



Pós-Graduação em Ciência da Computação

Diego Cananéa Nóbrega de Azevedo

**ESTIMAÇÃO DE BANDA DISPONÍVEL EM REDES SEM FIO
PADRÃO IEEE 802.11N: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL SOBRE OS
EFEITOS DE SEUS NOVOS MECANISMOS EM TÉCNICAS ATIVAS.**

Dissertação de Mestrado



Universidade Federal de Pernambuco
posgraduacao@cin.ufpe.br
www.cin.ufpe.br/~posgraduacao

RECIFE
2016

Diego Cananéa Nóbrega de Azevedo

**ESTIMAÇÃO DE BANDA DISPONÍVEL EM REDES SEM FIO
PADRÃO IEEE 802.11N: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL SOBRE OS
EFEITOS DE SEUS NOVOS MECANISMOS EM TÉCNICAS ATIVAS.**

*Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em
Ciência da Computação do Centro de Informática da Univer-
sidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.*

Orientador: Stênio Flávio de Lacerda Fernandes

RECIFE
2016

Catálogo na fonte
Bibliotecário Jefferson Luiz Alves Nazareno CRB 4-1758

A994e Azevedo, Diego Cananéa Nóbrega de.
Estimação de banda disponível em redes sem fio padrão IEEE 802.11N: uma análise experimental sobre os efeitos de seus novos mecanismos em técnicas ativas / Diego Cananéa Nóbrega de Azevedo – 2016.
65f.: fig., tab.

Orientador: Stênio Flávio de Lacerda Fernandes.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Cln. Ciência da Computação, Recife, 2016.
Inclui referências.

1. Redes de computadores 2. Redes locais sem fio. 3. Análise de desempenho. I. Fernandes, Stênio Flávio de Lacerda. (Orientador). II. Título.

004.68 CDD (22. ed.) UFPE-MEI 2016-167

Diego Cananea Nóbrega de Azevedo

**Estimação de Banda Disponível em Redes sem Fio Padrão IEEE
802.11n: Uma Análise Experimental sobre os Efeitos de seus Novos
Mecanismos em Técnicas Ativas**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação

Aprovado em: 08/09/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Kelvin Lopes Dias
Centro de Informática/UFPE

Prof. Dr. Glauco Estácio Gonçalves
Departamento de Estatística e Informática / UFRPE

Prof. Dr. Stênio Flávio de Lacerda Fernandes
Centro de Informática / UFPE
(Orientador)

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por todas as graças alcançadas, e a minha família, em especial a minha esposa Naiara, que tanto me deu força para chegar até aqui.

Agradecimentos

Participar do mestrado em Ciência da Computação do CIn/UFPE é muito gratificante e foi um tempo de grande aprendizado para mim. Agradeço profundamente ao meu orientador Stênio Fernandes pelas oportunidades e orientações durante o curso. Agradeço também ao meu amigo Leonidas Francisco de Lima Junior, doutorando do CIn/UFPE, que tanto me ajudou na caminhada, seja nos estudos das disciplinas e neste projeto ou nas viagens entre João Pessoa e Recife todas as semanas.

Agradeço a minha esposa pelo apoio incondicional, paciência e incentivos nas horas mais difíceis, sobre as quais posso garantir que se não fosse por ela, talvez não estivesse com este trabalho concluído. Minha gratidão também a minha família, por entender as ausências nas visitas semanais. Vocês são uma importante base para mim.

Por fim, agradeço aos meus colegas de trabalho, Renato Saltão e Fábio Alencar, que tanto me ouviram falar dos meus estudos, me dando força e ajudando com opiniões. Agradeço ao meu gerente de setor Henrique Porto, pois sem seu apoio não conseguiria participar deste curso de mestrado, sua paciência e incentivos foram fundamentais para que eu concluísse esta etapa.

É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os probres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem a vitória, nem derrota.

—THEODORE ROOSEVELT

Resumo

A estimação da capacidade e da banda disponível em redes têm sido objeto de diversas pesquisas nos últimos anos, principalmente por causa da evolução das tecnologias e crescimento do uso da Internet. Tais técnicas são de grande importância para que seja possível fazer um melhor aproveitamento da transmissão dos dados, evitando tanto a subutilização quanto o esgotamento de recursos. Existem inúmeros usos para as técnicas de estimação de banda, dentre as quais podemos citar *streaming* multimídia, aplicações *peer-to-peer*, protocolos de roteamento baseados na banda disponível, qualidade de serviço, protocolos de transporte fim a fim, entre outros. Com o interesse cada vez maior nestes tipos de aplicações, principalmente na transmissão de vídeo e áudio, a estimação de banda tem sido de bastante interesse para pesquisadores. A estimação de banda disponível em redes sem fio por si só já é um desafio para os pesquisadores e o novo padrão IEEE 802.11n trouxe novos mecanismos para otimizar a transmissão dos dados, alcançando assim maiores taxas. Porém, tais fatores contribuem para que as técnicas hoje existentes encontrem problemas ao tentarem estimar a banda disponível, causando assim resultados que deixam a desejar. Esta pesquisa demonstra experimentalmente a influência dos novos fatores adicionados pelo novo padrão, como a agregação de quadros e de canais, em técnicas ativas de estimação de banda disponível. É possível verificar, então, que todas tem sua acurácia diminuída, causando erros de estimativas. Verificamos que mesmo no cenário mais simples, onde os novos fatores são desativados, boa parte dos métodos analisados obtiveram uma performance aquém do esperado, corroborando com a afirmação de que o ambiente de redes sem fio é um grande desafio para o desenvolvimento deste tipo de técnica. A técnica de estimação YAZ se mostrou mais robusta que as demais, aproximando-se dos valores de referência em quase todos os cenários propostos, com exceção para a agregação de quadros. Em uma análise mais específica de seu algoritmo, podemos demonstrar o porquê do erro no resultado da estimação de banda disponível neste contexto.

Palavras-chave: Redes sem fio. 802.11. Estimação de banda. Banda disponível. Capacidade da rede. Técnicas Ativas. Probe Gap Model. Probe Rate Model.

Abstract

The estimation of capacity and available bandwidth in computer networks have been the subject of several studies in recent years, mainly because of changing technologies and increasing use of the Internet. Such techniques are of great importance to be able to make better use of data transmission, avoiding both underuse as resource depletion. There are numerous uses for bandwidth estimation techniques, among which we can mention textit stream multimedia applications textit peer-to-peer, routing protocols based on available bandwidth, quality of service, end to end transport protocols, among others. With the growing interest in these types of applications, especially in video and audio transmission, bandwidth estimation has been of great interest to researchers. The estimation of available bandwidth in wireless networks is itself a challenge for researchers and the new IEEE 802.11n standard has brought new mechanisms to optimize the transmission of data, thus achieving higher rates. However, these factors contribute to that existing techniques encounter problems when trying to estimate the available bandwidth, thus causing results that fall short. This research experimentally demonstrates the influence of new factors added by the new standard, such as frame aggregation and channels in active techniques for available bandwidth estimation. It's possible see, then, that all has its diminished accuracy, causing estimation errors. We found that even in the simplest scenario, where new factors are disabled, most of the methods discussed perform so below expectations, supporting the claim that the wireless network environment is a major challenge for the development of this type of technique . The YAZ estimation technique was more robust than the others, approaching the reference values in almost all proposed scenarios, except for the frame aggregation. In a more specific analysis of their algorithm, we can demonstrate why the error in the result of the available bandwidth estimation occurs in this context.

Keywords: Wireless Networks. 802.11. Available Bandwidth. Bandwidth Estimation. Network Capacity. Active Techniques. Probe Gap Model. Probe Rate Model.

Lista de Figuras

2.1	Funcionamento do sistema CSMA/CA	24
2.2	Esquema de agregação com A-MSDU e A-MPDU	26
3.1	Topologia de rede do nosso experimento	37
4.1	Estimação de banda para o cenário de referência	42
4.2	Raiz do erro quadrático médio para o cenário de referência	43
4.3	Impacto da agregação de canais na estimação.	44
4.4	Impacto da agregação de canais na estimação - RMSE.	45
4.5	Estimação de banda com a compatibilidade ativada (a)	46
4.6	Estimação de banda com a compatibilidade ativada (b)	46
4.7	Raiz do erro quadrático médio com a compatibilidade ativada (a)	47
4.8	Raiz do erro quadrático médio com a compatibilidade ativada (b)	47
4.9	Estimação de banda com agregação de quadros (a)	48
4.10	Estimação de banda com agregação de quadros (b)	49
4.11	Raiz do erro quadrático médio com agregação de quadros (a)	49
4.12	Raiz do erro quadrático médio com agregação de quadros (b)	50
4.13	Influência do tráfego concorrente no cenário de referência.	51
4.14	Influência do tráfego concorrente no cenário da agregação de quadros.	52
4.15	Influência do número de pacotes do YAZ em suas estimções no cenário da agregação de quadros.	53
4.16	Influência do limiar ζ do YAZ em suas estimções no cenário da agregação de quadros.	54
4.17	Relação entre g_{in} e g_{out} nos contextos com e sem agregação	55
4.18	Valor do limiar ζ nos contextos com e sem agregação	56
4.19	Espaços individuais dos pacotes pertencentes a um trem mensurados no destino pelo YAZ.	57

Lista de Tabelas

2.1	Padrões IEEE 802.11 para redes WLAN.	21
3.1	Sumário dos fatores e níveis. *Em relação à capacidade de transmissão do enlace sem fio.	38
3.2	Resumo dos detalhes sobre os equipamentos.	39
3.3	Softwares e versões utilizadas no experimento.	40

Lista de Acrônimos

DCF	Distributed Coordination Function	22
PCF	Point Coordination Function	22
HCF	Hybrid Coordination Function	22
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineer's	15
MIMO	Multiple-Input Multiple Output	15
MPDU	Mac Protocol Data Unit	21
PPDU	PLCP Protocol Data Unit	21
PSDU	PLCP Service Data Unit	21
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure	21
PMD	Physical Medium Dependent	21
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network	19
WLAN	Wireless Local Area Network	20
WPAN	Wireless Personal Area Network	20
WWAN	Wireless Wide Area Network	20

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Contexto	14
1.2	Problema	15
1.3	Motivação	16
1.4	Objetivo	16
1.5	Contribuições	17
1.6	Estrutura de dissertação	17
2	Referencial teórico	19
2.1	Redes sem fio	19
2.1.1	Padrão 802.11	20
2.1.1.1	Camada Física	21
2.1.1.2	Camada MAC	22
2.1.1.2.1	Controle de acesso ao meio	22
2.1.1.2.2	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)	23
2.1.2	Padrão 802.11n	24
2.1.2.1	Agregação de canais	24
2.1.2.2	Agregação de quadros	25
2.1.2.3	Sistema de múltiplos transmissores e receptores	26
2.1.2.4	Sistema de compatibilidade	27
2.2	Técnicas de estimação de banda	27
2.2.1	Técnicas passivas	28
2.2.2	Técnicas ativas	29
2.3	Trabalhos relacionados	30
2.4	Técnicas analisadas	33
2.4.1	IGI/PTR	33
2.4.2	PathChirp	33
2.4.3	ASSOLO	34
2.4.4	WBest	34
2.4.5	YAZ	35
3	Metodologia	36
3.1	Design do experimento	36
3.2	Fatores e níveis	37

3.3	Ambiente de experimentação	38
3.3.1	Equipamentos	38
3.3.2	Softwares	39
3.4	Metodologia estatística	40
4	Análise dos resultados	41
4.1	Cenário de referência	41
4.2	Agregação de canais	44
4.3	Sistema de compatibilidade	45
4.4	Agregação de quadros	48
4.5	Trafego concorrente	50
4.6	YAZ	51
4.6.1	Análise de opções da implementação	51
4.6.2	Análise de dados mais detalhada	55
5	Considerações finais	59
5.1	Visão geral da pesquisa	59
5.2	Visão geral do experimento	60
5.3	Contribuições	60
5.4	Considerações sobre os resultados	61
5.5	Trabalhos futuros	62
	Referências	63

1

Introdução

1.1 Contexto

A estimação da capacidade e da banda disponível em redes têm sido objeto de diversas pesquisas nos últimos anos, principalmente por causa da evolução das tecnologias e crescimento do uso da Internet. Tais técnicas são de grande importância para que seja possível fazer um melhor aproveitamento da transmissão de dados, evitando tanto a subutilização quanto o esgotamento de recursos.

Técnicas que implementam o *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP – Streaming Adaptativo Dinâmico sobre HTTP* (YUN; CHUNG; HONG, 2014), fazem uso da estimação de banda para selecionar dinamicamente a qualidade do vídeo que está sendo transmitido. Esta estimação é contínua durante toda a transmissão e a cada requisição feita ao servidor o valor obtido é usado como referência para escolher com qual qualidade aquela parte do vídeo será reproduzida.

Existem outros inúmeros usos para as técnicas de estimação de banda, dentre as quais podemos citar aplicações *peer-to-peer*, protocolos de roteamento baseados na banda disponível, qualidade de serviço, protocolos de transporte fim a fim, entre outros. Com o interesse cada vez mais crescente nestes tipos de aplicações, principalmente na transmissão de vídeo e áudio, a estimação de banda tem sido de bastante interesse para pesquisadores.

Como define PRASAD et al. (2003), o termo *bandwidth* (largura de banda) na camada física se refere à largura do espectro dos sinais eletromagnéticos, enquanto que no contexto da camada de redes faz referência à taxa de transmissão de dados que um link ou caminho pode transmitir. Nesta pesquisa, nosso foco é a largura de banda na camada de redes, a qual é utilizada pelas aplicações para controlar os dados transmitidos.

Já a banda disponível, PRASAD et al. (2003) define como a capacidade não utilizada da banda em um determinado período de tempo. Deste modo, enquanto a capacidade efetiva de uma conexão depende mais do meio de transmissão, a banda disponível está mais relacionada à quantidade de tráfego presente.

A estimação da capacidade e da banda disponível em redes cabeadas já é bastante

consolidada e um dos fatores que contribuem para isto é a estabilidade do meio de transmissão, o que garante menos aleatoriedade na estimação. Porém, a estimação de banda em redes sem fio é um grande desafio, principalmente devido ao seu meio extremamente sensível a mudanças e interferências. Além disso, existem uma série de mecanismos na camada MAC do padrão do Institute of Electrical and Electronics Engineer's (IEEE) 802.11 que influenciam diretamente o resultado das técnicas existentes para realizar tal tarefa.

1.2 Problema

O problema da estimação de banda em redes sem fio é um tema de bastante interesse na área científica e tem resultado em bons trabalhos na área. Grande parte dos pesquisadores foca em desenvolver técnicas que endereçam as particularidades presentes tanto na camada MAC quanto na Física, pois estas são diferentes no padrão *Ethernet*. Tais técnicas normalmente se dividem em passivas e ativas, sendo a primeira com menor impacto na rede, porém com maior complexidade de implementação, já a segunda injeta pacotes na rede, o que ocasiona consumo dos recursos, mas que possui maior flexibilidade na implantação.

Estas pesquisas desenvolvidas até o momento, focam nos padrões IEEE 802.11a/b/g, os quais já são considerados legados devido à ampla presença do padrão 802.11n. Este último introduziu grandes mudanças nas camadas MAC e Física, que influenciam diretamente no desempenho das técnicas de estimação. Tais mudanças visam melhorar a eficiência dessas camadas, principalmente da MAC, pois esta é um dos maiores limitadores de desempenho em redes 802.11. Dentre os novos mecanismos implementados pelo novo padrão, pode-se citar a agregação de quadros da camada MAC e a utilização de múltiplas antenas no sistema *Multiple-Input Multiple Output (MIMO)*.

Apesar do crescente uso de redes sem fio 802.11n, há apenas um estudo envolvendo estimação de banda disponível neste novo padrão ([FARSHAD et al., 2014](#)). Nele, os autores estudam o impacto da agregação de quadros, introduzida pelo novo padrão, em três técnicas de estimação - *DifTOPP*, *PathChirp* e *WBest*. Ao fim, eles elegeram este último, o qual é baseado no cálculo da dispersão entre pacotes, e realizaram modificações com o objetivo de adaptar à nova realidade. Contudo, observamos algumas limitações neste estudo que podem ser melhor exploradas. Outras técnicas e características, como o sistema de compatibilidade com padrões legados, podem ser avaliados neste contexto, com o intuito de melhor entender o comportamento das técnicas de estimação em conjunto com as novas características do padrão 802.11n. Diante disso, verificamos que o assunto ainda precisa de mais estudos e mais experimentação, com o objetivo de testar novos cenários e soluções.

Diante do exposto, é possível definir o problema abordado por nossa pesquisa como a influência dos novos mecanismos implementados pela camada MAC do padrão 802.11n nas técnicas ativas de estimação de banda disponível, mais especificamente a agregação de pacotes e de canais. Além desses, foi acrescentado à análise o sistema de proteção para coexistência de

dispositivos 802.11n com equipamentos que utilizam os padrões legados em uma mesma rede sem fio, pois este cenário não foi abordado em estudos anteriores, porém é uma opção padrão em implantações de redes sem fio.

Nossa hipótese é que como as técnicas ativas se baseiam no comportamento da transmissão e recepção dos pacotes de sondagem - atraso, dispersão, taxa de transmissão, etc - suas estimativas são diretamente afetadas pelos mecanismos presentes na camada MAC, visto que estes modificam a forma como os quadros são transmitidos no enlace sem fio.

1.3 Motivação

O uso de redes sem fio tem crescido bastante nos últimos anos, tanto em empresas quanto em redes domésticas. Muitas empresas de telecomunicações, por exemplo, têm utilizado pontos de acesso WIFI para fornecer conexão aos seus clientes em complemento aos seus planos de internet móvel, conseguindo assim ampliar sua cobertura com menor custo.

Muito dessa ascensão se deve ao fato da grande evolução do padrão 802.11, que o tornou bastante atraente e concorrente em comparação com redes cabeadas, com a vantagem da flexibilidade e menor custo de implantação. Por essas e outras razões, as redes sem fio tem sido objeto de vários estudos por parte da comunidade científica. Uma das áreas de bastante interesse é a de medições e análise de desempenho, pois este tipo de rede apresenta um meio de transmissão muito instável, no qual o sinal sofre bastante com atenuações e interferências que afetam a transmissão dos dados e prever seu comportamento não é uma tarefa trivial.

Pesquisadores têm se dedicado a desenvolver técnicas para estimar a capacidade e a banda disponível em um caminho de rede entre dois pontos. Esta informação é muito relevante para que se possa utilizar melhor os recursos, provendo mais eficiência e qualidade de serviço. Inúmeras tecnologias atuais fazem uso dessa informação, seja para controlar melhor o congestionamento da rede ou transmitir um vídeo na maior qualidade possível.

Verificando o estado da arte da estimação de banda em redes sem fio, em especial no padrão 802.11, verificamos que é uma área de bastante interesse e que possui cenários e hipóteses a serem testados e analisados. Nos chamou atenção que apesar de o novo padrão 802.11n ter trazido várias melhorias e conseqüentemente modificações, apenas um estudo abordou este tema. Por isto, achamos importante que haja mais aprofundamento nesta questão, buscando trazer mais luz para a influência de tais modificações na área de estimação de banda disponível.

1.4 Objetivo

O objetivo deste estudo é analisar, de um ponto de vista experimental, a influência dos novos mecanismos e modificações definidos pelo padrão 802.11n nas técnicas ativas de estimação de banda disponível. A seguir, definimos os objetivos específicos e conseqüentemente o escopo dessa dissertação.

1. **Analisar experimentalmente as técnicas ativas de estimação de banda disponível em um ambiente 802.11n.** Nosso objetivo aqui é analisar a partir de vários cenários a execução das técnicas de estimação em uma rede 802.11n. Baseado na variação de fatores predefinidos, os resultados apresentados serão analisados com o intuito de validar nossa hipótese de que eles serão afetados pelos fatores aqui avaliados.
2. **Análise específica em uma das técnicas.** Uma vez que podemos aceitar nossa hipótese, decidimos analisar uma das técnicas de maneira mais profunda, buscando encontrar o problema no cenário específico e uma possível solução. Embasados pelos resultados da experimentação realizada no objetivo anterior e apresentados no capítulo 4, definimos que a melhor técnica para esta finalidade foi a YAZ, pois apresentou os melhores resultados em quase todos os cenários.

1.5 Contribuições

Buscamos com este estudo contribuir para um melhor entendimento do comportamento da técnicas ativas de estimação de banda disponível em ambientes de redes sem fio, mais especificamente no padrão 802.11n.

1. Apresentar um levantamento do estado da arte sobre técnicas ativas de estimação de banda disponível em redes 802.11;
2. Realizar uma comparação experimental das técnicas em uma rede 802.11n;
3. Identificar quais fatores da camada MAC do padrão 802.11n influenciam os resultados da estimação;
4. Demonstrar em pelo menos uma das técnicas como efetivamente o(s) fature(s) influenciam seus resultados;
5. Apresentar uma possível solução para diminuir os efeitos causados pelo(s) fature(s) em pelo menos uma das técnicas;

1.6 Estrutura de dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo o primeiro esta introdução. O próximo capítulo apresentará referencial teórico do estudo, com definições sobre redes sem fio, técnicas de estimação e trabalhos relacionados, bem como uma apresentação resumida de como as técnicas aqui avaliadas realizam suas estimacões. No capítulo três, toda metodologia para realização do experimento é apresentada, incluindo os fatores a serem variados, equipamentos,

sistemas de apoio e a metodologia estatística. A análise dos resultados será apresentada no penúltimo capítulo, bem como a análise geral e específica. Por fim, na última parte serão discutidas as considerações finais da pesquisa.

2

Referencial teórico

2.1 Redes sem fio

As redes sem fio (*wireless*) são amplamente utilizadas atualmente. Existem vários padrões que visam atender variados tipos de redes, com diferentes tecnologias, divergindo principalmente devido ao seu alcance e conseqüentemente objetivo de uso. Todos têm em comum o uso de ondas eletromagnéticas através do ar como meio de transmissão, o que eleva bastante a complexidade na definição dos protocolos de comunicação. Um paradigma de rede sem fio muito utilizado é o de telefonia móvel, que nos últimos anos tem se focado cada vez mais na transmissão de dados além da voz. Outro padrão sem fio é o WiMAX, definido pelo IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers* - 802.16, que tem como objetivo redes de longa distância e é capaz de prover acesso sem fio para redes de acesso metropolitanas - *Wireless Metropolitan Area Network (WMAN)*.

Apesar da maior complexidade, as redes sem fio trazem inúmeras vantagens. A mobilidade é, sem dúvida, a que mais se destaca, afinal não é preciso ficar preso a cabos. Além disso, a flexibilidade e baixo custo de implantação também são pontos positivos que podem ser citados. Porém, além dos benefícios, o meio de transmissão sem fio traz características que desafiam os pesquisadores e podem impactar bastante na qualidade da rede. LI (2006) define bem tais pontos:

- Meio de acesso compartilhado - Todas as estações sem fio compartilham o mesmo meio e deste modo podem ouvir todos os dados que estão sendo transmitidos. É muito suscetível à interferência e colisões, sendo que esta é impossível de ser detectada pela estação que está transmitindo. Normalmente suporta modo de operação *half-duplex*, onde apenas uma estação transmite por vez.
- Propagação - As transmissões propagadas através do ar sofrem atenuações, reflexão, difração e efeitos de espelhamento. As condições causam variações na potência de recebimento do sinal e perda de dados, afetando assim as condições da rede.
- Taxa de erros - Devido às interferências, atenuações, enfraquecimento do sinal e

outras características, a rede sem fio apresenta altas taxas de perda de pacotes.

- Dependência da localização em relação à portadora - A performance da rede sem fio é afetada significativamente pela localização da estação em relação ao ponto de acesso. Um exemplo é o caso do terminal oculto, onde dois nós se encontram fora de alcance um do outro, mas ocorre uma interseção no destinatário, causando colisões e perda de pacotes.

LI (2006) também define uma categorização das redes sem fio de acordo com o alcance:

- Wireless Personal Area Network (WPAN) - São redes sem fio de curto alcance, feitas para funcionar dentro de pequenas áreas como uma sala ou escritório. O Bluetooth é um exemplo de tipo de WPAN e é definido na especificação IEEE 802.15.1.
- Wireless Local Area Network (WLAN) - As redes locais sem fio possuem um alcance maior que a categoria anterior, abrangendo áreas de prédios, casas, campus, etc. É talvez o padrão de rede sem fio mais utilizado.
- Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) - Possui abrangência bem maior que as redes locais sem fio, servindo por exemplo de enlace para interligar prédios distantes geograficamente ou prover conexão de acesso sem fio em uma grande área. O WiMAX é um representante desta categoria.
- Wireless Wide Area Network (WWAN) - Possui a maior cobertura e é a mais utilizada hoje em dia nas redes celulares para prover capacidade de transmitir dados. Padrões populares de WWAN são as 3G e GPRS, por exemplo.

Em nossa pesquisa, o foco é a categoria das redes locais sem fio (*WLAN - Wireless Local Area Networks*), que são padronizadas pela família de especificações IEEE 802.11. Hoje pode ser considerado um dos padrões de acesso sem fio mais utilizado em todo mundo. Este tipo de rede é empregada para complementar ou mesmo substituir as redes locais cabeadas e usada em empresas, universidades, escritórios e nas residências. Alguns provedores também utilizam para enlaces de baixo custo.

2.1.1 Padrão 802.11

O arcabouço estabelecido pelo grupo de trabalho do IEEE para WLANs é dividido em várias especificações, identificadas pelas letras ao fim do nome 802.11. O padrão 802.11i por exemplo, foi criado para definir mecanismos de segurança, como autenticação e criptografia. Já o 802.11e caracteriza configurações de QoS - *Quality of Service* - para redes sem fio. A primeira especificação do conjunto 802.11 foi definida em 1997.

Na família 802.11 existem cinco normas publicadas que padronizam a transmissão de dados e o controle de acesso ao meio. Podemos visualizar algumas de suas características na

Tabela 2.1: Padrões IEEE 802.11 para redes WLAN.

Padrão	Ano	Taxa de Transmissão*	Modulação	Banda
802.11a	1999	54Mbps	OFDM	5GHz
802.11b	1999	11Mbps	DSSS	2.4GHz
802.11g	2003	54Mbps	OFDM	2.4GHz
802.11n	2009	300Mbps	OFDM	2.4GHz/5GHz
802.11ac	2013	+1000Mbps	OFDM	5GHz

tabela 2.1. Nela é possível observar a evolução dos padrões e das taxas de transmissão. Porém, vale ressaltar que do ponto de vista da camada de rede, estas taxas são mais teóricas que práticas, pois tais valores são efetivamente reduzidos pela camada MAC, devido aos mecanismos de controle de acesso ao meio.

As redes locais sem fio são um desafio para os pesquisadores. Isto se deve principalmente às características inerentes a este tipo de rede, em particular ao meio pelo qual transmite os dados. Os mecanismos que permitem o uso de conexões sem fio se encontram nas duas primeiras camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection model*), a Física e a de Enlace. A primeira é mais evidente pois o meio de transmissão é bem diferente do tradicional cabo utilizado no padrão mais comum, o IEEE 802.3 (*Ethernet*). Na segunda, como a detecção de colisões em redes sem fio não é confiável, foi desenvolvido um novo protocolo de controle de acesso ao meio na camada MAC. Redes WLANs possuem dois modos de operação, o Ad Hoc em que as máquinas se conectam diretamente uma a outra, e infraestrutura, na qual existe um equipamento que atua como ponto de acesso sem fio e que é responsável por intermediar a comunicação entre os dispositivos e deles com a rede cabeada, além de gerenciar as configurações da rede em uso.

2.1.1.1 Camada Física

A camada Física do padrão 802.11 é dividida em duas subcamadas, a *Physical Layer Convergence Procedure (PLCP)* e a *Physical Medium Dependent (PMD)*. A primeira é responsável por preparar os quadros MAC para serem transmitidos. Já a outra é quem realmente transmite os dados.

A subcamada PLCP prepara as *Mac Protocol Data Units (MPDUs)* para o envio, diminuindo a dependência da camada MAC em relação à forma transmissão física e, para realização desta tarefa, são adicionados um preâmbulo e um cabeçalho necessários para que a MPDU seja transmitida. Este quadro completo é chamado de *PLCP Protocol Data Unit (PPDU)* e seu *payload* é o *PLCP Service Data Unit (PSDU)*.

Por sua vez, a PMD é responsável pela transmissão e recebimento dos quadros da camada, modulando e demodulando os mesmos e interagindo diretamente com o meio de transmissão sem fio. A camada Física também inclui a função de aferição do estado do canal, avisando à camada MAC quando um sinal é detectado.

Uma característica importante e que impacta bastante nos resultados das técnicas de

estimação é a adaptação da taxa de transmissão. De acordo com [GAST \(2005\)](#), a adaptação da taxa de transmissão é um mecanismo crítico para garantir o desempenho de redes sem fio padrão 802.11, por isso, é obrigatório o suporte a múltiplas taxas pela camada Física e que devem possuir diferentes esquemas de codificação e modulação.

2.1.1.2 Camada MAC

A camada MAC do padrão 802.11 é bem complexa e conta com vários mecanismos para mitigar as características inerentes ao meio de transmissão sem fio compartilhado, citados no tópico 2.1 e que podem afetar o desempenho da rede. Este é o ponto principal da especificação 802.11. A forma de trabalho desta camada e os mecanismos aqui presentes são os fatores que tornam a estimação de banda disponível neste tipo de rede tão desafiador para os pesquisadores.

2.1.1.2.1 Controle de acesso ao meio

De acordo com [GAST \(2005\)](#), o acesso ao meio sem fio é controlado por funções de coordenação, as quais podem ser distribuída, centralizada ou híbrida e que podem ser definidas da seguinte maneira:

- *Distributed Coordination Function (DCF)* - É o mecanismo principal para controle de acesso ao meio, sendo de implementação obrigatória em todos os produtos compatíveis com os padrões 802.11. As estações fazem uso do mecanismo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)*, o qual será melhor descrito no tópico 2.1.1.2.2.
- *Point Coordination Function (PCF)* - Prevê um controle de acesso livre de contenção através do uso de pontos de coordenação, provendo o acesso de forma centralizada. Esta função só existe em redes sem fio de infraestrutura, pois fica a cargo dos pontos de acesso sem fio. Como não é um aspecto obrigatório, é pouco implementada e utilizada.
- *Hybrid Coordination Function (HCF)* - Este recurso faz parte da especificação 802.11e, que descreve melhorias em termos de *Quality of Service (QoS)* para redes sem fio. O HCF permite que as estações mantenham diferentes filas de controle de acesso ao meio, permitindo o balanceamento entre elas.

Como nosso objetivo é analisar as técnicas de estimação em cenários de rede sem fio próximos aos reais, utilizamos apenas o sistema de coordenação distribuída nos nossos experimentos, o qual é o padrão nas implementações 802.11.

2.1.1.2.2 Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)

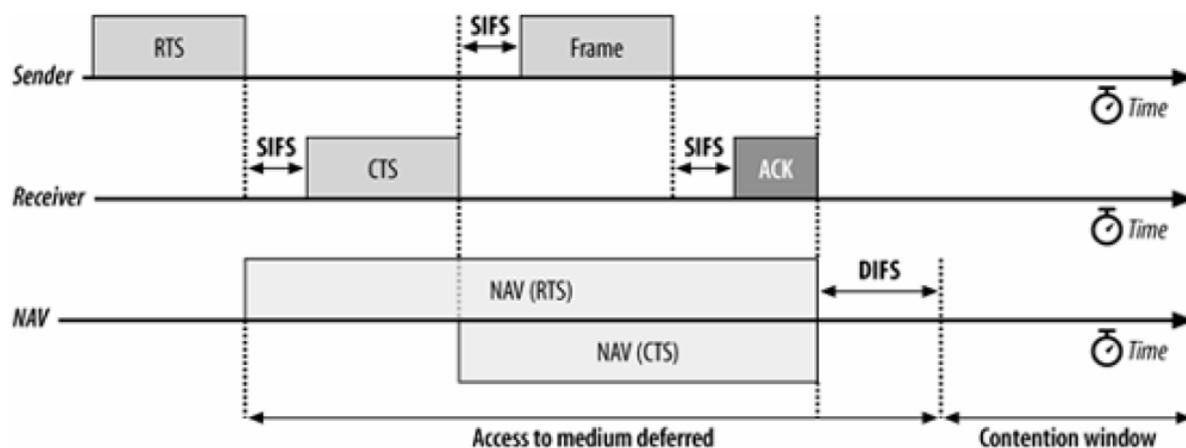
As redes cabeadas que utilizam o padrão *Ethernet* – 802.3 – utilizam o princípio *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* (CSMA/CD) no qual a estação verifica se o canal está disponível e inicia a transmissão, ao mesmo tempo continua monitorando o meio para detectar a ocorrência de colisões. Na transmissão sem fio não é possível detectar estes eventos de forma confiável, deste modo, foi desenvolvido uma variante do CSMA para evitá-los (*Collision Avoidance*).

Conforme é explicado por LI (2006), o funcionamento básico do CSMA/CA consiste na estação sem fio verificar se um canal está livre e caso a resposta seja afirmativa, é esperado um tempo pré-determinado (*Distributed Interframe Space* – DIFS) para depois o quadro ser transmitido. Se o canal estiver ocupado com um outro nó transmitindo, a estação espera um tempo exponencial aleatório (tempo de *backoff*) para poder checar novamente se o meio está disponível. O destinatário recebe o quadro e confere se o mesmo está íntegro através do CRC (*Cyclic Redundancy Check*), espera um outro período de tempo predeterminado (*Short Interframe Space* - SIFS) e envia um quadro de resposta para confirmar o recebimento (*Acknowledgment Frame* – ACK). O canal só é considerado livre ao final dessa transação de quadros.

Uma outra forma de funcionamento é definida para mitigar o problema do terminal oculto. Neste método, a estação envia um quadro especial para requisitar o meio de transmissão – *Request-to-Send* (RTS) – para reservá-lo pelo período de duração da transação necessária para transmissão do quadro. O receptor espera um período SIFS e envia um quadro *Clear-To-Send* (CTS), para avisar que o remetente pode transmitir. Caso esse último não receba o quadro CTS, é seguido o mesmo esquema do tempo exponencial aleatório para enviar novos quadros RTS até que a resposta seja recebida e o meio esteja livre para transmissão.

Outro fator importante é a retransmissão de quadros perdidos, por isso a presença de quadros ACK na camada MAC do protocolo 802.11. Segundo LI (2006), o DCF retransmite quadros RTS e de dados uma determinada quantidade de vezes baseada em seus tamanhos. Caso seja menor que um quadro RTS, ele pode ser enviado novamente até sete vezes e quatro se for maior. Estes reenvios não necessitam esperar o tempo de *backoff*, podendo ser transmitidos após um SIFS.

Este método de controle de acesso ao meio é o principal objeto dos estudos que desenvolvem técnicas de estimação de banda, pois é o que mais diferencia do padrão *Ethernet* e causa grandes variações no tempo da transmissão, dificultando bastante sua modelagem. Na figura 2.1 é possível verificar graficamente o funcionamento do protocolo CSMA/CA com a presença dos quadros RTS e CTS. O *Network Array Allocator* (NAV) que aparece na figura é o tempo alocado pelos outros dispositivos para esperar pela transmissão que está ocorrendo. Já a janela de contenção - *Contention Window* - é o intervalo em que o meio está livre e pode ser utilizado após um período DIFS.

Figura 2.1: Funcionamento do sistema CSMA/CA

Fonte: [GAST \(2005\)](#)

2.1.2 Padrão 802.11n

O protocolo para redes sem fio 802.11n foi oficialmente normatizado pelo IEEE em setembro de 2009. Pode trabalhar em frequências de 2.4GHz e 5GHz e é compatível com os padrões anteriores 802.11a/b/g. É capaz de alcançar taxas de transmissão de até 600Mbps, bem maiores que os anteriores que chegavam no máximo em 54Mbps. Trouxe inovações muito importantes e que melhoraram bastante o desempenho das redes sem fio, aumentando sua capacidade de concorrer com as redes cabeadas e ajudando na sua popularização. Estas características incluem, mas não se limitam, a agregação de canais e de quadros, o reconhecimento de quadros em bloco e o uso de múltiplas antenas (*Multiple Input, Multiple Output* – MIMO).

2.1.2.1 Agregação de canais

A técnica de *channel bonding* consiste na agregação de dois canais de 20MHz, que é a largura utilizada pelos padrões anteriores, formando um canal de 40MHz e pode assim dobrar a taxa de transmissão. As redes 802.11n podem utilizar as duas larguras de canais. Uma desvantagem de usar essa configuração é o aumento da possibilidade de interferência na frequência de 2.4GHz, sendo mais indicado sua utilização em 5GHz. Além disso, não é possível manter a compatibilidade com os padrões anteriores utilizando canais de 40MHz.

Apesar de aparentemente este mecanismo não parecer influenciar as estimações realizadas pelas técnicas ativas, os autores do artigo *On the impact of 802.11 n frame aggregation on end-to-end available bandwidth estimation* ([FARSHAD et al., 2014](#)) apontam que houve uma perda de acurácia e deste modo, decidimos incluir este fator em nossa análise experimental.

2.1.2.2 Agregação de quadros

Um dos maiores problemas de desempenho das redes 802.11 é a eficiência da camada MAC. Todo o procedimento do mecanismo CSMA/CA (descrito no tópico 2.1.1.2.2) acaba por diminuir muito a capacidade de transmissão de dados. Uma rede 802.11g, por exemplo, possui uma taxa de transmissão de 54Mbps, mas que efetivamente fica em torno de 25 a 30Mbps (GAST, 2012). A agregação de quadros diminui consideravelmente o overhead causado pela forma como a camada MAC trabalha, aumentando a fatia de tempo utilizada para transmitir os dados.

Conforme diz FARSHAD et al. (2014) em seu artigo, o objetivo do uso da agregação de quadros é dispersar o *overhead* em vários *frames*, ou seja, em vez de ter um cabeçalho para cada quadro, é possível enviar vários utilizando apenas um cabeçalho. Além disso, sua eficiência é ainda melhor ao ser utilizado em combinação com o reconhecimento de quadros em bloco, similar ao que o protocolo TCP faz. Deste modo, não é necessário enviar um ACK para confirmar o recebimento de cada quadro, sendo possível uma única resposta com a confirmação de vários deles.

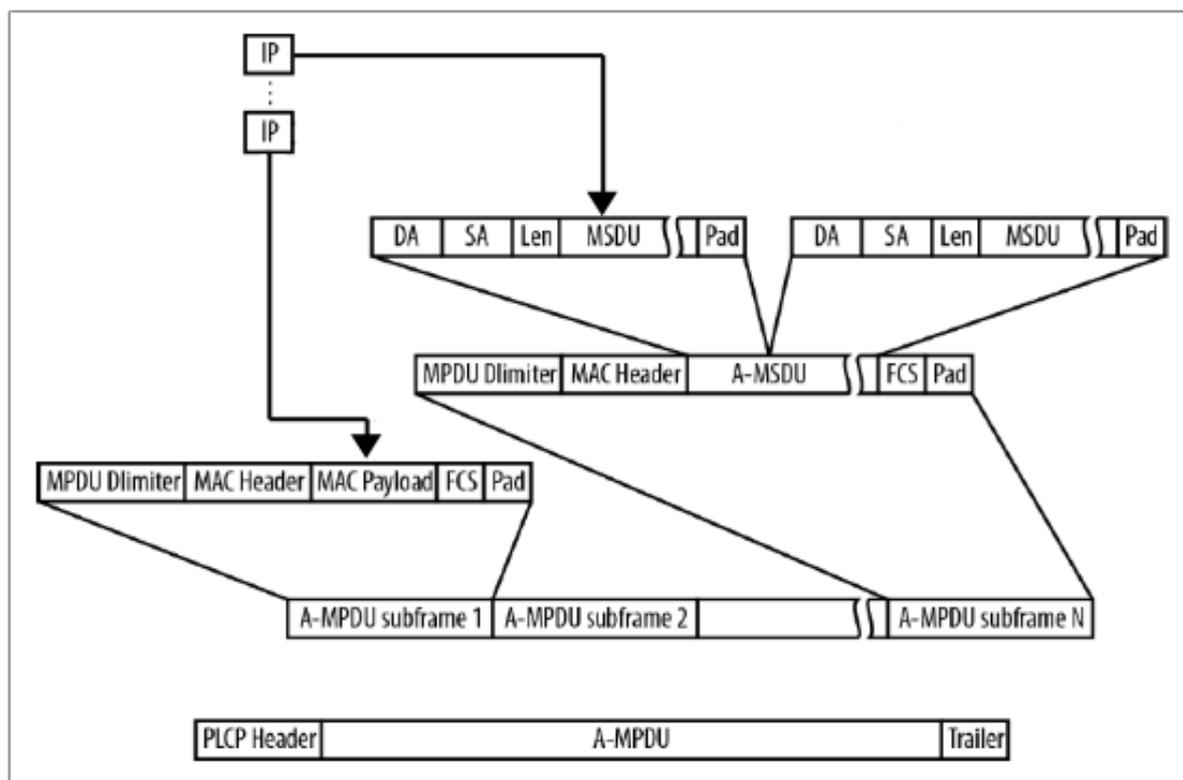
O protocolo 802.11n prevê dois modos de agregação. Um é a A-MSDU – *Agregate MAC Service Data Unit*, que compreende a agregação de vários pacotes da camada superior, por exemplo pacotes IP, em um único quadro MAC. Os pacotes IP são agrupados sob um único cabeçalho MAC e FCS – *Frame Check Sequence* - e devem possuir a mesma origem e destino. Este processo é feito em software através do *driver* da interface de rede sem fio e pelas regras definidas para este padrão, a implementação deste mecanismo é obrigatória apenas na recepção dos dados. O tamanho máximo de um A-MSDU é 7.955 *bytes*, que é o tamanho máximo de um quadro MAC. Não é possível utilizar o reconhecimento em bloco neste mecanismo e se alguma parte do quadro estiver corrompida, todo ele é descartado. Além disso, por ser feito via software, ocorre um aumento do consumo dos recursos do *host*. Este tipo de agregação não é muito utilizada e todos os equipamentos que tivemos acesso em nossa pesquisa só possuíam a implementação da recepção, não sendo possível analisarmos este fator.

A outra forma de agregação ocorre em hardware e é chamada de A-MPDU – *Agregate MAC Protocol Data Unit*, e consiste no agrupamento de vários quadros completos da camada MAC, que possuem cabeçalho, dados e FCS. É a forma mais comum de agregação e pode transmitir até 65.535 *bytes*, bem mais que um quadro A-MSDU. Diferente deste, um A-MPDU pode utilizar o reconhecimento em bloco dos quadros e desta forma, apenas os sub-quadros que forem corrompidos precisam ser retransmitidos. Este mecanismo melhora muito a eficiência da camada MAC, pois economiza dados de cabeçalho e tempo de transmissão de ACKs. Porém, pode atrapalhar os resultados apresentados pelas técnicas de estimação, pois os pacotes de sondagem podem ir agregados ou não, o que pode aumentar mais a variação dos atrasos e causar erros de cálculos na dispersão.

Há ainda a possibilidade da utilização das duas formas de agregação em conjunto, onde

vários pacotes IPs são agrupados em um quadro MAC e então vários deste tipo são agrupados em um A-MPDU. Na nossa pesquisa, analisaremos apenas a agregação de quadros A-MPDU, pois é suportada pelos equipamentos do nosso experimento na transmissão e na recepção. Na imagem 2.2 é possível ver as duas formas de agregação.

Figura 2.2: Esquema de agregação com A-MSDU e A-MPDU



Fonte: Adaptado de [GAST \(2012\)](#)

2.1.2.3 Sistema de múltiplos transmissores e receptores

Os padrões anteriores definidos pelo IEEE para redes sem fio locais utilizavam um sistema de transmissão conhecido como SISO – *Single Input, Single Output* – onde um rádio transmissor é capaz de falar com um único rádio receptor. Isto ocasiona que o sistema sofra muito com a degradação do sinal. Para atenuar este problema, alguns equipamentos eram equipados com duas antenas, mas, mesmo assim, apenas uma é empregada na conexão, utilizando a que estiver com melhores condições de sinal.

Segundo [GAST \(2012\)](#), os dispositivos utilizados em redes 802.11n fazem uso de múltiplas antenas e rádios, em uma técnica conhecida como MIMO – *Multiple Input, Multiple Output* - em que, diferente do esquema anterior, transmissor e receptor podem dispor de todos os rádios e antenas para realizar a conexão e transmitir dados. Existe então um ganho de confiabilidade devido à maior robustez do sinal, diminuindo a probabilidade de perdas de pacotes, além de conseguir alcançar taxas ainda maiores.

2.1.2.4 Sistema de compatibilidade

Quando o padrão 802.11g foi definido, houve uma preocupação em manter a compatibilidade com os equipamentos já existentes que suportavam 802.11b. O protocolo 802.11n estende esta coexistência para suportar os padrões 802.11b/g e 802.11a nas frequências de 2.4GHz e 5GHz, respectivamente. Esta convivência entre dispositivos tem um custo, causando perda de desempenho. Ao notar a associação de uma estação sem fio dos padrões anteriores, o ponto de acesso envia esta informação nos quadros *beacon* (utilizados para divulgar a rede e suas características) para que todos utilizem o sistema de proteção.

Uma das formas de permitir esta coexistência é feita na camada Física, onde o preâmbulo do quadro é transmitido em uma taxa legada e deste modo, todos os dispositivos poderão entender que uma transmissão esta ocorrendo e o resto do quadro é transmitido na velocidade 802.11n. Além disso, o sistema de RTS e CTS é ativado e estes quadros são enviados utilizando taxas de transmissão e modulações que possam ser entendidas pelos dispositivos mais antigos e quando o meio estiver reservado, o restante da transação ocorre conforme o padrão 802.11n.

2.2 Técnicas de estimação de banda

Por ser considerada uma importante métrica para o desempenho da rede e das aplicações, a estimação de banda disponível tem sido bastante estudada, dando origem a diversas pesquisas e soluções para atender tal demanda. As técnicas oriundas destes trabalhos podem ser divididas entre passivas e ativas, onde a primeira não necessita de tráfego de sondagem para realizar a estimação, sem causar assim interferência no funcionamento da rede. Já as ativas se baseiam na injeção de tráfego para analisar o comportamento do mesmo e assim realizar as análises necessárias para calcular a banda disponível, inserindo deste modo tráfego adicional ao já existente. Porém, estas são mais simples e flexíveis na implementação, enquanto que as passivas precisam de mudanças específicas nos nós para garantir a coleta das métricas necessárias para realizar a estimação, tornando muitas vezes sua implantação inviável.

Antes de descrevermos as técnicas de estimação de banda disponível, é importante apresentarmos alguns conceitos relativos à métricas de desempenho de uma rede que estão relacionadas com nossa pesquisa. [PRASAD et al., 2003](#) descrevem em seu trabalho que a capacidade é a quantidade máxima de dados que um *link* pode transmitir em um determinado tempo na ausência de tráfego concorrente. A capacidade de transmissão na camada de Enlace do modelo OSI é limitada pela capacidade física de propagação do meio e do hardware de transmissão e recepção. No padrão Ethernet temos, por exemplo, as taxas de 100Mbps e 1GBps, entre outras. Já na camada de Redes, que é o foco do nosso trabalho, a capacidade é menor em relação à camada inferior, pois tem seu rendimento reduzido devido ao *overhead* causado pelos dados de encapsulamento da camada 2.

[AUGUSTO; MURTA \(2010\)](#) definem que a largura de banda utilizada "representa a

quantidade de dados trafegando por um enlace em um determinado momento". É a soma do consumo da capacidade do *link* por todos os fluxos passantes. Já a banda disponível, ele conceitua como sendo "a taxa máxima na qual um *host* consegue transmitir dados ao longo de um caminho de rede ou enlace em um certo momento". É a fração não utilizada da capacidade de transmissão em um determinado período de tempo e que pode ser utilizada sem prejudicar os outros fluxos presentes. Esta métrica varia de acordo com o tempo e está relacionada à presença de outros tráfegos na rede.

Bulk-Transfer Capacity é uma métrica relacionada a conexões TCP e apesar de não abordarmos em nossa pesquisa, é importante conceituá-la. A RFC 3148 (MATHIS; ALLMAN, 2001) define como a transferência de uma quantidade significativa de dados em uma única conexão utilizando um protocolo de transporte que faça controle de congestão, por exemplo o TCP.

2.2.1 Técnicas passivas

As técnicas passivas de estimação de banda disponível não necessitam de tráfego extra para estimar a métrica. Para isto, se utiliza de informações colhidas a partir de dados nos próprios nós para realizar suas análises. Na estimação fim a fim, é necessário a cooperação de vários nós para que a estimação seja feita de forma correta.

Em redes 802.11, as técnicas passivas se valem principalmente das informações sobre o tempo ocupado e ocioso do canal sem fio, definindo assim a banda disponível como a porção de tempo em que o canal está ocioso durante um determinado intervalo. É necessário então a modificação dos *drivers* das placas de rede sem fio para colher esses dados, tornando a solução pouco portátil e inflexível.

No artigo *Bandwidth Estimation in Wireless Lans for Multimedia Streaming Services* LEE et al. (2007), os autores propõem a técnica chamada IdleGap. Ela tem como foco o uso de informações obtidas das camadas de rede inferiores para estimar a banda disponível. Seu funcionamento se baseia no *Network Allocation Vector* (NAV) usado na camada MAC para controlar o acesso ao meio sem que ocorra colisões. Existe então um módulo inserido na implementação camada MAC que verifica sempre que o NAV é atualizado e coleta os dados acerca do tempo em que o meio está ocupado ou não e a partir desta informação inferir a banda disponível. O IdleGap foi testado utilizando simulações com o simulador NS-2 e comparado ao ProbeGap e ao Spruce, sendo estas técnicas passiva e ativa, respectivamente. Os resultados mostraram que a técnica proposta obteve resultados melhores que as anteriores.

O método *Passive Available Bandwidth Estimation* (PABE) é proposto por ZHAO et al. (2011) e leva em consideração os fatores aleatórios presentes na arquitetura 802.11, como o tempo de *backoff* e as retransmissões, para modelar a capacidade efetiva. A partir de estimação da capacidade efetiva do enlace sem fio, o algoritmo utiliza um novo limiar de distância de sinal para verificar a taxa de ocupação do canal, tornando assim a técnica mais eficiente. Os

pesquisadores utilizaram o simulador OPNET Modeler para avaliar o método e na comparação com outras três técnicas passivas (AAC, ABE e CACP-CS), o modelo proposto se mostrou mais eficiente e esteve perto do valor real em todas as variações de fatores como *cross-traffic* e tamanho dos pacotes.

Um outro exemplo de procedimento passivo para estimação de banda pode ser visto na pesquisa *Experimental Comparison of Bandwidth Estimation Tools for Wireless Mesh Networks* (GUPTA et al., 2009). Nele também é proposto um método para modelar e estimar o tempo de ocupação do canal, com um diferencial de que o mesmo foi investigado em um cenário experimental real, diferente dos anteriores que utilizaram simulações. Para isto, os autores implementaram um algoritmo diretamente no *driver* de rede sem fio *madwifi* do Linux para coletar os dados necessários para o cálculo dos períodos de ocupação ou não do canal. São avaliados os impactos da perda de pacotes, interferência e adaptação da taxa de transmissão, onde a técnica proposta obteve melhores resultados que as ativas Pathload, PathChirp, PTR e Spruce. Um porém que deve ser ressaltado é que a capacidade do enlace não é calculado pelo modelo, devendo ser utilizado uma outra ferramenta para isto (os autores sugerem o Pathrate) e esta informação é crucial para o cálculo da banda disponível.

2.2.2 Técnicas ativas

As técnicas ativas de estimação de banda são bem mais flexíveis que as passivas, pois não dependem de modificações nos dispositivos para obter dados a partir de outras camadas. Seu conceito fundamental consiste no envio de dados entre dois *hosts* e então a estimação é realizada de acordo com o comportamento apresentado na transmissão e recepção. Apesar de alguns estudos dividirem este tipo em vários grupos, a exemplo de PRASAD et al. (2003) e CHAUDHARI; BIRADAR (2015), é possível simplificar (LAO; DOVROLIS; SANADIDI (2006), DELPHINANTO et al. (2010), OLVERA-IRIGOYEN et al. (2011)) e agrupar em dois: *Probe Gap Model* (PGM) e *Probe Rate Model* (PRM).

Conforme definido por DELPHINANTO et al. (2010), as técnicas que se baseiam no modelo PGM estimam a banda disponível enviando um trem ou pares de pacotes a uma taxa de transmissão igual à capacidade do caminho de rede, assim, a dispersão dos pacotes calculada no destino será afetada pelo tráfego cruzado presente no caminho. Como visto, é necessário conhecer a capacidade do percurso de rede e ocorre a perda de acurácia na presença de múltiplos gargalos ou quando o link de menor capacidade não é o mesmo que possui menor banda disponível. Em compensação, são algoritmos mais leves, rápidos e de fácil implementação. Técnicas que implementam esse esquema são o Spruce (LAO; DOVROLIS; SANADIDI, 2006), WBest (LI; CLAYPOOL; KINICKI, 2008) e o IGI (HU; STEENKISTE, 2003), estes dois últimos serão analisados neste estudo.

Os métodos de estimação que seguem o paradigma PRM enviam vários trens de pacotes com um aumento da taxa de transmissão a cada novo trem (DELPHINANTO et al., 2010). O

objetivo é encontrar o ponto onde a taxa de envio é maior que a banda disponível, causando assim uma congestão temporária na rede. A banda disponível é então aquela em que o atraso relativo dos pacotes pertencentes a um trem começam a aumentar em relação à taxa de envio. Tais técnicas são mais complexas de implementar, mais lentas e introduzem mais tráfego na rede. Contudo, são mais robustas e normalmente conseguem obter melhores resultados quando comparadas às que seguem o modelo PGM. Alguns exemplos são o ASSOLO (GOLDONI; ROSSI; TORELLI, 2009), pathChirp (RIBEIRO et al., 2003), YAZ (SOMMERS; BARFORD; WILLINGER, 2006), PTR (HU; STEENKISTE, 2003) e DietTOPP (JOHANSSON; MELANDER; BJÖRKMAN, 2004). Com exceção deste último, todos estão presentes na análise experimental realizada nesta pesquisa.

2.3 Trabalhos relacionados

As pesquisas desenvolvidas na área de estimação de banda normalmente elaboram uma nova técnica, ou uma modificação de uma já existente, e a compara com outras para demonstrar suas contribuições. Isto pode limitar o escopo da análise às limitações presentes na solução proposta (GOLDONI; SCHIVI, 2010). A análise, principalmente experimental, não é algo trivial e envolve muitos fatores que podem afetar os resultados, em especial quando se trata de redes sem fio. OLVERA-IRIGOYEN et al. (2011) cita os principais pontos que servem de balizamento para comparar as técnicas:

- Acurácia - Quão perto do valor real a estimação está.
- Intrusividade - A quantidade de dados que é necessário injetar na rede para realizar a estimação.
- Tempo de convergência - Quanto tempo a técnica precisa para chegar a um resultado.
- Robustez - Como é o comportamento do método em cenários complexos, como os que envolvem múltiplos gargalos ou enlaces sem fio.
- Usabilidade - A facilidade de implantação. Se é necessário instalar nos dois *hosts* ou apenas em um, se é preciso cooperação de nós intermediários.

O foco do nosso trabalho é a influência de alguns fatores que estão presentes em redes do padrão 802.11n nos resultados apresentados pelas técnicas ativas, deste modo, trataremos apenas da acurácia das estimativas apresentadas em nossa pesquisa.

OLVERA-IRIGOYEN et al. (2011) propõem o uso do Iperf de um modo mais leve, causando assim menos injeção de tráfego desnecessário na rede, para estimar a banda disponível em redes residenciais híbridas, as quais possuem enlaces sem fio e/ou o uso de modems. Tais características influenciam os resultados das técnicas ativas e os testes feitos pelos autores

mostram que IGI/PTR, WBest e PathChirp perdem acurácia em tais cenários, enquanto que o modo proposto alcança bons e estáveis resultados. A técnica utiliza o Iperf no modo TCP com intervalos de sondagem pequenos (menor que um segundo) e demonstram que, em redes com RTT – *Round Trip Time* – baixos, o TCP converge rapidamente para o valor da banda disponível, porém do contrário pode levar vários segundos para isto.

Já [JOHNSON; MELANDER; BJÖRKMAN \(2006\)](#) desenvolveram a técnica de estimação de banda DietTOPP, uma versão mais simples do método existente TOPP e que segue o modelo PRM. Consiste em enviar trens de pacotes iguais em uma taxa mínima e ao terminar este envio, a taxa é aumentada a cada novo envio. Quando a taxa de transmissão alcançar um valor que seja maior que a mensurada na recepção, é sinal de que o valor da banda disponível foi transpassado. O último valor de transmissão que foi igual ao da recepção é retornado como a banda disponível. Uma questão interessante apontada é a grande dependência do tamanho dos pacotes em relação à acurácia da estimação, quanto maior mais preciso. A avaliação do DietTOPP é feita de modo experimental e utilizando rede cabeada e sem fio, obtendo melhores resultados que o Pathload, mas perdendo precisão quando na presença de tráfego cruzado.

Na pesquisa de [DELPHINANTO et al. \(2010\)](#) é proposto um método para estimar a capacidade do caminho de rede entre um servidor e um cliente em redes residenciais. De acordo com os autores, é pouco intrusivo, de rápida convergência e é necessário a implementação apenas no servidor. Este último se deve ao fato de o algoritmo de estimação se basear no valor do RTT. São enviados n pares de pacotes e então o valor da capacidade é calculado pela razão entre o tamanho do pacote e a diferença dos menores RTTs entre primeiros e os segundos pacotes. Para não ser afetada pelo *overhead* causado pelos ACKs em redes 802.11, o primeiro pacote possui duas vezes o tamanho da MTU – *Max Transfer Unit*, enquanto que o segundo possui o tamanho normal. Sua prova de conceito foi em uma análise experimental e obteve bons resultados, estando perto dos valores reais e foram melhores que os da técnica Capprobe. Um problema que pode afetar os resultados é a presença de enlaces assimétricos no caminho de rede.

Uma pesquisa mais próxima à nossa foi feita por [GOLDONI; SCHIVI \(2010\)](#), cujo objetivo é analisar a acurácia, intrusividade e tempo de convergência de nove técnicas de estimação de banda disponível – Abing, ASSOLO, DietTOPP, IGI, pathChirp, Pathload, PTR, Spruce e Yaz. A diferença maior é que eles realizaram as análises utilizando apenas rede cabeada e, além disso, focaram no desempenho das técnicas, comparando precisão, sobrecarga causada na rede e rapidez, enquanto que nós estamos mais interessados em entender a influência de características presentes no padrão 802.11n na precisão dos métodos de estimação. Os resultados mostram que as ferramentas ASSOLO, Pathload e Yaz obtiveram mais precisão em seus resultados, enquanto que a Spruce é a que precisa de menos tempo e dados para realizar a estimação.

Na pesquisa desenvolvida por [BREDEL; FIDLER \(2008\)](#) ocorre a investigação da influência do sistema DCF do padrão 802.11 na estimação de banda disponível feita por técnicas ativas. A justificativa é que estas se baseiam no sistema de escalonamento FIFO – *First In, First*

Out – e acabam reportando uma porção justa de banda em vez da banda disponível quando na presença de tráfego concorrente. Os métodos analisados sobre este ponto de vista foram DietTOPP, IGI, PathChirp, Pathload, PTR, Spruce e WBest. Seus experimentos mostraram que as técnicas PRM reportam a porção justa da rede e que mesmo as desenvolvidas para o uso em redes sem fio, não obtiveram resultados superiores que as demais.

O BART é o método proposto por [JOHNSSON; BJORKMAN \(2008\)](#) e também é baseado na técnica anterior TOPP. A diferença é que enquanto este utiliza regressão linear no cálculo da estimação, o primeiro faz uso de um filtro Kalman e no artigo os parâmetros deste esquema são ajustados para obter os melhores resultados em redes do padrão 802.11. A avaliação experimental não levou em conta outras ferramentas, apenas o valor real calculado a partir da saturação do enlace com tráfego UDP. Os resultados obtidos foram bons e os autores os analisaram, assim como [BREDEL; FIDLER \(2008\)](#), como sendo a porção justa da banda e não como a banda disponível. Infelizmente o BART não está disponível para download e nem possui o código aberto.

Um dos pontos que difere nosso trabalho dos citados anteriormente e de outros – como [LÜBBEN; FIDLER; LIEBEHERR \(2014\)](#), [HEI; BENSAOU; TSANG \(2006\)](#) e [IVANCIU et al. \(2014\)](#) - é que todos se baseiam em padrões de redes locais sem fio 802.11a/b/g, os quais já são considerados legados devido ao amplo uso do padrão 802.11n. Este trouxe muitas inovações para melhorar a eficiência da arquitetura e assim alcançar taxas de transmissão mais altas. Tais fatores influenciam diretamente a acurácia das técnicas, causando assim resultados insatisfatórios. Apenas um estudo atual aborda este tema e foi realizado por [FARSHAD et al. \(2014\)](#).

[FARSHAD et al. \(2014\)](#) fazem uma análise das técnicas PathChirp, DietTOPP e WBest no contexto do novo padrão do IEEE. Inicialmente fazem uma análise exploratória com os fatores agregação de quadros e de canais e a multiplexação por divisão espacial. Demonstram que a agregação de quadros é o fator que mais impacta a precisão dos resultados e então focaram neste aspecto para a realização de mais testes. Os resultados experimentais mostraram que as técnicas que seguem o modelo PRM, no caso PathChirp e DietTOPP, foram as que obtiveram melhores resultados. Contudo, como o WBest possui um algoritmo mais simples, é mais rápido e injeta menos dados na rede, os autores o escolheram para realizar análises mais profundas. Diante disto, desenvolveram uma variação chamada WBest+ que utiliza o conceito de *jumbo frames*, ou seja, os pacotes são considerados como um único grande pacote quando forem transmitidos de forma agregada. A banda disponível é estimada a partir da análise da dispersão calculada na recepção entre os *jumbos frames*. Além disso, definiram um tamanho mínimo de pacotes no trem maior que o recomendado pelo WBest original, tal medida visa garantir uma quantidade suficiente de *jumbos* e aumentar a acurácia.

Nosso trabalho é similar ao desenvolvido por eles, porém aumentamos a quantidade de técnicas analisadas e substituímos o fator de multiplexação pela análise da influência do sistema de proteção para compatibilidade com os padrões legados da arquitetura 802.11. Esta condição, apesar de estar presente desde o padrão 802.11g, ainda não foi analisado por nenhum

outro estudo anterior e está cada vez mais presente nas implantações de redes sem fio, pois é configuração padrão em muitos equipamentos para dar suporte a dispositivos que utilizem os paradigmas de rede sem fio anteriores.

2.4 Técnicas analisadas

2.4.1 IGI/PTR

As técnicas IGI e PTR compartilham o mesmo procedimento de sondagem, porém com focos diferentes para calcular a banda disponível. É enviado uma série de trens onde o espaçamento dos pacotes aumenta em cada um, e conseqüentemente a taxa de transmissão diminui, até que a diferença desse espaçamento na origem e no destino seja igual a zero. O IGI então estima o tráfego de *background* através da análise da dispersão dos pacotes e calcula a banda disponível como a diferença entre esse tráfego e a capacidade do caminho de rede. O PTR por sua vez verifica as taxas de transmissão na origem e no destino, indicando a banda disponível como sendo aquela onde a relação entre origem e destino se iguala após ocorrer a congestão. Ao fim de todo procedimento, o IGI/PTR apresenta os dois resultados e sugere qual o mais indicado para utilizar.

Os autores avaliaram o IGI/PTR em medições através da Internet e em simulações no NS-2 [HU; STEENKISTE \(2003\)](#). No primeiro cenário, o foco foi a comparação com o Pathload em termos de acurácia e tempo de convergência, onde ambos obtiveram resultados similares, mas com o primeiro convergindo mais rápido. Foram utilizadas simulações para analisar cenários mais diversificados e os pesquisadores verificaram que o IGI perde precisão quando o link de menor capacidade não é o de menor banda disponível, característica do modelo PGM, indicando que é mais aconselhável a utilização do PTR.

2.4.2 PathChirp

O PathChirp segue o modelo PRM, porém em vez de enviar vários trens de pacotes com diferentes taxas, são enviados *chirps*, que são trens onde os pacotes são espaçados exponencialmente, sendo possível assim avaliar várias taxas a cada envio. Para detectar o ponto onde ocorre a congestão e conseqüentemente calcular a banda disponível, é utilizado o atraso relativo de cada pacote no destino. Quando este começa a aumentar e continua por uma quantidade específica de pacotes, a última taxa de envio em que não houve alteração no atraso é indicada como a banda disponível daquele *chirp*. É então utilizada uma média ponderada dos valores obtidos de cada *chirp* para reportar a estimativa final.

Esta técnica foi desenvolvida por [RIBEIRO et al. \(2003\)](#) e os pesquisadores a avaliaram em um cenário experimental de rede cabeada. O PathChirp é uma técnica complexa e que possui vários parâmetros que podem ser modificados para alcançar melhores resultados. Seus resultados

se mostraram superiores ao TOPP e ao Pathload, convergindo em menor tempo e obtendo mais precisão. Porém, em experimentos de outros autores que aferiram seu desempenho em redes 802.11, demonstrou alta variação e pouca exatidão em seus resultados.

2.4.3 ASSOLO

O método ASSOLO - *Available-bandwidth Smart Sampling On-Line Tool* – foi concebida por [GOLDONI; ROSSI; TORELLI \(2009\)](#) e é baseada no PathChirp. Uma das diferenças está no padrão de espaçamento dos chirps, aqui chamado do REACH (*Reflected Exponential Chirp*) e que consiste em concentrar mais pacotes próximos ao centro do intervalo de valores testados. Os autores indicam que normalmente o valor que corresponde à banda disponível se encontra neste ponto, conseguindo deste modo mais precisão. Além disso, é utilizado um filtro VHF - *Vertical Horizontal Filter* – na análise estatística. Este filtro é uma modificação da EWMA (*Exponentially Weighted Moving Average*) e possui a vantagem de se adaptar dinamicamente de acordo com a tendência da evolução temporal.

O desempenho do ASSOLO foi examinado experimentalmente em ambiente de rede padrão *Ethernet* com *switches* e roteadores. Os resultados foram comparados ao PathChirp em termos de precisão e estabilidade. Nos dois aspectos o ASSOLO foi melhor que o PathChirp. Uma observação que cabe ressaltar é que a implementação foi feita em um sistema operacional de tempo real, o que aumenta a precisão na resolução de tempos necessários para a estimação e com configuração de alta prioridade para a ferramenta, minimizando o impacto das mudanças de contexto.

2.4.4 WBest

A técnica de estimação de banda disponível WBest foi desenvolvida por [LI; CLAYPOOL; KINICKI \(2008\)](#) e foi elaborada para endereçar as características específicas das redes locais sem fio, tendo como objetivo ser rápida, não intrusiva e precisa. Segue o modelo de técnica ativa PGM, baseada na dispersão dos pacotes no destino. É um algoritmo de duas fases, onde na primeira uma série de pares de pacotes são enviados para mensurar a capacidade, pois são menos suscetíveis ao tráfego de segundo plano. A mediana das taxas calculadas para cada par no destino é definida como sendo a capacidade do caminho de rede. Após este procedimento, é enviado um trem de pacotes na taxa estimada da capacidade e então é medida a dispersão dos pacotes e a média é utilizada como estimador para a banda disponível.

A implementação do WBest foi avaliada em um experimento similar ao nosso em termos de *testbed*, mas que contemplou apenas o padrão IEEE 802.11g, e foi observado seu comportamento em casos com variações de tráfego de *background* e adaptação de taxa de transmissão. Na comparação feita pelos autores com IGI/PTR, PathChirp e Pathload, no próprio artigo de apresentação da técnica ([LI; CLAYPOOL; KINICKI \(2008\)](#)), o WBest se mostrou mais preciso e rápido na estimação, além de causar menos sobrecarga na rede. Entre as premissas para

o funcionamento do WBest está que o enlace sem fio deve ser o último do caminho e também é o link com menor capacidade e banda disponível.

2.4.5 YAZ

O YAZ [SOMMERS; BARFORD; WILLINGER \(2006\)](#) é uma técnica baseada no Pathload e que segue o método PRM, enviando vários trens de pacotes com o objetivo de causar uma congestão momentânea na rede. Inicialmente o YAZ envia um trem com o menor espaço entre pacotes possível, calculando a diferença em relação ao espaçamento no destino. Se a diferença absoluta for maior que um valor predeterminado que estabelece o quão grande esta desigualdade pode ser considerada como dentro da banda disponível, o algoritmo incrementa o espaçamento e envia outro trem até que a diferença esteja dentro do limiar configurado. Caso esteja dentro desse limiar, uma média móvel exponencialmente ponderada é atualizada com a taxa de envio. Ao final do processo esta média é reportada como a banda disponível.

O YAZ foi avaliado em conjunto com o Spruce e Pathload de forma experimental, em um *testbed* bem controlado mas bastante completo, apesar de não possuir enlaces de rede sem fio. Seus resultados foram bem melhores que os outros dois em todos os cenários propostos, tanto com a presença de tráfego UDP constante quanto com TCP. Uma limitação desta técnica é que não detecta pequenas congestões durante um trem, devido a utilizar a média dos espaçamentos de todos os pacotes, deste modo, apenas o *cross-traffic* persistente é identificado.

3

Metodologia

Neste capítulo descrevemos a metodologia que pautou nosso experimento. Nosso objetivo foi analisar as técnicas de estimação de banda disponível em um ambiente próximo ao real, porém de maneira controlada. Buscamos, em uma escala menor, montar uma topologia para comunicação entre dois computadores, um servidor e um cliente, sobre a qual as técnicas realizaram a estimação de banda disponível para o caminho de rede entre eles e assim poder analisar e quantificar o impacto causado pelas novas características presentes no padrão IEEE 802.11n, neste caso a agregação de pacotes e de canal, além do sistema de compatibilidade. Mais dois computadores são introduzidos para gerar tráfego de segundo plano, visto que dificilmente os dados passam de maneira exclusiva em um caminho de rede no mundo real.

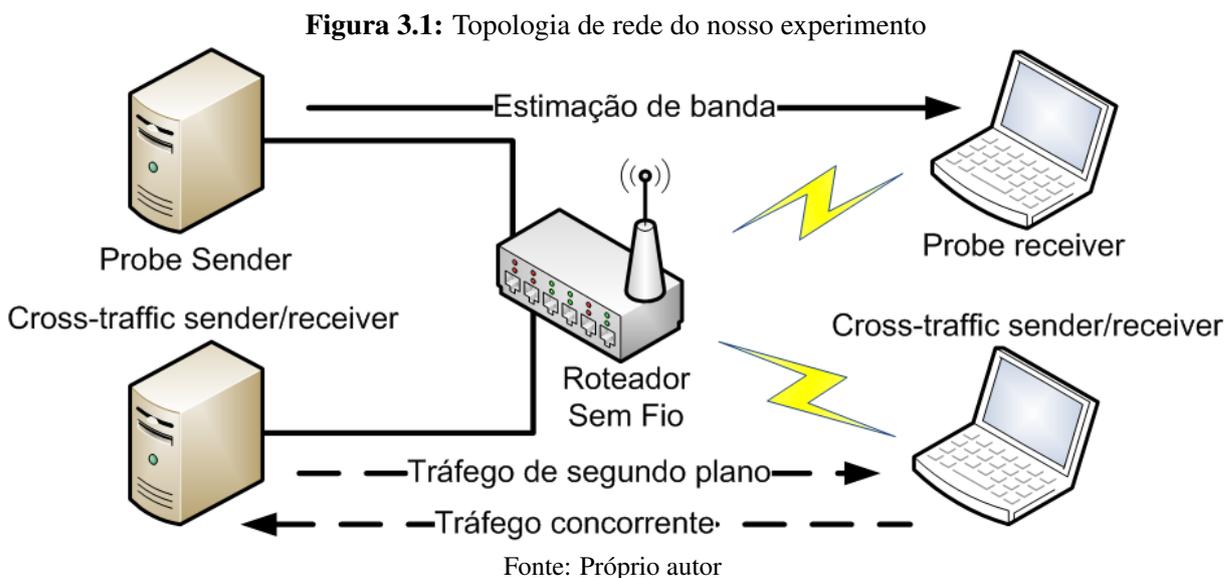
Também expomos os equipamentos e softwares utilizados, bem como as limitações do nosso cenário. Por fim, explicamos a metodologia para análise estatística, desde a construção do número de repetições à análise dos dados colhidos.

3.1 Design do experimento

Antes de montar um laboratório para realizar um experimento, é importante pensar bem no mesmo e em quais resultados visamos atingir, definindo quais condições serão simuladas. Inspirados pelos trabalhos relacionados e com a nossa experiência empírica, estabelecemos como as técnicas escolhidas serão analisadas em nosso ambiente controlado e como ele será montado.

Dividimos nosso experimento em duas fases, onde a primeira é mais genérica. Todas as técnicas são executadas com sua configuração padrão em todos os casos propostos. Objetivamos com isto definir quais são mais robustas e quais possuem mais problemas para estimar a banda disponível. A topologia de rede proposta pode ser vista na figura 3.1. Nosso objetivo é montar um cenário simples, pois assim podemos manter um controle maior sobre as variáveis e isolar melhor os fatores avaliados, uma vez que, como é possível verificar nos trabalhos anteriores, a presença de enlaces de rede sem fio por si só já afeta os resultados das técnicas.

Na segunda parte de nossa pesquisa, analisaremos com mais detalhes a técnica do YAZ, visando entender a causa dos erros em seus resultados. Para isto, realizamos os experimentos



com a coleta de mais dados, como *timestamps* dos pacotes, e confrontando-os com o algoritmo da implementação.

Tendo em vista que a frequência 2.4GHz é muito poluída e suscetível à interferência, devido a existência de muitos dispositivos e redes que a utilizam, decidimos realizar nossos experimentos na frequência de 5GHz, pois o local onde montamos nosso *testbed* não possui outras redes que ocupem esse espectro. Deste modo, podemos garantir que nossos resultados não serão afetados por influências externas ao experimento, como perdas de pacotes e variações de sinal ocasionados pela presença de outros dispositivos compartilhando o mesmo espectro. Além disso, iremos trabalhar apenas com o modo infraestrutura do padrão 802.11, que tem seu funcionamento explanado na seção 2.1.1. Também buscamos garantir que a taxa de transmissão física se mantenha fixa e no nível mais alto através da proximidade entre os equipamentos, da não interferência externa e utilizando um comando do Linux chamado *iw*, que permite, entre outras opções, configurar a modulação e codificação que está sendo utilizada.

3.2 Fatores e níveis

Nosso objetivo é estudar a influência de características presentes no padrão 802.11n que podem influenciar as estimativas de banda disponível executada por técnicas ativas. Por isso delimitamos nossa avaliação pela análise das propriedades da agregação de quadros e de canal e o sistema de compatibilidade com dispositivos legados para nosso experimento, este último causa uma diminuição na vazão da rede e também maior variação na dispersão dos pacotes, por isto decidimos estudar sua influência na acurácia das técnicas ativas de estimativa de banda disponível. Na pesquisa desenvolvida por [FARSHAD et al. \(2014\)](#) é apontado que a tecnologia de MIMO, apresentada na seção 2.1.2.3, influencia na precisão das técnicas de estimativa de banda, contudo, os equipamentos que utilizamos em nosso laboratório não suportam a manipulação

desta característica, motivo pelo qual não incluímos este fator. Outro fator que não pudemos avaliar foi a agregação de quadros A-MSDU, pois sua transmissão não está implementada no *firmware* original do ponto de acesso sem fio e nem em alternativos como OpenWRT e DD-WRT.

Além destas três propriedades, também variamos a quantidade de tráfego em segundo plano e concorrente no caminho de rede, onde o primeiro segue a mesma direção do tráfego da estimação e o outro em sentido contrário. Este tráfego é UDP, possuindo taxa constante e constituído de pacotes iguais com tamanho de 1470 *bytes*, variando em intensidade. Sabemos que esta forma não é realista, mas é o suficiente para nosso experimento e foi utilizada em diversos trabalhos anteriores (ZHAO et al., 2011) (OLVERA-IRIGOYEN et al., 2011) (LI; CLAYPOOL; KINICKI, 2008) (FARSHAD et al., 2014). Em uma pesquisa futura podemos incluir diferentes padrões. Na tabela 3.1 é possível verificar os fatores e seus níveis.

Tabela 3.1: Sumário dos fatores e níveis. *Em relação à capacidade de transmissão do enlace sem fio.

Fator	Níveis
Técnicas avaliadas	IGI, PTR, PathChirp, ASSOLO, WBest e YAZ
Agregação de quadros	Sem agregação, com agregação A-MPDU
Agregação de canais	20MHz, 40MHz
Sistema de compatibilidade	Desativado, Ativado
Intensidade do tráfego de segundo plano*	0%, 10%, 30%, 50%, 70% e 90%
Direção do tráfego de segundo plano	Mesmo sentido, Contrário

3.3 Ambiente de experimentação

O diagrama do nosso ambiente de experimentação pode ser visualizado na imagem 3.1. *Testbeds* similares foram utilizados nos trabalhos relacionados (IVANCIU et al., 2014)(FARSHAD et al., 2014)(OLVERA-IRIGOYEN et al., 2011)(LI; CLAYPOOL; KINICKI, 2008)(BREDEL; FIDLER, 2008). Apesar de parecer simples, esta estrutura consegue ajudar a compreender o desempenho das técnicas quando executadas em redes IEEE 802.11, visto que este enlace sem fio é a parte mais importante na influência de seus desempenhos.

3.3.1 Equipamentos

Nossa plataforma de testes foi montada utilizando quatro notebooks e um roteador com ponto de acesso sem fio. Dois deles estão conectados utilizando placas de rede *Gigabit Ethernet* e os demais utilizam conexão sem fio padrão 802.11a/n. Para escolha do roteador, realizamos testes com dois modelos, um Xiaomi Wireless Router e um TP-LINK TL-WDR3600. Ambos suportam o padrão 802.11n nas frequências 2.4GHz e 5GHz e foram testados com os *firmwares* originais. Como os testes iniciais mostraram uma equivalência no desempenho dos dois e das

técnicas de estimação, optamos pelo último por ser um equipamento mais comum e fácil de encontrar no mercado. A tabela 3.2 sumariza detalhes sobre estes dispositivos.

Tabela 3.2: Resumo dos detalhes sobre os equipamentos.

Dispositivo	Equipamento	Detalhes
Probe sender	Notebook LG A560	Intel Quad-Core i7-3630QM CPU @ 2.40GHz, 4GB de RAM e interface de rede Intel Gigabit Ethernet.
Cross-traffic sender/receiver	Notebook Lenovo Thinkpad T400	Intel Dual-Core Core2Duo P8600 CPU @ 2.40GHz, 2GB de RAM e interface de rede Intel Gigabit Ethernet.
Probe receiver	Notebook HP 6360b	Intel Dual-Core i3 23 1 0M CPU @ 2.1 GHz, 4GB de RAM e interface de rede sem fio IEEE 802.11a/b/g/n
Cross-traffic receiver/receiver	Notebook HP 6360b	Intel Dual-Core i3 23 1 0M CPU @ 2.1 GHz, 4GB de RAM e interface de rede sem fio IEEE 802.11a/b/g/n
Roteador com ponto de acesso sem fio	TP-LINK WRD3600	TL-CPU AR9344 (MIPS) 560 MHz , 128MB de RAM, chipsets Atheros AR9340 2.4GHz 802.11bgn e Atheros AR9582 5GHz 802.11an, Atheros AR8327N Gigabit Switch

3.3.2 Softwares

A escolha dos *softwares* que servirão como base para realização dos experimentos também é uma escolha muito importante e normalmente é dada preferência aos sistemas de código aberto, devido às possibilidades de customização e análise mais aprofundada. Todos os *hosts* do nosso *testbed* utilizaram Linux Debian como sistema operacional. A escolha dos notebooks com placas Intel se deve à possibilidade de utilizarmos o driver *iwlwifi*, o qual permite a manipulação de parâmetros para desabilitar/habilitar funcionalidades. Entre estas, desabilitamos a coexistência com o *BlueTooth* para não prejudicar o desempenho, pois, nos *chipsets* Intel utilizados pelos *notebooks* do nosso *testbed*, *Wifi* e *BlueTooth* são integrados na mesma placa e há relatos na Internet sobre problemas de desempenho no Linux quando ambos estão ativados. Através do mesmo módulo ativamos/desativamos a agregação de quadros.

Para gerar o tráfego de segundo plano e concorrente utilizamos o *Distributed Internet Traffic Generator* – D-ITG (BOTTA; DAINOTTI; PESCAPÈ, 2012) - gerador de tráfego bastante utilizado em medições de rede. Com ele também mensuramos os valores de referência para comparar com as estimações. As técnicas de estimação avaliadas são as descritas no tópico 2.4 e a tabela 3.3 nos mostra o resumo dos sistemas utilizados.

Tabela 3.3: Softwares e versões utilizadas no experimento.

Softwares	Versão
Sistema Operacional	GNU/Linux Debian Stretch/SID 64 bits
Driver Wireless Intel iwlwifi	iwlwifi-6000g2a
D-ITG	2.8.1
ASSOLO	0.9a
IGI/PTR	2.1 (Versão Normal)
PathChirp	2.4.1
WBest	1.0
YAZ	1.8
Firmware TP-LINK TL-WRD3600	3.14.3

3.4 Metodologia estatística

Pretendendo garantir significância estatística para nossos resultados, definimos alguns pontos em nosso experimento e análises. O primeiro aspecto é a quantidade de execuções de cada combinação de fatores e níveis. Cada execução do experimento possui duração de trinta segundos e foi repetida trinta vezes, valores estes definidos de acordo com nossos testes iniciais, trabalhos relacionados e conhecimento empírico. Os resultados são colhidos a cada execução e é calculada uma média para termos uma observação, gerando trinta observações para cada combinação de fatores.

Analisaremos as observações a partir de dois pontos de vista. Inicialmente compararemos as estimações das técnicas através das observações obtidas e os valores de referência, visando observar o comportamento, tendência e precisão. Posteriormente, calcularemos a raiz média do erro quadrático (*Root Mean Square Error - RMSE*) para verificar quais técnicas conseguiram resultados com menor margem de erro, pois segundo [HALLAK; PEREIRA FILHO \(2011\)](#), "esta é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de que RMSE apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada". Este é um método muito usado para comparação de estimadores e algumas de suas vantagens podem ser vistas na pesquisa de [CHAI; DRAXLER \(2014\)](#). Para todos os resultados foram calculados intervalos de confiança de 95%.

Os valores de referência que utilizamos foram calculados a partir da saturação da rede. Deste modo, executamos o gerador de tráfego D-ITG para encontrar uma taxa de transmissão onde a perda de pacotes seja mínima e no caso da presença de tráfego de segundo plano, ambos são executados simultaneamente. Encontrada esta taxa, realizamos execuções da mesma forma como descrevemos no primeiro parágrafo deste tópico.

4

Análise dos resultados

Neste capítulo apresentamos as análises feitas sobre os dados colhidos durante os experimentos, seguindo a metodologia descrita em 3.4. Nosso objetivo é estudar o comportamento das técnicas listadas no tópico 2.4 em um ambiente de rede sem fio IEEE 802.11n, especificamente sob o ponto de vista de algumas características inerentes a este padrão e que afetam os resultados providos por tais métodos de estimação.

Devido à quantidade de técnicas de estimação avaliadas, apresentamos os resultados sempre em dois gráficos (a e b), cada um com metade das avaliações. Esta exposição está dividida em quatro sub-tópicos, nomeadamente cenário de referência, agregação de quadros, sistema de compatibilidade e tráfego concorrente.

4.1 Cenário de referência

Este cenário é chamado de referência por ser o mais simples, sem que nenhum dos fatores indicados como problemáticos esteja ativado. Deste modo, este caso se comporta de maneira similar às redes legadas, exceto pela velocidade de transmissão da camada Física que é maior, e consequentemente a capacidade efetiva também.

A figura 4.1 apresenta os primeiros valores para este contexto, onde podemos ver os resultados do IGI, PTR e WBest. Este último, apesar de não obter o melhor resultado, segue quase que perfeitamente a tendência dos valores de referência. Observamos durante o experimento que a primeira fase de seu algoritmo sempre estima a capacidade da rede muito abaixo da real e como a outra parte depende do valor obtido, a estimação sempre fica abaixo do esperado. O IGI e o PTR obtiveram valores muito próximos até a presença de 30% de tráfego de segundo plano, a partir de onde eles começaram a se distanciar, tendo o segundo alcançado com precisão os valores de referência. Isto corrobora com a sugestão dos seus autores ([HU; STEENKISTE, 2003](#)) para o uso do PTR, pois possui maior precisão.

As outras três técnicas restantes também podem ser visualizadas no gráfico da figura 4.1. A estimativa apresentada é uma média das amostras coletadas para cada combinação de fatores, enquanto que as barras indicam o intervalo de confiança. O YAZ estimou quase que

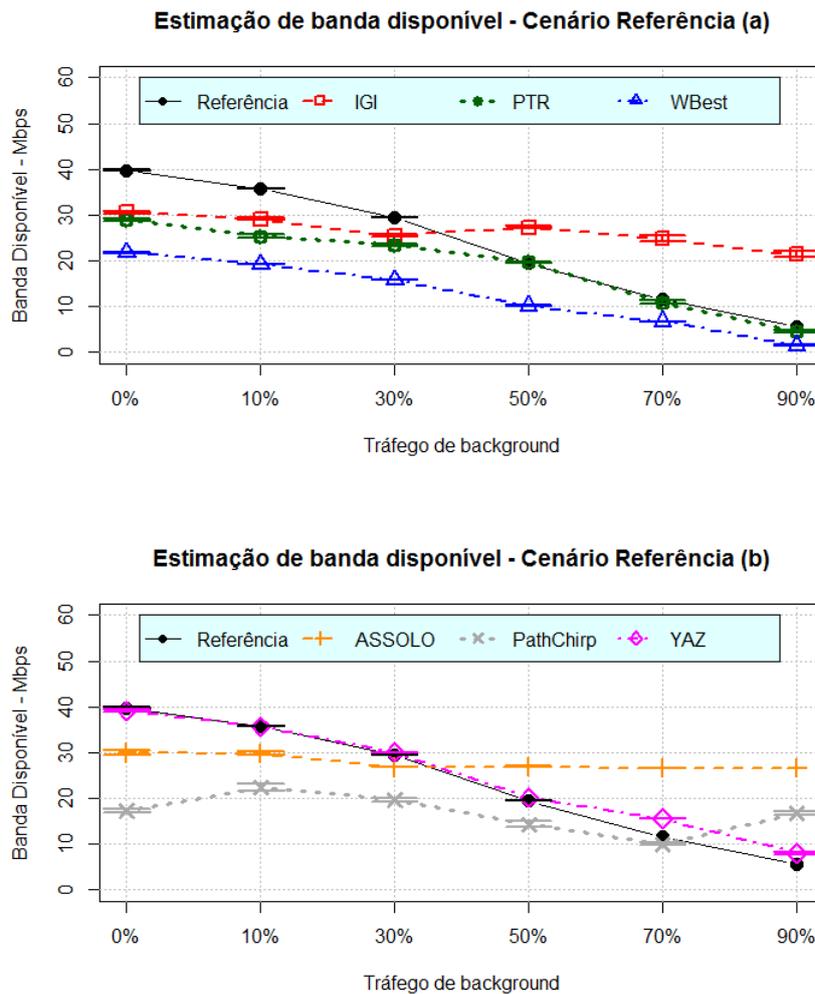


Figura 4.1: Estimação de banda para o cenário de referência

perfeitamente na presença de todas as variações de tráfego de *background*, possuindo o melhor resultado para este cenário entre as seis técnicas avaliadas. Um dos motivos que podem ter feito a diferença em seu resultado é que seu algoritmo leva em consideração tanto a compressão quanto a expansão na análise dos atrasos. O ASSOLO é baseado no PathChirp e ambos utilizam o mesmo esquema para detectar o aumento dos atrasos relativos. Como é possível verificar em seus resultados, o problema deve ser este método, visto que ambos obtiveram a mesma tendência, porém o primeiro com valores mais altos.

Para que possamos ter uma visão melhor do erro e sua tendência nas estimativas, a figura 4.2 traz a raiz do erro quadrático médio dos resultados (*Root Mean Square Error - RMSE*). O WBest e PTR tendem a diminuir o erro a medida que o tráfego de segundo plano aumenta, enquanto que o IGI tem sua margem aumentada consideravelmente. No caso do YAZ, vemos com facilidade como suas estimativas têm uma margem muito pequena de erro, com uma tendência de se manter praticamente estável, com um pequeno aumento na taxa de 70%.

PathChirp e ASSOLO tem linhas similares, porém com uma diferença no ponto onde o

erro inicia seu incremento. É possível que o cálculo de atrasos negativos possa ter ocasionado estes resultados. Isto foi visto por nós através em um registro de depuração do PathChirp no caso com ausência de tráfego de *background* e pode ocasionar que a assinatura utilizada por ambos identifique de maneira errada o aumento do atraso, que na situação verificada induzia o algoritmo a identificar a congestão muito cedo, causando subestimações como visto nos resultados aqui apresentados. A causa desses atrasos relativos negativos pode ser a presença de *buffers* ou *interrupt coalescing*, pois eles introduzem mais variação no atraso relativo entre os pacotes, causando compressão ou expansão em relação ao valor original. Tais influência são citadas, por exemplo, nas pesquisas desenvolvidas por FARSHAD et al. (2014) e SOMMERS; BARFORD; WILLINGER (2006).

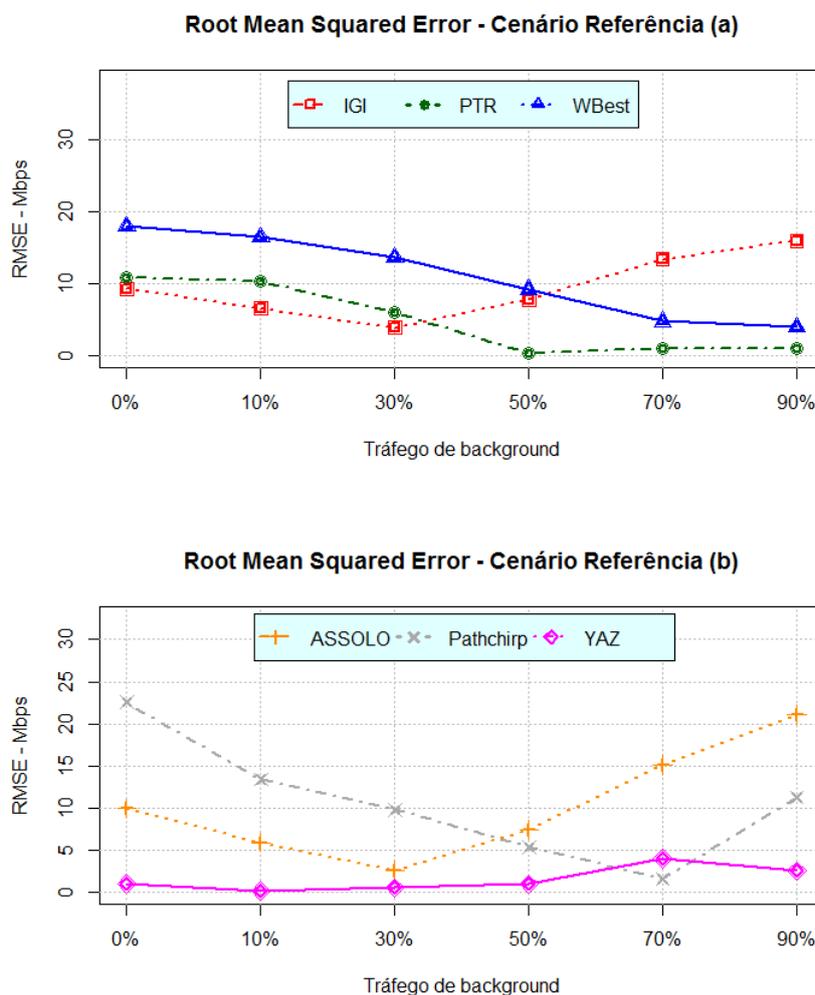


Figura 4.2: Raiz do erro quadrático médio para o cenário de referência

4.2 Agregação de canais

A técnica de *channel bonding* – ou agregação de canais – consiste na utilização de um canal de 40Mhz de largura do espectro em vez dos 20Mhz dos padrões anteriores, ressaltando que redes 802.11n suportam os dois tipos. Isto garante um ganho expressivo de velocidade de transmissão na camada Física. Incluímos este fator em nossa pesquisa pois o estudo preliminar desenvolvido por FARSHAD et al. (2014), mostrou que é gerada uma influência nas estimações de banda disponível.

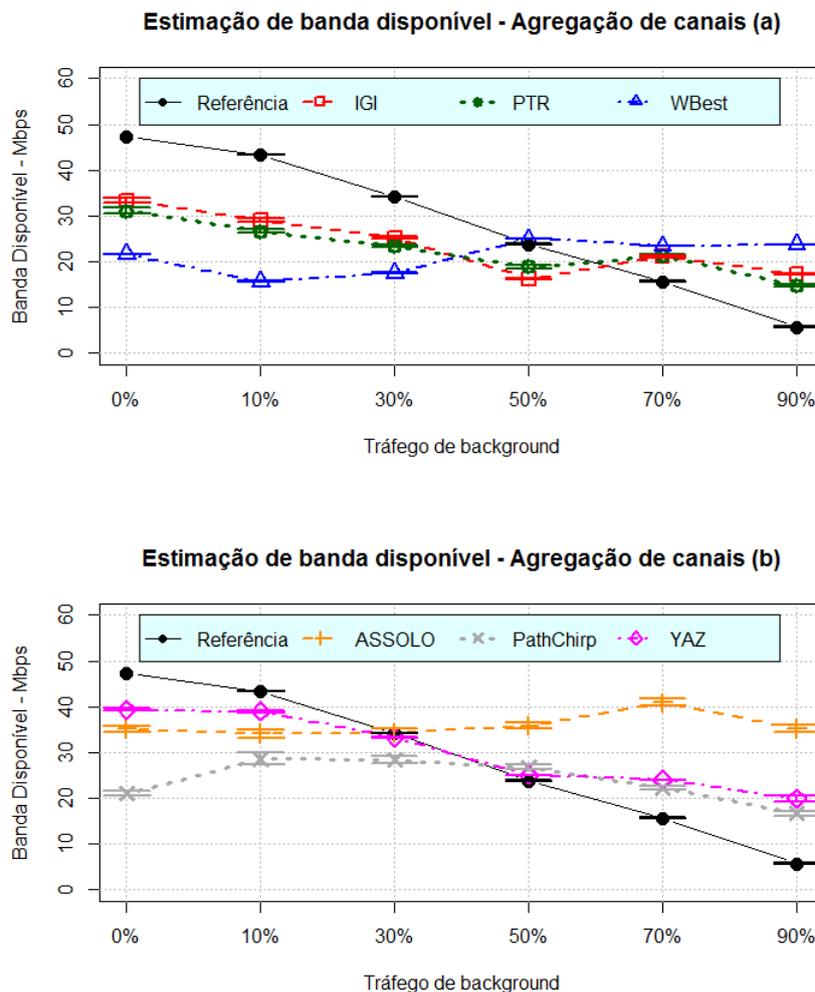


Figura 4.3: Impacto da agregação de canais na estimção.

Os gráficos presentes nas imagens 4.3 e 4.4 nos mostram os resultados colhidos para este contexto. É possível verificar que os resultados são semelhantes com os apresentados no cenário de referência do tópico 4.1, com algumas poucas variações. Em nossa opinião, estas são mais devidas ao aumento da taxa – do que pode aumentar a margem do erro – que com o agrupamento de canais por si só. Um ponto que vale evidenciar é que mesmo com o dobro da capacidade de transmissão física, o ganho na capacidade efetiva foi aproximadamente 30%.

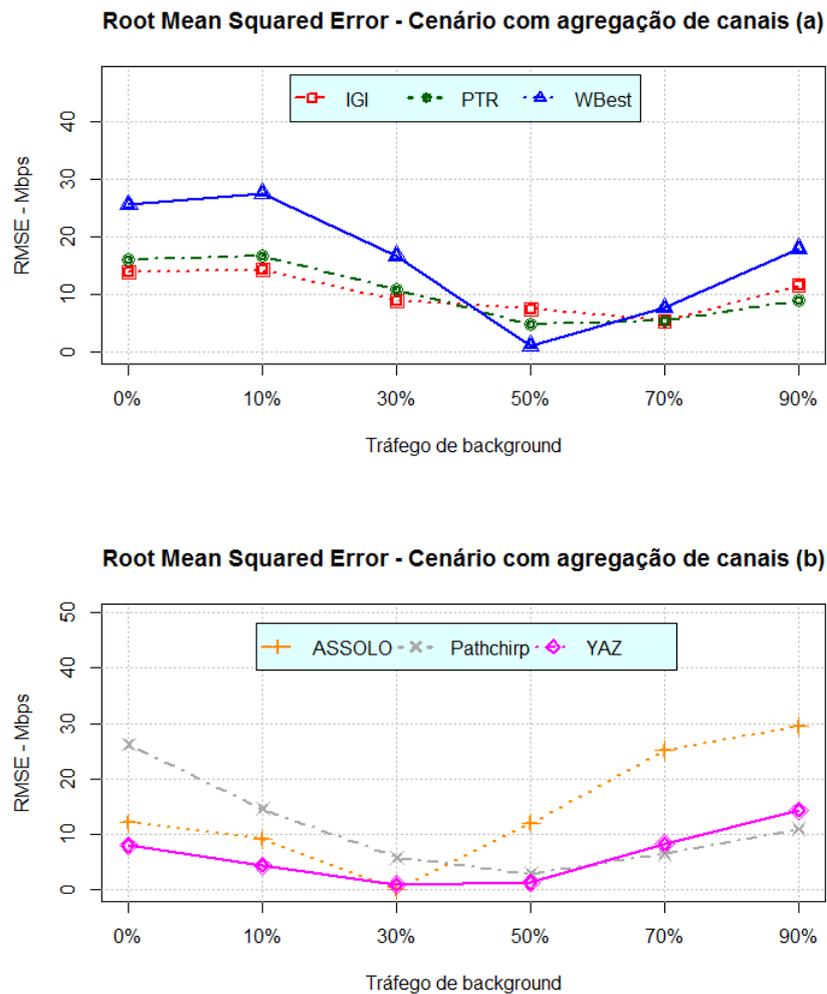


Figura 4.4: Impacto da agregação de canais na estimação - RMSE.

4.3 Sistema de compatibilidade

O terceiro cenário em termos de complexidade para as técnicas de estimação passiva é o sistema de compatibilidade com padrões anteriores ao protocolo IEEE 802.11n. Devido à introdução do sistema RTS/CTS, este fator pode causar mais variações nos atrasos e dispersão dos pacotes de sondagem, prejudicando a acurácia das técnicas. Uma observação importante a fazer é que o receptor do tráfego de segundo plano está conectado utilizando o padrão 802.11a, para assim ativar a compatibilidade, e deste modo só consegue alcançar as taxas de transmissão pertencentes a este modelo, as quais são menores que a do receptor do tráfego de sondagem. Diante disto, as variações do tráfego de segundo plano utilizadas aqui são referentes a estas taxas alcançáveis pelo receptor.

Este mecanismo parece afetar mais as técnicas que utilizam a dispersão dos pacotes (PGM). Podemos ver no gráfico 4.5 que o WBest perdeu precisão em relação ao cenário anterior, inclusive com maior variação nos resultados, conforme podemos ver nos intervalos de confiança.

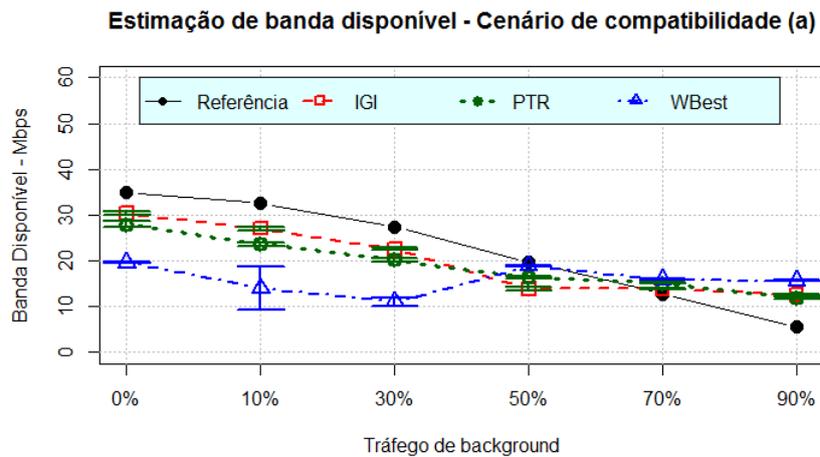


Figura 4.5: Estimação de banda com a compatibilidade ativada (a)

O IGI também foi afetado, contudo, foi melhor para seu algoritmo, pois manteve a proximidade do valor real nas três primeiras variações de tráfego cruzado e melhorou nos demais quando comparado ao cenário 1, estando próximo à referência. O PTR praticamente manteve seu nível de precisão e tendência, com uma piora na presença de maior intensidade de tráfego.

Na imagem 4.6 podemos visualizar os resultados das demais técnicas. Novamente o YAZ foi a técnica com maior acurácia, permanecendo próximo aos valores de referência e com pouca variação na amostra, não sofrendo com a presença do sistema de proteção. Já os outros dois, ASSOLO e PathChirp, obtiveram resultados piores, estimando acima dos valores de referência em quase todos os casos. A presença dos pacotes RTS/CTS deve ter potencializado o problema relatado no caso de referência.

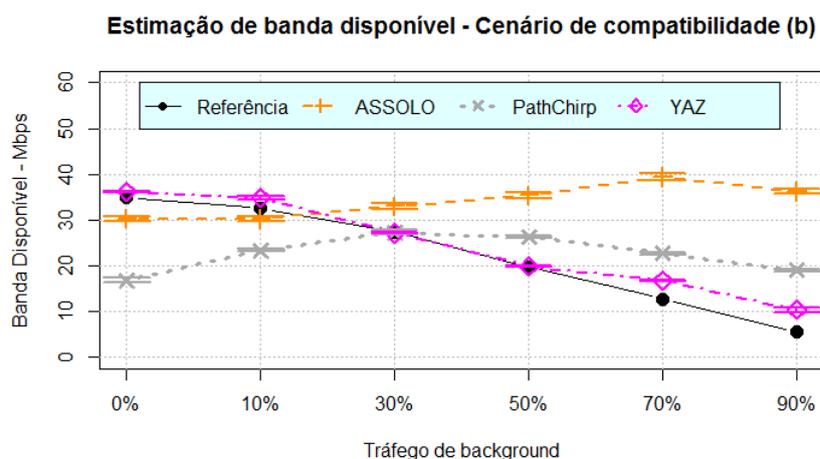


Figura 4.6: Estimação de banda com a compatibilidade ativada (b)

Os gráficos RMSE (figuras 4.7 e 4.8) nos mostram com mais nitidez o comportamento das tendências apresentadas pelos resultados. A curva do erro do WBest nos primeiros resultados se mostra bem mais acentuada que no caso anterior, enquanto que a do IGI apresenta um aumento

de precisão. Apesar do YAZ ter tido bons resultados, podemos ver que houve um aumento na sua margem de erro. Esta variação em relação ao cenário de referência pode ser causada pela introdução de maior aleatoriedade na transmissão devido ao esquema RTS/CTS e talvez por este motivo, todos os trabalhos relacionados citados nesta pesquisa desativem esta opção em seus experimentos.

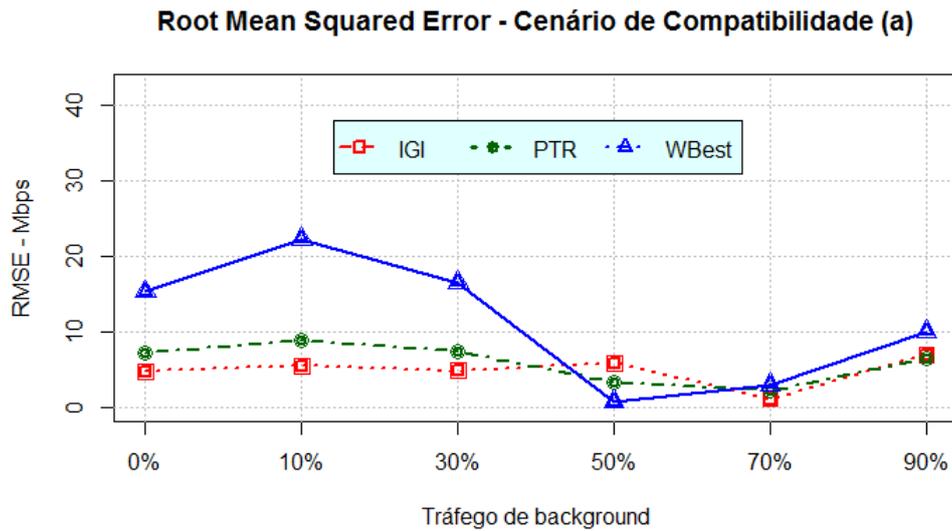


Figura 4.7: Raiz do erro quadrático médio com a compatibilidade ativada (a)

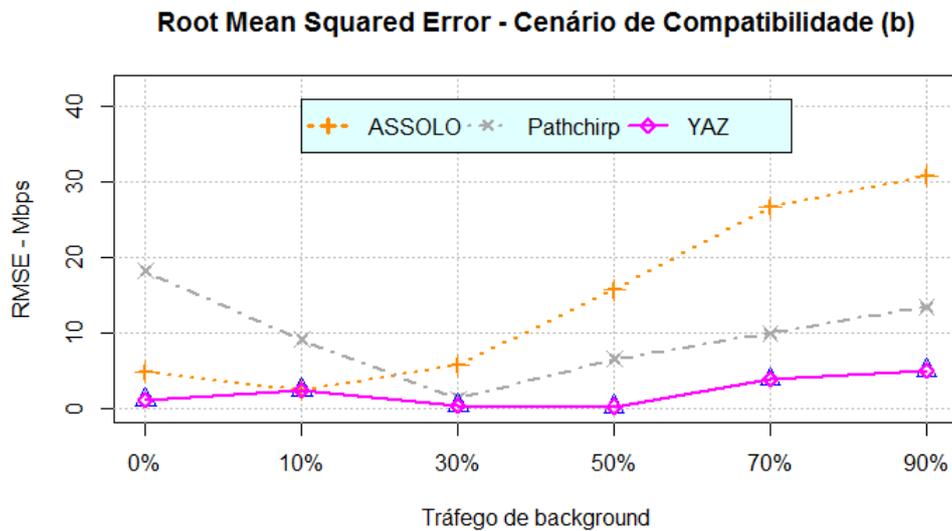


Figura 4.8: Raiz do erro quadrático médio com a compatibilidade ativada (b)

4.4 Agregação de quadros

A agregação de quadros é o fator que mais impacta no desempenho dos métodos ativos de estimação de banda disponível. Isto se deve ao fato de os pacotes de sondagem terem a possibilidade de ir juntos em um quadro agregado, causando uma superestimação, ou irem uns agregados e outros não, aumentando bastante a variação das estimações. Como mencionado no tópico do cenário de referência, a presença de *buffers* e *interrupt coalescing* podem causar efeito similar, porém o impacto deste tipo de agregação é ainda maior.

Podemos ver este comportamento de aumento da variabilidade das estimações no caso do IGI no gráfico 4.9. Os intervalos de confiança estão bem maiores que nos casos anteriores, chegando a ficar entre 116.722 e 157.998Mbps no caso de 70% de tráfego de *background*. As técnicas PRM normalmente são mais robustas e o PTR possui pouca variação nos resultados, porém estimou valores bem abaixo em todos os casos avaliados. No caso do WBest, os valores da estimação informados por ele apresentaram números muito grandes e negativos, na casa dos milhares de Mbps e por isso decidimos não incluir no gráfico. Contudo, o algoritmo informa uma métrica chamada *achievable throughput* que possui um valor próximo do real e que é parte do cálculo da estimação da banda disponível, deste modo podemos concluir que o erro encontra-se nesta etapa de inferência da banda disponível em relação ao *achievable throughput*. Diante disto, podemos considerar que o WBest é muito afetado pela agregação.

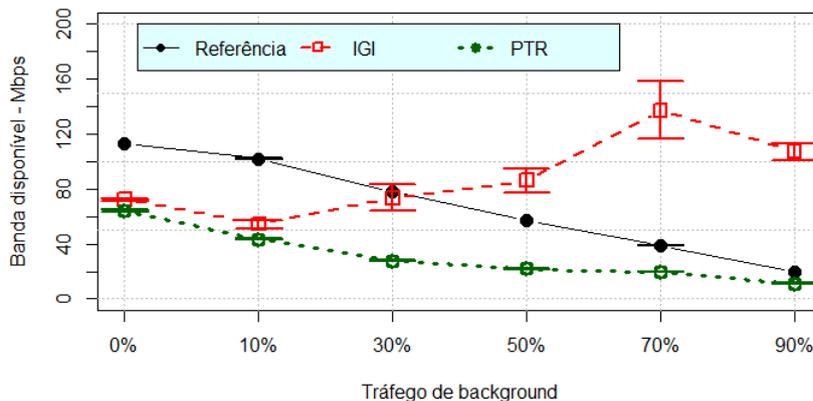


Figura 4.9: Estimação de banda com agregação de quadros (a)

O ASSOLO foi outro método de estimação que obteve resultados muito distantes do valor de referência quando na presença de quadros agregados. Não os colocamos no gráfico para não prejudicar a visualização do mesmo, pois houve vários pontos que passaram dos 200Mbps. Sua técnica de inspiração, o PathChirp mensurou valores iniciais abaixo do esperado até 30%, quando apontou o resultado correto. Contudo, no restante, os valores superestimaram bastante a banda disponível. O procedimento de estimação do YAZ também foi influenciado pela agregação. Nos cenários anteriores o mesmo foi o que obteve o melhor desempenho, estando sempre próximo

aos valores de referência, porém suas estimações ficaram aquém do esperado até 50% de tráfego de segundo plano, aproximando-se nos últimos níveis.

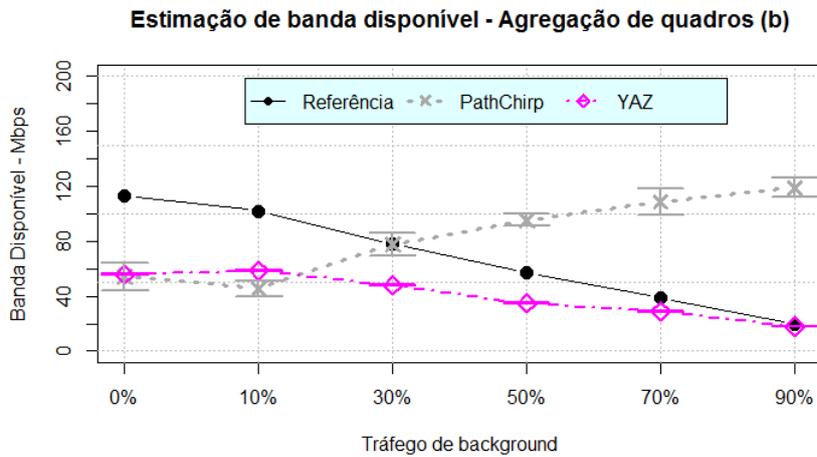


Figura 4.10: Estimação de banda com agregação de quadros (b)

As técnicas ativas de estimação de banda perdem precisão quando os quadros são agrupados. A comparação dos erros produzidos pelos métodos aqui avaliados podem ser vistos nas imagens 4.11 e 4.10. Podemos visualizar que houve um incremento considerável na escala dos erros. O YAZ e o PTR possuem uma tendência similar de diminuir o erro com a presença de tráfego de *background*. Um fator que contribui para que o ASSOLO e PathChirp resultarem em valores ruins pode ser devido ao tamanho do seu trem de chirps ser relativamente pequeno em relação ao YAZ e ao PTR. Como citado por trabalhos anteriores, o tamanho do trem de pacotes influencia muito no desempenho da estimação.

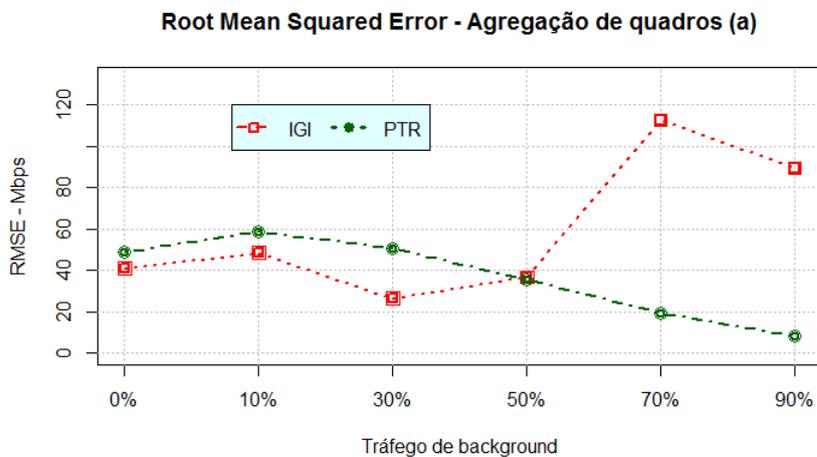


Figura 4.11: Raiz do erro quadrático médio com agregação de quadros (a)

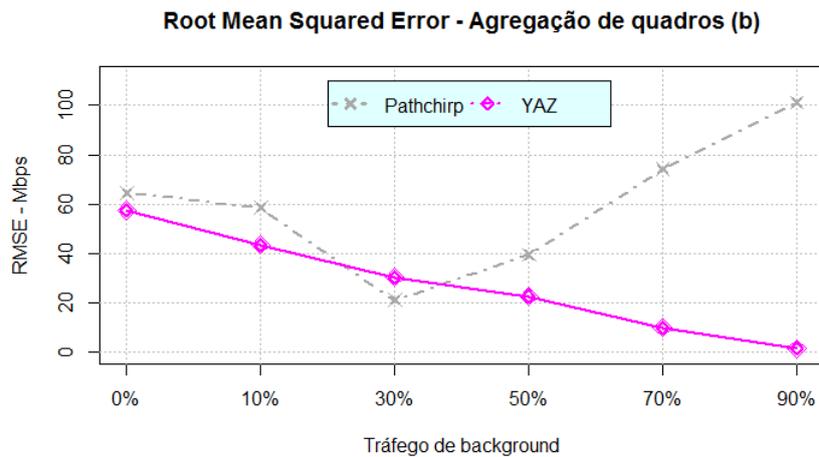


Figura 4.12: Raiz do erro quadrático médio com agregação de quadros (b)

4.5 Tráfego concorrente

Um ponto importante na análise experimental que envolve redes sem fio é o tráfego concorrente, também chamado de contenção. Este tráfego parte do cliente sem fio e disputa o meio com os demais clientes, ocasionando maior *overhead* na camada MAC. Nos cenários anteriores os dois tráfegos gerados, segundo plano e de estimação, seguem a mesma direção e deste modo apenas o roteador sem fio transmite, com os clientes enviando apenas ACKs de resposta, sem concorrer pelo acesso ao meio.

Este tópico é bastante relevante por que afeta diretamente o conceito de banda disponível, pois no sistema DCF e com a presença de tráfego de contenção, um novo fluxo não possuirá a banda disponível para uso, mas uma porção justa da capacidade da rede. Isto quer dizer que se um enlace sem fio possui capacidade efetiva de 30Mbps e dois fluxos forem configurados para gerar 20Mbps cada, na prática cada um só vai alcançar aproximadamente 15Mbps. Desta forma, as técnicas de estimação tendem a reportar esta porção em vez da banda disponível. Este problema foi apontado por [BREDEL; FIDLER \(2008\)](#), que fez uma análise experimental e demonstrou este impacto.

Nós avaliamos as técnicas sob este contexto e verificamos que para o mesmo cenário os resultados mudam bastante, indicando que este tipo de tráfego realmente tem um comportamento diferente do tráfego de dados em segundo plano. Os gráficos presentes nas imagens 4.13 e 4.14 mostram a diferença no comportamento das técnicas analisadas quando executadas nos cenários de referência e com agregação de quadros. É possível observar que as variações e tendências mudam consideravelmente na presença de tráfego concorrente.

Conforme foi evidenciado na pesquisa de [BREDEL; FIDLER \(2008\)](#), é possível observar que as estimativas tendem a se manter estáveis mesmo com a variação do tráfego presente. Não conseguimos inclusive saturar a rede para verificar a banda disponível efetiva, assim como fizemos nos testes anteriores, pois em vez de perder pacotes quando a capacidade total era

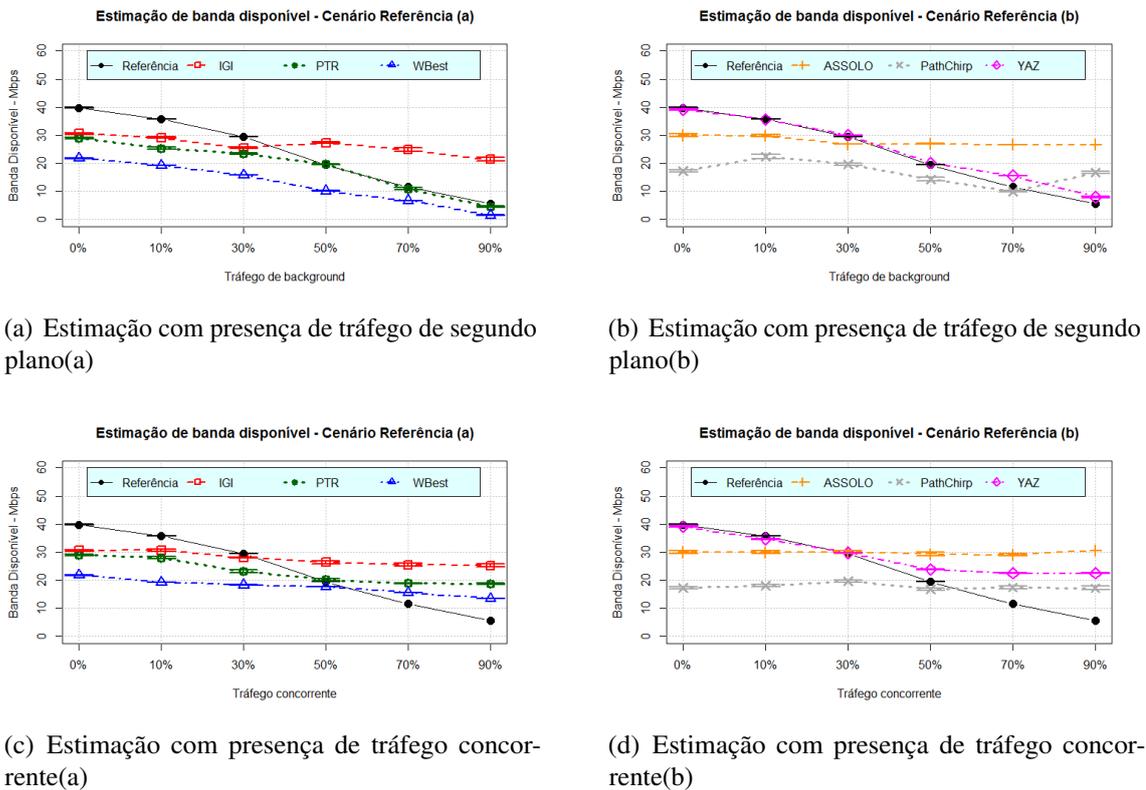


Figura 4.13: Influência do tráfego concorrente no cenário de referência.

atingida, os tráfegos se adaptavam e atingiam fatias justas da capacidade, se complementando na formação desta.

A análise mais profunda do comportamento do mecanismo DCF e do tráfego de contenção foge do escopo desta pesquisa, mas vemos que é de suma importância para pesquisas nesta área que este tópico seja melhor estudado, inclusive com uma possível modelagem de um novo conceito de banda disponível, pois esta porção de rede alcançada neste contexto é realmente a quantidade de banda que uma aplicação poderá utilizar.

4.6 YAZ

4.6.1 Análise de opções de implementação

Embasado pelos resultados e análises realizadas nos tópicos anteriores, escolhemos a técnica YAZ para realizar experimentos mais específicos. Este método se baseia no princípio de enviar trens de pacotes com diferentes taxas e mensurar a média dos espaçamentos dos pacotes pertencentes ao trem na origem e no destino. A banda disponível é estimada de acordo com a diferença entre esses valores, conforme equação 4.1, onde $\overline{g_{in}}$ e $\overline{g_{out}}$ representam a média dos espaçamentos na origem e no destino, respectivamente. A taxa de transmissão é retratada por r_{in} e a banda disponível por A . Deste modo, a partir da relação entre a diferença absoluta destes

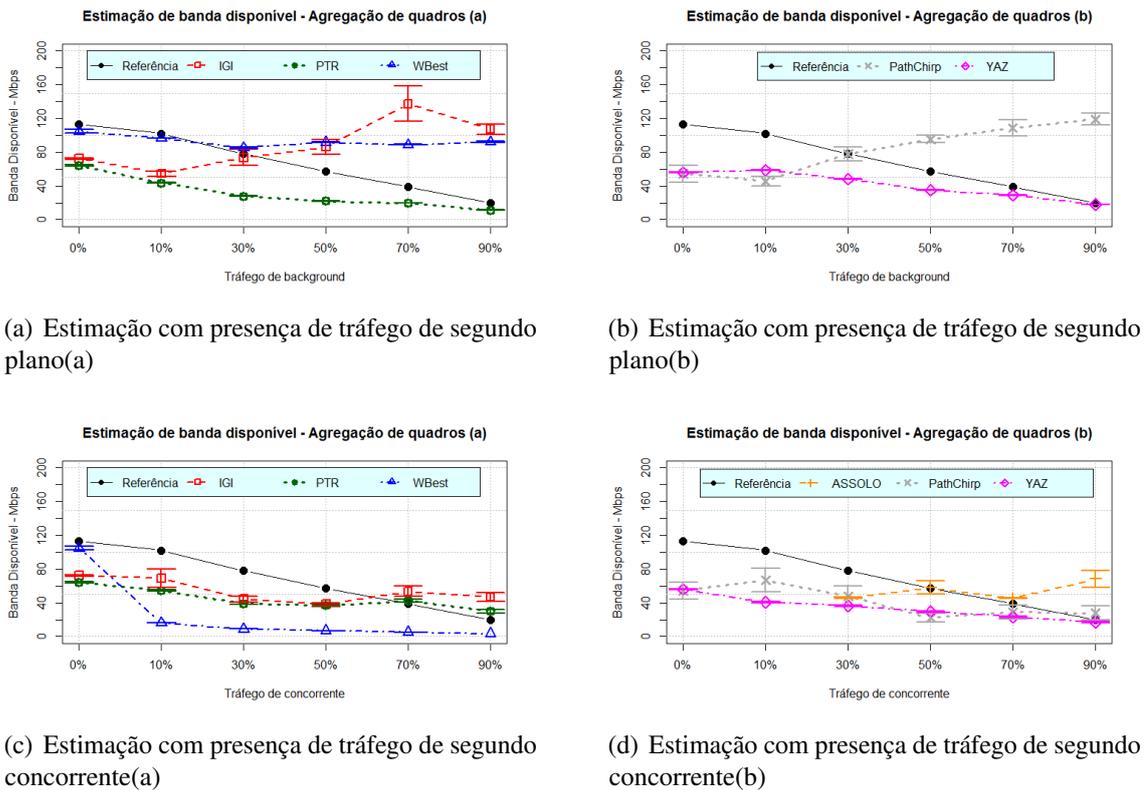


Figura 4.14: Influência do tráfego concorrente no cenário da agregação de quadros.

espaçamentos e o limiar, caracterizado por $\zeta * \overline{g_{in}}$, é possível inferir se a taxa transmitida é maior ou menor que a banda disponível.

$$|\overline{g_{in}}| - |\overline{g_{out}}| = \begin{cases} \leq \zeta * \overline{g_{in}} & r_{in} \leq A \\ \geq \zeta * \overline{g_{in}} & r_{in} \geq A \end{cases} \quad (4.1)$$

Em conformidade com nossos experimentos, é possível verificar que a agregação de quadros é o fator, aqui analisado, que possui maior influência nas estimções realizadas pelo YAZ, bem como pelos demais métodos. Este foi preferível às outras técnicas para novos experimentos devido aos bons resultados apresentados no cenário de referência, apontando assim que os resultados no contexto do tópico 4.4 foram impactados pela ativação da agregação de quadros.

Inicialmente verificamos opções do próprio YAZ para observar a ocorrência de alguma melhora na precisão. Dentre as opções existentes, os autores citam que a quantidade de pacotes no trem e o valor limiar ζ – presente na equação 4.1 – são as que mais ajudam na precisão de seus resultados. O primeiro também é citado por diversos estudos relacionados e das próprias técnicas como sendo muito importante para um bom desempenho. O último é um valor que define se a diferença entre o espaçamento médio na origem e no destino se encontra acima ou abaixo do valor da banda disponível. Realizamos então, uma série de experimentos variando estes fatores no cenário com agregação de quadros ativada e com a presença ou não de tráfego de segundo plano.

O ponto inicial a ser investigado é o número de pacotes que o YAZ enviará a cada trem de pacotes. Por padrão são enviados cinquenta para cada taxa de transmissão a ser testada. Quanto menor este número, menor será a precisão devido a não conseguir capturar completamente o comportamento da rede, enquanto que quanto maior, mais dados extras são inseridos na rede e melhor acurácia. A imagem 4.15 apresenta os resultados sem a presença de tráfego e com 30% da capacidade ocupada por *cross-traffic*. É possível verificar que este parâmetro tem pouca influência em nosso contexto, apresentando uma pequena melhora na estimativa, mas ainda encontrando-se muito aquém do valor de referência.

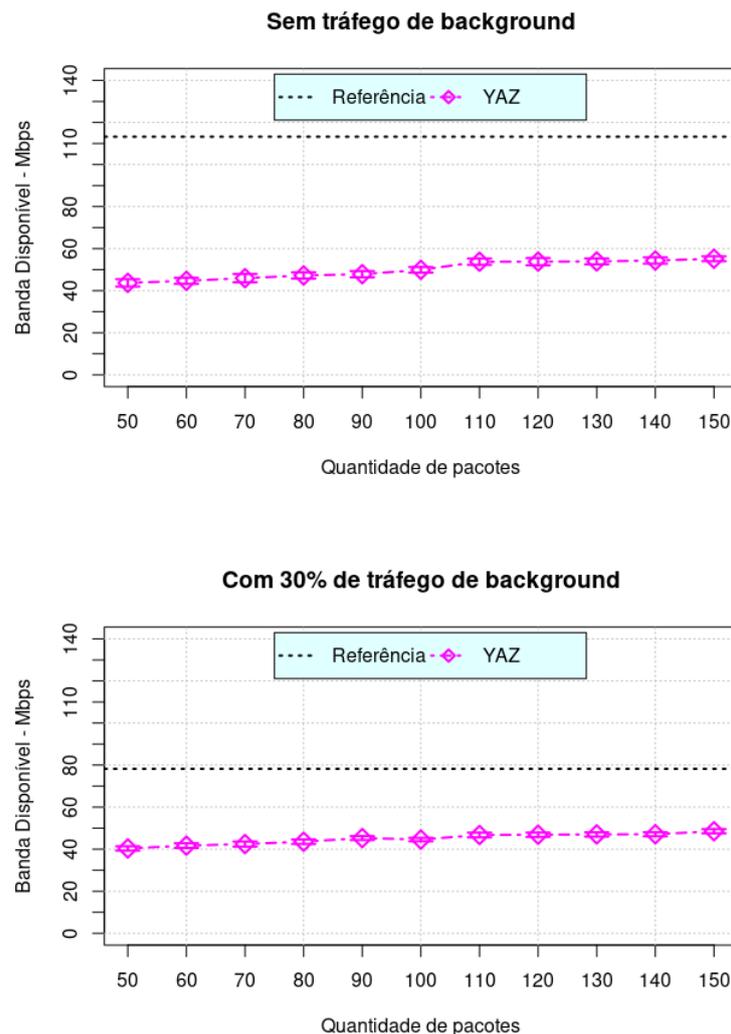


Figura 4.15: Influência do número de pacotes do YAZ em suas estimações no cenário da agregação de quadros.

De acordo com os autores do YAZ, um aspecto crucial na parametrização do método é o valor ζ da equação 4.1 e apesar de nesta seguir a mesma unidade dos espaçamentos, na implementação é passada como taxa de transmissão, possuindo valor padrão de 500Kbps . O cálculo desta informação não consta no artigo, porém extraímos do código e é representado pela equação 4.2. Deste modo, variamos este parâmetro nos mesmos contextos que analisamos a

quantidade de pacotes.

$$\frac{packetSize * 8}{(r_{in} - \zeta) * 1000000 - g_{in}} \quad (4.2)$$

A influência deste fator é demonstrada na imagem 4.16. Pode-se observar que realmente o impacto do dimensionamento nas estimativas é considerável. A técnica consegue alcançar os valores de referência com valores específicos de 28.000Kbps e 15.000Kbps, respectivamente. Contudo, podemos extrair dois problemas a partir destes resultados apresentados para contexto avaliado, onde um é que a fixação deste valor depende do tráfego presente, não sendo possível utilizar o mesmo para os dois casos. Além disso, este valor pode causar erros na estimação, chegando a transpassar o valor de referência, tornando o método menos preciso.

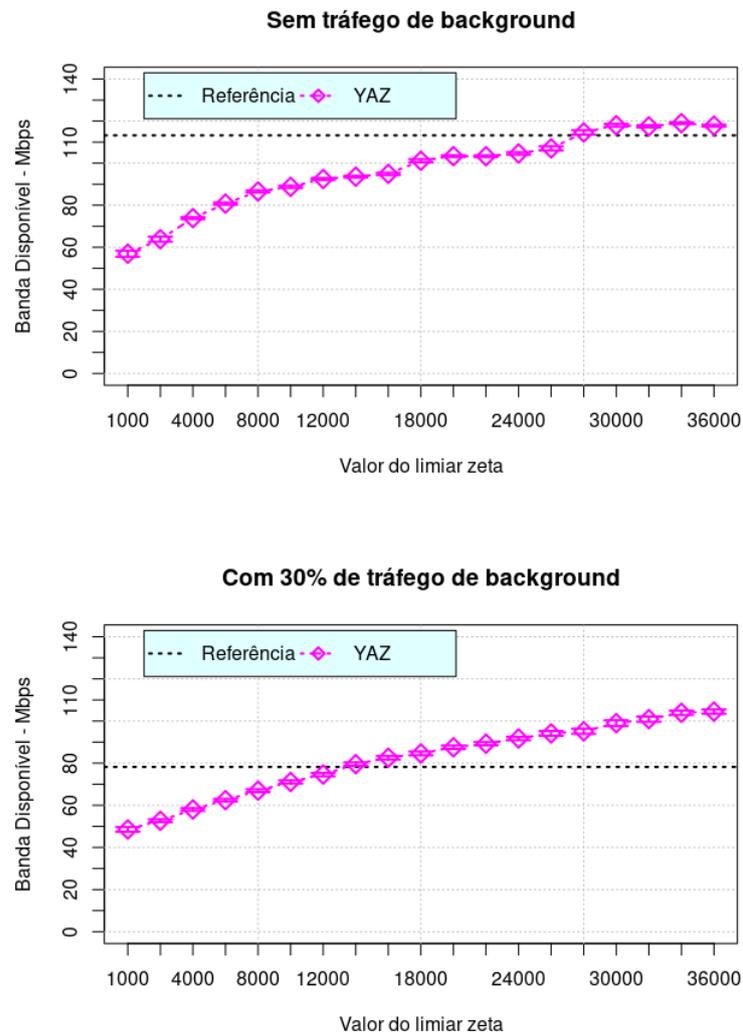
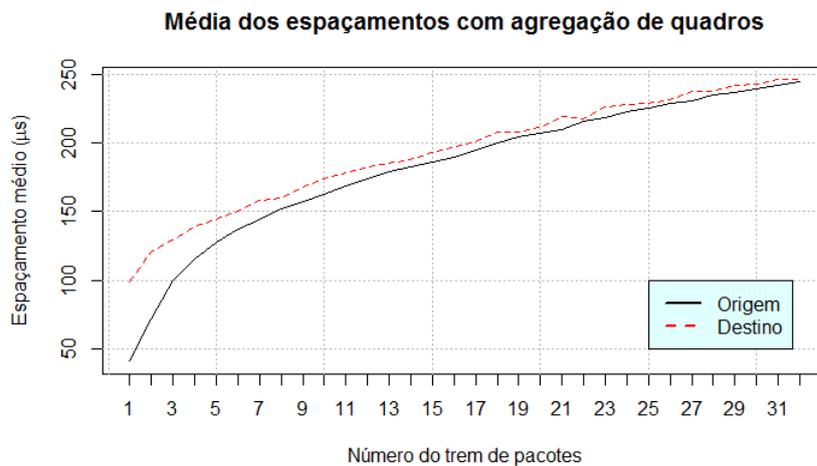


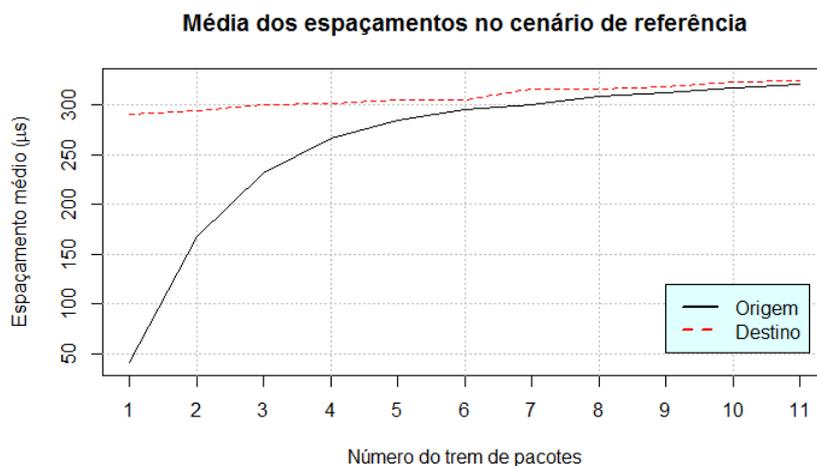
Figura 4.16: Influência do limiar ζ do YAZ em suas estimativas no cenário da agregação de quadros.

4.6.2 Análise de dados mais detalhada

Com o objetivo de detalhar mais o comportamento do algoritmo do YAZ, coletamos os dados referentes ao g_{in} e g_{out} nos contextos com e sem agregação de quadros e sem a presença de outros tráfegos na rede. Estas informações foram obtidas através do modo *verbose* da implementação e foram verificadas e confirmadas através da captura dos pacotes com o *Wireshark*. Com isto foi possível analisar a relação entre a média dos espaços, como podemos ver na figura 4.17.



(a) Com agregação de quadros.



(b) Sem agregação de quadros.

Figura 4.17: Relação entre g_{in} e g_{out} nos contextos com e sem agregação .

Inicialmente esclarecemos que a diferença na quantidade de amostras – quantidade de trens de pacotes analisados – se deve ao fato de que o YAZ, para ao obter o valor da banda disponível, envia um trem de pacotes a uma determinada taxa de transmissão e verifica se o valor estimado encontra-se dentro do limiar estabelecido, caso este valor não se enquadre nesta

condição, o algoritmo diminui a taxa e repete novamente o procedimento até que a estimação esteja em conformidade com o valor de *zeta*, quando finaliza e retorna o valor obtido. Dito isto, vemos que no cenário sem agregação o método precisou de apenas onze *streams*, enquanto que na presença de agregação foram necessários trinta e dois, sendo que mesmo assim o primeiro é mais preciso que o segundo, conforme visto na imagem 4.17. Outra característica a apontar é que o espaçamento médio no receptor se mantém quase constante na ausência da agregação, em contrapartida, no outro cenário o fator possui uma tendência similar à da origem, quase que como uma proporção.

Utilizamos a equação 4.2 para calcular o valor do limiar ζ padrão - passado como 500Kbps - para os dois casos, objetivando com isto verificar qual a margem que o método considera para inferir a banda disponível. Vemos através da figura 4.18 que este parâmetro, apesar de ser passado na execução, não se mantém fixo e aumenta conforme o espaçamento também se expande. Observamos também que quanto maiores as taxas de transmissão e recepção, menor será o valor do *threshold*.

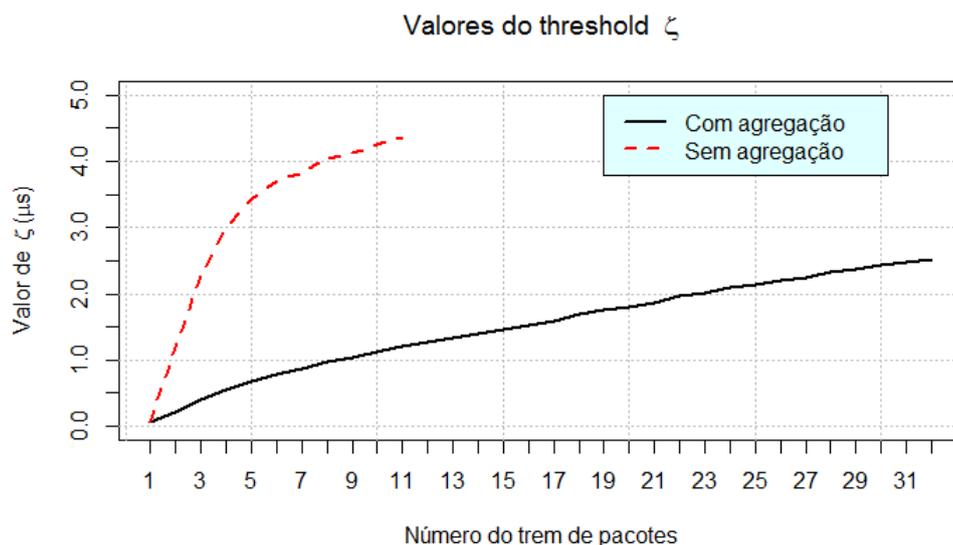
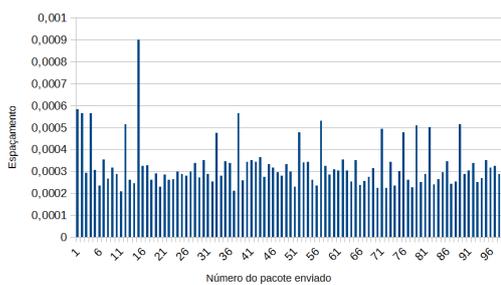


Figura 4.18: Valor do limiar ζ nos contextos com e sem agregação .

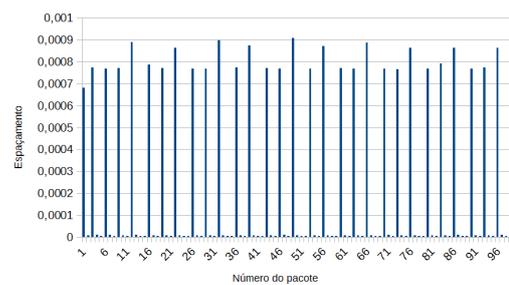
Podemos perceber como o parâmetro *zeta* influencia na inferência da banda disponível, onde mesmo com as taxas estando muito próximas, ainda assim se encontram fora do limiar estabelecido. Além disso, no ponto onde se encontra a banda disponível real no caso com agregação – terceiro trem de pacotes – temos uma diferença considerável (que pode ser visto na imagem 4.17), possuindo quase trinta microssegundos de diferença entre g_{in} e g_{out} . Com isto, o algoritmo falhou em achar esse valor e continuou enviando os dados. Poderíamos simplesmente configurar o limiar para o valor que cobriria essa diferença, assim como foi visto no tópico anterior de nossa análise. Porém esta opção modifica a acurácia do procedimento.

Por fim, almejando entender por que a taxa mensurada no destino é bem inferior à oferecida pelo YAZ - 92Mbps e 121Mbps, respectivamente - quando deveriam ser próximas, já que a

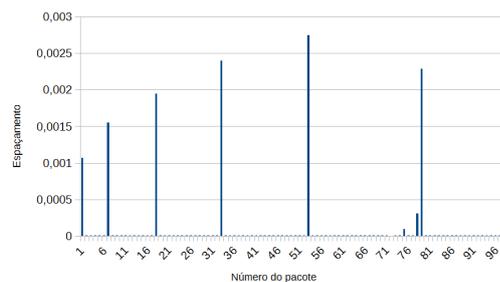
banda disponível real gira em torno de 113Mbps. Para isto, plotamos os três gráficos presentes na imagem 4.19 e que visam demonstrar como a agregação de quadros age no espaçamento dos pacotes. No caso que não há agregação, os espaços possuem valores próximos, com alguns um pouco maiores. Já quando na presença do agrupamento de quadros, é criado um padrão com vários pacotes que possuem um espaçamento mínimo, quase zero, precedidos por um espaçamento com maior valor. É relevante ressaltar que quanto maior a taxa de transmissão, mais pacotes são agregados em um único quadro, conforme figuras 4.19(b) e 4.19(c). Esta característica nos faz acreditar que a taxa mensurada relativamente mais baixa no destino em relação com a original, se deve *bufferização* dos pacotes para que seja feita a agregação. Para reforçar este entendimento, utilizamos o D-ITG para gerar um tráfego constante no valor da banda disponível e analisamos a taxa alcançada no destino a cada grupo de cem pacotes e percebemos que as taxas variam entre os conjuntos, com taxas tanto inferiores quanto superiores ao valor real. Mas como este envia muito mais pacotes em sua sondagem – 9610 pacotes/segundo – esta influência acaba dissipando-se.



(a) Sem agregação de quadros.



(b) Com agregação de quadros na taxa inferida pelo YAZ.



(c) Com agregação de quadros na taxa real da banda disponível.

Figura 4.19: Espaços individuais dos pacotes pertencentes a um trem mensurados no destino pelo YAZ.

Nesta seção realizamos testes específicos com a técnica YAZ com o objetivo de verificar a causa dos erros em suas estimções quando na presença da agregação de quadros. Coletamos mais dados e os analisamos à luz do funcionamento de seu algoritmo e de acordo com nossa análise, a agregação afeta a precisão de suas estimções devido a aumentar a diferença entre a taxa oferecida e mensurada no destino, ocasionando que esta esteja fora do limiar estabelecido.

Tal efeito fica mais evidenciado quando as taxas são maiores e há mais banda disponível, devido a mais pacotes serem agregados neste contexto.

Apontamos então, com bons indícios, a *bufferização* dos pacotes para realização da agregação como a possível causa. Uma forma de mitigar este problema seria o desenvolvimento de um algoritmo que adaptasse o valor de zeta de acordo com as taxas mensuradas no destino, em um sistema alimentado por feedback destes valores e que aceitasse a diferença maior em casos específicos, pois a taxa mensurada no destino trata-se do *throughput* alcançável, o qual tem relação direta com a banda disponível. A modelagem e implementação de um mecanismo deste tipo foge do escopo desta pesquisa, mas com certeza é um ponto a se destacar como trabalho futuro.

5

Considerações finais

Neste capítulo discorremos a cerca das considerações finais em relação à pesquisa realizada. Possuindo como objetivo analisar a pesquisa experimental executada e apontar contribuições e trabalhos futuros resultantes desta. Este tópico é seccionado em quatro partes, as quais são detalhadas a seguir.

5.1 Visão geral da pesquisa

A estimação de banda disponível é uma métrica muito relevante para o desempenho de uma rede, bem como para aplicações e protocolos que necessitem de maior eficiência na transmissão dos dados. Esta área é objetivo de diversos estudos, conforme observado nos tópicos referentes aos trabalhos relacionados e às técnicas de estimação, seções 2.2, 2.3 e 2.4, sendo assim, um tema de relevância na comunidade científica.

A maioria das pesquisas realizadas tem como foco o padrão de rede IEEE 802.3 - *Ethernet*, e deste modo, quase todos os métodos desenvolvidos são direcionados a este cenário. Contudo, estudos tem sido conduzidos de forma a analisar o desempenho das estimções em ambientes que utilizam redes sem fio IEEE 802.11, estando comprovado que este é um desafio ao algoritmos existentes e a modelagem de novos.

O padrão 802.11n foi oficializado em 2009 pelo IEEE para redes locais sem fio, permitindo a estas atingirem maior eficiência e conseqüentemente taxas de transmissão mais elevadas. Porém, cabe ressaltar que estas vantagens trazem características que tornam a estimação de banda disponível em redes locais sem fio ainda mais desafiadora para pesquisadores. Observando este ponto e a existência de poucos estudos envolvendo estes fatores - apenas o desenvolvido por [FARSHAD et al. \(2014\)](#), consideramos que é relevante a execução de mais análises a cerca do desempenho de procedimentos ativos de estimação de banda disponível no contexto desse novo padrão.

5.2 Visão geral do experimento

A realização de estudos experimentais são de certa forma complexos, pois possuem um limiar entre o ambiente controlado e o real, que quanto mais próximo de um, normalmente estará mais longe do outro. Em nossa pesquisa, visamos avaliar fatores específicos que não necessitam, a priori, de cenários absolutamente fiéis aos reais, pois vemos que inúmeros fatores presentes na arquitetura e funcionamento de redes IEEE 802.11 podem influenciar os resultados pretendidos. Apesar disso, buscamos utilizar um ambiente similar ao utilizado em trabalhos anteriores e que simulam um comportamento próximo ao real, porém com o foco em ser mais controlado. Objetivamos também utilizar equipamentos e softwares comuns, que apesar de talvez impactar no experimento (SOMMERS; BARFORD; WILLINGER, 2006), permite que tal topologia seja reproduzida e resultados sejam confrontados. Ressaltamos em nossa metodologia a limitações presentes, mas que contudo não deveriam enviesar os resultados.

Uma observação que queremos frisar é que a atenção aos equipamentos utilizados é muito importante, pois podem atrapalhar na configuração do experimento. Por exemplo, o D-ITG necessita ter seu parâmetro da taxa de pacotes por segundo ajustada ao ser executado na máquina *probeSender* e no *tgSender*, pois o primeiro consegue gerar pacotes mais rápido que este, mesmo os dois possuindo interfaces Intel Gigabit e isto ocorre devido à diferença entre os processadores utilizados.

Consideramos que a topologia e os cenários utilizados foram suficientes para atingir o objetivo desta pesquisa e a a partir deles conseguimos demonstrar que os fatores adicionados pelo padrão IEEE 802.11n impactam no desempenho das técnicas ativas avaliada neste contexto.

5.3 Contribuições

Consideramos que a maior contribuição do estudo desenvolvido é auxiliar a trazer mais luz à área de estimação de banda disponível em redes locais sem fio, utilizando-se para isto uma análise experimental de várias técnicas ativas. Vimos em nosso levantamento do estado da arte que este é um objeto bastante controverso ainda, necessitando que mais investigações sejam feitas para endereçar todos os fatores envolvidos. Apontamos como contribuições específicas os seguintes pontos:

1. A análise experimental de técnicas ativas de estimação de banda em ambiente que contenha enlace sem fio IEEE 802.11n, pois este foi objeto de apenas um estudo anterior.
2. A partir dos resultados iniciais de nosso experimento, verificamos que é muito difícil reproduzir resultados de pesquisas anteriores, que apontamos como causa o uso de equipamentos e configurações diferentes.

3. Demonstramos que, para nosso cenário, as técnicas existentes não alcançam desempenho satisfatório em redes 802.11n, à exceção do YAZ que se mostrou falho apenas na presença da agregação de quadros.
4. Através de uma análise mais detalhada, conseguimos apontar a possível causa dos erros do YAZ no cenário com agregação, através da demonstração da mudança de comportamento da relação entre os espaçamentos médios g_{in} e g_{out} neste contexto.
5. Apontamos, baseado em nosso conhecimento empírico e análise do algoritmo do YAZ, um possível caminho para mitigar tal questão, através de um sistema de adaptação do parâmetro ζ de acordo com o *throughput* alcançado no destino.

5.4 Considerações sobre os resultados

Os resultados apresentados da análise experimental realizada demonstram que todos os métodos de estimação tem dificuldades para obter precisão quando executados em ambiente de redes locais sem fio, em especial na presença dos fatores específicos avaliados. Estes dados obtidos corroboram com os trabalhos relacionados que indicam que as técnicas desenvolvidas para uso em redes cabeadas não possuem desempenho satisfatório em redes IEEE 802.11.

O PathChirp e o ASSOLO se mostraram como as técnicas com piores resultados em nosso experimento. Tal desempenho indica que a assinatura, que é a mesma em ambos, utilizada para identificar a presença de congestão na rede necessita de adaptação para o uso no contexto aqui analisado. Acreditamos que a causa pode ser a maior variabilidade nos atrasos individuais dos pacotes, fator crucial para o desempenho da estimação.

O sistema IGI/PTR seguiu a tendência apontada por seus autores que indicam o PTR como mais preciso. O primeiro se mostrou muito influenciado pelas condições da rede, como a presença de *cross-traffic*, se aproximando em pouquíssimos casos do valor real. Já o PTR se mostrou eficiente no cenário de referência, sempre próximo à banda disponível. Contudo, foi influenciado pelos demais fatores, o que diminuiu sua precisão consideravelmente, porém ainda conseguiu manter uma tendência estável.

O WBest é a única técnica que foi desenvolvida especificamente para o uso em redes sem fio, ainda assim esteve aquém dos resultados esperados. No cenário com agregação de pacotes, ele apresentou valores muito altos e negativos na estimação da banda disponível, porém, os valores informados como *throughput* alcançado mostraram-se bem próximo ao real. Isto nos leva a crer que o erro neste cenário está na inferência da banda disponível, a qual utiliza o *throughput* alcançado, e que precisa de ajustes para taxas mais altas. Nos demais cenários, observamos que o WBest estima a capacidade da rede muito abaixo da real, o que acarreta em subestimação da banda disponível na fase seguinte.

Por fim, o algoritmo do YAZ se mostrou mais eficiente que os demais, aproximando-se da banda disponível em todos os contextos, à exceção do cenário com agregação de quadros.

Devido a esta robustez em seus resultados, escolhemos o YAZ para uma análise mais específica, com objetivo de encontrar o ponto de falha do seu método em nosso ambiente. A partir da análise de opções inerentes ao método e da modelagem utilizada para identificar a banda disponível, demonstramos que a quantidade de pacotes agregados em um quadro impacta na diferença entre a taxa oferecida na origem e a mensurada no destino, mantendo esta diferença fora do limiar ζ utilizado. Vimos ainda que este fator é realmente o mais importante na acurácia do YAZ.

5.5 Trabalhos futuros

Devido à característica experimental e, de certa forma, exploratória, podemos apontar alguns pontos que consideramos com interessantes para trabalhos futuros. O principal é a adaptação do procedimento do YAZ para o uso em cenários com a presença de agregação e quadros. Para isto, mais análises específicas devem ser realizadas para poder desenvolver um método para adaptação do limiar ζ . Ponderamos também que é interessante uma análise mais aprofundada no WBest, com o intuito de verificar os problemas aqui relatados, pois se trata de uma técnica bastante simples de implementar, rápida e pouco intrusiva.

Na área de experimentação, ressaltamos a influência dos hardwares e sistemas utilizados, o que torna difícil a reprodução fiel dos resultados de um experimento. Diante disto, uma análise do impacto da utilização de equipamentos mais comuns em detrimento de outros mais especializados se faz necessário, incluindo fatores de sistema como *buffers* e *interrupt coalescing*, com o foco na reprodutibilidade da análise experimental.

Por fim, acrescentamos a análise e modelagem do tráfego concorrente concomitante com o sistema DCF, o qual é um fator muito importante mas que não é comumente abordado nos trabalhos anteriores. Este tem um impacto direto na estimação de banda disponível, modificando inclusive o conceito a cerca desta.

Referências

- AUGUSTO, M. E.; MURTA, C. D. Avaliação experimental de ferramentas para medição de largura de banda. , [S.l.], 2010.
- BOTTA, A.; DAINOTTI, A.; PESCAPÈ, A. A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios. **Computer Networks**, [S.l.], v.56, n.15, p.3531–3547, 2012.
- BREDEL, M.; FIDLER, M. A measurement study of bandwidth estimation in IEEE 802.11 g wireless LANs using the DCF. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH IN NETWORKING. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2008. p.314–325.
- CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, [S.l.], v.7, n.3, p.1247–1250, 2014.
- CHAUDHARI, S. S.; BIRADAR, R. C. Survey of bandwidth estimation techniques in communication networks. **Wireless Personal Communications**, [S.l.], v.83, n.2, p.1425–1476, 2015.
- DELPHINANTO, A. et al. Path capacity estimation in heterogeneous, best-effort, small-scale IP networks. In: LOCAL COMPUTER NETWORKS (LCN), 2010 IEEE 35TH CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p.1076–1083.
- FARSHAD, A. et al. On the impact of 802.11 n frame aggregation on end-to-end available bandwidth estimation. In: SENSING, COMMUNICATION, AND NETWORKING (SECON), 2014 ELEVENTH ANNUAL IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.108–116.
- GAST, M. **802.11 wireless networks: the definitive guide**. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2005.
- GAST, M. **802.11 n: a survival guide**. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2012.
- GOLDONI, E.; ROSSI, G.; TORELLI, A. Assolo, a new method for available bandwidth estimation. In: INTERNET MONITORING AND PROTECTION, 2009. ICIMP'09. FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. p.130–136.
- GOLDONI, E.; SCHIVI, M. End-to-end available bandwidth estimation tools, an experimental comparison. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON TRAFFIC MONITORING AND ANALYSIS. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p.171–182.
- GUPTA, D. et al. Experimental Comparison of Bandwidth Estimation Tools for Wireless Mesh Networks. In: INFOCOM. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. p.2891–2895.
- HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Methodology for performance analysis of simulations of convective systems in the metropolitan area of São Paulo with the ARPS model: sensitivity to variations with the advection and the data assimilation schemes. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.l.], v.26, n.4, p.591–608, 2011.

- HEI, X.; BENSOU, B.; TSANG, D. H. Model-based end-to-end available bandwidth inference using queueing analysis. **Computer networks**, [S.l.], v.50, n.12, p.1916–1937, 2006.
- HU, N.; STEENKISTE, P. Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques. **IEEE journal on Selected Areas in Communications**, [S.l.], v.21, n.6, p.879–894, 2003.
- IVANCIU, I. A. et al. Capacity and Available Transfer Rate evaluation for wireless links. In: COMMUNICATIONS (COMM), 2014 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.1–4.
- JOHANSSON, A.; BJORKMAN, M. On measuring available bandwidth in wireless networks. In: IEEE CONFERENCE ON LOCAL COMPUTER NETWORKS (LCN), 2008. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2008. p.861–868.
- JOHANSSON, A.; MELANDER, B.; BJÖRKMAN, M. Diettopp: a first implementation and evaluation of a simplified bandwidth measurement method. In: SECOND SWEDISH NATIONAL COMPUTER NETWORKING WORKSHOP. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004. v.5.
- JOHANSSON, A.; MELANDER, B.; BJÖRKMAN, M. Bandwidth measurement in wireless networks. In: **Challenges in Ad Hoc Networking**. [S.l.]: Springer, 2006. p.89–98.
- LAO, L.; DOVROLIS, C.; SANADIDI, M. The probe gap model can underestimate the available bandwidth of multihop paths. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, [S.l.], v.36, n.5, p.29–34, 2006.
- LEE, H. K. et al. Bandwidth estimation in wireless lans for multimedia streaming services. **Advances in Multimedia**, [S.l.], v.2007, 2007.
- LI, M. **Using Bandwidth Estimation to Optimize Buffer and Rate Selection for Streaming Multimedia over IEEE 802.11 Wireless Networks**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Georgia Institute of Technology.
- LI, M.; CLAYPOOL, M.; KINICKI, R. WBest: a bandwidth estimation tool for ieee 802.11 wireless networks. In: IEEE CONFERENCE ON LOCAL COMPUTER NETWORKS (LCN), 2008. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2008. p.374–381.
- LÜBBEN, R.; FIDLER, M.; LIEBEHERR, J. Stochastic bandwidth estimation in networks with random service. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, [S.l.], v.22, n.2, p.484–497, 2014.
- MATHIS, M.; ALLMAN, M. RFC 3148: a framework for defining empirical bulk transfer capacity metrics. **Internet Society (Jul. 2001)**, [S.l.], p.1–16, 2001.
- OLVERA-IRIGOYEN, O. et al. Available bandwidth probing in hybrid home networks. In: LOCAL & METROPOLITAN AREA NETWORKS (LANMAN), 2011 18TH IEEE WORKSHOP ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.1–7.
- PRASAD, R. et al. Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools. **Network, IEEE**, [S.l.], v.17, n.6, p.27–35, 2003.
- RIBEIRO, V. J. et al. pathchirp: efficient available bandwidth estimation for network paths. In: PASSIVE AND ACTIVE MEASUREMENT WORKSHOP. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003.

SOMMERS, J.; BARFORD, P.; WILLINGER, W. A proposed framework for calibration of available bandwidth estimation tools. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS (ISCC'06), 11. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2006. p.709–718.

YUN, D.; CHUNG, K.; HONG, J. Efficient Bandwidth Estimation for HTTP adaptive streaming. In: INFORMATION NETWORKING (ICOIN), 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.464–468.

ZHAO, P. et al. On an efficient estimation of available bandwidth for IEEE 802.11-based wireless networks. In: GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.1–5.