UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

ESTIMATIVA DE CAPACIDADE EM AMBIENTES COM ENLACES DE RÁDIO IEEE 802.16

ALEX AVELLAR DE OLIVEIRA

Orientador
Prof. DSc. Sidney Cunha de Lucena

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2010

ESTIMATIVA DE CAPACIDADE EM

AMBIENTES COM ENLACES DE RÁDIO IEEE 802.16

Alex Avellar de Oliveira

DISSERTAÇÃO APRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (UNIRIO). APROVADA PELA COMISSÃO EXAMINADORA ABAIXO ASSINADA.

Aprovada por:

_____

Sidney Cunha de Lucena, D.Sc. – UNIRIO

_____

Carlos Alberto Vieira Campos, D.Sc. – UNIRIO

_____

Antonio Augusto de Aragão Rocha, D.Sc. – UFRRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2010

O sentir é indispensável para se chegar ao saber

Antonio Damasio.

Oliveira, Alex Avellar de.
O48 Estimativa de capacidade em ambientes com enlaces de rádio IEEE 802.16 / Alex Avellar de Oliveira, 2010.
102f.

Orientador: Sidney C. de Lucena.
Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

1. Redes de computação. 2. Gestão de redes. 3. Metodologia de pares de pacotes. 4. Redes IEEE 802.16. I. Lucena, Sidney Cunha de. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2003-). Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Curso de Mestrado em Informática. III. Título.

CDD - 004.6

À minha noiva

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao professor Sidney Lucena, meu orientador, por ter me recebido no PPGI da UNIRIO, e servir de exemplo pela sua calma, competência, paciência e inteligência que usa para agir da melhor forma possível para tomar a melhor decisão em diferentes situações, será sempre um exemplo para minha vida dentro ou fora da sala de aula. Aos professores Morganna Diniz e Alexandre A. Andreatta que pelos ensinamentos, apoio e estímulos em disciplinas ministradas e na participação de todos os Seminários de Acompanhamento Discentes na UNIRIO.

Ao professor Carlos Alberto, professor Beto, pelos comentários extremamente relevantes fundamentais para o processo de avaliação e evolução deste trabalho e ao professor Antonio A. de A. Rocha, professor Guto, o qual os trabalhos sobre medições em redes IEEE 802.11 serviram como balizamento deste.

Agradecimentos especiais ao 2º Centro de Telemática de Área do Exército Brasileiro, sob a Chefia do Coronel Vidal e pelo apoio fundamental do Tenente Coronel Sirufo, Major Silveira, Tenente Engenheiro Militar Isaac e Sargento Araújo.

Ao Grupo de Estudos de Medições em Redes de Computadores da Universidade Federal do Espírito Santo que forneceu a ferramenta TCP-eCAP para os primeiros testes de medições.

Um, muito obrigado, ao pessoal da AGECOM, fornecedora dos rádios Alvarion, nas Figuras do André e do Claudio, pela disponibilização do conjunto de rádios para a montagem do laboratório foi fundamental.

Um agradecimento especial a minha felicidade, Leidijane, pela paciência, apoio e amor.

Por fim agradeço a minha mãe e a meu pai pela torcida e grande incentivo, meu filho Breno, que soube entender a impossibilidade de levá-lo aos jogos do Botafogo e a meus irmãos, de quem quero estar sempre por perto.

OLIVEIRA, Alex Avellar de . Estimativa de Capacidade em Ambientes com Enlaces de Rádio IEEE 802.16. UNIRIO, 2010. 102 páginas. Dissertação de Mestrado. Departamento de Informática Aplicada, UNIRIO.

RESUMO

Para entender a precisão e as limitações de uma dada técnica para estimação de capacidade de caminho, é importante considerar as características específicas dos enlaces de rede no caminho. Este estudo analisa o desempenho de algumas técnicas para estimar a capacidade máxima de um caminho que contenha enlaces IEEE 802.16. Para conseguir isto, duas ferramentas conhecidas para estimativa de capacidade de caminho foram usadas para a avaliação de suas respectivas implementações de técnicas baseadas em pares de pacotes, num ambiente IEEE 802.16. Neste contexto, um laboratório foi montado com rádios pré-WiMAX e as caracerísticas do WiMAX foram extensivamente exploradas. Resultados mostram que, quando algumas propriedades específicas do WiMAX estão presentes num enlace IEEE 802.16 no caminho, as ferramentas analisadas falham ao estimar a capacidade máxima do caminho. A identificação destas características específicas que influenciam algumas técnicas de medição baseadas em pares de pacotes é essencial para a proposta de novas técnicas que levem enlaces IEEE 802.16 em consideração.

Palavras-chave: Redes de computadores; gerência de redes; redes IEEE 802.16, WiMAX, estimativa de capacidade, metodologia de pares de pacotes

ABSTRACT

To understand the accuracy and limitations of some technique for path capacity estimation, it is important to consider the specific characteristics of the network links. This study evaluates the performance of some techniques to estimate the maximum capacity of a network path that contains an IEEE 802.16 link. To accomplish this, two well-know tools for path capacity estimation were used for the evaluation of their respective implementations of a packet pair based technique in an IEEE 802.16 environment. Within this context, a laboratory was setup with pre-WiMAX radios and the WiMAX characteristics were extensively explored. Results show that, when some specific WiMax properties are present in an IEEE 802.16 link in the path, the analysed tools fail to estimate the maximum capacity of the path. The identification of these specific characteristics that influence some measurement techniques based on packet pairs isessential for the proposal of new techniques that take IEEE 802.16 links into account.

Keywords: Computer networks, network management, IEEE 802.16, WiMAX, estimated capacity, packet-pair approach

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 Metodologia Utilizada e Resultados Obtidos 2

1.2 Organização do Trabalho 3

2 O PADRÃO IEEE 802.16 4

2.1 Visão Geral do Padrão IEEE 802.16 4

2.2 Família do Padrão IEEE 802.16 6

2.3 Camadas do Padrão IEEE 802.16 8

2.3.1 Camada Física (PHY) 9

2.3.1.1 WirelessMAN-SC 10

2.3.1.2 WirelessMAN-SCa 12

2.3.1.3 WirelessMAN-OFDM 13

2.3.1.4 OFDMA 14

2.3.2 Camada de Acesso ao Meio (MAC) 14

2.3.2.1 Subcamada de Segurança 15

2.3.2.2 Subcamada de Convergência Comum 15

2.3.2.3 Subcamada de Convergência Específica 18

2.3.2.4 Características do IEEE 802.16 que Podem Influenciar as Medidas Estimadas 18

2.3.2.5 Concatenação 19

2.3.2.6 Burst 19

2.3.2.7 MAC PDU 20

2.3.2.8 Duplexing 20

2.3.2.9 Mapeamento 20

2.3.2.10 Resolução de Contenções 21

2.3.2.11 Suporte à Retransmissão 21

2.3.2.12 Escalonamento 21

2.3.2.13 Requisição de Largura de Banda 21

2.4 Padrões WIMAX e Pré-WIMAX 22

3 METROLOGIA DE REDES 23

3.1 Conceito de Metrologia de Redes 23

3.2 Medições Ativas e Passivas 26

3.3 Técnicas de Medição ... 26
3.3.1 VPS ... 26
3.3.2 SLOPs ... 27
3.3.3 TOPP ... 28
3.4 Métodos para Estimativa de Capacidade ... 28
3.4.1 Método dos Pares de Pacotes ... 29
3.4.2 Método do Trem de Pacotes ... 31
3.5 Análise do Impacto na Medição pela Variação no Tamanho dos Pacotes ... 32
4 ESTUDO DE CASO UM ... 33
4.1 Testes Preliminares ... 33
4.2 O Ambiente da Rede do Exército Brasileiro ... 33
4.3 Estimativa Usando TCP-eCAP ... 34
4.4 Resultados Usando o PathCrawler ... 36
4.5 Conclusões Preliminares ... 38
5 ESTUDO DE CASO DOIS ... 39
5.1 Ambiente Controlado para Testes ... 39
5.1.1 Especificações do Enlace de Rádio ... 39
5.2 Ferramentas Usadas para Estimativa de Capacidade ... 41
5.2.1 Capprobe ... 42
5.2.2 Pathrate ... 42
5.3 Tamanho dos Pacotes ... 43
5.4 Limitações e Problemas Encontrados ... 44
5.4.1 Problemas com Modulação Adaptativa ... 44
5.4.2 Limitações no Monitoramento do Enlace de Rádio ... 45
5.4.3 Tráfego de Controle no Enlace de Rádio ... 46
5.4.4 Eventos de Reinicialização dos Rádios ... 47
5.4.5 Diferentes Tecnologias Embarcadas no Rádio Alvarion ... 47
5.5 Procedimentos Usados nos Experimentos ... 48
5.6 Influência do Burst e da Concatenação nos Resultados do Capprobe ... 50
5.7 Influência do Burst e da Concatenação nos Resultados do Pathrate ... 51
5.8 Influência do Uso de Pacotes Pequenos nos Resultados ... 51
6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADO DO ESTUDO DE CASO 2 ... 52
6.1 Experimentos com Capprobe no Sentido BS – SS ... 52

6.1.1 Burst e Concatenação Ligados no BS e no SS (configuração default) ... 52
6.1.2 Burst Desativado no BS ... 56
6.1.3 Burst Desativado no SS ... 58
6.1.4 Burst Ativado e Concatenação Desativada no BS e no SS ... 60
6.2 Experimentos com Capprobe no Sentido SS – BS ... 63
6.2.1 Burst e Concatenação Ligados em Ambos os Sentidos ... 63
6.2.2 Burst Desligado no BS ... 65
6.2.3 Burst Desligado no SS ... 68
6.2.4 Burst Ligado e Concatenação Desligada no BS e no SS ... 70
6.3 Experimentos com o Pathrate no sentido BS-SS ... 74
6.4 Experimentos com o Pathrate no Sentido SS-BS ... 75
6.5 Quadros Comparativos ... 76
6.6 Discussão dos Resultados ... 78
6.6.1 Falhas no Método do Par de Pacotes ... 78
6.6.2 Falhas Devido às Medidas Estatísticas do *Capprobe* ... 79
6.6.3 Falhas no Método Usado pelo *Pathrate* ... 80
6.7 Workarounds dos Problemas Encontrados ... 80
7. CONCLUSÃO ... 82
8. REFERÊNCIAS ... 84

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Visão Geral da Arquitetura Fixa IEEE 802.16 5

Figura 2.2 – Pilha de Protocolos do IEEE 802.16 9

Figura 2.3 – Modulação Adaptativa por Perfil de Rajada 9

Figura 2.4 – Quadros de Downlink e Uplink 10

Figura 2.5 – Modo Time Division Duplex 11

Figura 2.6 – Sub-quadro de uplink 12

Figura 2.7 – Descrição das freqüências no OFDM 13

Figura 2.8 – Descrição das Freqüências no OFDMA 14

Figura 2.9 – Exemplo do Funcionamento da Subcamada de Convergência Comum 16

Figura 3.1 - Capacidade do enlace 25

Figura 3.2 - Uso da técnica VPS com a ferramenta *Pathchar* 27

Figura 3.3 - Capacidade de contenção em um caminho 29

Figura 3.4 - Situações que Podem Ocorrer na Estimativa de Capacidade por Par de Pacotes. Fonte: Kapoor, 2004. 30

Figura 3.5- Exemplo numérico na estimativa de capacidade por par de pacotes 31

Figura 4.1 – Antenas localizadas no morro do Sumaré e no IME-RJ 34

Figura 4.2 - Fase *slow-start* no controle de congestionamento TCP 35

Figura 4.3 - Experimentos com PathCrawler na rede do Exército 37

Figura 4.4 - Enlaces sem fio da rede do Exército na cidade do Rio de Janeiro 38

Figura 5.1 - Tela de gerência dos rádios apresentando os contadores. 46

Figura 5.2 - Laboratório para os testes controlados 48

Figura 6.1 - Capacidades estimadas no sentido BS-SS com pacotes de 500 Bytes e todas as funcionalidades ligadas 52

Figura 6.2- Resultado do *Capprobe* com tudo ligado no sentido BS-SS e pacote de 1.500 bytes 53

Figura 6.3 - Sentido BS-SS com tudo ativado e pacote de 1.500 Bytes 54

Figura 6.4 - Histograma das estimativas do Capprobe no sentido BS-SS com todas as funcionalidades ligadas e pacotes de 1.500 Bytes 55

Figura 6.5 - Sentido BS-SS com *Burst* desativado no BS e pacotes de 1.500 bytes 56

Figura 6.6- Resultado da ferramenta com *Burst* desligado no BS, sentido BS-SS e pacote de 1.500 bytes 57

Figura 6.7 - Histograma das estimativas do *Capprobe* com *Burst* desligado no BS, sentido BS-SS e pacotes de 1.500 bytes 57

Figura 6.8 - Sentido BS-SS com Burst desativado no SS e pacote de 1.500 Bytes 58

Figura 6.9 - Resultado da ferramenta com Burst desligado no SS sentido BS-SS e pacote de 1.500 bytes de pacote 59

Figura 6.10 - Histograma com Burst desligado no SS e 1.500 bytes de pacote 59

Figura 6.11 - Exemplo de Burst ativado e concatenação desativada em ambos os rádios 60

Figura 6.12 - Histograma sem concatenação na BS e na SS no sentido BS-SS e pacotes de 500 bytes 61

Figura 6.13 - Distribuição das capacidades estimadas sem concatenação na BS e na SS no sentido BS-SS com pacotes de 500 bytes 61

Figura 6.14 - Resultado da ferramenta sem concatenação na BS e na SS no sentido BS-SS e pacote de 1.500 bytes 62

Figura 6.15 – Histograma das Capacidades sem Concatenação na BS e na SS no Sentido BS-SS com Pacotes de 1.500 bytes62

Figura 6.16 - Sentido SS-BS com tudo ativado 63

Figura 6.17 - Histograma com tudo ligado e pacotes de 500 bytes no sentido SS-BS..... 64

Figura 6.18 - Histograma com tudo ligado e pacotes com 1.500 bytes no sentido SS-BS..... 64

Figura 6.19- Resultado da ferramenta com tudo ligado no sentido SS-BS e pacotes de 1.500 bytes..... 65

Figura 6.20- Sentido SS-BS com *Burst* desativado no BS..... 66

Figura 6.21 - Histograma com *Burst* desligado no BS e pacotes de 500 bytes no sentido SS-BS 67

Figura 6.22 - Histograma com Burst desligado no BS e 1.500 bytes de pacote no sentido SS-BS 67

Figura 6.23 - Resultado da ferramenta com *Burst* desligado no BS no sentido SS-BS com pacote de 1.500 bytes 68

Figura 6.24 - Sentido SS-BS com *Burst* desativado no SS 69

Figura 6.25 - Resultado da ferramenta com *Burst* desligado no SS no sentido SS-BS e pacote de 1.500 bytes 69

Figura 6.26 - Histograma com *Burst* desligado no SS e pacote de 1.500 bytes no sentido SS-BS 70

Figura 6.27 – Burst Ativado em Ambos os Sentidos e Concatenação Desativada 71

Figura 6.28 - Histograma para estimativas sem concatenação e pacotes de 500 bytes no sentido SS-BS 71

Figura 6.29 - Resultado da ferramenta sem concatenação sentido SS-BS e pacotes de 500 bytes..... 72

Figura 6.30 - Resultado da ferramenta sem concatenação no sentido SS-BS e pacotes de 1.500 bytes..... 73

Figura 6.31 - Histograma sem concatenação e pacotes de 1.500 bytes no sentido SS-BS..... 73

Figura 6.32 - Estimativas de capacidade sem concatenação e pacotes de 1.500 bytes no sentido SS-BS 74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 – Especificações Técnicas para o Padrão 802.16 ..... **7**

Tabela 2-2 – Freqüências Disponíveis para WIMAX no Brasil **22**

Tabela 5.5-1 – Parâmetros dos Rádios Alvarion **40**

Tabela 5-2 - Capacidade do enlace por nível de modulação **44**

Tabela 5-3 - Capacidades esperadas no sentido BS-SS **49**

Tabela 5-4 - Capacidades esperadas no sentido SS-BS **49**

Tabela 6-1 - Estimativa de capacidade na descida usando o *Wireshark* **54**

Tabela 6-2 – Estatísticas do histograma da Figura 6.4 ..... **55**

Tabela 6-3 – Estatísticas do histograma da Figura 6.7 ..... **58**

Tabela 6-4 - – Estatísticas do histograma da Figura 6.10 ..... **60**

Tabela 6-5 – Estatísticas do histograma da Figura 6.12 ..... **61**

Tabela 6-6 – Estatísticas do histograma da Figura 6.15 ..... **63**

Tabela 6-7 - Estatísticas do histograma da Figura 6.18 ..... **65**

Tabela 6-8- Estimativa de capacidade no *downlink* usando o *Wireshark* **66**

Tabela 6-9 - Estatísticas do histograma da Figura 6.22 ..... **68**

Tabela 6-10 - Estatísticas do histograma da Figura 6.26 ..... **70**

Tabela 6-11- Estatísticas do histograma da Figura 6.28 ..... **72**

Tabela 6-12 - Estatísticas do histograma da Figura 6.31 ..... **73**

Tabela 6-13 - Resultados do *Pathrate* no sentido BS-SS **75**

Tabela 6-14 - Resultados do *Pathrate* no sentido SS-BS **76**

Tabela 6-15 - Comparativo do *Capprobe* no sentido BS-SS com pacote de 1.500 bytes **76**

Tabela 6-16 - Comparativo do *Capprobe* no sentido BS-SS com pacote de 500 bytes **77**

Tabela 6-17 - Comparativo do *Capprobe* no sentido SS-BS com pacotes de 1.500 bytes **77**

Tabela 6-18 - Comparativo do *Capprobe* no sentido SS-BS com pacotes de 500 bytes **77**

Tabela 6-19 - Comparativo do *Pathrate* no sentido BS-SS **78**

Tabela 6-20 - Comparativo do *Pathrate* no sentido SS-BS **78**

GLOSSÁRIO

BS	Base Station
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CAIDA	Cooperative Association for Internet Data Analysis
CS	Convergence Sublayer
DL-MAP	Downlink-MAP
ICMP	Internet Control Message Protocol
LAN	Local Area Network
MAC	Media Access Control
MB	Megabyte
Mbps	Megabit por Segundo
OFDM	Orthogonal Frequency Division multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division multiplexing Access
PDU	Protocol Data Unit
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RTT	Round Trip Time
SLOPs	Self Loading Periodoc Streaming
SNMP	Simple Network Management Protocol
SC	Single Carrier
SCa	Single Carrier a
SS	Subscriber Station
TCP	Transmission Control Protocol
TOPP	Trains of Packets Pairs
UL-MAP	Uplink MAP
VPS	Variable Packet Size Probing

1 Introdução

As redes sem fio em grandes áreas (*Wireless Metropolitan Area Network - WMAN*), cujo padrão é o IEEE 802.16, conhecidas também como *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WIMAX), atendem às necessidades de transmissão sem fio, móvel ou não, em banda larga. O objetivo dessas redes é conectar as residências e as corporações a outras redes, atendendo a novos requisitos das aplicações como elevada largura de banda, maior segurança e qualidade de serviço.

O padrão 802.16 permite acesso sem fio às estações clientes através de antenas externas nas estações rádio base, oferecendo uma alternativa econômica para redes de acesso cabeadas, como as de enlace de fibra ótica, sistemas com meio coaxial usando *cable-modems* e enlaces de acesso banda larga com DSL[1] (Digital Subscriber Line). Todos os tipos de acesso citados necessitam de altos investimentos em infra-estruturas. O padrão 802.16 pode proporcionar uma implantação mais rápida de interconexão de rede, com economia de custos e em menor tempo, oferecendo de forma conveniente um acesso em banda larga para um grande número de usuários e tornando-se uma tecnologia emergente para a cobertura em locais de difícil acesso, normalmente não servidos por redes cabeadas [BROERSMA 2004]. Além disso, pode ser também uma alternativa nos grandes centros urbanos devido a sua fácil implantação. Assim sendo, as redes padrão 802.16 surgiram com uma proposta para solucionar o problema de acesso banda larga sem fio de última milha, oferecendo interconexão aos provedores de serviço de comunicação e ligação ponto-a-ponto ou ponto-multiponto entre pontos próximos ou distantes. Essas redes podem atender a uma grande quantidade de usuários que necessitam de largura de banda para suas aplicações.

De um modo geral, determinadas aplicações em rede podem melhorar a qualidade de seu funcionamento caso conheçam as características dos diversos caminhos de redes existentes. Tais características podem ser a perda, o RTT (*Round*

[1] No caso de residências, é mais comum encontrar ADSL (Asynchronouns DSL), esta usa a linha telefônica normal para prover banda larga.

Trip Time), o *jitter*, o retardo unidirecional, a capacidade efetiva do caminho e a banda disponível, dentre outras. Existem alguns fatores importantes para a obtenção dessas características tais como: assumir a inexistência de ajuda dos equipamentos das redes que estão no meio do caminho, utilizar o mínimo de tráfego e processamentos adicionais para a obtenção das medidas, ou seja, ter um baixo custo operacional e, principalmente, manter a rapidez na obtenção das características desejadas, de maneira suficiente para que uma aplicação possa usufruir dos resultados [MARTINELLO 2007].

Medir as características dos diversos caminhos é igualmente importante para as atividades de gerenciamento de redes, como o diagnóstico de problemas de desempenho, a verificação de contratos de qualidade de serviço e o planejamento de capacidade.

Neste trabalho, é analisado com detalhe o problema da estimativa de capacidade mínima em redes quando o enlace de menor capacidade num dado caminho é um enlace de rádio que utiliza o padrão IEEE 802.16. Tal estimativa deseja justamente obter o valor do enlace de menor capacidade num dado caminho, e esta análise pode ser útil para qualquer sistema que necessite inferir o melhor caminho, do ponto de vista de banda, entre dois pontos de uma rede heterogênea. O objetivo geral desta dissertação é avaliar os métodos para estimativa de capacidade usando as técnicas de pares de pacotes e de trem de pacotes, quando no caminho existe um enlace IEEE 802.16. A análise dos resultados leva em consideração os problemas e limitações das ferramentas utilizadas e propõe possíveis soluções diante das discrepâncias encontradas em relação à capacidade real de um enlace padrão 802.16 no caminho. Para isso, foram usados rádios pré-WIMAX da marca Alvarion operando em 5.8GHz para um padrão fixo de redes metropolitanas sem fio.

1.1 Metodologia Utilizada e Resultados Obtidos

A metodologia adotada teve como foco a estimativa de capacidade de um caminho contendo um enlace WIMAX fixo, ou seja, sem uso de mobilidade. Foram feitas atividades de pesquisa e levantamento bibliográfico de forma a alinhar os métodos conhecidos de estimativa de capacidade pelo uso do par de pacotes e do trem de pacotes com as características existentes em enlaces WIMAX. O estudo levou em consideração o comportamento das ferramentas nesses enlaces e as características da camada física e da camada de acesso ao meio do IEEE 802.16.

Este trabalho pode ser dividido em três fases: pesquisa por métodos para estimativa de capacidade, estudo das características do WIMAX e análise dos resultados com os testes feitos em rádios pré-WIMAX.

Vários métodos de obtenção de características de um enlace foram pesquisados, assim como algumas ferramentas foram avaliadas. Na verificação dessas ferramentas, buscou-se aquelas que conseguiam inferir os resultados da forma mais precisa possível, com o intuito de avaliá-las em enlaces WIMAX. Duas ferramentas foram escolhidas para serem testadas: o Capprobe [KAPPOR 2004] e o Pathrate [PRASAD 1997]. Dessa maneira, na análise dos resultados obtidos foram verificados alguns problemas relacionados com a modulação adaptativa nos rádios, com a assimetria dos enlaces e com algumas funcionalidades que são normalmente configuradas por *default* nos rádios WIMAX do fabricante Alvarion.

Outros resultados analisados e obtidos neste trabalho são: o comportamento das ferramentas de medição em função dos parâmetros de configuração dos rádios WIMAX; falhas no resultado final da estimativa devido às medidas estatísticas utilizadas pelas ferramentas; falhas nos métodos de par de pacotes e trem de pacotes; impacto na medição em função do tamanho do pacote; e problemas relacionados aos mapas de *downlink* e *uplink* presentes na camada de acesso ao meio do WIMAX.

1.2 Organização do Trabalho

Com relação à estrutura deste documento: o Capítulo 2 descreve o padrão IEEE 802.16; o Capítulo 3 mostra técnicas para medição de capacidade em redes de computadores; o Capítulo 4 descreve o Estudo de Caso Um e mostra seu resultado; o Capítulo 5 apresenta o cenário do Estudo de Caso Dois; o Capítulo 6 traz os resultados obtidos nos experimentos; e o Capítulo 7 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2 O Padrão IEEE 802.16

Gerações futuras de redes serão caracterizadas pela necessidade de altas taxas de dados, de requisitos de qualidade de serviços e de suporte a mobilidade. Um importante aspecto para a próxima geração de redes é a padronização, permitindo uma independência de plataforma e mantendo a interoperabilidade. O IEEE desenvolveu uma tecnologia a fim de cumprir essas necessidades e chamou de IEEE 802.16, mais comumente denominada WIMAX. Esta tecnologia tem o objetivo de fornecer altas taxas de dados e qualidade de serviço com baixo custo para uma rede com tecnologia de acesso sem fio em escala metropolitana.

Este capítulo apresenta as principais características do protocolo IEEE 802.16 a fim de fornecer um melhor entendimento desta tecnologia e uma melhor análise do comportamento das ferramentas de medições.

2.1 Visão Geral do Padrão IEEE 802.16

O padrão IEEE 802.16 contempla uma arquitetura de rede desenvolvida pelo Fórum WIMAX, apoiado por um grupo de empresas de tecnologia, tais como Intel, AT&T e ALVARION. O WIMAX fornece acesso com altas taxas e com qualidade de serviço à chamada “última milha”, e, embora não tenha sido construído para trabalhar com mobilidade no início, encontramos o padrão IEEE 802.16e com suporte a mobilidade, garantindo o *handover* e o QoS.

O WIMAX é usado para interconexão de diversas redes ao *backbone* principal da rede, como pode ser verificado na Figura 2.1.

O acesso a redes sem fio fixas é conhecido como acesso via Rádio Fixo e tem como objetivo principal realizar uma conexão de “última milha” entre o usuário e o *backbone*. A principal característica nesta rede é que o transmissor e o receptor estão fixos a um ponto, e isto faz com que as redes sem fio fixas sejam diferentes das redes sem fio móveis. Por conta disto, há diferença na limitação de largura de banda, pois não existe a necessidade de se adaptar a mudanças rápidas de posicionamento.

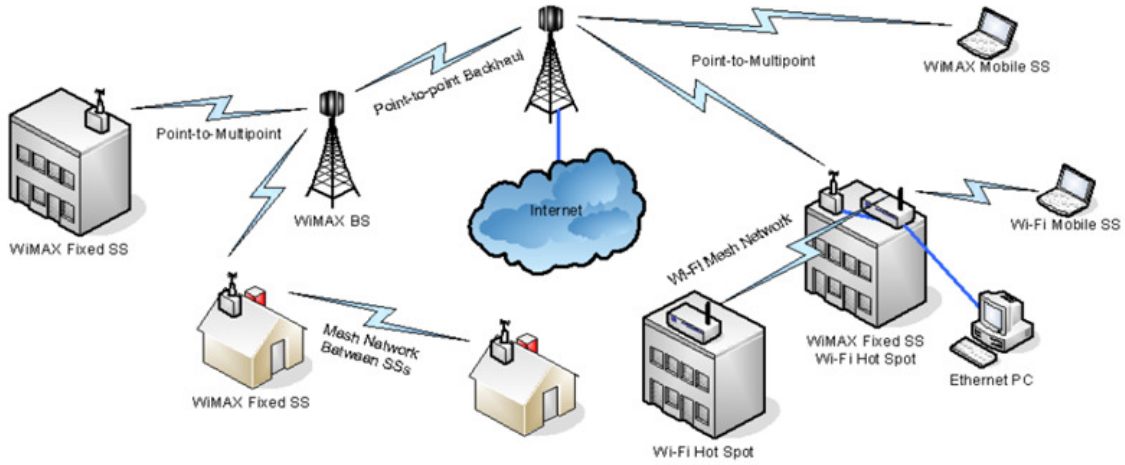


Figura 2.1 – Visão Geral da Arquitetura Fixa IEEE 802.16

Fonte: [ALBERTI 2006]

Novos usuários podem se conectar às redes WIMAX sem necessidade de uma infra-estrutura completa para conexão entre pontos distantes. O maior concorrente das redes WIMAX é o Cable Modem e a Asynchronous Digital Subscriber Line (ADSL), que possui uma grande infraestrutura através das *Public Switched Telephone Networks* (PSTN).

Existem três tipos de topologias de redes metropolitanas sem fio fixa:

- Ponto a Ponto (PP) – duas estações base se comunicam por um enlace entre apenas dois pontos. Tem como característica a alta largura de banda e a utilização de antenas direcionais (visada direta).
- Ponto Multiponto (PMP) – rede de conexão com uma ou mais estações base e a possibilidade de várias estações clientes conectadas a essas estações base. As estações clientes podem possuir antenas direcionais e as estações base possuem antenas omni-direcionais, setoriais ou grupos de antenas direcionais.
- Multiponto Multiponto (MM) – conhecidas como redes *mesh*, sua principal característica é que não existe uma estação base centralizada, um ou mais usuários transmitem em uma topologia de malha, com isto existe uma complexidade maior no roteamento, na reserva de QoS e na descoberta dos nós.

Outra característica importante dos sistemas de redes metropolitanas sem fio fixas é a possibilidade de eles serem sem visada direta (NLOS - *Non Line Of Sight*) ou

com visada direta (LOS – *Line Of Sight*), onde as ondas de rádio são mais susceptíveis a reflexões e bloqueios.

São vários os problemas que podem ocorrer em uma conexão de rede sem fio. As ondas de rádio podem ter efeitos como a interferência, desvanecimento, ruídos, perda do caminho e outros. Assim uma técnica denominada modulação adaptativa é usada com o intuito de adaptar a taxa de dados de acordo com a necessidade de QoS ou por motivos de interferências no meio, como por exemplo condições climáticas. É possível usar modulações como a 64 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) usado para transmissão de altas taxas, porém mais sensíveis a interferências, ou diminuir a taxa usando esquemas de modulação menos sensíveis, como por exemplo a 16 QAM. A técnica de alocação de frequência com canais divididos por freqüência, a *Frequency Division Duplex* (FDD), é usada para permitir comunicação simultânea em canais diferentes para *downlink* e *uplink*. Outra técnica utilizada é a *Time Division Duplex* (TDD), que usa o mesmo canal no modo *half-duplex* multiplexado no tempo. As características de modulação por freqüência ou tempo são chamadas de duplexação [FIGUEIREDO 2004].

2.2 Família do Padrão IEEE 802.16

O padrão IEEE 802.16 permite um enlace de alcance de dezenas de quilômetros com taxas de transmissão de dezenas de Mbps, podendo atender a centenas de usuários ao mesmo tempo. Assim o padrão IEEE 802.16 é capaz de prover acesso banda larga a grandes áreas metropolitanas sem fio, sem a necessidade de investimento em infra-estrutura.

A Tabela 2.1 mostra a família de padrões IEEE 802.16 de acordo com [SOUSA 2007] e [DIAS 2005]:

Tabela 2-1 – Especificações Técnicas para o Padrão 802.16

PADRÃO	CARACTERÍSTICAS
IEEE802.16	- Aprovada em dezembro de 2001; - Faixa de freqüência de 10 a 66 GHz; - Operação somente em LOS; - Corresponde à especificação original, projetado para padronizar implementações LMDS (*Local Multipoint Distribtion System*).
IEEE802.16.2	- Especificação de práticas para operação de múltiplos sistemas BWA; - Faixa de freqüência de 10 a 66 GHz;
IEEE802.16c	- Aprovada em dezembro de 2002; - Interoperabilidade das freqüências até 66GHz em LOS; - Especificações de perfis visando interoperabilidade entre equipamentos de vários fabricantes.
IEEE802.16a	- Aprovada em dezembro de 2003; - Faixa de freqüência licenciada e não-licenciada de 2 a 11 GHz; - Operação em NLOS; Alcance de 50 km.
IEEE802.16b	- Uso de aplicações permitido o uso da faixa de freqüência de 5 a 6 GHz não licenciadas; - Trata aspectos relativos à quantidade de serviços;
IEEE802.16d ou 802.16-2004	- Publicado em Outubro de 2004; - Também chamada de 802.16-2004 ou WiMAX fixo; - Especificação de regras para interoperabilidade nas freqüências até 66GHz; - Suporta arranjos de antenas inteligentes; - Atualização do padrão 802.16a e 802.16c em um único padrão, substituindo o 802.16a como o padrão base. Entre as alterações pode-se destacar a provisão de suporte para antenas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), o que aumenta a confiabilidade do alcance com multipercurso. Facilita instalações com o uso de antenas indoor.

IEEE802.16.e	- Ratificada em dezembro de 2005; - Também chamada de 802.16.2005 ou WiMAX móvel; - Incompatível com o WiMAX fixo; - Faixa de freqüência licenciada e não licenciada de 2 a 6 GHz; - Mobilidade até 60 Km/h e controle de potência; - Usa a Modulação S-OFDMA.
IEEE802.16.f	- Publicado em agosto de 2004; - Introduziu conceito de redes em malha (*mesh networks*).
IEEE802.16.g	- Publicado em agosto de 2004; - Evolução para suporte a mobilidade em velocidades maiores que 60 Km/h.

O padrão 802.16 inicialmente usava faixas de freqüência entre 10GHz e 66GHz, causando alguns empecilhos devido ao comprimento da onda e ao baixo aproveitamento da banda. As atualizações começaram a trabalhar com freqüências mais baixas, entre 2 e 11GHz com modulação *Ortogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), representando um avanço aos padrões anteriores.

2.3 Camadas do Padrão IEEE 802.16

A pilha de protocolos do IEEE 802.16 é dividida em duas partes, a camada física e a camada de controle de acesso ao meio (MAC). A Figura 2.2 mostra o modelo em camadas do padrão 802.16. A camada MAC é dividida em três subcamadas: subcamada de segurança (*MAC Privacy Sublayer*), subcamada de convergência comum (*MAC CPS – Common Part Sublayer*) e subcamada de convergência de serviços específicos (*CS – Convergence Sublayer*).

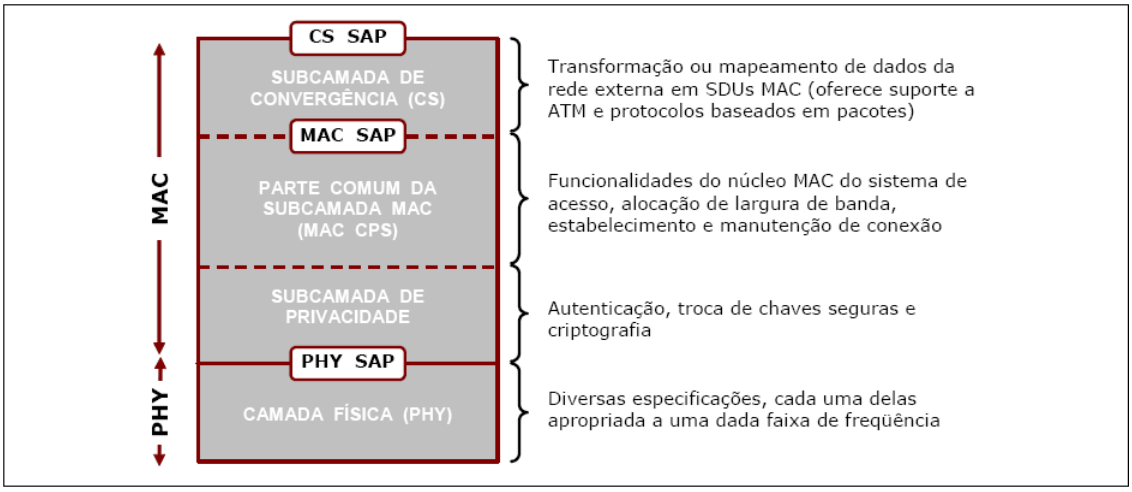


Figura 2.2 – Pilha de Protocolos do IEEE 802.16

Fonte: [ALBERTI 2006]

2.3.1 Camada Física (PHY)

O padrão IEEE 802.16 especifica a interface aérea e inclui a camada de enlace de dados (MAC) e múltiplas camadas físicas (*Physical Layer* – PHY) [FIGUEIREDO 2004]. Quatro padrões são especificados para a camada física do WIMAX: SC (*Single Carrier*), SCa (*Single Carrier* a), OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) e OFDMA. A camada física segue as especificações do padrão, tais como: multiplexação, vazão, sincronização de transmissores e receptores, correção e definição do espectro de freqüência.

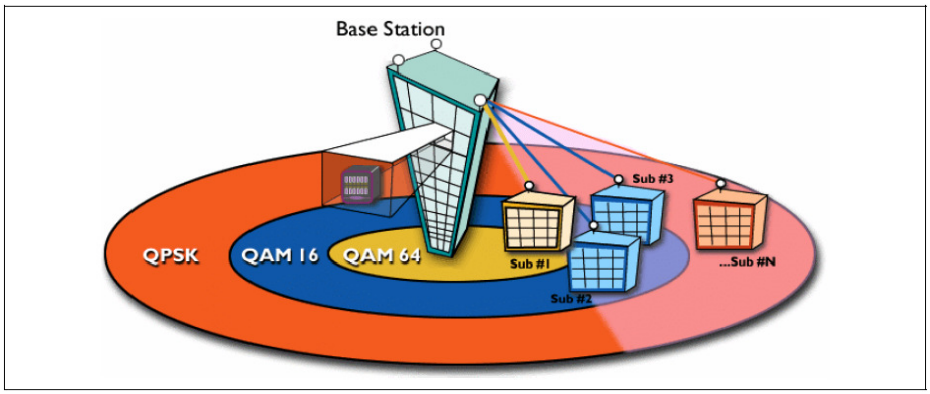


Figura 2.3 – Modulação Adaptativa por Perfil de Rajada

Fonte: [FIGUEIREDO 2004]

A camada física funciona com diferentes modulações, ver Figura 2.3, e depende de cada modelo. Quanto maior a quantidade de símbolos de uma modulação, maior a

taxa de dados, porém menos robusta ela se torna, diminuindo seu alcance. As modulações encontradas são: QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*); QPSK com mapeamento de Gray e constelação de 4 símbolos; 16-QAM (16 - *Quadrature Amplitude Modulation*), com constelação de 16 símbolos; 64-QAM com constelação de 64 símbolos, 256-QAM, com constelação de 256 símbolos; e BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*) e *Spread* BPSK com constelação de 2 símbolos [IEEE Std 802.16-2003].

2.3.1.1 WirelessMAN-SC

O padrão SC é um padrão da camada física do WIMAX para operar entre freqüências de 10Ghz e 66Ghz com alta flexibilidade, sendo necessário linha de visada entre a estação base e a estação cliente.

O sistema SC usa a modulação de acordo com a qualidade do enlace. A modulação QAM-64 é usada para uma alta qualidade em curtas distâncias; para um meio termo entre estabilidade e qualidade de conexão, é usado o QPSK; e para sinais com possibilidade de atenuação do sinal, é usado o QAM-64. O sistema leva em conta a distância entre a estação base (BS) e as estações assinantes (SS) [EKLUND, 2006].

O WirelessMAN-SC trabalha o quadro de *downlink* com a técnica TDM e para o quadro de *uplink* é usado o TDMA (*Time Divison Multiple Access*). O FDD suporta *full-duplex* e *half-duplex*, pois fica alocada uma freqüência para cada canal. No TDD, cada quadro possui tamanho fixo e as porções de *uplink* (*Uplink Subframe*) e *downlink* (*Downlink Subframe*) são ajustáveis, o que altera a capacidade de transmissão tanto para *uplink* quanto para *downlink.*

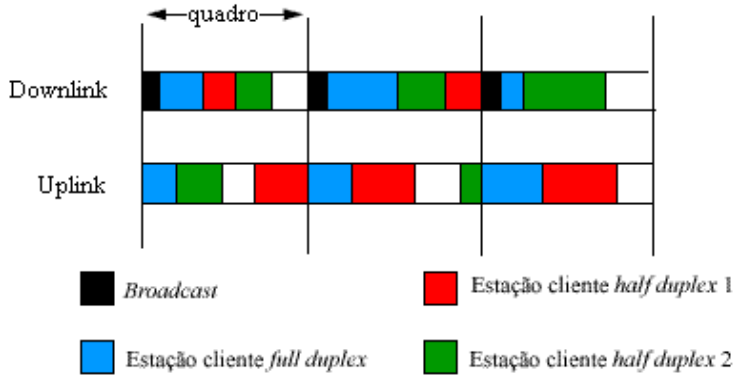


Figura 2.4 – Quadros de Downlink e Uplink

Fonte: [ALBERTI 2006]

O quadro é dividido em sub-quadro de *downlink* e sub-quadro de *uplink*, e a duplexação ocorre por FDD ou TDD. Dois canais com freqüências diferentes são alocados no FDD suportando *full-duplex* e *half-duplex*, sendo que o *downlink* pode ser feito em rajadas com suporte ao cliente *full-duplex* e *half-duplex*, já no TDD a divisão é por tempo, conforme a Figura 2.4.

No caso de uma transmissão *half-duplex* existe o tempo TTG (*transmit/receive transition gap*) presente entre *dowlink* e o *uplink* subseqüentes, fazendo com que a estação base entre em modo de espera. E existe o tempo RTG (*receive/transmition transition gap*), onde a estação cliente fica no aguardo.

O mapeamento de *downlink* é enviado no início de cada subquadro por uma BS, para determinar os *slots* de tempo de uma determinada SS. A alocação de *slots* de tempo é feita pela BS. Devido ao atraso de propagação do sinal pelo meio, o uso do TDD pode trazer problemas. Para que o TDD funcione corretamente, deve existir uma sincronização entre os quadros das SSs e os quadros da BS, e as SSs devem iniciar a transmissão de seus *slots* de tempo antecipadamente.

No caso do modo TDD, existe um preâmbulo para sincronização logo após uma seção de controle de broadcast com o *Downlink Map* (DL-MAP) e *Uplink Map* (UL-MAP), para indicar os *slots* físicos nas quais a rajada deve iniciar. As seções subseqüentes TDM carregam os dados e são divididas entre diferentes modulações e técnicas de erros antecipadas FEC (*Forward Error Correction*), com parâmetros fixos, com cada base decodificando a informação de controle em busca dos respectivos cabeçalhos MAC (Figura 2.5).

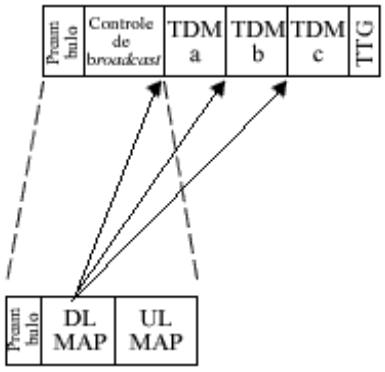


Figura 2.5 – Modo Time Division Duplex

Fonte: IEEE Std 802.16-2003

No caso de um sub-quadro de *downlink* FDD existe a possibilidade de suporte a estações cliente *full-duplex* e *half-duplex*, possibilitando a transmissão no mesmo quadro. Existe uma seção TDMA, controlada pelo DL-MAP, que permite a decodificação de somente algumas regiões específicas do sub-quadro, e é utilizado por estações *half-duplex* que necessitam transmitir antes de receber o *downlink* completo.

A Figura 2.6 mostra o sub-quadro de *uplink* para a transmissão da estação cliente para a estação base, onde cada cliente transmite no espaço reservado determinado no UL-MAP. Podem existir espaços para um primeiro acesso ao sistema, ou para requisições de banda para comunicação em *broadcast* ou *multicast*. A transmissão é em TDMA e as rajadas podem conter um número variável de PDUs, todas as transmissões são separadas por SSTGs (*Subscriber Station Transition Gap*) para evitar a interferência.

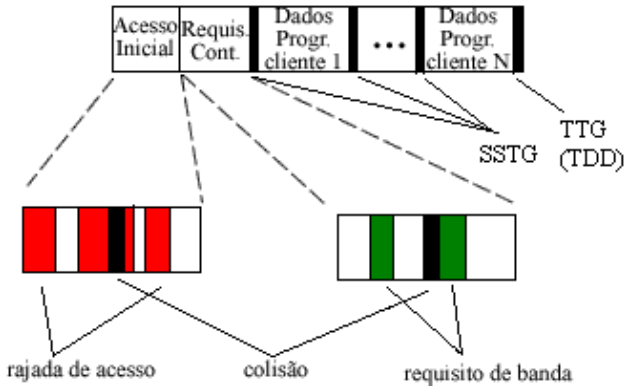


Figura 2.6 – Sub-quadro de uplink

Fonte: [ALBERTI 2006]

2.3.1.2 WirelessMAN-SCa

O padrão SCa utiliza apenas uma única portadora e foi a primeira com freqüências abaixo de 11GHz com transmissão sem linha de visada. O *uplink* utiliza TDMA e o *downlink* TDM ou TDMA. As modulações utilizadas são *Spread* BPSK, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM. Suporta FDD e TDD, modulação adaptativa e FEC, sendo esta utilizada no *downlink* e no *uplink*.

2.3.1.3 WirelessMAN-OFDM

O padrão OFDM usa o esquema de modulação OFDM, que transmite em múltiplos canais espaçados ortogonalmente e ao mesmo tempo, evitando interferências. Trabalha em faixas inferiores a 11GHz e padronizado para comunicação NLOS e FTT (*Fast Fourier Transform*) com 256 portadoras com ondas criadas a partir de uma transformada inversa de Fourier. Apenas 200 transmitem os dados, o restante são subportadoras de guarda (Figura 2.6). Suporta modulação adaptativa e FEC nos dois sentidos. O controle de acesso ao meio é feito por TDMA. O uso dessa interface aérea é obrigatória para bandas de freqüências não licenciadas.

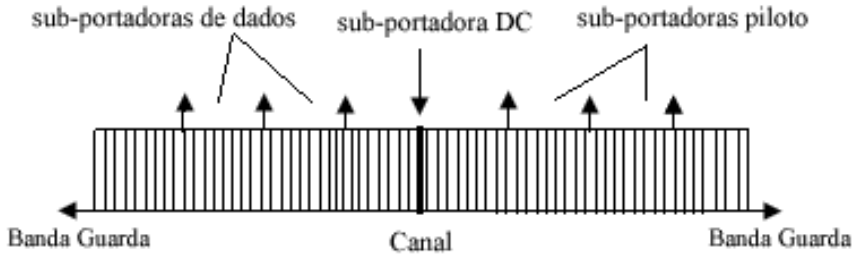


Figura 2.7 – Descrição das freqüências no OFDM

Fonte: [ALBERTI 2006]

No domínio de freqüência, existem três tipos de sub-portadoras: para transmissão de dados; pilotos, utilizadas em estimativas; e nulas, que não estão transmitindo no momento e são utilizadas como bandas guarda, sub-portadoras inativas ou sub-portadoras DC. As bandas guarda têm o objetivo de permitir que o sinal decaia naturalmente e de criar a forma de "muralha" do FTT. A sub-portadora DC equivale à freqüência RF central da estação. As modulações utilizadas por este padrão são BPSK, QPSK com mapeamento de Gray, 16-QAM e 64-QAM (opcional em bandas que não precisem de licenciamento).

Para bandas licenciadas, a duplexação pode ser tanto FDD quanto TDD. Em bandas não licenciadas, a duplexação deve ser TDD. A transmissão é baseada em quadros. O sub-quadro de *downlink* possui somente uma PDU, enquanto o sub-quadro de *uplink* é dividido em intervalos de contenção programados para requisitos iniciais e de banda, além de um ou vários PDUs, transmitidos por diferentes estações cliente.

Nas estimativas feitas neste trabalho foram utilizados rádios com essa especificação para a interface aérea.

2.3.1.4 OFDMA

O modo OFDMA é baseada em modulação OFDMA (*Ortoghonal Frequency Division Multiple Access*), e foi desenvolvida para operação sem linha de visada, com freqüências inferiores a 11 Ghz. O modelo emprega FTT com 2048 e 4096 portadoras. O símbolo no domínio do tempo é semelhante àquele do padrão OFDM, como mostra a Figura 2.7. No domínio de freqüência, a diferença é que as sub-portadoras são divididas em sub-canais.

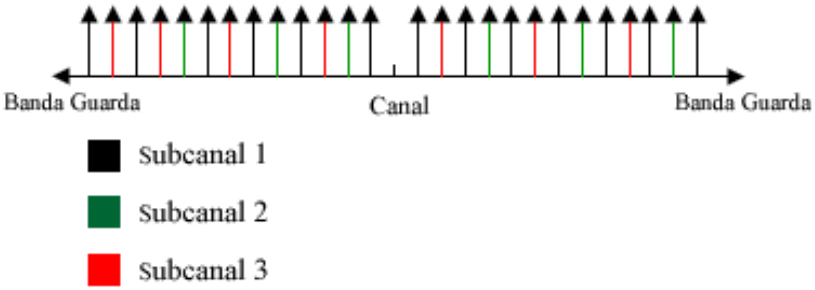


Figura 2.8 – Descrição das Freqüências no OFDMA

Fonte: [ALBERTI 2006]

No *downlink*, cada sub-canal pode ser utilizado para a transmissão para grupos diferentes de usuários. No *uplink*, cada cliente pode utilizar um ou mais canais. Diversos clientes podem transmitir simultaneamente. A divisão em sub-canais lógicos, conforme descrito na Figura 2.7, tem por objetivo a escalabilidade, acesso múltiplo e o processamento de grupos de antenas. Não é necessário que as sub-portadoras que compõem um mesmo canal sejam adjacentes, como indicado na Figura. As modulações utilizadas são QPSK com mapeamento de Gray, 16-QAM e 64-QAM (opcional).

2.3.2 Camada de Acesso ao Meio (MAC)

A camada MAC controla e distribui os recursos do limitado espectro do rádio entre a estação base e as estações clientes, enquanto a camada física tem funções específicas do rádio como modulação, codificação e alocação de freqüência física. Como o meio é limitado pelo rádio é importante que esta distribuição de recursos seja feita com eficiência, por isso a camada MAC tem algumas funções: agendamento de

dados, qualidade de serviço e gerenciamento de conexão. A camada MAC é orientada a conexão, e toda a comunicação de dados é associada a uma conexão.

Por utilizar um meio compartilhado, os ambientes sem fio exigem a adição de um nível extra de complexidade, principalmente na camada de enlace. O protocolo de controle de acesso ao meio (MAC) é o responsável por gerenciar toda essa complexidade [ISIKAWAC, 2009]. A camada MAC define como a interface aérea deve ser compartilhada entre os usuários em um canal sem fio, e por isso causa um impacto significativo no desempenho percebido pelo usuário, na capacidade do sistema e na complexidade no terminal remoto. A camada MAC é dividida em três subcamadas: segurança, convergência comum e convergência específica.

2.3.2.1 Subcamada de Segurança

Responsável por prover privacidade aos assinantes com autenticação, aplicando a criptografia de dados entre a SS e a BS. A BS força a criptografia na rede protegendo os dados através de dois protocolos. O primeiro é um protocolo de encapsulamento que define um conjunto de aplicativos de criptografia suportados e as regras para aplicação desses algoritmos no MAC PDU. O segundo é o protocolo de gerenciamento de chaves que fornece a distribuição de chaves de dados da BS para a SS.

Neste trabalho, as especificações de segurança não serão ativadas com o objetivo de melhor validar as técnicas de medições escolhidas.

2.3.2.2 Subcamada de Convergência Comum

A principal função dessa subcamada é estabelecer e gerenciar as conexões entre BS e SSs, suporte a qualidade de serviço e gerenciamento de largura de banda fazendo todas as adequações do quadro dependendo do tipo de conexão MAC (Figura 2.9).

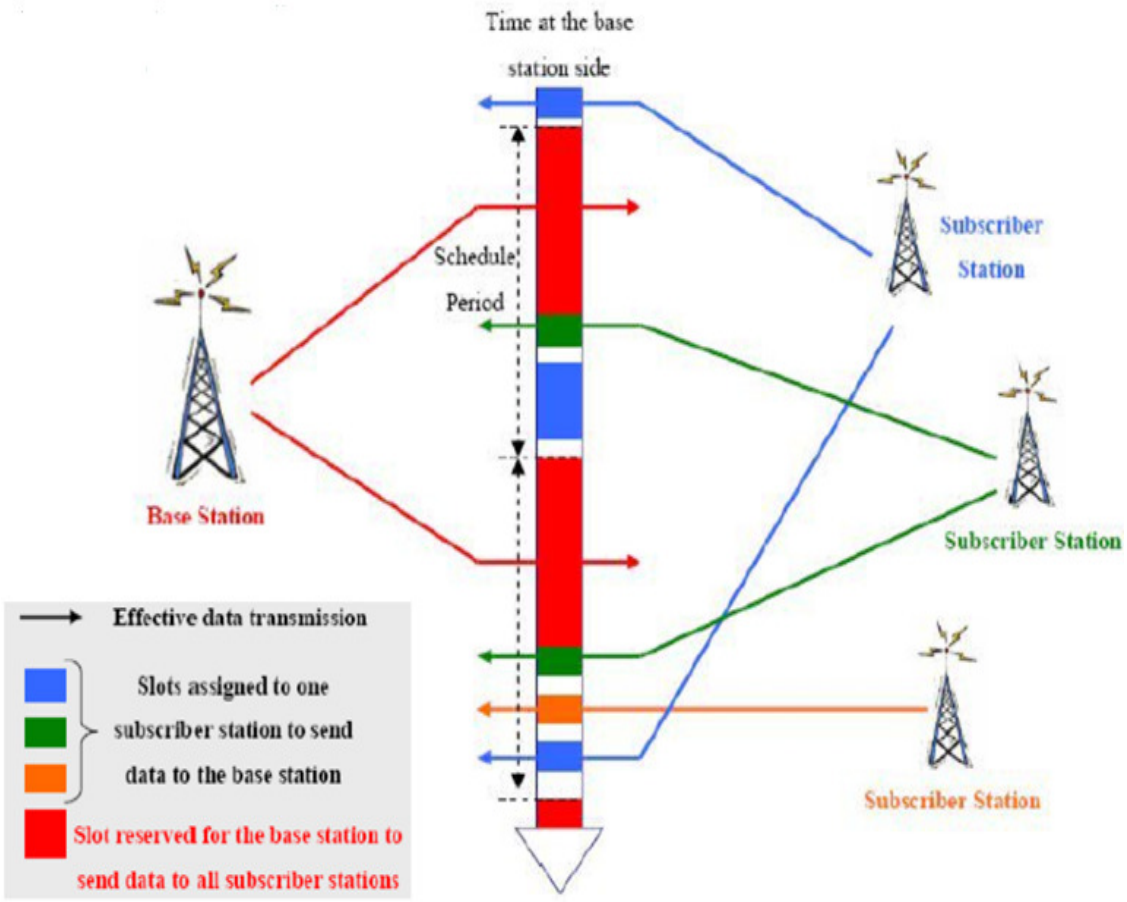


Figura 2.9 – Exemplo do Funcionamento da Subcamada de Convergência Comum

Fonte: [ALBERTI 2006]

A Figura 2.9 é um exemplo do funcionamento da subcamada de convergência comum. Neste caso, três estações clientes e uma estação base acessam o meio por períodos de tempos definidos. A estação base cria o mapa de *uplink* para que as estações tenham períodos de tempo para enviar seus dados, e o mapa de *downlink* informando os períodos de tempo que a estação base enviará informações para as estações clientes. O *downlink* (DL) consiste de uma ou múltiplas rajadas com diferentes modulações e códigos, e são enviadas com robustez crescente, ou seja, modulações que conseguem se comportar melhor em condições mais adversas como, por exemplo, causadas por situações climáticas. Estas rajadas são endereçadas para diferentes conexões chamadas CID (*Connection Identifiers*). Estes identificadores podem identificar rajadas endereçadas para estações clientes individuais, mensagens de *broadcast* ou múltiplas mensagens, e possuir valores específicos [Figueiredo, 2009].

Dentro do quadro de DL, primeiro é feita a sincronização por preâmbulos, logo após o FCH que define o tipo de modulação/codificação. Após encontram-se mensagens de controle, como DL-MAP, UL-MAP, mensagens UCD e DCD.

O padrão 802.16 do IEEE adotou quadros divididos em *slots* de tempo de duração de 0,5 até 2 ms para identificar as transmissões da camada física e para alocação de largura de banda. As subdivisões são chamadas de *downlink* e *uplink*. O subquadro de *downlink* possui três campos, o preâmbulo, o DL-MAP e o UL-MAP, usados para transmissões físicas no *downlink*, ou seja largura de banda e perfis de perda no *uplink*.

O DL-MAP, quando configurado para transmissão no quadro, é sempre o primeiro e descreve o conteúdo do *downlink*, contendo a BS, identificador da operação e elementos de informação sobre a rajada de dados. Estes elementos de informação no DL-MAP agem como um tipo de ponteiro para rajadas no *downlink* e contêm informações de para qual CID a rajada é endereçada e qual tipo de rajada, permitindo assim a estação cliente identificar quais rajadas escutar.

Depois do DL-MAP vem o UL-MAP com funções semelhantes ao DL-MAP, porém descreve o *uplink*. Estas rajadas são alocadas pelo BS para as estações enviarem dados de *uplink*. O UL-MAP descreve qual tipo de rajada e em qual momento a rajada alocada inicia.

O *uplink* é compartilhado pelas estações clientes, cada uma usa sua própria modulação e codificação para transmitir para a estação base. O UL-MAP enviado no *downlink* indica para quem cada rajada é endereçada e qual o tipo. A primeira parte do *uplink* é reservada para a disputa inicial, quando estações precisam se comunicar com a estação base para alcançar sincronização e intensidade de sinal adequada para a comunicação. A segunda parte do *uplink* é para requisições de largura de banda e estações clientes podem enviar mensagens de solicitação sem esperar pela alocação individual.

Na disputa inicial por tempo de transmissão e na requisição de largura de banda, podem ocorrer colisões, entre estações clientes ao transmitirem ao mesmo tempo durante este período. Para resolver esse problema, a mensagem UCD contém informações sobre a janela de *backoff* para ambos e que vão solicitar intervalos de

largura de banda. Quando uma estação quer transmitir em um desses períodos de disputa, ele configura a janela de contenção de acordo com mensagens UCD, aleatoriamente seleciona um número dentro desta janela e transmite de acordo com esse número. Caso não ocorra uma resposta, isto é interpretado como uma perda e a janela de *backoff* é incrementada de dois, e o processo é repetido até um número máximo de repetições. Após isso, cada estação cliente possuirá sua própria porção do *uplink* para enviar dados usando um tipo de rajada específica.

Uma estação pode solicitar um aumento na largura de banda ao BS, enviando uma mensagem solicitando ou uma requisição *piggyback*. As requisições podem ser enviadas em qualquer rajada de *uplink* com exceção de um pequeno intervalo inicial. Essas requisições podem ser incrementais ou agregadas, na incremental é adicionada a largura de banda já alocada pelo BS, e na agregada o valor atual é substituído pelo valor solicitado. Requisições usando *piggyback* são apenas incrementais. Uma estação sempre solicita largura de banda para uma conexão específica, porém o BS aloca as estações e não as conexões individuais.

2.3.2.3 Subcamada de Convergência Específica

Esta camada faz as adaptações necessárias para qualquer cliente de uma rede WIMAX. O nome é "específica" porque leva em consideração a tecnologia do cliente e, a partir dela, faz uma associação com duas especificações existentes hoje. A primeira especificação é a ATM CS, definida para dar suporte a convergência das PDUs geradas pelo protocolo da camada ATM de uma rede ATM. A Packet CS é segunda especificação, usada para o transporte de todos os protocolos baseados em pacotes, como o IP, o PPP e o Ethernet.

2.3.2.4 Características do IEEE 802.16 que Podem Influenciar as Medidas Estimadas

A camada física e a camada MAC do WIMAX possuem características que podem influenciar nos resultados das ferramentas de estimativa de capacidade com os métodos estudados. O objetivo desta subseção é identificar as características do IEEE 802.16 que podem alterar os resultados das ferramentas de medição estudadas e limitar o escopo dessa influência. Os tópicos abaixo descrevem essas características.

2.3.2.5 Concatenação

A concatenação é uma característica do WIMAX que ativa a agregação de muitos quadros de dados dentro de um mesmo quadro para transmissão em um enlace sem fio. Essa característica aumenta o *throughput* e reduz o *overhead* nesses enlaces, pois apenas um CRC é requisitado para um grupo de quadros. Quando a concatenação está ativada pacotes de dados são enfileirados em uma *bridge* interna e acumulados antes de um único quadro concatenado ser transmitido no meio sem fio.

Os quadros de dados podem ser acumulados até um tamanho máximo de 4032 bytes para os rádios Alvarion, que foram usados nos experimentos, e a BS trata diferente cada SS. Outra característica importante é o número máximo de quadros dentro de um quadro concatenado, que no rádio usado são oito.

Quando um quadro é identificado como um candidato para concatenação, ele é marcado e, caso não exista nenhum quadro concatenado para o mesmo destino, ocorre uma dessas duas ações: se a fila está vazia o quadro é transmitido imediatamente, porém se a fila não está vazia, o quadro é inserido em uma fila para concatenação. Quando um quadro é identificado como candidato e já existem quadros para o mesmo destino na fila, se o tamanho de ambos excede o tamanho máximo de um quadro concatenado ele é colocado como um quadro normal, e os quadros são enviados separados. Mas, se o tamanho não excede o tamanho máximo de um quadro concatenado, o novo quadro é adicionado ao quadro concatenado. Se este alcançou o tamanho máximo, ele é transmitido; caso não tenha alcançado, fica na fila até ser escalonado para transmissão.

Este processo é feito de forma separada para cada estação assinante. O processo ocorre com o encapsulamento de MAC SDUs em um único MAC PDU e podem ser de dois tipos, com MAC SDUs de tamanho variável e de tamanho fixo. No MAC SDU variável, existe a necessidade de se colocar alguns subcabeçalhos para informar o tamanho do MAC SDU junto às informações de controle, facilitando assim o processo de empacotamento e fragmentação. No caso dos fixos, não é preciso inserir estes cabeçalhos extras, pois já se sabe o tamanho das MAC SDUs. Após o recebimento pelos seus destinos, eles são remontados de modo que os MAC SDUs originais sejam restaurados sem que o receptor saiba que eles foram concatenados.

2.3.2.6 Burst

A função *Burst* tem o objetivo de providenciar um aumento do *throughput* reduzindo o *overhead* associado com a transmissão no meio sem fio. Isto é possível a

partir da redução do espaçamento entre quadros. Quadros unicast são transmitidos em rajada, sem qualquer período de contenção, até uma duração máxima que é configurável.

O *Burst* possui uma configuração de intervalo de tempo que define o tamanho do *Burst*, ou seja, o tempo em que quadros de dados serão enviados imediatamente sem período de contenção pelo meio sem fio.

2.3.2.7 MAC PDU

Os MAC PDUs possuem tamanho variável e são divididos em três partes: um cabeçalho genérico, MAC de tamanho fixo 6 bytes, um *payload* de tamanho variável e um código de redundância cíclica (CRC) opcional de 4 bytes. O tamanho máximo de um MAC PDU é 2058 bytes e o *payload* pode estar vazio ou preenchido com sub-cabeçalhos MAC SDUs. Existem dois tipos de cabeçalhos das MAC PDUs, o genérico e o de negociação de banda, que não possui *payload* e serve apenas para solicitar banda de *uplink* para uma determinada conexão.

2.3.2.8 Duplexing

Duas técnicas de *duplexing* são feitas pela MAC do WIMAX, TDD e FDD. No TDD as transmissões de *uplink* e *downlink* são multiplexadas no tempo e utilizam a mesma freqüência na camada física. Um quadro TDD tem uma duração fixa e é dividido em duas partes: uma porção de *uplink* (*uplink subframe*) e uma porção de *downlink* (*downlik subframe*). Esses subquadros são divididos em *slots* físicos para facilitar a largura de banda e esta varia para cada direção. No FDD as transmissões no *uplink* e no *downlink* são multiplexadas na freqüência e são diferentes. É possível transmitir de forma contínua no *downlink* e no *uplink*, e suporta SSs *full-duplex* e *half-duplex*.

2.3.2.9 Mapeamento

É a técnica utilizada para controle de acesso e alocação de banda no MAC. Difere de acordo com o tipo de camada física. Nas camadas físicas OFDM, que faz parte do escopo desse trabalho, o mapa de alocação de *uplink* (UL-MAP) utiliza como unidade símbolos e subcanais OFDM.

2.3.2.10 Resolução de Contenções

A alocação de banda no *uplink* é controlada pelo BS através de mensagens UL-MAP. Pode ser que ocorram colisões de tráfego nas fases de inicialização e nos intervalos de requisição de banda.

2.3.2.11 Suporte à Retransmissão

O suporte à retransmissão é opcional e pode ser ativado para cada CID no momento da criação da conexão. A informação de *feedback* ARQ pode ser enviada como uma mensagem individual de gerência MAC, em uma conexão básica de gerência apropriada ou via *piggyback* em uma conexão de dados existente.

2.3.2.12 Escalonamento

Com o escalonamento é possível definir a prioridade de transmissão de MAC SDUs pelas conexões existentes. Cada conexão de acordo com o CID pertence a um tipo pré-definido de escalonamento. Quatro classes são definidas e cada uma delas possui um conjunto de parâmetros que quantifica os seus pré-requisitos de QoS. As quatro classes suportadas são:

- ***Unsolicited Grant Service*** **(UGS)** - Classe para tráfego em tempo real com fluxo de taxa constante (pacote de tamanhos fixo), tais como emulação de circuitos e ATM CBR.
- ***Real Time Polling Service*** **(rtPS)** – Classe para tráfego em tempo real com fluxo de taxa variável (pacotes de tamanho variável), tal como vídeo MPEG.
- ***Non-real-time Polling Service*** **(nrtPS)** – Tráfego armazenado tolerante a atraso com fluxo de taxa varável (pacotes de tamanho variável), tal como vídeo armazenado MPEG.
- ***Best Effort*** **(BE)** – Tráfego de dados de taxa variável (pacotes de tamanho variável), tal como o TCP/IP.

2.3.2.13 Requisição de Largura de Banda

Processo no qual uma SS solicita à BS uma alocação de largura de banda específica. As requisições podem vir como um pedido isolado (MAC PDU) ou via *piggyback*, e podem ser incrementais ou agregadas. As requisições agregadas substituem a informação de banda necessária para a conexão, enquanto que as incrementais acrescentam a banda necessária à já existente. Requisições via *piggyback*

são sempre incrementais. A SS envia periodicamente requisições de banda. O processo de alocação de banda pelo BS é conhecido como *polling*. Essas negociações podem ser de uma única SS ou de um grupo de SSs e o objetivo principal é permitir que uma SS possa negociar banda para suas conexões [GRONDALEN, 2007].

2.4 Padrões WIMAX e Pré-WIMAX

O principal motivo da denominação Pré-WIMAX para a classificação de alguns rádios é o fato destes não trabalharem com frequências licenciadas. Os rádios Pré-WIMAX da ALVARION trazem também como diferenças em relação aos rádios WiMAX o fato de a correção de erros (FEC) e a confirmação (ACK) serem optativas. Essas características foram mantidas por não apresentarem problemas com as medições devido à proximidade das antenas e boa qualidade do enlace. Outra diferença entre o dois padrões é que os rádios WIMAX já trabalham com antenas microprocessadas, ou seja, os pacotes podem ser enviados em canais com freqüências distintas e podem assim ser enviados ao mesmo tempo. A Tabela 2.2 indica as bandas permitidas no Brasil. Um rádio do padrão WIMAX deve possuir as características definidas no Forum2 WIMAX. Os rádios Alvarion trabalham em faixas não licenciadas.

Tabela 2-2 – Freqüências Disponíveis para WIMAX no Brasil

Fonte: ANATEL

Faixa	Regulamentação	Frequências (MHZ)	Comentário
2,6 GHz	Res. 429 (13/02/06)	2500-2530 (FDD) 2570-2620 (TDD) 2620-2650 (FDD)	Compartilhada com o MMDS[3]
3,5 GHz	Res. 416 (14/10/05)	3400 a 3600	em licitação
5 GHz	Res. 506 (01/07/08) Seção X	5150-5350 5470-5725	Não precisa de licença

[2] O WIMAX Fórum – Foi fundado em junho de 2001, por indústrias líderes no segmento de telecomunicações e computação, com o objetivo de criar uma plataforma comum para o desenvolvimento da tecnologia WIMAX e auxiliar empresas a interpretar e modificar a especificação IEEE 802.16.

[3] MMDS - Serviço de Distribuição Multiponto Multicanal, conhecido como método alternativo de recepção de programação de TV a cabo.

3 Metrologia de Redes

A metrologia é a ciência que trata das medições e abrange todos os aspectos teóricos e práticos, qualquer que seja a incerteza, em quaisquer campos da ciência ou da tecnologia. A ação de estimar é o conjunto de operações que tem como objetivo encontrar o valor de uma grandeza, esta pode ser definida como sendo um atributo físico de um corpo que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado. Para as estimativas mais simples ou mais complexas, é necessário adotar um método de estimativa e um procedimento de medição para se obter o resultado pretendido.

Este capítulo trata dos conceitos de metrologia de redes e apresenta as principais técnicas para estimar características em um enlace, os principais métodos utilizados e ferramentas implementadas para validar os métodos existentes.

3.1 Conceito de Metrologia de Redes

A metrologia de redes estuda as estimativas, os processos que levam a estimar características e os erros associados a estes em redes de computadores. A estimativa é alcançada a partir de dois componentes, que são os métodos de medição e o instrumento de medição. Os métodos de medição podem ser definidos como técnicas de medição, ou seja, uma metodologia para conseguir estimar características em uma rede, e o instrumento de medição é uma ferramenta criada a partir de uma metodologia.

As medições de desempenho envolvem a análise de Estatísticas que verificam o comportamento da rede, podendo ser relacionadas ao tráfego de dados, protocolos, roteamento ou serviços. Para um diagnóstico preciso sobre Estatísticas em uma rede são necessárias ferramentas adequadas ao meio medido e elas devem ser confiáveis de acordo com a tecnologia de enlace utilizada. O tipo de tecnologia usado influencia nas técnicas de medição, e em redes com diferentes tecnologias de enlace a medição é fundamental, pois normalmente não conhecemos as características desse enlace [CARTER, 1996]. Nesse caso, as medições conhecidas como fim-a-fim usam os pontos terminais para obterem seus resultados.

Uma ação importante para uma melhor precisão das técnicas de estimativas é o uso de repetições para obter as características. Um número maior de medições da mesma estimativa melhora o resultado final da ferramenta, porém é necessário manter as condições da rede. Algumas tecnologias variam muito suas características no tempo, como, por exemplo, os enlaces sem fio, que são mais suscetíveis a sofrerem influências do meio. Para estas tecnologias é necessária a adaptação de certas técnicas.

De acordo com a técnica utilizada, um protocolo é escolhido para ser usado como agente na obtenção das características da rede. Grande parte das ferramentas utiliza o protocolo ICMP para obter o caminho que os pacotes percorrem na rede, através do envio de mensagens de erro ou controle. O TCP é o principal protocolo de transmissão de dados entre terminais, os mecanismos de retransmissão implementados por este protocolo, por ser orientado a conexão, fazem com que algumas ferramentas de medição utilizem essa funcionalidade para obter características das redes. A ferramenta TCP-eCAP, apresentada em [MARTINELLO 2007], aproveita pacotes enviados pelo protocolo TCP, sem o uso de pacotes extras em suas medições. Algumas ferramentas utilizam o protocolo UDP em suas estimativas, aproveitando as características de eficiência desse protocolo, porém, neste caso, a ferramenta deverá estar presente em ambos os lados, no emissor e no receptor. O protocolo SNMP é o padrão de gerenciamento de redes, fornecendo informações precisas de equipamentos de redes, mas é preciso acessos administrativos ou permissões de acesso de leitura de configuração nesses equipamentos.

Algumas características são desejáveis para as técnicas e ferramentas de medição em redes, como o uso de pouca ou nenhuma intrusão, precisão, rapidez e robustez. Uma ferramenta pode estimar características da rede com pouca ou muita intrusão: quanto maior for a intrusão, mais o tráfego normal da rede pode ser afetado. A precisão e a rapidez são essenciais para que aplicações possam usufruir dos resultados obtidos pelas ferramentas, principalmente em tempo real, e devido a uma gama de ambientes encontrados em redes como a Internet, a robustez da ferramenta é essencial para o seu emprego de forma eficiente[LAI, 1999].

A medição de desempenho em uma rede pode ser caracterizada por estatísticas como largura de banda, atraso de ida e volta, atraso unidirecional e perdas [AUGUSTO, 2002]. A largura de banda pode ser uma estimativa importante para protocolos e aplicações, sendo que existem três Estatísticas relacionadas: largura de banda de contenção, largura de banda utilizada e largura de banda disponível. Este trabalho

analisa o comportamento das ferramentas que estimam a capacidade de um caminho, conhecida também como largura de banda de contenção e definida como a quantidade máxima de dados que uma rede pode transmitir, de acordo com o enlace de menor capacidade no meio do caminho, chamado de gargalo. A largura de banda utilizada é a quantidade de dados que estão passando pelo enlace em determinado momento e a largura de banda disponível é a taxa máxima que pode ser transmitida considerando o tráfego existente no momento da medição.

Várias pesquisas são desenvolvidas para a área de estimativa de capacidade. A capacidade de um enlace pode ser definida como a taxa máxima que pode ser alcançada em uma conexão na ausência de qualquer tráfego, ou seja, qual a quantidade máxima em bps que pode ser enviado por determinado enlace. É importante definir que a capacidade do enlace é diferente da largura de banda disponível. Enquanto na capacidade do enlace temos a taxa máxima de transmissão de bits do enlace, na largura de banda temos a taxa de transferência disponível para uma aplicação em determinado instante, em outras palavras, a porção da capacidade de banda que não está sendo usada por tráfego concorrente [LAI, 2000].

Alguns trabalhos anteriores usam outros métodos para obter características de enlaces no meio do caminho. [CHEN, 2005] usou uma ferramenta baseada na técnica do par de pacotes, para estimar a capacidade de uma rede com enlaces sem fio do tipo AdHoc. [ROCHA, 2007] propôs um método que leva em consideração tempos específicos dos enlaces IEEE 802.11 como SIFS, DIFS e Backoff. [SO-IN, 2009] apresenta uma ferramenta de estimativa que leva em consideração a mobilidade em enlaces IEEE 802.11.

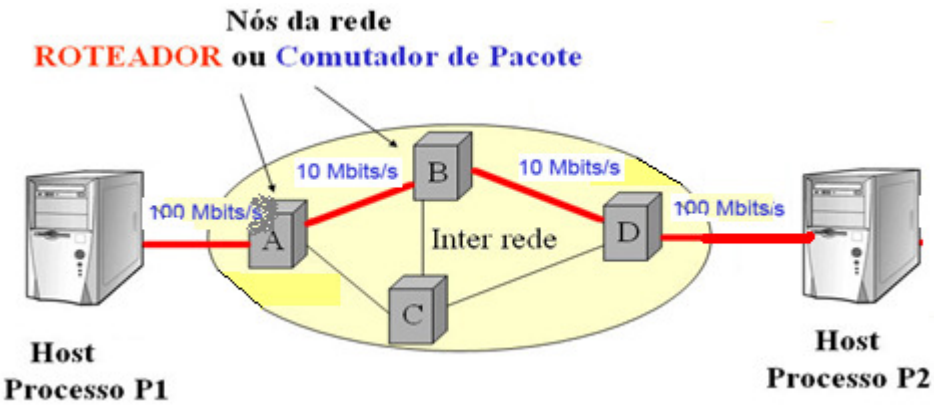


Figura 3.1 - Capacidade do enlace

O enlace de menor capacidade no caminho determina a capacidade fim-a-fim de todo o enlace. A Figura 3.1 mostra um caminho fim-a-fim com capacidade limitada pela interface de menor capacidade, que é de 10 Mbps, e nesse caminho são encontradas capacidades de 100 Mbps e 10 Mbps.

3.2 Medições Ativas e Passivas

Uma característica importante das técnicas de estimativa conhecidas é a forma como elas trabalham, e nesse ponto elas podem ser identificadas como ativas ou passivas. As ativas são as que injetam algum tipo de tráfego extra para conseguir resultados, porém trazem a vantagem de serem mais flexíveis para projetar pacotes de pesquisa, com propriedades particulares a fim de contemplar as requisições de medições, tais como média de atraso, perdas no roteador, capacidade e largura de banda disponível. As medições passivas não geram pacotes extras para obter suas medições, não aumentam o tráfego e em alguns casos não necessitam de administração dos equipamentos em qualquer lado do caminho que se deseja estimar, porém, são pouco flexíveis quando é necessário buscar informações mais específicas [CLAFFY, 2006].

3.3 Técnicas de Medição

3.3.1 VPS

Uma técnica conhecida é classificada como VPS (*Variable Packet Size Probing*). O VPS mede a capacidade de cada enlace em função do RTT da fonte até cada nó ao longo do caminho e do tamanho do pacote usado. Como exemplo de ferramenta que usa essa técnica, tem-se o *Pathchar*, de [JACOBSON 1997], uma técnica que usa pacotes de tamanhos variáveis para encontrar a capacidade de cada enlace no caminho. No caso do RTT, o *Pathchar* usa o campo *Time-To-Live* (TTL) do pacote ICMP, ao expirar o tempo de resposta de um determinado nó, é descartado e uma mensagem ICMP "*time-exceeded*" é enviada ao emissor. O emissor usa o pacote recebido para medir o RTT.

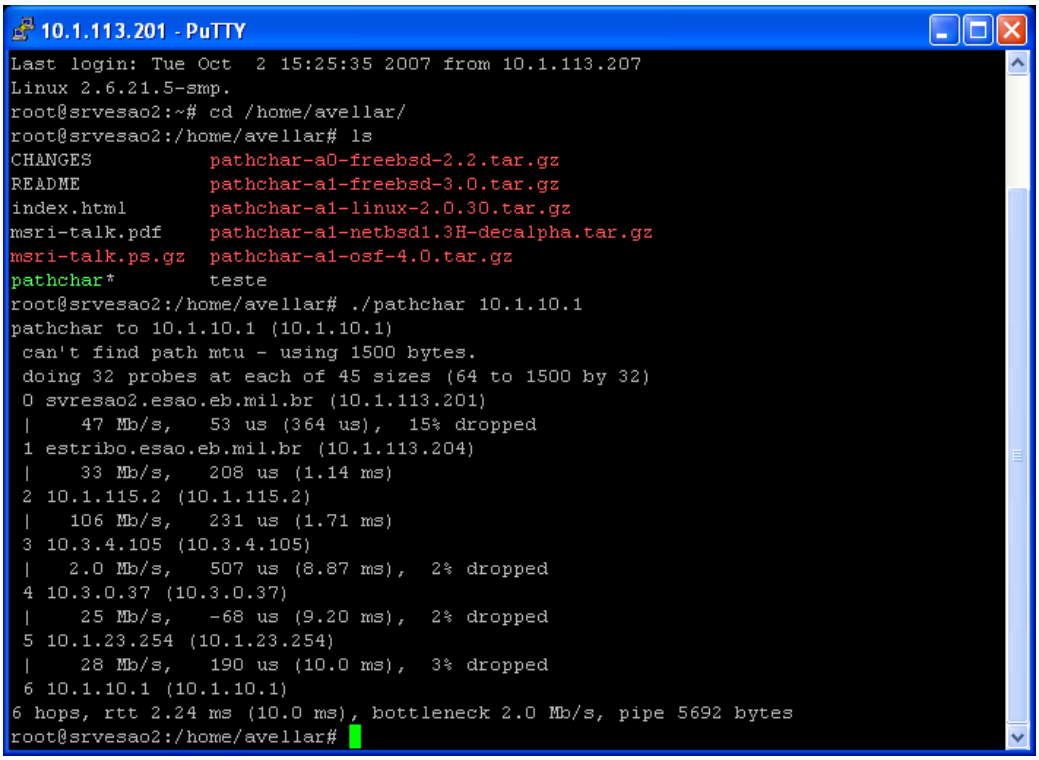


Figura 3.2 - Uso da técnica VPS com a ferramenta *Pathchar*

A Figura 3.2 indica um resultado após a utilização desta ferramenta em uma rede de teste, verificando-se que neste caso temos a capacidade do gargalo que na Figura aparece como sendo de 2 Mbps, correspondente a um canal E1 de um enlace rádio.

A técnica tem algumas suposições básicas: o tempo de transmissão é proporcional ao tamanho do pacote, os enlaces são formados por apenas um canal, os equipamentos roteadores no meio do caminho seguem a política do tipo armazena e envia e os pacotes ICMP não podem ser enfileirados. Outra observação importante é que os roteadores podem diminuir a prioridade de processamento a pacotes ICMP, alterando o resultado das medições. *Clink* e *pchar* são outras ferramentas que usam essa técnica[JACOB, 2003].

3.3.2 SLOPs

A técnica denominada SLOPs (*Self Loading Periodoc Streaming*) envia pacotes de tamanhos iguais em uma taxa constante e mede a disponibilidade de largura de banda no caminho fim-a-fim. Ferramentas como *Pathload* e *IGI* usam essa técnica. A ferramenta mais recente que trabalha com esse método é chamada *Spruce*. Um trabalho de JACOBSON (2004) apresenta essa ferramenta e a compara com as outras duas citadas. Os resultados das pesquisas mostram que as ferramentas que usam a técnica não

apresentam resultados precisos quando usados em enlaces de alta velocidade. mostrando elevadas discrepâncias. Isso ocorre quando a taxa do fluxo é maior que a largura de banda disponível do trajeto, pois neste caso o fluxo causará sobrecarga no enfileiramento da menor largura de banda disponível no enlace.

3.3.3 TOPP

O *Train Of Packet Pair* é uma medida que estima a largura de banda disponível enviando pacotes de pesquisa e guardando as informações para comparações posteriores. Um diferencial deste método é que ele pode estimar a largura de banda em um enlace congestionado.

O método TOPP é dividido em duas fases, a primeira envia pacotes de pesquisa através da rede, ou seja, gera um tráfego iniciando por uma pequena taxa de "n" pares de pacotes de tamanhos iguais. Após o envio deste primeiro grupo, a taxa é incrementada e uma nova série de pacotes é enviada. Estas ações continuam até o enlace alcançar a taxa máxima definida.

O tempo entre os pares de pacotes é escolhido de forma que o enfileiramento entre dois pacotes seja pequeno, o que é benéfico, pois os nós ao longo do trajeto não receberão longos *bursts*. O receptor recebe os pacotes de pesquisa colocam o tempo de recepção (*timestamp*) neles e os e reenvia à origem.

Após a fase de pesquisa, iniciá-se a fase de análise que se baseia no espaçamento decorrente do congestionamento na rede para se obter a largura de banda disponível tendo como base o tamanho dos pacotes e dividindo pelo tempo de separação entre eles. Uma explicação mais detalhada sobre pares de pacotes é explicada na seção 3.4 [CROCE, 2008].

3.4 Métodos para Estimativa de Capacidade

Vários métodos foram propostos para estimar a capacidade de um caminho, sendo que este trabalho pesquisa dois métodos, o método dos pares de pacote (*packet-pairs*), largamente utilizado para estimar a capacidade de contenção, e o método do trem de pacotes (*packet-train*), utilizado para verificar a disponibilidade de largura de banda.

O CAIDA[4] (FONTE) mantém uma página com ferramentas de medições em redes de computadores disponíveis para *download* e testes, além de outras ferramentas para melhor visualização dos resultados e artigos relacionados à análise de características em redes, acompanhamentos de projetos e apresentação de *workshops*.

3.4.1 Método dos Pares de Pacotes

Neste método, dois pacotes de mesmo tamanho e origem, separados por um espaço de tempo próximo de zero, são enviados por um caminho até um receptor, onde é computado o intervalo de tempo de chegada entre eles. A dispersão entre os pacotes do par é causada pela menor capacidade de transmissão ao longo do caminho. O espaçamento entre os pacotes é mantido até a passagem por um enlace com capacidade de transmissão inferior à do emissor e essa dispersão é mantida até o final, a não ser que no caminho exista algum enlace com capacidade menor.

A Figura 3.3 representa o funcionamento do método do par de pacotes com a dispersão criada pelo enlace de menor capacidade. A partir do intervalo de tempo entre as chegadas dos dois pacotes e o tamanho deles, é possível estimar a capacidade do enlace. Vale notar que o intervalo de tempo entre chegadas é medido entre o último bit do primeiro pacote do par e o último bit do segundo pacote.

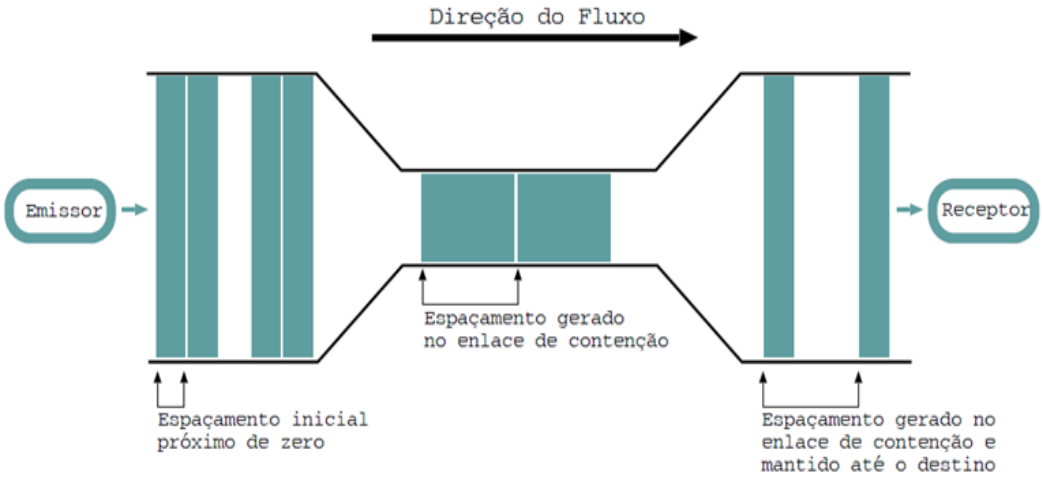


Figura 3.3 - Capacidade de contenção em um caminho

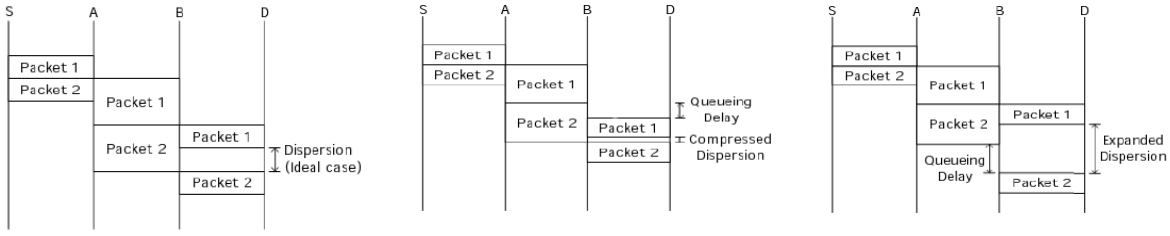
Fonte: Rocha, 2006

[4] Cooperative association for Internet data analysis (CAIDA) - programa de cooperação para medições de desempenho e análise de dados na Internet.

A capacidade é obtida pela divisão do tamanho do pacote pelo intervalo de tempo entre as chegadas:

$$C = \frac{\text{tamanho do pacote (bits)}}{\text{intervalo de tempo (segundos)}}$$

A Figura 3.4a representa uma situação ideal na estimativa de capacidade em um caminho: a dispersão após a passagem por um enlace de menor capacidade permanece até o resultado final. Os primeiros trabalhos com o uso do método do par de pacotes não levavam em conta o tráfego cruzado, porém a situação da rede durante a medição é essencial para a correta estimativa de capacidade. O tráfego cruzado pode interferir na precisão da estimativa de capacidade de duas maneiras: (i) pacotes à frente do par de pacotes podem diminuir a dispersão entre eles e a capacidade do caminho será superestimada, o item (b) da Figura 3.4 representa esta situação; (ii) por outro lado, pacotes do tráfego normal do enlace podem ser inseridos entre o par de pacotes, causando uma estimativa inferior à capacidade real de transmissão do enlace devido ao acréscimo da dispersão dos pacotes, como mostrado no item (c) Figura 3.4c.



(a) Caso ideal (b) Capacidade superestimada (c) Capacidade subestimada

Figura 3.4 - Situações que Podem Ocorrer na Estimativa de Capacidade por Par de Pacotes. Fonte: Kapoor, 2004

Muitas técnicas utilizam um histograma para medir de forma mais precisa a capacidade de um caminho usando o método do par de pacotes. Neste caso, vários pares de pacotes são disparados e a estimativa é aquela que apresenta a maior quantidade de amostras por capacidade obtida.

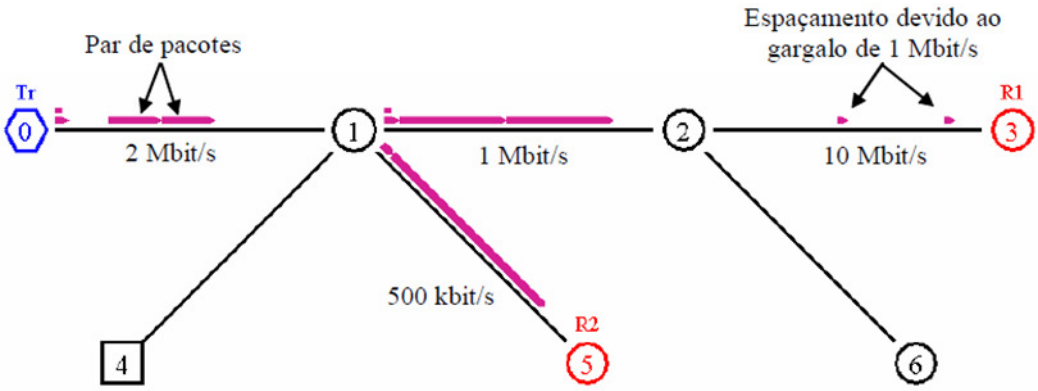


Figura 3.5- Exemplo numérico na estimativa de capacidade por par de pacotes

Fonte: Roesler (2003)

No exemplo da Figura 3.5, ao passar pelo enlace de 1 Mbps o par sofre um espaçamento que permanece até o receptor R1. Neste exemplo, o tamanho dos pacotes são de 1.500 bytes. Caso o tempo de chegada do primeiro pacote seja, por exemplo, de 1,734691s, e o segundo pacote chegue no tempo 1,746691s, a diferença entre eles será de 12ms. Ou seja, a capacidade será dada por:

$$(1.500 \times 8 \text{ bits}) / 12\text{ms} = 1 \text{ Mbps} .$$

Existem alguns pressupostos para o correto funcionamento desta técnica. Primeiramente, não pode existir reordenação de pacotes no meio do caminho, pois o tempo entre as chegadas pode até ser negativo e incorreto para a medição. O caminho não pode mudar durante a estimativa, pois neste caso os pares poderão apresentar valores diferentes. É necessária uma atenção especial com enlaces assimétricos, onde a largura de banda de contenção não é a mesma em ambas as direções. Neste caso haverá problemas se a medição envolver a ida e volta dos pacotes, pois a banda de contenção registrada será a de menor valor em ambos sentidos, não sendo possível (a priori) saber qual sentido apresenta a menor banda. O último pressuposto, conforme já mencionado, é que não pode haver a presença de um ou mais pacotes entre os pares enviados, pois isto faz com que o método não funcione corretamente.

3.4.2 Método do Trem de Pacotes

O método baseado em “trens de pacotes” é derivado do método do par de pacotes, sendo que a principal diferença está no fato de que são usados uma rajada de

pares de pacotes e a dispersão é obtida pela quantidade de tempo entre o último bit do primeiro pacote e o último bit do último pacote. A técnica do trem de pacotes é conceitualmente similar técnica do par de pacotes: a idéia é enviar uma quantidade L de pacotes de tamanho S e medir a chamada ADR (*Asymptotic Dispersion Rate*), definida como $R = (L-1)S/\Delta$, onde Δ é o tempo entre a chegada do primeiro pacote e do último pacote do trem. Comparada com a técnica do par de pacotes, a do trem de pacotes é mais robusta e menos sensível a erros, pois a dispersão é medida com uma quantidade maior de pacotes [JOHNSSON, 2004]. Porém, ainda existe a possibilidade do tráfego cruzado atrapalhar a estimativa.

3.5 Análise do Impacto na Medição pela Variação no Tamanho dos Pacotes

Em [ROESLER 2003], um estudo prático foi feito para analisar a influência do tamanho dos pacotes na estimativa de capacidade usando o método do par de pacotes. Para analisar esse impacto, foram usados pacotes de 64 bytes, 500 bytes e 1000 bytes, com ou sem tráfego concorrente. Os resultados deste estudo mostram que, na ausência de tráfego concorrente, não existem variações nas medições, e todos os resultados foram exatos. Porém, na presença de tráfego cruzado existe uma influência do tamanho do pacote na medição, e pacotes pequenos são menos estáveis. Foram usados fluxos TCP como tráfego concorrente na medição feita pelo artigo citado e os resultados mostraram que pacotes pequenos perdiam espaços na fila do roteador frente aos pacotes do fluxo TCP.

4 Estudo de Caso Um

Para uma avaliação prática do método do par de pacotes, foi utilizada a rede do Exército Brasileiro, denominada EBNet. Nela são encontradas diferentes tecnologias cabeadas e sem fio, dentro as quais enlaces de rádio no padrão IEEE 802.16. Este capítulo apresenta um estudo de caso utilizando uma ferramenta baseada no métdo do par de pacotes para estimativa de capacidade do caminho.

4.1 Testes Preliminares

Em [MARTINELLO 2007] é proposta a técnica denominada TCP-eCAP. Esta técnica usa o método do par de pacotes para estimar a capacidade de um caminho usando os pacotes de inicialização do protocolo TCP durante a fase de *slow-start*. O TCP-eCAP consegue inferir a capacidade do caminho com uma quantidade pequena de pacotes, necessitando apenas buscar uma página em um servidor *web*, por exemplo. Os arquivos relacionados com a ferramenta que se vale do TCPeCAP foram disponibilizados pela UFES e um ambiente foi montado na EBNet com o intuito de realizar experimentos com diferentes tecnologias de enlace, conforme descrito nas próximas seções.

4.2 O Ambiente da Rede do Exército Brasileiro

A rede de dados do Exército Brasileiro foi utilizada como ambiente de testes, uma rede usada para tráfego de dados, voz e vídeo. Para o uso da ferramenta TCP-eCAP, que será vista na próxima seção, foram selecionados servidores *web* localizados nas seguintes cidades: São Paulo (SPO), Porto Alegre (POA), Brasília (BSA) e Rio de Janeiro (RJO). A rede do Exército Brasileiro foi escolhida em virtude de possuir uma quantidade bem significativa de elementos heterogêneos, como enlaces de fibra ótica e uma grande cobertura com enlaces de rádio, diferenciando também na capacidade dos seus enlaces, além da administração de todos os equipamentos e conhecimento da largura de banda de todos os enlaces.

A Figura 4.1 mostra alguns exemplos de instalações próprias e equipamentos da rede EBNet. Estes enlaces localizados entre o morro do Sumaré, e o Instituto Militar de Engenharia, na cidade do Rio de Janeiro, foram neste primeiro estudo de caso.

Figura 4.1 – Antenas localizadas no morro do Sumaré e no IME-RJ

4.3 Estimativa Usando TCP-eCAP

O primeiro objetivo do TCP-eCAP, apresentado em MARTINELLO (2007), é mostrar que a estimativa de capacidade pode ser obtida realizando inferências no comportamento tradicional do TCP. Para isso, ele foi criado com o nome TCP-ECAP (*Embedded Path Capacity Estimator in TCP*), que mede no retorno dos pacotes a dispersão entre eles durante a fase de *slow-start*. Como os pacotes são enviados de volta, formando um par, a dispersão é proporcional ao atraso mínimo de transmissão ao longo do caminho de volta do par de pacotes.

A aplicação que roda o TCP-ECAP utiliza dois algoritmos: *Short Regulated* e *No Regulated Rate*. Ambos atuam no lado receptor do TCP e estimam as capacidades dos caminhos no início da conexão. São implementados dentro do código do Linux no módulo TCP com o objetivo de alcançar resultados precisos nas medições. Não existe a necessidade de possuir acesso ou permissão a máquinas remotas. O uso do TCP-ECAP permite que o receptor limite a quantidade de tráfego na rede, regulando o tamanho da janela e reduzindo o uso do espaço em *buffer* na presença de um gargalo. Outro aspecto importante é que o protocolo TCP foi projetado para ser controlado pelo lado emissor. O TCP-ECAP é baseado no lado receptor do TCP, calculando a capacidade com uma

precisão de 64 bits. O tempo de resposta é rápido, podendo ser utilizado de forma rápida pelas aplicações.

O TCP-eCAP usa a dispersão do par de pacotes e o método de filtragem *minimum delay sum*, que utiliza os pares de pacotes que não sofreram atrasos no caminho. Este método filtra os resultados obtidos, descartando pares que sofreram atrasos ou enfileiramentos ao longo do caminho. Para cada ciclo RTT, o número de pacotes permitidos pela janela de recebimento é dobrado, fazendo com que fique difícil não descobrir pacotes que podem ser usados para a medição. Um usuário realizando um *download* de uma página em um servidor *web* pode ser informado sobre a capacidade do presente caminho. A implementação básica do TCP faz com que a conexão seja controlada pelo lado emissor, mas o TCP-ECAP utiliza as medidas em termos de escalabilidade e a conexão passa a ser controlada pelo lado receptor, informando ao emissor o tamanho que deve ser usado na janela.

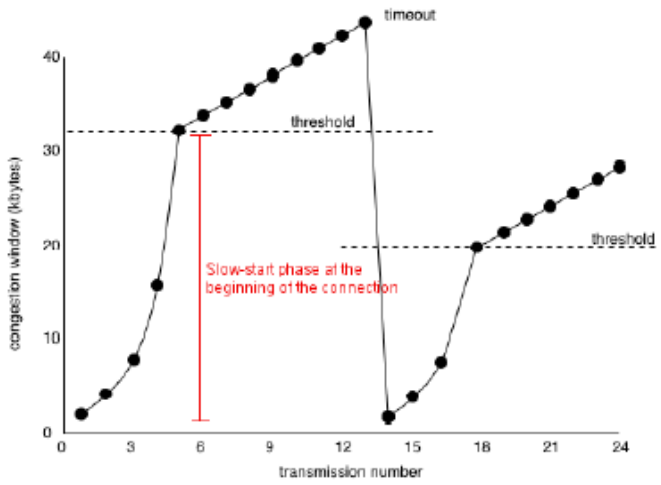


Figura 4.2 - Fase *slow-start* no controle de congestionamento TCP

Fonte: Tanenbaum, 2003

Para medir a capacidade é necessário obter pares de pacotes enviados do transmissor para o receptor durante uma conexão TCP normal, e um instante disponível para obter essas amostras está no início da fase de transporte, ou seja, no *slow-start*, descrito na Figura 4.2.

No TCP, quando uma conexão é estabelecida, o emissor inicializa a janela de congestionamento para o tamanho máximo do segmento em uso na conexão e então envia um pacote. Para cada ACK recebido antes do *time-out*, a janela de

congestionamento é incrementada de um, o que torna seu crescimento exponencial. Na ocorrência de um *time-out* , o que pode caracterizar um atraso na rede, a janela de congestionamento retorna ao seu valor inicial.

Sendo assim, para cada ACK recebido durante a fase de *slow-start*, o transmissor prepara dois pacotes para serem transmitidos, um correspondendo ao ACK recebido e o outro referente ao incremento da janela de congestionamento. Logo, para todo ACK enviado pelo receptor, um par de pacotes é transmitido de volta pelo transmissor. O TCP-ECAP usa esse comportamento do TCP e aproveita os pares de pacotes que chegam no receptor, sem que a arquitetura do TCP seja mudada ou sejam incluídos quaisquer pacotes de pesquisa.

4.4 Resultados Usando o PathCrawler

Os experimentos descritos nesta seção apresentam de forma gráfica os resultados obtidos por uma ferramenta que usa a técnica do par de pacotes para estimar a capacidade do caminho [MARCONDES, 2008]. Esta ferramenta é chamada de *PathCrawler*. O objetivo é mostra de forma gráfica e sucinta a capacidade de todos os caminhos para servidores *web* usados na rede de dados do Exército, a partir da estrutura localizada na cidade do Rio de Janeiro.

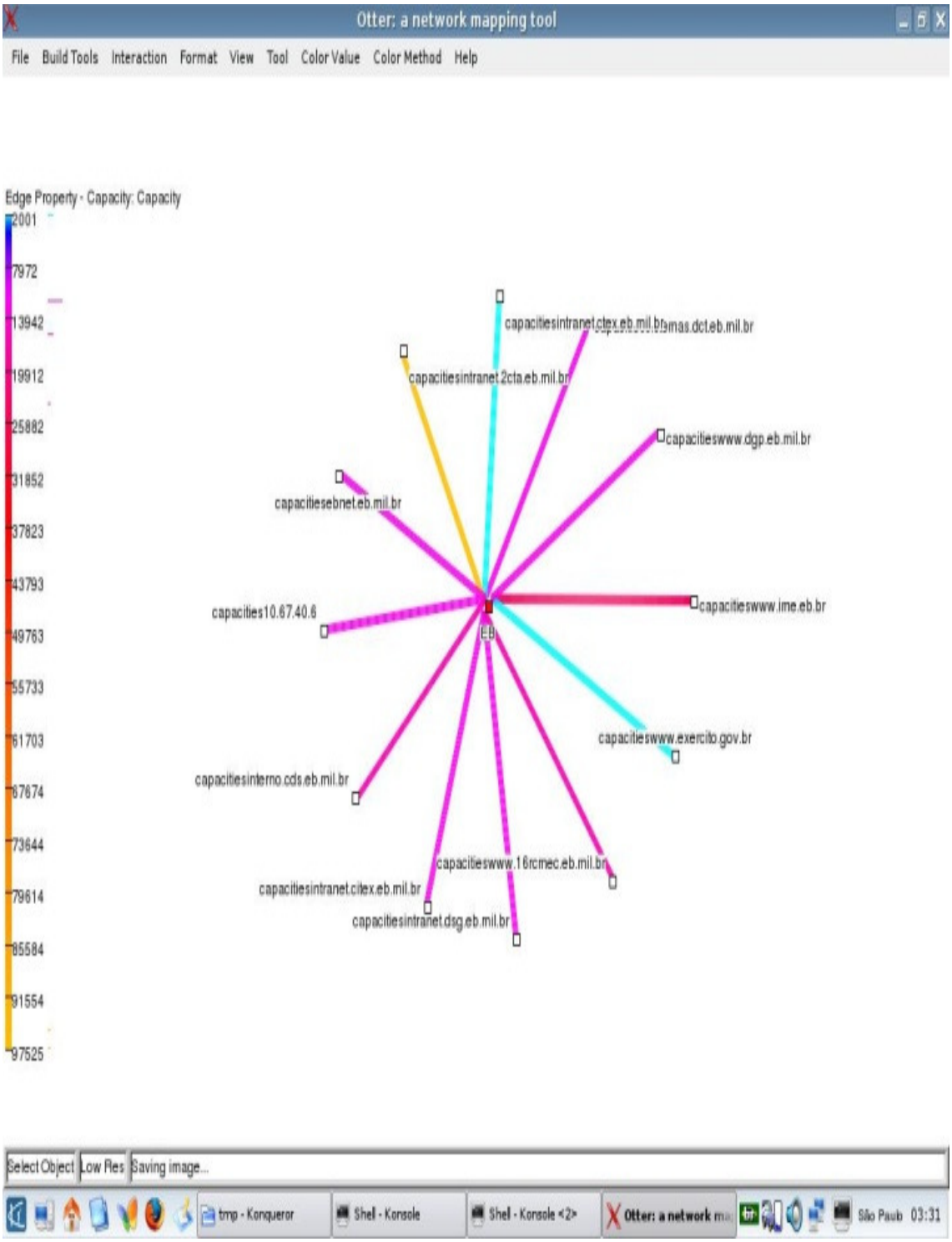


Figura 4.3 - Experimentos com PathCrawler na rede do Exército

A Figura 4.3 mostra os resultados obtidos com o PathCrawler. Neste caso, foram escolhidos apenas pontos localizados dentro da rede do Exército, espalhados pelo estado do Rio de Janeiro e Brasília (Distrito Federal), ressaltando-se que da origem (EB) até o destino encontram-se enlaces com capacidades diferentes. Como exemplo, tem-se o enlace de cor azul claro, com destino ao *site* www.exercito.gov.br, em que foi estimado

um enlace de aproximadamente 2 Mbps. Esta informação é verdadeira, pois o “gargalo” desse caminho é um canal E1 com 2 Mbps. As linhas de cor rosa representam uma saída do Rio de Janeiro para Brasília em um enlace MPLS contratado com capacidade de 14 Mbps, que é o gargalo desse caminho. A linha próxima à cor vermelha, com destino ao www.ime.eb.br, é um enlace rádio que no momento dos testes estava funcionando com 21 Mbps. E a linha próxima da cor laranja é uma máquina localizada na própria rede local com conexão *fastethernet*, por isso a capacidade próxima de 100 Mbps.

4.5 Conclusões Preliminares

Neste ambiente de teste inicial foram usados rádios instalados em pontos da cidade do Rio de Janeiro que fazem parte da Rede do Exército em nível nacional, EBNet, um ambiente propício para estes testes por possuir uma rede própria e heterogênea de enlaces sem fio, com diferentes capacidades (Figura 4.4).

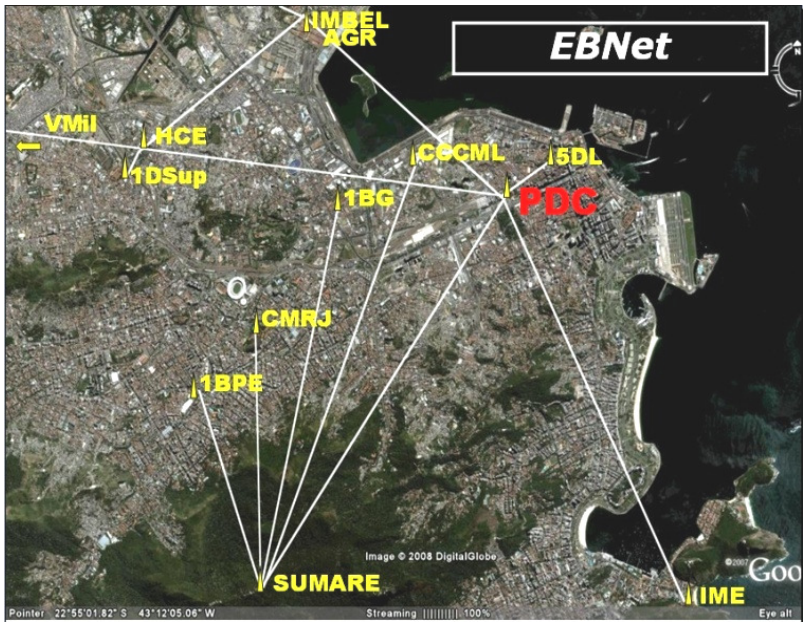


Figura 4.4 - Enlaces sem fio da rede do Exército na cidade do Rio de Janeiro

Nos resultados obtidos para este primeiro estudo de caso, um valor de 7 Mbps foi estimado para um enlace pré-WiMAX cuja capacidade real era de 6 Mbps ou seja, apresentou um valor acima do esperado. Outras ferramentas que serão detalhadas no capítulo 5, como *capprobe* e *pathrate*, foram usadas e o erro persistiu, concluindo-se que deveria se tratar de algum problema ligado ao método do par de pacotes, quando aplicados em caminhos com enlaces de rádio no padrão WiMAX.

5 Estudo de Caso Dois

Os testes foram feitos com e sem tráfego cruzado, em diversos horários. Porém, por ser uma rede em plena produção, testes mais específicos só poderiam ser feitos com avisos prévios e em horários reduzidos. Com o aumento da quantidade de testes, estes foram conduzidos nas instalações da empresa Alvarion, fornecedora dos rádios, mas a disponibilidade do laboratório era apenas em horário comercial. Uma oferta de empréstimo de dois rádios foi então feita pela Alvarion e um laboratório foi montado, não existindo mais a limitação de horários para realização dos experimentos. Um segundo estudo de caso foi então realizado a partir da montagem deste laboratório.

5.1 Ambiente Controlado para Testes

O laboratório montado possuía dois rádios pré-WIMAX e quatro computadores, dois deles ligados nas portas Ethernet de cada rádio. Um computador servia para alteração de configuração dos rádios e verificação dos contadores de pacotes no enlace sem fio, serviços estes feitos através do software de gerência BreezeConfig. No segundo computador foram colocados programas escritos em linguagem C para extrair os dados fornecidos pelas ferramentas de medição e estruturá-los para exportados em uma planilha para geração de gráficos. Foram usadas antenas direcionais com uma distância de quatro metros entre elas em ambiente fechado.

5.1.1 Especificações do Enlace de Rádio

Os experimentos foram realizados com a utilização de dois rádios pré-WiMAX BreezeAccess VL do fabricante Alvarion. A estação base usada foi a AU-E-AS-5.8VL e a estação do assinante a SU-A-5.8-24BD-VL. Eles suportam uma taxa de transmissão de até 54 Mbps e funcionam na faixa de freqüência de 5.8GHz. Um software de gerência chamado BreezeConfig foi utilizado para facilitar a configuração dos rádios, acompanhar através de contadores, a quantidade de pacotes que atravessaram os enlaces e fornecer dados estatísticos.

O rádio ALVARION emprega técnica de multiplexação OFDM com um conjunto de subcanais. Um dos problemas comuns em redes sem fio baseadas em topologia Ponto-Multiponto é o desbalanceamento de cobertura entre os enlaces de subida (*uplink*) e de descida (*downlink*). Nesse ambiente, as estações clientes sofrem restrições quanto ao consumo de potência e à potência máxima de transmissão, e a cobertura é limitada pelo enlace de *uplink*.

A Tabela 5.1, extraída do manual dos rádios Alvarion, apresenta os principais parâmetros encontrados nos rádios utilizados para os experimentos, assim como as características do enlace de rádio construído.

Os rádios usados tinham uma capacidade de 54 Mbps, porém, de acordo com o manual, as taxas efetivas de *throughput* TCP com a modulação de nível oito eram, no canal de *uplink*, 26.4Mbps e, no canal de *downlink*, 31.1 Mbps. Esses foram os valores levados em consideração na comparação dos resultados das ferramentas de estimativa de capacidade.

Tabela 5.5-1 – Parâmetros dos Rádios Alvarion

ITEM	DESCRIÇÃO
Banda	5.8GHz
Freqüências	5.725 – 5.875 GHz
Antena integrada (SS)	20 +/- 1 dBi típica in the 5.250-5.875 GHz band, 14o AZ x 14o EL, polarização vertical/horizontal
Antena na BS	AU-Ant-5G-17-90: 17 dBi typical, 5.150-5.875 GHz,90o AZ x 6o EL sector antenna, polarização vertical
Distância	4 metros
Largura de banda do canal	20 MHz
Porta da antena	50 ohm
Potência máxima de entrada na antena	-30 dBm

Potência máxima de saída	21 dBm
Técnica de multiplexação	OFDM
Modo de operação	Time Division Duplex (TDD)
Nível de modulação	8
Sensibilidade	-71 dBm
SNR[5] mínimo	23dB
Modulação Adaptativa	Modulação OFDM, 64 FFT points; BPSK, QPSK, QAM16, QAM64
Conector Ethernet	10/100Base Ethernet (RJ-45)
Encriptação de dados	Desativado
Taxa nominal de throughput no sentido BS-SS	31.1 Mbps
Taxa nominal de throughput no sentido SS-BS	26.4 Mbps

5.2 Ferramentas Usadas para Estimativa de Capacidade

Para analisar as questões levantadas, foram utilizadas as ferramentas Pathrate[6] e Capprobe[7], que estimam a capacidade de um caminho de acordo com o enlace de menor capacidade encontrado.

[5] Obtida através do calculo do logaritmo da relação entre potência do sinal e potência do ruído na recepção.
[6] Ferramenta de estimativa de capacidade fim a fim que usa as técnicas de pares de pacotes e de trem de pacotes junto com técnicas estatísticas para estimar a capacidade de um enlace que é o gargalo em um caminho.
[7] Ferramenta de estimativa de capacidade fim a fim que usa a técnica dos pares de pacotes através de uma análise de probabilística para inferir o gargalo em um caminho fim a fim.

5.2.1 Capprobe

A ferramenta denominada *Capprobe* combina a possibilidade de obter a estimativa de capacidade pela dispersão dos pacotes. O *Capprobe* é executado em modo *kernel*. A principal diferença dessa técnica para as demais, como *Pathrate* e TCP-eCAP, está no fato do *Capprobe* ser bidirecional (trabalha com ICMP e RTT) e combinar atrasos e medições de dispersões de pares de pacotes a fim de filtrar distorções. A estimativa de capacidade de caminho por pares de pacotes, conforme já mostrado, pode ser influenciada pela presença de tráfego cruzado e enfileiramentos ao longo do caminho, causando discrepâncias. O *Capprobe* filtra essas discrepâncias nas medições monitorando os atrasos dos pares de pacotes e fazendo uma análise estatística. A ferramenta usa o chamado *minimum delay sum*, que é a soma dos atrasos de um par de pacotes que não sofreu modificações na dispersão devido a tráfego cruzado, isso ocorre com uma comparação entre o tempo de ida e volta que é usado como parâmetro. Baseado nessa informação, o *Capprobe* calcula a soma dos atrasos de todos os pares de pacotes e usa a dispersão do *minimum delay sum* para estimar a capacidade do enlace, que é o gargalo no caminho.

O *Capprobe* possui um baixo custo operacional e uma rápida estimativa de capacidade. De acordo com [KAPPOR 2004], a ferramenta pode ser bem aplicada a enlaces sem fio onde a qualidade do enlace varia com freqüência, pois as medições são realizadas em tempo real de acordo com a capacidade do enlace.

5.2.2 Pathrate

Para estimar a capacidade de um caminho, a ferramenta *Pathrate* necessita ser usada em ambos os lados de uma rede, pois são necessários um aplicativo transmissor e um aplicativo receptor. Ou seja, requer a cooperação de ambos os lados em uma rede, o que lhe permite análises unidirecionais. O *Pathrate* usa UDP para transferir pacotes gerados e cria uma conexão TCP para controle entre o transmissor e o receptor. Todos os pacotes perdidos são ignorados, além de abortar o processo quando detecta um dado número consecutivo de perdas no caminho.

Pathrate tenta estimar a capacidade de um caminho a partir de três fases. Na primeira fase, ele detecta o maior tamanho de um trem de pacotes que um caminho pode transferir sem causar perdas. São gerados sessenta trens de pacotes de tamanhos

crescentes que são usados para, primeiro, tentar verificar se o enlace tem sub-canais ou algum tipo de modelador de tráfego e, segundo, verificar se o enlace contém baixa variação na dispersão entre os pares de pacotes. Normalmente em enlaces com pouco tráfego cruzado, é medido um coeficiente de variação. Se este coeficiente for menor que um certo limiar, o *Pathrate* termina a primeira fase com o valor final, ignorando valores menores ou maiores. O *Pathrate* entra na segunda fase, quando não consegue estimar a capacidade usando o coeficiente de variação na fase inicial. Neste caso, o *Pathrate* envia 1.000 pares de pacotes com tamanhos variados, entre 550 bytes e o maior tamanho da MTU encontrado na fase inicial. No fim desta fase, o *Pathrate* descobre todas as faixas de estimativas possíveis no enlace. Na terceira e última fase, o *Pathrate* usa procedimentos estatísticos da segunda fase e estima a ADR (*Asymptotic Dispersion Rate*), até a distribuição ser convergida para apenas uma moda, e envia 500 trens de pacotes com o máximo MTU encontrado e o máximo de número de pacotes possíveis em cada trem. Se foram encontradas muitas faixas, a estimativa de capacidade é a faixa que provavelmente mais se aproxima dos valores estatísticos encontrados nas outras fases [Dovrolis 2005]. O *Pathrate* fornece a capacidade final após o término da terceira fase.

O *Pathrate* é robusto para medir enlaces com pouco ou algum tráfego, e um ponto importante é que esta ferramenta não é prejudicada pela assimetria na rede, devido ao fato desta só medir o atraso unidirecional do pacote.

5.3 Tamanho dos Pacotes

O tamanho dos pacotes usados nos testes foi variado. Isto porque, de acordo com trabalhos anteriores, o resultado da medição de capacidade usando a técnica do par de pacotes poderia variar com pacotes de tamanhos diferentes. Além disso, as funcionalidades do IEEE 802.16 que podem afetar as técnicas de medição podem também ter ligação com o tamanho dos pacotes, como se verificou ser o caso ao se usar concatenação.

Diante das possíveis variações de resultado, foi escolhido usar pacotes de tamanho 100 Bytes, 500 bytes e 1.500 Bytes, este último equivalente ao MTU default para interfaces Ethernet.

5.4 Limitações e Problemas Encontrados

Durante a realização dos experimentos, foram encontrados alguns problemas com a modulação adaptativa, tráfego excessivo de controle no enlace rádio, eventos de reinicialização dos rádios, além de limitações quanto ao seu uso, como a impossibilidade de monitoramento diretamente no enlace de rádio e a presença de várias outras tecnologias embarcadas no rádio Alvarion.

5.4.1 Problemas com Modulação Adaptativa

O IEEE 802.16 possui as modulações QPSK e QAM. De acordo com a troca de informações entre as estações base e cliente, a modulação a ser adotada é adaptada às condições do enlace de rádio, onde as modulações com muitos símbolos alcançam maiores taxas de dados, porém tem o seu alcance reduzido.

Tabela 5-2 - Capacidade do enlace por nível de modulação

Fonte: Manual Alvarion

Modulation Level	PHY Rate (Mbps)
8	54
7	48
6	36
5	24
4	18
3	12
2	9
1	6

Os níveis de modulação são trocados dinamicamente de acordo com as condições do enlace e o algoritmo providencia que um BS possa alocar modulações diferentes para cada estação assinante conectada. Nos testes feitos no laboratório montado, a modulação inicial era nível 8, conforme a Tabela 5.1. Porém, durante as medições foi verificado que o rádio trocava várias vezes de modulação, fazendo com que os resultados do Pathrate, por exemplo, convergissem apenas depois de um longo tempo, ou simplesmente não chegassem a um valor final. Este problema foi resolvido

desativando a modulação adaptativa. Após isto, os experimentos usando a ferramenta Pathrate ocorreram sem erro.

As antenas foram fabricadas para trabalharem em ambientes externos e com grandes distâncias entre elas. Em um ambiente fechado com distância de quatro metros, ocorriam reflexões que eram sentidas pelo rádio. Uma grande quantidade de pacote era perdida e este, a fim de melhorar a qualidade do sinal, trocava constantemente sua modulação. A simples diminuição da potência de sinal das antenas resolvia esse problema, porém a possibilidade de alteração da capacidade do canal deixaria o ambiente do laboratório menos controlado. Para manter as características de capacidade máxima do enlace, optou-se por desativar a modulação adaptativa. Em relação a medições em ambientes externos, estes têm menos chances de sofrer com problemas de reflexão, embora sofram outros problemas relacionados a clima e interferências.

5.4.2 Limitações no Monitoramento do Enlace de Rádio

A maior limitação nos experimentos usando o rádio Alvarion foi a impossibilidade de captura dos pacotes que trafegavam no enlace sem fio. Os softwares de gerência disponibilizados pelo fabricante não resolvem esse problema, e qualquer tentativa de captura por softwares que alcançam sucesso no 802.11 [PERSSON , 2009] [SUN, 2005] não foram bem sucedidos em enlaces 802.16. Para contornar essa limitação, foi preciso alinhar informações fornecidas pelo software de gerência da Alvarion com a ferramenta Wireshark instalada para capturar os pacotes nas interfaces de rede Ethernet dos PCs ligados aos rádios. As informações provenientes do software de gerência são contadores associados aos quadros trafegados pelo enlace de rádio, conforme mostrado na Figura 5.1. Informações como quadros concatenados, quadros unicast e descartes eram analisados nos dois sentidos, de downlink e de uplink, e comparados com os pacotes capturados na origem e no destino onde a ferramenta Wireshark estava instalada.

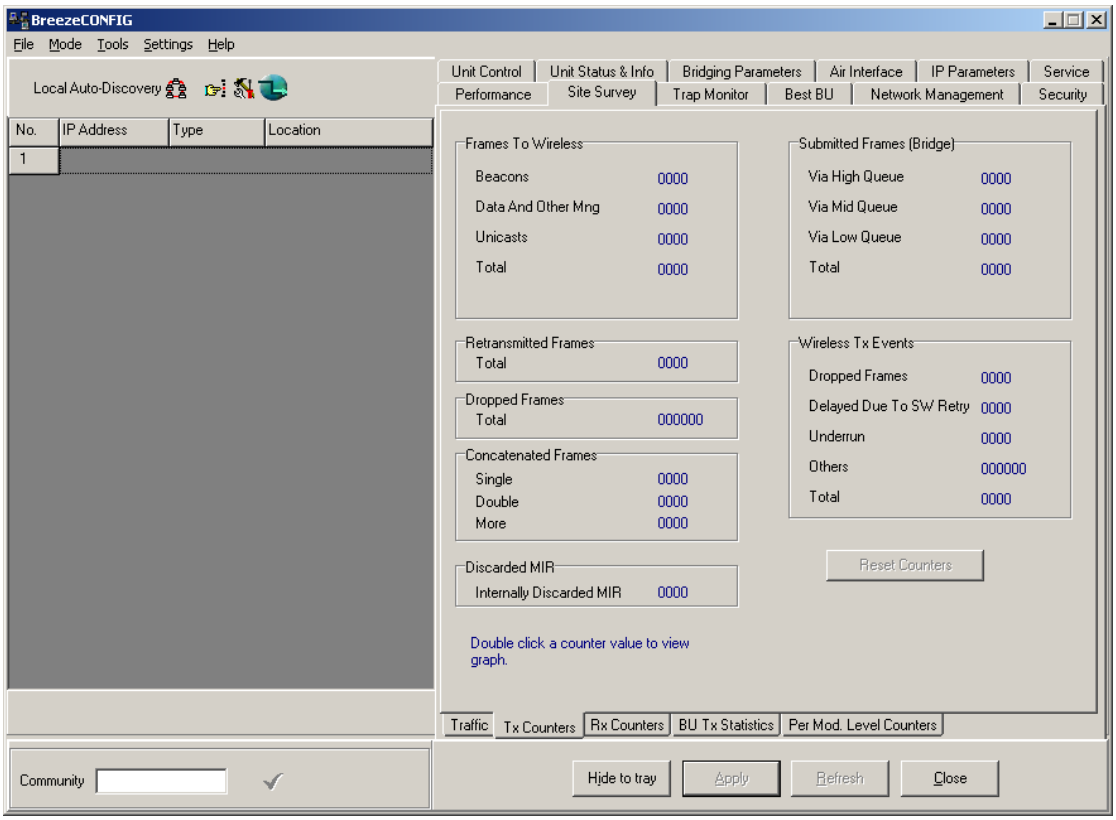


Figura 5.1 - Tela de gerência dos rádios apresentando os contadores.

Fonte: [BREEZE]

5.4.3 Tráfego de Controle no Enlace de Rádio

Na leitura dos contadores do software de gerência, todos os quadros do rádio, na porta Ethernet ou na sem fio, eram contabilizados, porém uma diferença na quantidade de quadros de dados enviados e na quantidade total de quadros enviados chamou a atenção. Existia uma quantidade razoável de quadros que chegavam em um lado do enlace, principalmente na BS, que não eram quadros de dados. Esses eram quadros de controle para manutenção do enlace sem fio, chegando a representar 20% do total de quadros. Estes quadros devem ser levados em consideração na análise do funcionamento das ferramentas de estimativa utilizadas, pois trabalhos anteriores com o uso do método do par de pacotes mostram erros na estimativa devido a pacotes cruzados que reduziram ou aumentaram o espaçamento entre o par de pacotes, interferindo nos resultados. Uma boa parte desse tráfego de controle são parâmetros de RTS/CTS, que são enviados para o meio a fim de evitar colisões de quadros. Este parâmetro foi desativado algumas vezes para verificar se essa informação de controle estava interferindo nas medições. Para os testes, o envio de RTC/CTS foi configurado para

quadros acima de 1.520 bytes, com isso os pacotes de experimentos não eram afetados por essa característica.

5.4.4 Eventos de Reinicialização dos Rádios

Após a identificação do problema de reflexão dos rádios e a desativação da modulação adaptativa, outro problema passou a ocorrer com certa freqüência quando ambas as ferramentas de estimativa eram usadas. Os rádios, após um tempo reiniciavam, principalmente quando uma grande quantidade de pacotes passava no enlace sem fio. Desativar a modulação adaptativa permitiu a estabilidade das ferramentas de medição, porém o problema da reflexão devido à proximidade dos rádios e o funcionamento em ambiente interno faziam com que, após uma perda de pacotes identificada pelo rádio, este reiniciasse, pois não podia mudar a modulação. Isto afetava algumas medições, principalmente às da ferramenta Pathrate, que leva um tempo maior para estimar a capacidade.

Para resolver esse problema foi diminuída a potência do SS, conforme orientações do fabricante. Dessa forma, o número de reflexões foi reduzido e a capacidade foi mantida.

5.4.5 Diferentes Tecnologias Embarcadas no Rádio Alvarion

Para a análise do comportamento das ferramentas de medição de redes com a metodologia dos pares de pacotes em ambientes WiMAX, é necessário o conhecimento da tecnologia existente no rádio e todas as suas características. O início das pesquisas e mapeamento dos testes foi baseado nas principais características do padrão IEEE 802.16, conforme descrito na Seção 2.3.2 deste trabalho. Com o início dos experimentos, alguns problemas com os resultados das medições foram notados, o que nos levou a pesquisar sobre outras características que não estão presentes no padrão WiMAX.

Os rádios pré-WiMAX possuem espaçamento entre quadros que são característicos do padrão 802.11, com tempos de DIFS (Distributed Interframe Space) e SIFS (Short Interframe space). Este último é conhecido como janela de contenção e determina o tempo em que uma unidade espera para concluir que não existe nenhuma transmissão detectada que poderá causar uma colisão. Um período de back-off é usado para resolver problemas de contenção entre muitas SSs que precisam acessar o meio.

Como os experimentos foram feitos em um enlace ponto a ponto full-duplex, a janela de contenção não se faz necessária.

Os rádios proprietários seguem o padrão WiMAX para garantir a interoperabilidade. As características eleitas pelo WiMAX Forum definem as funções principais dos rádios para garantir o seu grande alcance e elevada largura de banda, porém cada fabricante implementa novos acessórios, seja para torná-lo mais robusto ou de forma a melhorar a performance de seu equipamento. O Burst empregado no Alvarion faz com que o espaçamento entre quadros seja eliminado até um tempo máximo de envio desses quadros (tempo máximo de rajada), aumentando a eficiência e a capacidade do enlace. Essas características não são boas para os métodos de estimativa de capacidade usando pares de pacotes, conforme será visto nas seções 5.7 e 5.8.

5.5 Procedimentos Usados nos Experimentos

Um laboratório foi montado para avaliar as ferramentas, a Figura 5.2 mostra a disposição dos equipamentos para teste e gerência dessa rede.

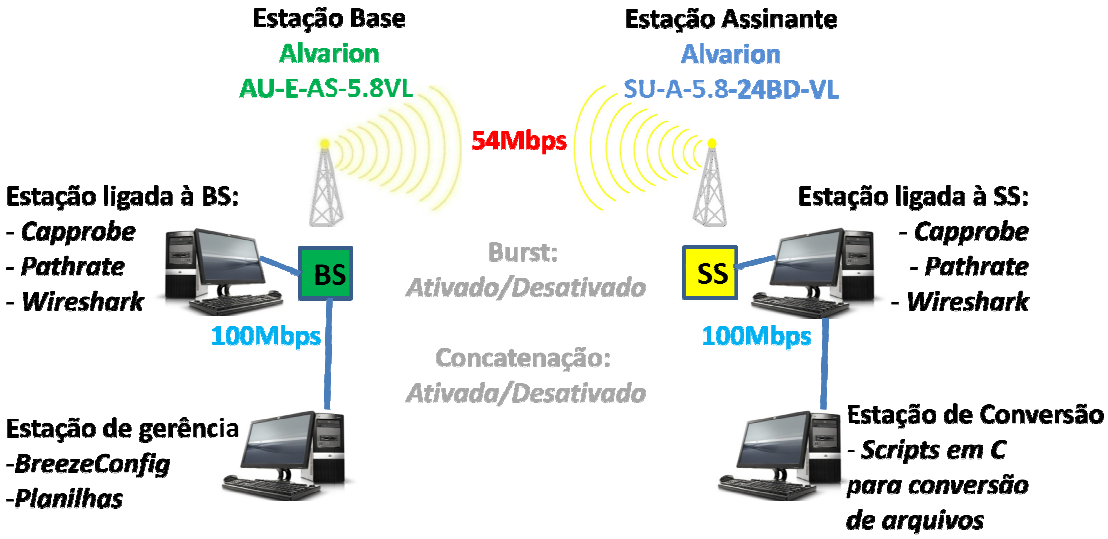


Figura 5.2 - Laboratório para os testes controlados

O laboratório possuía duas máquinas com o sistema operacional da distribuição Linux Ubuntu ligados nas portas fastEthernet dos rádios BS e SS. Essas estações possuíam as ferramentas de medições usadas nos experimentos e todos os aplicativos que poderiam concorrer com essas aplicações foram retirados ou desabilitados, ficando

apenas os processos básicos para funcionamento do sistema operacional. O aplicativo Wireshark foi usado nas duas estações para capturar os pacotes e analisar o comportamento, já que não era possível capturar os quadros no enlace sem fio. Uma estação de gerência realizava todas as configurações nos rádios e disponibilizava informações estatísticas sobre o enlace e contadores de quadros que foram utilizados. Esta informações foram combinadas com as informações fornecidas pelo Wireshark para observar o comportamento dos quadros no enlace sem fio. Todos os testes foram direcionados para arquivos de saída que guardaram todos os resultados e logs. Programas em linguagem C filtraram os dados de forma que pudessem ser criadas planilhas. Os rádios pré-WIMAX foram configurados com modulação 8 e possuem capacidade de 54Mbps. As antenas estavam em visada direta com distância de 4 metros entre elas. O throughput do enlace varia de acordo com o sentido e com as características do WiMAX que estão ativadas. As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam as capacidades de acordo com a configuração realizada o sentido do tráfego. Na configuração default, o rádio apresenta um throughput de 31.1 Mbps no downlink, ou seja, da estação base para a estação assinante, e de 26.4 Mbps no sentido contrário.

Tabela 5-3 - Capacidades esperadas no sentido BS-SS

BS – SS	VALOR ESPERADO
Tudo ligado no BS	31.1
Burst ou concatenação desativados no BS	28 - 31.1

Tabela 5-4 - Capacidades esperadas no sentido SS-BS

SS – BS	VALOR ESPERADO
Tudo ligado no SS	26.4
Burst ou concatenação desativados no BS	23.7 - 26.4

Antes da realização dos experimentos, algumas configurações foram feitas para adaptação dos rádios ao ambiente e algumas características foram configuradas, como modulação adaptativa, envio de RTS/CTS e escalonamento, que poderiam influenciar

no comportamento das ferramentas de medições. Duas características tiveram parâmetros alterados durante os experimentos, o burst e a concatenação. Nas observações dos experimentos do primeiro estudo de caso, verificou-se que esses parâmetros influenciavam muito nos resultados. Para a realização dos experimentos, o Burst e a concatenação ficaram ativados ou desativados e em alguns experimentos estavam desativados em apenas um dos rádios. O tamanho do pacote variou em 500 bytes e 1.500 bytes com o objetivo de analisar as ferramentas para pacotes pequenos e com a MTU da Ethernet. Conforme mostrado nas Tabelas 5.3 e 5.4, o fabricante informa que quando uma ou duas características citadas estão desabilitadas, a capacidade pode baixar em 10%, a partir de testes de laboratórios feitos pela Alvarion. A ferramenta Capprobe usa os dois sentidos (ida e volta) para estimar a capacidade final, por isso é necessário observar as configurações de Burst e concatenação em ambos os rádios para indicar a capacidade esperada de cada sentido.

5.6 Influência do Burst e da Concatenação nos Resultados do Capprobe

As características de concatenação e Burst influenciam diretamente nas medições. A concatenação tem influência nos pacotes menores, pois esses são colocados em quadros maiores, chamados de quadros concatenados, e enviados pelo meio sem que o par se distancie um do outro, tornando impossível a medição do enlace sem fio. A concatenação não afeta muito os pacotes do tamanho da MTU, pois poucos são os quadros concatenados nesta situação em decorrência do tamanho. O Burst tem uma influência maior nos experimentos com o Capprobe, pois este fornece a estimativa após o par percorrer o caminho de ida e volta no enlace. Como o enlace WiMAX é assimétrico, o correto seria a ferramenta sempre estimar o enlace de menor capacidade, ou seja o canal SS-BS de uplink, mas em algumas situações isso não ocorre. O problema é que, se o Capprobe é usado no sentido SS-BS quando o Burst está ativo no BS, os quadros de retorno são enviados sem o período de contenção. Logo, no sentido SS-BS, o par de pacotes passa primeiro pelo uplink e, ao chegar de volta no BS para retornar, o intervalo entre eles é reduzido. Isso faz com que o único enlace estimado seja o de downlink, no sentido BS-SS. Sempre que o Burst estiver ativado no SS e o sentido de aplicação do Capprobe for SS-BS, a estimativa será a do enlace de maior (downlink)

capacidade no meio sem fio e não a de menor capacidade (uplink). Ou, de maneira resumida, pode-se dizer que sempre que o Burst estiver ativado no sentido de downlink e o Capprobe for usado no sentido SS-BS, a capacidade estimativa será a de downlink, caso contrário (sem Burst no downlink), a capacidade estimada será a de menor valor entre o uplink e o downlink.

5.7 Influência do Burst e da Concatenação nos Resultados do Pathrate

O Pathrate é muito afetado pela característica de concatenação do enlace WiMAX. O Pathrate envia pacotes de tamanhos diferentes a uma taxa constante, favorecendo a concatenação, pois esta aproveita os pacotes pequenos e os concatena em um quadro maior. O fato dos pacotes chegarem na forma de um trem faz com que hajam mais candidatos para serem concatenados, e isso faz com que a ferramenta apresente uma capacidade maior que a esperada. Na desativação destas características, o Pathrate em geral consegue estimar a capacidade.

A característica de Burst não afeta muito o Pathrate, já que, diferente do Capprobe, o Pathrate usa apenas um sentido do enlace para extrair a medição, ou seja, a ferramenta só é influenciada pelo atraso de ida do pacote, existindo assim a necessidade de um cliente e um servidor nos dois extremos no enlace.

5.8 Influência do Uso de Pacotes Pequenos nos Resultados

Trabalhos anteriores, como em [DOVROLIS 2004], discutem o efeito do tamanho do pacote na estimativa de capacidade usando a método do par de pacotes. Esses trabalhos indicam os melhores tamanhos de pacotes para uma estimativa mais correta usando o método. O diferencial deste trabalho quando relacionamos o tamanho do pacote é que são as características do WiMAX que influenciam na estimativa final da medição dependendo do tamanho do pacote.

Pacotes pequenos fazem com que a estimativa da capacidade do enlace seja errada quando a função de concatenação está ativada. Porém, quando esta característica está desativada, as medições tendem a ser corretas. Pacotes com tamanho igual à MTU são melhores na estimativa de capacidade para enlaces WiMAX justamente porque minimizam este problema.

6 Apresentação dos Resultados do Estudo de Caso 2

Este capítulo apresenta os resultados obtidos para o estudo de caso 2, detalhado no capítulo 5.

6.1 Experimentos com Capprobe no Sentido BS – SS

Os experimentos foram feitos nos dois sentidos do enlace conforme descreve as Figuras, para cada experimento foram utilizados 200 pares de pacotes e as discrepâncias foram removidas. Para experimentos que apresentavam altas discrepâncias, a quantidade de pares de pacotes ficou entre 50 e 100 pares.

6.1.1 Burst e Concatenação Ligados no BS e no SS (configuração default)

A Figura 6.1 mostra a estimativa de capacidade em função da quantidade de pares de pacotes enviados obtida pela ferramenta Capprobe no sentido BS-SS (downlink)com o uso de pacotes de 500 bytes. Pode-se verificar que os valores estimados são irreais, bem acima da capacidade do enlace nos dois sentidos.

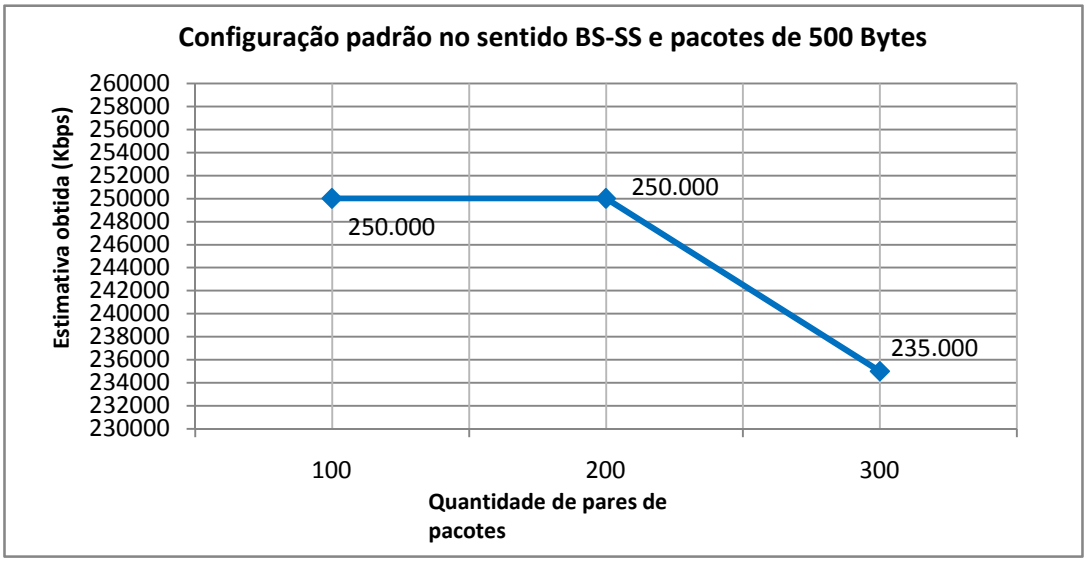


Figura 6.1 - Capacidades estimadas no sentido BS-SS com pacotes de 500 Bytes e todas as funcionalidades ligadas

Como o Burst e a concatenação estavam ativos nos dois sentidos, as estimativas de capacidade usando pacotes de 500 bytes não apresentaram resultados favoráveis

porque, quando quadros pequenos chegam ao rádio para serem enviados ao enlace sem fio, eles podem ser concatenados em um quadro maior. Como a maioria dos quadros pequenos que chegavam no enlace eram concatenados, de acordo com os contadores associados às interfaces do rádio, estes apresentaram erros. Os resultados mostram estimativas próximas de 250 Mbps e este erro é potencialmente devido à concatenação retirar o intervalo de tempo entre os pacotes e colocá-los muito próximos. Além disso, o Burst também favorecia que os intervalos de contenção fossem retirados para permitir rajadas, reduzindo ainda mais a dispersão. Quanto menor a dispersão, maior a capacidade estimada.

Alguns testes com quadros de 1.500 bytes também apresentaram concatenação, porém em um número muito pequeno, de acordo com os contadores da ferramenta BreezeConfig da Alvarion. Neste caso, a concatenação não foi um fator que levasse as estimativas a valores errados. A Figura 6.2, apresenta os resultados quando todas as características estão ligadas e são usados pacotes de 1.500 bytes com a ferramenta Capprobe.

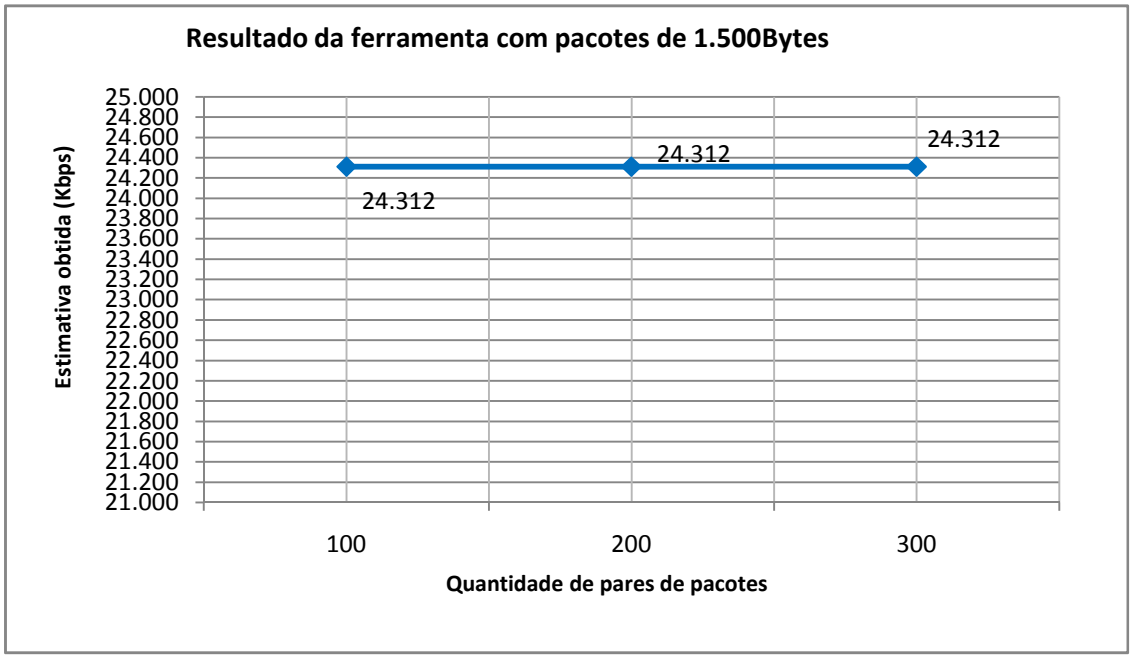


Figura 6.2- Resultado do *Capprobe* com tudo ligado no sentido BS-SS e pacote de 1.500 bytes

A Figura 6.3 traz a configuração para este experimento específico. O Burst e a concatenação configurados no BS não exercem efeito sobre a medida, uma vez que o tamanho de 1.500 bytes impede a concatenação dos quadros e a ausência de contenção

entre os pacotes não representa problema no envio do par. Os pacotes capturados no lado do SS indicam o valor correto do link no sentido BS-SS (downlink), que é de 31,1 Mbps de acordo com o manual da Alvarion.

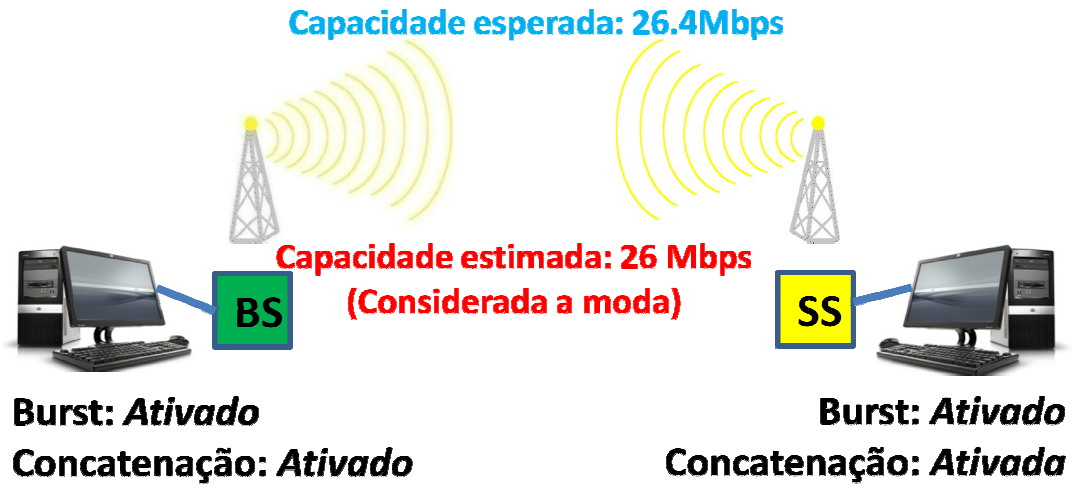


Figura 6.3 - Sentido BS-SS com tudo ativado e pacote de 1.500 Bytes

A Tabela 6.1 representa pacotes que foram capturados com o Wireshark instalado em uma máquina depois do rádio SS e os valores correspondem à estimativa correta do link no sentido BS-SS. Porém, esses não são os valores finais da ferramenta, pois, como citado, o Capprobe estima a capacidade usando os dois sentidos e os valores apresentados pela ferramenta são referentes à capacidade do downlink.

Tabela 6-1 - Estimativa de capacidade na descida usando o *Wireshark*

PAR	Tempo de Chegada no SS(s)	Intervalo no SS(ms)	Estimativa no SS(Mbps)
Primeiro pacote	**66.567**		
Segundo pacote	**66.954**	**0,387**	**31,0**

A diferença de intervalo de tempo entre o primeiro e o segundo pacote é de 0,387ms e a estimativa de capacidade é calculada levando em consideração também o tamanho do pacote que, retirando os cabeçalhos IP e TCP, é de 1480 bytes.

A ferramenta Capprobe apresentou um valor de estimativa de 24.3 Mbps conforme pode ser visto na Figura 6.2. Este valor está abaixo da capacidade esperada do enlace que é de 26.4 Mbps. Porém, observando o histograma obtido para o envio de 200 pares de pacotes, apresentado na Figura 6.4, verifica-se que a ferramenta Capprobe não escolheu as capacidades que apresentavam maior concentração de pacotes.

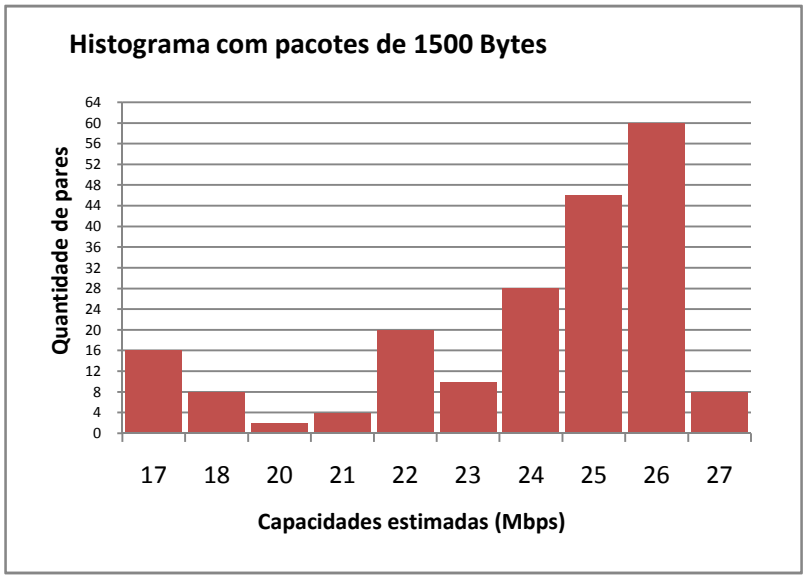


Figura 6.4 - Histograma das estimativas do Capprobe no sentido BS-SS com todas as funcionalidades ligadas e pacotes de 1.500 Bytes

Caso fosse escolhida a moda, o resultado estaria em 26 Mbps, o que se aproxima mais da capacidade esperada do enlace no sentido SS-BS. A Tabela 6.2 apresenta os resultados da média, mediana e moda.

Tabela 6-2 – Estatísticas do histograma da Figura 6.4

Métrica	Valor
Mediana	**25**
Média	**23,8**
Moda	**26**

Como descrito na Seção 5.1.5, encontramos características de redes IEEE 802.11 nos rádios Alvarion. Segundo o fabricante, as novas versões dos rádios estão diminuindo as características do padrão 802.11 em rádios padrão 802.16, porém no caso dos nossos experimentos encontramos tempos como SIFS e DIFS e quadros de controle com RTS e CTS, que não fazem parte do padrão 802.16. ROCHA (2006) apresentou em seu trabalho que tempos como SIFS, DIFS e Backoff influenciam nas ferramentas de

medição que usam o método dos pares de pacotes e propôs uma nova metodologia para levar essas características em consideração. O presente trabalho não levou em consideração, para fins de medição, essas características, se preocupando apenas com as características do WiMAX que podem afetar as medições.

6.1.2 Burst Desativado no BS

A Figura 6.5 mostra o teste com a ferramenta Capprobe no sentido BS-SS, porém com Burst desativado no BS. Neste caso, espera-se que o comportamento do experimento seja equivalente ao anterior, já que o Burst não tem influência quando ativado no uplink ou seja, o valor esperado para a estimativa do Capprobe é de 26.4 Mbps.

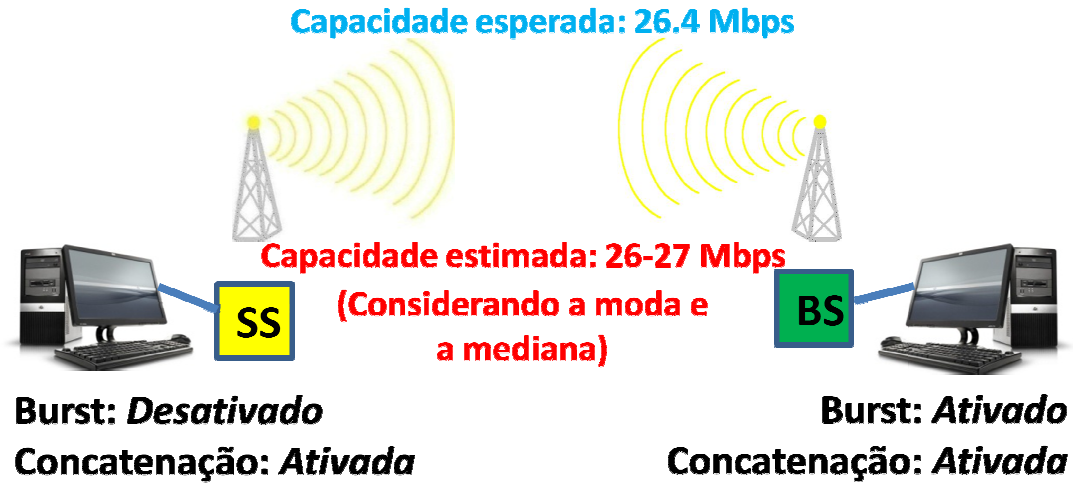


Figura 6.5 - Sentido BS-SS com *Burst* desativado no BS e pacotes de 1.500 bytes

Os testes com pacotes pequenos de 500 bytes novamente não tiveram sucesso devido à concatenação. Porém, com pacotes de 1.500 bytes, os resultados podem ser vistos na Figura 6.6. Neste caso, a ferramenta Capprobe estimou a capacidade em aproximadamente 31.2 Mbps após o envio de 200 pares, levando em consideração o algoritmo que usa o minimum delay sum (o Capprobe usa essa medida para estimar a capacidade do enlace).

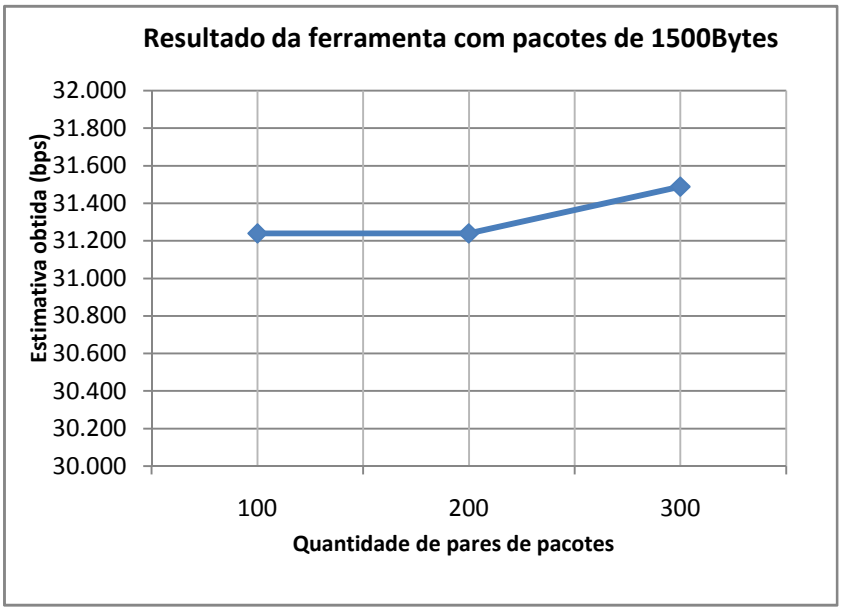


Figura 6.6- Resultado da ferramenta com *Burst* desligado no BS, sentido BS-SS e pacote de 1.500 bytes

Caso fosse levada em consideração a mediana dos resultados obtidos pelo Capprobe (Figura 6.7) após o envio de 200 pares, o resultado da estimativa seria de 27 Mbps, conforme a tabela 6.3. Já o resultado usando a moda seria de 26 Mbps.

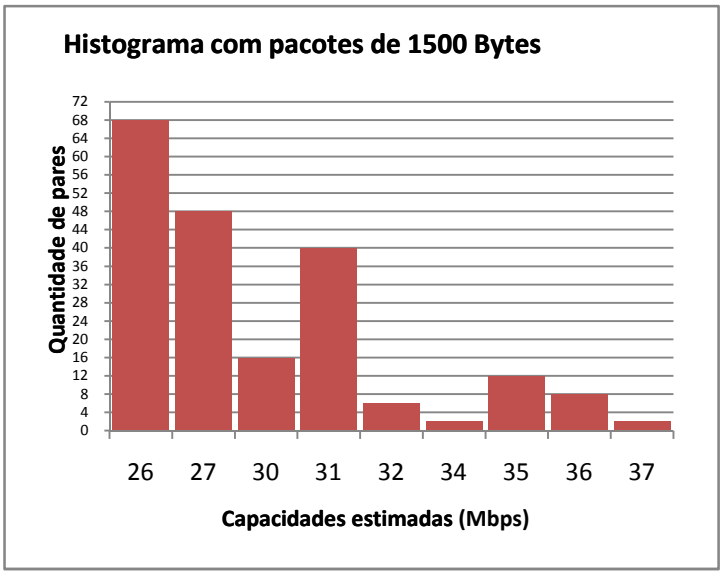


Figura 6.7 - Histograma das estimativas do *Capprobe* com *Burst* desligado no BS, sentido BS-SS e pacotes de 1.500 bytes

Com o Burst desativado no BS, os quadros são enviados com períodos de contenção e a dispersão entre o par de pacotes não é alterada. Porém, ao chegar no SS, o Burst encontra-se ativo e são enviados pacotes sem período de contenção, ou seja, os

pacotes são enviados próximos um dos outros e o enlace de uplink é medido. A Tabela 6.3 apresenta os resultados da média, mediana e moda.

Tabela 6-3 – Estatísticas do histograma da Figura 6.7

Métrica	Valor
Mediana	**27**
Média	**28,8**
Moda	**26**

6.1.3 Burst Desativado no SS

A Figura 6.8 mostra a situação com o Burst desligado no SS, a ferramenta foi iniciada no sentido BS-SS.

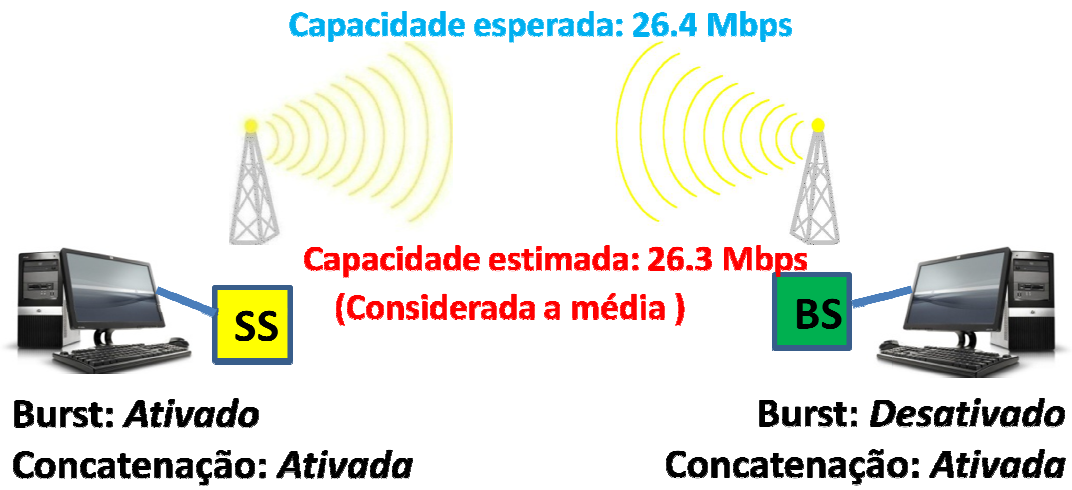


Figura 6.8 - Sentido BS-SS com Burst desativado no SS e pacote de 1.500 Bytes

O resultado da ferramenta Capprobe mostra uma estimativa de capacidade acima do valor esperado, porém, verificando o histograma da ferramenta e levando em consideração as medidas mostradas na Tabela 6.4, todos os resultados (média, mediana e moda) convergiram para um valor próximo de 26 Mbps, que é o resultado esperado. O Capprobe apresentou uma estimativa de aproximadamente 29.75 Mbps após o envio de 100 pares e mantendo-se até 300 pares, mostrando que a estatística usada pela ferramenta não foi a mais adequada para este caso.

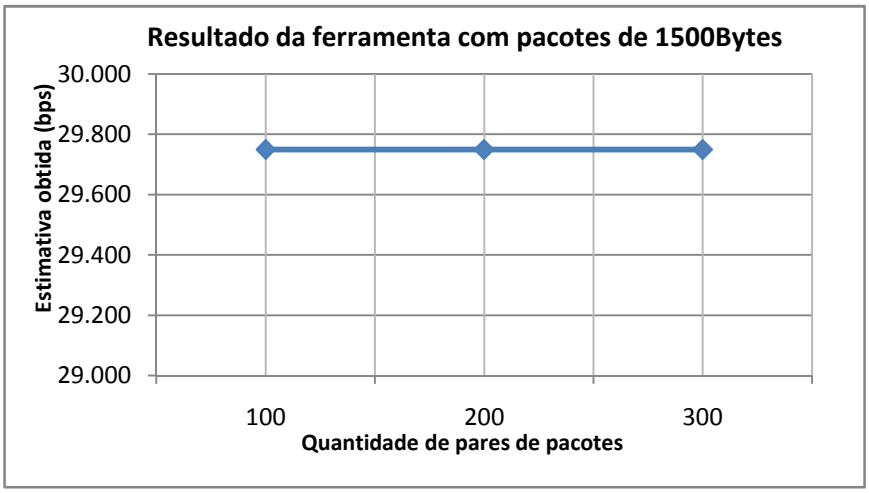


Figura 6.9 - Resultado da ferramenta com Burst desligado no SS sentido BS-SS e pacote de 1.500 bytes de pacote

Neste caso, apesar dos quadros saírem do BS para o enlace sem fio sem períodos de contenção, no SS eles passam por um enlace de menor capacidade, aumentado a dispersão e diminuindo a capacidade dentro do valor esperado, que é a capacidade do uplink.

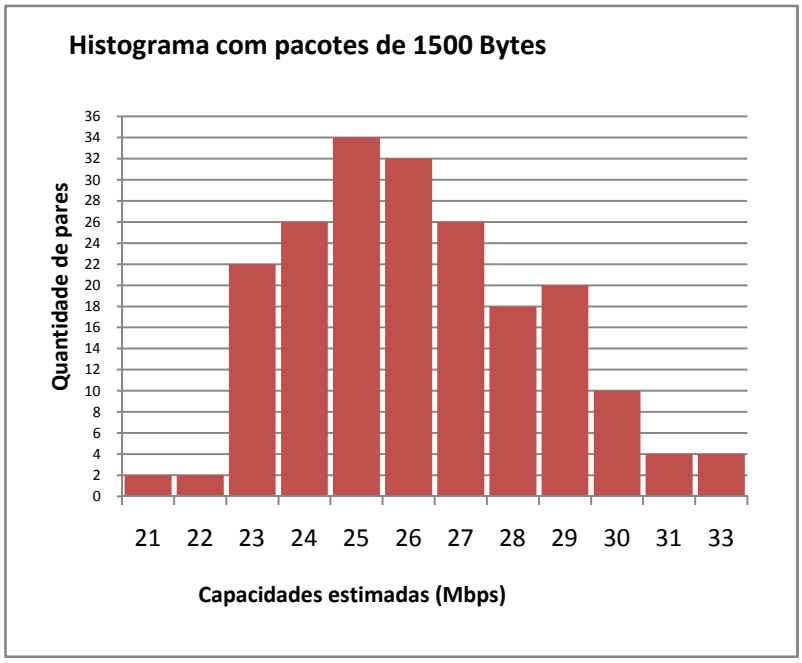


Figura 6.10 - Histograma com Burst desligado no SS e 1.500 bytes de pacote

Apesar dos pacotes de retorno para o Capprobe serem pequenos, pois correspondem a ICMP echo replies, a concatenação no SS não afetou estes pacotes em função da dispersão que já estava inserida nos mesmos, e pelo fato de não haver tráfego cruzado e os buffers estarem vazios.

Tabela 6-4 - – Estatísticas do histograma da Figura 6.10

Métrica	Valor
Mediana	26
Média	26,3
Moda	25

6.1.4 Burst Ativado e Concatenação Desativada no BS e no SS

Os testes desta seção foram feitos com o *Burst* ativado em ambos os rádios e a concatenação desativada nos dois lados. Os testes foram feitos pelo C*approbre* no sentido BS-SS, conforme a Figura 6.11.

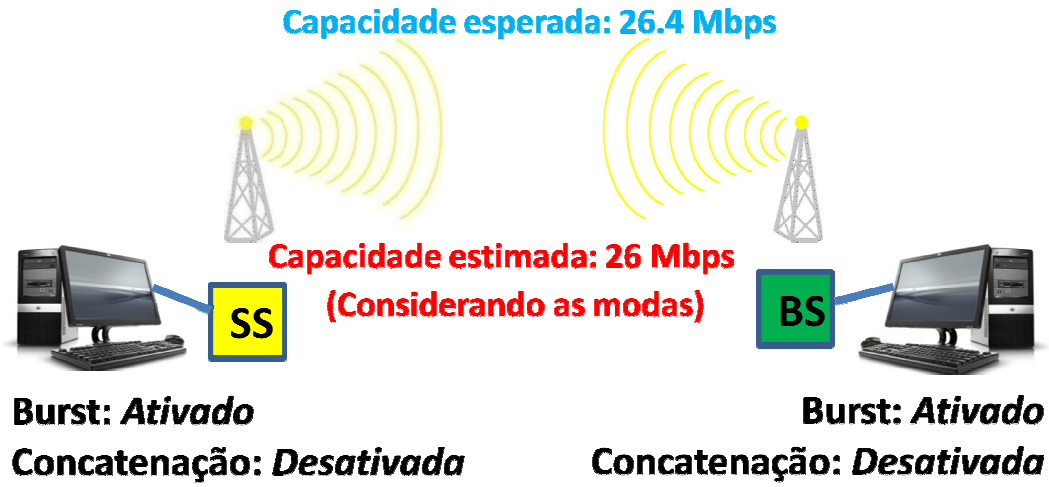


Figura 6.11 - Exemplo de Burst ativado e concatenação desativada em ambos os rádios

As Figuras 6.12 e 6.13 apresentam estimativas no sentido BS-SS com o *Burst* ativado e a concatenação desativada nos dois rádios, e, neste caso, o uso de pacotes de 500 bytes permitiu ao *Capprobe* estimar corretamente o enlace de menor capacidade no valor de 26,2 Mbps. Estes resultados foram mais precisos que os experimentos com pacotes de 1.500 Bytes, que apresentaram estimativas entre 25,6 e 26,4 Mbps, de acordo com o gráfico da Figura 6.14.

Na Figura 6.13 pode-se notar o resultado preciso da ferramenta *Capprobe* com pacote de tamanho pequeno até um total de 500 pares de pacotes enviados. A Figura 6.12 mostra o histograma dos resultados obtidos após o envio de 100 pares e a Tabela 6.5 apresenta a média, a mediana e a moda.

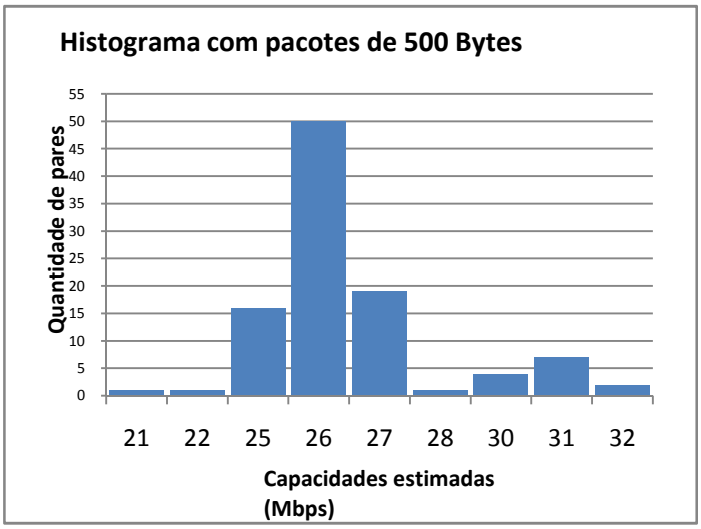


Figura 6.12 - Histograma sem concatenação na BS e na SS no sentido BS-SS e pacotes de 500 bytes

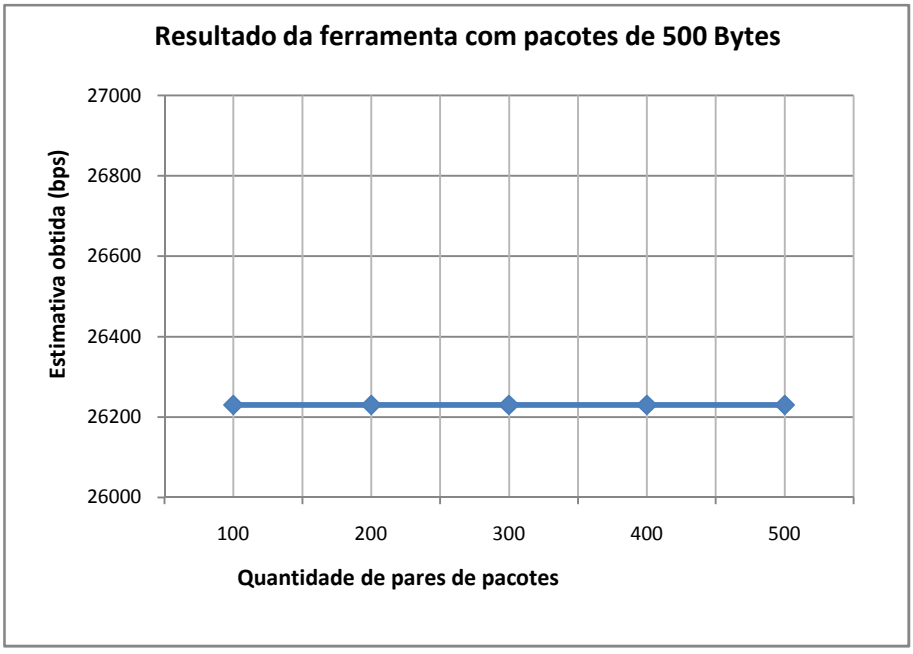


Figura 6.13 - Distribuição das capacidades estimadas sem concatenação na BS e na SS no sentido BS-SS com pacotes de 500 bytes

Tabela 6-5 – Estatísticas do histograma da Figura 6.12

Métrica	Valor
Mediana	26
Média	26,3
Moda	26

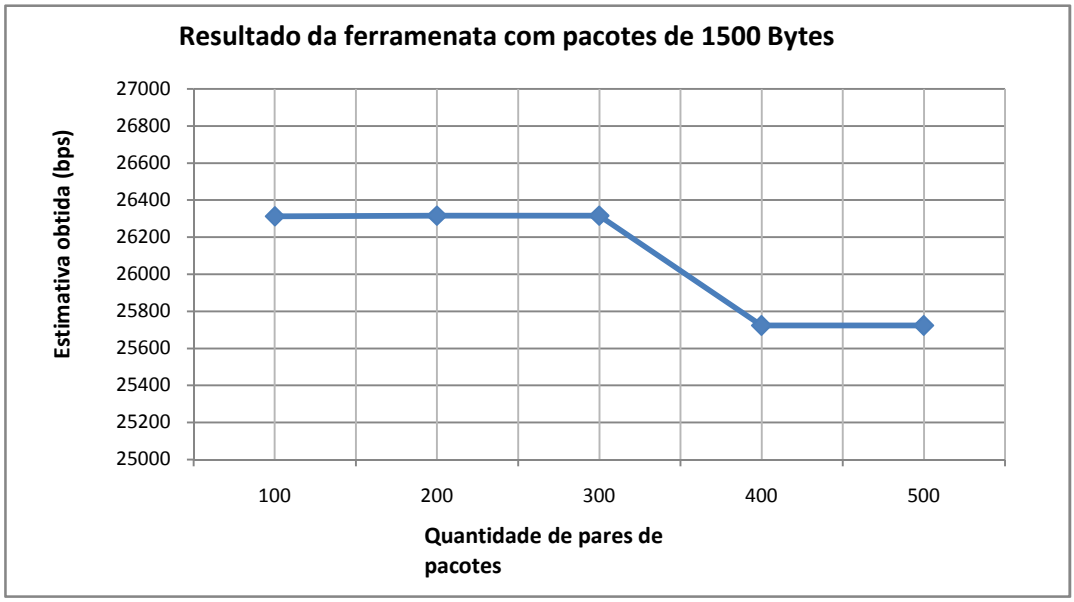


Figura 6.14 - Resultado da ferramenta sem concatenação na BS e na SS no sentido BS-SS e pacote de 1.500 bytes

A Figura 6.15 mostra o histograma dos resultados obtidos pelo *Capprobe* após o envio de 200 pares no sentido BS-SS sem concatenação em ambos os lados e com pacotes de 1.500 bytes. A estimativa nesse sentido deveria ser entre 23.7 e 26.4 Mbps. Os valores estimados ficam próximos dos valores esperados, porém com uma dispersão maior em relação a pacotes com 500 bytes.

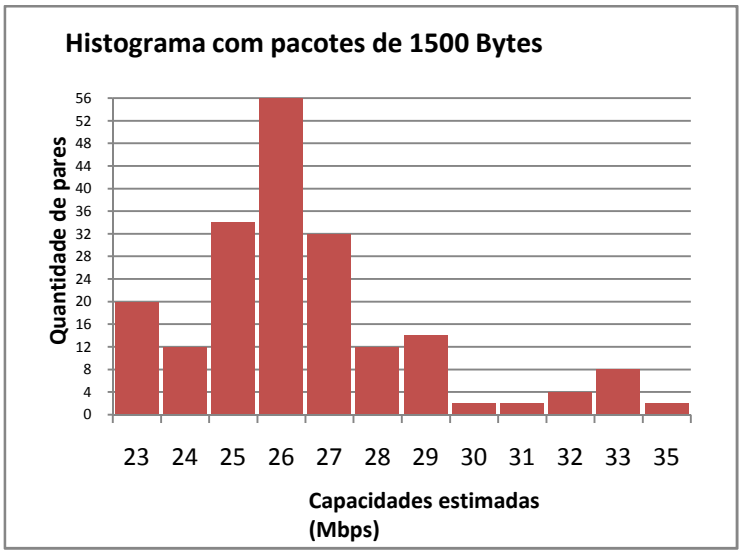


Figura 6.15 – Histograma das Capacidades sem Concatenação na BS e na SS no Sentido BS-SS com Pacotes de 1.500 bytes

A Tabela 6.5 mostra que todas Estatísticas estimariam de forma aproximada a capacidade do enlace, que deveria ser em torno de 26.4 Mbps.

Tabela 6-6 – Estatísticas do histograma da Figura 6.15

Métrica	Valor
Mediana	**26**
Média	**26.4**
Moda	**26**

6.2 Experimentos com Capprobe no Sentido SS – BS

6.2.1 Burst e Concatenação Ligados em Ambos os Sentidos

A Figura 6.16 mostra a situação dos enlaces no sentido SS-BS. A medição desejada é a capacidade do *uplink* por ser a menor, ou seja, 26.4 Mbps. Os pares saem do SS e encontram o canal de *uplink* com a capacidade de aproximadamente 26 Mbps. Após chegarem à estação (PC) depois do BS, são reenviados de volta e, ao chegarem no BS, são enviados sem período de contenção devido ao *Burst*, ou seja, a dispersão vinda no *uplink* é desfeita e uma nova capacidade é mostrada, a do canal de *dowlink*. Esta característica faz com que a capacidade de *uplink* seja esquecida e seja apresentada apenas a capacidade de *downlink*, cujo valor esperado é de 31.1 Mbps.

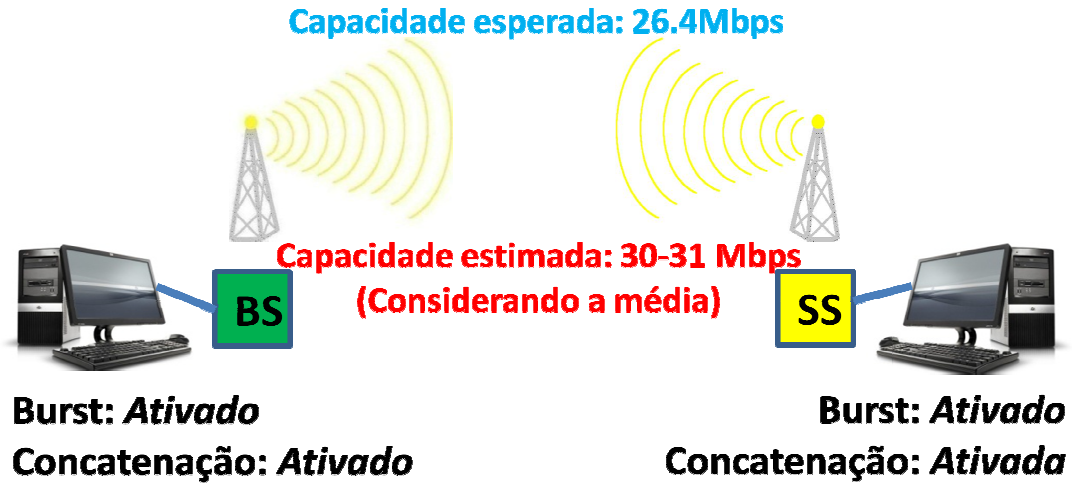


Figura 6.16 - Sentido SS-BS com tudo ativado

No sentido de *uplink*, os pacotes pequenos continuaram a falhar já que a concatenação está ativada, conforme mostrado na Figura 6.17. Com pacotes do tamanho da MTU *ethernet* (1.500 bytes), os resultados foram satisfatórios.

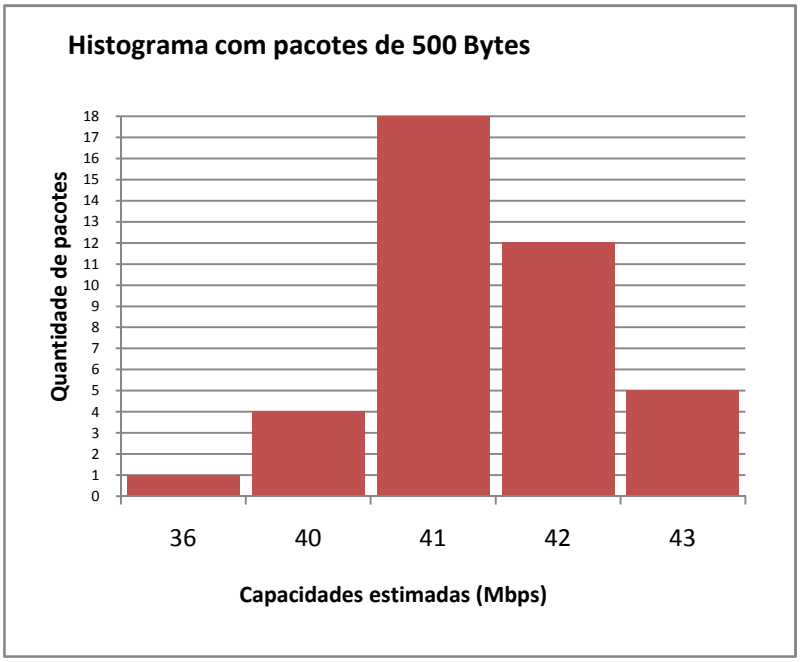


Figura 6.17 - Histograma com tudo ligado e pacotes de 500 bytes no sentido SS-BS

A Figura 6.18 mostra o histograma com pacotes de 1.500 bytes enviados no sentido SS-BS com todas as características ligadas. Neste caso, a medição após o envio de 212 pares de acordo com o valor esperado, que deveria ser de 31.1 Mbps (enlace de downlink). A Tabela 6.6 mostra que a mediana e a moda foram as Estatísticas que mais se aproximaram deste valor.

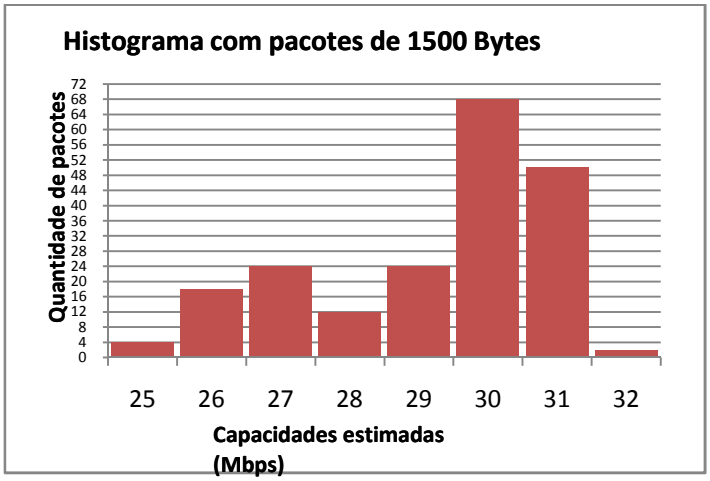


Figura 6.18 - Histograma com tudo ligado e pacotes com 1.500 bytes no sentido SS-BS

Tabela 6-7 - Estatísticas do histograma da Figura 6.18

Métrica	Valor
Mediana	**30**
Média	**29,2**
Moda	**30**

Na Figura 6.19 o resultado do *Capprobe* fica em torno de 30 Mbps, ou seja, a ferramenta estima de forma bem aproximada os valores.

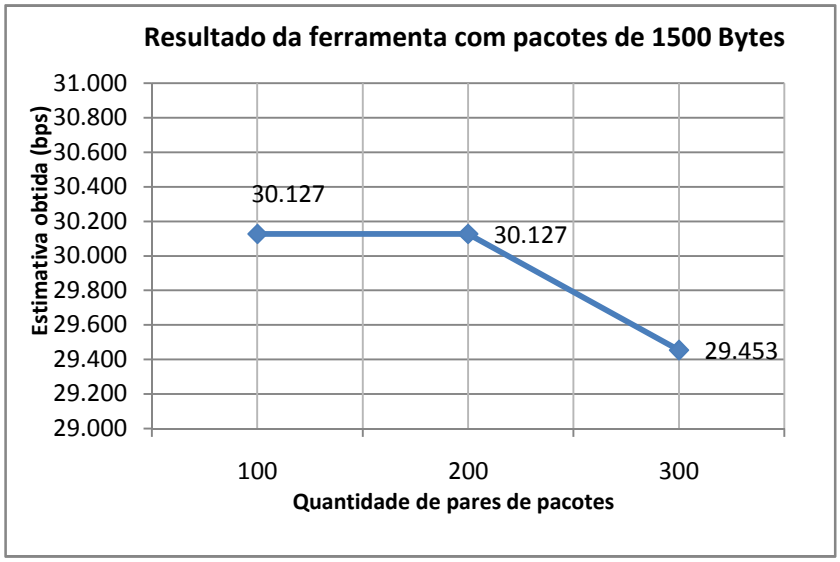


Figura 6.19- Resultado da ferramenta com tudo ligado no sentido SS-BS e pacotes de 1.500 bytes

6.2.2 Burst Desligado no BS

Quando o *Burst* está desligado na BS, a medida de capacidade esperada é também a desejada, ou seja, a que corresponde ao *uplink*, 26,4 Mbps. A Figura 6.20 mostra que, como a BS está com *Burst* desligado, o período de contenção será mantido e com isso a dispersão dos pares de pacotes vinda do *uplink* é mantida, sendo estimado o enlace de menor capacidade.

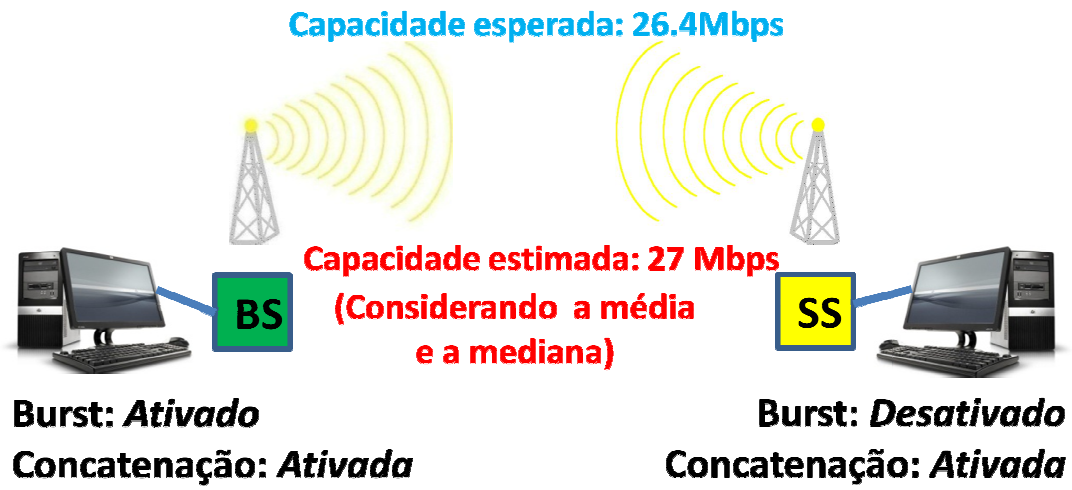


Figura 6.20- Sentido SS-BS com *Burst* desativado no BS

A Tabela 6.8 mostra a dispersão causada pelo canal de *uplink* a partir de medidas no *Wireshark* colocado no PC após a BS.

Tabela 6-8- Estimativa de capacidade no *downlink* usando o *Wireshark*

PAR	Tempo de Chegada no BS(s)	Intervalo No BS(ms)	Estimativa no BS(Mbps)
Primeiro pacote	770.488		
Segundo Pacote	770.940	0,452	26,5

O gráfico da Figura 6.21 mostra o histograma dos resultados obtidos com o *Capprobre* para pacotes de 500 bytes. A estimativa sofreu influência da concatenação.

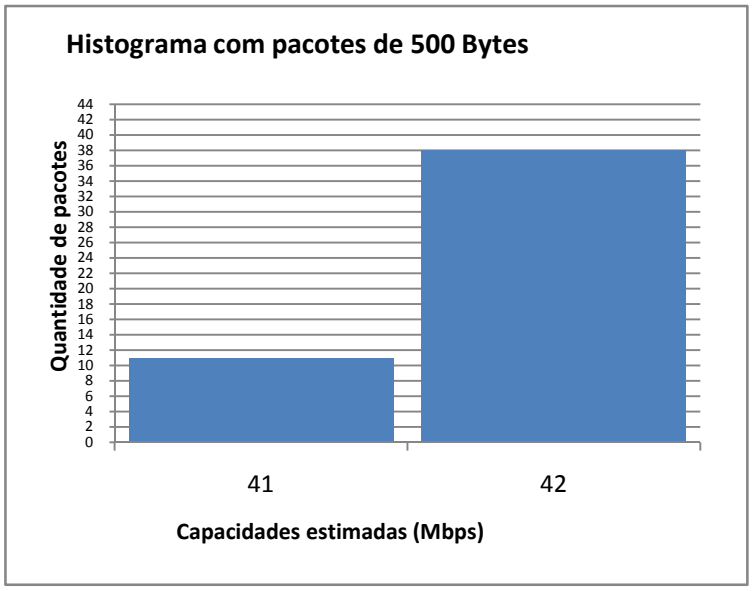


Figura 6.21 - Histograma com *Burst* desligado no BS e pacotes de 500 bytes no sentido SS-BS

O gráfico da Figura 6.22 mostra o histograma após 100 pares de pacotes enviados no sentido SS-BS com o *Burst* desligado e pacotes de 1.500 bytes. Neste caso, a mediana e a moda se aproximam da capacidade esperada, conforme pode ser visto na Tabela 6.9.

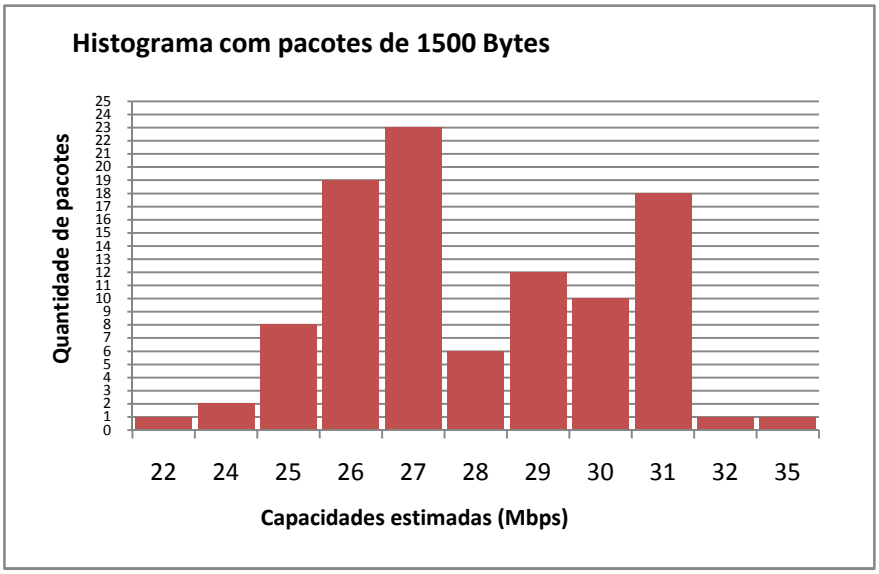


Figura 6.22 - Histograma com Burst desligado no BS e 1.500 bytes de pacote no sentido SS-BS

Tabela 6-9 - Estatísticas do histograma da Figura 6.22

Métrica	Valor
Mediana	**27**
Média	**28**
Moda	**27**

A ferramenta *Capprobe* não estimou corretamente a capacidade do enlace, apresentando um valor entre 29 e 31.5 Mbps, quando na verdade o enlace está próximo dos 26 Mbps. O gráfico da Figura 6.23 apresenta esta situação.

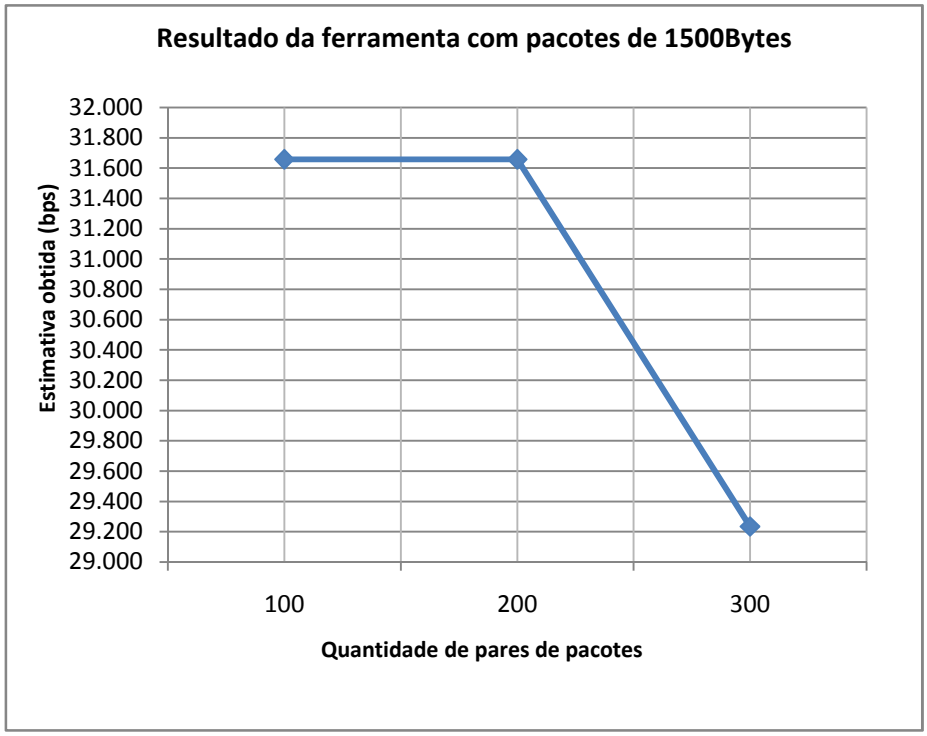


Figura 6.23 - Resultado da ferramenta com *Burst* desligado no BS no sentido SS-BS com pacote de 1.500 bytes

6.2.3 Burst Desligado no SS

O comportamento esperado do Capprobe no sentido SS-BS, com *Burst* desativado apenas no SS, é análogo à situação com configuração default, conforme mostra a Figura 6.24.

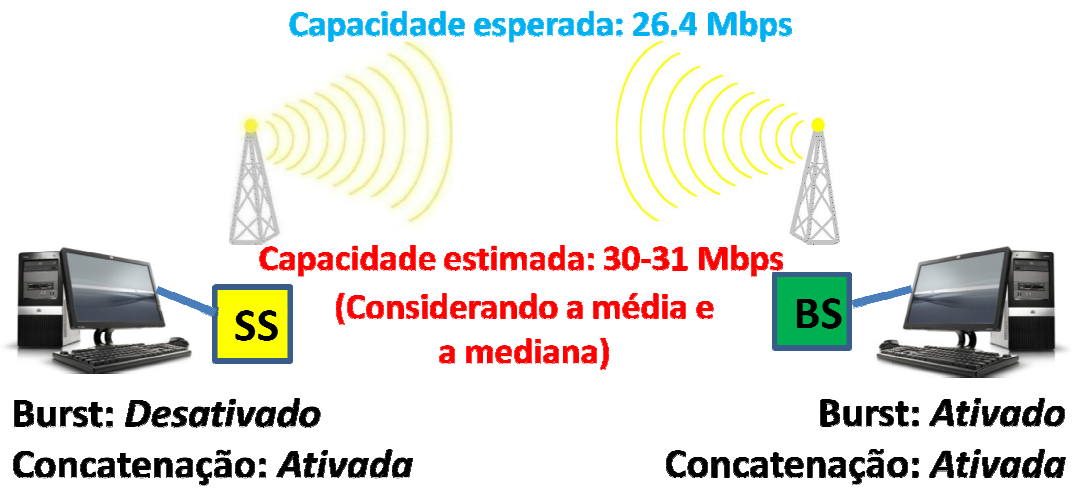


Figura 6.24 - Sentido SS-BS com *Burst* desativado no SS

A ferramenta *Capprobe* apresentou nos primeiros 100 pares de pacotes enviados a estimativa correta, porém, nos próximos 200 pares, passou a apresentar uma estimativa abaixo da esperada (Figura 6.25).

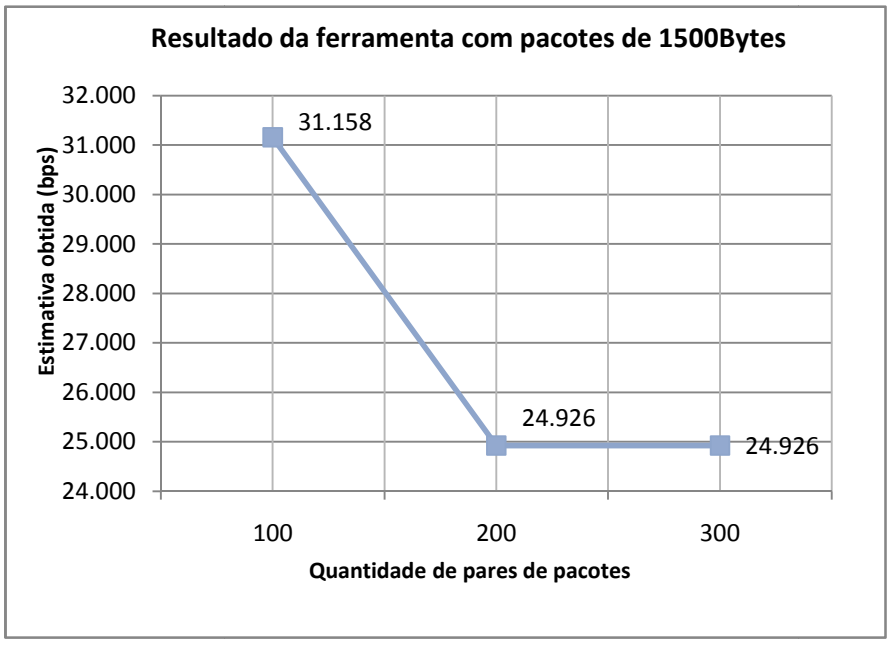


Figura 6.25 - Resultado da ferramenta com *Burst* desligado no SS no sentido SS-BS e pacote de 1.500 bytes

A Figura 6.26 apresenta o histograma após o envio de 200 pares de pacotes. A Tabela 6.10 mostra que a moda foi a métrica que mais se aproximou do valor esperado (downlink).

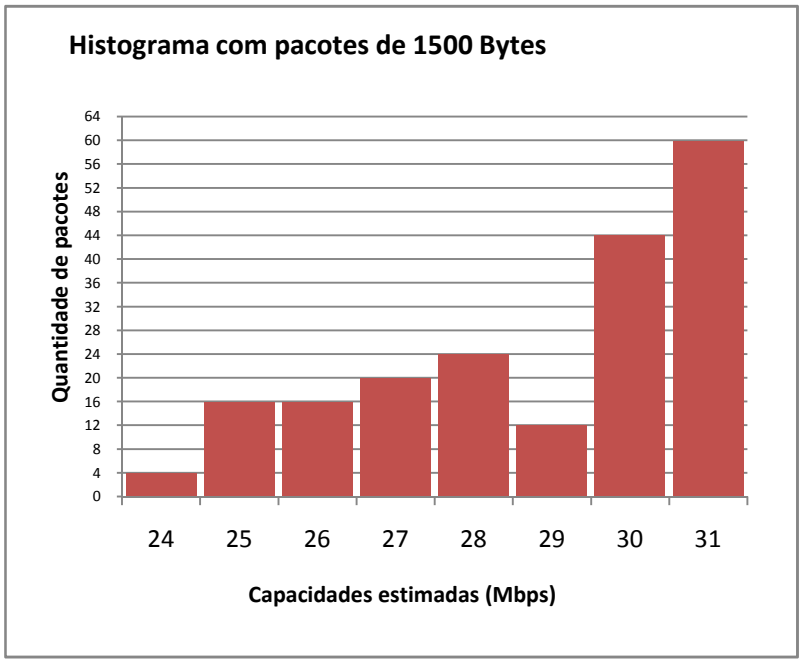


Figura 6.26 - Histograma com *Burst* desligado no SS e pacote de 1.500 bytes no sentido SS-BS

Tabela 6-10 - Estatísticas do histograma da Figura 6.26

Métrica	Valor
Mediana	**30**
Média	**28,4**
Moda	**31**

6.2.4 Burst Ligado e Concatenação Desligada no BS e no SS

Em ambas as direções o *Burst* está ativado, porém a concatenação para os dois canais está desativada, conforme a Figura 6.27. Mais uma vez, devido ao *Burst* no BS, a capacidade registrada pelo *Capprobe* será a de downlink.

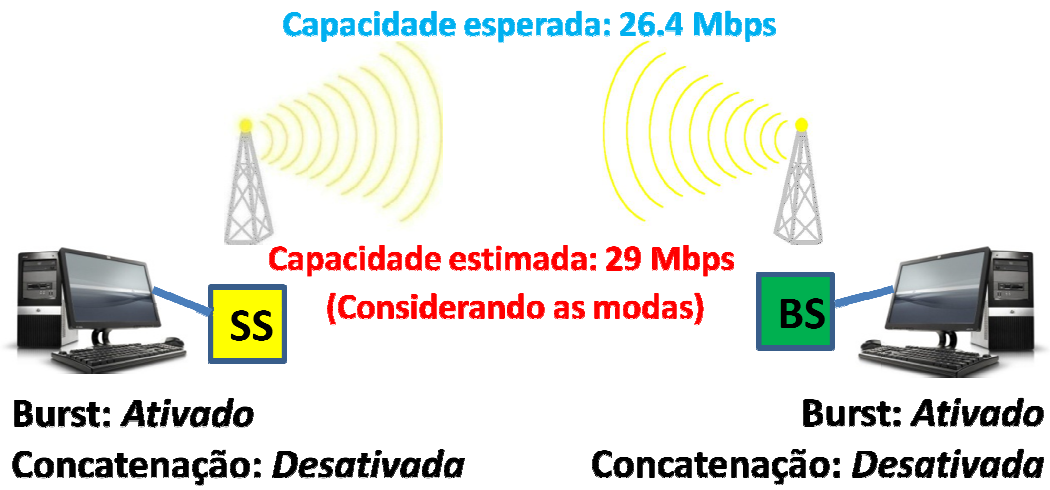


Figura 6.27 – Burst Ativado em Ambos os Sentidos e Concatenação Desativada

Os resultados a seguir apresentam estimativas com o uso de pacotes de 500 bytes e 1.500 bytes no sentido SS-BS com a concatenação desligada. As capacidades apresentadas nestas duas situações estão abaixo da capacidade total do *downlink*, e isto se deve ao fato da concatenação estar desligada, o que, segundo o fabricante, pode diminuir a estimativa em até dez por cento.

Com a concatenação desligada os pacotes pequenos passam a estimar corretamente a capacidade do enlace. A Figura 6.28 mostra o histograma sem concatenação no sentido SS-BS e com pacotes de 500 bytes após o envio de 100 pares de pacotes. A Tabela 6.11 apresenta a mediana, a média e a moda para estes dados.

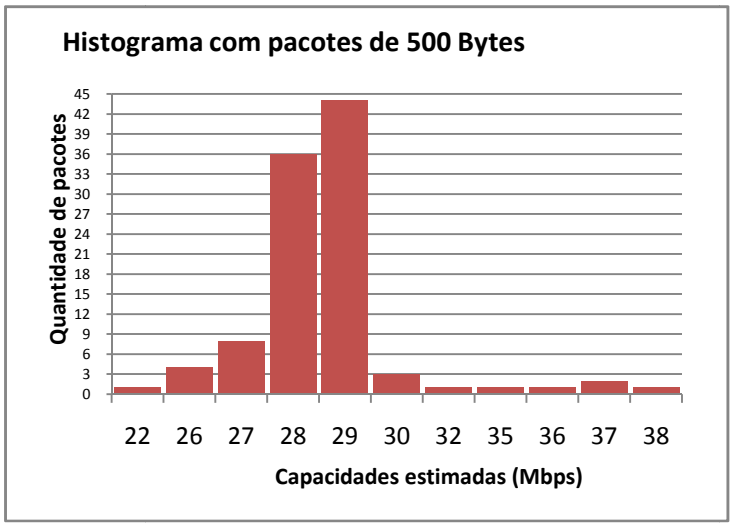


Figura 6.28 - Histograma para estimativas sem concatenação e pacotes de 500 bytes no sentido SS-BS

A Figura 6.29 mostra os resultados obtidos pela ferramenta Capprobe, que neste caso forneceu o valor previsto.

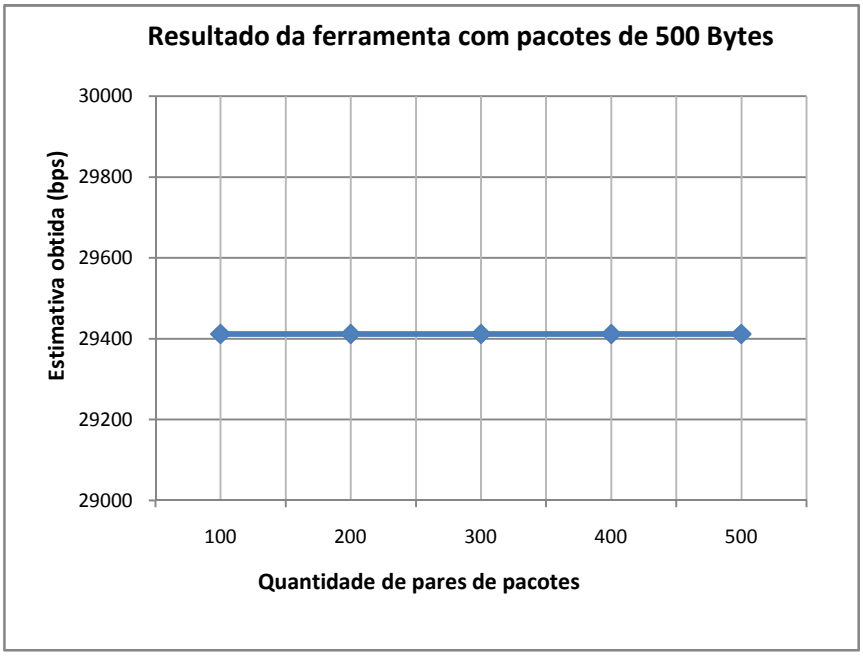


Figura 6.29 - Resultado da ferramenta sem concatenação sentido SS-BS e pacotes de 500 bytes

Tabela 6-11- Estatísticas do histograma da Figura 6.28

Métrica	Valor
Mediana	**29,4**
Média	**29,4**
Moda	**29,4**

Os gráficos a seguir mostram o comportamento da ferramenta Capprobe com pacotes de 1.500 bytes. A Figura 6.30 mostra o valor fornecido pela ferramenta, já a Figura 6.31 mostra o histograma após o envio de 200 pares de pacotes. A Tabela 6.12 mostra a mediana, a média e a moda para estes dados.

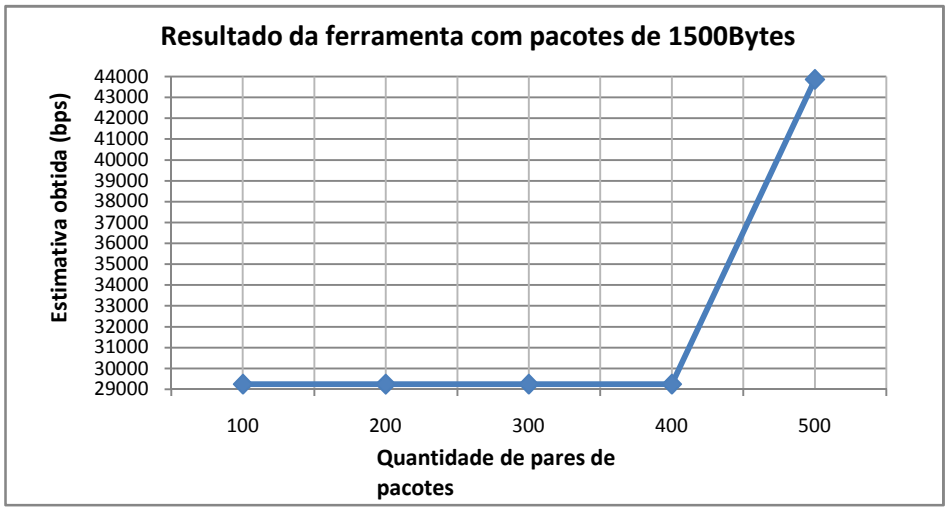


Figura 6.30 - Resultado da ferramenta sem concatenação no sentido SS-BS e pacotes de 1.500 bytes

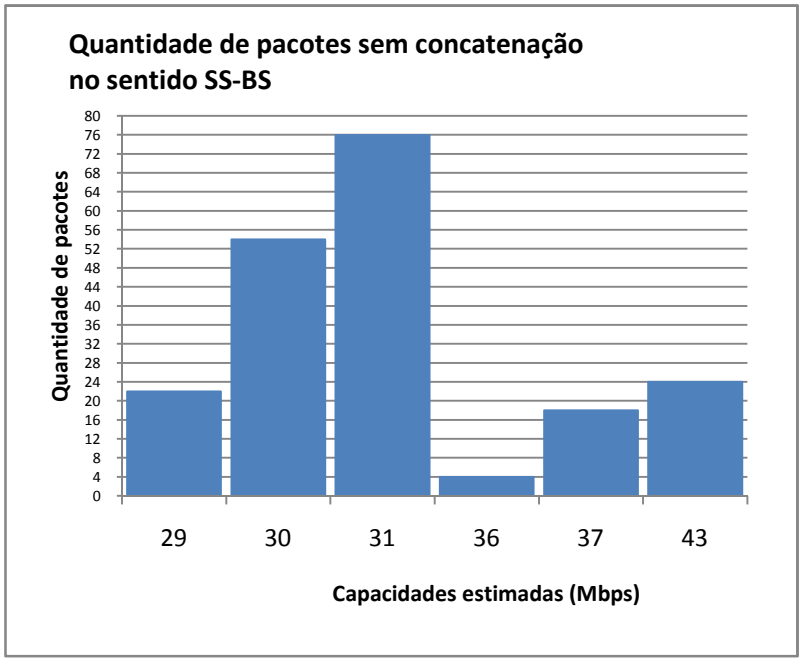


Figura 6.31 - Histograma sem concatenação e pacotes de 1.500 bytes no sentido SS-BS

Tabela 6-12 - Estatísticas do histograma da Figura 6.31

Métrica	Valor
Mediana	31
Média	32,5
Moda	31

É possível verificar que, neste caso, a estatística usada pelo Capprobe estima corretamente o valor esperado para downlink até 400 pares de pacotes enviados, se

perdendo após este ponto. Já a moda e a mediana deram valor um pouco acima do esperado.

A Figura 6.32 mostra a dispersão dos 100 primeiros pares de pacotes, quando a concatenação está desligada, mostrando que a maioria dos pares estima de forma correta o valor esperado.

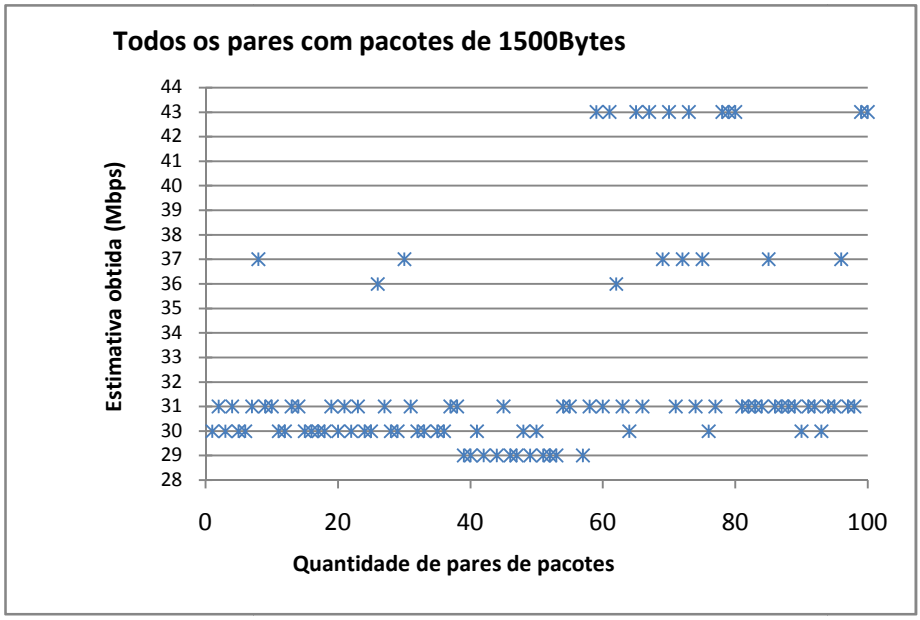


Figura 6.32 - Estimativas de capacidade sem concatenação e pacotes de 1.500 bytes no sentido SS-BS

6.3 Experimentos com o Pathrate no sentido BS-SS

A capacidade esperada no sentido BS-SS usando a ferramenta *Pathrate* é de 31.1 Mbps. Vale lembrar que, neste caso, a estimativa é unidirecional. A Tabela 6.13 apresenta todos os resultados variando as características. A primeira estimativa foi no sentido BS-SS com todas as características ligadas, e ficou na faixa entre 38 e 39 Mbps. Neste caso, o *Pathrate* executou em três fases, porém encontrou várias "possíveis" faixas para a capacidade e, após a passagem pela terceira fase, apresentou um valor bem acima do esperado. Na observação dos pacotes que passaram pelo enlace sem fio, foi detectada uma grande quantidade de pacotes concatenados, o que é a causa deste erro na estimativa. O mesmo se repetiu quando somente o *Burst* estava desativado. Nota-se que, neste caso só faz sentido falar em ativação ou desativação de *Burst* e concatenação apenas no BS, já que a medida é unidirecional.

Tabela 6-13 - Resultados do *Pathrate* no sentido BS-SS

BS-SS PATHRATE	Estimativa Esperada	Faixa Estimada	Número de Pacotes
Tudo ligado	**31.1**	**38 - 39**	**152**
Sem *Burst*	**28 – 31.1**	**35 - 39**	**289**
Sem concatenação	**28 – 31.1**	**29 - 29**	**214**
Sem *Burst* e sem concatenação	**28 – 31.1**	**28 - 29**	**152**

O *Pathrate* encontrou dificuldades para convergir para o resultado final com a modulação adaptativa ligada, poucas vezes ela conseguiu apresentar o valor final. Porém, após a desativação da modulação adaptativa, todos os testes chegavam ao fim.

Com o *Burst* desativado, a ferramenta se aproximou um pouco da capacidade esperada, conforme mostrado, porém ainda ficou acima do valor esperado. O *Pathrate* envia uma quantidade significativa de pacotes de tamanho pequeno que são influenciados pelo *Burst* e pela concatenação.

Na situação de somente a concatenação desativada e na de *Burst* e concatenação desativados, a ferramenta *Pathrate* necessitou passar pelas três fases previstas. Neste caso, a capacidade real do enlace deve estar compreendida entre 28 a 31.1 Mbps já que, por observação do fabricante, quando uma ou as duas características (*Burst* ou concatenação) estão desativadas, a capacidade pode cair até dez por cento. A ferramenta apresentou um valor estimado na faixa de 28 a 29 Mbps em ambos os casos, porém utilizou um grande número de trens de pacotes para chegar ao resultado final.

6.4 Experimentos com o Pathrate no Sentido SS-BS

Os resultados para o *Pathrate* no sentido SS-BS se encontram na Tabela 6.14. Neste sentido, com tudo ligado, a ferramenta *Pathrate* apresentou uma estimativa maior que a capacidade do enlace, cujo valor real é de 26,4 Mbps. A ferramenta errou a estimativa final e não entrou nas outras fases, não criando assim uma oportunidade de melhor verificar a capacidade estimada.

Testes feitos utilizando a ferramenta *Pathrate* no sentido SS-BS sem *Burst* e com a concatenação desligada apresentaram medição correta do enlace, em torno de 24

a 26 Mbps, obtido já na fase inicial sem a necessidade de envio de uma grande quantidade de pares de pacotes e trens de pacotes.

Tabela 6-14 - Resultados do *Pathrate* no sentido SS-BS

SS-BS PATHRATE	Estimativa esperada	Faixa Estimada	Número de Pacotes
Tudo ligado	**26.4**	**30**	**Todos**
Sem *Burst*	**23.7-26.4**	**28 - 29**	**152**
Sem concatenação	**23.7-26.4**	**25 - 27**	**Todos**
Sem *Burst* e sem concatenação	**23.7-26.4**	**24 - 26**	**Todos**

A estimativa por trem de pacotes do *Pathrate* é altamente prejudicada pela concatenação de pacotes em redes WiMAX. A colocação de pacotes menores em um único pacote maior faz com que a dispersão seja afetada e o resultado é, na maior parte das vezes, estimado acima da capacidade real do enlace devido à diminuição no intervalo final entre os pacotes. Os resultados com a concatenação desligada podem ser considerados satisfatórios, uma vez que a capacidade esperada era de 23,7 a 26,4 Mbps segundo o manual do fabricante, já que a desativação da concatenação, ou do *Burst*, resulta numa queda de 10% da capacidade total.

6.5 Quadros Comparativos

As tabelas 6.15 a 6.20 trazem um resumo dos resultados obtidos nos experimentos do estudo de caso 2.

Tabela 6-15 - Comparativo do *Capprobe* no sentido BS-SS com pacote de 1.500 bytes

BS - SS (1.500 bytes) CAPPROBE	VALOR ESPERADO	ESTIMATIVA	ERRO %
Tudo ligado	26,4	26	1,5
Burst desligado no BS	23,7-26,4	26	0,0
Burst desligado no SS	23.7-26.4	25 - 26	0,0
Sem concatenação	23.7-26.4	26 – 27	0,0
Tudo desligado	23.7-26.4	26 – 27	0,0

Tabela 6-16 - Comparativo do *Capprobe* no sentido BS-SS com pacote de 500 bytes

BS - SS (1.500 bytes) CAPPROBE	VALOR ESPERADO	ESTIMATIVA	ERRO %
Tudo ligado	26,4	235	790,2
Burst desligado no BS	23.7-26.4	38	43,9
Burst desligado no SS	23.7-26.4	42	59,1
Sem concatenação	23.7-26.4	26 – 27	0,0
Tudo desligado	23.7-26.4	26 – 27	0,0

Tabela 6-17 - Comparativo do *Capprobe* no sentido SS-BS com pacotes de 1.500 bytes

SS - BS (1.500 bytes) CAPPROBE	VALOR ESPERADO	ESTIMATIVA	ERRO %
Tudo ligado	31.1	30 - 31	0,3
Burst desligado no BS	23.7-26.4	27	2,3
Burst desligado no SS	28 – 31.1	31	17,4
Sem concatenação	28 – 31.1	31	0,0
Tudo desligado	23.7-26.4	26	0,0

Tabela 6-18 - Comparativo do *Capprobe* no sentido SS-BS com pacotes de 500 bytes

SS - BS (500 bytes) CAPPROBE	VALOR ESPERADO	ESTIMATIVA	ERRO %
Tudo ligado	31.1	41	31,8
Burst desligado no BS	23.7-26.4	42	59,1
Burst desligado no SS	28 – 31.1	23	26,0
Sem concatenação	28 – 31.1	29	6,8
Tudo desligado	23.7-26.4	29	9,8

Tabela 6-19 - Comparativo do *Pathrate* no sentido BS-SS

BS - SS PATHRATE	VALOR ESPERADO	ESTIMATIVA	ERRO %
Tudo ligado	31.1	38 - 39	25,4
Burst desligado	28 – 31.1	35 - 39	25,4
Sem concatenação	28 – 31.1	29 - 29	6,8
Tudo desligado	28 – 31.1	28 - 29	6,8

Tabela 6-20 - Comparativo do *Pathrate* no sentido SS-BS

SS - BS PATHRATE	VALOR ESPERADO	ESTIMATIVA	ERRO %
Tudo ligado	26.4	30 – 30	13,6
Burst desligado	23.7-26.4	28 - 29	9,8
Sem concatenação	23.7-26.4	25 - 27	2,3
Tudo desligado	23.7-26.4	24 - 26	1,5

6.6 Discussão dos Resultados

6.6.1 Falhas no Método do Par de Pacotes

Nas estimativas de capacidade usando a técnica dos pares de pacotes em enlaces WiMAX é necessária algumas observações para extrair corretamente os resultados. O estado da rede durante as medições é um fator importante para o sucesso das medições, nosso trabalho não leva em consideração a presença de tráfego cruzado. A condição de um alto tráfego concorrente pode causar em uma estimativa errada, algo já sabido com relação a esta técnica independente dela ser usada em enlaces cabeados ou não. No início dos experimentos deste trabalho, alguns experimentos foram feitos com tráfego cruzado nas faixas de 30%, 50% e 70%. Com 30% de tráfego as medições já começavam a apresentar erros independentes do sentido da medição, com 50%, graves erros eram notados. O tráfego cruzado no WiMAX decorrente das informações de controle entre BSs e SSs, apesar de considerável, não afetou as medições realizadas. Porém, em algumas situações, o *Wireshark* mostrou um tempo bem maior do que o esperado no intervalo dos pacotes, possivelmente causado por algum pacote de controle que foi colocado entre o par de pacotes.

Algumas características afetam a técnica dos pares de pacotes. A modulação adaptativa afetou bastante as medições, porém como era um problema de reflexão, ela foi desativada. Algumas vezes, o envio de RTS e CTS para pacotes de 1.500 bytes interferia nas medições. Por se tratar de uma característica do 802.11, esta característica foi desligada. As características de concatenação e *Burst* estiveram sempre presentes nos experimentos e influenciaram diretamente as medições. Para o método do par de pacotes, a concatenação influenciava diretamente nos pacotes menores, esses eram colocados em quadros maiores, chamados de quadros concatenados, e enviados pelo meio sem que o par se distanciasse um do outro, tornando impossível a medição do enlace sem fio. Quando a concatenação estava desligada, a estimativa era fornecida sem problemas. A concatenação não afetava muito os pacotes do tamanho da MTU, pois poucos eram os quadros que eram concatenados nesta situação devido ao tamanho. O *Burst* tinha uma influência maior nos experimentos, o motivo foi a ferramenta escolhida para as estimativas. O *Capprobe* fornece a estimativa após o par percorrer o caminho de ida e volta no enlace, e como o enlace WiMAX é assimétrico, o correto era a ferramenta estimar o enlace de menor capacidade sempre, ou seja, o canal SS-BS de *uplink*. Mas, em algumas situações descritas na Seção 5.3, isso não ocorria. O problema é que, quando o *Burst* está ativo, os quadros são enviados sem o período de contenção, e quando isto ocorre na volta, todo espaçamento anterior é anulado o resultado obtido é sempre a estimativa de capacidade para o *link* de retorno.

6.6.2 Falhas Devido às Medidas Estatísticas do *Capprobe*

Resultados finais da ferramenta *Capprobe* apresentaram alguns problemas devido à interpretação da estimativa final para a medida de capacidade. O *Capprobe* combina atrasos de ida e volta com dispersões de pares de pacotes, filtrando distorções. Nos experimentos, os valores de cada par de pacotes inferidos pela ferramenta foram computados e um histograma foi montado. Em alguns casos, principalmente no sentido BS-SS, a estimativa de capacidade deveria ser definida pelo caminho de *uplink* no sentido SS-BS, porém a ferramenta estimava uma capacidade maior do que a esperada. Todavia, quando verificado o histograma e freqüência das capacidades, ou mesmo a média, esses resultados eram equivalentes à capacidade esperada. O mesmo ocorreu com outros experimentos usando o *Capprobe*. Conclui-se, portanto, que a forma utilizada por esta ferramenta para fazer a avaliação estatística das informações obtidas através dos pares de pacotes enviados pode ser melhorada quando a freqüência for

levada em consideração em primeiro lugar, tendo como objetivo sua utilização em caminhos contendo enlaces WiMAX.

6.6.3 Falhas no Método Usado pelo *Pathrate*

O método do trem de pacotes está presente no método usado pela ferramenta *Pathrate*. Esta técnica, combinada com a variação no tamanho dos pacotes, mostrou ser muito afetada pela característica de concatenação do enlace WiMAX. O *Pathrate* envia pacotes de tamanhos diferentes a uma taxa constante, "um prato cheio" para a concatenação, pois esta aproveita os pacotes pequenos e os concatena em um quadro concatenado maior, retirando os tempos entre os pares quando estes são recuperados no rádio receptor. Além disso, devido ao fato de estar sempre chegando pacotes, quadros de concatenação possuem sempre candidatos para ocupar esse quadro maior. Com isso, a ferramenta leva um tempo maior para inferir um resultado e, devido à quantidade de quadros que são concatenados, esse resultado tende ao erro e apresenta sempre uma capacidade maior que a esperada. Na desativação destas características, o *Pathrate* conseguiu inferir a capacidade, principalmente no sentido SS-BS, onde se conseguia o resultado esperado ainda na fase inicial de rodada da ferramenta.

A funcionalidade de *Burst* não afetou os resultados do *Pathrate* pelo fato dele ser unidirecional. O *Burst* só trará problemas para a medição quando esta for bidirecional e ele estiver ativado no lado receptor.

6.7 Workarounds dos Problemas Encontrados

Para ser possível utilizar as ferramentas de estimativa de capacidade estudadas neste trabalho de uma maneira ampla, faz-se necessário que estas estejam aptas a fornecer resultados confiáveis qualquer que seja a tecnologia dos enlaces de um dado caminho, até porque deve-se levar em consideração que, à priori, o usuário ou sistema final desconhece estas características. Sendo assim, para os problemas aqui estudados, fazem necessárias algumas modificações nos métodos utilizados pelas ferramentas, como o uso da freqüência, para se evitar distorções causadas pelas funcionalidades de *Burst* ou concatenação, normalmente ativadas por *default* em rádios WiMAX. No caso da concatenação, o workaround natural é o uso de pacotes com tamanho grande, de maneira a diminuir as chances destes virem a ser concatenados. Os resultados aqui expostos para os experimentos usando o *Capprobe* demonstram isto.

No caso do *Burst*, o problema está relacionado com os pacotes que são transmitidos em rajada e só se aplica às estimativas de ferramentas não cooperativas, como o *Capprobe*, que necessitam das respostas aos pacotes enviados. O *Burst* do outro lado faz com que um pacote de resposta fique junto com um pacote anterior enquanto este é serializado pelo enlace sem fio. Como isto só ocorre se o segundo pacote chegar dentro de um limite de tempo configurável, correspondente ao tamanho máximo da rajada, a forma mais natural de se contornar este problema é forçar que o intervalo de tempo entre os dois pacotes de prova seja superior ao maior limite máximo configurável nos equipamentos. No caso do rádio Alvarion, este limite é de 10ms. A técnica de trem de pacotes permite contornar este problema, bastando fazer com que o último pacote do trem seja enviado num intervalo de tempo superior a 10ms em relação ao primeiro pacote do trem. Como a técnica se baseia nas estampas de tempo do primeiro e do último pacote para extrair a medida de capacidade, estes jamais serão inseridos numa mesma rajada.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou o comportamento das ferramentas de medição em redes que usam a técnica de pares de pacotes para estimar a capacidade de um caminho contendo enlaces sem fio no padrão IEEE 802.16, comumente chamadas de redes WiMAX. Ferramentas amplamente adotadas em estimativas de capacidade (*Pathrate* e *Capprobe*) foram usadas para executar experimentos numa rede corporativa e num ambiente controlado. As principais características das redes WiMAX foram mapeadas para analisar a influência de cada uma nas medições deste trabalho, sendo que aquelas que mais influenciaram na estimativa de capacidade foram a modulação adaptativa, o envio de pacotes de requisição, o escalonamento, o *burst* e a concatenação de quadros. O trabalho focou nas duas que mais alteraram o comportamento das ferramentas de medição: (i) o *burst*, que elimina o espaço *interframe* para permitir rajadas, alterando assim o resultado final da estimativa, e a (ii) concatenação, que junta quadros menores em um quadro maior e, com isso, elimina a possibilidade de dispersão entre os quadros originais durante sua transmissão pelo enlace de rádio. Como o resultado da estimativa de capacidade por par de pacotes depende desta dispersão, o resultado fica comprometido.

Um estudo utilizando rádios pré-WiMAX fabricados pela Alvarion foi feito para identificar as causas dos problemas de medição encontrados nos testes com os equipamentos. Os rádios possuíam algumas características de redes IEEE 802.11, como tempos de DIFS (*Distributed Interframe Space*) e SIFS (*Short Interframe space* configuráveis, mas o objetivo foi avaliar as características do WiMAX presentes nos rádios.

Os resultados comentados no capítulo 5 mostram as deficiência das ferramentas existentes para estimativa de capacidade de caminho quando o gargalo é um enlace WiMAX. Os resultados mostram que as funções de *Burst* e concatenação, que fazem com que o padrão IEEE 802.16 consiga ser mais eficiente e que são ativadas por *default* nos rádios WiMAX da Alvarion, influenciam negativamente nos resultados das ferramentas que usam a técnica do par de pacotes.

Este trabalho também identificou algumas ações que podem ser adotadas para melhorar as estimativas de capacidade em redes WiMAX, como o uso de pacotes de

tamanho grande, por serem menos suscetíveis a concatenação, e a adoção de trens de pacotes com duração superior ao limite máximo de tempo de rajadas, que é um parâmetro da função *burst*. Isto também ajuda a diminuir o efeito da concatenação, uma vez que a dispersão é medida entre o primeiro e o último pacote do trem. A identificação e o estudo das características específicas dos enlaces de rádio WiMAX que influenciam na técnica de medição por pares de pacotes são essenciais para a proposta de novas ferramentas de medição que levam essas características em consideração.

Como trabalho futuro, pretende-se estudar o uso do trem de pacotes como mecanismo de *workaround* para os problemas decorrentes das funções de *burst* e concatenação. Além disso, pretende-se estender os estudos aqui realizados para também contemplar o problema do tráfego cruzado e verificar sua influência frente às diversas características das redes WiMAX. De posse destes resultados, espera-se também ser possível a realização de testes numa rede de produção que possua enlaces WiMAX.

8. REFERÊNCIAS

AUGUSTO, M. E., 2002, *Avaliação Experimental de Ferramentas para Medição de Largura de Banda*. Dissertação de Mestrado, Pós-graduação em Informática, Universidade do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

ALBERTI, R. A., Chan, S., "*A Comparasion of Approaches for IEEE 802.16 Performance Evolution*", MPRG- Mobile and Portable Radio Research 2006, Virgínia

BREEZE – Manual do radio Alvarion BreezeConfig for BreezeACCESS VL versão 4.5.0.9

BROERSMA, M. *WiMAX – don't believe the hype*. Techworld. 29 April 2004.

CARTER, R., Crovella, M. 1996, *Measuring Bottleneck Link Speed in Packet Switched Networks*. Journal ACM – Performance Evolution

CHEN, L., SUN, T., YANG, G., SANADIDI, M. Y., GERLA, M. 2005, *AdHoc Probe: Path Capacity Probing in Wireless Ad Hoc Networks*

CLAFFY, K. 2006, *Comparison of Public End-to-End Bandwidth Estimation Tools on High-Speedy Links*, PAM - Passive & Active Measurement

CROCE, D., En-NAJJARY, T., URVOY-KELLER, G., BIERSACK, E. W., et al., 2008, "Capacity Estimation of ADSL Links", CoNEXT 2008

DIAS, G. N. 2005, *Estudo sobre o Padrão IEEE 802.16 para Redes Metropolitanas Sem fio de Banda Larga.* Laboratório de Redes de Alta Velocidade – RAVEL – Programa de Engenharia de Sistemas e Computação – PESC/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro

DOVROLIS, C., RAMANATHAN, P., MOORE D. 2001, *What do packet dipersion technique measure*. Proceding of INFOCOM - Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.

DOVROLIS C., MOORE D. 2004, *Packet Dispersion Techniques and a Capacity Estimation Methodology*. Journal IEEE/ACM Transactions on Networking

DOVROLIS, C., MANISH, J., PRASAD R. 2001, *Tutorial Pathrate* - Georgia Tech – College of Computing

EKLUND, C. MARKS, R-B., PONNUSWAMY, S. STANWOOD, K-L. 2006. *WirelessMAN Inside the IEEE 802.16 Standard for Wireless Metropolitan Networks* COMSOC - Communication Society

FIGUEIREDO, F. L. *Fundamentos de Tecnologia WiMAX* – 2009 - CPqD Telecom & IT Solutions, Relatório Técnico.

GRONDALEN, O., GRONSUND P., BREIVIK T., 2007, *Fixed WiMAX Field Trial Measurements and Analyses* - Mobile and Wireless Communications Summit

HALEPOVIC, E. WU, Q., WILLIAMSON, C., GHADERI, M., 2007, *TCP over WiMAX: A Measurement Study*. MASCOTS 2008 - Modeling, Analysis and Simulation of Computers and Telecommunication Systems, 2008..

IEEE Std 802.16-2003. Standard for Local and Metropolitan area networs. Part 16: AirInterface for Fixed Broadband Wireless Access Systems – Amendment 2:Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz (Amendment to IEEE Std 802.16-2001). April 01, 2003. Disponível em http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp [Acesso em: agosto de 2010]

ISIKAWA,C. K., BIANCHINI, D., 2009, *Simulação de Rede Wireless 802.16 Estudo do comportamento da MAC* – Relatório Científico – PUC Campinas

JACOB, S., KATABI, D., KAASHOEK, F., 2003, *A Measurement Study of Available Bandwidth Estimation* - IMC '03 Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM conference on Internet measurement

JACOBSON V., 1999, *Pathchar: A Tool to Infer Characteristics of Internet Paths*. SIGCOMM '99 Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication

JOHNSSON, A., 2004 *On the Comparison of Packet Pair and Packet Train Measurements*

KAPOOR, R., CHEN. L., LAO, L., GERLA, M., SANADIDI, M. Y., et al., 2004, *Capprobe: A Simple and Accurate Capacity Estimation Technique* SIGCOMM '04 Proceedings of the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications

LAI, D.; BAKER, M. *Measuring bandwidth.* 1999, Infocom - IEEE International Conference on Computer Communications

LAI, K.; BAKER, M. 2000, *Measuring link bandwidths using a deterministic model of packet delay*. In: SIGCOMM.

MARCONDES, C., SANADIDI, M.Y., C.GERLA, MARTINELLO M., SCHWARTZ, R. S. 2007 - *Exploring Embedded Path Capacity Estimation in TCP Receiver. In: Workshop on End-to-End Monitoring Techniques and Services,* E2EMON, May 21, 2007 , Munich, Germany

MARCONDES, C., SCHWARTZ, R. S., SANTOS R. O., MARTINELO, M., SANADIDI M. Y., GERLA, M. 2008 - *PathCrawler: Automatic Harvesting Web Infra-Structure.* NOMS - Network Operations and Management Symposium

PRASAD, R., DOVROLIS, C., NURRAY M. 1997, *Bandwidth Estimation: Metrics measurement Techniques and Tools* , IEEE Network.

PERSSON, A., MARCONDES, C., CHEN, L., LAO L. SANADIDI, M. Y., GERLA, M. 2009, *TCP Probe: A TCP with built-in Path Capacity Estimation* - 8th IEEE Global Internet Symposium.

ROCHA, A. A. A., LEÃO., R. M. M., SILVA E. S., *Estimando a taxa de transmissão de redes de acesso sem fio através de medições fim-a-fim na Internet* . 2006, SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores

ROCHA, A. A. A., LEÃO., R. M. M., SILVA E. S., 2007, *An End-toEnd Technique to Estimate the Transmission Rate of IEEE 802.11 WLAN* - Communications, 2007. ICC IEEE International Conference

ROESLER. V., FINZSCH. P., ANDRADE. M., LIMA. J. V., 2007, Análise do mecanismo de pares de pacotes visando estimar a banda da rede via UDP - SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores

SO-IN, C., JAIN, R., TAMIMI, A. A. 2009, *Capacity Estimation of IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks*

SOUSA, L. B. 2007, *Projetos e implementação de redes: fundamentos, soluções, arquiteturas e planejamento*. 1ed São Paulo: Érica

SUN, T., YANG, G. CHEN, L. SANADIDI, M. Y., GERLA M. 2005, A measurement Study of Path Capacity in 802.11b based Wireless Networks - WiTMeMo '05 Workshop on Wireless Traffic Measurements and modeling

WiMAX Forum. www.WiMAXforum.org