadora (B_{avl}). Ou seja, para admitir um novo fluxo, um nó deve ter banda disponível local e na vizinhança.

Para saber a banda local disponível em cada nó da vizinhança o nó precisa constantemente trocar informações com os nós dentro de sua área de detecção de portadora. Entretanto, nós que estão dentro da área de detecção de portadora uns dos outros podem não conseguir se comunicar diretamente. No mecanismo proposto por Yang e Kravets [32] são utilizadas duas abordagens para coordenar a troca de informações de banda entre os nós que estão dentro da área de detecção de portadora. O primeiro método envia mensagens de

requisição de banda usando um limitador de contagem de saltos. Entretanto os autores concordam que esse método não funciona adequadamente em cenários de rede onde um nó dentro da área de detecção de portadora não é alcançável via nenhum caminho. A segunda abordagem utiliza mensagens de requisição de banda enviadas com uma potência de transmissão maior. Todavia, esse tipo de metodologia requer dispositivos que não tem implementação comercial de custo acessível. Também o aumento na potência de transmissão causa um impacto em uma área maior na rede aumentando o número de colisões.

Diferentemente da abordagem utilizada em [32], onde o controle de admissão é feito em cada nó da rota, no mecanismo proposto utilizamos um controle central de admissão onde a informação do tempo de ocupado percebida por cada nó é enviada periodicamente ao controle central de admissão através de mensagens de controle. Além do tempo de ocupado essas mensagens também informam a taxa de transmissão do link. Essas mensagens são utilizadas, também, como mensagens de *keep alive* indicando que o nó está ativo. Na ausência de três mensagens consecutivas o CCA considera que o nó em questão está fora de serviço, não sendo mais considerado para o cálculo de novas rotas.

Com base na informação do tempo de ocupado fornecido por cada nó e na topologia e área de detecção de portadora, o controle central pode estimar a banda disponível em um determinado nó da rede considerando também os seus vizinhos dentro da área de detecção de portadora (B_{avl}):

$$B_{avl}(i) = \min(B_{local}(i), B_{local}(j)) \quad (5.9)$$

para todo o nó j dentro da área de detecção de portadora do nó i .

Como isso é possível avaliar a banda disponível em cada nó da rede de forma a não impactar em outros fluxos já existentes.

É necessário balancear os prós e contras entre a precisão para o controle central estimar as condições atuais da rede e o *overhead* causado por mensagens adicionais de controle. Entretanto, considerando uma janela de tempo de um segundo utilizado para medida do tempo de ocupado e o mesmo intervalo de tempo para o envio das mensagens de controle para o CCA, o *overhead* causado na rede pelas mensagens de controle é muito baixo sendo negligenciado nos cálculos.

5.3.3. Determinação da Rota

O CCA mantém um grafo da topologia do *backbone mesh*. Esse grafo é criado a partir de informações da topologia da rede configuradas na tabela de topologia do CCA, conforme exemplo mostrado na Tabela 5.1. Esse grafo é constantemente atualizado pelas mensagens de *keep alive* enviadas pelos nós ao controle central.

Para verificar se existe uma rota entre a origem e o destino o controle central executa um algoritmo de busca baseado no algoritmo de *Dijkstra* (SPF), que verifica o caminho de menor custo entre a origem e o destino. Existem duas abordagens possíveis para verificação do custo, a primeira baseada no menor número de saltos e a segunda baseada na maior taxa do link. Caso exista um caminho, o CCA verifica se o caminho calculado tem recursos suficientes para admitir o fluxo requisitado e retorna para o nó solicitante a rota a ser percorrida e um identificador do fluxo admitido. A verificação dos recursos disponíveis na rota leva em consideração a interferência intra-fluxo, abordada na próxima seção.

Caso não haja recursos disponíveis na rota selecionada, o nó congestionado é desconsiderado e uma nova rota é calculada, sendo repetido o processo de verificação de recursos disponíveis para essa nova rota. No caso de não existir uma rota com recursos disponíveis, o CCA retorna uma mensagem informando ao cliente a falta de recursos.

5.3.4. Cálculo da Interferência Intra-Fluxo

Como vimos anteriormente, devido à natureza compartilhada do meio, as transmissões sem fio consomem banda de todos os nós dentro da área de alcance de detecção de portadora do nó que está transmitindo. Além disso, múltiplos nós ao longo do caminho de um fluxo podem estar dentro do alcance de detecção de portadora uns dos outros, causando a chamada interferência intra-fluxo, na qual um nó da cadeia de encaminhamento terá os seus recursos divididos pelo número de nós situados na cadeia de encaminhamento que estejam situados dentro do seu alcance de detecção de portadora.

Para calcular a interferência intra-fluxo, é necessário conhecer a interferência de cada nó (*Contention Count - CC*), conforme mostrado na seção 5.2. Como o CCA previamente conhece a topologia e a região de interferência de cada nó, ele consegue facilmente calcular o *CC* para cada nó afetado pelo fluxo na rota. O mecanismo proposto percorre cada nó da rota, calculando o *CC* para o nó e seus vizinhos dentro da região de detecção de portadora, conforme mostrado no pseudocódigo abaixo:

```

1. faça CC de todos os nós igual à zero
2. para j ← origem até (destino - 1), faça
3.   para i ← 0 até n, faça
4.     se nó(i) dentro da região de detecção de portadora do nó(j), faça
5.       CC(nó(i))++
6.     fim-se
7.   fim-para
8. fim-para

```

Note que o pseudocódigo assume que o próprio nó está dentro da área de detecção de portadora. Importante citar também que a região de interferência pode variar conforme a taxa de transmissão do link, entretanto essa taxa é informada juntamente com o tempo de ocupação ao CCA, permitindo que o mesmo assuma a região de interferência conforme a taxa do link.

5.4. Decisão de Admissão

Considere a topologia mostrada na Figura 5.3, supondo que o cliente conectado ao nó 17 deseja efetuar uma chamada VoIP para outro cliente fora da rede *mesh*. A seguinte seqüência de admissão da chamada será executada:

- O nó 17 envia uma mensagem para o CCA (nó 1) solicitando a admissão do novo fluxo. Essa mensagem é enviada por rotas de controle previamente configuradas. Nessa mensagem são informados a origem do fluxo, a taxa de geração de pacotes e o tamanho dos pacotes pertencente ao fluxo a ser admitido.
- Ao receber a requisição, o CCA executa um algoritmo de busca para encontrar uma rota entre a origem (nó 17) e o destino (nó 1 – GW).
- Na seqüência, com base nas informações recebidas na mensagem de requisição, o CCA faz uma estimativa dos recursos que serão consumidos pelo novo fluxo a ser admitido. Essa estimativa é feita com base no cálculo da fração de tempo consumida pelo fluxo dado pela Expressão 5.6.
- Em seguida o CCA percorre cada nó da rota e calcula o *CC* para todos os nós da rota e seus vizinhos dentro da área de alcance de detecção de portadora. Com base nas informações do tempo de ocupado do canal, no tempo gasto pelo

fluxo e no CC calculado, o controle central verifica se a rota calculada possui recursos suficientes para admitir o fluxo. O novo fluxo será admitido pela rota calculada se, para cada nó da rota e seus vizinhos dentro da região de detecção de portadora, a seguinte equação for satisfeita:

$$T_{fluxo} * CC(i) < T_L(i) * p \quad (5.10)$$

para todo o nó i , da rota e seus vizinhos, onde o CC calculado seja maior ou igual a um. O parâmetro p representa o fator de utilização.

- Caso a rota calculada possua recursos suficientes para admitir o novo fluxo o controle central faz uma pré-reserva desses recursos informando o nó requisitante a rota e o identificador do fluxo admitido. Caso a rota calculada não tenha recursos suficientes, o nó com recursos insuficientes é desconsiderado e uma nova rota é calculada. Caso nenhuma rota entre o cliente e o *gateway* possua recursos suficientes o controle central envia uma mensagem o nó solicitante informando a falta de recursos na rede.

O pseudocódigo abaixo mostra um resumo dos passos executados pelo CCA para admitir um novo fluxo.

1. nó solicita admissão de um novo fluxo (origem, taxa, tamanho)
2. algoritmo busca rota de menor custo entre origem e destino
3. se recursos disponíveis na rota, faça
 4. reserva recursos e retorna a rota e o id do fluxo admitido
 5. senão, faça
 6. se outra rota disponível, faça
 7. execute passo 3
 8. senão, faça
 9. retorna fluxo recusado
 10. fim-se
 11. fim-se

Sempre que uma chamada VoIP é terminada, o nó informa ao CCA o identificador do fluxo terminado. Esse procedimento permite que o CCA mantenha informações atualizadas de todos os fluxos ativos na rede.

As mensagens de controle são enviadas por rotas estáticas configuradas entre os nós e o controle central de admissão. A configuração dessas rotas pode ser feita pelo controle central através do envio de mensagens de criação de rota para cada nó da rota a ser configurada. Essas mensagens contêm o endereço MAC da origem (cliente) e do destino (CCA). Para cada nó, será configurada uma entrada na tabela de roteamento especificando o próximo nó a ser seguido para o determinado par origem-destino. A configuração das rotas, bem como o esquema de roteamento dos pacotes de dados faz parte de um estudo futuro. Nas simulações efetuadas nesse trabalho utilizamos rotas fixas configuradas manualmente em cada nó da rede

Capítulo 6

Resultados das Simulações

6.1. Introdução

Com o objetivo de verificar o funcionamento do Controle Central de Admissão (CCA), desenvolvemos o código do algoritmo em linguagem C. Foram efetuadas várias simulações comparando-se o número de chamadas admitidas na simulação com o NS-2, mostradas no Capítulo 4, e o número de chamadas admitidas pelo algoritmo implementado.

6.2. Implementação e Simulação do Algoritmo de Controle

6.2.1. Implementação do Algoritmo de Controle

Em uma segunda etapa de simulação, com o objetivo de verificar o funcionamento do controle de admissão proposto, desenvolvemos o código do algoritmo central de controle de admissão.

Na Figura 6.1 é apresentado o fluxograma simplificado do código do simulador do CCA desenvolvido. O código do algoritmo foi implementado em linguagem C no ambiente de desenvolvimento do Dev-Cpp [58].

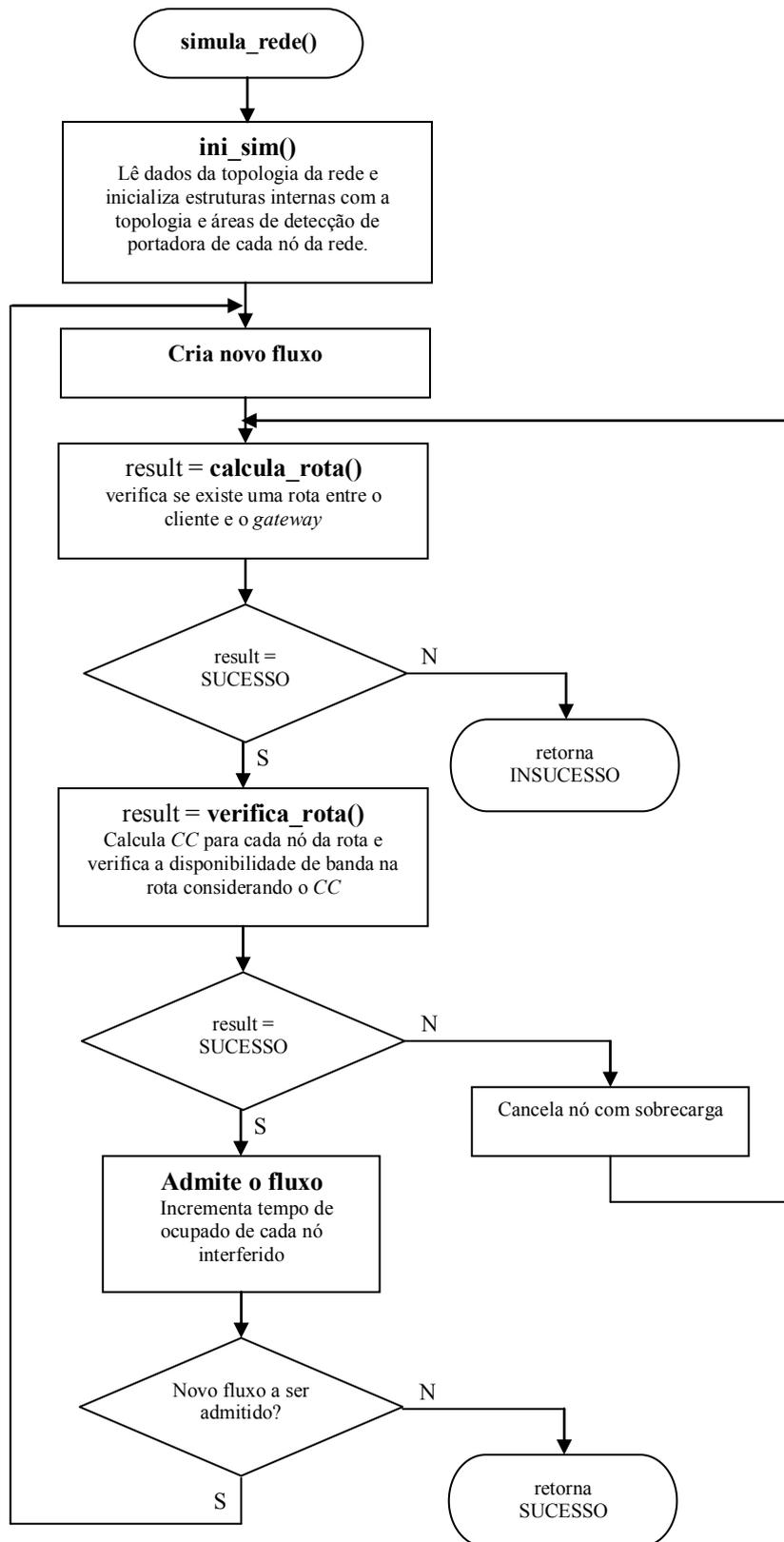


Figura 6.1: Fluxograma simplificado do simulador do CCA implementado.

6.2.2. Resultados das Simulações Utilizando o Algoritmo Implementado

Para validar os resultados obtidos com o Simulador do CCA, foram realizados testes comparativos com as simulações realizadas no NS-2. A mesma topologia de teste utilizada nos testes com o NS-2, mostrada na Figura 4.9, foi configurada no Simulador do CCA, conforme mostrado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Topologia configurada no Simulador do CCA.

Nó	a	b	c	d	e	f	g	gw
a	1	2	1	0	0	0	0	0
b	2	1	2	1	0	0	0	0
c	1	2	1	2	1	0	0	0
d	0	1	2	1	2	1	0	0
e	0	0	1	2	1	2	1	0
f	0	0	0	1	2	1	2	1
g	0	0	0	0	1	2	1	2
gw	0	0	0	0	0	1	2	1

Para todas as condições de saltos foram realizadas simulações verificando o número de fluxos admitidos pelo Simulador do CCA. A coluna dois da Tabela 6.2 mostra os resultados obtidos para o padrão 802.11b.

Tabela 6.2: Resultado obtidos pelo Simulador do CCA.

Número de saltos	Número de Fluxos Admitidos			
	802.11b RTS/CTS (11 Mbps)	802.11b CSMA/CA (11 Mbps)	802.11g RTS/CTS (54 Mbps)	802.11g CSMA/CA (54 Mbps)
1	12	21	84	118
2	6	10	42	59
3	4	7	28	39
4	3	5	21	29
5	2	4	16	23
6	2	4	16	23
7	2	4	16	23

Note que os resultados são os mesmos resultados fornecidos pelo NS-2 na Tabela 4.3, o que comprova o funcionamento do algoritmo implementado.

Foram realizadas outras simulações com o algoritmo implementado, utilizando-se fluxos (todos em direção ao *gateway*) gerados aleatoriamente, sendo que o número de fluxos admitidos simultaneamente variou de dois a doze, conforme esperado. Esse comportamento de doze chamadas simultâneas aparece quando todos os fluxos são admitidos em nós vizinhos de no máximo um salto do *gateway*.

6.3. Considerações Sobre os Resultados das Simulações

O baixo número de fluxos VoIP suportados pelo IEEE 802.11b pode ser melhorado pela utilização de várias técnicas de otimização [8, 9], ou através de padrões que suportem taxas maiores, como o IEEE 802.11a ou IEEE 802.11g. Nas colunas 4 e 5 da Tabela 6.2 são mostrados os resultados da simulação para o padrão IEEE 802.11g com e sem RTS/CTS respectivamente.

Na simulação consideramos a capacidade máxima da rede igual à capacidade efetiva da camada MAC. Entretanto, na prática isso não ocorre devido às interferências externas que podem inclusive variar a qualidade do link entre os nós. Todavia, isso não invalida o CCA, no qual o tempo de ocupado do canal é obtido a partir de informações de medidas físicas coletadas em cada nó da rede de acesso. Resultados práticos vão depender diretamente da precisão das medidas do tempo de ocupado efetuadas em cada nó da rede.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste estudo, consideramos a utilização de uma rede em malha sem fio IEEE 802.11 associada a um enlace de satélite para prover infraestrutura de acesso VoIP para localidades remotas de baixa densidade populacional. Através de medidas efetuadas em um enlace de satélite e de uma metodologia para avaliação da qualidade da voz, verificamos que o enlace de satélite impõe estritos requisitos de QoS à rede de acesso. Através de simulações efetuadas com o NS-2 e considerando os resultados das medidas efetuadas no enlace de satélite, verificamos que se mantendo o canal sem fio abaixo do nível de saturação o atraso imposto pela rede *mesh* de acesso fica dentro do limite aceitável estimado, viabilizando a solução proposta para redes *mesh* de acesso para pequenas localidades.

Propomos um mecanismo centralizado de controle de admissão para a rede *mesh* de acesso, capaz de restringir o acesso de novas chamadas, mantendo a qualidade das chamadas existentes, enquanto maximiza o número de chamadas admitidas. No mecanismo proposto, o nó que deseja admitir um novo fluxo VoIP faz uma requisição ao módulo central de controle de admissão que decide se aceita ou rejeita o novo fluxo. Novos fluxos só serão aceitos caso os recursos disponíveis sejam suficientes para atender a carga requisitada sem interferir nos fluxos pré-existentes. O controle de admissão utiliza o período de tempo em que o meio permanece ocupado como estimativa dos recursos disponíveis considerando a interferência intra-fluxo, o que permite uma maior precisão na decisão de admissão de novos fluxos VoIP. Para validar o mecanismo proposto, o algoritmo do controle central de admissão foi implementado em código C, sendo os resultados de testes comparados com os resultados obtidos nas simulações efetuadas com o NS-2.

Como trabalhos futuros, inclui-se a realização de testes práticos utilizando uma rede *mesh* conectada a um enlace de satélite, comparando os resultados com os resultados obtidos nas simulações. Implementação de um esquema de controle de violação de QoS e de um mecanismo de diferenciação de tráfego, permitindo que a rede seja utilizada também para fornecer acesso à Internet. Também podemos citar, à avaliação de métodos para melhorar o desempenho como o agrupamento de múltiplas chamadas, supressão do silêncio, compressão de cabeçalho IP entre outros que podem trazer ganhos expressivos, aumentando consideravelmente o número de chamadas simultâneas admitidas na rede.

Referências Bibliográficas

- [1] PGMU, *Plano Geral de Metas para Universalização*. Decreto ANATEL 4.733, junho 2003. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2003/D4733.htm. Acesso em: 28 de abril de 2008.
- [2] GESAC, *Governo Eletrônico – Serviço de Atendimento ao Cidadão*. Disponível em: www.idbrasil.gov.br. Acesso em: 28 de abril de 2008.
- [3] MELLO, T. e KIEFER, A. *Satellite VoIP Access Gateway*. International Conference on Digital Telecommunications (ICDT'06), 2006.
- [4] AKYILDIZ, I. F.; WANG, X. e WANG, W. *Wireless Mesh Networks: a Survey*. Comput. Netw. ISDN Syst., Amsterdam, Holanda, v. 47, n. 4, p. 445–487, Janeiro 2005.
- [5] ITU-T Recommendation V.150.1, *Modem-over-IP networks: Procedures for the end-to-end connection of V-series DCEs*. ITU-T, 2003.
- [6] LI, J. et al. *Capacity of Ad Hoc Wireless Networks*, ACM MobiCom, p.61–69, 2001.
- [7] NICULESCU, D.; GANGULY, S.; KIM, K. e IZMAILOV, R. *Performance of VoIP in a 802.11 Wireless Mesh Network*, Proceedings of IEEE INFOCOM 2006, Apr. 2006.
- [8] WANG, W.; LIEW, S. C. e LI, V. O. K. *Solutions to Performance Problems in VoIP over 802.11 Wireless LAN*. IEEE Trans. on Vehicular Technology, Jan 2005.
- [9] GANGULY, S. et al *Performance Optimizations for Deploying VoIP Services in Mesh Networks*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.24, Iss.11, Nov. 2006, p.2147-2158.

- [10] COLE, Robert G. e ROSENBLUTH, J. H. *Voice over IP performance monitoring*. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol.31, issue 2. abr. 2001.
- [11] FALCONIO, P. et al *Performance of a Multi-Interface based Wireless Mesh Backbone to support VoIP Service Delivery*, proceedings of the WiMob 2006.
- [12] TRAD, A.; MUNIR, F. e AFIFI, H. *Capacity Evaluation of VoIP in IEEE 802.11e WLAN Environment*. Consumer Communications and Networking Conference, 2006. CCNC 2006, p.828-832.
- [13] JUN, Jangeun e SICHITIU, Mihail L. *The Nominal Capacity of Wireless Mesh Networks*, IEEE Wireless Communications, 2003.
- [14] ANATEL, *Agência Nacional de Telecomunicações*. Solução para rede Municipal Sem FIO. Disponível em:
http://www.anatel.gov.br/Tools/frame.asp?link=/biblioteca/releases/2007/release_26_03_2007mm.pdf. Acesso em: 14 de maio de 2008.
- [15] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE 802.11 wireless local area networks*, 2002. Disponível em: <http://www.ieee802.org/11/>.
- [16] KRAVETS, R.; CARTER, C. e MAGALHAES, L. *A Cooperative Approach to User Mobility*, ACM Computer Communications Review, vol. 31, 2001.
- [17] ALBUQUERQUE, Célio Vinícius Neves et al *GT-Mesh – Relatório Técnico 1 - Termo de Referência e Estado da Arte*, Rede Nacional de Pesquisas, Fevereiro 2006.
- [18] RANIWALA, A. e CHIEUH, T. *Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network*, Proceedings of IEEE Infocom, 2005.
- [19] HUANG, Y.; GONG, W. e GUPTA, D. *Architecture and scheduling algorithm for a multi-channel wireless infrastructure network with diversity management layer*.

proceeding of 44th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) and European Control Conference (ECC), 2005.

- [20] DRAVES, R.; PADHYE, J. e ZILL, B. *Routing in Multi-radio, Multi-hop Wireless mesh Networks*, ACM MobiCom, Philadelphia, PA, September 2004.
- [21] AGUAYO, Daniel; BICKET, John; BISWAS, Sanjit; JUDD, G. e MORRIS, Robert. *A Measurement Study of a Rooftop 802.11b Mesh Network*, Proceedings of ACM SIGCOMM Conference (SIGCOMM 2004), Setembro 2004.
- [22] REMESH, Disponível em: <http://mesh.icc.uff.br/>. Acesso em: 28 de abril de 2008.
- [23] MESHNET – Santa Bárbara Mesh Networks, Disponível em: <http://moment.cs.ucsb.edu/meshnet/>. Acesso em: 28 de abril de 2008.
- [24] S. ROCH, S. *Nortel's Wireless Mesh Network solution: Pushing the boundaries of traditional WLAN technology*, Nortel Technical Journal, Issue 2, October 2005.
- [25] CISCO Wireless Mesh, Disponível em: <http://www.cisco.com/go/wirelessmesh>, March 2006. Acesso em: 20 de abril de 2008.
- [26] IEEE Std 802.11e. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications; Amendment: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements*. IEEE Std 802.11e, 2005.
- [27] GROSSGLAUSER, M. e TSE, D. *A Framework for Robust Measurement-Based Admission Control*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999.
- [28] FILHO, J. *Mecanismo de Controle de Qualidade de Serviço em redes IEEE 802.11*, UFRJ/IM/NCE, M. Sc. Informática, 2003.
- [29] MILBRANDT, Jens; MENTH, Michael e JUNKER, Jan *Experience-Based Admission Control in the Presence of Traffic Changes*. Networking, 2006

- [30] BRESLAU, L.; JAMIN, S. e SHENKER, S. *Performance of measurement-based admission control algorithms*. IEEE Joint Conference of Computer and Communications Societies (INFOCOM'2000), 2000.
- [31] KIM, Kyungtae; KASHYAP, Anand e GANGULY, Samrat *On Admission of VoIP Calls Over Wireless Mesh Networks*. IEEE International Conference on Communications (ICC 2006), Istanbul, Turkey, Jun. 2006.
- [32] Yang, Y. e Kravets, R. *Contention-aware Admission Control for Ad Hoc Networks*, IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005.
- [33] Chakeres, I. D. e Belding-Royer, E. M. *PAC: Perceptive Admission Control for Mobile Wireless Networks*, in: Proceedings of QShine, Dallas, TX, 2004.
- [34] ITU-T Recommendation G.107, *The E-Model, a computational model for use in transmission planning*. ITU-T, March 2005.
- [35] ZHAL, H.; CHEN, X. e FANG, Y. *A Call Admission and Rate Control Scheme for Multimedia Support over IEEE 802.11 Wireless LANs*. 1st Int'l. Conf. QoS in Heterogeneous Wired/Wireless Networks (QShine'04), Dallas, TX, Oct. 2004.
- [36] GAO, D.; CAI, J. e NGAN, K. N. *Admission control in IEEE 802.11e wireless LANs*. *IEEE Network*. vol. 19:4, p. 6- 13, July-Aug. 2005.
- [37] ITU-T Recommendation P.800, *Methods for subjective determination of transmission quality*, 1996.
- [38] ITU-T Recommendation P.830, *Subjective performance assessment of telephone band and wideband digital codecs*, 1996.
- [39] CARVALHO, L. et al *An E-Model Implementation for Speech Quality Evaluation in VoIP Systems*. Proceedings of the 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (Iscc'05), 2005.

- [40] ITU-T Recommendation P.862, *Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs*, 2001.
- [41] ETSI ETR250, *Speech Communication Quality for Mouth to Ear for 3.1 kHz Handset Telephony across Networks*, Technical Report ETR250, 1996.
- [42] ITU-T Recommendation G.108, *Application of the E-model: A planning guide*. ITU-T, September 1999.
- [43] ITU-T Recommendation G.113 Appendix I, *Provisional planning values for the equipment impairment factor I_e and packet-loss robustness factor*, 2002.
- [44] PSYTECHNICS GROUP, *Estimating E-model I_d within a VoIP network*. Psytechnics Technical note, United Kingdom, 2002.
- [45] CLARK, Alan D. *Modeling the Effects of Burst Packet Loss and Recency on Subjective Voice Quality*. IP – Telephony Workshop. [USA], 2001.
- [46] ITU-T. *Estimates of I_e and B_{pl} Parameters for a Range of Codec Types*. ITU-T Delayed Contribution 106, January 2003.
- [47] HALL, T. A. *Objective Speech Quality Measures for Internet Telephony*. Proceedings of SPIE Vol. 4522. Petros Mouchtaris Editor, 2001.
- [48] HUANG, C.; CHAO, C. e LIU, A. *A Distributed Management Framework for H.323-Based VoIP System*. Communications in Computing (CIC) 2003. EUA, jun. 2003.
- [49] DVB Forum, <http://www.dvb.org>. Acesso 20 de março de 2008.
- [50] VERMESAN, Anca et al *VoIP over DVB-RCS Radio Resource and QoS Perspective*, Nera Broadband Satellite AS, White Paper, 2004.

- [51] IPERF - Disponível em: <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>. Acesso em: 10 de maio de 2007.
- [52] ITU-T Recommendation G.114, *One-way Transmission Time*, 2003.
- [53] BIANCHI, G. *Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function*. IEEE Journal Selected Areas in Communications, 18(3), 2000.
- [54] Website oficial do NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acesso 20 de janeiro de 2009.
- [55] Bicket, J., Aguayo, D., Biswas, S. e Morris, R., *Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Networks*, MobiCom'05, Cologne, Germany, 2005.
- [56] Lassila, P., Penttinen, A. e Virtamo, J., *Dimensioning of Wireless Mesh Networks with Flow Level QoS Requirements*, PEWASUN' 06, Torremolinos, Malaga, Spain, 2006.
- [57] Jun, J., Peddabachagari, P. e Sichitiu, M. L., *Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and Its Applications*, IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, 2003.
- [58] Bloodshed Dev-C++. Integrated Development Environment (IDE) for the C/C++ programming language, Disponível em: <http://www.bloodshed.net/devcpp.html>. Acesso em: 28 de abril de 2008.