

Avaliando a Eficácia das Técnicas de Estimativa de Capacidade de Caminho em Redes com Enlaces WiMAX

Alex A. de Oliveira¹, Sidney C. de Lucena¹,
Carlos A. V. Campos¹, Antônio A. de A. Rocha²

¹Departamento de Informática Aplicada
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO)

²Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal Fluminense (UFF)

{alex.oliveira,sidney,beto}@uniriotec.br, arocha@ic.uff.br

Resumo. A métrica “capacidade máxima de transmissão de um caminho” representa a menor taxa de transmissão alcançada dentre todos os enlaces do caminho de rede medido. Este artigo analisa a eficácia das técnicas mais utilizadas para a estimativa desta métrica quando há no caminho medido pelo menos um enlace WiMAX. Para tal, ferramentas que usam o estado da arte das técnicas de estimativa de capacidade foram avaliadas em um ambiente experimental com enlace WiMAX. Os resultados obtidos demonstram que tais técnicas podem severamente falhar nas suas estimativas, especialmente se algumas propriedades específicas do padrão são conjuntamente habilitadas no enlace sem fio.

Abstract. The metric called “maximum transmission capacity of a path” represents the narrowest transmission rate available among all the links in a measured network path. This paper analyzes the effectiveness of some existing techniques for estimating this metric when applied to a path dotted by at least one WiMAX link. For the evaluation, we consider state-of-art techniques for capacity estimation applied to an experimental environment with a WiMAX link. Obtained results show that those techniques can fail severally in their estimates, especially if some specific properties of the standard are jointly enabled in the wireless link.

1. Introdução

O padrão IEEE 802.16 [IEEE Std 802.16-2003], também conhecido como WiMAX (do termo em inglês, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*), consiste numa especificação para redes sem fio em grandes áreas (*Wireless Metropolitan Area Network* - WMAN). Ele surge como uma solução para o problema de acesso banda larga sem fio de última milha, oferecendo conexão a provedores de serviço de comunicação através de ligações ponto-a-ponto ou ponto-multiponto para curtas e longas distâncias. Trata-se de um modelo de transmissão para enlaces sem fio, com ou sem mobilidade, para a conexão de residências, corporações e outros tipos de redes, sendo também utilizado como solução para enlaces de rádio ponto-a-ponto em redes de núcleo. Esta tecnologia permite o atendimento de uma grande quantidade de usuários e o fornecimento de

alguns dos principais requisitos para as aplicações atuais, tais como elevada largura de banda, maior segurança e garantias de qualidade de serviço. Comparada a outras tecnologias de acesso (fibra óptica, *cable-modem* ou linhas DSL), o padrão WiMAX pode ser uma alternativa de menor custo uma vez que não se torna necessária infraestrutura de cabeamento e sua característica de cobertura o torna, em alguns casos, uma solução mais rápida para a implantação de acesso banda larga em larga escala. Devido a estas facilidades, o WiMAX surge cada vez mais como uma alternativa para centros urbanos densamente povoados.

Conhecer as características de desempenho dos diversos caminhos de rede por onde trafegam os fluxos de dados pode ser fundamental para o desenvolvimento de mecanismos que possibilitem melhorar a qualidade do funcionamento de aplicações distribuídas. Medir tais características para os caminhos de rede é igualmente importante para as atividades de gerenciamento, como o diagnóstico de problemas de desempenho, a verificação de contratos de qualidade de serviço e o planejamento de capacidade. Dentre as medidas de desempenho mais relevantes, como perda, atraso e *jitter*, a capacidade de transmissão efetiva do caminho [Prasad 1997] é de especial importância para certas aplicações distribuídas, como no caso da seleção de *peers* em redes P2P. No entanto, existem alguns fatores importantes que devem ser considerados quanto à obtenção dessas medidas, tais como: (i) assumir a inexistência de ajuda dos equipamentos das redes ao longo do caminho, assim como o desconhecimento das características dos enlaces e da topologia; (ii) utilizar o mínimo de tráfego e processamento adicional para a obtenção das medidas (i.e., ter um baixo custo operacional); e (iii) haver rapidez na obtenção das características desejadas, de forma que a aplicação possa usufruir dos resultados.

O presente trabalho faz uma análise das técnicas mais utilizadas para estimativa da capacidade de transmissão efetiva em caminhos de rede que possuam um ou mais enlaces WiMAX. A capacidade de transmissão efetiva, também chamada de capacidade ou *throughput* máximo do caminho, representa a menor taxa de transmissão alcançável dentre todos os enlaces de um caminho de rede medido. A análise aqui apresentada permite avaliar o quão (in)eficaz é a estimativa de capacidade de alguns métodos considerados estado da arte, como o Pares de Pacotes e o Trens de Pacotes [Johnsson 2004], quando aplicados a caminhos com enlaces sem fio IEEE 802.16. Os resultados apresentados demonstram os problemas e limitações das técnicas utilizadas quando aplicadas a este cenário. No limite do nosso conhecimento, este é o primeiro trabalho que investiga a eficácia destas técnicas quando aplicadas a um caminho de rede que possua ao menos um enlace WiMAX e, como contribuição, são identificados os respectivos problemas ao se usar as ferramentas mais populares para estimativa de capacidade efetiva.

A continuação deste trabalho está organizada da seguinte forma: na Seção 2 é feita uma breve revisão do padrão IEEE 802.16; na Seção 3 são descritos os métodos tradicionais de pares de pacotes e trem de pacotes, além de alguns trabalhos relacionados aos problemas gerais do uso do mecanismo de pares (e trens) de pacotes para obtenção de medidas em enlaces sem fio; na Seção 4 é apresentado o ambiente desenvolvido e detalhes da avaliação experimental desenvolvida neste trabalho; a Seção 5 é dedicada à apresentação dos resultados obtidos; e, finalmente, na Seção 6 são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

2. O Padrão IEEE 802.16

Conforme descrito na introdução, o padrão IEEE 802.16 foi desenvolvido para o acesso a banda larga sem fio em regiões metropolitanas [IEEE Std 802.16-2003]. Para esta razão, a especificação da pilha de protocolos a divide em duas camadas: a camada física e a camada de acesso ao meio (MAC). A camada MAC, por sua vez, é dividida em três subcamadas: (i) a subcamada de segurança (*Privacy Sublayer*), (ii) a subcamada de convergência comum MAC (*MAC CPS – Common Part Sublayer*) e (iii) a subcamada de convergência de serviços específicos (*CS – Service Specific Convergence Sublayer*). A camada física define funções específicas de transmissão, como o tipo de modulação, a codificação e a faixa de frequência, enquanto que a camada MAC controla e distribui os recursos do espectro de frequência entre a estação base (*Base Station*, ou BS) e as estações clientes (*Subscriber Station*, ou SS).

Na camada física, o padrão IEEE 802.16 define o uso de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) como técnica de multiplexação, operando na faixa de 2 a 11 GHz. Para contornar problemas durante a transmissão do sinal (como ruído, interferência, desvanecimento ou perdas), o padrão prevê o uso de modulação adaptativa com o intuito de adequar a taxa de dados conforme as características do meio. Por exemplo, é possível usar a modulação 64 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) para transmissão de altas taxas, porém mais sensível a interferências, ou diminuir a taxa usando esquemas de modulação menos sensíveis, como a 16 QAM.

Duas importantes características da camada MAC, de caráter opcional, são as funções de Concatenação e Burst. Ambas têm como objetivo elevar o *throughput* da interface aérea do rádio. A função de Concatenação, quando habilitada, permite a junção do *payload* de vários quadros pequenos no *buffer* de transmissão num único quadro maior para transmissão via rádio, de acordo com um limite de tamanho máximo pré-estabelecido. O quadro concatenado, ao chegar no receptor, tem os *payloads* originais novamente restaurados para serem roteados. Além de aumentar o *throughput* devido à remoção do intervalo de tempo entre os quadros originais, chamado de intervalo de contenção, esta função também reduz o *overhead* pela eliminação dos cabeçalhos dos quadros originais, ficando apenas o do quadro resultante. Na BS, o processo de concatenação ocorre de forma separada e independente para cada SS de destino. A função Burst, quando habilitada, apenas minimiza o intervalo de contenção entre os quadros no *buffer* de transmissão ao serem enviados, fazendo com que os mesmos sejam transmitidos em rajada, praticamente sem intervalo de tempo entre eles. Esta função se aplica apenas a quadros *unicast* e é limitada pela configuração da duração máxima de rajada. Ambas as funções, Concatenação e Burst, podem ser simultaneamente ativadas.

A diferença básica entre rádios Pré-WiMAX e WiMAX é que o primeiro opera em frequências não licenciadas. Além disso, rádios Pré-WiMAX de alguns fabricantes não implementam algumas características optativas, como a correção de erros (FEC) e a confirmação (ACK). Neste artigo, foram utilizados rádios do tipo Pré-WiMAX.

3. Estimativa de Capacidade Máxima de Caminho

Diversos métodos foram propostos na literatura para a estimativa de métricas relacionadas com capacidade. Dentre os métodos mais conhecidos estão: (i) *One-packet*, implementado pelas ferramentas Pathchar e Clink, que tem como objetivo estimar a taxa

de transmissão de todos os enlaces presentes no caminho de rede medido [Downey 1999]; (ii) *Mult-packet*, uma variação da técnica One-packet desenvolvida por Lai e Baker em [Lai e Baker 2000], que também tem como finalidade estimar a capacidade de transmissão dos enlaces de um caminho; (iii) Pares de pacotes (ou *packet-pairs*), que é amplamente utilizado na literatura para estimar, dentre outras medidas, a capacidade de contenção (ou capacidade máxima de transmissão) do caminho, e é implementada em ferramentas como CapProbe [Kapoor 2004] e Tangram-II [Rocha 2009]; e, (iv) Trem de pacotes (ou *packet-train*), que é uma extensão da técnica de Pares de pacotes, desenvolvida por Dovrolis et al. em [Dovrolis 2001], e é utilizada por ferramentas como Pathrate e Pathload para medir, respectivamente, a capacidade de contenção e a largura de banda disponível em um caminho de rede [Jacob 2003].

Descrições mais detalhadas sobre o funcionamento de cada um dos métodos citados acima, assim como de algumas das métricas citadas, podem ser encontrados em diversos trabalhos da literatura (ver [Ziviani 2005]). O foco do presente trabalho será apenas para o método de pares de pacotes e para a sua variação, o método de trem de pacotes, pois são as técnicas apropriadas para a obtenção da medida de interesse avaliada neste trabalho: capacidade máxima de transmissão de um caminho de rede.

3.1. Pares de Pacotes

O método de pares de pacotes consiste na emissão de dois pacotes de mesmo tamanho e de uma mesma origem, separados por um intervalo de tempo bem próximo de zero. Os pacotes atravessam o mesmo caminho na rede até chegarem a um único destino, onde são coletados. A partir da coleta destes pacotes é possível identificar algumas características do caminho de rede atravessado pelo par, como a capacidade de contenção.

A suposição principal da técnica é que a dispersão entre os pacotes do par, identificada na coleta, é causada pela menor capacidade de transmissão ao longo do caminho (denominada, capacidade de contenção). Os pacotes, que são gerados de uma mesma origem e separados por intervalos de tempo bem próximos de zero, possuem o espaçamento entre eles mantido até que passem por um enlace com capacidade de transmissão inferior à do emissor. Essa dispersão, causada pelo tempo de transmissão deste enlace (superior aos tempos experimentados nos enlaces anteriores) é mantida até o destino dos pacotes, a menos que seja encontrado, ao longo do restante do caminho, outro enlace com uma capacidade ainda menor. Seja T o intervalo de tempo entre as chegadas dos dois pacotes dado em segundos, e seja B o tamanho dos pacotes dado em bits, capacidade de contenção $C = B/T$ bits/s.

Avaliações feitas do método de pares de pacotes, como os apresentados em [Dovrolis 2001, Carter 1996, Roesler 2003, Augusto 2003 e Rocha 2004], demonstram que uma situação de tráfego concorrente alto pode influenciar as estimativas e ocasionar erros nos resultados obtidos. A influência causada pelo tráfego concorrente pode ser caracterizada de duas formas: (i) a presença de pacotes em frente aos pares na fila dos roteadores, após já terem passado pelo nó de contenção do caminho, pode ocasionar uma redução na dispersão existente entre os pacotes. Como consequência, a capacidade de contenção é superestimada; (ii) a inserção de tráfego concorrente entre os dois

pacotes do par. Este evento pode resultar em um acréscimo da dispersão dos pacotes e causar uma estimativa inferior à capacidade real de transmissão do enlace de contenção.

Para reduzir a influência do tráfego concorrente, uma série de pares de pacotes pode ser utilizada e, então, gerado um histograma das capacidades estimadas por todos os pares. No caso, a capacidade de contenção estimada equivalerá àquela de maior frequência no histograma resultante. No entanto, avaliações apresentadas em [Rocha 2004] e em [Kapoor 2004] demonstram que, mesmo com o uso de diversos pares de pacotes, a precisão das medidas ainda sofre grande influência da condição da rede.

Em [Rocha 2004] é apresentada uma variação da técnica de pares de pacotes, na qual apenas pares selecionados são utilizados para computar a capacidade de contenção. A ferramenta CapProbe, apresentada em [Kapoor 2004], também propõe uma seleção dos pares de pacotes utilizados para computar a capacidade de contenção baseada no atraso sofrido por estas sondas. Uma diferença fundamental entre as duas técnicas é que a primeira refere-se à respectiva métrica de caminho em apenas um sentido, enquanto que a segunda mede a capacidade de contenção no caminho de ida-e-volta.

3.2. Trem de Pacotes

O método baseado em trens de pacotes é derivado da técnica de pares de pacotes. Ao invés de apenas sequências de pares, neste caso são usadas sequências com rajadas de pacotes. A idéia é enviar uma rajada de $L > 2$ pacotes, todos de tamanho igual a S , e determinar a dispersão na recepção desses pacotes. Essa dispersão, denotada por t , é determinada pelo intervalo de tempo entre o último bit do primeiro pacote e o último bit do último pacote.

A partir de uma sequência de pacotes coletados é possível determinar uma medida de taxa de dispersão assintótica. Denotada por R , essa taxa de dispersão assintótica é dada por $R = (L - 1) S / t$, onde L é o número de pacotes da rajada, S é o tamanho desses pacotes e t é o intervalo de tempo entre a chegada do primeiro e do último pacote do trem. Se a taxa de transmissão do trem de pacotes for superior à largura de banda disponível do caminho medido, então o valor dessa medida será equivalente ao valor computado pela taxa de dispersão assintótica. No entanto, se a taxa de transmissão do trem de pacotes for inferior à largura de banda disponível, então a medida obtida refere-se à capacidade de contenção do caminho medido.

Comparada à técnica de pares de pacotes, a técnica de trem de pacotes é mais robusta e menos sensível a erros. No entanto, ela é mais intrusiva, pois exige uma quantidade maior de pacotes a serem enviados pela rede. Além disso, a precisão da métrica ainda é influenciada pelo tráfego concorrente existente no caminho medido. Esta técnica é utilizada por ferramentas como Pathload e Pathrate [Jacobson 1999] para estimar, respectivamente, as métricas largura de banda disponível e capacidade de contenção.

3.3. Problemas com a Técnica de Pares de Pacotes no Padrão 802.16

Em trabalhos anteriores já foram utilizadas técnicas de medições com pares de pacotes para estimar algumas métricas relacionadas a capacidades em caminhos onde existem enlaces sem fio. Por exemplo, em [Kapor 2004] foram executadas medições para estimar a capacidade de contenção de caminho nas quais o enlace de menor

capacidade estava numa rede local sem fio. Já em [Rocha 2007], foi apresentada uma técnica para estimar a taxa de transmissão em uma rede local sem fio.

Apesar da existência de trabalhos na literatura relacionados à medição de capacidade de enlaces sem fio, ainda pouco se conhece do desempenho destas técnicas em redes com enlaces de tipo WiMAX. Para isto, alguns aspectos relacionados com características próprias do padrão 802.16 devem ser considerados para a estimativa de métricas de capacidade.

As funcionalidades de Concatenação e Burst da camada MAC do padrão IEEE 802.16, geralmente ativadas por *default* em rádios WiMAX e pré-WiMAX por elevarem o *throughput*, podem interferir severamente em estimativas de capacidade máxima de caminho que usem a técnica de pares de pacotes. Isto ocorre porque tais funcionalidades acabam por eliminar o intervalo de contenção entre alguns quadros transmitidos, de acordo com o distanciamento no tempo e tamanho dos mesmos. Caso isto ocorra com o intervalo entre dois pacotes de medição (por exemplo, um par de pacotes de sonda), elimina-se a dispersão de tempo entre os quadros que até então caracterizaria a menor capacidade encontrada no caminho.

A concatenação tem influência sobre quadros de tamanho pequeno no *buffer* de transmissão, uma vez que estes conseguem ser concatenados em quadros maiores e enviados pelo meio sem que haja intervalo de tempo entre eles. Conforme já mencionado, o tamanho de um quadro concatenado (ou seja, resultante de concatenação) é limitado a um valor máximo, que pode ser configurável ou definido pelo fabricante do rádio. O Burst tem o mesmo tipo de influência, independente do tamanho do quadro, uma vez que remove os intervalos de contenção entre todos os quadros no *buffer* de transmissão que conseguem ser enviados até um tempo limite, denominado duração máxima da rajada. Este parâmetro é configurável e pode assumir valores que geralmente são múltiplos de 1 ms até um limite máximo.

Para quaisquer dessas funções que estejam ativadas, juntas ou não, a consequência para uma sequência de pacotes de medição que se enquadre nas situações descritas é um aumento no valor estimado pela técnica de pares de pacotes, ou mesmo pela de trem de pacotes.

4. Avaliação Experimental

De maneira a possibilitar uma avaliação experimental das limitações impostas pelo padrão IEEE 802.16 para a estimativa de capacidade máxima de caminho, foi montado um cenário contendo um enlace de rádio WiMAX interconectando duas redes. Apesar de se tratar de uma topologia ponto-a-ponto, os rádios se comportavam como se estivessem numa topologia ponto-multiponto, com BS e SS operando em modo *half-duplex* usando TDD (*Time Division Duplexing*).

4.1. Especificações

Foram usados dois rádios pré-WiMAX BreezeAccess VL do fabricante Alvarion, sendo o modelo AU-E-AS-5.8VL usado para estação base (BS) e o modelo SU-A-5.8-24BD-VL para estação do assinante (SS). Ambos suportam uma taxa de transmissão no nível físico de até 54 Mbps na faixa de frequência de 5.8GHz. O software de gerência proprietário da Alvarion, chamado BreezeConfig [Breeze 2010],

foi utilizado na configuração e no monitoramento da quantidade de pacotes que atravessam o enlace. Os rádios foram colocados em ambiente fechado e foram usadas antenas direcionais dispostas em linha de visada, com uma distância de 4 metros entre elas. A potência dos rádios foi regulada de maneira a evitar problemas com reflexão e a modulação adaptativa foi desabilitada (fixada em 64 QAM) para evitar mudanças de capacidade durante os experimentos.

O cenário de experimentação usado é mostrado na Figura 1. Dois computadores foram ligados nas portas Ethernet de cada rádio, totalizando quatro. Um computador servia para alteração de configuração dos rádios e verificação dos contadores de pacotes no enlace sem fio, através do BreezeConfig. No segundo computador foram colocadas as ferramentas usadas para a estimativa de capacidade.

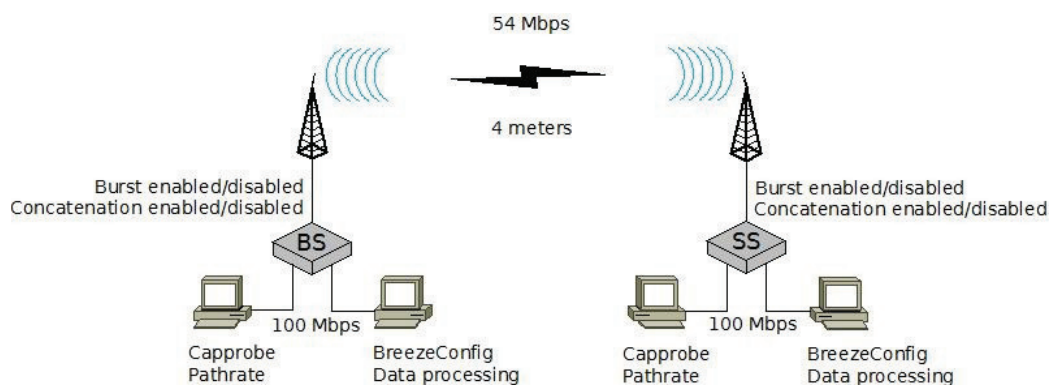


Figura 1. Cenário dos experimentos

4.2. Ferramentas Usadas

Para se obter a estimativa de capacidade máxima de caminho e avaliar o uso da técnica de pares de pacotes em redes com enlaces IEEE 802.16, foram utilizadas as ferramentas Pathrate [Jacobson 1999] e CapProbe [Kapoor 2004]. Ambas as ferramentas são amplamente conhecidas e baseadas no uso de pares de pacotes, porém cada qual com uma abordagem diferente.

O funcionamento do Pathrate pode ser dividido em três fases distintas. Na primeira, ele detecta o maior tamanho que um trem de pacotes pode ter de forma a ser transferido sem perdas. O coeficiente de variação da dispersão entre os pares de pacotes é medido e, se este valor for menor que um dado limiar, o Pathrate termina a primeira fase já com o resultado final. Quando isto não ocorre, o Pathrate entra na segunda fase e envia 1000 pares de pacotes com tamanhos variados, entre 550 bytes e o maior MTU encontrado na fase inicial. Ao final da segunda fase, as estimativas de capacidade obtidas são agrupadas em faixas para que, na terceira e última fase, o Pathrate realize uma análise estatística e envie 500 trens de pacotes com o máximo MTU encontrado e o maior número de pacotes possíveis em cada trem. O Pathrate fornece a estimativa de capacidade máxima após o término da terceira fase, indicando uma faixa de valores para esta medida.

Diferentemente do Pathrate, que usa uma abordagem cliente-servidor para realizar estimativas unidirecionais, o CapProbe é uma ferramenta não-cooperativa que se vale de *echo requests* e *responses* do ICMP, direcionados a um IP de destino, para

enviar pares de pacotes e monitorar a dispersão de ida e volta no caminho. Isto significa que o CapProbe fornece estimativas bidirecionais, informando a menor capacidade “unidirecional” dentre todas ao longo do caminho de ida e volta. De maneira a evitar distorções na medida causadas pela presença de tráfego cruzado e enfileiramentos ao longo do caminho (ida e volta), o CapProbe monitora os atrasos dos pacotes e usa o chamado *minimum delay sum*, que é a menor soma dos atrasos dos pacotes de um par, para selecionar o par que não sofreu ou que menos sofreu influência de tráfego cruzado. A dispersão deste par é então usada para a estimativa de capacidade.

4.3. Influência da subcamada MAC CPS nos Resultados das Ferramentas

Conforme mostrado a seguir na Seção 5, os resultados do Pathrate sofrem influência da função Concatenação, que costuma ser habilitada por *default* em rádios WiMAX ou Pré-WiMAX. Isto ocorre devido aos trens de pacotes de tamanho pequeno que o Pathrate gera durante sua fase inicial. A função Burst, que também costuma ser habilitada por *default*, pode também prejudicar a medição caso haja um enlace 802.16 após o ponto de “gargalo” no caminho com tenha esta função ativada. Dependendo do tamanho dos trens de pacotes enviados, as dispersões causadas pelo enlace de menor capacidade podem ser removidas ao passar pelo enlace 802.16.

O tamanho dos pacotes de medição usados pelo CapProbe é parametrizado pelo usuário, mantendo-se o mesmo até o final de sua execução. Dependendo do valor usado, os pares de pacotes poderão ou não sofrer influência da Concatenação habilitada em um rádio 802.16 no caminho. No caso da função Burst estar habilitada, esta quase sempre afetará a estimativa do CapProbe. Isto ocorre por conta da assimetria inerente a estes enlaces e pela característica bidirecional das medidas extraídas. Caso o sentido de “ida” tenha uma capacidade de contenção menor que o sentido de “volta”, e caso o Burst esteja ativado em um rádio WiMAX no sentido de “volta”, a capacidade registrada pela dispersão dos pacotes na ida será removida.

Devido às características do cenário usado neste trabalho para avaliação experimental, que tem apenas um salto entre rádios, e pelo aspecto unidirecional da medida realizada pelo Pathrate, apenas a influência da Concatenação foi comprovada para esta ferramenta. Já para as estimativas obtidas pelo CapProbe, tanto a influência da Concatenação como a do Burst foram verificadas nos experimentos.

Nos rádios usados no experimento, o tamanho máximo do quadro concatenado foi igual a 2200 bytes e a duração máxima da rajada foi igual a 5 ms, sendo ambos valores *default*.

4.4. Procedimentos Usados nos Experimentos

De acordo com o fabricante [Breeze 2010], as taxas médias de *throughput* variam conforme o sentido e a modulação usada. Além disso, caso as funções de Concatenação e/ou Burst estejam desativadas, a capacidade do enlace pode ser reduzida em até 10% no respectivo sentido. As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores de capacidade, conforme sentido e configuração dos rádios, para a modulação de nível oito, que é a que permite maiores taxas. Estes valores foram usados como referência para validar os resultados obtidos com o Pathrate e o CapProbe. Vale notar que, apesar da capacidade de

transmissão na camada física ser de 54 Mbps, a capacidade efetiva de transmissão é substancialmente inferior devido às características de controle da camada MAC.

Tabela 1 - Capacidades esperadas no sentido BS para SS

Configuração	Vazão Média
Default	31,1 Mbps
Burst e/ou Concatenação desativados no BS	28 – 31,1Mbps

Tabela 2 - Capacidades esperadas no sentido SS para BS

Configuração	Vazão Média
Default	26,4 Mbps
Burst e/ou Concatenação desativados no BS	23,7 – 26,4 Mbps

Em linhas gerais, o procedimento adotado nos experimentos se consistiu da aplicação das ferramentas citadas para estimar as capacidades do enlace de rádio montado, e da comparação dos valores obtidos com os valores de *throughput* médio fornecidos pelo fabricante. As medidas para cada ferramenta foram extraídas nas duas direções possíveis: com sondas partindo do lado do BS para o lado SS e vice-versa. Para cada direção, foram variadas as configurações de Burst e Concatenação dos rádios.

No caso do Pathrate, por se tratar de uma estimativa unidirecional, apenas as funcionalidades de Burst e Concatenação do rádio no lado de onde partia as sondas foram variadas. Já no caso do CapProbe, pelas medições serem bidirecionais, para cada direção testada variou-se as funcionalidades de cada rádio separadamente. O tamanho dos pacotes usados pelo CapProbe assumiu valores de 500 e 1500 bytes em experimentos distintos.

5. Resultados

Os itens a seguir mostram uma comparação entre os valores obtidos pelas ferramentas e aqueles informados pelo fabricante, de acordo com a configuração usada para cada experimento. Todas as capacidades estão em Mbps.

5.1. Influência do Burst e da Concatenação nos Resultados do CapProbe

Conforme mencionado na Seção 4.3, a avaliação das estimativas do CapProbe deve considerar o ponto onde os pacotes de medição foram disparados: lado BS ou lado SS. Portanto, os resultados foram agrupados em função deste fator. No que diz respeito aos valores obtidos, como a ferramenta também fornece todas as dispersões medidas para cada par de pacotes enviado, foram também computadas a média, a mediana e a moda amostral destas dispersões, para cada experimento, assim como o desvio-padrão.

Vale observar que, idealmente, no cenário usado, o CapProbe deveria sempre indicar a menor capacidade no caminho de ida e volta, que é sempre a capacidade no sentido SS para BS. Entretanto, dada a influência da função Burst quando habilitada no BS, se pares de pacotes forem enviados a partir do lado SS com destino no lado BS, o CapProbe irá medir a capacidade no sentido de volta (BS para SS) devido à remoção da dispersão na BS.

As Tabelas 3, 4, 5 e 6 trazem os resultados obtidos para os experimentos com CapProbe. Cada tabela agrupa os experimentos realizados com um tamanho específico de pacote, 500 ou 1500 bytes, com pares de pacotes disparados de um lado específico (BS ou SS). Cada linha nas tabelas mostra os resultados para uma dada configuração em cada rádio, sendo que a primeira linha sempre traz os resultados para a configuração *default*, ou seja, Burst e Concatenação ativos em ambos os rádios (BS e SS). As demais linhas mostram as modificações em relação ao *default*: (i) Burst desabilitado na BS; (ii) Burst desabilitado na SS; (iii) Concatenação desabilitada em ambos os rádios; e (iv) Burst e Concatenação desabilitados em ambos os rádios. Para cada configuração, é mostrado nas colunas: o valor esperado conforme informação do fabricante, o valor fornecido pelo *minimum delay sum* (MDS) usado no CapProbe, a mediana, a média, a moda e o desvio-padrão das capacidades extraídas para cada par de pacotes enviado. O número de pares de pacotes enviado em cada experimento variou de 200 a 300.

5.1.1. Estimativas a partir do lado BS

As Tabelas 3 e 4 apresentam um quadro comparativo para os valores obtidos pelo CapProbe, nas diferentes configurações, para pacotes de medição com tamanhos de 500 e 1500 bytes, respectivamente, quando disparados a partir do computador ligado à BS. As capacidades expressas nas tabelas estão em Mbps.

Os valores informados pelo fabricante para a capacidade efetiva foram usados como referência, porém também foram consideradas as configuração de Burst no lado SS para identificar qual resultado o CapProbe deveria fornecer. No caso, a eliminação da dispersão dos pacotes pela SS não impacta a estimativa, já que o enlace de volta é o de menor valor. A faixa de valores de 23,7 a 26,4 Mbps está de acordo com as informações da Tabela 2.

Tabela 3 - CapProbe sentido BS-SS com pacotes de 500 bytes

Configuração	Referência	MDS	Mediana	Média	Moda	Desvio
Default	26.4	235	250	251.5	250	8.430
Burst desab. (BS)	26.4	38	38	37.7	38	2.897
Burst desab. (SS)	23.7 – 26.4	42	27	28	32	5.410
Concat. desab. (BS e SS)	23.7 – 26.4	26.2	26	26.3	26	1.740
Ambos desab. (BS e SS)	23.7 – 26.4	25.2	25	26.4	27	5.380

Pelos resultados da Tabela 3, é possível verificar o impacto negativo causado pela Concatenação quando se usa pacotes de medição com tamanho de 500 bytes. No caso de configuração *default*, com Burst e Concatenação habilitados nos rádios, a estimativa do CapProbe falhou de forma muito acentuada. Entretanto, ao se retirar a Concatenação dos rádios, o CapProbe foi capaz de fornecer uma estimativa dentro do esperado, medida esta que foi muito próxima da média, da mediana e da moda das amostras de dispersão. O Burst habilitado no SS não provoca erro na medida esperada uma vez que o enlace de menor capacidade é o do sentido de volta (SS-BS).

Já nos resultados da Tabela 4, é possível verificar que a Concatenação não surte o mesmo efeito negativo para as estimativas quando os pacotes de medição têm tamanho de 1500 bytes. Isto porque a concatenação de pacotes de 1500 bytes resultaria

num quadro concatenado que ultrapassaria o tamanho máximo permitido (2200 bytes, conforme consta na Seção 4.3), o que faz com que eles não sejam concatenados. Em todos estes casos, o CapProbe foi capaz de fornecer estimativas próximas dos valores esperados (valores nominais). Entretanto, é possível verificar que os valores obtidos para a média, a moda e, em especial, a mediana se aproximaram melhor do que o resultado final do CapProbe.

Tabela 4 - CapProbe sentido BS-SS com pacotes de 1500 bytes

Configuração	Referência	MDS	Mediana	Média	Moda	Desvio
Default	26.4	24.3	25	23.8	26	2.458
Burst desab. (BS)	26.4	31.2	27	28.8	26	2.179
Burst desab. (SS)	23.7 – 26.4	29.8	26	26.3	25	2.514
Concat. desab. (BS e SS)	23.7 – 26.4	26.3	26	26.4	26	2.470
Ambos desab. (BS e SS)	23.7 – 26.4	25.9	26	26.6	29	2.893

5.1.2. Estimativas a partir do lado SS

Assim como para as duas tabelas anteriores, as Tabelas 5 e 6 apresentam um quadro comparativo para os valores obtidos pelo CapProbe com pacotes de medição possuindo 500 e 1500 bytes de tamanho, respectivamente, quando disparados a partir do computador ligado à SS. As capacidades expressas nas tabelas estão em Mbps.

Os valores mostrados na coluna *Referência*, assim como nas Tabelas 3 e 4, consideraram a situação configurada no sentido de volta dos pacotes de medição, ou seja, o lado da BS. Sempre que houver eliminação das dispersões na BS, a capacidade medida será a do sentido BS para SS. Desta forma, sempre que o Burst estiver desativado, a capacidade estimada deverá ser de fato a do sentido SS para BS, que é a de menor valor. Por outro lado, se o Burst estiver habilitado, espera-se que a capacidade estimada seja a do sentido BS para SS. Os valores para as capacidades efetivas de referência estão de acordo com a Tabela 1.

Tabela 5 - CapProbe sentido SS-BS com pacotes de 500 bytes

Configuração	Referência	MDS	Mediana	Média	Moda	Desvio
Default	31.1	41	41	41.2	41	1,074
Burst desab. (BS)	26.4	42	42	41.8	42	0,478
Burst desab. (SS)	28.0 – 31.1	42	42	41.9	42	1,362
Concat. desab. (BS e SS)	28.0 – 31.1	29.4	29.4	29.4	29.4	2,126
Ambos desab. (BS e SS)	23.7 – 26.4	23.8	23	23.4	22	1,820

Pelos resultados da Tabela 5, é possível novamente verificar o impacto negativo causado pela Concatenação quando os pacotes de medição possuem tamanho igual a 500 bytes. Entretanto, o erro introduzido não é tão acentuado quanto o mostrado na Tabela 3. Apenas quando a Concatenação é desligada que o CapProbe torna-se capaz de fornecer uma estimativa dentro dos valores esperados. Nestes casos, a mediana, a média e a moda apresentaram valores muito próximos.

A explicação para a diferença entre os erros mostrados nas Tabelas 3 e 5, causados pela ação conjunta de Burst e Concatenação habilitados no sentido de volta, reside nos tempos que a SS e a BS levam para transmitir os quadros. Como a SS precisa efetuar a reserva de capacidade, e a BS não, os quadros levam mais tempo no *buffer* de transmissão da SS aguardando a liberação do meio. Conseqüentemente, mais quadros são enfileirados e, portanto, mais quadros são concatenados e enviados em rajada, causando um erro maior na dispersão medida.

Tabela 6 - CapProbe sentido SS-BS com pacotes de 1500 bytes

Configuração	Referência	MDS	Mediana	Média	Moda	Desvio
Default	31.1	29.4	30	29.2	30	1,747
Burst desab. (BS)	26.4	29.2	27	28	27	2,707
Burst desab. (SS)	28.0 – 31.1	24.9	30	28.4	31	3,130
Concat. desab. (BS e SS)	28.0 – 31.1	29.4	31	32.5	31	4,424
Ambos desab. (BS e SS)	23.7 – 26.4	24.7	30	31.2	27	6,163

Os resultados da Tabela 6 mostram que, conforme esperado, para pacotes de medição com tamanho igual a 1500 bytes a Concatenação não impacta na estimativa de capacidade. O CapProbe foi capaz de fornecer estimativas próximas do esperado em todos os casos, entretanto, as modas obtidas das amostras de dispersão se aproximaram melhor dos valores esperados.

Os resultados apresentados pelas Tabelas 4 e 6 sugerem que a técnica estatística usada pelo CapProbe pode não ser a mais adequada para casos de caminhos contendo enlaces no padrão IEEE 802.16, haja visto que medidas estatísticas simples extraídas a partir das amostras de dispersão, como a moda ou a média, apresentaram resultados mais próximos do esperado.

Conforme mencionado anteriormente, vale notar que os valores de referência informados não necessariamente são os valores que deveriam ser corretamente estimados como capacidade de contenção. No ambiente testado, considerando-se uma avaliação bidirecional, este valor deveria ser sempre a capacidade no sentido SS para BS. De forma resumida, isto significa que o Burst, quando habilitado na BS, sempre causará erro nesta medida caso os pacotes de medição sejam disparados do lado SS.

5.2. Influência do Burst e da Concatenação nos Resultados do Pathrate

No caso do Pathrate, como as estimativas são unidirecionais, as configurações do rádio do lado receptor não influenciam as medidas e, diferente do CapProbe, a ferramenta não provê controle do tamanho dos pacotes enviados. Portanto, os resultados foram agrupados em apenas duas tabelas. A Tabela 7 apresenta um quadro comparativo dos resultados relativos a pacotes de medição partindo do lado BS. A Tabela 8 apresenta o mesmo quadro, porém relativo a pacotes de medição partindo do lado SS. As capacidades expressas nas tabelas estão em Mbps.

Os resultados observados nas Tabelas 7 e 8 comprovam que as estimativas do Pathrate falham sempre que a Concatenação está ativa no lado cliente da ferramenta. No caso do cenário experimental usado, a configuração de Burst no lado cliente em nada afeta as estimativas. Todavia, num caso genérico de caminho com diversos enlaces,

sendo um deles no padrão IEEE 802.16, a presença de Burst neste enlace pode remover a informação de “gargalo” obtida num salto anterior através da dispersão dos pares de pacotes.

Tabela 7 - Pathrate sentido BS - SS

Configuração	Referência	Pathrate
Default	31,1	38 – 39
Burst desabilitado	28 – 31,1	35 – 39
Concatenação desabilitada	28 – 31,1	29 – 29
Ambos desabilitados	28 – 31,1	28 – 29

Tabela 8 - Pathrate sentido SS - BS

Situação	Referência	Pathrate
Default	26,4	30 – 30
Burst desabilitado	23,7 – 26,4	28 – 29
Concatenação desabilitada	23,7 – 26,4	25 – 27
Ambos desabilitados	23,7 – 26,4	24 – 26

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi possível verificar a imprecisão de métodos considerados estado da arte para estimativa de capacidade quando aplicados a caminhos com enlaces sem fio IEEE 802.16. No caso, os métodos verificados foram baseados na técnica de Pares de Pacotes. Sempre que determinadas características opcionais da camada MAC estão habilitadas, especificamente Concatenação e Burst, o intervalo de contenção entre pacotes é removido fazendo com que a dispersão inserida pelos canais de menor capacidade nas sondas enviadas seja perdida. A Concatenação atua sobre pacotes de tamanho menor, enquanto que o Burst atua sobre pacotes que chegam dentro de um período de tempo configurável chamado duração máxima da rajada.

Um cenário de experimentação usando dois rádios Pré-WiMAX foi montado para verificar as limitações das ferramentas usadas para estimativa de capacidade. Os resultados apresentados comprovam a influência do Burst e da Concatenação no resultado das ferramentas Pathrate e CapProbe, mostrando como as mesmas falham mediante determinadas configurações de enlaces 802.16 no caminho.

Como perspectiva de trabalhos futuros, pretende-se investigar a adoção de determinados parâmetros para o método de trem de pacotes e de pares de pacotes de maneira a torná-los mais imunes às características de Burst e Concatenação dos enlaces 802.16, normalmente habilitadas por *default* nos rádios WiMAX e Pré-WiMAX.

Referências

Augusto, M.; Murta, C. (2003) *Avaliação Experimental de Ferramentas para Medição de Capacidade em Redes de Computadores*. Anais do SBC WPerformance.

Breeze (2010) *Manual do radio Alvarion BreezeConfig for BreezeACCESS VL versão 4.5.0.9*

- Carter, R., Crovella, M. (1996) *Measuring Bottleneck Link Speed in Packet Switched Networks*. ACM Performance Evaluation, Volume 27-28.
- Dovrolis, C., Ramanathan, P., Moore D. (2001) *What do packet dispersion technique measure*. Proceeding of IEEE INFOCOM.
- Downey, A. (1999) *Using Pathchar to Estimate Internet Link Characteristics*. ACM SIGCOMM.
- 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.
- Jacob, S., Katabi, D., Kaashoek, F. (2003) *A Measurement Study of Available Bandwidth Estimation* - Proceedings of the ACM IMC '03.
- Jacobson V. (1999) *Pathchar: A Tool to Infer Characteristics of Internet Paths*. Proceedings of the ACM SIGCOMM '99.
- Johnsson, A. (2004) *On the Comparison of Packet Pair and Packet Train Measurement*. Swedish National Computer Networking Workshop, Arlandastad.
- Kapoor, R., et al. (2004) *Capprobe: A Simple and Accurate Capacity Estimation Technique*. Proceedings of the ACM SIGCOMM.
- Lai, D.; Baker, M. (1999) *Measuring bandwidth*. Proceedings of the IEEE INFOCOM.
- Prasad, R.; Dovrolis, C.; Nurray M. (1997) *Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques and Tools*, IEEE Network.
- Rocha, A. A. A., Leão., R. M. M., Silva E. S. (2004) *Proposta de uma técnica de seleção dos pares de pacotes para estimar a capacidade de contenção*. Anais do SBC WPerformance.
- Rocha, A. A. A., Leão., R. M. M., Silva E. S. (2007) *An End-to-End Technique to Estimate the Transmission Rate of IEEE 802.11 WLAN*. Proceedings of the IEEE ICC.
- Rocha, A., et al. (2009) *Novas evoluções integradas à ferramenta Tangram-II v3.1*. Anais do SBRC (Salão de ferramentas).
- Roesler. V., Finzsch. P., Andrade. M., Lima. J. V. (2007) *Análise do mecanismo de pares de pacotes visando estimar a banda da rede via UDP*. Anais do SBRC.
- So-In, C., Jain, R., Tamimi, A. A. (2009) *Capacity Estimation of IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks*
- Ziviani, A.; Duarte, O. (2005) *Metrologia na Internet*, Anais de Minicursos SBRC.