

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE INFORMÁTICA APLICADA
CURSO DE BACHARELADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

UM ESTUDO SOBRE ESTIMATIVA DE CAPACIDADE EM REDES WIMAX
COM A FERRAMENTA CAPPROBE E UM CENÁRIO REAL

Daniel de Miranda Chaves Christiani

Orientador: Carlos Alberto Vieira Campos

Co-Orientador: Sidney Cunha de Lucena

Agosto/2013

UM ESTUDO SOBRE ESTIMATIVA DE CAPACIDADE EM REDES WIMAX
COM A FERRAMENTA CAPPROBE E UM CENÁRIO REA

Projeto de Graduação apresentado à Escola
de Informática Aplicada da Universidade
Federal do Estado do Rio de Janeiro
(UNIRIO) para obtenção do título de
Bacharel em Sistemas de Informação.

Daniel de Miranda Chaves Christiani

Orientador: Carlos Alberto Vieira Campos

Co-Orientador: Sidney Cunha de Lucena

“To accomplish great things, we must not only act, but also dream; not only plan, but also believe.”

Jacques Anatole François Thibault

Dedico esta monografia à minha namorada, Karen, que se fez presente em todos os momentos em que me dediquei e me esforcei para concluir este projeto.

Agradecimentos

Agradeço, acima de tudo, a Deus pelo dom da vida, sem o qual nada seria possível. Agradeço também aos meus orientadores, os professores Carlos Alberto Vieira Campos e Sidney Cunha de Lucena pela dedicação e orientação que me deram, não apenas neste trabalho, mas na minha vida acadêmica como um todo. Agradeço a eles também por me ensinarem sobre redes de computadores, conhecimento este que me encantou e me fez buscar um saber ainda maior, agora materializado nesta monografia.

Agradeço também ao capitão Alex Avellar de Oliveira e ao Exército Brasileiro pelo uso do enlace WiMAX, sem o qual não seria possível realizar o trabalho. Suas orientações e disposição que permitiram a realização das medições aqui descritas. Meus agradecimentos também ao professor Antonio Augusto de Aragão Rocha por ter gentilmente cedido o acesso a uma máquina na UFRJ, que também foi essencial a este trabalho.

Gostaria de dizer também um muito obrigado aos meus pais, Sônia Ruth Valente de Miranda Chaves e Luiz Fernando Christiani por terem me dado uma boa educação e os meios de alcançar todos os meus objetivos. Eu devo a eles todo o meu caráter, e valores.

Finalmente, agradeço à minha namorada, Karen Nunes Valcarcel, por todo o amor, carinho e dedicação que ela tem demonstrado em todo o tempo em que estamos juntos. Quando me senti perdido e com dúvidas, ela veio me aconselhar. Quando me senti fraco e desmotivado, ela sempre veio com palavras de incentivo. E quando finalmente eu consegui vencer, ela veio compartilhar a alegria comigo.

Índice de ilustrações

Figura 1: WiMAX: Arquitetura P2P	14
Figura 2: WiMAX: Arquitetura PMP	15
Figura 3: Arquitetura WiMAX [Alberti 2010].....	20
Figura 4: Intervalo entre quadros. [Silva 2008]	26
Figura 5: Intervalo entre pacotes.....	26
Figura 6: Técnica de pares de pacotes com dispersão normal	27
Figura 7: Par de pacotes com dispersão reduzida	28
Figura 8: Par de pacotes com dispersão expandida.....	28
Figura 9: Tráfego cruzado.....	29
Figura 10: Trem de pacotes.....	30
Figura 11: Cenário de teste	36
Figura 12: PuTTY	37
Figura 13: CapProbe	38
Figura 14: Aplicação R	38
Figura 15: Cenário entre a estação base e a estação assinante.....	41
Figura 16: Cenário entre a estação assinante e a estação externa.	45
Figura 17: Medição com 2.000 pacotes	52
Figura 18: Medição com 4.000 pacotes	53
Figura 19: Medição com 8.000 pacotes	54
Figura 20: Cenário entre a estação base e a estação assinante com interferência.	55
Figura 21: Cenário entre a estação base e a estação externa com interferência.....	60

Índice de Tabelas

Tabela 1: Valores fornecidos pelo fabricante.....	40
Tabela 2: Medições entre a estação base e a estação assinante - funcionalidades desligadas	42
Tabela 3: Medições entre a estação base e a estação assinante - Funcionalidades ligadas	42
Tabela 4: Medições entre a estação base e a estação assinante - Burst ligado.....	43
Tabela 5: Medições entre a estação base e a estação assinante - Concatenação ligada	44
Tabela 6: Medições entre a estação assinante e a estação externa.....	46
Tabela 7: Medições entre a estação base e a estação externa - Funcionalidades desligadas	47
Tabela 8: Medições entre a estação base e a estação externa - Funcionalidades ligadas	48
Tabela 9: Medições entre a estação base e a estação externa - Burst ligado	49
Tabela 10: Medições entre a estação base e a estação externa - Concatenação ligada	50
Tabela 11: Testes Preliminares com interferência	54
Tabela 12: Medições entre a estação base e a estação assinante - Funcionalidades Desligadas.	56
Tabela 13: Medições entre a estação base e a estação assinante - Funcionalidades ligadas	57
Tabela 14: Medições entre a estação base e a estação assinante - Burst ligado.....	58
Tabela 15: Medições entre a estação base e a estação assinante - Concatenação ligada	59
Tabela 16: Medições entre a estação assinante e a estação externa.....	60
Tabela 17: Medições entre a estação base e a estação externa - Funcionalidades desligadas	61
Tabela 18: Medições entre a estação base e a estação externa - Funcionalidades ligadas	62
Tabela 19: Medições entre a estação base e a estação externa - Burst ligado	63

Tabela 20: Medições entre a estação base e a estação externa - Concatenação ativada	
.....	64

Sumário

Capítulo 1 – Introdução.....	14
Capítulo 2 – WiMAX.....	18
2.2 – Camadas do WiMAX.....	20
2.2.1 – Camada Física (PHY)	20
2.2.2 – Camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC).....	20
2.2.2.1 – Subcamada de Segurança.....	20
2.2.2.2 – Subcamada de Convergência Comum	21
2.2.2.3 – Subcamada de Convergência Específica.....	22
2.2.2.4 – Burst (Rajada)	22
2.2.2.5 – Concatenação	23
2.3 – Motivação.....	23
Capítulo 3 – Medição da capacidade de um caminho de rede	25
3.1 – Técnicas de medição	25
3.1.1 – Par de pacotes (TOPP – Train of Package Pair)	25
3.1.2 – Trem de Pacotes	29
3.1.3 – VPS: Variable Package Size	30
3.1.4 – SLoPS: Self-Loading Periodic Streams	30
3.2 – Ferramentas para a Medição:	31
3.2.1 – CapProbe	31
3.2.2 – PathRate	32
Capítulo 4 – Trabalhos Relacionados	33
Capítulo 5 – Análise Experimental:	35
5.1 – Cenário de Testes	35
5.2 – Ferramentas Utilizadas.....	36
5.2.1 – PuTTY	36
5.2.2 – CapProbe	37
5.2.3 – R	38
Capítulo 6 – Resultados obtidos.....	39
6.1 – Metodologia	39
6.2 – Avaliação da capacidade entre estações do enlace WiMAX	40

6.2.1 – Avaliação da Capacidade do Enlace WiMAX Utilizando a Estação Externa	44
6.3 – Medições preliminares com interferência de outra estação na camada física...	51
6.3.1 – Medição da capacidade com interferência	55
6.3.2 – Avaliação da capacidade do enlace WiMAX com interferência	55
6.3.4 – Avaliação da capacidade do enlace WiMAX com interferência e utilizando a estação externa	59
Capítulo 7 – Conclusão e trabalhos futuros	66
Referências Bibliográficas:	67

Lista de Abreviaturas

1xEVDO - Evolution-Data Optimized

4G – Quarta Geração

ATM - Asynchronous Transfer Mode

BS – Base Station

EA – Estação Assinante

EB – Estação Base

EE – Estação Externa

Gbps – Gigabits por segundo

GHz – Giga Hertz

ICMP - Internet Control Message Protocol

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineer

IP – Internet Protocol

Km – Quilômetro

Km/h – Quilômetros por hora

LOS – Line of Sight

MAC – Media Access Control

MAN – Metropolitan Area Network

Mbps – Mega bits por segundo

MIMO – Multiple-input and multiple-output

NLOS – No Line of Sight

PHY - Physical Layer

PING – Packet Internet Grouper (Groper)

PMP – Point-to-Multipoint

P2P – Point-to-Point

PDU – Protocol Data Unit

PKM – Private Key Management

QoS – Quality of Service

RTT – Round Trip Time

SA – Security Association

SDU – Service Data Unit

SLoPS - Self-Loading Periodic Streams

SSH - Secure Shell

TOPP – Train of Packege Pair

TTL – Time to Live

UDP - User Datagram Protocol

VPS - Variable Package Size

WiMAX - Wordwide Interoperability for Microwave Access

Resumo

Este trabalho possui como objetivo avaliar o comportamento de uma conhecida ferramenta de medição de pares de pacotes ao tentar estimar a capacidade de um enlace WiMAX. Devido às características únicas nestas redes, a medição por este tipo de técnica acaba sendo muito imprecisa e falha. Por isto, foram analisados os resultados de diversas medições e em vários cenários diferentes para tentar descobrir a melhor maneira de se utilizar estas ferramentas. Foi também avaliado a influência de uma interferência no meio físico nas medições.

Palavras-chave: Redes de computadores; WiMAX; CapProbe; Estimativa de Capacidade; Pares de pacotes

Capítulo 1 – Introdução

O padrão IEEE 802.16, chamado WiMAX [IEEE Std 802.16-2003], tem por função oferecer uma solução para o problema de criar uma rede de ampla área, provendo o serviço de ligações ponto-a-ponto (P2P) ou ponto-multiponto (PMP). A rede ponto-a-ponto é caracterizada pelo fato dos dispositivos em redes estarem em série, podendo ser necessário acessar todos os pontos da rede para ir de um extremo até o outro.



Figura 1: WiMAX: Arquitetura P2P

Já na topologia ponto-multiponto é possível acessar diversos pontos da rede através de uma mesma estação base. As redes WiMAX, por serem redes sem fio de banda larga, também são consideradas uma alternativa de baixo custo, já que não precisam da mesma infraestrutura que as redes cabeadas.

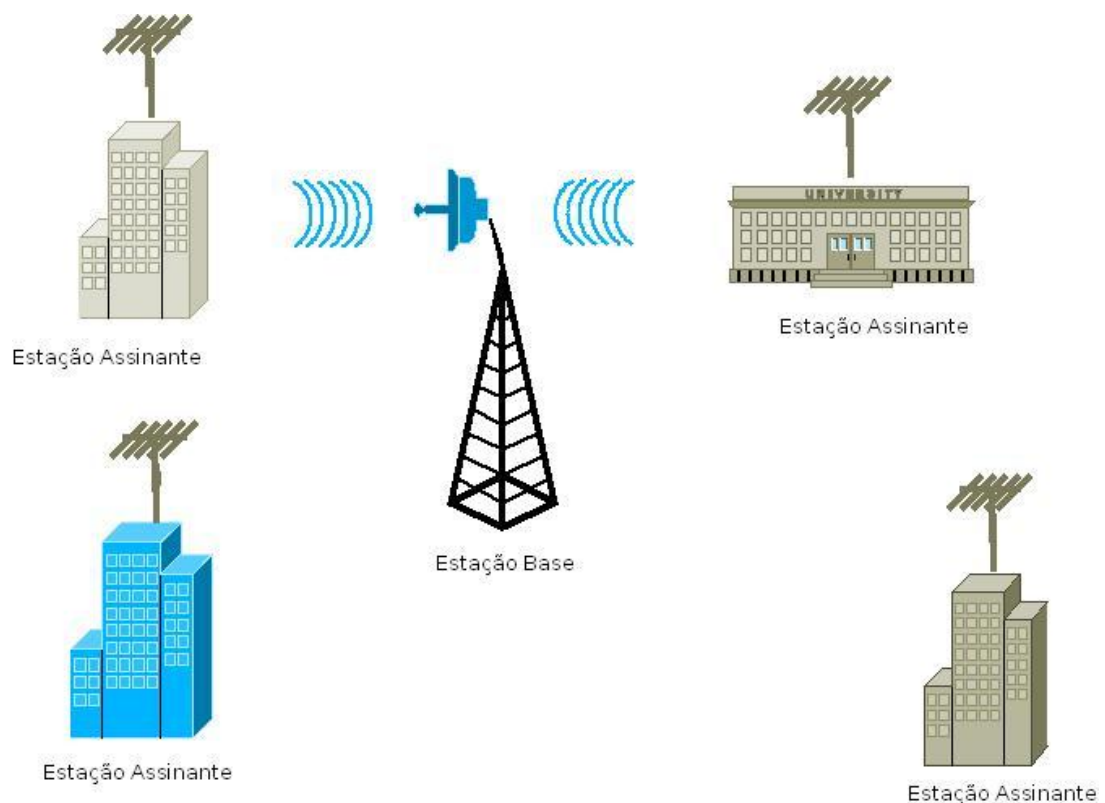


Figura 2: WiMAX: Arquitetura PMP

As redes de computadores possuem diversas categorias. Estas categorias estão relacionadas com o tamanho e a área de alcance da rede. Uma rede que possua uma área muito restrita, formada apenas por dispositivos conectados entre si, e muito próximos, é chamada de rede pessoal (PAN – *Personal Area Network*). Ao se expandir esta rede, limitando a mesma a uma área de até 10 km, cria-se uma rede chamada de rede local (LAN – *Local Area Network*) [Rodrigues et al 2009]. Quando estas redes são formadas por dispositivos Wireless são denominadas de WLANs.

Ao expandir a rede até os limites de uma cidade, cria-se uma rede metropolitana (MAN – *Metropolitan Area Network*). Com este tipo de rede, diversos usuários podem conseguir acesso à internet, e empresas podem interconectar diversas filiais dentro dos limites de uma mesma cidade. No entanto, algumas destas redes necessitam de uma área ainda maior, sendo assim denominadas de redes regionais (RAN – *Regional Area Network*).

Algumas redes são tão grandes que se expandem por uma grande área, englobando diversas cidades, estados e até mesmo países. Estas redes são denominadas de WLANs (*Wide Area Network*). As WLANs que são compostas por dispositivos sem fio são chamadas de WWANs, sendo o WiMAX um padrão para este tipo de rede.

O padrão IEEE 802.16 é dividido em duas camadas: a camada física (PHY) e a camada de acesso ao meio (MAC) [IEEE Std 802.16-2003]. A camada MAC possui mais três divisões, chamadas de subcamadas. Estas são a subcamada de segurança, a subcamada de convergência comum e a subcamada de convergência de serviços específicos.

Dentro da camada MAC, o WiMAX apresenta as funcionalidades de Concatenação e o *Burst* [Oliveira 2010]. Enquanto a função de concatenação faz a junção de vários quadros, a função *Burst* reduz o intervalo entre a transmissão dos mesmos. Ambas possuem a função de aumentar o *throughput*.

A estimativa da capacidade de uma rede é uma importante métrica dentro da gerência de redes de computadores. O conhecimento destas medidas pode auxiliar a monitoração destas redes e também são utilizadas para desenvolver aplicações que são dependentes destas medidas [Silva 2008]. Para auxiliar na estimação da capacidade do enlace, foram desenvolvidas ferramentas para automatizar o processo de medição. Cada ferramenta destas utiliza uma técnica diferente para estimar a capacidade.

Um dos métodos para se estimar a capacidade de transmissão dentro de um enlace é chamado de Pares de Pacotes. Esta é uma técnica ativa de medição de enlace, [Quinteiro 2007] uma vez que é preciso enviar os pacotes para a rede, e assim realizar a medição. Nesta técnica, são enviados dois pacotes, possuindo o menor tempo possível entre os dois. A medição é feita a partir do aumento do intervalo entre os pacotes, já que quanto maior for o intervalo final entre os pacotes, menor será a capacidade de transmissão do enlace. Outro método de medição é conhecido como Trem de Pacotes. Este método é caracterizado pelo envio de vários pacotes, com um tempo mínimo entre eles. Ambos os métodos podem ser influenciados pelo tráfego na rede.

As funcionalidades de *Burst* e Concatenação representam uma grande dificuldade para a medição do tempo de transmissão de uma rede que contenha um enlace WiMAX [Oliveira 2010]. Isto acontece pelo fato delas deliberadamente reduzirem o intervalo entre os pacotes a serem transmitidos.

Capítulo 2 – WiMAX

O WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) é uma definição de tecnologia para redes sem fio de banda larga [Quinelato et al, 2007], no qual é utilizado o padrão IEEE 802.16 [IEEE Std 802.16-2003]. Este padrão é utilizado para redes de computadores que se estendem em uma rede metropolitana. Em uma rede WiMAX, as taxas de transmissão de dados variam de alguns Mbps até 150Mbps, variando de acordo com determinadas configurações do meio físico, como a frequência utilizada, o tipo de modulação, as técnicas utilizadas para o controle de erros e até mesmo pelas condições do ambiente. Devido às suas características, o WiMAX é utilizado para atuar em grandes redes metropolitanas (MAN – *Metropolitan Area Network*), e, por isso, agregam diversos serviços dentro de uma mesma rede. Uma rede WiMAX pode atender a milhares de usuários, a partir de uma única estação base, provendo serviços com diferentes tipos de prioridade.

Em Junho de 2001 foi fundado o WiMAX Fórum [Soares 2009], um consórcio entre diversas empresas de telecomunicações e computação, como por exemplo as empresas Intel, Alvarion, AT&T, Fujitsu, Samsung e Nextel. O objetivo deste consórcio é o desenvolvimento de produtos baseados na tecnologia WiMAX, bem como a certificação de equipamentos, garantindo a interoperabilidade entre os mesmos [Rés 2006] [Rocha 2006]. Vale ressaltar que o WiMAX Fórum é uma organização sem fins lucrativos.

2.1 – Padrões WiMAX

O padrão IEEE 802.16 surgiu em Dezembro de 2001, como uma solução para banda larga de última milha [Rés 2008]. No entanto, o WiMAX só foi aprovado pelo IEEE em Abril de 2002 [Rocha 2006] [Lima et al, 2004]. Em sua primeira versão, o WiMAX operava dentro da faixa de frequência de 10 até 66GHz, e requeria uma linha de visada direta entre os seus dispositivos (LOS – *Line Of Sight*).

Em Janeiro de 2003 foi apresentada uma nova versão do padrão, chamada IEEE 802.16a [Rés 2008]. Esta versão corrigia o problema da necessidade de visada direta entre os dispositivos. Além disso, o padrão IEEE 802.16a utilizava uma faixa de frequência mais baixa, de 2 GHz até 11 GHz [Rocha 2006]. Esta versão do WiMAX possui um alcance de até 50Km sem linha de visada (NLOS – *No Line Of Sight*) e com taxas de transmissão de até 75Mbps. Como atende a diversos usuários

ao mesmo tempo, começou a ser utilizada como solução de acesso à internet de banda larga em última milha. Este padrão recebeu mais duas correções, a IEEE 802.16b, que abordou a qualidade de serviço e a IEEE 802.16c, que abordava aspectos da interoperabilidade, protocolos e especificação de teste de conformação [Lima et al, 2004].

Aproveitando as melhorias dos padrões anteriores, a versão IEEE 802.16d também acrescentou a possibilidade do uso de antenas do tipo MIMO, aumentando a confiabilidade do alcance do WiMAX, e possibilitando o seu uso em locais fechados. Lançada em Outubro de 2004, esta nova revisão firmou-se como o novo padrão WiMAX, em detrimento dos anteriores.

Também conhecido como WiMAX fixo, este padrão operava em frequências de até 66GHz [Oliveira 2010], conseguindo alcançar uma taxa de transmissão de até 70 Mbps para cada estação base. O seu limite de alcance varia de 8 km até 12 km sem a linha de visada, mas pode alcançar uma distância de 30 km até 40 km caso possua uma linha de visada [Rodrigues et al, 2009]. Neste padrão, embora fosse possível a movimentação das estações base, isto só poderia ser feito enquanto as mesmas não estivessem operacionais.

Em contra partida ao padrão WiMAX fixo, o WiMAX móvel (IEEE 802.16e) é um padrão para internet de banda larga móvel. Criado em Agosto de 2004, este padrão permite que os terminais da rede se movimentem entre as células transmissoras livremente, de forma semelhante ao que ocorre com os telefones celulares.

O WiMAX móvel foi atualizado diversas vezes. A primeira foi para o padrão IEEE 802.16f, adicionando as redes em malha ao padrão, e no WiMAX IEEE 802.16f, que permitiu que a velocidade dos dispositivos ultrapassasse os 60km/h, podendo chegar até os 100km/h. Diversas funcionalidades foram adicionadas a este padrão desde então, como o suporte à funcionalidade de *bridge* e à arquitetura de *multi-hop delay*.

Atualmente, uma última versão do WiMAX móvel já foi aprovada. Esta versão é denominada IEEE 802.16m, e pode atingir velocidades de até 1 Gbps no padrão fixo e 100Mbps no móvel. Esta versão é o padrão WiMAX para as redes

móveis de quarta geração (4G) [Rodrigues et al, 2009]. Embora esta versão tenha perdido para o LTE, este utiliza algumas características do WiMAX.

2.2 – Camadas do WiMAX

O padrão WiMAX é composto por duas camadas, a camada física (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC).



Figura 3: Arquitetura WiMAX [Alberti 2006]

2.2.1 – Camada Física (PHY)

A camada física do WiMAX é responsável pela transmissão dos dados pelo meio físico. Esta transmissão é feita por meio de rádio, seguindo as frequências licenciadas. Caso os dispositivos WiMAX tenham uma linha de visada entre si, o intervalo da frequência utilizável varia entre 10GHz e 66GHz. Caso exista alguma obstrução no caminho do enlace, o intervalo de frequência é reduzido para 2GHz, podendo chegar até 11GHz [Lima et al, 2004].

2.2.2 – Camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC)

A camada MAC, no WiMAX, é responsável por garantir a qualidade da conexão (QoS). É nesta camada também que estão as duas funcionalidades contempladas por este trabalho, o *Burst* e a Concatenação. Esta camada é subdividida em três subcamadas, cada uma com uma função específica. Estas subcamadas são chamadas de subcamada de segurança, subcamada de convergência comum e subcamada de convergência específica.

2.2.2.1 – Subcamada de Segurança

Esta camada contém todas as funcionalidades relativas à segurança e a criptografia. Entre estas funcionalidades, a Subcamada de Segurança impede que pessoas não autorizadas acessem as estações base (BS – *Base Station*) e a comunicação da mesma com as demais estações da rede [Rodrigues et al 2009]. Isto é feito através de duas funcionalidades presentes nesta subcamada, chamadas de Associações de Segurança (SA – *Security Associations*) e de Gerenciamento Privado de Chaves (PKM – *Private Key Management*).

As Associações de Segurança são responsáveis por garantir que as informações compartilhadas entre as estações WiMAX sejam feitas de maneira segura. Existem três tipos de SAs: primárias, estáticas e dinâmicas. As primárias são criadas na inicialização das estações, enquanto as estáticas são fornecidas pela estação base. As dinâmicas são criadas ou descartadas durante o fluxo de informações.

O PKM sincroniza as chaves usadas na comunicação entre a estação base e as outras estações. Esta funcionalidade utiliza de criptografia para manter a comunicação segura. O objetivo é impedir que a estação base se comunique com estações clonadas, embora ainda seja possível que as estações clientes se comuniquem com uma estação base falsa.

A Subcamada de Segurança também é responsável pelo conjunto de funcionalidades de criptografia utilizado entre as estações WiMAX. Nestas funções estão presentes todos os algoritmos criptográficos utilizados [Quinelato et al, 2007]. São utilizados dois protocolos na criptografia do WiMAX. O primeiro é chamado de protocolo de encapsulamento, que é responsável por gerenciar as funções de criptografia utilizadas. O segundo é o protocolo de gerenciamento de chaves, responsável pelas chaves de criptografias utilizadas na rede [Oliveira 2010].

2.2.2.2 – Subcamada de Convergência Comum

A Subcamada de Convergência Comum é responsável pelos serviços de QoS do WiMAX. É também sua responsabilidade garantir o gerenciamento das subestações [Quinelato et al, 2006] entre si e com a estação base, a alocação da largura de banda e o escalonamento dos pacotes [Shabani et al, 2012]. Outras funcionalidades providas por esta subcamada são a construção de PDUs (PDU –

Protocol Data Unit), suporte a mobilidade e redução do consumo de energia [Shabani 2012]. O funcionamento desta camada pode ser observado na Figura 4.

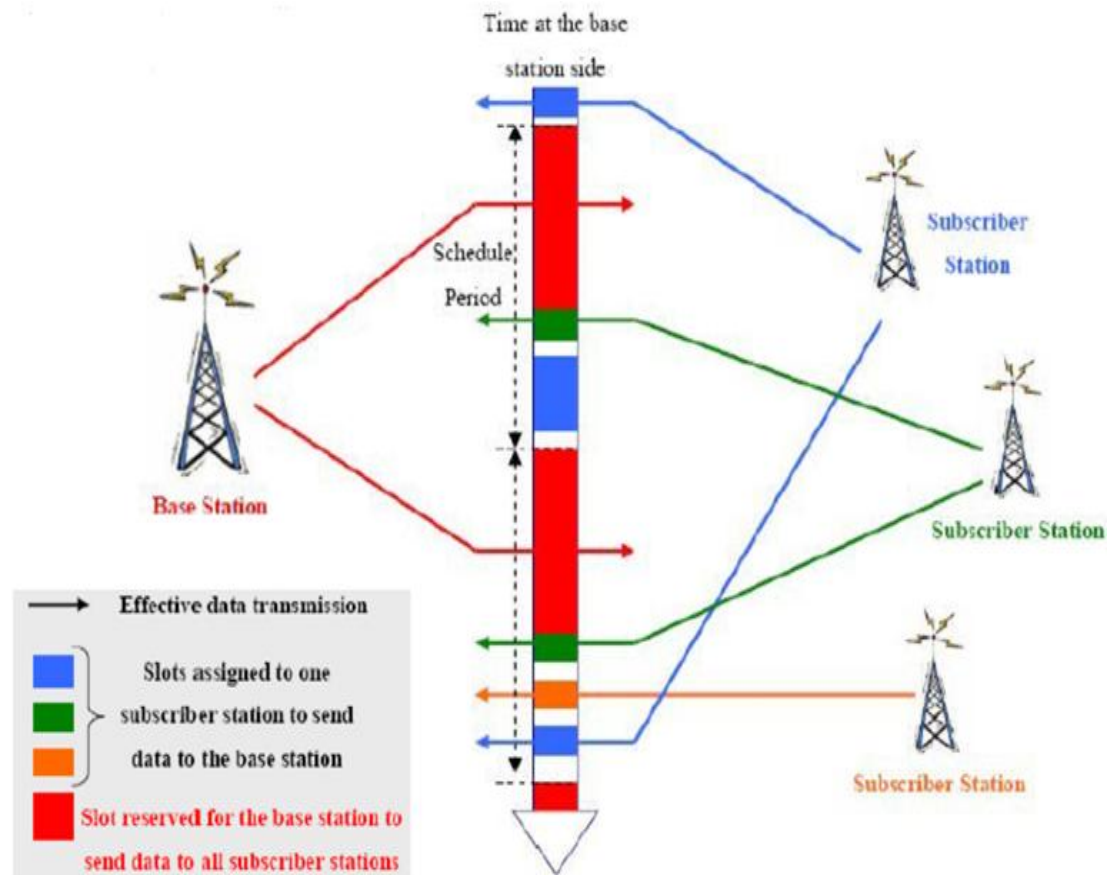


Figura 4: Camada de convergência comum [Alberti 2006]

2.2.2.3 – Subcamada de Convergência Específica

Nesta camada os SDUs (*SDU – Service Data Unit*) são classificados para serem utilizados na interface da conexão correta. Pela norma é possível utilizar conexões para protocolos de camadas superiores do tipo ATM, para encapsulamento de pacotes IP e também para Ethernet [Quinelato et al, 2007] [Shabani et al, 2012].

2.3 – Funcionalidades que aumentam o *throughput*

Nesta seção serão apresentadas as duas funcionalidades do IEEE 802.16 que tem a finalidade de aumentar a capacidade de transmissão da rede. Estas funcionalidades serão estudadas pois podem influenciar as estimativas da capacidade.

2.3.1 – Burst (Rajada)

O *Burst* é uma das funcionalidades da camada MAC do WiMAX para aumentar o *throughput* do enlace. Isto acontece por meio da redução do intervalo entre os quadros na transmissão pelo meio físico. Estes quadros são enviados, durante um período determinado de tempo, em rajada. Durante este período, nenhum quadro é retido, sendo enviados no momento em que são recebidos. O tempo de duração do *Burst* pode ser configurado [Oliveira 2010].

2.3.2 – Concatenação

A outra função da camada MAC contemplada por este trabalho é a Concatenação [Oliveira 2010]. Esta funcionalidade aumenta o *throughput* da conexão ao unir diversos quadros em apenas um. Este quadro é então enviado pelo enlace até o seu destino. No rádio utilizado para este estudo, esse quadro, formado por diversos outros, pode ser formado por até oito quadros originais, e atingir um tamanho máximo de 4032 Bytes.

Quando ativada a Concatenação, os diversos quadros são avaliados. Caso sejam candidatos à Concatenação, eles são marcados e enviados para uma fila de transmissão. Se a fila de transmissão não possuir nenhum outro quadro a ser enviado, a transmissão ocorre no mesmo momento. Caso contrário, ele é enviado para uma fila de concatenação se não existir nenhum outro quadro já concatenado. Uma fila de concatenação é uma fila de pacotes que estão no dispositivo WiMAX aguardando para serem concatenados.

Caso já existe um quadro concatenado é feita uma avaliação entre eles. Se a soma do tamanho entre estes quadros não exceder o limite, eles são unidos e postos em espera para a transmissão. Caso ultrapasse o máximo, o quadro é enviado imediatamente. Após serem recebidos, os quadros concatenados são separados, mantendo sua estrutura original.

2.4 – Motivação

Como mencionado na introdução, a utilização de técnicas de estimativa de capacidade de caminho utilizadas em redes cabeadas podem ser muito prejudicadas devido às características das redes WiMAX. Por isto, é preciso analisar as técnicas atuais dentro do contexto das redes WiMAX, para que estas estimativas possam ser feitas em qualquer enlace.

As redes WiMAX possuem duas funcionalidades que prejudicam a estimativa de capacidade de transferência em seus enlaces. A funcionalidade de Concatenação junta diversos quadros em um *buffer*, e os envia juntos em um quadro concatenado. A funcionalidade de *Burst* (Rajada) remove o intervalo entre os pacotes, enviando todos eles num espaço curto de tempo. Estas duas funcionalidades prejudicam a métrica do *throughput* pelas técnicas de pares de pacote e de trens de pacote, já que ambas são baseadas em analisar o espaço criado entre os quadros após o seu envio.

Capítulo 3 – Medição da capacidade de um caminho de rede

A medição da capacidade de um enlace é uma das mais importantes métricas dentro da administração de uma rede. Neste capítulo serão descritas as técnicas e as ferramentas utilizadas na medição da capacidade de um enlace.

3.1 – Técnicas de medição

Existem diversas técnicas para realizar a medição da capacidade de um enlace. Estas técnicas podem ser divididas em dois grandes grupos: técnicas ativas e técnicas passivas de medição.

As técnicas de medição passivas apresentam a vantagem de não gerarem tráfego no enlace, já que não criam pacotes para realizar a medição. Outro ponto positivo destas ferramentas é que elas não necessitam de equipamentos em nenhum dos lados do caminho envolvidos na medição. No entanto, estas ferramentas não demonstram ser tão flexíveis para projetar pacotes de pesquisa quanto as ferramentas ativas de medição [Oliveira 2010]. Para realizar a medição, estas ferramentas coletam o fluxo de dados, e depois o analisam.

As ferramentas ativas de medição injetam tráfego no caminho a ser testado, na forma de pacotes. Porém, isto pode causar diversas alterações na medição. A grande vantagem destas técnicas de medição sobre as técnicas passivas são sua maior flexibilidade, podendo estimar diversas outras medidas. A seguir serão descritas algumas técnicas ativas de medição.

3.1.1 – Par de pacotes (Package Pair)

Dentre as técnicas de medição ativa, a mais simples delas é a técnica de medição por pares de pacotes. Esta técnica consiste no envio de dois pacotes, sendo que a diferença do tempo de envio de cada um deles é a menor possível [Quinteiro 2007]. A distância entre estes dois pacotes é constante, até o momento em que passam por um enlace com a capacidade inferior aos enlaces anteriores. Ao passarem por este enlace, é ampliada a distância entre os dois pacotes [Silva 2008]. A Figura 4 demonstra como o intervalo é criado, no momento em que os pacotes passam por um enlace de menor capacidade.

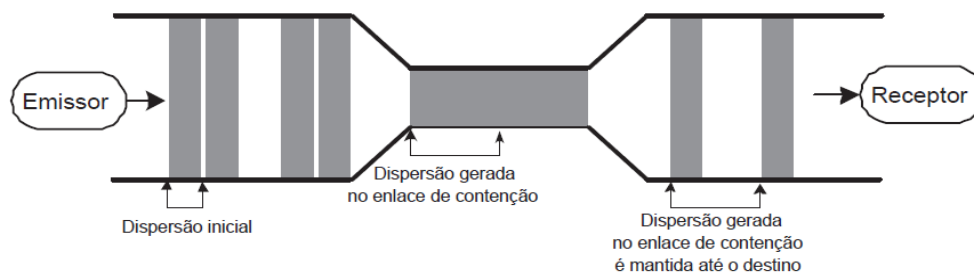


Figura 5: Intervalo entre quadros. [Rocha 2006]

Nesta técnica são enviados vários pares de pacotes para o enlace, e após isso é medida a distância entre cada um dos pares. Por ser uma técnica que injeta os pacotes no enlace, ao invés de simplesmente realizar a medição através do tráfego, a técnica de pares de pacotes é considerada uma técnica ativa de medição. Ao passar por um enlace de menor capacidade, o intervalo entre os pares de pacotes aumenta. Após a chegada ao seu destino é feita a medição do intervalo entre os pacotes. A dispersão dos pacotes é medida entre o último bit do primeiro pacote e o último bit do segundo pacote [Silva 2008]. O tamanho dos pacotes também influencia a medição. A capacidade do enlace é estimada ao se dividir o tamanho dos pacotes pelo tempo entre as chegadas dos pacotes, causado pelo intervalo. Ou seja, $C = S/T$, onde C é a capacidade do enlace, S é o tamanho dos pacotes e T é o tempo entre as chegadas.

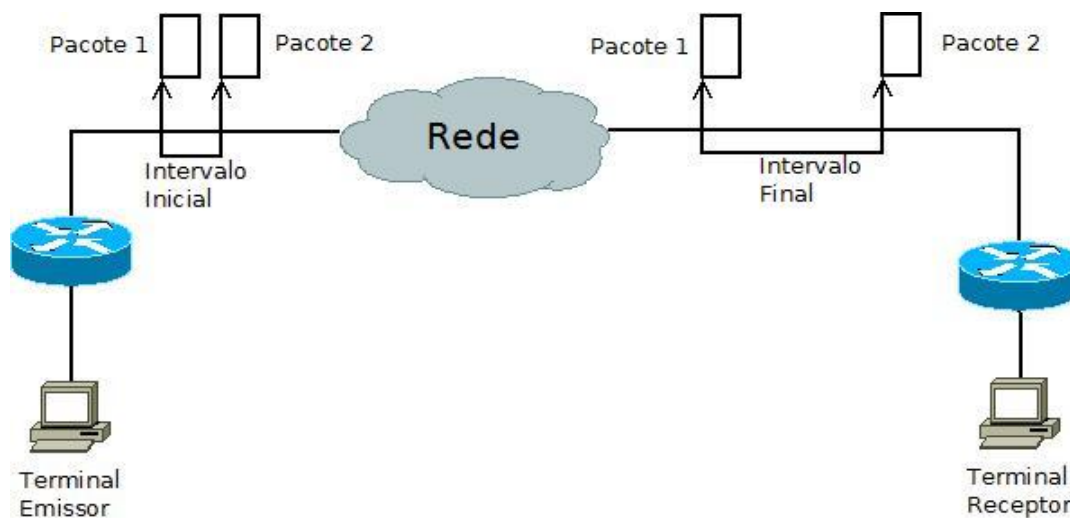


Figura 6: Intervalo entre pacotes

A Figura 5 demonstra como a dispersão entre os pares de pacotes é criada. A partir desta medição entre o intervalo dos dois pacotes, quando chegarem ao fim do enlace, é possível medir a diferença do tempo de chegada entre os dois pacotes. A partir desta medição é possível calcular qual é a menor capacidade deste enlace. Na Figura 6 pode-se observar como é o funcionamento da técnica sem interferência externa por tráfego cruzado.

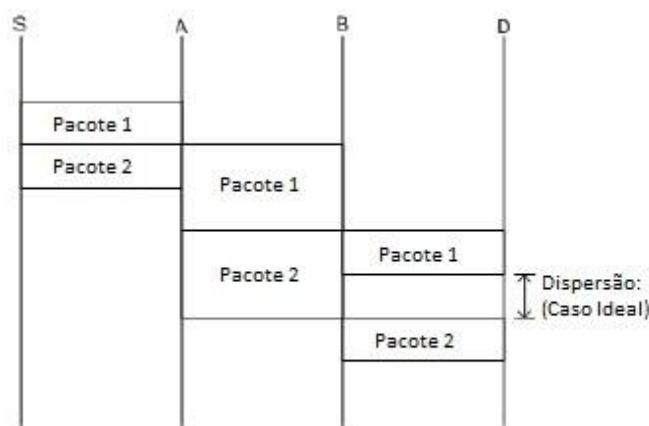


Figura 7: Técnica de pares de pacotes com dispersão normal

Como a técnica é sensível ao tráfego de rede, é recomendável que se utilize várias medições. Embora bastante simples e eficiente, esta técnica também é passível de erros. Caso exista tráfego cruzado no enlace, é possível que um pacote seja colocado entre o par usado na medição fazendo com que este seja maior do que o esperado.

Um dos possíveis erros que podem atrapalhar a medição é quando o segundo pacote enviado fica preso em uma fila para a transmissão. Com isto, o intervalo entre os dois pacotes é reduzido. Após os pacotes serem recebidos, a análise da diferença de tempo entre os dois pacotes acusa uma capacidade superior à real. Isto é demonstrado na Figura 7.

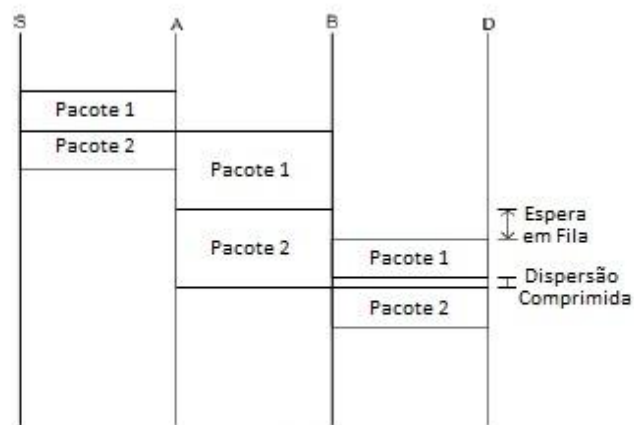


Figura 8: Par de pacotes com dispersão reduzida

Outra possível situação de erro ocorre quando um ou mais pacotes são inseridos entre os pacotes a serem medidos. Isto provoca um aumento no intervalo entre o par de pacotes. Com a medição dos pacotes, a capacidade do enlace será avaliada como sendo inferior à real, como demonstrado na Figura 8.

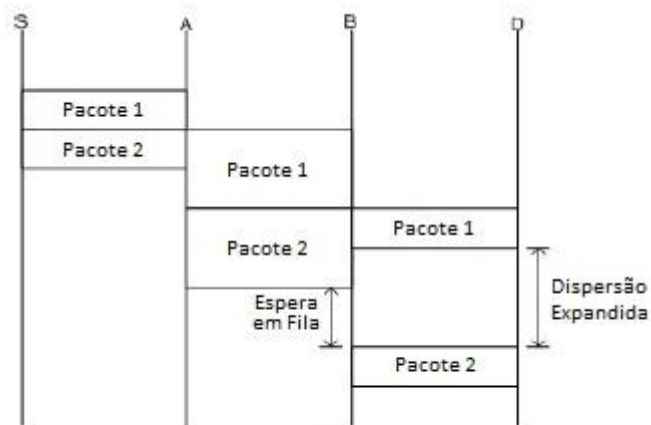


Figura 9: Par de pacotes com dispersão expandida

Em ambos os casos, a presença de outros pacotes no meio analisado impede que a medição seja precisa. A ordem em que os pacotes do tráfego cruzado e do par

de pacotes são recebidos pelo roteador da rede causam erros distintos. Estes erros podem ser observados na Figura 9 a seguir.

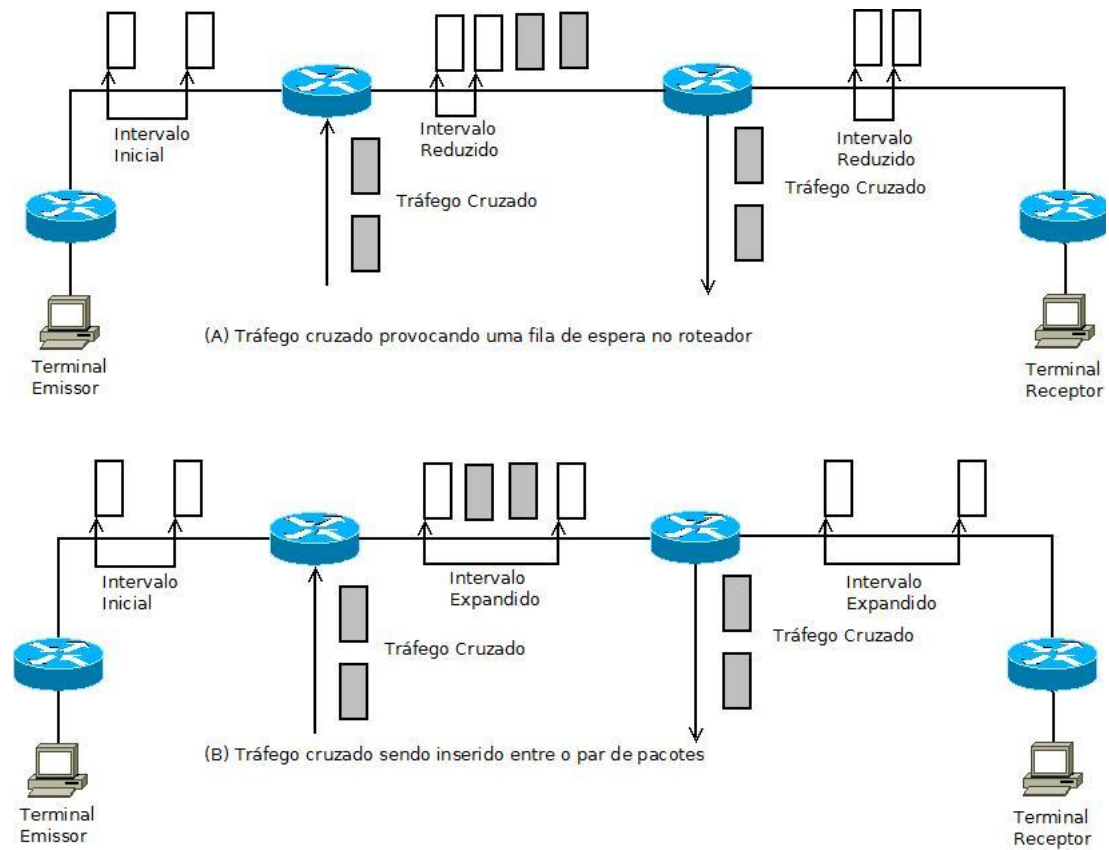


Figura 10: Tráfego cruzado

3.1.2 – Trem de Pacotes

A técnica de estimativa por Trens de Pacote é uma extensão da técnica de Pares de Pacotes, e por isto, é muito similar à esta [Quinteiro 2007]. A diferença fundamental entre as duas é que enquanto a técnica de Pares de Pacotes envia apenas dois pacotes pelo enlace, a técnica de Trens de Pacote envia vários pacotes sequencialmente. O funcionamento desta técnica pode ser observado na Figura 10.

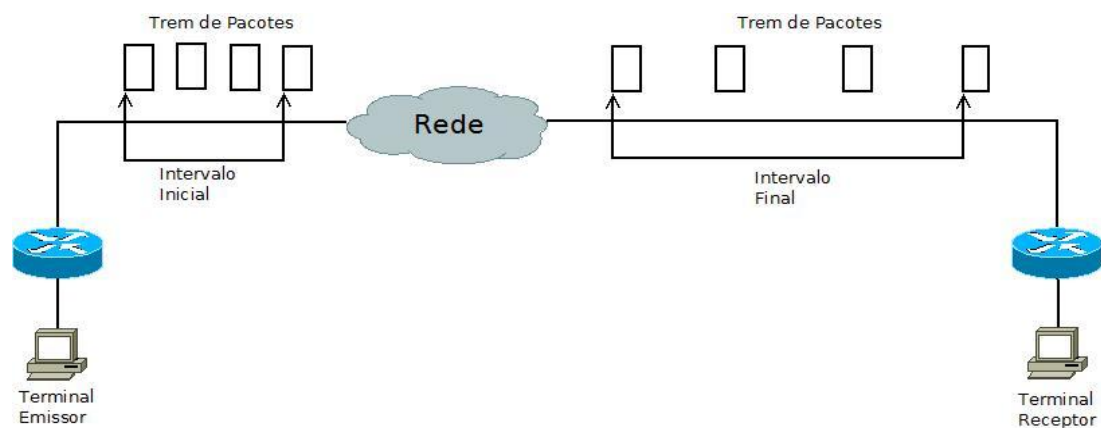


Figura 11: Trem de pacotes

Como é enviada uma sequência de vários pacotes, ao contrário da técnica por par de pacotes em que é enviado apenas um par, a medição do intervalo entre o trem de pacotes é feita a partir do último bit do primeiro pacote enviado e o último bit do último pacote enviado. Assim como a técnica por pares de pacotes, a técnica de trens de pacotes é passível de erro caso exista outro tráfego na rede.

3.1.3 – VPS: Variable Package Size

Esta técnica de medição é caracterizada por medir cada parte de um caminho. Esta técnica mede o RTT (*Round Trip Time*) do enlace. Para fazer esta medição, esta técnica utiliza o TTL (*Time To Live*) do cabeçalho IP de cada pacote utilizado na medição [Silva 2008] para que este expire ao final de cada enlace do caminho que está sendo medido. Assim que este pacote expira, o roteador então o descarta, retornando uma mensagem ICMP de erro para a fonte da medição. Ao receber o pacote de erro, o ponto de emissão calcula o RTT, ou seja, o tempo entre a emissão de pacote e o recebimento do erro. Nesta técnica são enviados diversos pacotes, para que sejam expirados ao final de cada seção do caminho. Com isto é possível medir a capacidade de cada pedaço do enlace [Prasad et al, 2003].

3.1.4 – SLoPS: Self-Loading Periodic Streams

Nesta técnica são enviados aproximadamente 100 pacotes no enlace a ser testado. Todos estes pacotes tem o mesmo tamanho, e são enviados com um intervalo regular entre cada um deles [Prasad et al, 2003]. Após isto, são medidas as variações no tempo entre cada um dos pacotes. O intervalo entre os pacotes é modificado, para

que se aproxime do intervalo gerado pelo enlace de menor capacidade no caminho. Esta variação segue um algoritmo iterativo similar ao algoritmo da busca binária. Caso a banda disponível seja alterada durante a medição, a técnica irá detectar esta variação e informar a região de variação apontada durante a medição.

3.2 – Ferramentas para a Medição:

Para realizar a medição de capacidade de um enlace são utilizadas diversas ferramentas. Cada uma destas ferramentas tem uma particularidade que a auxilia a fazer uma medição precisa, apesar de todos os problemas que podem ocorrer durante a medição.

3.2.1 – CapProbe

O CapProbe é uma ferramenta para a estimação da capacidade de um enlace. Ela se baseia na utilização de técnicas de dispersão de pacotes, como as técnicas de pares e trens de pacotes. Ao contrário de outras ferramentas, o CapProbe combina análise da dispersão dos pacotes e do intervalo de tempo (*delay*) entre a transmissão e o recebimento dos pacotes [Kapoor et al, 2004]. Para conseguir realizar esta medição, o programa envia dois pacotes do tipo ICMP sequenciais, na forma de um comando PING. Embora os pacotes do PING normalmente sejam utilizados para testar a conectividade da rede, dois ou mais pacotes sequenciais podem ser utilizados para as técnicas de medição por dispersão de pacotes. Após obter a resposta destes pacotes, a ferramenta analisa a diferença de tempo entre os pacotes enviados. O CapProbe também é capaz de eliminar as distorções em suas medições. Estas distorções podem ser definidas como alterações na medição que levam a uma estimativa incorreta. Ou seja, uma distorção pode levar a ferramenta a estimar uma capacidade menor ou maior do que a capacidade esperada. Para conseguir fazer isto, parte-se do princípio que medidas devem ter sido distorcidas por causa da criação de filas criadas pelo tráfego cruzado, ou pelo fato dos pacotes terem sido retidos em uma fila de transmissão. O CapProbe então elimina essas distorções de medição utilizando apenas os pares de pacote com o intervalo fim-a-fim mínimo. Apesar de esta ferramenta conseguir se manter precisa na maioria dos cenários de teste, o CapProbe possui uma dificuldade na medição de tráfego que seja ao mesmo tempo intenso e não reativo, como por exemplo, um tráfego UDP constante. Como uma das

formas de implementação para a sua medição, esta ferramenta pode se utilizar de pacotes UDP ou mensagens ICMP. Nestes casos, o CapProbe é considerada uma ferramenta de medição ativa.

3.2.2 – PathRate

O Pathrate é uma ferramenta para a estimação da capacidade de um enlace. Assim como o CapProbe, o Pathrate utiliza as técnicas de dispersão por par de pacotes e por trem de pacotes. O programa se utiliza de dois módulos para realizar a sua medição. O primeiro módulo é chamado de *pathrate_snd*, que envia os pacotes pelo enlace. O segundo módulo é chamado de *pathrate_rcv*, que recebe os pacotes e realiza as medições. Esta é uma grande diferença entre este programa e o CapProbe, ou seja, a utilização de apenas um módulo para enviar e receber todas as informações necessárias para a medição. Como não foi possível realizar a estimativa da capacidade do enlace utilizando esta ferramenta, já que a conexão com o as estações se encerrava antes que o PathRate fosse capaz de terminar a estimativa, foi decidido não mais utilizar esta ferramenta.

Capítulo 4 – Trabalhos Relacionados

Na literatura, foram pesquisados artigos sobre o tema do projeto.

No artigo [Kapoor et al, 2004] o autor se dedica a explicar todo o funcionamento da ferramenta CapProbe. Por ser uma importante ferramenta de medição, além de uma das mais utilizadas, e também por ser a ferramenta utilizada nos trabalhos [Oliveira 2010] e [Oliveira et al, 2012] os quais são intimamente relacionados à este trabalho, por abordarem os problemas específicos da medição em uma rede que contenha um enlace WiMAX e as suas funcionalidades de *burst* e concatenação. Ao abordar também as consequências do tráfego cruzado para as medições ativas, em especial o CapProbe, o trabalho em [Kapoor et al, 2004] aborda também futuras dificuldades que possam vir a serem encontradas ao se medir a capacidade de transmissão de um enlace que contenha o WiMAX. Outras dificuldades, não envolvendo as particularidades do WiMAX, mas sim do CapProbe, também são descritas.

No trabalho [Quinteiro 2007], o autor se dedica a explicar detalhadamente quais são os tipos de medição mais utilizados para avaliar a capacidade de um enlace. Ao entender melhor o funcionamento de cada tipo de medição, é possível identificar quais são os problemas relacionados com cada uma destas técnicas. Partindo das peculiaridades de medição existentes em cada uma delas, é possível também supor qual entre estas técnicas seria a mais adequada à realidade do enlace em que se deseja medir. Caso nenhuma destas técnicas seja apropriada, a criação de novas técnicas que sejam mais adequadas à realidade da rede a ser medida pode ser facilitada. Os mecanismos destas técnicas são mais detalhados ainda no trabalho [Silva 2008], que possui um grande detalhamento técnico sobre as técnicas de medição de capacidade.

Em [Silva 2008], existe uma grande preocupação com a descoberta da capacidade de um link, embora neste trabalho, o enfoque seja em outras redes sem fio, como a 1xEVDO. Por isto, são abordadas as dificuldades existentes para esta medição nas redes sem fio, já que a maior parte das ferramentas não foi desenvolvida para este tipo de cenário. Por também abordar as técnicas de medição por dispersão de pacotes, acaba por repetir alguns dos assuntos do trabalho [Quinteiro 2007], embora com uma profundidade e detalhamento muito maior. As fórmulas utilizadas

por estas técnicas são descritas em detalhes, assim como o comportamento do intervalo entre o par de pacotes no momento em que passam por enlaces de diferentes capacidades. Outro tipo de metodologia para medição, a *Variable Packet Size* (VPS) também é descrita neste trabalho. Também são descritos diversos tipos de medição por dispersão de pacotes, como por exemplo, as técnicas de trens de pacotes e pares de pacotes.

O trabalho desenvolvido em [Oliveira 2012] é o mais próximo deste. Por abordar especificamente como as funcionalidades do *Burst* e da Concatenação eliminam o espaçamento entre os pacotes, podendo assim distorcer todas as medidas de medição. Por isto, [Oliveira 2012] é a principal fonte deste trabalho. Embora os outros que foram descritos anteriormente possam abordar em maior profundidade os detalhes mais específicos sobre a medição de capacidade, e suas técnicas, é a partir de [Oliveira 2012] que é descrito como estas técnicas são afetadas pelo WiMAX. Ao se entender não apenas como estas funcionalidades se comportam num ambiente controlado, é possível preparar o usuário da técnica de medição para verificar o funcionamento destas mesmas ferramentas em um ambiente mais realista, que é a proposta deste trabalho.

A norma técnica [IEEE Std 802.16-2003], embora muito extensa, é essencial para o entendimento do protocolo WiMAX. É a partir do entendimento das peculiaridades do protocolo que os problemas abordados são entendidos em sua totalidade, e as soluções podem ser pensadas. Mais do que apenas um material de referência, esta norma contém toda a definição e o detalhamento das características do WiMAX. Por isto, é essencial para o entendimento de como funciona o tráfego de pacotes, e os problemas que suas funcionalidades podem causar. Esta norma é essencial para o desenvolvimento deste trabalho, já que é baseado nas dificuldades encontradas devidos as características de gerenciamento de pacotes do padrão WiMAX. Por conta de duas de suas funcionalidades, *Burst* e Concatenação, o intervalo entre dois pacotes usado nas ferramentas de medição de capacidade, é encurtado, causando erro nas medições. Este padrão é fundamental para entender como este erro é criado.

Capítulo 5 – Análise Experimental:

5.1 – Cenário de Testes

Para realizar este trabalho foram realizados diversas medições da capacidade de um enlace WiMAX. O objetivo destas medições foi de avaliar o comportamento da ferramenta CapProbe ao estimar a capacidade neste tipo de enlace. A diferença das medições demonstradas é o fato de terem sido feitas em um ambiente real, e sujeitas a problemas encontrados em redes reais.

Dois destes problemas são a interferência no meio físico, ocasionada por outras estações, e o tráfego cruzado no enlace. Estes dois problemas foram abordados nas estimativas realizadas para este trabalho.

Os testes propostos neste trabalho foram utilizados três terminais. Dois destes são ligado ao enlace WiMAX. O terceiro terminal é um terminal externo, ligado à rede de uma universidade. O terminal da estação assinante também está presente na rede da mesma universidade.

Em todos os computadores dos terminais está presente a ferramenta CapProbe. Com isto, foi possível utilizá-la para medir a capacidade do enlace. Estas medições foram feitas tanto no sentido da estação assinante para a estação base quando no sentido inverso. Também foram feitas as mesmas medições a partir do terminal externo. O uso das medições a partir do terminal externo é para avaliar o comportamento da ferramenta com o tráfego cruzado presente na rede.

A configuração do rádio foi modificada ao longo dos testes. O objetivo seria analisar a influência das funcionalidades de *Burst* e Concatenação nas medições. Com isto é possível identificar a influência destas funcionalidades durante a medição. Para avaliar se o tamanho de cada pacote utilizado pode auxiliar a medição da capacidade, foram utilizados pacotes de tamanho 500 Bytes e 1500 Bytes. O cenário em que os testes foram feitos pode ser observado na Figura 11.

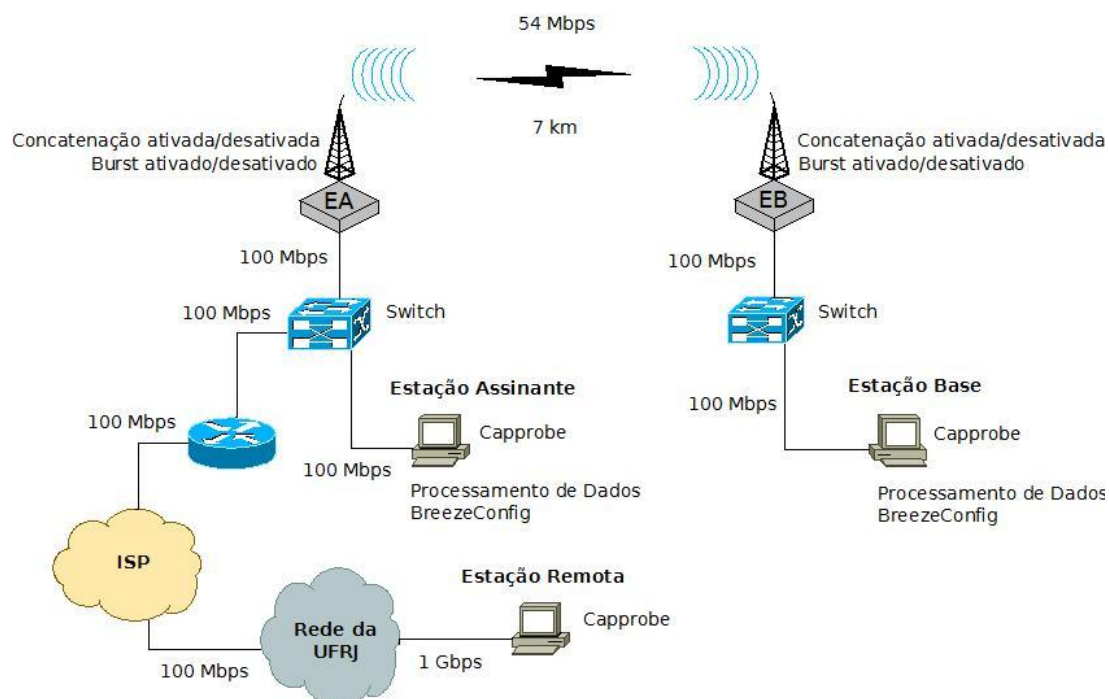


Figura 12: Cenário de teste

Foram utilizados dois computadores para acessar os rádios para realizar os testes. O primeiro foi um *netbook* da ASUS com Windows XP. O Segundo foi um notebook Toshiba com Windows 8. Os softwares utilizados em ambos os computadores foram os mesmos, também descritos neste trabalho.

Para realizar os testes foram utilizados dois rádios pré-WiMAX BreezeAccess VL do fabricante Alvarion. Como estação base foi utilizado um modelo AU-E-AS-5.8VL e, como estação de assinante, foi utilizado um rádio modelo SU-A-5.824BD-VL. Os rádios estavam configurados com a versão IEEE 802.16e do WiMAX, embora esta tenha sido utilizada numa arquitetura fixa ponto-a-ponto

5.2 – Ferramentas Utilizadas

Esta seção busca explicitar e descrever as ferramentas utilizadas neste trabalho, bem como suas funções. Tais ferramentas foram utilizadas para obter os dados, elaborar gráficos e criar as imagens apresentadas.

5.2.1 – PuTTY

O programa escolhido para fazer o *login* externo às máquinas do enlace para realizar as medições é o PuTTY. Este programa foi utilizado para acessar tanto os

rádios quanto os terminais necessários para a realização deste trabalho. Os terminais foram acessados via SSH, enquanto os rádios foram acessados via Telnet. Após serem feitas as medições, os resultados foram armazenados em um *log* do próprio programa. A Figura 12 mostra a interface gráfica da aplicação.

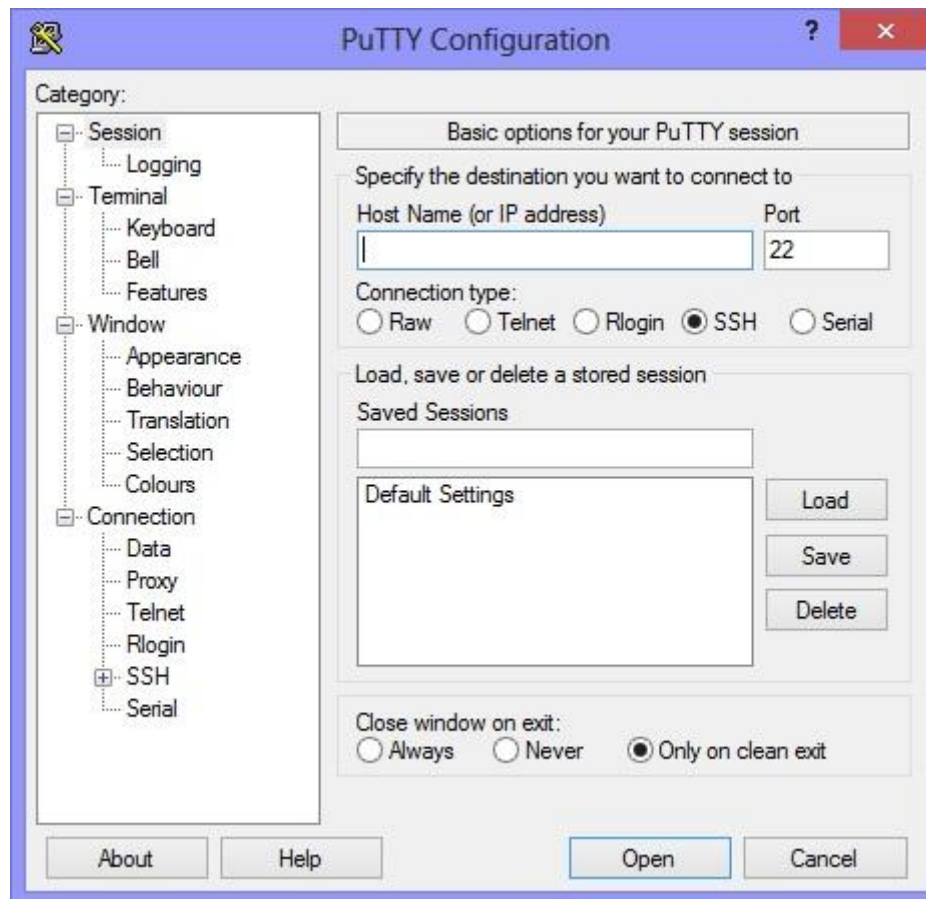


Figura 13: PuTTY

5.2.2 – CapProbe

O CapProbe foi a aplicação escolhida para realizar as medições do enlace. O programa foi executado remotamente, através do PuTTY. Através da saída do programa foi possível extrair as métricas necessárias a este trabalho. A Figura 13 demonstra a saída do programa. Os números de IP dos terminais acessados foram omitidos por questão de segurança.

```

sending 3999 1370132749 953973 3999
508 bytes from [REDACTED]: icmp_seq=3999 ttl=58 time=47.049 ms
508 bytes from [REDACTED]: icmp_seq=4000 ttl=58 time=47.043 mscap= 118.854 Mbps
ps C= 97.775 Mbps

--- [REDACTED] ping statistics ---
4000 packets transmitted, 3811 received, 4% packet loss
rtt min/avg/max/mdev = 3.822/21.270/2174.166/96.089 ms, pipe 6
root@ubuntu:/home/divtecsrd/iputils#
```

Figura 14: CapProbe

Através da saída do CapProbe é possível identificar diversas informações relevantes como o número de pacotes enviados, e quantos destes foram perdidos. Outras métricas, como a capacidade do enlace, também são fornecidas pela aplicação. O CapProbe informa a medição para cada par de pacotes, e ao final, qual destas é a mais provável. O programa também fornece o RTT, bem como seu valor mínimo, máximo e a média.

5.2.3 – R

O R é um programa estatístico. Com ele é possível extrair a média e outras medidas relevantes de um conjunto de dados e também criar diversos gráficos. Por este motivo, este programa foi utilizado para tratar os dados fornecidos pelo CapProbe, para que possam ser melhor visualizados e entendidos. A Figura 14 exibe

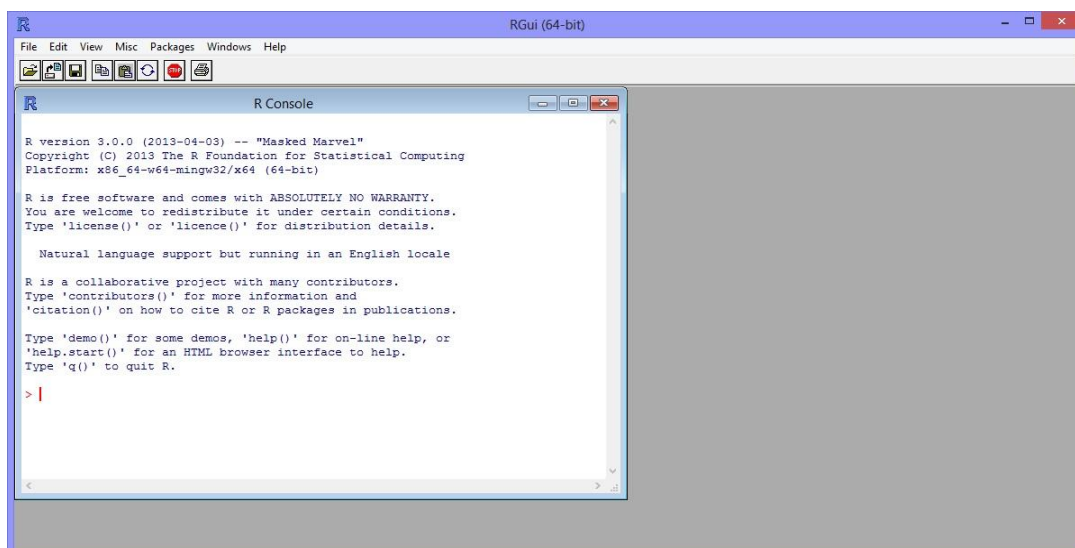


Figura 15: Aplicação R
a interface gráfica inicial do R.

Capítulo 6 – Resultados obtidos

Neste capítulo serão descritas as medições de capacidade usadas neste trabalho. Primeiro, foram feitas estimativas para medir a capacidade do enlace com as funcionalidades ligadas e desligadas em cada sentido da transmissão. Após isto, todas as medições foram refeitas, mas com uma interferência gerada por outra estação (tráfego cruzado), compartilhando o mesmo meio físico.

Um dos grandes diferenciais deste trabalho é que foi utilizada uma rede real em todas as estimativas. O enlace WiMAX utilizado pertence ao exército brasileiro, e a rede da estação assinante até a estação externa pertence à Universidade Federal do Rio de Janeiro. Esta rede, por estar em produção, possui um tráfego cruzado real.

Outro grande diferencial é que foi utilizada uma quantidade de pacotes mais significativa nas estimativas da capacidade. Isto foi feito para avaliar se as ferramentas seriam capazes de estimar uma capacidade mais próxima da real.

6.1 – Metodologia

Primeiro, foram realizadas medições dentro do enlace WiMAX. Cada medição foi feita pela ferramenta CapProbe, enviando quatro mil pacotes. Foram feitas estimativas da capacidade nos dois sentidos do enlace, tanto da estação base para a estação assinante, quanto o inverso. Foram realizadas medições relativas às funcionalidades de *Burst* e de Concatenação.

Para avaliar a interferência das funcionalidades, em relação às medições, foram feitas estimativas da capacidade do enlace com as duas funcionalidades desligadas, e com ambas ativadas. Também foram feitas estimativas com apenas uma das duas funcionalidades ligadas. Com isto é possível avaliar a influência de cada uma das funcionalidades nas medições.

Para verificar se o tamanho dos pacotes também influencia as medições, todas as estimativas descritas anteriormente foram feitas com pacotes de tamanho 500 Bytes e 1500 Bytes. O propósito destas medições é avaliar se é possível impedir as distorções de medições ocasionadas pelo *Burst* e pela Concatenação utilizando pacotes com maior tamanho.

Após isto, foram feitas as mesmas medições com o uso do terminal externo. Primeiro foram feitas estimativas deste terminal até a estação assinante e no sentido contrário. Assim, foi possível avaliar como se comportam as medições sem passar

pelo enlace WiMAX. Em seguida, foram realizadas todas as estimativas anteriores, utilizando o terminal externo e a estação base. Com isto, é possível avaliar como o tráfego cruzado, presente entre o terminal externo e a estação assinante, influencia as medições.

Após isto, foram realizadas estimativas para avaliar o comportamento das medições com uma fonte externa de interferência na camada física. Para gerar esta interferência, foi utilizado um rádio externo, utilizando o mesmo meio físico do enlace. Todas as medições, anteriormente descritas, foram repetidas neste novo cenário. Como inicialmente não seria possível prever o comportamento dos dados nesta estimativa, foi feito um teste preliminar para avaliar qual seria o número mais apropriado de pacotes em cada medição.

6.2 – Avaliação da capacidade entre estações do enlace WiMAX

Para avaliar a capacidade deste enlace é preciso conhecer os valores esperados. Neste cenário, os valores fornecidos pelo fabricante dos rádios podem ser observados na Tabela 1.

Sentido	Configuração	Capacidade Esperada
EB – EA	Funcionalidades ligadas	31,1 Mbps
EB – EA	Funcionalidades desligadas	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB – EA	<i>Burst</i> ligado	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB – EA	Concatenação ligada	28 Mbps – 31,1 Mbps
EA – EB	Funcionalidades ligadas	26,4 Mbps
EA – EB	Funcionalidades desligadas	23,4 Mbps – 26,4 Mbps
EA – EB	<i>Burst</i> ligado	23,4 Mbps – 26,4 Mbps
EA – EB	Concatenação ligada	23,4 Mbps – 26,4 Mbps

Tabela 1: Valores fornecidos pelo fabricante

Agora é possível utilizar estes valores para comparar com os encontrados durante as estimativas da capacidade. Para estas estimativas da capacidade, foram utilizados 1000 pacotes em cada medição. Após serem medidas as estimativas a partir dos 500 pares de pacotes, foi extraída a medida apontada como a correta pelo

MDS do CapProbe. Foram realizadas cinco medições, e então calculada a média, mediana e o desvio padrão entre estas medições.

A primeira medição foi feita a partir da estação base e em direção à estação assinante. Neste cenário as funcionalidades de *Burst* e Concatenação foram desativadas. Foram realizadas diversas medições, com o tamanho de cada pacote utilizado pelo CapProbe sendo de 500 Bytes. O cenário em que estas medições ocorreram pode ser observado na Figura 15.

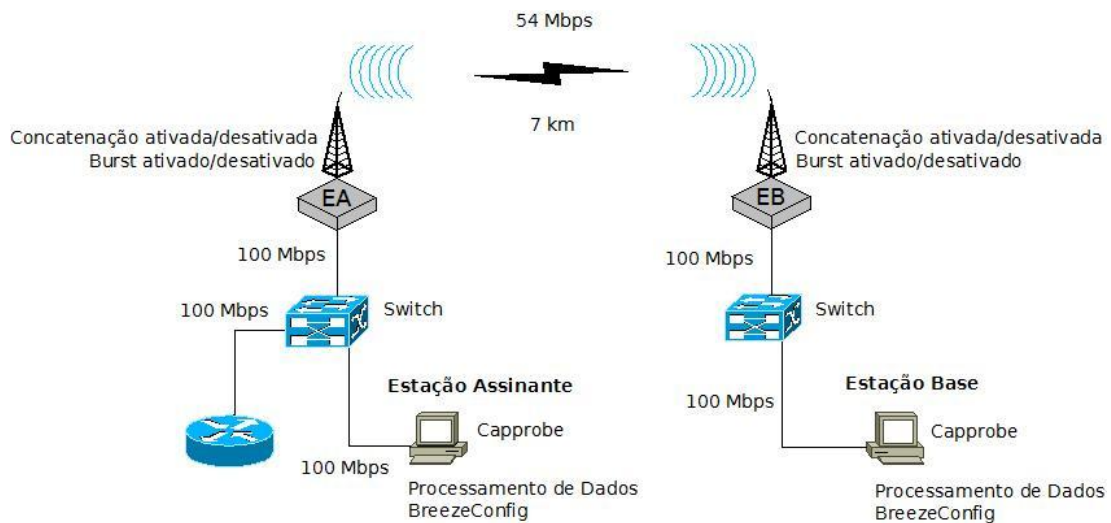


Figura 16: Cenário entre a estação base e a estação assinante.

Após estimar a capacidade do enlace a partir da estação base, verificou-se a possibilidade das medições realizadas a partir da estação assinante serem congruentes com as realizadas anteriormente. Para isto, foram feitos mais estimativas da capacidade, desta vez a partir da estação assinante e em direção à estação base. As diferenças entre as médias, medianas e o desvio padrão entre os testes, tanto utilizando 500 Bytes quanto 1500 Bytes, podem ser observados na Tabela 2.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB - EA	500 Bytes	39,1404 Mbps	39,732 Mbps	3,290644	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB - EA	1500 Bytes	34,8784 Mbps	32,342 Mbps	11,23122	28 Mbps – 31,1 Mbps
EA - EB	500 Bytes	40,8486 Mbps	40,71 Mbps	0,6616712	23,4 Mbps

					– 26,4 Mbps
EA - EB	1500 Bytes	31,414 Mbps	28,925 Mbps	5,275592	23,4 Mbps – 26,4 Mbps

Tabela 2: Medições entre a estação base e a estação assinante - funcionalidades desligadas

Outro ponto analisado na Tabela 2 foram os diferentes efeitos no uso de pacotes com tamanhos diferentes. O primeiro deles é que a maior parte dos valores se aproxima do esperado. E o segundo efeito é que o desvio padrão entre os pacotes é maior ao se utilizar 1500 Bytes do que 500 Bytes.

Após estas medições, as funcionalidades de *Burst* e Concatenação foram ativadas. O objetivo dessas novas medições é observar e comparar as estimativas da capacidade com as funcionalidades ligadas em relação aos valores encontrados com as mesmas funcionalidades desligadas.

Além de estimar a capacidade do enlace a partir da estação base, também é necessário verificar como as medições se comportam no sentido contrário. Para isto, foram realizadas novas medições a partir da estação assinante até a estação base.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EA	500 Bytes	34,8784 Mbps	32,342 Mbps	11,23122	31,1 Mbps
EB – EA	1500 Bytes	60,0684 Mbps	52,061 Mbps	18,79153	31,1 Mbps
EA – EE	500 Bytes	128,5236 Mbps	127,928 Mbps	1,696054	26,4 Mbps
EA – EE	1500 Bytes	87,2162 Mbps	99,096 Mbps	27,45152	26,4 Mbps

Tabela 3: Medições entre a estação base e a estação assinante - Funcionalidades ligadas

Na Tabela 3 podemos observar que embora as estimativas da capacidade com 500 Bytes tenham tido um desvio padrão de 11,23122, os valores de média (34,8784 Mbps) e mediana (32,342 Mbps) foram muito próximos do valor esperado. No entanto, as medições com 1500 Bytes tiveram uma média (60,0684 Mbps) e mediana (52,061 Mbps) acima do que seria o esperado (31,1 Mbps). Também foi verificado que, ao utilizar pacotes de 1500 em substituição aos de 500, houve uma diminuição tanto na média (de 128,5236 Mbps para 87,2162 Mbps) quanto na mediana (de 127,928 Mbps para 99,096 Mbps). No entanto, ao aumentar o tamanho dos pacotes na medição da estação assinante até a estação base houve um aumento no desvio padrão entre as medições, que alcançou o valor de 27,45152.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EA	500 Bytes	72,23 Mbps	69,656 Mbps	5,979424	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB – EA	1500 Bytes	71,0736 Mbps	70,088 Mbps	22,77828	28 Mbps – 31,1 Mbps
EA – EE	500 Bytes	57,85 Mbps	54,299 Mbps	8,227078	23,4 Mbps – 26,4 Mbps
EA – EE	1500 Bytes	91,2106 Mbps	95,749 Mbps	11,5793	23,4 Mbps – 26,4 Mbps

Tabela 4: Medições entre a estação base e a estação assinante - Burst ligado

Na Tabela 04 não é possível notar nenhuma diferença significativa a partir da estação base entre as médias dos testes (72,23 Mbps com pacotes de 500 Bytes e 71,0736 Mbps com pacotes de 1500 Bytes) e medianas (69,656 Mbps com pacotes de 500 Bytes e 70,088 com pacotes de 1500 Bytes). No entanto, quanto ao desvio padrão as medições com pacotes de tamanho 1500 Bytes tiveram uma diferença de valor muito superior (5,979424 com pacotes de 500 Bytes e 22,77828 com pacotes de 1500 Bytes). Esta tabela demonstra que, nas estimativas da capacidade realizadas a partir da estação base, a média entre as medidas aumentou de 57,85 Mbps para 91,2106 Mbps e a mediana aumentou de 54,299 Mbps para 95,749 Mbps ao se

utilizar pacotes de 1500 Bytes. Com isto, tanto a média quanto a mediana se distanciaram do valor fornecido pelo fabricante.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EA	500 Bytes	111,8742 Mbps	129,17 Mbps	75,15149	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB – EA	1500 Bytes	61,8042 Mbps	65,645 Mbps	21,95213	28 Mbps – 31,1 Mbps
EA – EB	500 Bytes	87,6388 Mbps	84,049 Mbps	24,37142	23,4 Mbps – 26,4 Mbps
EA – EB	1500 Bytes	65,7116 Mbps	71,629 Mbps	18,90758	23,4 Mbps – 26,4 Mbps

Tabela 5: Medições entre a estação base e a estação assinante - Concatenação ligada

Após ter realizado as estimativas da capacidade com apenas a funcionalidade de *Burst* ativada foram realizadas novas medições para avaliar o comportamento das estimativas da capacidade do enlace com a funcionalidade de Concatenação ligada. Para estas medições também foram utilizados pacotes de 500 Bytes e 1500 Bytes.

A Tabela 5 demonstra que, mesmo que os valores nas medições realizadas a partir da estação base tenham sido visivelmente superiores ao esperado, as métricas encontrados a partir das estimativas com pacotes de tamanho igual a 1500 Bytes foram mais próximas do ideal, de acordo com o fabricante. Neste caso, até mesmo o desvio padrão encontrado entre as estimativas da capacidade com pacotes de 1500 Bytes foi inferior, tendo sido reduzido de 75,15149 nas medições com pacotes de tamanho 500 Bytes para 21,95213 nas estimativas da capacidade realizadas com pacotes de tamanho igual a 1500 Bytes.

Ainda na Tabela 5, percebe-se que, novamente, houve uma redução no desvio padrão entre as estimativas da capacidade realizadas a partir da estação assinante nas medições que utilizaram pacotes de 500 Bytes (24,37142) e as estimativas da capacidade que utilizaram pacotes de 1500 Bytes (18,90758). Os valores de média

(65,7116 Mbps) e mediana (71,629 Mbps) também foram mais próximos do valor esperado (23,4 Mbps – 26,4 Mbps) nas medições de 1500 Bytes.

6.2.1 – Avaliação da Capacidade do Enlace WiMAX Utilizando a Estação Externa

Após a realização das medições utilizando somente a estação base e a estação assinante do enlace WiMAX, o cenário das medições pode ser expandido para novas medições. Como a estação externa é mais próxima da estação assinante, e precisa passar pela estação assinante para alcançar a estação base, foram feitas estimativas da capacidade envolvendo apenas as estações externa e a estação assinante. As funcionalidades de *Burst* e Concatenação não influenciam estas medições, já que os pares de pacote não passaram pelo enlace WiMAX. Para estas estimativas da capacidade foi utilizado o cenário da Figura 16.

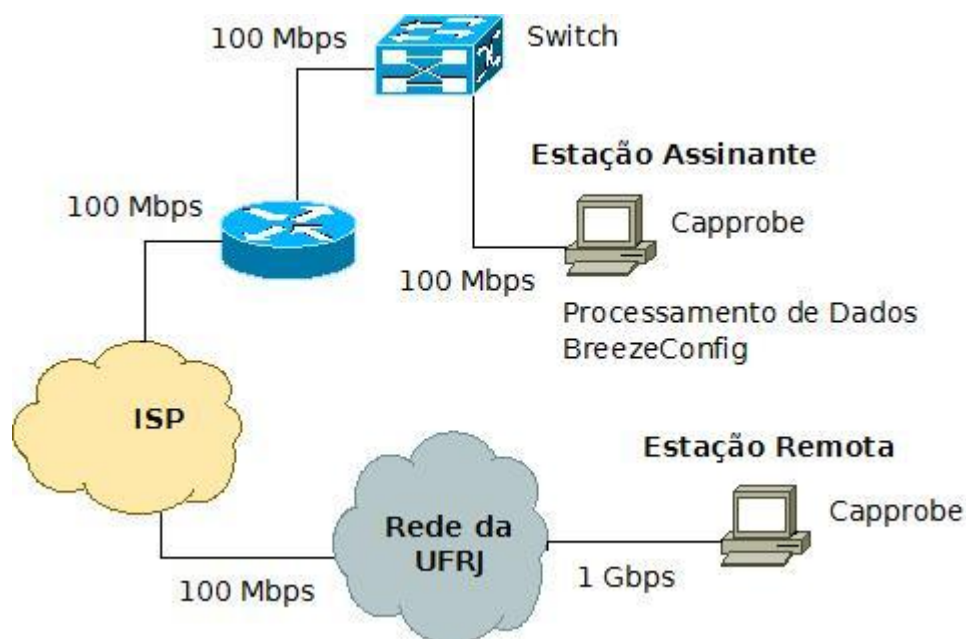


Figura 17: Cenário entre a estação assinante e a estação externa.

Em seguida foram realizadas novas estimativas da capacidade deste enlace, utilizando pacotes de 1500 Bytes. Nestas medições, o valor estimado da capacidade em todos os testes foi muito próximo dos 130 Mbps. No entanto, não é possível afirmar se estas medições foram capazes de estimar a capacidade do enlace com maior precisão ou se eles foram influenciados por tráfego cruzado existente na rede.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado

EA – EE	500 Bytes	65,7116 Mbps	71,629 Mbps	18,90758	100 Mbps
EA – EE	1500 Bytes	129,1966 Mbps	129,317 Mbps	0,8198346	100 Mbps
EE – EA	500 Bytes	150,8606 Mbps	169,333 Mbps	25,29438	100 Mbps
EE – EA	1500 Bytes	265,662 Mbps	274,182 Mbps	175,4807	100 Mbps

Tabela 6: Medições entre a estação assinante e a estação externa

A Tabela 6 demonstra o tráfego entre a estação assinante e a estação externa na qual é perceptível que houve uma redução no desvio padrão entre as estimativas da capacidade que utilizaram pacotes de 500 Bytes (18,90758) e as medições que utilizaram pacotes de 1500 Bytes (0,8198346). Os valores de média (65,7116 Mbps nos testes de 500 Bytes e 129,1966 Mbps nos testes de 1500 Bytes) e mediana (71,629 Mbps nas estimativas da capacidade com 500 Bytes e 129,317 Mbps), no entanto foram maiores nas medições com pacotes de 1500 Bytes do que nos pacotes de 500 Bytes.

Após estas medições, foram realizadas outras no sentido inverso do enlace, ou seja, a partir da estação externa e com destino à estação assinante do enlace WiMAX. Na Tabela 6 podemos também observar um comparativo entre estimativas realizadas a partir da estação externa. Nestes cenários, ao utilizar pacotes com 1500 Bytes de tamanho, gerou estimativas de capacidade muito altas, com uma média de 265,662 Mbps e uma mediana de 274,182 Mbps. Houve também uma grande variância entre os pacotes, já que o desvio padrão entre os mesmos foi de 175,4807.

Agora que as estimativas da capacidade do enlace entre a estação assinante e a estação externa já foram feitos, é possível utilizá-las como parâmetro para realizar a estimativa da capacidade do enlace entre a estação base e a estação assinante. Como as medições realizadas entre a estação assinante e a estação externa estimaram um valor superior às estimativas entre as estações base e assinante, o valor esperado será o valor da capacidade fornecido pelo fabricante dos rádios no mesmo percurso. Nestas medições foi utilizado o cenário exibido na Figura 11 do Capítulo 5.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio	Valor
---------	---------	-------	---------	--------	-------

				Padrão	Esperado
EB – EE	500 Bytes	23,0506 Mbps	14,328 Mbps	12,8292	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB – EE	1500 Bytes	53,2804 Mbps	52,131 Mbps	9,957217	28 Mbps – 31,1 Mbps
EE – EB	500 Bytes	13,9502 Mbps	11,104 Mbps	11,83288	23,4 Mbps – 26,4 Mbps
EE – EB	1500 Bytes	9,5748 Mbps	10,215 Mbps	4,209649	23,4 Mbps – 26,4 Mbps

Tabela 7: Medições entre a estação base e a estação externa - Funcionalidades desligadas

A Tabela 7 demonstra que tanto a média quanto a mediana das estimativas da capacidade do enlace com pacotes de 500 Bytes ficaram abaixo do valor esperado. Embora os valores da média e da mediana das medições com pacotes de 1500 Bytes tenham sido superiores ao valor esperado, ainda são menores do que os valores estimados pelos testes realizados no enlace entre a estação assinante e a estação externa. Isto indica que o trecho de menor capacidade entre a estação base e a estação externa é justamente o enlace WiMAX entre as estações base e assinante.

Ainda nesta Tabela é possível observar que todos os valores para média e mediana foram inferiores ao valor esperado. Isto é um forte indicativo que, embora as medições tenham sofrido com o tráfego cruzado, o enlace WiMAX formado pela estação base e a estação assinante é o enlace de menor capacidade da rede, e deve ser usado como referência.

Após estimar a capacidade entre a estação base e a estação assinante com as funcionalidades desligadas foram realizados testes para avaliar se as funcionalidades de *Burst* e Concatenação influenciam estas medições.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EE	500 Bytes	133,0802 Mbps	119,897 Mbps	28,74296	31,1 Mbps

EB – EE	1500 Bytes	80,2258 Mbps	87,875 Mbps	12,32161	31,1 Mbps
EE – EB	500 Bytes	172,2782 Mbps	169,333 Mbps	4,032881	26,4 Mbps
EE – EB	1500 Bytes	16,7584 Mbps	17,741 Mbps	2,064259	26,4 Mbps

Tabela 8: Medições entre a estação base e a estação externa - Funcionalidades ligadas

A Tabela 8 demonstra que, nas estimativas da capacidade do enlace realizadas a partir da estação base, embora a média das estimativas da capacidade com pacotes de 1500 Bytes (133,0802 Mbps) tenha sido menor do que a média das estimativas com pacotes de 500 Bytes (80,2258 Mbps), ambas as médias foram muito superiores ao valor esperado (31,1 Mbps). O Mesmo comportamento foi observado nas duas medianas (119,897 Mbps com pacotes de 500 Bytes e 87,875 Mbps com pacotes de 1500 Bytes). Quanto ao desvio padrão entre as medições, as estimativas com pacotes de 1500 Bytes (12,32161) obtiveram um valor bem menor do que os testes com pacotes de 500 Bytes (28,74296).

Com as medições a partir da estação base realizadas, foram executadas outras medições, a partir do terminal externo. Na Tabela 8 pode-se observar que os valores de média (172,2782 Mbps) e mediana (169,333 Mbps) das medições com pacotes de 500 Bytes foram visivelmente maiores do que os valores encontrados para a média (16,7584 Mbps) e mediana (17,741 Mbps) nos testes com pacotes de 1500 Bytes. Também houve uma redução nos valores do desvio padrão (4,032881 nos testes com pacotes de 500 Bytes e 4,032881 nos testes com pacotes de 1500 Bytes), indicando uma maior precisão nestas estimativas.

Após a realização das medições com ambas as funcionalidades ligadas, foram testadas as funcionalidades de *Burst* e Concatenação separadamente. A primeira funcionalidade testada foi o *Burst*. Estas estimativas foram feitas a partir da estação base. Em seguida foram feitas medições com pacotes de 1500 Bytes. No entanto, estas medições não se mostraram mais precisas do que as medições com pacotes de 500 Bytes.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio	Valor
---------	---------	-------	---------	--------	-------

				Padrão	Esperado
EB – EE	500 Bytes	60,3506 Mbps	64,536 Mbps	26,28928	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB – EE	1500 Bytes	78,5472 Mbps	88,225 Mbps	15,0744	28 Mbps – 31,1 Mbps
EE – EB	500 Bytes	24,075 Mbps	20,525 Mbps	8,991053	23,4 Mbps – 26,4 Mbps
EE – EB	1500 Bytes	71,0736 Mbps	70,088 Mbps	22,77828	23,4 Mbps – 26,4 Mbps

Tabela 9: Medições entre a estação base e a estação externa - Burst ligado

A Tabela 9 mostra que, nestes dois últimos cenários de estimativa da capacidade, o valor encontrado para média (60,3506 Mbps) e mediana (64,536 Mbps) nos testes de 500 Bytes foram mais próximos do valor esperado do que os valores estimados da capacidade com pacotes de 1500 Bytes (Média 78,5472 Mbps e mediana de 88,225 Mbps). No entanto, o desvio padrão encontrado foi menor nas medições com pacotes de 1500 Bytes do que nos pacotes de 500 Bytes (26,28928 nos testes com 500 Bytes e 15,0744 nos testes de 1500 Bytes).

Após estas estimativas da capacidade, foram realizadas outras medições a partir da estação externa até estação base. Estas medições estimaram uma capacidade mais baixa do que as medições realizadas a partir da estação base, já que as medições que estimaram a maior capacidade não estimaram um valor maior do que 40 Mbps.

A Tabela 9 mostra que, embora a mediana dos testes com pacotes de 500 Bytes tenha sido inferior ao valor esperado (20,525 Mbps), a média das medições (24,075 Mbps) ficou dentro do intervalo esperado (23,4 Mbps – 26,4 Mbps). No entanto, tanto a média (71,0736 Mbps) quanto a mediana (70,088 Mbps) das estimativas da capacidade com pacotes de 1500 Bytes não foram capazes de estimar uma capacidade próxima ao valor esperado, estimando uma capacidade muito acima do mesmo. O desvio padrão também foi maior nos testes com 1500 Bytes (8,991053 nos testes com pacotes de 500 Bytes e 22,77828 nos testes com 1500 Bytes).

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio	Valor
----------------	----------------	--------------	----------------	---------------	--------------

				Padrão	Esperado
EB – EE	500 Bytes	42,1104 Mbps	20,003 Mbps	45,30505	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB – EE	1500 Bytes	90,19 Mbps	89,802 Mbps	1,518313	28 Mbps – 31,1 Mbps
EE – EB	500 Bytes	60,4648 Mbps	34,151 Mbps	60,94561	28 Mbps – 31,1 Mbps
EE – EB	1500 Bytes	18,3276 Mbps	17,21 Mbps	2,23766	28 Mbps – 31,1 Mbps

Tabela 10: Medições entre a estação base e a estação externa - Concatenação ligada

Após a realização das medições com a funcionalidade de *Burst* ligada, falta apenas estimar a capacidade do enlace com apenas a funcionalidade de Concatenação ativada. A Tabela 10 demonstra que, embora a média (42,1104 Mbps) encontrada nas estimativas com pacotes de 500 Bytes tenha sido acima do valor esperado (28 Mbps – 31,1 Mbps), a mediana encontrada é inferior ao esperado. No entanto, nas estimativas da capacidade com pacotes de 1500 Bytes foi encontrada uma média de 90,19 Mbps e uma mediana de 89,802 Mbps. Quanto ao desvio padrão, foi encontrado um valor muito superior nas medições com pacotes de 500 Bytes (45,30505) do que com pacotes com 1500 Bytes (28 Mbps – 31,1 Mbps). O fato do desvio padrão ter sido acima de 45 nas medições a partir da estação base com pacotes de 500 Bytes e de 60,9 nas estimativas a partir da estação assinante indica que houve uma grande diferença entre o maior e o menor valor encontrado nas estimativas da capacidade. Isto significa que não foi possível estimar a capacidade do enlace de forma precisa.

Após estimar a capacidade do enlace com a Concatenação ligada a partir da estação base, é necessário estimar a capacidade a partir da estação externa. Na Tabela 10 pode-se observar que embora a mediana nas medições com 500 Bytes (34,151 Mbps) tenha sido próxima do valor esperado (28 Mbps – 31,1 Mbps), a média encontrada foi muito superior (60,4648 Mbps). Nas estimativas de capacidade utilizando pacotes de 1500 Bytes tanto a média quanto a mediana dos testes foram

abaixo do valor esperado. Quanto ao desvio padrão, foi encontrado um desvio muito maior nos testes com pacotes de 100 Bytes do que com os testes com 1500 Bytes.

6.3 – Medições com interferência de outra estação na camada física

Após a realização das medições apresentadas anteriormente, foram executadas novas medições, mas com uma fonte de interferência na camada física. Para gerar esta interferência foi utilizado outro rádio próximo do enlace WiMAX.

Primeiro, foi detectado que uma das medições apresentou um resultado diferente do que seria esperado. Isto demonstrou que as estimativas da capacidade não estavam sendo adequadas para o cenário, já que estavam sendo muito imprecisas. Um dos motivos para essa diferença na medição é o número reduzido de pacotes enviados pelo CapProbe o que ocasionaria uma amostra não representativa.

Na tentativa de encontrar qual seria o número ideal de pacotes a serem enviados pelo enlace, foram realizadas diversas medições, com um número crescente de pacotes. Cada medição foi repetida diversas vezes, e o seu resultado anotado. Depois, foram extraídas as métricas de média, mediana e desvio padrão, para avaliar a consistência de cada estimativa. Esta primeira medição pode ser observada na Figura 17.

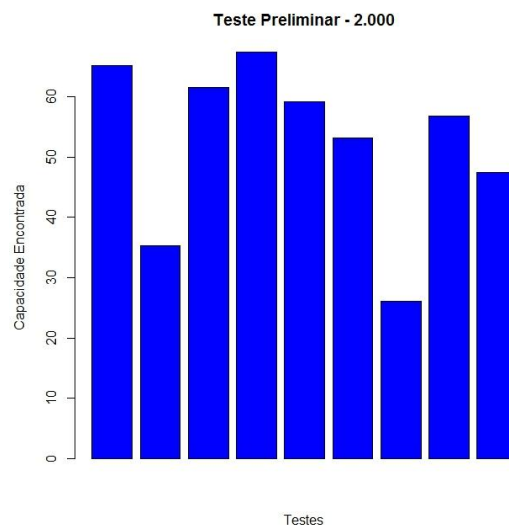


Figura 18: Medição com 2.000 pacotes

Na primeira estimativa, as amostras demonstraram uma variância muito grande. Essa variância indicou que o tamanho de cada amostra era muito pequeno. Portanto, essa medição demonstrou que as amostras não foram significativas.

A seguir, foi realizada uma nova medição com o objetivo de verificar o tamanho ideal da amostra. Esta verificação foi feita para confirmar se as amostras realmente eram insuficientes, ou se este era um comportamento normal. Para comprovar isto, o número de pacotes enviados foi dobrado. Foram então enviados quatro mil pacotes através do enlace, e mantendo toda a configuração constante. Os valores encontrados em cada amostra podem ser observados na Figura 18.

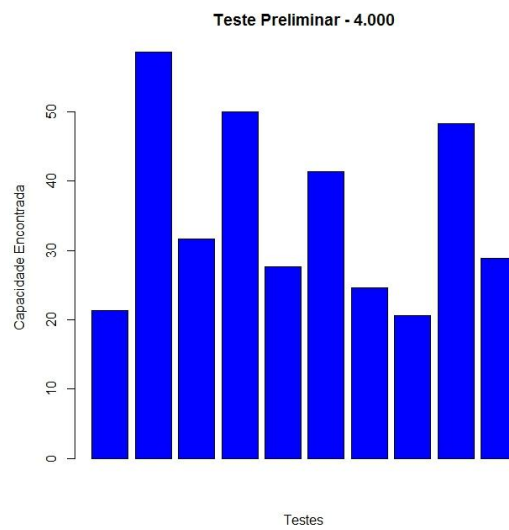


Figura 19: Medição com 4.000 pacotes

Houve uma sensível redução da variância entre as amostras. Nesta estimativa da capacidade, as amostras foram mais consistentes, o que indicou maior adequação neste cenário de teste. No entanto, foi preciso uma nova estimativa com o objetivo de verificar se este tamanho era significativo, ou se seria possível conseguir um resultado com melhor precisão, utilizando uma amostra com um maior número de pacotes. Para verificar esta possibilidade, novamente dobrou-se o número de pacotes (8.000). Os resultados podem ser observados na Figura 19.

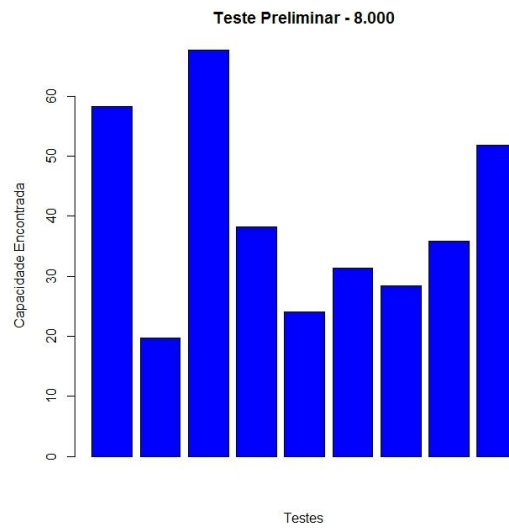


Figura 20: Medição com 8.000 pacotes

Como se pode observar, houve uma visível redução de todas as medidas das estimativas da capacidade com amostras de dois mil pacotes para as estimativas com amostras de quatro mil. No entanto, o valor das métricas aumentou quando foi utilizado um tamanho de oito mil. Como não é possível que a amostra com tamanho de quatro mil pacotes seja mais representativa do que a de oito mil pacotes, isto poderia ser causado pelo fato de que a quantidade de medições foi insuficiente. No entanto, como houve uma interferência no meio físico, e as estimativas da capacidade exigem muito tempo para serem realizadas, forem realizadas cinco estimativas da capacidade para cada cenário utilizando quatro mil pacotes em cada estimativa. Estas informações podem ser visualizadas na Tabela 11.

Tamanho da Amostra	Média	Mediana	Desvio Padrão
2.000 pacotes	49,9019 Mbps	57,9675 Mbps	22,3746
4.000 pacotes	35,3173 Mbps	30,2555 Mbps	13,34925
8.000 pacotes	39,48622 Mbps	35,906 Mbps	16,29303

Tabela 11: Testes Preliminares com interferência

6.3.1 – Medição da capacidade com interferência

Nesta seção estão todas as medições para avaliar a estimativa da capacidade no enlace. Inicialmente, será apresentada a metodologia utilizada nos experimentos, e depois os resultados e a análise dos mesmos.

6.3.2 – Avaliação da capacidade do enlace WiMAX com interferência

Serão apresentadas a seguir as medições com as funcionalidades de *Burst* e de Concatenação desligadas. Embora este não seja o padrão do rádio (funcionalidades ligadas), estas estimativas demonstram como é a medição sem interferências. Foram realizadas estimativas da capacidade no sentido da estação base até a estação assinante com ambas as funcionalidades desligadas. O cenário destas medições pode ser observado na Figura 20.

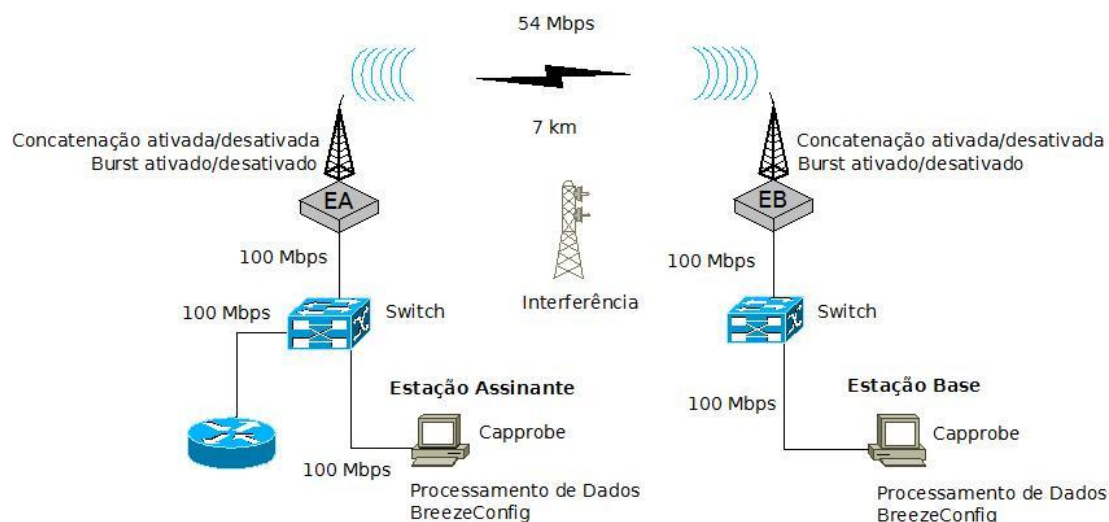


Figura 21: Cenário entre a estação base e a estação assinante com interferência.

Primeiro, foi utilizado 500 Bytes como tamanho de pacote. Para observar se há alguma alteração na estimativa da capacidade caso sejam utilizados pacotes de tamanho maior, foram também realizadas medições utilizando pacotes de tamanho 1500 Bytes.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EA	500 Bytes	39,247 Mbps	39,376 Mbps	0,5421125	28 Mbps – 31,1 Mbps

EB – EA	1500 Bytes	53,160 Mbps	61,571 Mbps	19,58677	28 Mbps – 31,1 Mbps
EA – EB	500 Bytes	38,006 Mbps	40,345 Mbps	4,502559	23,4 Mbps – 26,4 Mbps
EA – EB	1500 Bytes	43,457 Mbps	46,618 Mbps	15,875	23,4 Mbps – 26,4 Mbps

Tabela 12: Medições entre a estação base e a estação assinante - Funcionalidades Desligadas.

Como se pode observar, houve uma variação mais significativa nas estimativas com pacotes de 500 Bytes. Isto pode ser observado pelo desvio padrão, na qual na primeira medição teve um valor próximo de 0,5, e no segundo um valor mais próximo de 20. Por isto, ao se utilizar pacotes com 1500 Bytes de tamanho a variação entre as medições foi visivelmente superior. Esta variação, bem como a diferença entre outras métricas relevantes entre estas duas estimativas podem ser observadas na Tabela 12.

Os resultados das estimativas da capacidade indicam que mesmo com as funcionalidades de *Burst* e Concatenação desligadas, foi estimada uma capacidade superior à esperada. Estas medições também demonstram que, quanto maior é o tamanho de cada pacote, maior é o desvio padrão entre as medições. Também foi observado que o resultado das estimativas utilizando 1500 Bytes foi muito acima do esperado e das estimativas utilizando 500 Bytes como tamanho de pacote.

Em seguida é preciso avaliar se as medições realizadas no sentido contrário também se comportam desta mesma forma. Foram realizadas também estimativas da capacidade a partir da estação assinante até a estação base. Na primeira estimativa foram utilizados pacotes de tamanho 500 Bytes. Ambas as funcionalidades permaneceram desligadas. Para novamente comparar a influência do aumento do tamanho de cada pacote na estimativa da capacidade, as mesmas medições foram repetidas, utilizando pacotes de tamanho 1500 Bytes.

Analisando os resultados em ambos os sentidos percebe-se que o aumento do tamanho de cada pacote possui um impacto negativo na medição. Independente de qualquer uma das duas funcionalidades estar ativada, as medições com 500 Bytes

foram mais precisas do que as medições com 1500 Bytes. As informações sobre o comparativo das últimas estimativas da capacidade pode ser observado na Tabela 12.

No sentido da estação assinante até a estação base também foi identificado que o desvio padrão das medições com pacotes de 1500 Bytes (15,875) foi superior ao desvio padrão observado nas medições com pacotes de 500 Bytes. As medições continuaram a estimar uma capacidade superior à informada pelo fabricante dos rádios, considerando a média e mediana das estimativas da capacidade.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EA	500 Bytes	169,0434 Mbps	138,464 Mbps	43,19627	31,1 Mbps
EB – EA	1500 Bytes	50,1578 Mbps	55,018 Mbps	8,35315	31,1 Mbps
EA – EB	500 Bytes	159,0136 Mbps	128,377 Mbps	42,75353	26,4 Mbps
EA – EB	1500 Bytes	84,1316 Mbps	83,29 Mbps	12,23459	26,4 Mbps

Tabela 13: Medições entre a estação base e a estação assinante - Funcionalidades ligadas

A seguir, foi estimada a capacidade com as funcionalidades de *Burst* e Concatenação ligadas. Em seguida, foram feitas mais estimativas, aumentando o tamanho de cada pacote para 1500 Bytes. Ao contrário das medições anteriores, ao aumentar o tamanho dos pacotes com as funcionalidades de *Burst* e Concatenação ligadas, houve uma redução das medidas encontradas na estimativa de pacotes. Isto demonstra que apesar do aumento do tamanho dos pacotes aumentar a imprecisão das medições, pacotes de tamanho maior podem anular os efeitos negativos dessas funcionalidades durante a estimativa da capacidade.

Neste caso, com as funcionalidades ativadas, o efeito de aumentar o tamanho dos pacotes aproximou os resultados até o esperado. Não apenas isso, mas o desvio padrão também foi reduzido, que foi de mais de aproximadamente 43,2 na estimativa de 500 Bytes e foi reduzido para 8,3 na medição de 1500 Bytes. Isto demonstra que

as funcionalidades de *Burst* e Concatenação não apenas distorcem as medições, fazendo com que estimem uma capacidade acima do esperado, mas também aumentam o desvio padrão entre as estimativas da capacidade.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EA	500 Bytes	97,8232 Mbps	70,442 Mbps	60,54689	26,4 Mbps
EB – EA	1500 Bytes	74,5464 Mbps	71,057 Mbps	20,35352	26,4 Mbps
EA – EB	500 Bytes	76,0778 Mbps	85,027 Mbps	14,07453	26,4 Mbps
EA – EB	1500 Bytes	68,5956 Mbps	74,652 Mbps	27,95467	26,4 Mbps

Tabela 14: Medições entre a estação base e a estação assinante - Burst ligado

Agora que já foi analisada a influência das duas funcionalidades juntas é preciso analisar cada uma separadamente. A primeira funcionalidade a ser analisada será o *Burst*. Estas métricas podem ser observadas na Tabela 14. Como se pode observar, o desvio padrão foi bem reduzido nas medições utilizando 500 Bytes (60,54689) para as estimativas com 1500 Bytes (20,35352). Isto também ocorreu com a média, embora a mediana tenha sido bem similar. Nesta Tabela pode-se observar a diferença das estimativas utilizando 500 e 1500 Bytes. Embora os valores para média e mediana em ambos os testes tenham sido muito próximos, as capacidades estimadas com pacotes de tamanho de 1500 Bytes estimaram valores mais próximos do valor esperado, embora tenham tido um desvio padrão muito maior.

Embora os testes com 500 Bytes (14,07453) tenham um desvio padrão maior do que os testes com 1500 Bytes (27,95467) a média e a mediana das medições com 1500 Bytes ainda se mostrou mais próxima do valor esperado. Como pode-se ver, ao aumentar o tamanho dos pacotes de 500 Bytes para 1500 Bytes, provocou uma redução da média (de 149,6748 Mbps para 88,8146 Mbps). O mesmo aconteceu com a mediana, que foi calculada como 132,789 Mbps nas estimativas com 500 Bytes e

como 93,398 Mbps nas estimativas com 1500 Bytes. No entanto, ambas as métricas foram muito diferentes do valor esperado (26,4 Mbps).

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EA	500 Bytes	149,6748 Mbps	132,789 Mbps	38,54529	26,4 Mbps
EB – EA	1500 Bytes	88,8146 Mbps	93,398 Mbps	10,37289	26,4 Mbps
EA – EB	500 Bytes	128,3684 Mbps	129,024 Mbps	1,503287	26,4 Mbps
EA – EB	1500 Bytes	67,8964 Mbps	72,721 Mbps	20,05505	26,4 Mbps

Tabela 15: Medições entre a estação base e a estação assinante - Concatenação ligada

Para tentar evitar que os pacotes fossem concatenados, o tamanho dos mesmos foi aumentado para 1500 Bytes. Com isto foram estimadas capacidades menores, no entanto as estimativas obtiveram uma média e mediana das capacidades superior a 60 Mbps.

Na Tabela 15 é possível perceber que houve um grande aumento no desvio padrão dos testes com pacotes de tamanho 500 Bytes (1,503287) para as medições com pacotes de 1500 Bytes (20,05505). No entanto, a média das estimativas com testes de 1500 Bytes (67,8964 Mbps) foi menor do que a média das medições com 500 Bytes (128,3684 Mbps). O mesmo comportamento ocorreu com a mediana das estimativas, (129,024 Mbps com 500 Bytes e 72,721 Mbps com 1500 Bytes) que ficaram mais próximas do valor esperado (26,4 Mbps).

6.3.4 – Avaliação da capacidade do enlace WiMAX com interferência e utilizando a estação externa

Após a realização das estimativas da capacidade do enlace WiMAX com interferência no meio físico, o cenário das medições foi expandido até a estação externa. As primeiras estimativas da capacidade realizadas neste cenário fora feitas com as funcionalidades de Burst e Concatenação desativadas. As medições foram feitas a partir da estação base, em direção à estação externa. Nestas primeiras

estimativas, no entanto, foram realizadas da estação externa até a estação assinante. Estas medições utilizara um cenário idêntico ao da Figura 16.

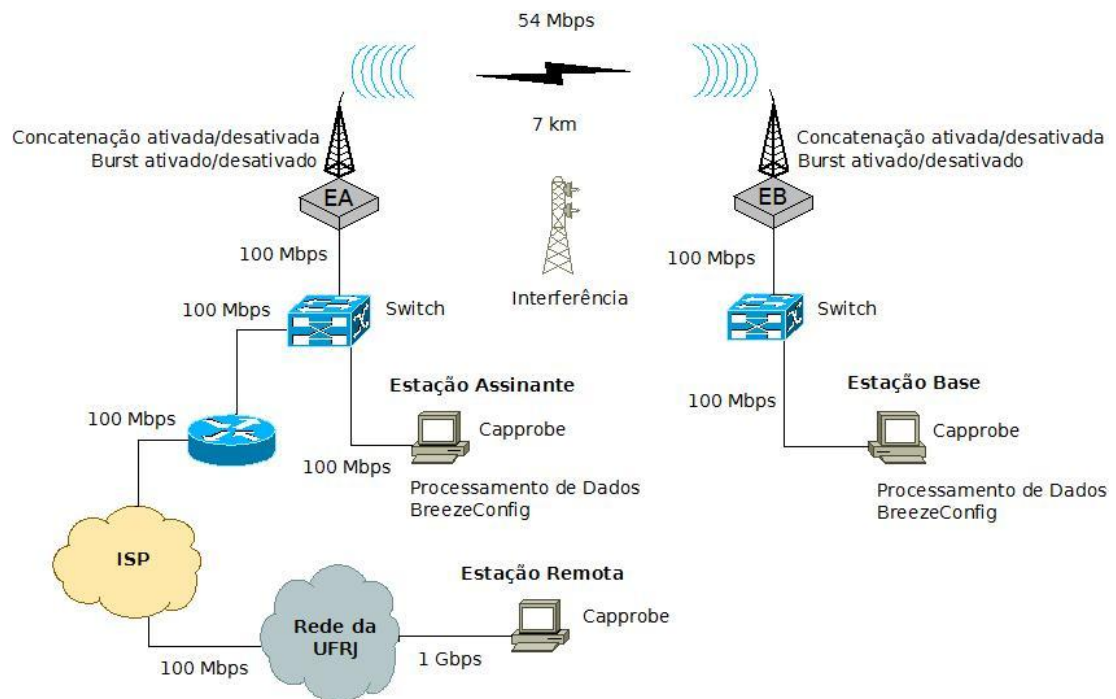


Figura 22: Cenário entre a estação base e a estação externa com interferência

Após estas medições serem realizadas, outras foram feitas utilizando 1500 Bytes de tamanho para cada pacote. Neste caso, as estimativas registraram uma capacidade muito acima da estimada nas medições com pacotes de 500 Bytes. O cenário em que estas estimativas foram feitas pode ser observado na Figura 21.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EA – EE	500 Bytes	177,5712 Mbps	206,746 Mbps	42,03026	100 Mbps
EA – EE	1500 Bytes	275,1636 Mbps	270,967 Mbps	105,9890	100 Mbps
EE – EA	500 Bytes	132,85 Mbps	169,333 Mbps	60,99137	100 Mbps
EE – EA	1500 Bytes	341,3188 Mbps	280,558 Mbps	89,2372	100 Mbps

Tabela 16: Medições entre a estação assinante e a estação externa

Na Tabela 16 observa-se que embora tanto a média (275,1636 Mbps) quando a mediana (270,967 Mbps) nas medições com pacotes de 1500 Bytes foram estimados valores maiores do que nas medições com pacotes de 500 Bytes (média de 177,5712 Mbps e mediana de 206,746 Mbps). Também foi observada uma grande diferença no desvio padrão entre as estimativas (42,03026 nos testes com pacotes de 500 Bytes e 105,9890 nos pacotes com 1500 Bytes).

Após estas medições foi estimada a capacidade no sentido oposto, isto é, a partir da estação externa para a estação assinante. Após esta estimativa da capacidade do enlace, o tamanho dos pacotes foi aumentado para 1500 Bytes, e novas medições foram realizadas no mesmo sentido do enlace.

Na Tabela 16 podemos observar o resultado das estimativas da capacidade realizadas da estação externa até a estação assinante. Como é possível visualizar, a média das medições com pacotes de 1500 Bytes (341,3188 Mbps) foi mais do que o dobro da média das medições com pacotes de 500 Bytes (132,85 Mbps). O valor da mediana das estimativas da capacidade com pacotes de 1500 Bytes (280,558 Mbps) também se mostrou maior do que nas estimativas com pacotes de 500 Bytes (169,333 Mbps).

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EE	500 Bytes	30,5014 Mbps	33,394 Mbps	10,45675	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB – EE	1500 Bytes	62,1852 Mbps	67,081 Mbps	9,648637	28 Mbps – 31,1 Mbps
EE – EB	500 Bytes	12,8542 Mbps	11,712 Mbps	1,860893	23,4 Mbps – 26,4 Mbps
EE – EB	1500 Bytes	10,7834 Mbps	11,862 Mbps	2,106721	23,4 Mbps – 26,4 Mbps

Tabela 17: Medições entre a estação base e a estação externa - Funcionalidades desligadas

Após as estimativas da capacidade entre a estação assinante e a estação externa, foram realizadas medições a partir da estação base até a estação externa.

Nestas medições existe a interferência de outra estação na camada física do enlace WiMAX. A Tabela 17 exibe os dados destas medições. Como é possível observar, a média das estimativas com pacotes de 500 Bytes (30,5014 Mbps) ficou dentro do intervalo esperado (28 Mbps – 31,1 Mbps), o que não ocorreu com a média das estimativas com pacotes de 1500 Bytes (62,1852 Mbps). Embora nenhuma das medianas tenha sido calculada dentro do valor esperado, a mediana das medições com pacotes de 500 Bytes (33,394 Mbps) ficou mais próxima do que a mediana das medições com pacotes de 1500 Bytes (67,081 Mbps).

Após as medições realizadas a partir da estação base, será estimado o outro sentido do enlace, ou seja, a partir da estação externa até a estação base. Nestas estimativas as funcionalidades de *Burst* e Concatenação foram mantidas desativadas.

Como se pode observar na Tabela 17, a média e a mediana de ambas as estimativas ficaram abaixo do valor esperado.

Após estimar a capacidade do enlace com as duas funcionalidades desativadas é preciso avaliar a estimativa da capacidade com as funcionalidades de *Burst* e Concatenação ligadas.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EE	500 Bytes	98,6846 Mbps	98,452 Mbps	0,9053125	31,1 Mbps
EB – EE	1500 Bytes	85,846 Mbps	89,767 Mbps	10,60998	31,1 Mbps
EE – EB	500 Bytes	237,0666 Mbps	169,333 Mbps	92,74805	26,4 Mbps
EE – EB	1500 Bytes	21,8804 Mbps	19,648 Mbps	5,127814	26,4 Mbps

Tabela 18: Medições entre a estação base e a estação externa - Funcionalidades ligadas

Como pode-se ver na Tabela 18 não houve uma diferença muito grande entre as médias e medianas das medições realizadas com as funcionalidades desligadas. No entanto, o desvio padrão da estimativa da capacidade com pacotes de 1500 Bytes

(10,60998) foi muito superior ao desvio padrão das estimativas com pacotes de 500 Bytes (0,9053125). A Tabela exibe as estimativas da capacidade realizadas a partir da estação externa até a estação base. Ao aumentar o tamanho dos pacotes de 500 Bytes para 1500 Bytes as médias (237,0666 Mbps com pacotes de 500 Bytes e 21,8804 Mbps com pacotes de 1500 Bytes) e medianas (169,333 Mbps com pacotes de 500 Bytes e 19,648 Mbps com pacotes de 1500 Bytes) das estimativas da capacidade foram reduzidas. O mesmo comportamento ocorreu com o desvio padrão entre as medições. No entanto, as estimativas com pacotes de 1500 Bytes ficaram abaixo do valor esperado (92,74805 nas estimativas com pacotes de 500 Bytes e 5,127814 nas medições com pacotes de 1500 Bytes).

Após realizar as estimativas da capacidade do enlace com as funcionalidades de *Burst* e Concatenação ligadas e desligadas, o próximo passo foi realizar as medições com as funcionalidades ativadas separadamente.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EE	500 Bytes	53,0734 Mbps	39,298 Mbps	26,306	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB – EE	1500 Bytes	87,1918 Mbps	91,192 Mbps	10,95054	28 Mbps – 31,1 Mbps
EE – EB	500 Bytes	28,3154 Mbps	29,029 Mbps	6,726906	23,4 Mbps – 26,4 Mbps
EE – EB	1500 Bytes	22,045 Mbps	22,341 Mbps	1,767003	23,4 Mbps – 26,4 Mbps

Tabela 19: Medições entre a estação base e a estação externa - Burst ligado

Como é possível observar na Tabela 19, a mediana (39,298 Mbps) das medições com pacotes de 500 Bytes foi a métrica mais próxima do valor esperado (28 Mbps – 31,1 Mbps). No entanto, a média (53,0734 Mbps) do mesmo diferiu bastante, em parte por conta do alto desvio padrão (26,306).

A Tabela 19 demonstra que nas estimativas da capacidade com pacotes de tamanho 500 Bytes, tanto a média (28,3154 Mbps) quanto a mediana (29,029 Mbps) foram acima do valor esperado (23,4 Mbps – 26,4 Mbps). No entanto, as estimativas

com pacotes de tamanho de 1500 Bytes obtiveram uma média (22,045 Mbps) e mediana (22,341 Mbps) abaixo do valor esperado.

Após serem feitas as medições com o *Burst* ligado, foram realizadas novas estimativas com apenas a funcionalidade de Concatenação ativada. Após estas medições, o tamanho dos pacotes foi aumentado para 1500 Bytes. Como é possível perceber, não houve uma redução muito grande nas estimativas da capacidade do enlace.

É possível observar que nenhuma das métricas das medições foi próxima do valor esperado. Embora as estimativas tenham sido reduzidas ao aumentar o tamanho dos testes de 500 Bytes para 1500 Bytes, esta não foi uma redução significativa.

Sentido	Tamanho	Média	Mediana	Desvio Padrão	Valor Esperado
EB – EE	500 Bytes	90,139 Mbps	97,775 Mbps	12,45398	28 Mbps – 31,1 Mbps
EB – EE	1500 Bytes	84,859 Mbps	80,416 Mbps	15,37916	28 Mbps – 31,1 Mbps
EE – EB	500 Bytes	126,0586 Mbps	169,333 Mbps	59,38229	23,4 Mbps – 26,4 Mbps
EE – EB	1500 Bytes	21,383 Mbps	21,352 Mbps	2,624383	23,4 Mbps – 26,4 Mbps

Tabela 20: Medições entre a estação base e a estação externa - Concatenação ativada

Depois de concluir as medições a partir da estação base, foram realizadas estimativas da capacidade a partir da estação externa. Primeiro foram feitas medições utilizando pacotes de tamanho igual a 500 Bytes, mantendo apenas a funcionalidade de Concatenação ativada. Após isto foram realizadas novas estimativas, utilizando pacotes de 1500 Bytes.

Como podem ser observados na Tabela 20, os valores de média (21,383 Mbps) e mediana (21,352 Mbps) nas estimativas com pacotes de 1500 Bytes foram muito mais próximos do valor esperado (23,4 Mbps – 26,4 Mbps). Também houve uma grande redução do desvio padrão nestas medições (de 59,38229 nas estimativas

da capacidade com pacotes de 500 Bytes para 2,624383 nas estimativas com pacotes de 1500 Bytes).

Capítulo 7 – Conclusão e trabalhos futuros

Nas medições feitas dentro do enlace WiMAX, a maioria das métricas indicaram uma maior precisão dos testes executados sem interferência. Algumas exceções podem ser explicadas pelo fato de terem sido utilizados oito mil pacotes nos testes com interferência, ao contrário dos testes sem interferência, que utilizaram apenas mil pacotes. O aumento do número de pacotes utilizado pelo CapProb garantiu uma precisão maior com a funcionalidade de *Burst* ativada.

Já nas medições utilizando o terminal externo, a maioria das estimativas da capacidade do enlace com interferência no meio físico demonstraram ser mais precisas do que nas estimativas utilizando apenas mil pacotes e sem interferência. Isto ocorreu inclusive na estimativa utilizando pacotes de 500 Bytes e com as funcionalidades desligadas, a partir da estação base. Isto indica que, em um ambiente mais realista, e com tráfego cruzado, o aumento do número de pacotes utilizados pelo CapProbe pode ser suficiente para garantir medições mais precisas, mesmo com a interferência de uma estação externa.

Outra observação feita em ambos os casos, com e sem interferência, é que existe uma tendência maior de, ao se utilizar pacotes de tamanho mais elevado, aumenta-se também o desvio padrão entre os pacotes. Nas medições realizadas sem interferência no meio físico e utilizando somente as estações do enlace WiMAX, este efeito foi observado em todas as estimativas da capacidade em que a funcionalidade de Concatenação estava desativada. Nas outras estimativas, este efeito não ocorreu em outros cenários, mas como houve uma influência maior de tráfego cruzado e de interferência externa, não é possível afirmar se isto interferiu no desvio padrão dos pacotes.

Um dos grandes problemas na realização das medições no enlace WiMAX utilizando o CapProbe foi o tempo de realização de cada estimativa da capacidade. Por terem sido utilizados um número muito grande de pares de pacotes, os testes as medições levaram muito tempo para serem concluídas. Uma sugestão para um trabalho futuro é o uso de uma maior quantidade de pares de pacotes, para estimar a capacidade de um enlace WiMAX sem interferências no meio físico. Outra sugestão é de utilizar um maior número de medições da capacidade do enlace, para verificar se as médias e medianas seriam confirmadas.

Referências Bibliográficas:

ALBERTI, R. A., Chan, S., “A Comparison of Approaches for IEEE 802.16 Performance Evolution”, MPRG-Mobile and Portable Radio Research 2006, Virginia.

IEEE Std 802.16-2003. Standard for Local and Metropolitan area networks. 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.

KAPOOR, R., CHEN, L., LOA, L., GUERLA, M., SANADIDI, M. Y. (2004) “CapProbe: A simple and accurate capacity estimation technique”. Proceedings of the ACM SIGCOMM. 67-78, Portland, USA, 2004.

LIMA, L. dos S., SOARES, L. F. G., ENDLER, M. **WiMAX: Padrão IEEE 802.16 para Banda Larga Sem Fio**. 2004. 57f. Monografia (Monografias em Ciência da Computação) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, A. A. de **Estimativa de capacidade em ambientes com enlaces de rádio IEEE 802.16**. 2010. 88f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

OLIVEIRA, A. A., LUCENA, S. C. de, CAMPOS, C. A. V., ROCHA, A. A. de A. “Avaliando a Eficácia das Técnicas de Estimativas de Capacidade de Caminho em redes com Enlaces WiMAX” In XVI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços, 14p 161 – 174. 2011.

OLIVEIRA, A. A., LUCENA, S. C. de, CAMPOS, C. A. V., ROCHA, A. A. de A. “Package dispersion techniques over WiMAX links: challenges and problems” IEEE Communications Magazine. 51(3): 154-159 2013

PRASSAD, R., DOVROLIS, C., MURRAY, M., CLAFFY K, “Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques, and Tools”, IEEE Networks. 17 ,27 - 35 (2003).

QUINELATO, F. M., ALBERTI, A. M. “Análise das Características de Funcionamento da Gerência de Banda em Redes WiMAX” In: Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica do Inatel (Incitel), 2007, Santa Rita do Sapucaí. Anais do Incitel, 2007.

QUINTEIRO, N. F. M., **Mecanismo do kernell para o controle de tráfego e variação da taxa fim a fim: E2E**. 2007. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

RÉS B. M. R. e S., **Soluções Tecnológicas e Impacto da Mobilidades Numa Rede WiMAX**. 2008. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica de Telecomunicações) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008. [online] Disponível em < <http://ria.ua.pt/bitstream/10773/1928/1/2009000302.pdf>> Acesso em: 26 de Agosto de 2013.

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, L. B. R., **WiMAX - Aplicações e Futuro**. 2006. 40p. Monografia (Monografia em Engenharia Elétrica Em Telecomunicações) – Centro Universitário Salesiano de São Paulo, Campinas, 2006. [online] Disponível em <www.decom.fee.unicamp.br/~silva/TCC_Wimax.htm#Toc1355390341> Acesso em: 11 de Junho de 2013.

RODRIGUES, A. A., SÁ, L. M. Z. de **Aplicação da Tecnologia WiMAX para inclusão dos cidadãos e empresas na sociedade da informação**. 2009. 68f. Monografia (Monografia em Sistemas de Computação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.

SHABANI, A. M., BEG, M. T., KHADER, A. A., “Survey of Down Link Data Allocation Algorithms in IEEE 802.16 WiMAX”. **International Journal of Distributed and Parallel Systems**. [online] v.3, n.4, 2012. Disponível em: <<http://airccse.org/journal/ijdps/papers/0712ijdps20.pdf>>. Acesso em 08 de Junho de 2013.

SILVA, Adriel B. da, **Estimação de Capacidade fim-a-fim em redes sem fio CDMA 1xEVDO utilizando a técnica de Dispersão de Pacotes**. 2008. 55f. Dissertação. (Mestre em ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

SOARES, C. L., **Proposta de Algoritmo de Controle de Admissão de Conexões Baseado em Threshold para as Redes IEEE 802.16**. 2009. 125f. Dissertação.

(Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

UM ESTUDO SOBRE ESTIMATIVA DE CAPACIDADE EM REDES WIMAX
COM A FERRAMENTA CAPPROBE E UM CENÁRIO REAL

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Carlos Alberto Vieira Campos

Sidney Cunha de Lucena

Alex Avellar de Oliveira

Maximiliano Martins de Faria

O(s) autor(es) deste Projeto autoriza(m) a ESCOLA DE INFORMÁTICA
APLICADA da UNIRIO a divulgá-lo, no todo ou em parte, resguardados os direitos
autorais conforme legislação vigente.

Rio de Janeiro, ____ de ____ de ____.

Nome(s) e Assinatura(s) do(s) aluno(s)