



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Tecnologia

EDMILSON MOREIRA

**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE
IMPLEMENTAÇÕES DOS PADRÕES IEEE
802.11a/b/g/n/ac**

LIMEIRA
2018

EDMILSON MOREIRA

**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE
IMPLEMENTAÇÕES DOS PADRÕES IEEE 802.11a/b/g/n/ac**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas
como parte dos requisitos exigidos para a obtenção
do título de Mestre em Tecnologia, na Área de
Sistemas de Informação e Comunicação.

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Ursini

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins Pedro

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO EDMILSON
MOREIRA, E ORIENTADA PELO PROF.
DR. EDSON LUIZ URSINI.

LIMEIRA
2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

Moreira, Edmilson, 1986-
M813m Método para avaliação do desempenho de implementações dos padrões
IEEE 802.11a/b/g/n/ac / Edmilson Moreira. – Limeira, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Edson Luiz Ursini.
Coorientador: Paulo Sérgio Martins Pedro.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Tecnologia.

1. Redes locais sem fio. 2. IEEE 802.11 (Normas). I. Ursini, Edson Luiz,
1951-. II. Pedro, Paulo Sérgio Martins, 1967-. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Method for evaluating the performance of IEEE 802.11a/b/g/n/ac
standards implementations

Palavras-chave em inglês:

Wireless LANs

IEEE 802.11 (Standards)

Área de concentração: Sistemas de Informação e Comunicação

Titulação: Mestre em Tecnologia

Banca examinadora:

Edson Luiz Ursini [Orientador]

Marcos Sérgio Gonçalves

Omar Carvalho Branquinho

Data de defesa: 03-12-2018

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

FOLHA DE APROVAÇÃO

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa de dissertação para o Título de Mestre em Tecnologia na área de concentração de Sistemas de Informação e Comunicação, a que submeteu o aluno Edmilson Moreira, em 03 de dezembro de 2018 na Faculdade de Tecnologia- FT/ UNICAMP, em Limeira/SP.

Prof. Dr. Edson Luiz Ursini

Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. Marcos Sérgio Gonçalves

FT/UNICAMP

Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho

PUC CAMPINAS

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretária do Programa da Unidade.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido o dom da vida, me dar forças, inteligência e sabedoria para ultrapassar todas as adversidades e dificuldades em minha caminhada diária.

Presto também minhas sinceras homenagens ao Prof. Dr. Edson Luiz Ursini e também ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins Pedro por me apoiarem no desenvolvimento desse trabalho, onde devido as minhas dificuldades e falta de experiência tive que consulta-los diversas vezes a respeito das diversas dúvidas que foram surgindo ao desenvolver desse estudo.

Apresento também meu agradecimento a Faculdade de Tecnologia, pela sua estrutura, disponibilidade de materiais didáticos de ótima qualidade, dentre outros recursos que me ajudaram e ainda ajuda os diversos estudantes e docentes que fazem parte unidade.

Por fim, porém não menos importante, agradeço também a minha família por ter me apoiado e também servir de estrutura e inspiração para que todos meus objetivos e sonhos cheguem a cada dia mais perto de se tornarem realidade.

Resumo

No contexto das redes *WLAN* (*Wireless Local Area Network*) para uso interno e/ou uso externo, temos várias opções em relação aos padrões disponíveis para a utilização dessas redes, abrangendo desde soluções SOHO (*Small Office Home Office*) até soluções de níveis empresariais para redes de longas distâncias.

Contudo, dentre os vários padrões existentes, torna-se difícil achar uma métrica para definir como e quando deverá ser usado cada uma dessas implementações para atender a uma determinada solução específica.

O presente estudo tem como principal objetivo servir de base para apresentar os pontos positivos e negativos das implementações dos padrões *wireless* IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n e 802.11ac, relacionando a velocidade de transferência teórica de cada um desses padrões com sua velocidade de transferência real obtida em uma implementação de hardware de um fabricante em específico.

Os testes práticos foram realizados num ambiente interno confinado, com baixo nível de interferências e ruídos.

Os resultados são analisados sob certas condições de tráfegos, compreendendo emulações com *frames* de diversos tamanhos e transferência de dados utilizando-se de múltiplo fluxos simultâneos.

Todas as projeções e simulações de tráfegos foram feitas tendo como limite o âmbito da camada física e de enlace do modelo de referência ISO/OSI (International Organization for Standardization, 1996), estabelecendo como topologia uma comunicação do tipo ad-hoc, onde apenas 2 pontos são envolvidos na comunicação (P2P).

Observa-se que este estudo também abrange o uso de equações para previsão dos resultados práticos, considerando o uso de BER (*Bit Error Rate*) para modular o resultado obtido com a equação, de forma que esta se assemelhe aos resultados práticos medidos em campo.

Diante do exposto, o diferencial deste trabalho é a abrangência de vários padrões WLAN, prevendo seus resultados não somente através de equações, mais também fazendo-se do uso de testes práticos para representar o desempenho obtido quando usado a implementação em hardware de um fabricante em específico.

Abstract

In the context of the indoor and/or outdoor WLAN (Wireless Local Area Network), we have a lot of choices in relation about the standards available to use, starting from SOHO (Small Office Home Office) solutions until the enterprise solutions to a network of large scale.

However, among the several WLAN standards available, it's difficult to find a metric to define how and when each of these implementations has to be used to solve a specific demand.

The present study has the main goal to be a base to show the positives and negatives points of the IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n and 802.11ac wireless standards implementation, relating the theoretical transfer speed on each of these standards with its real transfer speed got in a hardware implementation from a specific manufacturer.

The practical tests were done in a confined internal environment, with low interference and noise level.

The results are analysed by certain traffic conditions, comprising emulations with frames of several length and data transfer utilizing of multiple simultaneous flows.

All the projections and traffic simulations were done at the limit of the physical and data link layer from the OSI model, establishing how communication topology an ad-hoc network type, where only 2 points are involved at the communication (P2P).

It is observed that this study do the use of equations to foresee the practical results, considering the use of BER (Bit Error Rate) to modulated the results obtained with the equations, so that it resembles to the practical results measured in field.

So, the differential from this work is the covering of the various WLAN standards, foreseeing it results not only by the equations, but also doing the use of practical tests to show the performance got when used a hardware implementation from a specific manufacturer.

Lista de Ilustrações

2.1	Faixa de canais na frequência de 2,4 GHz	20
3.1	Modo de comunicação unidirecional com RTS e CTS	26
3.2	Modo de comunicação bidirecional com RTS e CTS	27
3.3	<i>Overhead</i> nas duas primeiras camadas do padrão 802.11	28
3.4	Detalhamento do <i>overhead</i> de comunicação até a camada 4 do modelo OSI . .	29
3.5	Comunicação com e sem o uso dos <i>frames</i> RTS/CTS	33
3.6	Solução do problema do nó escondido com o uso dos <i>frames</i> RTS/CTS	34
3.7	Projeção de throughput para o padrão 802.11b	39
3.8	Projeção de throughput para o padrão 802.11g	39
3.9	Projeção de throughput para o padrão 802.11a	40
3.10	Esquema de formação do <i>frame</i> A-MSDU	42
3.11	Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 20 MHz / A-MSDU	46
3.12	Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 40 MHz / A-MSDU	46
3.13	Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 20 MHz / A-MSDU .	47
3.14	Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 40 MHz / A-MSDU .	47
3.15	Esquema de formação do <i>frame</i> A-MPDU	49
3.16	Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 20 MHz / A-MPDU	51
3.17	Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 40 MHz / A-MPDU	51
3.18	Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 20 MHz / A-MPDU .	51
3.19	Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 40 MHz / A-MPDU .	52
3.20	Esquema de agregação em dois níveis	53
3.21	Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 20 MHz / Dois níveis	55
3.22	Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 40 MHz / Dois níveis	56
3.23	Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 20 MHz / Dois níveis	56
3.24	Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 40 MHz / Dois níveis	57
4.1	Traffic Generator - Estatísticas	59
4.2	Traffic Generator - Topologia de testes em loop	60
4.3	Airview - Análise de espectro na faixa de 5 GHz	61
4.4	Freq. Usage - Análise na faixa de frequência de 2,4 GHz	62
4.5	Freq. Usage - Análise na faixa de frequência de 5 GHz	62
4.6	Spectral Scan - Análise na faixa de frequência de 5 GHz	63
4.7	Snooper - Análise na faixa de frequência de 2,4 GHz	64
4.8	Snooper - Análise na faixa de frequência de 5 GHz	65
4.9	Scan - Análise na faixa de frequência de 2,4 GHz	65
4.10	Scan - Análise na faixa de frequência de 5 GHz	66
4.11	Rádio 5 GHz 802.11a/n/ac	66
4.12	Cartão WLAN miniPCI-e	67

4.13	Antena Omni 6dBi - Dual Band	67
4.14	Rádio WLAN 5 GHz usado para análise espectral	68
4.15	Servidor	68
5.1	802.11a - Resultado da fórmula vs. Testes em campo	71
5.2	802.11g - Resultado da fórmula vs. Testes em campo	72
5.3	802.11g - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER	73
5.4	802.11g - Considerando a incidência de BER para o data rate máximo	74
5.5	802.11a - Resultado da fórmula vs. Testes em campo	75
5.6	802.11a - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER	76
5.7	802.11a - Considerando a incidência de BER para o data rate máximo	76
5.8	802.11n - 5 GHz / 20 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo	77
5.9	802.11ac - 5 GHz / 20 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo	77
5.10	802.11n/ac - A-MPDU em 5 GHz / 20 MHz - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER	79
5.11	802.11n - A-MPDU em 5 GHz / 20 MHz - Considerando a incidência de BER para o <i>data rate</i> máximo	79
5.12	802.11ac - A-MPDU em 5 GHz / 20 MHz - Considerando a incidência de BER para o <i>data rate</i> máximo	80
5.13	802.11n - 5 GHz / 40 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo	81
5.14	802.11ac - 5 GHz / 40 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo	81
5.15	802.11n/ac - A-MPDU em 5 GHz / 40 MHz - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER	83
5.16	802.11n - A-MPDU em 5 GHz / 40 MHz - Considerando a incidência de BER para o <i>data rate</i> máximo	83
5.17	802.11ac - A-MPDU em 5 GHz / 40 MHz - Considerando a incidência de BER para o <i>data rate</i> máximo	84
5.18	802.11n - 2,4 GHz / 20 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo	85
5.19	802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 20 MHz - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER	86
5.20	802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 20 MHz - Considerando a incidência de BER para o <i>data rate</i> máximo	86
5.21	802.11n - 2,4 GHz / 40 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo	87
5.22	802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 40 MHz - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER	88
5.23	802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 40 MHz - Considerando a incidência de BER para o <i>data rate</i> máximo	89

Lista de Tabelas

2.1	Soluções na faixa de 5 GHz versus 2,4 GHz	19
2.2	Características gerais do padrão 802.11a	19
2.3	Características gerais do padrão 802.11b	20
2.4	Características gerais do padrão 802.11g	21
2.5	Características gerais do padrão 802.11n	22
2.6	Características gerais do padrão 802.11ac	24
3.1	Componentes de <i>delay</i> para diferentes modulações na camada MAC	31
3.2	Parâmetros usados para o cálculo do TMT	35
3.3	MCS para canais com largura de 20 MHz, Nss = 1	41
3.4	Tamanho máximo do frame MPDU para o esquema A-MSDU	42
3.5	A-MSDU - Valores de referências baseado na norma IEEE Standards Association (2016)	43
3.6	AIFS - Valores de referência (BURTON, 2009)	44
3.7	Tamanho máximo do PSDU para o esquema A-MSDU	48
3.8	A-MPDU - Valores predeterminados para os parâmetros 'L' e 'X'	50
3.9	A-MPDU - Valores de referências baseado na norma IEEE Standards Association (2016)	50
3.10	Tamanho máximo do MPDU e PSDU na agregação em 2 níveis	53
3.11	Agregação em 2 níveis - Valores de referências baseado na norma IEEE Standards Association (2016)	54
5.1	802.11b - Estatísticas da comunicação	72
5.2	802.11g - Diferenças no <i>throughput</i>	72
5.3	802.11g - Estatísticas da comunicação	73
5.4	802.11g - Definição de valores referente ao BER (<i>Bit Error Rate</i>)	74
5.5	802.11a - Diferenças no <i>throughput</i>	75
5.6	802.11a - Estatísticas da comunicação	75
5.7	802.11a - Definição de valores referente ao BER (<i>Bit Error Rate</i>)	76
5.8	A-MPDU, 5 GHz / 20 MHz - Diferenças no <i>throughput</i>	78
5.9	A-MPDU, 5 GHz / 20 MHz - Estatísticas de comunicação	78
5.10	A-MPDU em 5 GHz / 20 MHz - Definição de valores referente ao BER (<i>Bit Error Rate</i>)	80
5.11	A-MPDU, 5 GHz / 40 MHz - Diferenças no <i>throughput</i>	82
5.12	A-MPDU, 5 GHz / 40 MHz - Estatísticas de comunicação	82
5.13	A-MPDU em 5 GHz / 40 MHz - Definição de valores referente ao BER	84
5.14	802.11n - A-MPDU, 2,4 GHz / 20 MHz - Diferenças no <i>throughput</i>	85
5.15	802.11n - A-MPDU, 2,4 GHz / 20 MHz - Estatísticas de comunicação	85
5.16	802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 20 MHz - Definição do BER (<i>Bit Error Rate</i>)	87

5.17	802.11n - A-MPDU, 2,4 GHz / 40 MHz - Diferenças no <i>throughput</i>	88
5.18	802.11n - A-MPDU, 2,4 GHz / 40 MHz - Estatísticas de comunicação	88
5.19	802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 40 MHz - Definição de valores referente ao BER (<i>Bit Error Rate</i>)	89

Lista de Abreviaturas e Siglas

<i>A – MPDU</i>	Aggregation MAC Protocol Data Unit
<i>A – MSDU</i>	Aggregation MAC Service Data Unit
<i>ACK</i>	Acknowledgement
<i>AIFS</i>	Arbitration Interframe Space
<i>AP</i>	Access Point
<i>App</i>	Application
<i>BACK</i>	Block ACK
<i>BER</i>	Bit Error Rate
<i>BO</i>	Backoff timer
<i>CCK</i>	Complementary Code Keying)
<i>CCQ</i>	Client Connection Quality
<i>CSMA/CA</i>	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
<i>CTS</i>	Clear to Send
<i>CW</i>	Contention Window
<i>DCF</i>	Distributed Coordination Function
<i>DIFS</i>	DCF Interframe Sapce
<i>DSSS</i>	Direct-Sequence Spread Sprectrum
<i>DUT</i>	Device Under Test
<i>EIRP</i>	Equivalent Isotropically Radiated Power
<i>ERP – OFDM</i>	Extended Rate PHY - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
<i>F – BACK</i>	Foward BACK
<i>F – DATA</i>	Forward DATA
<i>FCC</i>	Federal Communications Commission
<i>FCS</i>	Frame Check Sequence

<i>GI</i>	Guard Interval
<i>HR – DSSS</i>	High-Rate DSSS
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>IFS</i>	Interframe Space
<i>IP</i>	Internet Protocol
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>ITU – T</i>	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
<i>LoS</i>	Line of Sight
<i>MAC</i>	Media Access Control
<i>MCS</i>	Modulation and Code Scheme
<i>MIMO</i>	Multiple Input Multiple Output
<i>ModeloOSI</i>	Open Systems Interconnection model
<i>MPDU</i>	MAC PDU
<i>MSDU</i>	MAC SDU
<i>MSS</i>	Maximum Segment Size
<i>MTU</i>	Maximum Transmission Unit
<i>MU – MIMO</i>	Multi-User Multiple Input and Multiple Output
<i>NAV</i>	Network Allocation Vector
<i>NSS</i>	Number Spatial Stream
<i>OFDM</i>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<i>P2P</i>	Peer-to-peer
<i>PCB</i>	Printed Circuit Board
<i>PCF</i>	Point Coordination Function
<i>PDU</i>	Protocol Data Unit
<i>PIFS</i>	PCF Interface Space
<i>PLCP</i>	Physical Layer Convergence Procedure
<i>PPDU</i>	PLCP PDU
<i>PSDU</i>	PLCP SDU

<i>PTMP</i>	Point to Multi Point
<i>QAM</i>	Quadrature Amplitude Modulation
<i>QoS</i>	Quality of Service
<i>R – BACK</i>	Return BACK
<i>R – DATA</i>	Return DATA
<i>RF</i>	Radio Frequência
<i>RSSI</i>	Received Signal Strength Indication
<i>RTS</i>	Request to Send
<i>SDM</i>	Spatial Division Multiplexing
<i>SDU</i>	Service Data Unit
<i>SIFS</i>	Short Interframe Space
<i>SISO</i>	Single Input Single Output
<i>SNR</i>	Signal to Noise Ratio
<i>SO</i>	Sistema Operacional
<i>SOHO</i>	Small Office Home Office
<i>STBC</i>	Space Time Block Coding
<i>TCP</i>	Transmission Control Protocol
<i>TMG</i>	Theoretical Maximum Goodbput
<i>TMT</i>	Theoretical Maximum Throughput
<i>T_{sym}</i>	Transmission Symbol
<i>TXOP</i>	Transmission Opportunity
<i>U – NII</i>	Unlicensed National Information Infrastructure
<i>VHT</i>	Very High Throughput
<i>WiFi</i>	Wireless Fidely
<i>WLAN</i>	Wireless Local Area Network

Sumário

1	Introdução	16
2	Algumas das emendas abrangidas pelo IEEE 802.11	18
2.1	Protocolo IEEE 802.11a	18
2.2	Protocolo IEEE 802.11b	20
2.3	Protocolo IEEE 802.11g	21
2.4	Protocolo IEEE 802.11n	21
2.5	Protocolo IEEE 802.11ac	22
3	Modelo de Dimensionamento Teórico	25
3.1	Fórmulas para os protocolos 802.11a/b/g	27
3.2	Fórmulas para os protocolos 802.11n/ac	40
3.2.1	A-MSDU (Aggregation MAC Service Data Unit)	41
3.2.2	A-MPDU (<i>Aggregation MAC Protocol Data Unit</i>)	48
3.2.3	Agregação em Dois Níveis	52
4	Modelo para Medições e Testes em Campo	58
4.1	<i>Softwares</i> Utilizados	58
4.2	Hardware Empregado nos Testes	66
5	Ambiente de Testes e Medições	69
5.1	Relação entre os resultados teórico e prático	70
5.1.1	Padrão 802.11b	71
5.1.2	Padrão 802.11g	72
5.1.3	Padrão 802.11a	74
5.1.4	Método de agregação A-MPDU	77
6	Conclusões	90
6.1	Trabalhos Futuros	91
	Referências Bibliográficas	93

Capítulo 1

Introdução

A necessidade pela troca de informações faz com que a procura pela criação de maneiras rápidas e eficientes sejam desenvolvidas para que isso seja de fato possível. Desta forma, entram em cena várias tecnologias que juntas servem de pilares para que as informações em forma de dados sejam trocadas entre as fontes interessadas.

Conceitualmente, no contexto da comunicação para a troca de dados entre dispositivos, são três os agentes que sempre devem existir para que esta transferência de informação seja de fato possível no âmbito das redes de computadores (CANTÚ, 2003):

- Entidades (computadores, switches, firewall, telefones IP, etc.);
- Meios de transmissão (meio guiado, meio não guiado);
- Protocolos de comunicações (IEEE 802.3, IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, ITU-T G.984, etc);

Assim como no âmbito dos meios guiados, os meios de comunicação não-guiados, compreendendo os sistemas de redes sem fio, vêm crescendo constantemente, principalmente devido à sua acessibilidade, possibilidade da criação de redes locais em ambientes internos e/ou externos, mobilidade, dentre outras vantagens.

Dessa forma, essas tecnologias trazem benefícios a vários tipos de usuários e aplicações, atendendo desde usuários finais até grandes empresas e organizações. O trabalho proposto apresentará, de maneira sucinta, um resumo sobre os fundamentos básicos de alguns dos padrões para redes WLAN assim referidos, focando principalmente nas particularidades de cada um, descrevendo conceitos como: modo de transmissão, modulação, velocidade teórica, *throughput*, dentre outras características.

Nesse contexto, as tecnologias de comunicações de redes sem fio possuem vantagens que muitas das vezes podem ser primordiais para suprir a uma determinada necessidade, principalmente quando se exige mobilidade e praticidade nas instalações, porém com o advento de novos padrões de redes WLAN, é possível usar essa tecnologia até mesmo como alternativa para a criação de redes de alta velocidade, superando inclusive algumas soluções de meio guiado, quebrando assim o paradigma de que redes sem fio sempre são sinônimo de redes com baixa velocidade de comunicação.

Nesta pesquisa são abordadas algumas tecnologias de redes WLAN, assim como emulações de diversas situações-problemas, buscando a definição da tecnologia mais adequada para atender e resolver de modo eficiente cada perfil.

Como foco de trabalho, é posto em pauta um estudo sobre os seguintes padrões *wireless*:

- IEEE 802.11a
- IEEE 802.11b
- IEEE 802.11g
- IEEE 802.11n
- IEEE 802.11ac

Além de uma breve explicação sobre cada padrão anteriormente citado, o presente estudo tem por finalidade empregar na prática situações envolvendo o uso de cada uma das implementações dos referidos padrões, mostrando, sempre que possível, a diferença de desempenho entre um e outro, usando para tal vários equipamentos de diferentes fabricantes no contexto geral dos testes práticos realizados em campo.

No quesito avaliação de desempenho, serão exibidos na prática situações envolvendo os tópicos a seguir:

- *Throughput*
- Latência
- *Jitter*
- Frequência no espectro eletromagnético
- Método de controle de acesso ao meio
- Modulações
- Processamento consumido dos equipamentos responsável pelo enlace sem fio

Em resumo, o foco principal é mostrar da forma mais didática e explicativa possível o que se pode esperar de cada padrão, assim como suas vantagens e desvantagens. Contudo, é importante observar que todos os testes são realizados considerando apenas a camada física e a camada MAC do modelo de referência ISO/OSI (International Organization for Standardization, 1996), visto que estas são as duas camadas abrangidas pelo conjunto de padrões representada pela norma 802.11 (IEEE Standards Association, 2016).

Na literatura existem diversos trabalhos com foco na previsão em relação ao desempenho esperado para determinadas redes WLAN, citando como exemplo os artigos de Lee (2011), Sharon e Alpert (2014), Jun, Peddabachagari e Sichitiu (2003), Liao et al. (2015), Liu, Yao e Qiu (2015), dentre outros.

O diferencial deste trabalho em relação aos citados anteriormente se deve ao fato deste ter um escopo de maior abrangência em relação aos padrões WLAN abrangidos num único estudo, onde além das informações exibidas referentes a cada um desses padrões WLAN em estudo e as equações para determinar a previsão dos resultados em certas condições, complementa-se com testes práticos em campo. Posteriormente, os resultados expostos através das equações são modulados de acordo com o valor referente ao BER, para que os valores práticos se assemelhem aos obtidos pelas fórmulas.

Capítulo 2

Algumas das emendas abrangidas pelo IEEE 802.11

Os protocolos aqui referenciados foram criados pelo grupo de trabalho (*Task Group*) do *IEEE Standards Association* e são definidos como padrões. Neste estudo também foram consideradas as emendas aos referidos padrões.

Até a presente data, a norma ‘IEEE 802.11-2016’ (IEEE Standards Association, 2016) é a que está atualmente em vigor (marcada como ativa), seguindo o seguinte formato para sua nomenclatura: IEEE 802.11 acrescido do ano de sua publicação.

Já as emendas se referem às atualizações feitas nesse padrão, incluindo algumas modificações, podendo identificá-las pela(s) sigla(s) que se seguem após o 802.11, como por exemplo: a, b, g, n, ac, dentre outras.

Por fim, temos também o conceito de *draft*, que corresponde às revisões das respectivas emendas antes desta ter sua versão final aprovada. A cada nova funcionalidade implementada pelos novos *drafts* relacionado a uma emenda, é estabelecido como premissa a certificação de que mesmo com o acréscimo dessas novas funcionalidades, a mesma deve-se manter a compatibilidade com os *drafts* lançados anteriormente para a mesma emenda.

2.1 Protocolo IEEE 802.11a

Este protocolo foi o segundo desenvolvido pelo IEEE no âmbito das redes 802.11, logo após o padrão inicial que é o ‘802.11-1997’ (IEEE Standards Association, 1997), e apesar de ser uma emenda criada um pouco antes do padrão 802.11b, apenas em meados do ano de 2001 foi possível observar equipamentos disponíveis no mercado com suporte a esse padrão.

A partir do momento em que os padrões 801.11a e 802.11b estavam disponíveis comercialmente, foi possível notar que a grande maioria dos equipamentos *WLAN* deu preferência em adotar o padrão 802.11b ao invés do 802.11a, mesmo considerando o fato da emenda 802.11a possuir uma taxa de transferência teórica bem superior ao padrão 802.11b. O motivo para a rápida popularização do padrão 802.11b foi devido ao baixo custo de produção dos equipamentos com suporte a este padrão e consecutivamente ao baixo valor de venda no mercado.

Mesmo com sua baixa popularidade na época, o padrão 802.11a ainda sim teve seu nicho de mercado, onde sua escolha era voltada aos consumidores com necessidade de soluções de redes sem fio com capacidade para transferir dados a uma maior taxa de velocidade.

O 802.11a utiliza-se dos canais na faixa dos 5 GHz, abrangido pelo U-NII (*Unlicensed National Information Infrastructure*), contudo cada região de domínio definiu quais dos canais seriam homologados para o uso em um ambiente *indoor* e quais seriam destinados para o funcionamento no ambiente *outdoor*, conforme mostrado em Federal Communications Commission (2013).

Como método de modulação de espectro na camada física, o protocolo 802.11a utiliza-se da técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Vale ressaltar que a faixa de 5 GHz possui algumas vantagens e desvantagens em relação à faixa de frequência de 2,4GHz, conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Soluções na faixa de 5 GHz versus 2,4 GHz

Frequências	Vantagens	Desvantagens
5 GHz	<p>Maior <i>throughput</i></p> <p>Antenas de menor tamanho</p> <p>¹Tendência a um menor nível de interferência</p> <p>Canais adjacentes apresentam baixo nível de sobreposição</p>	<p>Tendência a equipamentos mais caros</p> <p>Abrangência (alcance) mais limitada</p> <p>²Alguns canais nessa faixa podem ser usados por radar</p> <p>³Dificuldade em ultrapassar obstáculos</p>
2.4 GHz	<p>Geralmente os equipamentos são mais baratos</p> <p>Maior abrangência (alcance)</p> <p>Suportado pela grande maioria dos dispositivos WiFi</p> <p>³Menor resistência a ultrapassagem de obstáculos</p>	<p>Menor <i>throughput</i></p> <p>Antenas maiores</p> <p>¹Alta probabilidade de interferência</p> <p>Baixo número de canais sem sobreposição</p>

¹Comparação pelas características das propriedades de cada padrão

²Na incidência de se escolher um canal que já esteja sendo usado por algum radar, deve-se trocar o canal de operação, conforme mostrado em IEEE Standards Association (2003)

³Alguns obstáculos podem apresentar diferentes comportamentos frente a incidência da frequência eletromagnética

Tabela 2.2: Características gerais do padrão 802.11a

Faixa de frequência	Lançamento	Modulação	Largura de canal	Velocidade teórica (Mbps)	Sistema de transmissão
5 GHz	1999	OFDM	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54	SISO 1x1

2.2 Protocolo IEEE 802.11b

Este foi o terceiro protocolo criado seguindo o padrão 802.11 que e ainda está em uso, principalmente pelos equipamentos legados. Sua criação ocorrera em 1999 e foi possível observar já em 2000 que alguns produtos disponíveis comercialmente já o implantavam. Apesar de ter caído em desuso, até mesmo os equipamento mais recentes fornecem suporte a esse protocolo para manter a compatibilidade com os *hosts* mais antigos.

Seu maior *data rate* (taxa de velocidade teórica da modulação usada) é de 11 Mbps, contudo, na prática sua velocidade máxima de transferência real é bem menor que esse valor, visto que é levado em consideração algumas premissas como interferência, taxa de conexão negociada entre as partes envolvidas, *Signal to Noise Ratio* (SNR), tamanho dos pacotes transmitidos/recebidos, capacidade de processamento do *host*, bit de paridade usada pela modulação, dentre outros (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003).

Diferente do protocolo 802.11a, o 802.11b trabalha na faixa dos 2,4 GHz e no Brasil é homologado com a disponibilidade de 13 canais *wireless*, tendo a possibilidade do uso de até três canais simultaneamente sem sobreposição entre si, considerando o fato de cada canal trabalhar com 22 MHz de largura (GAST, 2002). Na figura 2.1 é ilustrada a forma como os canais estão organizados na faixa de 2,4 GHz.

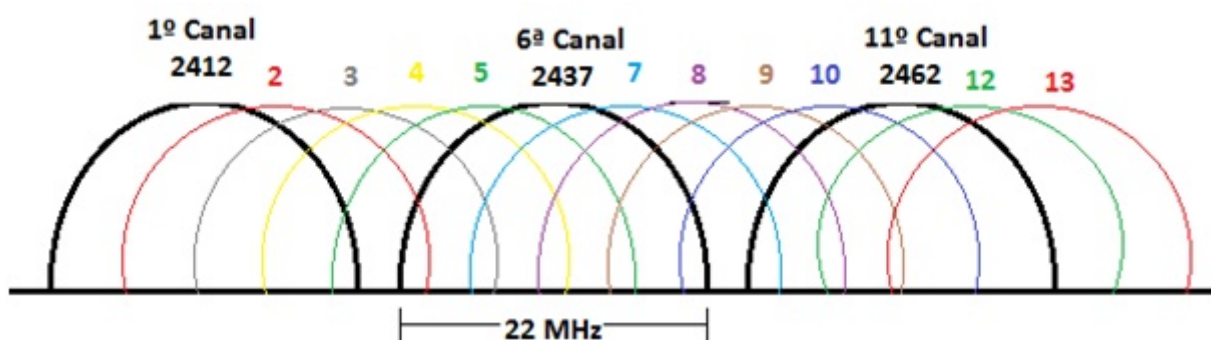


Figura 2.1: Faixa de canais na frequência de 2,4 GHz

Como método de controle de acesso ao meio (MAC), este se utiliza da técnica CSMA/CA, já em relação à técnica de espalhamento de espectro ou modulação, emprega-se o uso do HR-DSSS (*High-Rate Direct-Sequence Spread Spectrum*) associada ao método de codificação CCK (*Complementary Code Keying*) para as maiores taxas, como por exemplo, 5,5 e 11 Mbps. Na tabela 2.3 são demonstradas as características desse protocolo de forma geral.

Tabela 2.3: Características gerais do padrão 802.11b

Faixa de frequência	Lançamento	Modulação	Largura de canal	Velocidade teórica (Mbps)	Sistema de transmissão
2,4 GHz	1999	DSSS	22 MHz	1, 2, 5,5 e 11	SISO 1x1

2.3 Protocolo IEEE 802.11g

Disponível comercialmente a partir de 2003, a emenda 802.11g teve alta aceitação no mercado, pois mantém seu uso na faixa de frequência de 2,4 GHz, empregando uma técnica de multiplexação chamada ERP-OFDM (*Extended Rate PHY - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) na camada física, usando-se das mesmas modulações suportadas pelo protocolo 802.11a para atingir a uma taxa de até 54 Mbps.

Os canais na faixa de 2,4 GHz ainda permanecem com largura de banda em 22 MHz, a qual é totalmente compatível com o protocolo 802.11b, tendo em vista que a grande maioria dos equipamentos que suportam o padrão 802.11g também suporta o padrão 802.11b.

É importante destacar que a taxa de comunicação geral para toda a rede irá cair substancialmente na coexistência de clientes que suportam somente o padrão 802.11b e outros que usam o padrão 802.11g, quando esses estiverem conectados ao mesmo AP (*Access Point*), no mesmo momento. Tal comportamento se deve ao chaveamento que o AP deverá fazer entre as modulações suportadas por cada padrão implantado na solução de *hardware* usado pelo respectivo cliente, naquele dado momento.

Nota-se que as mesmas interferências e ruídos impostas como empecilhos para a rede 802.11b ainda estão presentes para a rede 802.11g. Isso implica em questões para a diminuição do desempenho da rede, citando como exemplo as interferências de outros *access points* trabalhando na mesma faixa de frequência, de dispositivos eletrodomésticos de uso geral, como forno de micro-ondas, bluetooth (padrão 802.15), alguns telefones sem fio, babás eletrônicas, etc. Para consultar as especificações desse padrão, vide tabela 2.4.

Tabela 2.4: Características gerais do padrão 802.11g

Faixa de frequência	Lançamento	Modulação	Largura de canal	Velocidade teórica (Mbps)	Sistema de transmissão
2,4 GHz	2003	ERP-OFDM	22 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54	SISO 1x1

2.4 Protocolo IEEE 802.11n

Em 2002 dá-se o início do desenvolvimento do protocolo 802.11n, passando por várias versões denominadas *drafts* e por fim publicado em sua versão final apenas em 2009 (IEEE Standards Association, 2009). Como ponto chave, tal emenda possibilita chegar à taxa máxima teórica de até 600 Mbps. Isso foi possível graças a alguns melhoramentos e novas abordagens que foram empregados nesse protocolo, dentre as quais são destacadas, a seguir, algumas delas:

- MIMO (*Multiple Input and Multiple Output*), com um limite de até 4 *streams* na configuração '4x4:4', onde o primeiro número se refere as saídas usadas para transmissão, seguido das saídas dedicadas para a recepção e por fim o número de *chains*, onde este último termo se refere a quantidade de canais RF (radio frequência) suportado pelo sistema.

- Dentro do contexto para a transmissão seguindo os princípios impostos pelo método MIMO, existem algumas alternativas em relação ao envio dos dados, como por exemplo, o método em que cada uma das antenas de um *host* sem fio envia diferentes porções dos dados pretendidos, método este denominado SDM (*Spatial Division Multiplexing*), ou então a possibilidade da replicação da mesma informação (redundância) por todas as antenas deste *host* através do método STBC (*Space Time Block Coding*), dentre outras formas de transmissão conforme demonstrado em networks (2014).
- Aumento da largura de canal, com a possibilidade de selecionar um canal com até 40 MHz de largura
- Disponibilidade na escolha da faixa de frequência a ser usada, tendo como opção a frequência de 2,4 GHz ou 5 GHz, onde o fabricante do dispositivo pode optar por trabalhar com apenas uma dessas frequências ou com ambas;
- Possibilidade da escolha do intervalo de guarda (*guard interval*) entre as transmissões, compreendendo a disponibilidade da adoção de um desses valores: 800 ns (*long*) ou 400 ns (*short*);
- Uso de novas modulações, proporcionando maiores taxa de dados.

Vale ressaltar que o protocolo 802.11n é compatível com os padrões anteriores, ou seja, caso o fabricante implemente em sua solução de *hardware* o suporte a essas duas frequências (2,4 e 5 MHz), esta solução terá então a opção de manter a compatibilidade com os padrões a/b/g. Pela tabela 2.5, é possível visualizar as características de maiores destaques para esse protocolo.

Tabela 2.5: Características gerais do padrão 802.11n

Faixa de frequência	Lançamento	Modulação	Largura de canal	¹ Velocidade teórica (Mbps)	Sistema de transmissão
2,4 GHz e/ou 5 GHz	2009	MIMO-OFDM	20 MHz	7.2, 14.4, 21.7, 28.9, 43.3, 57.8, 65, 72.2	MIMO 4x4 (max)
			40 MHz	15, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150	

¹ Guard Interval definido em 400 ns, usando apenas um único stream (1x1)

Na norma do padrão IEEE Standards Association (2009), é possível consultar todos os data rate disponíveis

2.5 Protocolo IEEE 802.11ac

Também conhecido como VHT (*Very High Throughput*), este padrão foi criado em 2008, porém publicado somente em 2013, e apesar de ser o ultimo padrão abrangido por esta pesquisa, é importante notar que existem outros novos protocolos da família 802.11 que já estão publicados e disponíveis comercialmente, citando como exemplo o 802.11ad, 802.11af, etc.

Como característica, o protocolo 802.11ac trabalha na faixa de 5 GHz, notando que sua taxa de velocidade máxima teórica pode chegar a 6,77 Gbps dependendo dos parâmetros e configurações usadas. Este foi nomeado pelo IEEE como protocolo de 5ª geração do padrão 802.11.

A seguir serão descritos alguns melhoramentos implementados na camada 1 e 2 do modelo de referência ISO/OSI para a emenda 802.11ac, que contribuíram de forma direta para o aumento de seu *throughput* final.

- Aumento da largura do canal de transmissão, tendo como padrão mandatório o emprego de canal com largura de até 80 MHz, e opcionalmente, suportando canal com até 160 MHz, sendo essa última opção a menos comum
- Suporte à agregação de *frames*, usando técnicas como: A-MSDU, A-MPDU e ‘*Two-level aggregation frames*’. Tais técnicas de agregação serão explicadas mais a frente.
- Suporta até 8 *chains* de transmissão, contudo apenas 1 *chain* é considerado como mandatório. Podemos definir ‘*chains*’ como os canais de saída para a emissão do sinal *wireless*, em que, geralmente, cada saída é direcionada para uma antena
- Assim como no padrão 802.11n, o parâmetro *guard interval*, ou seja, o intervalo entre transmissões, teve seu valor alterado para 400 ns (*short*) como característica mandatória e 800 ns (*long*) como opcional
- Com essa emenda surgiu também o conceito de empregar-se a técnica de transmissão denominada MU-MIMO (*Multi-User Multiple Input and Multiple Output*), onde sua função é possibilitar o atendimento de vários clientes conectados no mesmo AP (*Access Point*) de forma simultânea no sentido de *downlink* (tráfego originado no AP com destino ao cliente). Desta forma, com a técnica MU-MIMO é possível atender até 4 clientes simultaneamente, melhorando assim a divisão de *throughput* entre os pontos clientes, reduzindo a latência e também o tempo de espera para o atendimento de cada estação.
- Outro recurso de grande valia que foi implantado no padrão 802.11ac como opcional é a técnica chamada ‘*beamforming*’. O princípio de funcionamento dessa técnica se define pela sua característica em utilizar-se de um *array* (conjunto) de antenas para focar o sinal *wireless* em determinadas direções onde os clientes estão localizados, aumentando assim tanto a abrangência da rede *wireless* quanto seu *throughput*. O *beamforming* é um recurso que também estava disponível como opcional para as redes 802.11n, contudo a grande dificuldade nesse caso foi à ausência de um padrão universal para possibilitar a comunicação entre dispositivos de fabricantes diferentes. Já na emenda 802.11ac, o *beamforming*, mesmo como recurso opcional, segue um padrão de implementação, ou seja, caso algum fabricante opte por empregar esse recurso em seus equipamentos, o mesmo deve seguir todos os requisitos técnicos de seu funcionamento, afim de possibilitar a compatibilidade entre equipamentos de fabricante diferentes (WEXLER, 2009).
- Com o advento da rede 802.11ac, foi empregado em seu desenvolvimento uma modulação com maior eficiência espectral, ou seja, a 256-QAM em MCS 5/6, denotando a máxima taxa teórica permitida dentro desse padrão. O 256-QAM corresponde ao tipo de modulação e o MCS 5/6 ao *coding rate*, que se refere ao código de correção de erros, ou seja, neste caso para cada 5 bits enviado, um 6º bit é acrescentado para a implantação de redundância, com a finalidade de correção de erros
- Tanto o padrão 802.11n quanto o 802.11ac suportam agregações de *frames*, contudo a quantidade de dados em cada agregação é maior na emenda 802.11ac, sendo esta caracte-

rística considerada como uma das grandes diferenças que proporcionam um aumento no *throughput* em comparação a emenda 802.11n (SHARON; ALPERT, 2014).

- Os equipamentos que suportam o padrão 802.11ac podem também manter a compatibilidade com os padrões que funcionam em cima da faixa de frequência de 5 GHz, que foram desenvolvidos antes de seu lançamento, em específico o 802.11a e o 802.11n, contudo esta escolha parte do fabricante desenvolvedor do *hardware* em questão.

Tabela 2.6: Características gerais do padrão 802.11ac

Faixa de frequência	Lançamento	Modulação	Largura de canal	¹ Velocidade teórica (Mbps)	Sistema de transmissão
5 GHz	2013	MIMO-OFDM	20 MHz	7.2, 14.4, 21.7, 28.9, 43.3, 57.8, 65, 72.2, 86.7, 96.3	MIMO 8x8 (max)
			40 MHz	15, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150, 180, 200	
			80 MHz	32.5, 65, 97.5, 130, 195, 260, 292.5, 325, 390, 433.3	
			160 MHz	65, 130, 195, 260, 390, 520, 585, 650, 780, 866.7	

¹ Guard Interval definido em 400 ns, usando apenas um único stream (1x1)

Na norma do padrão IEEE Standards Association (2013) é possível consultar todos os data rate disponíveis

Capítulo 3

Modelo de Dimensionamento Teórico

Este trabalho abrange o uso de algumas equações para determinar previamente os resultados esperados em relação ao *throughput* e à latência para cada uma das redes consideradas neste estudo, conforme ilustrado em Lee (2011), Jun, Peddabachagari e Sichitiu (2003) e Sharon e Alpert (2014). Contudo, às vezes, os resultados obtidos com essas fórmulas não correspondem aos resultados obtidos na prática. Nesses casos serão consideradas algumas hipóteses para identificar o provável motivo de tal diferença entre os dois modelos (teórico x prático).

É importante salientar que quanto maior for a camada do modelo de referência OSI ao qual uma aplicação ou serviço estiver situado, menor será o *throughput* máximo disponibilizado para o referido serviço ou aplicação. Pode-se atribuir essa característica ao *overhead* acumulado nesta camada e nas superiores (SCHERRER; SPAHNI, 1994).

Numa comunicação *wireless* entre dois ou mais *hosts*, usando-se ou não dos *frames* de controle RTS/CTS dentro do protocolo CSMA/CA, existem até dois sentidos em que os dados desejados podem ser trafegados. Logo a seguir serão detalhados os passos envolvidos para uma comunicação de sentido *unidirecional* e também para a comunicação *bidirecional* com fluxo de dados reversos (*bi-directional data flow*), onde neste último contexto o ponto de destino envia seus dados no tempo de transmissão dedicado ao ponto de origem (TXOP) (THAPA; SHIN, 2012).

Comunicação Unidirecional

1. Durante o tempo definido como DIFS (*Distributed Interframe Space*) o ponto de origem monitora o meio *wireless*, caso este estiver livre, seu *backoff timer* (ou *contention window*) é decrementado, porém caso o meio estiver ocupado, seu *backoff timer* será pausado, e a cada tentativa de acesso ao meio sem sucesso (meio ocupado), o valor deste *backoff timer* será incrementado até chegar a um limite máximo pré-definido e por fim descartar o pacote que está na fila para transmissão (*time out*)
2. A transmissão somente é iniciada quando o *backoff timer* chega à zero, e a partir desse ponto o *host* identificado como origem envia um pacote RTS (*Request To Send*) direcionado ao ponto de destino
3. Depois do tempo definido como SIFS (*Short Interframe Space*), o ponto de destino retorna com um pacote do tipo CTS (*Clear To Send*), e as outras estações que ouvem o pacote RTS ou CTS atualizam seu tempo de alocação NAV (*Network Allocation Vector*);
4. Passado o tempo SIFS, o ponto de origem envia seus dados

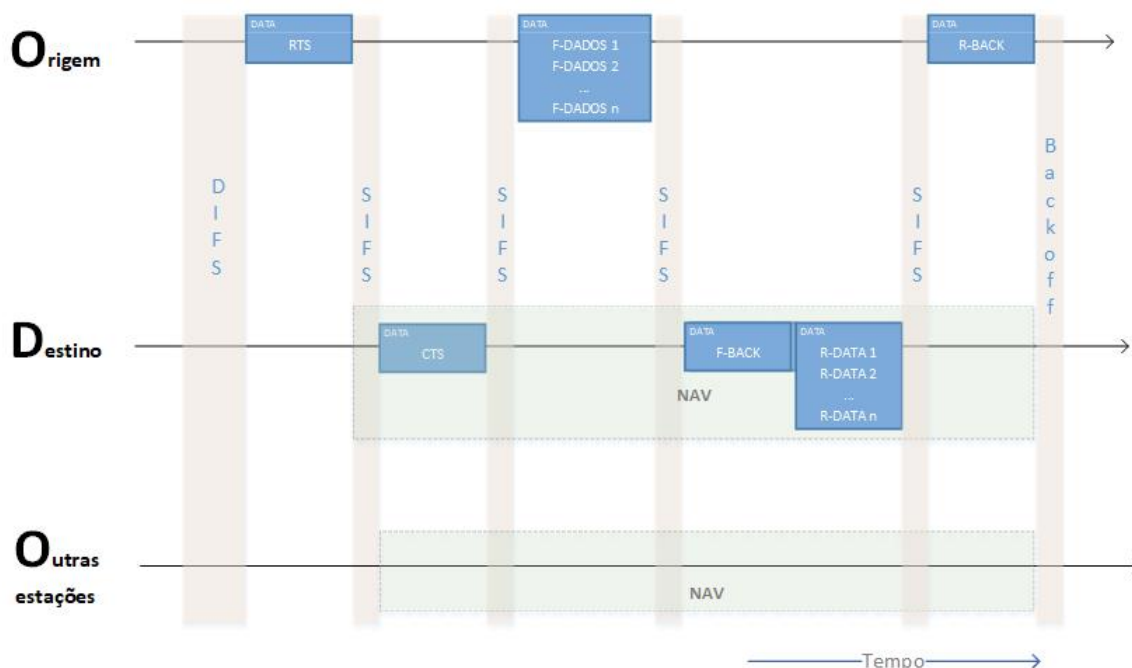


Figura 3.2: Modo de comunicação bidirecional com RTS e CTS

NOTAS

Nos passos acima, supõe-se que não existam erros na transmissão, porém na sua ocorrência os dados devem ser reenviados.

Em todas as equações que serão expostas neste trabalho, foi considerado somente o cálculo para o tráfego com sentido *unidirecional*.

As ilustrações acima foram feitas considerando o uso dos *frames* RTS/CTS, porém neste estudo estes *frames* foram omitidos

Considerando o tráfego até a 2ª camada do modelo de referência OSI, podemos dizer que os seguintes parâmetros influenciam diretamente no *throughput* (LEE, 2011).

- O uso de *frames* de controles, como o RTS/CTS e ACK (esses *frames* são transmitidos a uma taxa teórica de 1 Mbps para manter a compatibilidade entre os diferentes padrões WLAN em estudo)
- Tecnologia de espalhamento de espectro e modulações
- Taxa de transferência teórica (*Data rate*)
- Tamanho dos *frames*
- Tempo do CW (*Contention Window*) ou backoff-timer, visto que em cada colisão esse valor é incrementado
- *Frames* com erro
- *Frames* IFS (*Inter-Frame Spacing*)

3.1 Fórmulas para os protocolos 802.11a/b/g

Considerando as sete camadas do modelo de referência OSI, quanto maior o nível em que um serviço está localizado nessa camada, maior será o *overhead* acrescentado ao pacote que

será transmitido, dessa forma, o *overhead* acrescentado ao *frame* situado na camada 2 (*MAC layer*) será menor quando comparado ao *overhead* total presente em um pacote localizado na camada 7 (*application layer*).

Pela Eq. 3.1 é possível observar a relação entre o *data rate* teórico negociado entre os pontos envolvidos na comunicação com o *goodput* que estaria disponível para o envio dos dados úteis (*payload*) pertencente a uma aplicação localizada na camada 7 do modelo OSI, estabelecendo como premissa de que não haja nenhuma fragmentação nas camadas inferiores a esta.

Cálculo do *goodput* máximo teórico disponível para uma determinada aplicação em canais livres de erros (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003)

$$TMG_{APP} = \frac{\beta}{\alpha + \beta} * DT802.11 \quad (bps) \quad (3.1)$$

Em que:

TMG_{APP} : Abreviação de ‘*Theoretical Maximum Goodput*’, representando o *goodput* que ficaria disponível para um serviço na camada de aplicação do modelo de referência OSI

α : *Overhead* total presente nas camadas superiores a camada MAC

β : Tamanho do pacote para a aplicação (em bytes)

$DT802.11$: Refere-se ao ‘*data rate*’ possibilitado a um serviço na camada MAC

Para o parâmetro TMG, são consideradas as seguintes premissas:

- TMG simulado para uma topologia ponto a ponto, onde apenas 2 *hosts* se comunicam diretamente entre si
- Nesse caso, a taxa de BER (*Bit Error Rate*) é desconsiderada
- Desconsidera-se qualquer perda de pacotes devido a colisões
- A fila de pacotes no transmissor está sempre ocupada com pacotes a serem enviados
- Não será considerado a ocorrência de fragmentação na camada MAC
- Os *frames* de gerenciamento, como os *beacons* e os *frames* de associação foram omitidos dos cálculos, visto que suas influências no cálculo do *goodput* são desprezível
- Esta equação pode ser usada para qualquer um dos padrões WLAN abrangidos neste estudo

A Fig. 3.3 ilustra toda a estrutura de divisão composta pelas duas primeiras camadas do modelo de referência OSI, onde entram em cena as seguintes unidades:

- PDU (*Protocol Data Unit*): unidade que engloba o *overhead* da camada superior e mais o *payload* a ser transmitido (ou SDU)
- SDU (*Service Data Unit*): representa o *payload* (dados úteis) da respectiva camada em que está situado



Figura 3.3: *Overhead* nas duas primeiras camadas do padrão 802.11

Já na Fig. 3.4 é possível observar o *overhead* até a camada 4 do modelo de referência OSI, onde nesse contexto é usado apenas os principais protocolos, contudo, na adição de outro(s) protocolo(s), seria necessário considerar seu *overhead(s)* para o cálculo do *throughput* final.

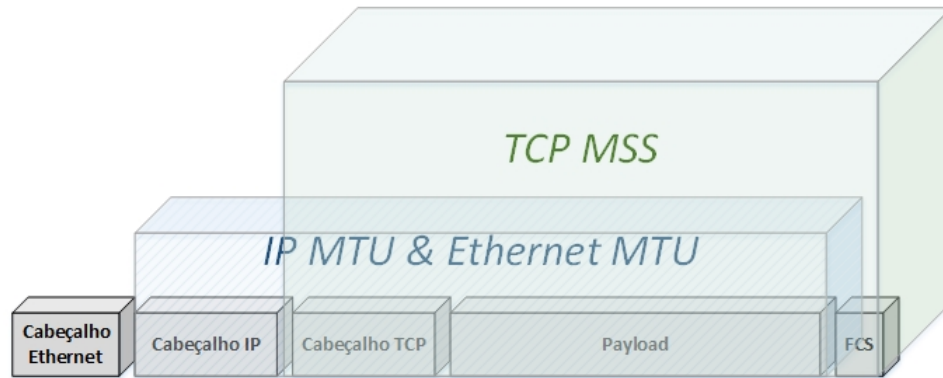


Figura 3.4: Detalhamento do *overhead* de comunicação até a camada 4 do modelo OSI

Destaca-se neste trabalho alguns termos como *throughput*, *goodput* e *data rate*, que são termos relacionados a medida de velocidade de comunicação no âmbito das redes de computadores, denotando assim, em alguns casos, uma certa tendência a geração de dúvidas sobre a diferença entre cada uma dessas palavras.

Devido a tal fato, logo abaixo é exemplificado a diferença de forma clara para cada um desses termos

Throughput: representa a taxa máxima de dados brutos transferidos entre os pontos envolvidos na comunicação, considerando além do *payload*, também o *overhead* dos protocolos e os *frames* de controles.

Goodput: entende-se como *goodput* o valor referente a velocidade de transferência considerando apenas o *payload*, ou seja, excluindo o *overhead*, retransmissão de *frames* por erro e o uso de *frames* de controle.

Data rate: taxa bruta de dados permitida por uma determinada modulação em um determinado meio físico.

Cálculo do *goodput* máximo teórico para o MSDU (MAC Service Data Unit) em canais livres de erros (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003)

$$TMG = \frac{\text{Tamanho do MSDU}}{\text{Delay por MSDU}} \quad (3.2)$$

Onde:

TMG_{APP} : abreviação de 'Theoretical Maximum Goodput' para o MSDU
Tamanho do MSDU: valor dado em bits

Cálculo do *delay* total por MSDU, sem considerar a retransmissão por erros (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003)

$$\text{Delay por MSDU} = (T_{DIFS} + T_{SIFS} + T_{BO} + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + T_{DATA}) * 10^{-6}s \quad (3.3)$$

Em que:

T: *denota o tempo de transmissão, sofrendo influência do tipo de modulação usada*

DIFS: *DCF Interframe Space*

SIFS: *Short Interframe Space*

BO: *Backoff Timer*

RTS: *Request to Send*

CTS: *Clear to Send*

ACK: *Acknowledgement*

DATA: *representa o tamanho do MSDU (em bytes) e seu overhead*

*Como a fórmula acima considera a simulação em um canal livre de erros, o tempo para cada componente usado nesta formula é dado pela Tabela 3.1

Tabela 3.1: Componentes de *delay* para diferentes modulações na camada MAC

Modulação	Componentes de delay (10^{-6} s)						
	T_{DIFS}	T_{SIFS}	T_{BO}	T_{RTS}	T_{CTS}	T_{ACK}	T_{DATA} (MSDU dado em bytes)
CSMA/CA							
DSSS-1	50	10	310	-	-	304	$192+8*(34+MSDU)/1$
DSSS-2	50	10	310	-	-	304	$192+8*(34+MSDU)/2$
HR/DSSS-5,5	50	10	310	-	-	304	$192+8*34+MSDU)/5.5$
HR/DSSS-11	50	10	310	-	-	304	$192+8*(34+MSDU)/11$
OFDM-6	34	³ 16 ou ⁴ 10	67,5	-	-	44	$20+4*[(16+6+8*(34+MSDU))/24]$
OFDM-12	34	³ 16 ou ⁴ 10	67,5	-	-	32	$20+4*[(16+6+8*(34+MSDU))/38]$
OFDM-24	34	³ 16 ou ⁴ 10	67,5	-	-	28	$20+4*[(16+6+8*(34+MSDU))/96]$
OFDM-54	34	³ 16 ou ⁴ 10	67,5	-	-	24	$20+4*[(16+6+8*(34+MSDU))/216]$
RTS/CTS							
DSSS-1	50	10x3	310	352	304	304	$192+8*(34+MSDU)/1$
DSSS-2	50	10x3	310	352	304	304	$192+8*(34+MSDU)/2$
HR/DSSS-5,5	50	10x3	310	352	304	304	$192+8*(34+MSDU)/5.5$
HR/DSSS-11	50	10x3	310	352	304	304	$192+8*(34+MSDU)/11$
OFDM-6	34	9x3	67,5	¹ 52	² 44	² 44	$20+4*[(16+6+8*(34+MSDU))/24]$
OFDM-12	34	9x3	67,5	¹ 36	² 32	² 32	$20+4*[(16+6+8*(34+MSDU))/38]$
OFDM-24	34	9x3	67,5	¹ 28	² 28	² 28	$20+4*[(16+6+8*(34+MSDU))/96]$
OFDM-54	34	9x3	67,5	¹ 24	² 24	² 24	$20+4*[(16+6+8*(34+MSDU))/216]$

¹É possível obter esse valor através da Eq. 3.7

²Tal valor pode ser obtido através da Eq. 3.8

³Valor referente ao padrão 802.11a

⁴Valor referente ao padrão 802.11g

Conforme demonstrado na Tabela 3.1, para cada *frame* transmitido são estabelecidos alguns tempos com o intuito de gerar o sincronismo no acesso, assim como o uso dos *frames* de controles a fim de diminuir a colisão com outros dispositivos que disputam o acesso ao meio físico, ou seja, o meio *wireless*.

Toda transmissão é iniciada com um tempo de espaçamento entre *frames*, conhecido internacionalmente como '*interframe spacing*', onde sua unidade de medida é dado em μ s (micro segundos).

Existem vários valores disponíveis de acordo com o *interframe spacing* a ser usado, onde cada valor está diretamente ligado ao seu nível de prioridade do acesso ao meio e também as características da camada física onde será feito o seu uso, não sofrendo influência do *data rate* sincronizado entre os pontos envolvidos na comunicação.

Abaixo é exibida uma breve explicação de alguns dos *interframe space* usados no âmbito das redes de comunicações:

SIFS (Short Interframe Space)

É o tempo usado para frames com alta prioridade, como o ACK e o RTS/CTS.

PIFS (*PCF Interframe Space*)

Usado em redes do tipo contention-free ou livre de disputa para o acesso ao meio, assim como determinado pelo método de controle PCF (Point Coordination Function), onde cita-se como exemplo as redes *Token Ring*. Este frame não é referenciado em nenhum dos cálculos exibidos nesse estudo, visto que os protocolos abrangidos neste trabalho são do tipo DCF (Distributed Coordination Function), ou seja, existe a disputa (ou concorrência) para acessar o meio de comunicação.

DIFS (*DCF Interframe Space*)

Se refere ao tempo mínimo de espera exigido logo após a finalização de uma transmissão e o início de uma nova, onde somente depois de ocorrido esse tempo uma estação com dados a serem transmitidos pode verificar sua janela de contenção (ou Backoff timer) para tentar o acesso ao meio.

O BO (*Backoff timer*) foi criado a fim de diminuir a colisão de *frames* para estações que desejam transmitir seus dados simultaneamente, contudo, somente esse recurso não é suficiente para uma situação onde existem diversas estações conectadas a um mesmo ponto de acesso.

Para tal situação, existe como complemento o uso de *frames* opcionais chamados de RTS/CTS, onde o RTS (*Request To Send*) é enviado pelo ponto que deseja transmitir seus dados, enviando este *frame* em *broadcast* para toda a rede, informando seu desejo de acessar o meio *wireless* para o envio de seus dados.

Já o CTS (*Clear To Send*) é enviado pelo ponto de destino da estação que inicialmente solicitou o acesso ao meio (origem), e caso o meio esteja livre, o acesso é concedido a este ponto de origem.

A figura 3.5 ilustra a maneira como os *frames* RTS/CTS são usados.

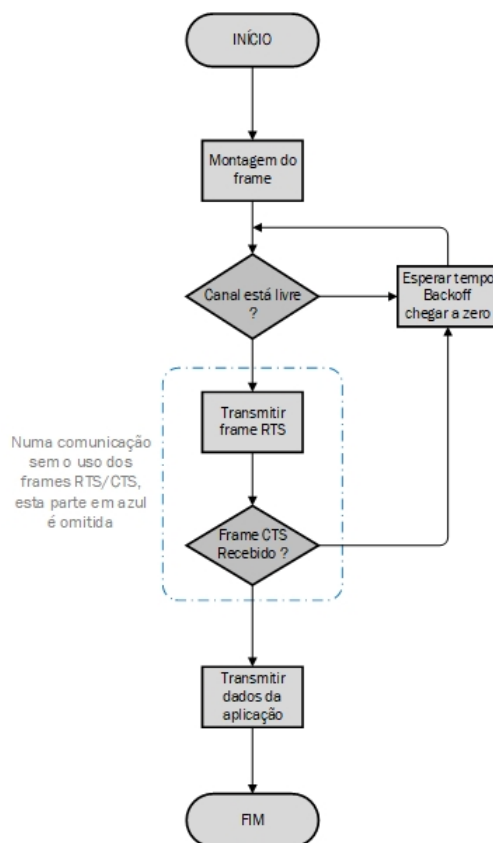


Figura 3.5: Comunicação com e sem o uso dos *frames* RTS/CTS

Numa situação convencional, as estações são as responsáveis por fazerem a transmissão do *frame RTS*, enquanto o *Access Point* é o dispositivo que faz a transmissão dos *frames CTS*.

Com o advento do uso dos *frames* RTS/CTS, diminui-se os problemas de colisões por um tipo de situação chamado de nó escondido, conforme demonstrado na figura 3.6, onde dessa forma tanto os dispositivos ao alcance da estação com dados a serem transmitidos quanto os que estão na abrangência do AP irão receber os *frames* RTS/CTS e assim atualizar seu tempo de alocação (NAV) para evitar o acesso ao meio durante esse período.

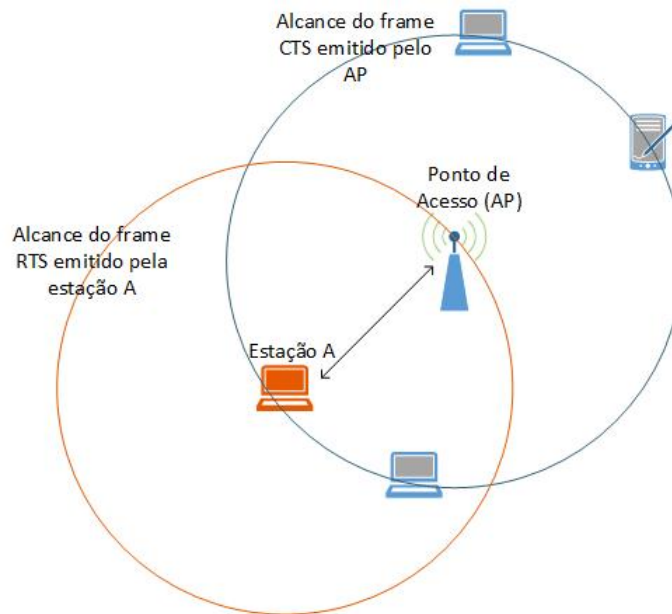


Figura 3.6: Solução do problema do nó escondido com o uso dos *frames* RTS/CTS

Nota-se que o uso dos *frames* RTS/CTS inclui um aumento no *overhead* para o tráfego de dados, onde seu uso deve ser estudado para determinar seu real aproveitamento dependendo das condições do ambiente em questão.

Por fim temos o *frame* ACK, que é o responsável pela confirmação dos recebimentos dos dados previamente enviados.

Método simplificado para o cálculo do *delay* por MSDU, sem considerar a presença de erros na transmissão (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003)

$$\text{Delay por MSDU}(x) = (ax + b) * 10^{-6} s \quad (3.4)$$

Em que:

x: variável correspondente ao valor do MSDU (em bytes)

*Para os valores de 'a' e 'b', usar-se da tabela 3.2

Tabela 3.2: Parâmetros usados para o cálculo do TMT

Modulação	Data rate	a	b
CSMA/CA			
DSSS-1	1 Mbps	8	1138
DSSS-2	2 Mbps	4	1002
HR/DSSS-5,5	5,5 Mbps	1,45455	915,45
HR/DSSS-11	11 Mbps	0,72727	890,73
OFDM-6	6 Mbps	1,33333	223,5
OFDM-12	12 Mbps	0,66667	187
OFDM-24	24 Mbps	0,33333	170,75
OFDM-54	54 Mbps	0,14815	159,94
RTS/CTS			
DSSS-1	1 Mbps	8	1814
DSSS-2	2 Mbps	4	1678
HR/DSSS-5,5	5,5 Mbps	1,45455	1591,45
HR/DSSS-11	11 Mbps	0,72727	1566,73
OFDM-6	6 Mbps	1,33333	337,5
OFDM-12	12 Mbps	0,66667	273
OFDM-24	24 Mbps	0,33333	244,75
OFDM-54	54 Mbps	0,14815	225,94

Obtenção do TMT até a camada 2 em canais livres de erros (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003)

$$TMT(x) = \frac{8x}{ax + b} * 10^6 \text{ bps} \quad (3.5)$$

Em que:

TMT(x): *Theoretical Maximum Throughput para o MSDU*

x: *O valor de 'x' corresponde ao valor do MSDU (em bytes)*

*Para os valores de 'a' e 'b', usar-se da tabela 3.2

*O delay total é representado pelos valores: ' $ax + b$ '

*Observa-se que essa fórmula é a simplificação da fórmula 3.2

*A Eq. 3.10 pode ser usada no lugar desta fórmula desde que a mesma considere um valor nulo referente ao BER, como por exemplo ' $Pb = 10^{-7}$ '

Cálculo do data rate máximo teórico (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003)

$$\lim_{x \rightarrow \infty} TMT(x) = \frac{8}{a} * 10^6 \text{ bps} \quad (3.6)$$

Método para o cálculo do tempo RTS na modulação OFDM (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003)

$$T_{RTS} = 20 + 4x \left[\frac{16 + 6 + 8 * 20}{N_{DBPS}} \right] \quad (3.7)$$

Em que:

Modulação	N_{DBPS}
OFMD-6	24
OFDM-12	48
OFDM-24	96
OFDM-54	216

N_{DBPS} : Número de bits por símbolo OFDM

Método para o cálculo do tempo CTS na modulação OFDM (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003)

$$T_{CTS} = 20 + 4x \left[\frac{16 + 6 + 8 * 14}{N_{DBPS}} \right] \quad (3.8)$$

$$T_{CTS} = T_{ACK}$$

Em que:

Modulação	N_{DBPS}
OFMD-6	24
OFDM-12	48
OFDM-24	96
OFDM-54	216

N_{DBPS} : Número de bits por símbolo OFDM

Eficiência de banda (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003)

$$Eficiencia = \frac{TMT}{R} \quad (3.9)$$

Em que:

R: *Data rate teórico*

Notas Gerais

De acordo com Jun, Peddabachagari e Sichitiu (2003), é possível assumir as seguintes premissas:

- A eficiência de banda aumenta proporcionalmente com o tamanho do *frame* MSDU, porém tal eficiência se mostra inversamente proporcional ao data rate teórico
- Na ausência dos *frames* RTS/CTS, o *throughput* é maior quando considerado uma comunicação livre de erros, porém na incidência deste, seu uso deve ser estudado. Nota-se também que os *frames* RTS/CTS possuem um real aproveitamento no contexto de uma topologia PMTP (*Point to Multi Point*).
- A alteração no tamanho do *frame* MSDU apresenta mudanças significativas no *throughput*, onde tal diferença é proporcional a capacidade do *data rate* sincronizado entre os pontos envolvidos na comunicação
- Tamanho máximo permitido para o *frame* MSDU considerando as modulações suportada pelo padrão 802.11b
 - Modulação HR-DSSS: 4.095 bytes
 - Modulação DSSS: 8.191 bytes

Fórmula para o cálculo do TMT na camada 2, considerando a ocorrência de BER (*Bit Error Rate*) (JUN; PEDDABACHAGARI; SICHITIU, 2003)

A Eq. 3.10 possibilita uma aproximação do resultado esperado através da taxa de BER, onde essa aproximação é obtida tomando como base o modelo de Gilbert-Elliott (HASSLINGER; HOHLFELD, 2008), que por sinal é baseado na cadeia de Markov de 2 estados (bom e ruim). De forma geral, a taxa referente ao BER retrata a condição de sucesso ou falha para um *frame* chegar ao seu destino. É importante notar que esta equação também pode ser usada com qualquer um dos padrões WLAN expostos neste estudo.

Apesar desta fórmula abranger também os padrões WLAN que usam-se do método de agregação do tipo A-MPDU, nota-se que as agregações do tipo A-MSDU e a agregação de dois níveis utilizam outras fórmulas que não são abrangidas neste estudo, visto que não foi realizado os testes práticos em campo para esses dois últimos métodos.

$$TMT = \frac{8 * L * (1 - Pb)^{8*4*\lceil \frac{C2+L}{4} \rceil}}{\frac{C1}{X} + \frac{1}{R} * 8 * 4 * \lceil \frac{C2+L}{4} \rceil + \frac{22}{X*R}} \quad (3.10)$$

Em que:

- L: *Tamanho do MSDU (em bytes)*
- Pb: *Valor para representar o Bit Error Rate, retratando a probabilidade da mudança de estado entre bom e ruim*
- C2: *Variável usada para representar a soma dos valores referente ao cabeçalho MAC e ao campo FCS*
- C1: *Representa a soma dos seguintes valores: AIFS, BO, Preâmbulo, SIFS e ACK.*
- X: *Número de frames MSDU, sendo que para o padrão 802.11a/b/g seu valor será sempre 1*
- R: *Data rate na camada física*
- * *Quando está fórmula for usada para a agregação A-MSDU, substitui-se o frame ACK pelo BACK*

Notas Gerais:

- AIFS: *Arbitration Interframe Sapce*
 BO: *Backoff Timer*
 Preâmbulo: *O Preâmbulo se refere aos dados adicionais incluídos no cabeçalho do frame a ser transmitido, a fim de auxiliar na sincronização do tempo de transmissão entre as estações. Existem 2 tipos de preâmbulo, onde neste contexto foi usado o valor referente ao preâmbulo curto*
 SIFS: *Short Interframe Space*
 FCS: *Frame Check Sequence*, usado para detectar frames corrompidos
 ACK: *Frame de gerencia, usado para informar o recebimento dos dados enviados previamente*

* A probabilidade de sucesso para a transmissão de um *frame* com tamanho de 'B' bits, considerando o BER definido pela variável 'Pb' na Eq. 3.10, pode ser definida pela seguinte função:

$$(1 - Pb)^B * 100$$

- * Para o padrão 802.11a/b/g, o valor referente aos campos SIFS e ACK podem ser obtidos através da Tabela 3.1
- * Preâmbulo - 802.11a/g: 20 μ s 802.11b: 144 μ s
- * Cabeçalho MAC - 802.11a/b/g: 30 bytes
- * FCS - 802.11a/b/g: 4 bytes
- * Para o padrão 802.11n/ac, o valor para as variáveis referente ao SIFS, BACK, preâmbulo, cabeçalho MAC e o campo FCS são exibidos pela Tabela 3.9
- * BO - obtido através da Eq. 3.13
- * AIFS - obtido através da Eq. 3.12
- * Na ausência do suporte a prioridade (QoS), pode-se usar o valor referente ao tempo DIFS no lugar do AIFS, contando neste estudo usou-se o valor referente ao AIFS
- * Para o padrão 802.11b, o BO foi reduzido para 100 μ s, onde dessa forma o resultado obtido com a fórmula retratou exatamente o resultado do *throughput* aferido em campo

PROJEÇÃO DOS RESULTADOS

As projeções exibidas pelas Fig. 3.7, 3.8 e 3.9 foram feitas através da Eq. 3.5, onde é relacionado os resultados dos *throughputs* obtidos com a equação e seu respectivo *data rate* teórico para diferentes tamanho de *frame*.

Padrão 802.11b

No gráfico 3.7 é exibido os resultados para o padrão 802.11b, onde é possível observar de forma clara que o tamanho do *frame* possui grande influência no resultado do *throughput*.

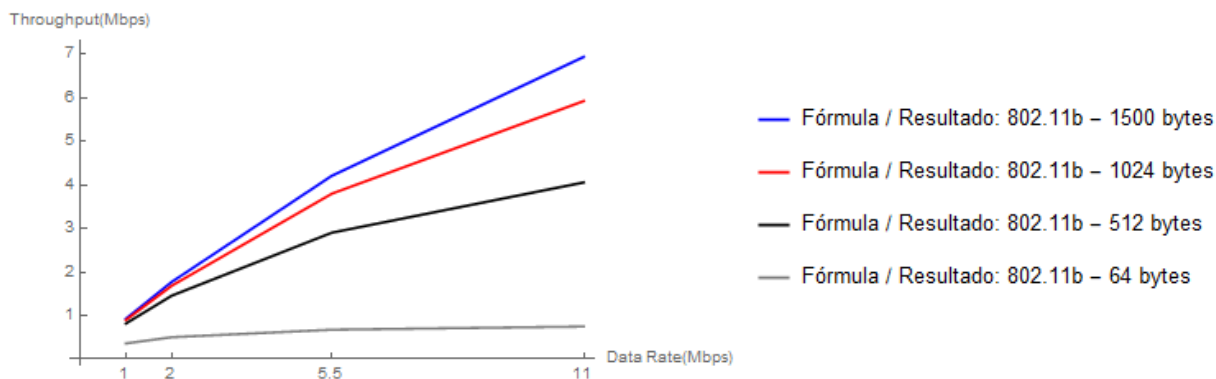


Figura 3.7: Projeção de throughput para o padrão 802.11b

Padrão 802.11g

O gráfico 3.8 apresenta os resultados obtidos para o padrão 802.11g, que apesar de possuir resultados de maior valor, a curva característica determinado pelo tamanho do *frame* se mantém a mesma.

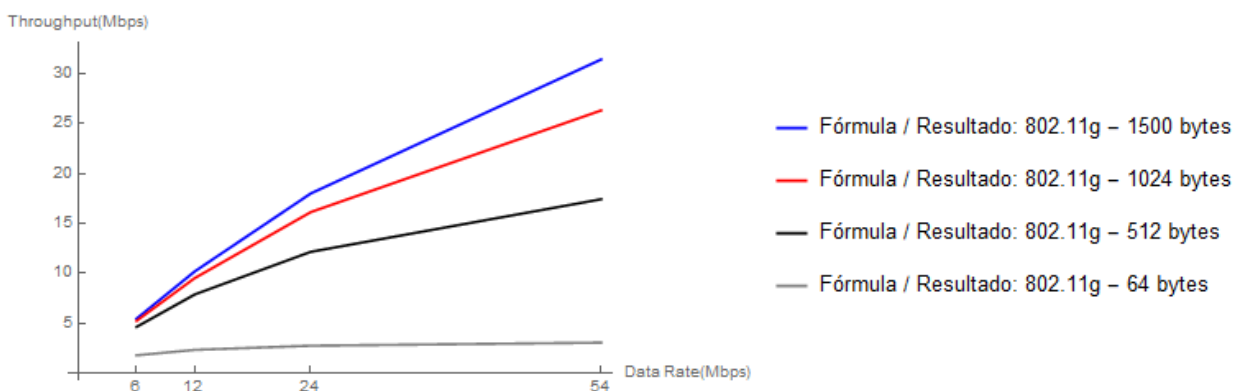


Figura 3.8: Projeção de throughput para o padrão 802.11g

Padrão 802.11a

Por fim, o gráfico 3.9 apresenta os resultados para o padrão 802.11a, notando que apesar de ambos (802.11a/g) utilizarem o mesmo tipo de modulação, em específico o OFDM, observa-se que alguns parâmetros de suas variáveis se diferem entre si, por fim apresentando resultados diferentes em relação ao *throughput*, mesmo essas diferenças sendo mínimas.

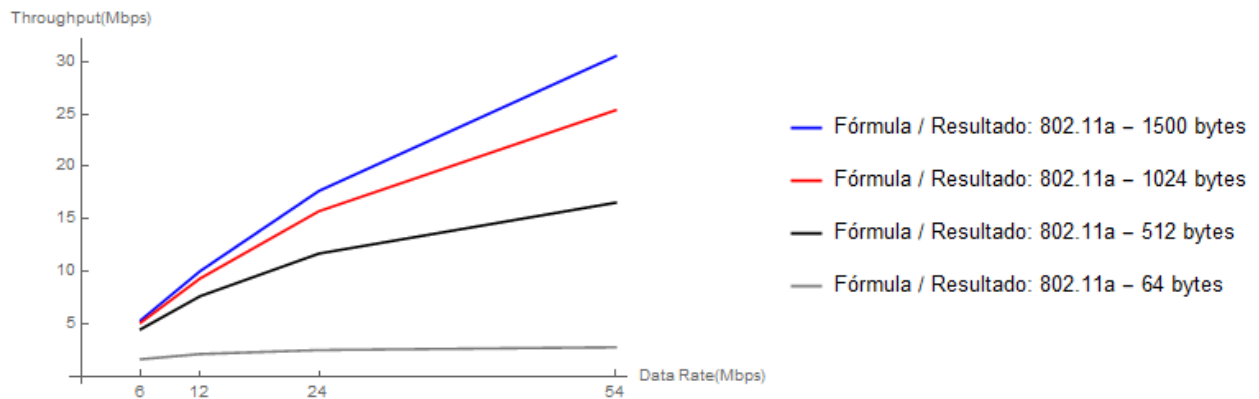


Figura 3.9: Projeção de throughput para o padrão 802.11a

3.2 Fórmulas para os protocolos 802.11n/ac

Em relação aos padrões anteriores, tanto o protocolo 802.11n quanto o 802.11ac trouxeram alguns melhoramentos em sua estrutura, possibilitando melhores resultados considerando seu desempenho no geral.

Antes de expor algumas formulas para calcular seu *throughput*, é importante descrever abaixo alguns dos melhoramentos que cada um desses padrões trouxeram. Dentre esses melhoramentos, descrevemos a agregação de *frames*, que reduz o *overhead* do acesso ao canal (ex: *backoff timer* e *interframe space*), assim como o *overhead* na transmissão dos dados, considerando a camada física e a de enlace.

Existem três tipos de agregação opcionais ao padrão 802.11n/ac (SHARON; ALPERT, 2014), onde neste estudo foi realizado a comparação entre esses métodos de agregação de *frames*, considerando para tal as seguintes premissas:

- Na camada física, usou-se o sistema de transmissão SISO (1x1)
- Largura de canal: 20 e 40 MHz;
- Intervalo de guarda (*guard interval*): 400 ns;
- Todas as simulações são feitas usando o formato do preâmbulo em *greenfield mode*, sendo este localizado na subcamada PLCP da camada física para a rede 802.11n, onde nesse modo de transmissão é possível tirar total proveito dos melhoramentos impostos por este protocolo. Contudo, ao usar-se de tal modo, a compatibilidade com as redes legadas, em específico a 802.11a, será perdida.
- Para o padrão 802.11ac, existe apenas um único formato de preâmbulo, onde é possível já de forma nativa tirar todo o aproveitamento das melhorias impostas pelo mesmo, além de suportar as redes que foram desenvolvidas anteriormente a este, citando como exemplo o padrão 802.11a e inclusive o próprio 802.11n (Tektronix Inc., 2013).

Tabela 3.3: MCS para canais com largura de 20 MHz, Nss = 1

MCS Index	Modulação	Taxa de codificação	Data Rate (Mb/s)	
			800 ns GI	400 ns GI
0	BPSK	$1/2$	6,5	7,2
1	QPSK	$1/2$	13	14,4
2	QPSK	$3/4$	19,5	21,7
3	16-QAM	$1/2$	26	28,9
4	16-QAM	$3/4$	39	43,3
5	64-QAM	$2/3$	52	57,8
6	64-QAM	$3/4$	58,5	65
7	64-QAM	$5/6$	65	72,2
8	256-QAM	$3/4$	78	86,7
9	256-QAM	$5/6$	-	-

Fonte: IEEE Standards Association (2013)

Notas:

- MCS Index (*Modulation and Coding Scheme*): representa o índice da respectiva modulação
- Modulação: descreve o tipo de modulação digital usada
- Taxa de codificação (*coding rate*): representa a relação dos 'bits enviados' pelos 'bits usado para correção de erros' em cada modulação
- Data rate: Velocidade de transferência teórica
- GI (*Guard Interval*): define o valor a ser usado como intervalo de guarda entre as transmissões, a fim de evitar possíveis colisões, onde seu valor é dado em nanosegundo(s)
- Nss: Número de '*spatial stream*', ou seja, quantidade de saídas RF

3.2.1 A-MSDU (Aggregation MAC Service Data Unit)

O método de agregação A-MSDU consiste na agregação de dois ou mais *frames* MSDU, formando o A-MSDU, que neste contexto também é conhecido como MPDU quando considerado o acréscimo do 'MAC Header' e 'FCS'. Visto que todos os *subframes* na agregação A-MSDU compartilham o mesmo cabeçalho MAC e FCS (*Frame Check Sequence*), a retransmissão de alguns *subframes* por corrupção não é suportada.

Cada *subframe* MSDU possui 14 bytes de cabeçalho. A Tabela 3.4 exibe o tamanho máximo do MPDU neste método e agregação, e na Fig. 3.10 é ilustrada a formação do *frame* A-MSDU propriamente dito.

Tabela 3.4: Tamanho máximo do frame MPDU para o esquema A-MSDU

Padrões	Tamanho máximo do MPDU
802.11n	7.935 bytes
802.11ac	11.454 bytes

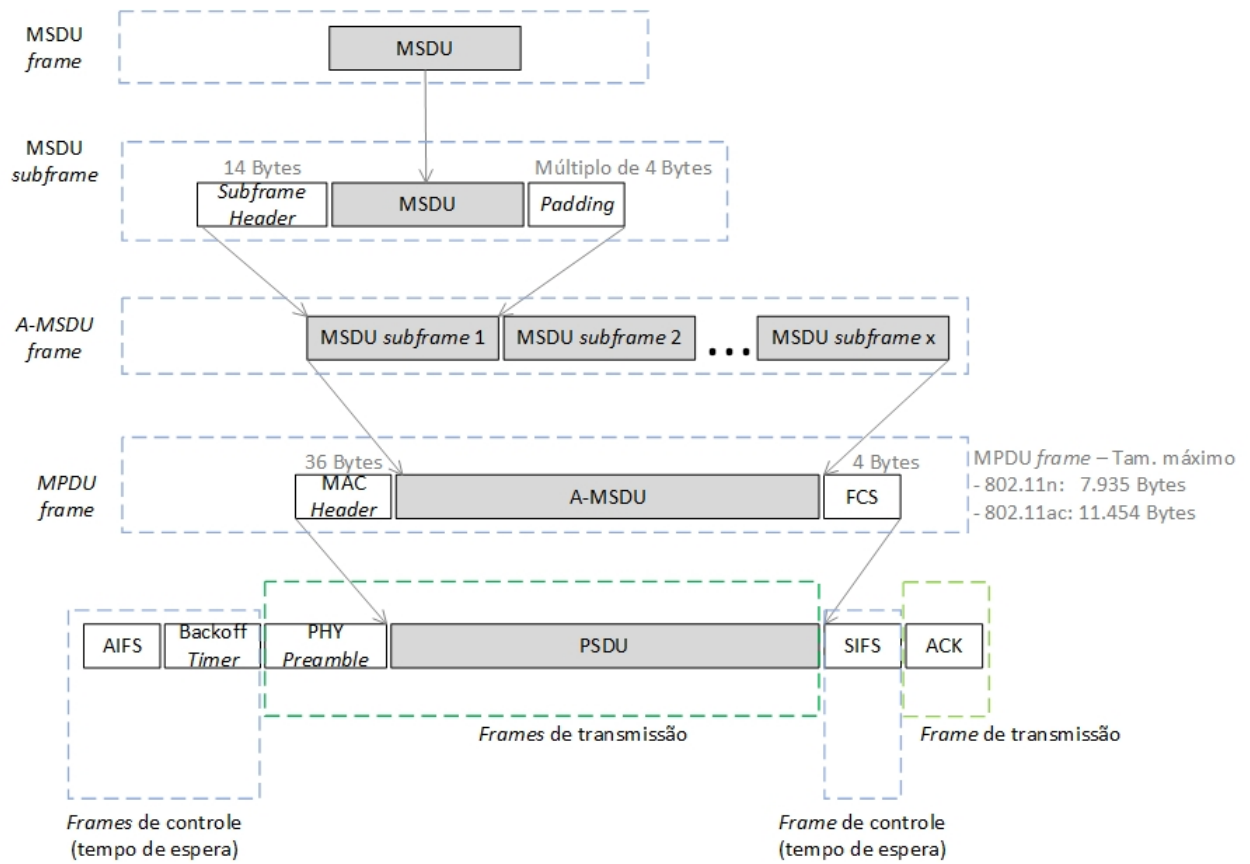


Figura 3.10: Esquema de formação do frame A-MSDU

Throughput para o método de agregação A-MSDU na camada 2 em canais livres de erros (SHARON; ALPERT, 2014)

$$T_{MT} = \frac{8 * Y + L}{AIFS + BO + Preamble + SIFS + Ack + TSym * \left\lceil \frac{8 * (MacHeader + FCS + Y * 4 \lceil \frac{L+14}{4} \rceil) + 22}{BitsPerSymbol * R} \right\rceil} \quad (3.11)$$

Em que:

TMT: *Theoretical Maximum Throughput*
 L: *Tamanho do MSDU (em bytes)*
 Y: *Número de MSDU's incluídos dentro de um único frame A-MSDU*
 R: *Data rate na camada física*
 AIFS: *Arbitration Interframe Space*
 BO: *Backoff Timer*
 SIFS: *Short Interframe Space*
 FCS: *Frame Check Sequence, usado para detectar frames corrompidos*
 Tsym: *Tempo da transmissão de um símbolo em OFDM*

Tabela 3.5: A-MSDU - Valores de referências baseado na norma IEEE Standards Association (2016)

Parâmetros	2,4 GHz	5 GHz
MACHeader	36 bytes	36 bytes
FCS	4 bytes	4 bytes
SIFS	10 μ s	16 μ s
Preamble	16 μ s	16 μ s
ACK	¹ 18 μ s	¹ 18 μ s
Tsym	4 μ s	4 μ s
BitsPerSymbol	4 bits	4 bits

¹Considerado a transmissão do frame 'ACK' a um data rate de 24 Mbps, por medida de segurança

Determinando o valor do AIFS (*Arbitration Interframe Space*) (BURTON, 2009)

O AIFS se refere ao tempo que uma estação deve aguardar antes de disputar o acesso ao meio *wireless*, em que seu valor é determinado levando em consideração a prioridade imposta aos dados de uma estação que usa QoS (Quality of Service).

$$AIFS[AC] = AIFSN[AC] * SlotTime + SIFS \quad (3.12)$$

Em que:

AIFSN[AC]: *Número AIFS da categoria de acesso (prioridade) em uso. Vide Tabela 3.6*

SlotTime: *Valor fixo definido pelo sistema. Vide Tabela 3.6*

SIFS: *Short Interframe Space. Vide Tabela 3.6*

Tabela 3.6: AIFS - Valores de referência (BURTON, 2009)

Parâmetros	2,4 GHz	5 GHz
<i>SlotTime</i>	20 μ s longo / 9 μ s curto	9 μ s
SIFS	10 μ s	16 μ s
¹ Categoria AC_BK (<i>Background</i>)	7	7
¹ Categoria AC_BE (<i>Best Effort</i>)	3	3
¹ Categoria AC_VI (<i>Video</i>)	2	2
¹ Categoria AC_VO (<i>Voice</i>)	2	2

¹ Categoria de acesso, onde seu valor deve ser substituído pelo parâmetro 'AIFSN[AC]' na fórmula

* O AIFS[AC] não depende do *data rate* da camada física, da qual seu resultado é dado em μ s

* O valor considerado nesse estudo para o cálculo do AIFS será o *Best Effort*

* O padrão 802.11b suporta apenas o preâmbulo longo (20 μ s)

Backoff Timer(BO) (SHARON; ALPERT, 2014)

O *Backoff Timer* refere-se a um tempo de contenção para evitar colisões de *frames*, escolhendo para isso uma janela de contenção (*Contention Window* ou CW) com o intuito de determinar o tempo de espera antes de um *host* ter permissão para poder transmitir seus dados. A janela de contenção inicia-se em um valor mínimo e caminha para um valor máximo definido, da qual o tempo de espera para o BO pode ser determinado pela equação 3.13.

$$BO[x] = CW[x] * SlotTime \quad (3.13)$$

Em que:

x: Deve se escolher entre 'min' e 'max' para o BO e o CW

CW: *Contention Window*, variando de acordo com a prioridade AC (*Access Categories*)

SlotTime: Valor fixo definido pelo sistema

Notas

- CWmin: 15 CWmax: 1023 (Exceção: 802.11b - CWmin: 31)
- *Slot time* (em 2,4 GHz): 20 μ s longo ou 9 μ s curto
- *Slot time* (em 5 GHz): 9 μ s
- O BO não depende do *data rate* da camada física
- Na ocorrência de colisão numa tentativa de acesso ao meio, o valor do BO será dobrado
- O valor considerado nesse estudo para o cálculo do BO será o fornecido pela categoria '*Best Effort*'

Simplificação da Eq. 3.11, ignorando os parâmetros ‘*Tsym*’ e ‘*BitsPerSymbol*’ (SHARON; ALPERT, 2014)

$$TMT = \frac{8 * Y * L}{C_1 + \frac{C_2 + Y * C_3}{R}} \quad (3.14)$$

Em que:

TMT: *Theoretical Maximum Throughput*

C_1 : *AIFS + BO + Preamble + SIFS + ACK*

C_2 : $22 + 8 * (MacHeader + FCS)$

C_3 : $8 * 4 * \left\lceil \frac{L+14}{4} \right\rceil$

Alternativa no lugar da Eq. 3.14 para se obter o mesmo resultado (SHARON; ALPERT, 2014)

$$TMT = \frac{8 * L}{\frac{C_1}{Y} + \frac{C_2}{Y * R} + \frac{C_3}{R}} \quad (3.15)$$

A-MSDU - PROJEÇÃO DOS RESULTADOS

Visto que os padrões 802.11n e 802.11ac compartilham algumas de suas características, dentre elas, o método de agregação para a transmissão de *frames*, será exposto abaixo os resultados obtidos através da Eq. 3.11, onde é possível verificar de forma clara as diferenças entre seus resultados.

Padrão 802.11n/ac, usando a frequência de 5 GHz com canal de 20 MHz de largura

Através do gráfico 3.11, é possível observar o comportamento em relação ao *throughput* para os padrões 802.11n/ac na faixa de frequência de 5 GHz, com canal de 20 MHz de largura, usando a agregação A-MSDU.

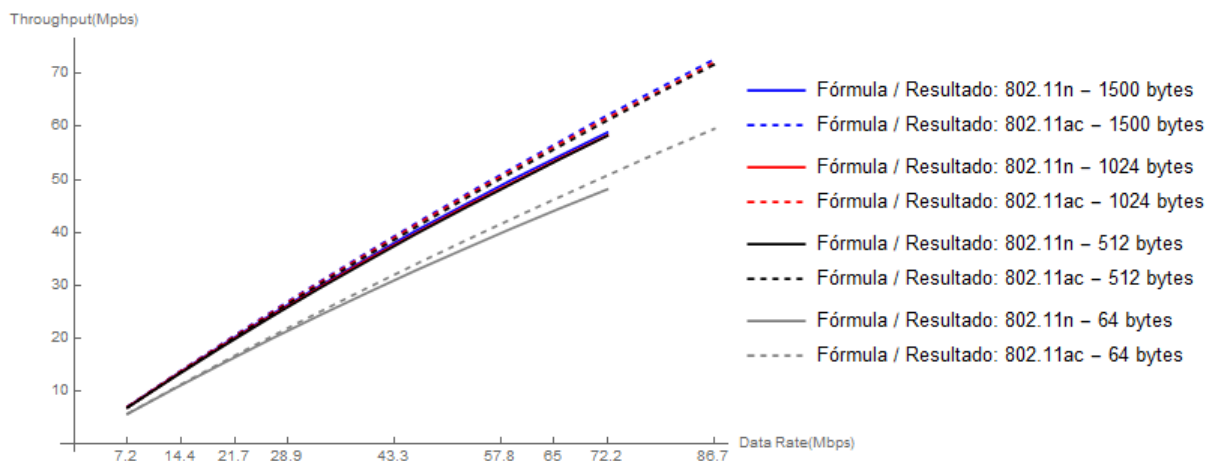


Figura 3.11: Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 20 MHz / A-MSDU

Padrão 802.11n/ac, usando a frequência de 5 GHz com canal de 40 MHz de largura

No gráfico 3.12, a simulação é realizada usando-se da agregação A-MSDU, em 5GHz, com canal de 40 MHz de largura.

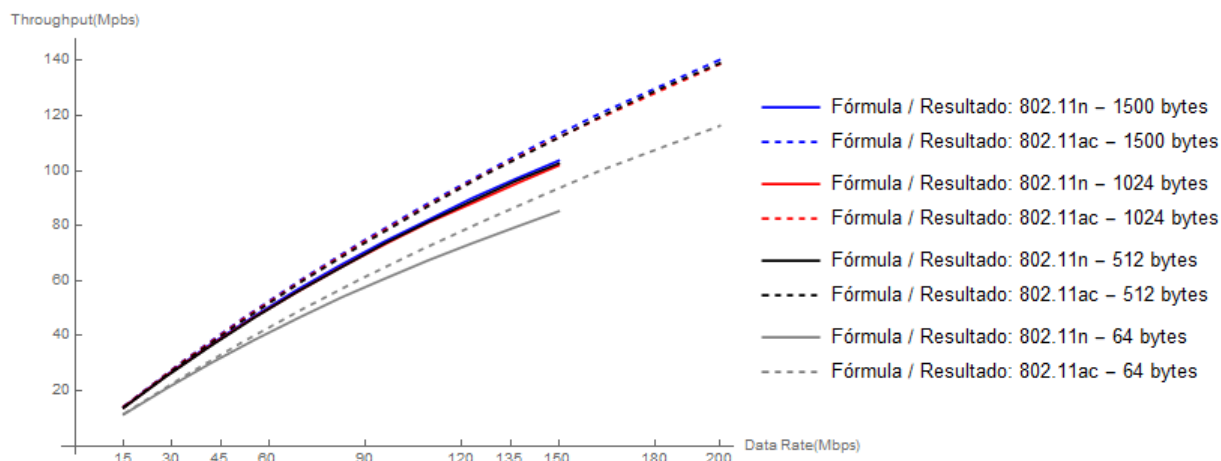


Figura 3.12: Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 40 MHz / A-MSDU

Padrão 802.11n, usando a frequência de 2,4 GHz com canal de 20 MHz de largura

Observa-se, conforme relatado no início deste trabalho, que o padrão 802.11ac exige como premissa o uso da faixa de frequência de 5 GHz, contanto, na simulação representada pelo gráfico 3.13 é descrito apenas os resultados para o padrão 802.11n, usando canais de 20 MHz.

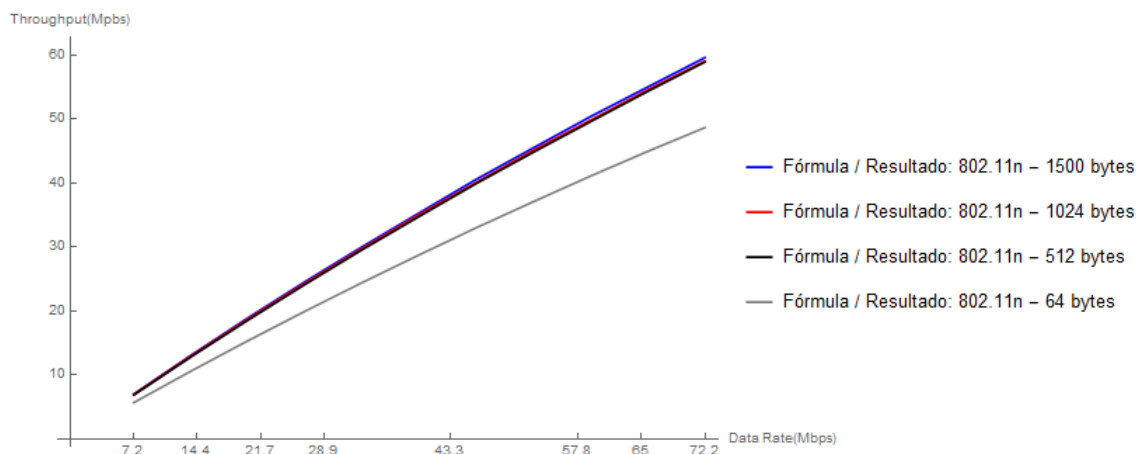


Figura 3.13: Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 20 MHz / A-MSDU

Padrão 802.11n, usando a frequência de 2,4 GHz com canal de 40 MHz de largura

Segue-se agora o resultado exibido pelo gráfico 3.14, usando-se de canais com 40 MHz de largura, onde devido a essa mudança o *data rate* teórico dobra comparado ao perfil apresentado quando canais com 20 MHz de largura são usados.

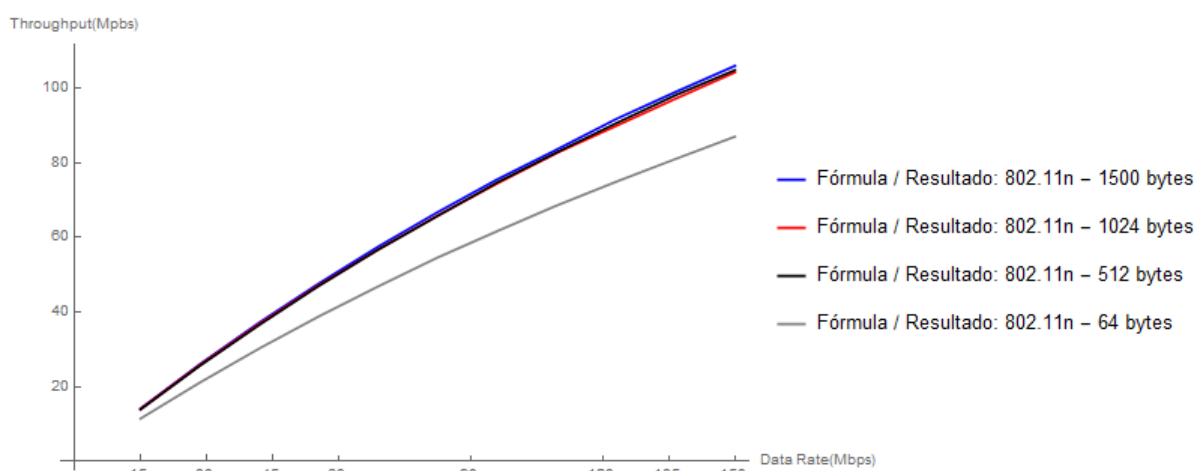


Figura 3.14: Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 40 MHz / A-MSDU

NOTAS GERAIS PARA O MÉTODO DE AGREGAÇÃO A-MSDU

Comparando com os outros métodos de agregação, a do tipo A-MSDU possui como vantagem o menor índice de *overhead* por dados transmitidos, onde as informações dos *frames* de controle, como o AIFS, BO, preâmbulo da camada física, SIFS, ACK, MAC *header* e FCS são compartilhadas para vários MSDU. Tal modelo tem como desvantagem o fato de todos os *frames* MSDU fazerem o uso de um único *frame* FCS, desta forma todos os *frames* presentes na agregação chegam ou não ao seu destino final com sucesso.

Numa transmissão com alta propensão a erros, a retransmissão de todos os *frames* presente na agregação pode ter uma influência extremamente negativa no *throughput* final.

O padrão 802.11ac supera o 802.11n por ter um limite maior para o *frame* MPDU, onde no 802.11ac seu limite é de 11.454 bytes, contra 7.935 bytes para o padrão 802.11n. Nota-se que

a diferença de *throughput* se torna maior com o aumento do *data rate* da camada física.

3.2.2 A-MPDU (*Aggregation MAC Protocol Data Unit*)

Refere-se à união de dois ou mais *frames* MPDU. Como cada *subframe* possui seu próprio cabeçalho MAC e FCS, é possível fazer a retransmissão do(s) *subframe(s)* que foram corrompidos, contudo isso faz com que o *overhead* na transmissão seja maior comparado ao modelo A-MSDU, denotando que este *overhead* corresponde a um valor de 38 bytes de tamanho para cada *frame*.

Mesmo com o aumento do *overhead*, o método A-MPDU possui ainda assim um maior *throughput* comparado ao esquema A-MSDU, visto que a quantidade máxima de dados permitida por esta agregação é maior se comparado com o anterior.

Para esse método de agregação, usa-se o conceito de *Block ACK* (BACK), onde é enviado um único *frame* de confirmação para um conjunto de *frames* MPDUs transmitidos. Em relação ao PSDU, este pode ter um total de 64 MPDUs, sendo usada a Tabela 3.7 para expor seu tamanho máximo permitido em bytes e complementado com a Fig. 3.15 para demonstrar como o *frame* A-MPDU é formado.

Tabela 3.7: Tamanho máximo do PSDU para o esquema A-MSDU

Padrões	Tamanho máximo do PSDU
802.11n	65.534 bytes
802.11ac	1.048.575 bytes

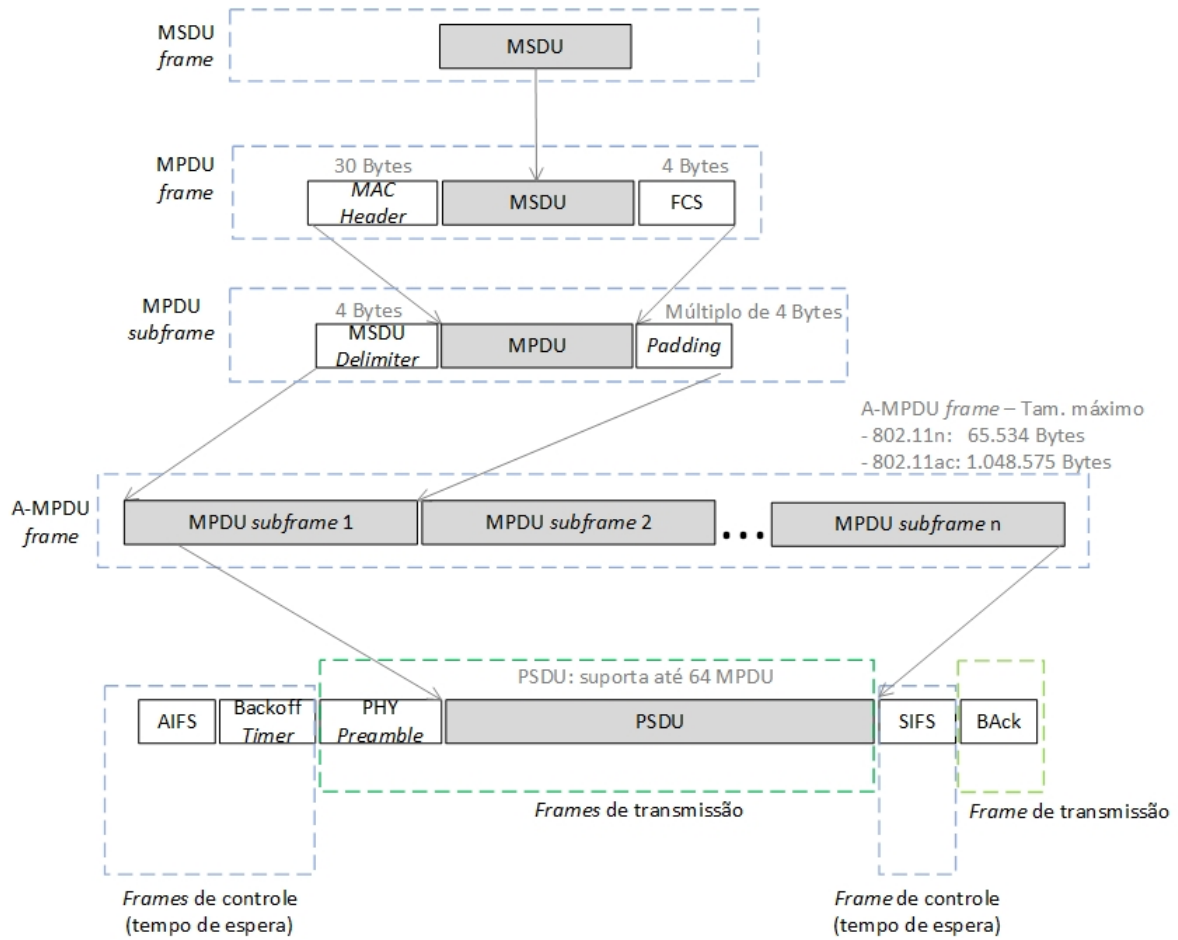


Figura 3.15: Esquema de formação do frame A-MPDU

Throughput para o método de agregação A-MPDU na camada 2 em canais livres de erros (SHARON; ALPERT, 2014)

$$TMT = \frac{8 * X * L}{AIFS + BO + Preamble + SIFS + BAck + TSym * \left\lceil \frac{8 * X * 4 * \left\lceil \frac{MacDelimiter + MacHeader + FCS + L}{4} \right\rceil + 22}{BitsPerSymbol * R} \right\rceil} \quad (3.16)$$

Em que:

TMT: *Theoretical Maximum Throughput*

L: *Tamanho do MSDU (em bytes)*

X: *Número de MPDU's incluídos dentro de um único frame A-MPDU*

R: *Data rate na camada física*

AIFS: *Arbitration Interframe Space*

BO: *Backoff Timer*

SIFS: *Short Interframe Space*

BAck: *Block ACK*

FCS: *Frame Check Sequence, usado para detectar frames corrompidos*

Tsym: *Tempo da transmissão de um símbolo em OFDM*

Tabela 3.8: A-MPDU - Valores predeterminados para os parâmetros 'L' e 'X'

Parâmetro L	Parâmetro X Padrão 802.11n	Parâmetro X Padrão 802.11ac
64 ou 512 bytes	64 MPDU's	64 MPDU's
1500 bytes	≤ 64 MPDU's	≤ 42 MPDU's

Tabela 3.9: A-MPDU - Valores de referências baseado na norma IEEE Standards Association (2016)

Parâmetros	2,4 GHz	5 GHz
MACDelimiter	4 bytes	4
MACHeader	30 bytes	30 bytes
FCS	4 bytes	4 bytes
SIFS	10 μ s	16 μ s
Preâmbulo	16 μ s	16 μ s
BAck	¹ 32 μ s	¹ 32 μ s
Tsym	4 μ s	4 μ s
BitsPerSymbol	4 bits	4 bits

¹Considerado a transmissão do *frame* 'BAck' a um *data rate* de 24 Mbps, por medida de segurança

Simplificação da equação 3.16, ignorando os parâmetros 'Tsym' e 'BitsPerSymbol'
(SHARON; ALPERT, 2014)

$$TMT = \frac{8 * L}{\frac{C_1}{X} + \frac{1}{R} * 8 * 4 * \left\lceil \frac{C_2 + L}{4} \right\rceil + \frac{22}{X * R}} \quad (3.17)$$

Em que:

TMT: *Theoretical Maximum Throughput*

C₁: *AIFS+BO+Preamble+SIFS+BAck*

C₂: *MacDelimiter+MacHeader+FCS*

A-MPDU - PROJEÇÃO DOS RESULTADOS

As projeções que se seguem representam os resultados para o método de agregação do tipo A-MPDU, usando-se da Eq. 3.16 para se obter tais valores.

Padrão 802.11n/ac, usando a frequência de 5 GHz com canal de 20 MHz de largura

O gráfico 3.16 expõe os resultados para a agregação A-MPDU, na faixa de frequência de 5 GHz, com canais de 20 MHz de largura.

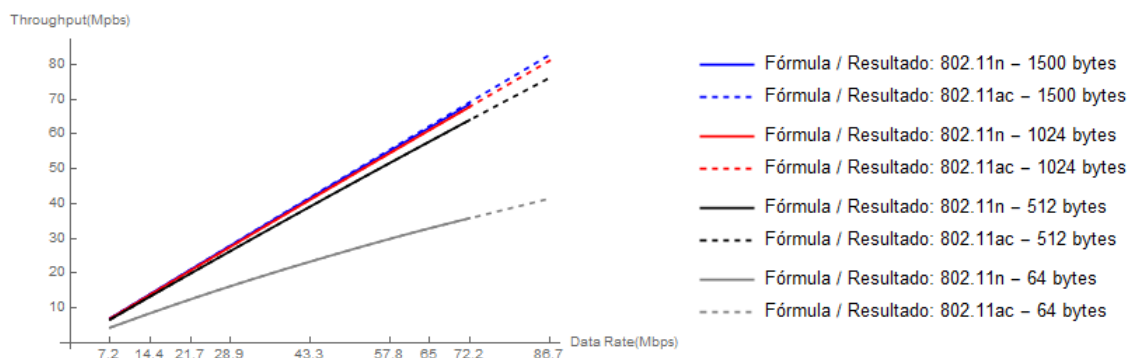


Figura 3.16: Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 20 MHz / A-MPDU

Padrão 802.11n/ac, usando a frequência de 5 GHz com canal de 40 MHz de largura

Mantendo a frequência de 5 GHz, porém agora usando canais com 40 MHz de largura, observa-se através do gráfico 3.17 os resultados, onde comparando com o gráfico 3.16 é possível observar uma certa similaridade entre ambos. Contando, a principal diferença é atribuída ao aumento do *data rate* e consecutivamente ao aumento do *throughput* para os *data rates* maiores.

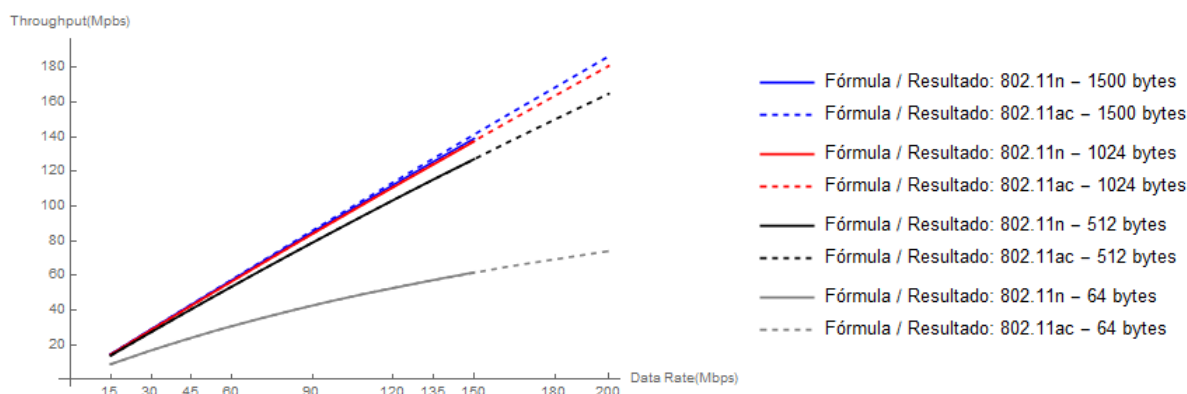


Figura 3.17: Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 40 MHz / A-MPDU

Padrão 802.11n, usando a frequência de 2,4 GHz com canal de 20 MHz de largura

Conforme relatado anteriormente, o padrão 802.11ac funciona única e exclusivamente na faixa de 5 GHz, então o gráfico 3.18 exibe o resultado da simulação usando faixa de frequência de 2,4 GHz considerando apenas o protocolo 802.11n, em canal de 20 MHz de largura.

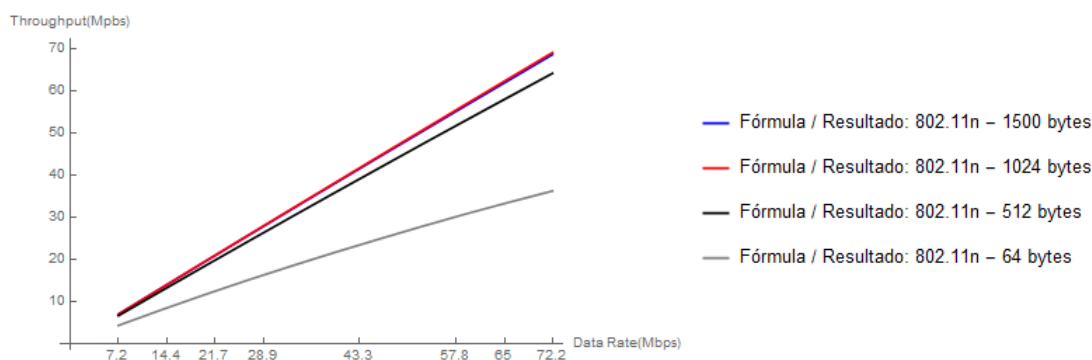


Figura 3.18: Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 20 MHz / A-MPDU

Padrão 802.11n, usando a frequência de 2,4 GHz com canal de 40 MHz de largura

Finalizando os resultados para a agregação A-MPDU, o gráfico 3.19 expõe o resultado agora para canais com 40 MHz de largura

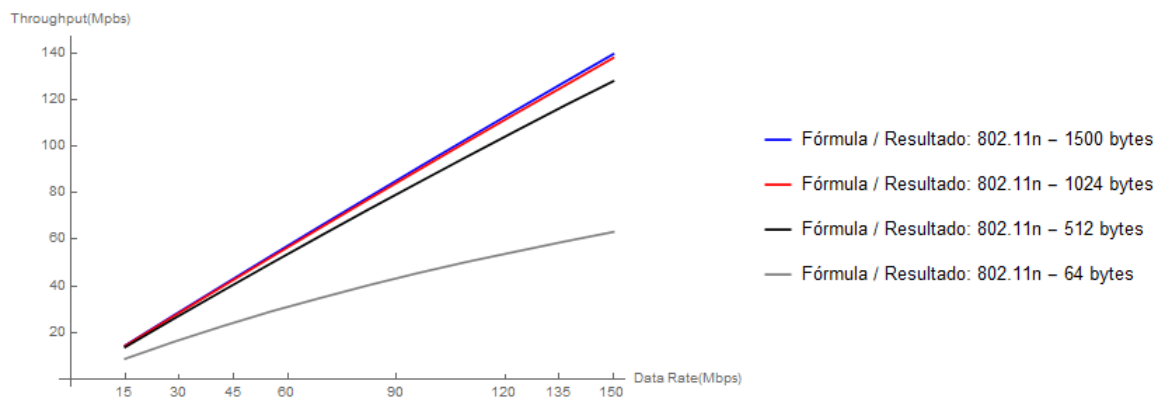


Figura 3.19: Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 40 MHz / A-MPDU

NOTAS GERAIS PARA O MÉTODO DE AGREGAÇÃO A-MPDU

O padrão 802.11ac supera o 802.11n apenas para situações onde o MSDU possui um tamanho grande, como por exemplo considerando *frames* de 1500 bytes. O motivo para tal se deve ao fato de ambos os padrões possuírem um limite máximo de 64 *frames* MPDUs que podem ser empacotados dentro de um único *frame* A-MPDU no processo de agregação, limite este imposto pela função *Block ACK*. Dessa forma, quando se usa *frames* pequenos, como de 64 ou 512 bytes, ambos padrões apresentam exatamente o mesmo *throughput*.

Mesmo considerando o uso de *frames* de maior tamanho, como por exemplo o uso do *frame* MSDU com 1500 bytes de tamanho, a diferença entre os resultados é pequena quando comparando o padrão 802.11ac com o 802.11n, principalmente para *data rates* de menores valor.

A agregação A-MPDU supera a A-MSDU para longos tamanhos de *frames* MSDU, porém para *frames* com 64 bytes de tamanho, o seu limite de 64 MPDUs e seu alto *overhead* faz com que seu *throughput* seja menor em relação ao método A-MSDU.

3.2.3 Agregação em Dois Níveis

Este é o método de agregação de melhor desempenho dentre os expostos, em que a agregação é realizada em dois níveis, englobando o A-MSDU e também o A-MPDU. É importante notar que neste tipo de esquema de agregação, o recomendável para se manter o *throughput* no melhor nível possível é que não exista diferença entre a quantidade de *frames* MSDUs dentro de cada *frame* MPDU, contanto, na sua existência, quanto maior for essa diferença, menor tende a ser o *throughput* final.

A Tabela 3.10 mostra o tamanho máximo do MPDU e do A-MPDU na agregação em dois níveis e a Fig. 3.20 expõe a forma como é estruturado este esquema de agregação.

Tabela 3.10: Tamanho máximo do MPDU e PSDU na agregação em 2 níveis

Padrões	Tamanho máximo do MPDU e A-MPDU	
802.11n	MPDU: 4.096 bytes	A-MPDU: 65.534 bytes
802.11ac	MPDU: 11.454 bytes	A-MPDU: 1.048.575 bytes

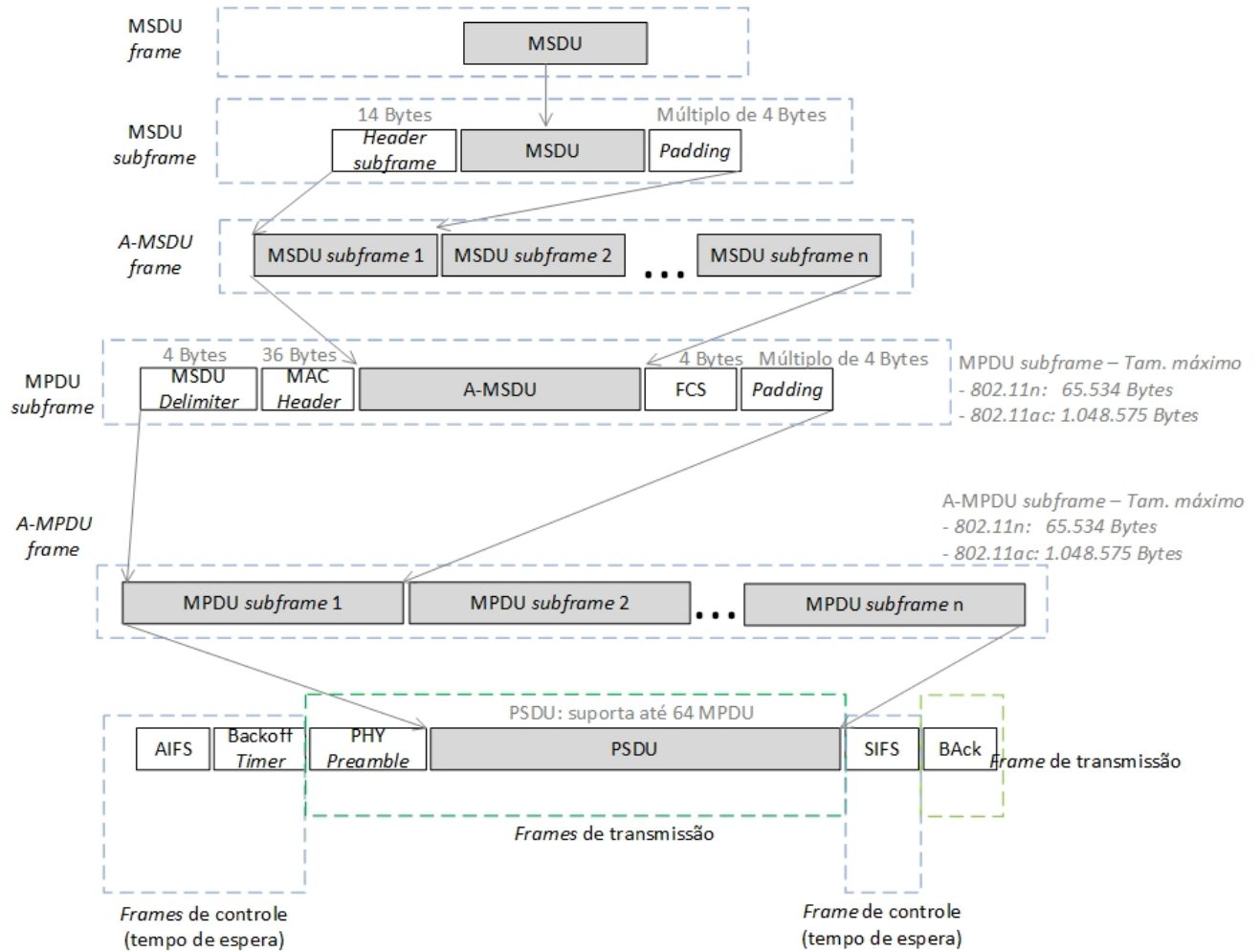


Figura 3.20: Esquema de agregação em dois níveis

Cálculo de *throughput* para o método de agregação em 2 níveis na camada 2, em canais livres de erros (SHARON; ALPERT, 2014)

$$TMT = \frac{8 * Y * L}{C_1 + TSym * \left[\frac{8 * X * \left(4 * \left\lceil \frac{(MacHeader + MacDelimiter + FCS)}{4} \right\rceil \right)}{BitsPerSymbol * R} + \frac{8 * Y * 4 * \left\lceil \frac{L + 14}{4} \right\rceil + 22}{BitsPerSymbol * R} \right]} \quad (3.18)$$

Em que:

- TMT: *Theoretical Maximum Throughput*
 L: *Tamanho do MSDU (em bytes)*
 Y: *Número de MSDUs dentro do frame A-MSDU*
 X: *Número de MPDUs incluídos dentro de um único frame A-MPDU*
 R: *Data rate na camada física*
 FCS: *Frame Check Sequence, usado para detectar frames corrompidos*
 Tsym: *Tempo da transmissão de um símbolo em OFDM*

Tabela 3.11: Agregação em 2 níveis - Valores de referências baseado na norma IEEE Standards Association (2016)

Parâmetros	2,4 GHz	5 GHz
C_1	$AIFS + BO + Preamble + SIFS + BAck$	
MACDelimiter	4 bytes (assume-se o valor da agregação 'A-MPDU')	
MACHeader	36 bytes (assume-se o mesmo valor da agregação 'A-MSDU')	
FCS	4 bytes	4 bytes
SIFS	10 μs	16 μs
Preâmbulo	16 μs	16 μs
BAck	¹ 32 μs	¹ 32 μs
Tsym	4 μs	4 μs
BitsPerSymbol	4 bits	4 bits

¹Considerado a transmissão do frame 'BAck' a um data rate de 24 Mbps, por medida de segurança

Sumarização da equação 3.18, ignorando os parâmetros 'Tsym' e 'BitsPerSymbol' (SHARON; ALPERT, 2014)

$$TMT = \frac{8 * Y * L}{C_1 + X * C_2 + Y * C_3 + \frac{22}{R}} \quad (3.19)$$

Em que:

TMT: *Theoretical Maximum Throughput*

$$C_1 = AIFS + BO + Preamble + SIFS + BAck$$

$$C_2 = \frac{8 * (4 * \left\lceil \frac{(MacHeader + MacDelimiter + FCS)}{4} \right\rceil)}{R}$$

$$C_3 = \frac{8 * 4 * \left\lceil \frac{L+14}{4} \right\rceil}{R}$$

Tempo para se transmitir o PSDU (*Physical Service Data Unit*)

$$PSDU = T_{sym} * \left\lceil \frac{T_x + 22}{R * BitsPerSymbol} \right\rceil \quad (3.20)$$

A fórmula 3.20 é válida para qualquer método de agregação, onde seus atributos possuem a seguinte definição

T_x : Tamanho do PSDU (em bits)

T_{sym} : Tempo da transmissão de um símbolo OFDM, onde nesse caso seu valor é $4\mu s$

$BitsPerSymbol$: 4 bits

R : Data rate na camada física

22: Valor referente a soma dos seguintes campos presentes no cabeçalho de cada frame ethernet: service + tail

AGREGAÇÃO EM DOIS NÍVEIS - PROJEÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados para a agregação em dois níveis foram obtidos através da Eq. 3.18

Padrão 802.11n/ac, usando a frequência de 5 GHz com canal de 20 MHz de largura

Inicia-se as projeções para o método de agregação em dois níveis, com os resultados das simulações sendo representado pelo gráfico 3.21, usando a frequência de 5 GHz e canais com 20 MHz de largura.

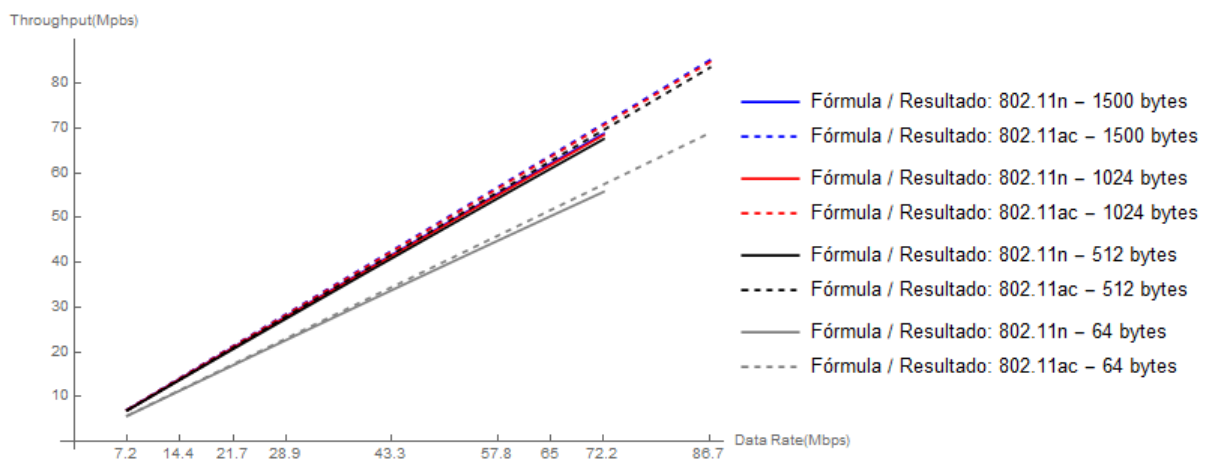


Figura 3.21: Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 20 MHz / Dois níveis

Padrão 802.11n/ac, usando a frequência de 5 GHz com canal de 40 MHz de largura

Segue-se agora com o gráfico 3.22, onde a simulação é exibida para canais de 40 MHz de largura, na faixa de 5 GHz.

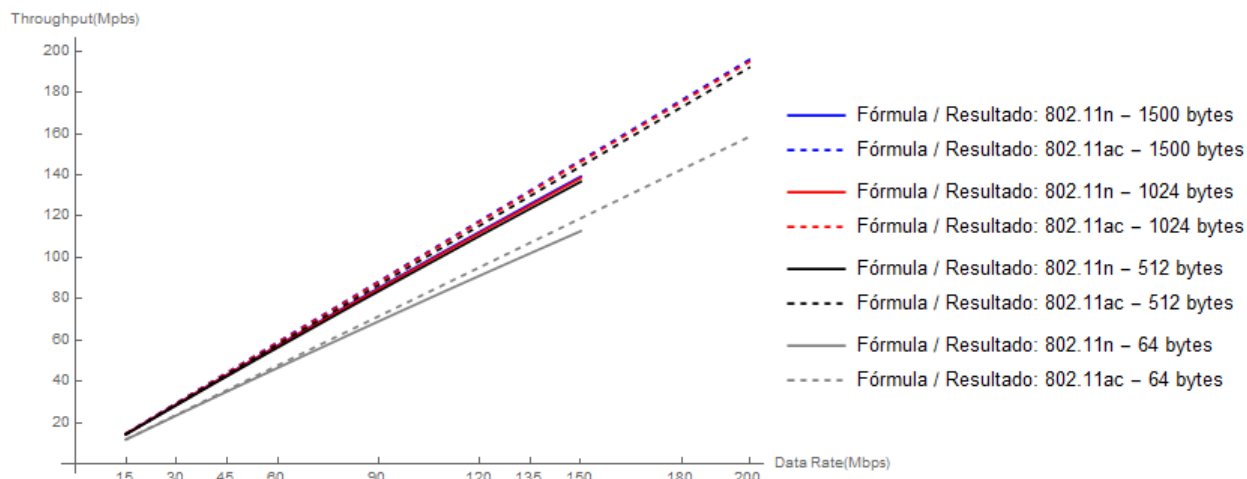


Figura 3.22: Projeção de throughput para o padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 40 MHz / Dois níveis

Padrão 802.11n, usando a frequência de 2,4 GHz com canal de 20 MHz de largura

O gráfico 3.23 exibe os resultados para a faixa de frequência de 2,4 GHz, em canal com 20 MHz de largura. É possível perceber que seu resultado é bem similar aos resultados da simulação para a faixa de 5 GHz na mesma largura de canal.

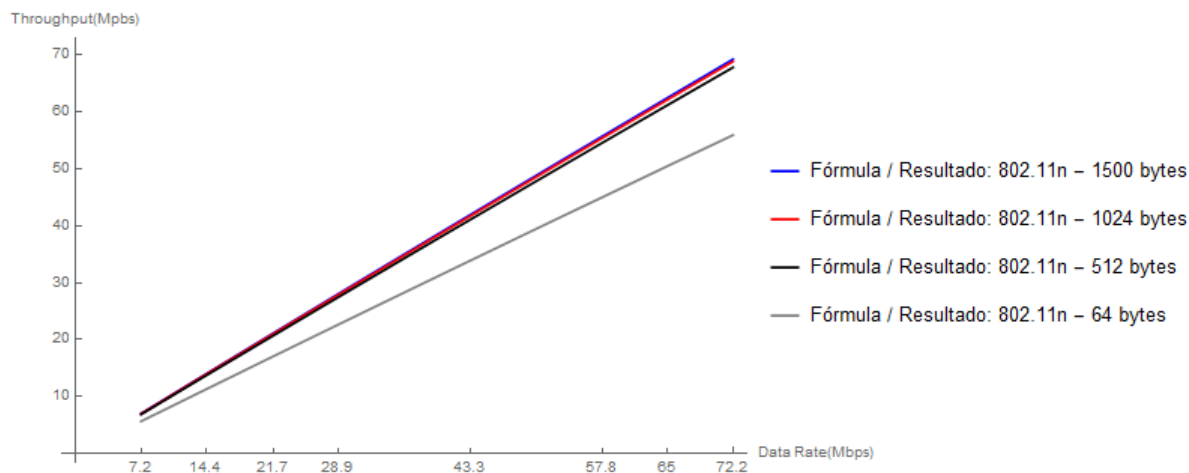


Figura 3.23: Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 20 MHz / Dois níveis

Padrão 802.11n, usando a frequência de 2,4 GHz com canal de 40 MHz de largura

Finalizamos com o gráfico 3.24, representando o comportamento agora com canal de 40 MHz de largura

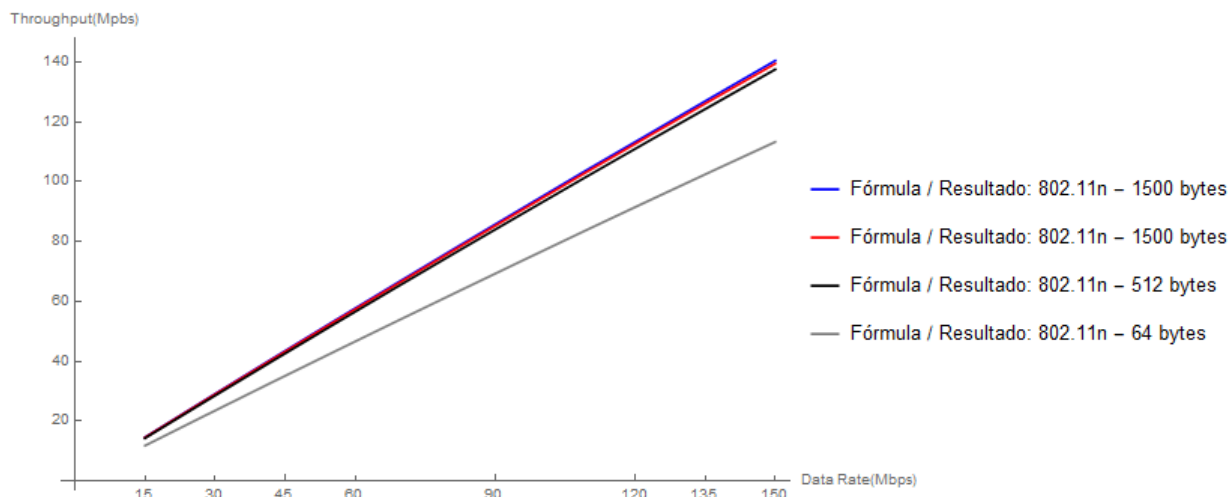


Figura 3.24: Projeção de throughput para o padrão 802.11n, 2,4 GHz / 40 MHz / Dois níveis

NOTAS GERAIS PARA O MÉTODO DE AGREGAÇÃO EM DOIS NÍVEIS

Este método apresenta a melhor relação entre a quantidade de dados transmitidos pelo *overhead* da camada 1 e 2 do modelo OSI, quando comparado aos outros 2 métodos.

O padrão 802.11ac supera o 802.11n por possibilitar *frames* de maior tamanho, porém assim como na agregação A-MPDU, a agregação de dois níveis também possui como limite o número máximo de 64 MPDUs dentro de cada *frame* A-MPDU.

A diferença de *throughput* entre o padrão 802.11ac e o 802.11n dentro de um mesmo método de agregação se torna maior quando comparado a diferença apresentada neste método com a da agregação A-MSDU, principalmente considerando o fato do *frame* MPDU possuir um tamanho menor para o padrão 802.11n na agregação em dois níveis.

Para se atingir o máximo *throughput*, a relação entre a quantidade de *frames* MSDUs dentro de cada *frame* MPDU deve ser de no máximo 1.

Capítulo 4

Modelo para Medições e Testes em Campo

Será descrito a seguir todas as ferramentas usadas para o desenvolvimento dos testes, abrangendo desde os *softwares* para analisar a condição do espectro eletromagnético em que as emulações são feitas até os *hardwares* que irão proporcionar a transmissão dos *frames* sobre determinadas circunstâncias.

4.1 *Softwares* Utilizados

Sistema Operacional de Rede

Para a realização desses testes foi escolhido o sistema operacional de um fabricante em específico, onde no contexto desse trabalho será referenciado como fabricante 'x'.

No propósito deste trabalho, este SO (sistema Operacional) terá a função de fornecer o gráfico com as informações dos fluxos ao qual serão submetidos os equipamentos em teste, demonstrando assim todas as estatísticas dos tráfegos que estão passando pelo enlace em questão, compreendendo a velocidade de transmissão, pacotes por segundos, jitter, etc.

Além das informações de estatísticas, usaremos seu utilitário denominado '*Traffic Generator*', sendo esse explicado logo abaixo.

Informações sobre a versão usada

- SO: versão 6.42
- Bootloader (ou Firmware): versão 6.42

Traffic Generator

Com este utilitário presente no SO (Sistema Operacional) do fabricante x, é possível emular o tráfego para os testes e assim verificar qual é a máxima taxa de transferência possível de se ser alcançada num determinado enlace *wireless* para cada um dos protocolos *WLAN* em estudo, além do fornecimento de outros parâmetros, como: latência, jitter, perdas, etc.

O *Traffic Generator* possui algumas características que tornam o seu uso interessante no contexto deste trabalho, como por exemplo:

- Opções para selecionar o tamanho dos *frames* a serem enviados
- Escolha da camada do modelo de referência OSI que será usada para a emulação do tráfego, onde neste contexto foi escolhido as duas primeiras camadas
- Quantidade de tráfegos (em velocidade ou *frames* por segundos) a serem enviados

- Possibilidade para envio dos dados de forma unidirecional ou bidirecional
- Fornecimento de informações detalhadas para os resultados da emulação

Vale ressaltar que para o uso do *Traffic Generator* é necessário apenas um único equipamento para gerar e receber os dados que irão passar pelo enlace *wireless*, onde tal topologia de testes é definida como ‘testes em *loop*’.

A Fig. 4.1 exibe as estatísticas apresentadas pelo *Traffic Generator* durante sua execução, onde é possível verificar a quantidade de dados injetado sobre o equipamento em testes, aliado as estatísticas referente a quantidade de pacotes recebidos, taxa de perda, latência, jitter, dentre outras informações.

Seq	ID	Tx Packets	Tx Rate	Rx Packets	Rx Rate	Lost Packets	Lost Rate	Lat. Min.	Lat. Avg.	Lat. Max.	Jitter
12	0	24 998	299.9 Mbps	14 171	170.0 Mbps	10 827	129.9 Mbps	19.0ms	22.1ms	28.8ms	9.82ms
13	0	25 003	300.0 Mbps	14 036	168.4 Mbps	10 967	131.6 Mbps	18.9ms	22.3ms	32.0ms	13.1ms
14	0	24 999	299.9 Mbps	14 168	170.0 Mbps	10 831	129.9 Mbps	19.1ms	22.1ms	29.2ms	10.1ms
15	0	25 002	300.0 Mbps	14 171	170.0 Mbps	10 831	129.9 Mbps	19.0ms	22.1ms	31.2ms	12.2ms
16	0	24 999	299.9 Mbps	14 043	168.5 Mbps	10 956	131.4 Mbps	18.8ms	22.3ms	30.9ms	12.1ms
17	0	25 000	300.0 Mbps	14 133	169.5 Mbps	10 867	130.4 Mbps	18.9ms	22.1ms	33.3ms	14.4ms
18	0	25 000	300.0 Mbps	14 207	170.4 Mbps	10 793	129.5 Mbps	19.1ms	22.1ms	30.2ms	11.1ms
19	0	24 999	299.9 Mbps	14 190	170.2 Mbps	10 809	129.7 Mbps	18.9ms	22.1ms	31.1ms	12.2ms
20	0	24 999	299.9 Mbps	14 094	169.1 Mbps	10 905	130.8 Mbps	19.0ms	22.2ms	29.5ms	10.5ms
21	0	25 003	300.0 Mbps	14 234	170.8 Mbps	10 769	129.2 Mbps	18.9ms	22.2ms	34.1ms	15.2ms
22	0	24 999	299.9 Mbps	14 265	171.1 Mbps	10 734	128.8 Mbps	19.0ms	22.0ms	28.3ms	9.21ms
23	0	24 998	299.9 Mbps	14 291	171.4 Mbps	10 707	128.4 Mbps	18.8ms	22.0ms	30.7ms	11.9ms
24	0	25 001	300.0 Mbps	14 203	170.4 Mbps	10 798	129.5 Mbps	18.8ms	22.0ms	29.1ms	10.2ms
25	0	25 000	300.0 Mbps	14 345	172.1 Mbps	10 655	127.8 Mbps	19.0ms	21.8ms	28.3ms	9.30ms
26	0	25 000	300.0 Mbps	14 412	172.9 Mbps	10 588	127.0 Mbps	19.1ms	21.9ms	30.2ms	11.1ms
27	0	25 000	300.0 Mbps	14 232	170.7 Mbps	10 768	129.2 Mbps	19.0ms	22.0ms	30.4ms	11.3ms
28	0	25 000	300.0 Mbps	14 232	170.7 Mbps	10 768	129.2 Mbps	18.8ms	22.0ms	30.1ms	11.3ms
29	0	25 002	300.0 Mbps	14 114	169.3 Mbps	10 888	130.6 Mbps	19.0ms	22.2ms	30.9ms	11.9ms
30	0	24 998	299.9 Mbps	14 218	170.6 Mbps	10 780	129.3 Mbps	18.8ms	22.0ms	29.0ms	10.1ms
TOT	0	749 932	299.9 Mbps	425 058	170.0 Mbps	324 874	129.9 Mbps	408.us	22.1ms	35.7ms	35.3ms

Figura 4.1: Traffic Generator - Estatísticas

Como o *Traffic Generator* é um aplicativo nativo no SO do fabricante 'x', foi escolhido então um servidor produzido também pelo mesmo fabricante, onde este já possui o SO usado neste trabalho nativamente. Outra justificativa para a escolha deste servidor deve-se a sua grande capacidade de processamento, suficiente para simular os tráfegos propostos neste estudo.

A seguir, é exemplificado pela Fig. 4.2 a forma como a topologia de teste é desenvolvida, onde os dados são enviados por uma das portas ethernet deste servidor com destino ao radio de origem, e por fim os dados previamente enviados retornam por uma outra de suas portas ethernet, que está ligado ao radio remoto.

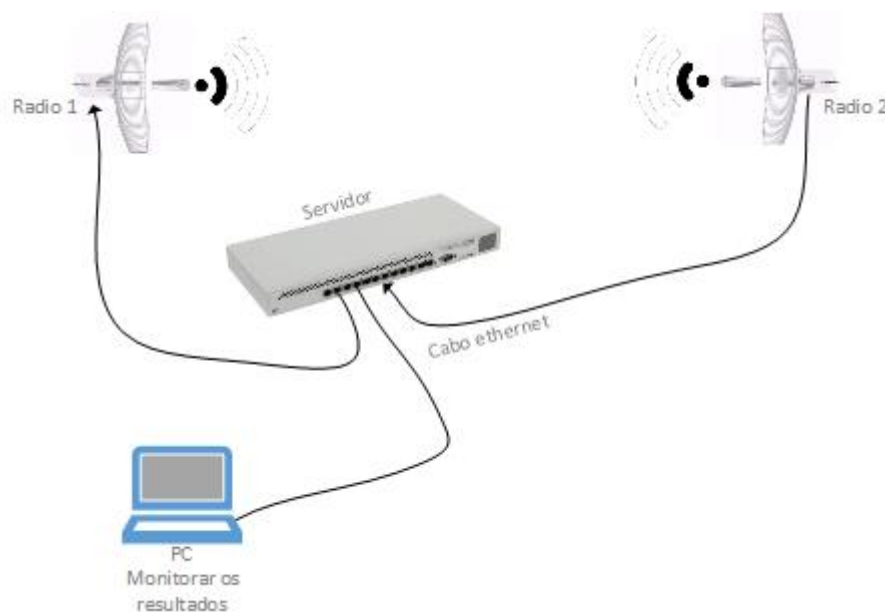


Figura 4.2: Traffic Generator - Topologia de testes em loop

airView

Este utilitário tem a função de servir como analisador de espectro, certificando-se de que as condições ambientais relacionadas ao ruído e interferência seja o mais semelhante possível em todos os testes.

O airView é uma solução proprietária de uma outra empresa, onde neste contexto será denominada empresa 'y'. Usaremos alguns dos rádios desta empresa que possuem o airView disponível em seu *firmware* nativamente.

O utilitário airView foi utilizado através de um equipamento que trabalha na faixa de 5 GHz, com antena integrada, fabricado pela empresa 'y'.

A Fig. 4.3 apresenta o resultado da análise espectral usando-se do airView para a faixa de frequência de 5 GHz

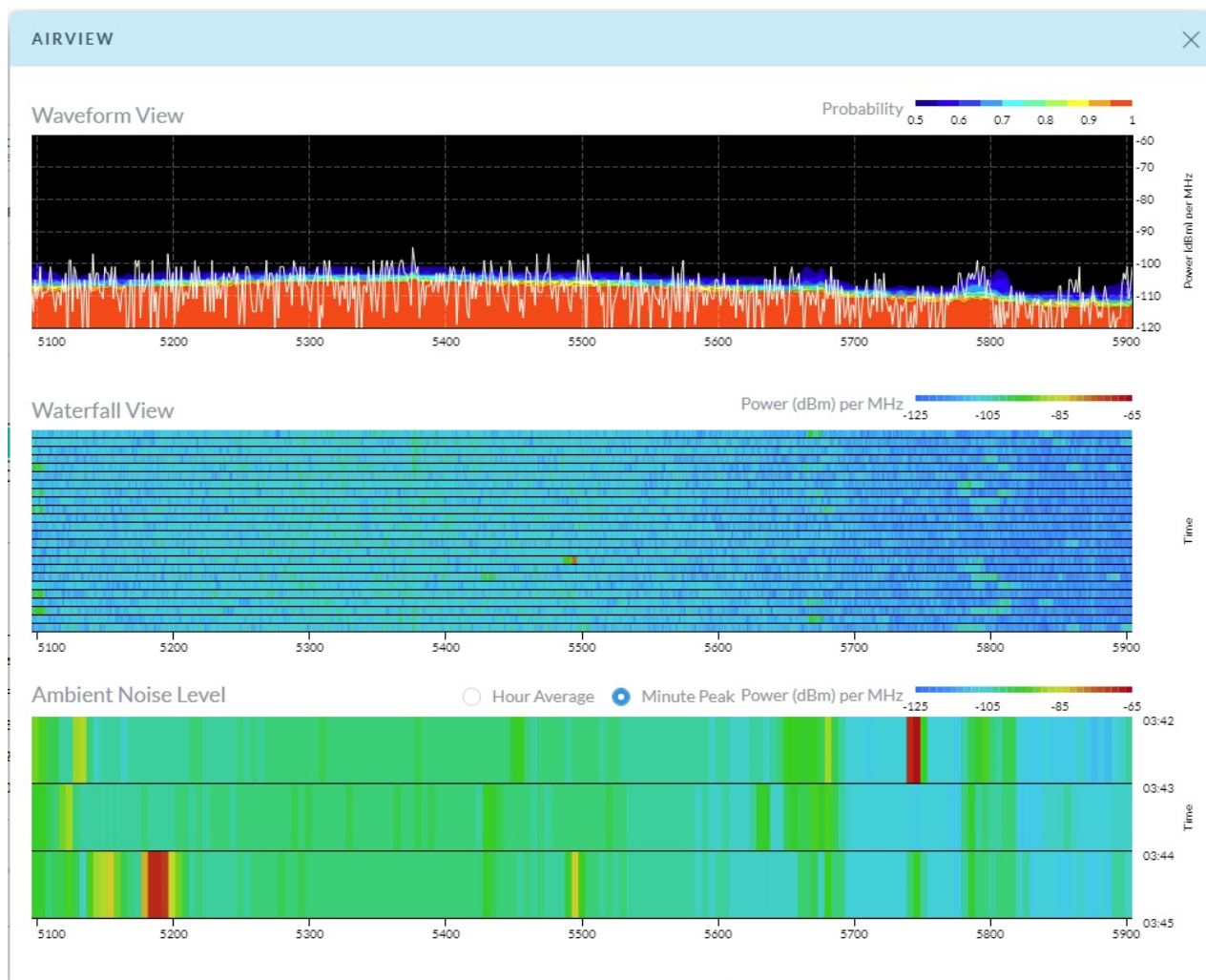


Figura 4.3: Airview - Análise de espectro na faixa de 5 GHz

Freq. Usage

A ferramenta *Freq. Usage* está disponível nativamente nos rádios da empresa 'x', onde seu intuito é demonstrar as faixas de canais disponíveis para a frequência selecionada e a relação da porcentagem de uso em cada canal, assim como o respectivo ruído incidente sobre o mesmo.

A Fig. 4.4 apresenta a análise para a faixa de frequência de 2,4 GHz, seguido da Fig. 4.5 representando a análise para a faixa de 5 GHz.

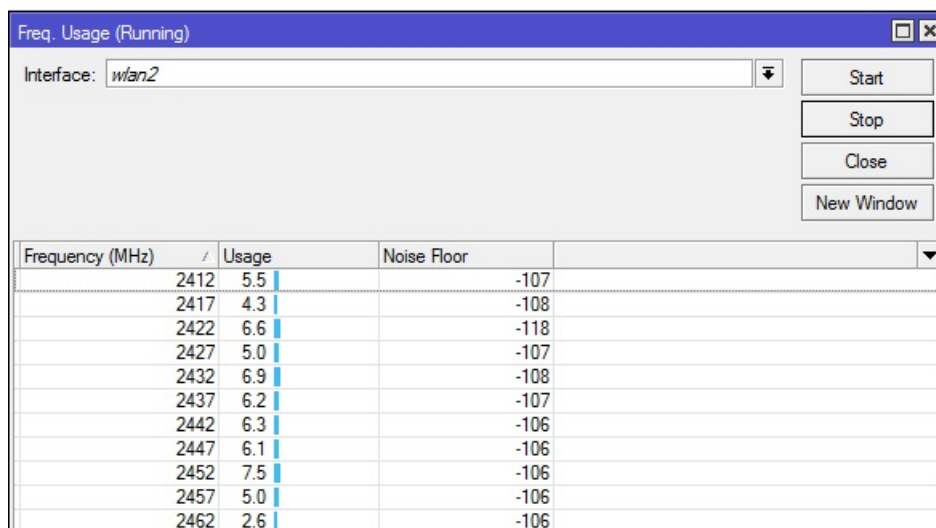


Figura 4.4: Freq. Usage - Análise na faixa de frequência de 2,4 GHz

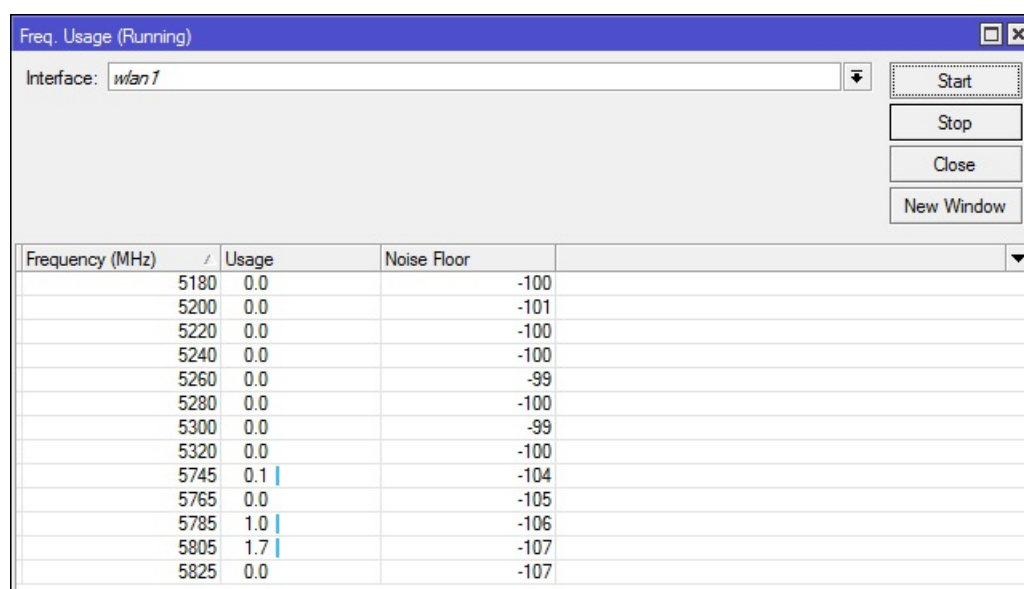


Figura 4.5: Freq. Usage - Análise na faixa de frequência de 5 GHz

Spectral Scan

Assim como o airView da empresa 'y', a empresa 'x' também possui seu analisador de espectro, sendo este denominado *Spectral Scan*. O princípio de funcionamento dessa ferramenta segue a mesma linha do airView, onde é demonstrado através de um gráfico qual o nível de uso em cada canal pela intensidade de interferência incidente a este. Vale ressaltar que a ferramenta *Spectral Scan* está disponível apenas para analisar a faixa de frequência de 2.4 GHz, onde seu resultado é exibido na Fig. 4.6 .

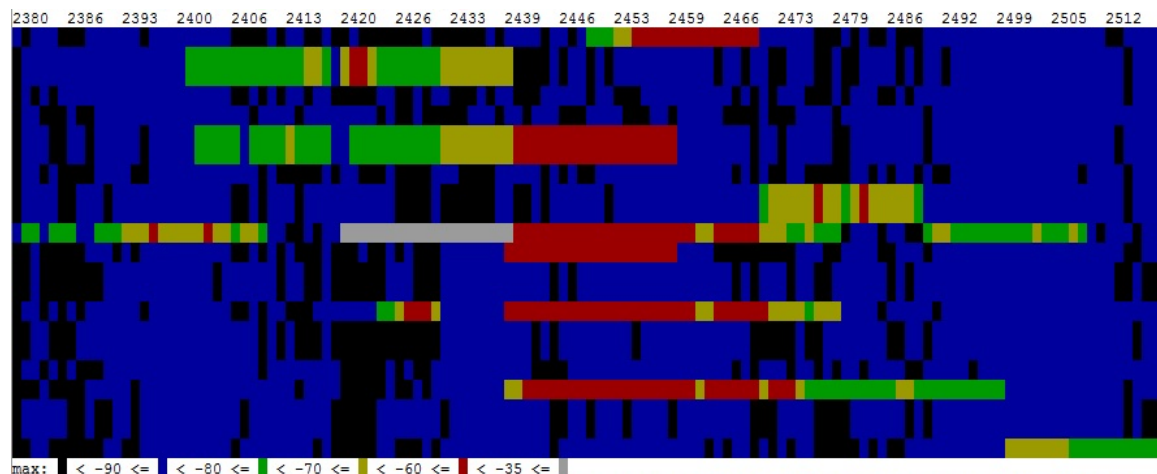


Figura 4.6: Spectral Scan - Análise na faixa de frequência de 5 GHz

Snooper

Esta é também uma outra ferramenta usada para realizar a análise do espectro eletromagnético, criado pela empresa 'x', onde seu diferencial é o fato desta informar mais detalhes sobre os equipamentos que estão usando a faixa de frequência em foco nos testes, detalhando os dados condizente a largura de canal que cada equipamento está usando na localidade em que os testes são realizados, intensidade de sinal, porcentagem de uso em cada canal, taxa de transferência estimada por canal, dentre outras informações.

É importante salientar que nenhuma das ferramentas usadas para realizar a análise de espectro aqui citadas são tão precisas comparado a um analisador de espectro profissional, mesmo assim, para o objetivo deste trabalho, essas ferramentas atendem ao requerido, que é identificar quais dos canais possuem o menor nível de interferência e ruído.

A Fig. 4.7 exibe o resultado apresentado pelo Snooper para a faixa de frequência de 2,4 GHz, seguido da Fig. 4.8 representando a análise para a faixa de 5 GHz

Wireless Snooper (Running)

Interface: wlan2

Start

Stop

Close

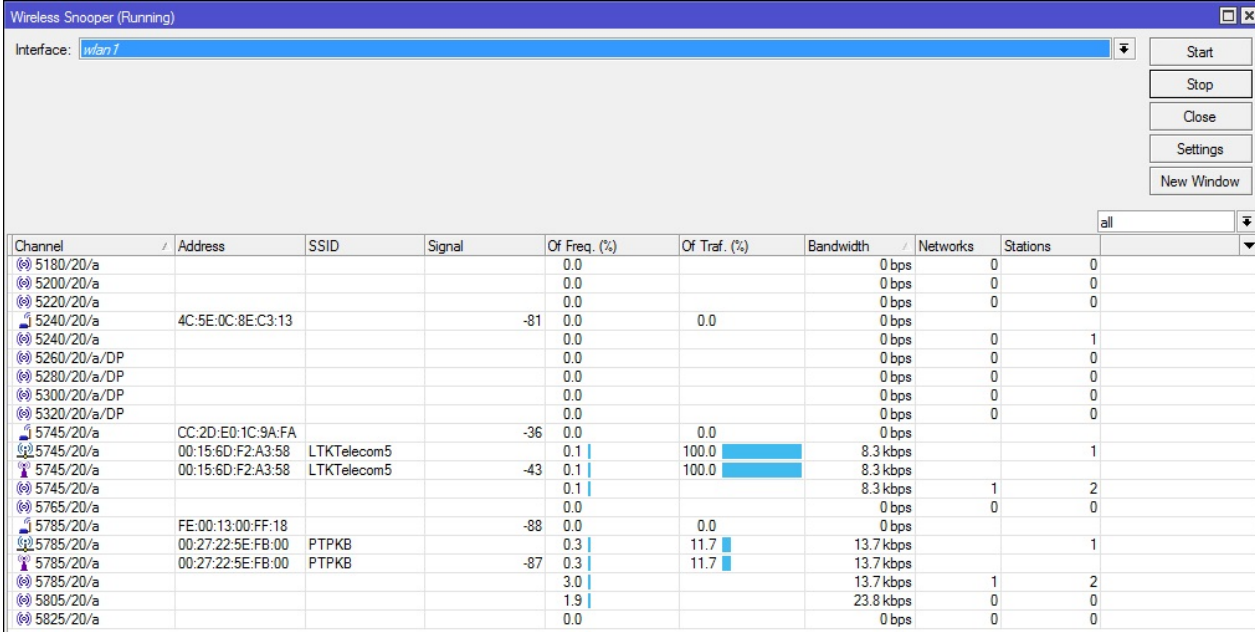
Settings

New Window

all

Channel	Address	SSID	Signal	Of Freq. (%)	Of Traf. (%)	Bandwidth	Networks	Stations
2412/20/gn	EE:9F:DB:97:47:D7	GK-Visitante		0.0	0.0	0 bps		1
2412/20/gn	96:03:00:00:CB:00		-77	0.0	0.0	0 bps		
2412/20/gn	3A:35:45:3A:30:43		-70	0.0	0.0	0 bps		
2412/20/gn	EE:9F:DB:97:47:D7	GK-Visitante	-88	0.0	0.0	0 bps		
2412/20/gn			5.8			51.1 kbps	1	3
2417/20/gn	D4:6E:0E:C5:89:0C	RMA Teste		0.0	0.0	0 bps		1
2417/20/gn	D4:6E:0E:C5:89:0C	RMA Teste	-92	0.0	0.0	0 bps		
2417/20/gn	04:00:FE:00:13:00		-72	0.0	0.0	0 bps		
2417/20/gn	50:92:B9:88:E4:EA		-78	0.0	0.0	0 bps		
2417/20/gn			4.7			28.6 kbps	1	3
2422/20/gn	9A:04:00:00:CB:00		-70	0.0	0.0	0 bps		
2422/20/gn	00:00:07:00:FF:08		-70	0.0	0.0	0 bps		
2422/20/gn	8E:05:00:00:CB:00		-66	0.0	0.0	0 bps		
2422/20/gn			5.8			41.4 kbps	0	3
2427/20/gn	1A:05:00:00:CB:00		-71	0.0	0.0	0 bps		
2427/20/gn			13.2			37.6 kbps	0	1
2432/20/gn	FE:00:13:00:FF:18		-72	0.0	0.0	0 bps		
2432/20/gn	50:C7:BF:9A:87:4F	RMA	1.0	7.9		9.7 kbps		1
2432/20/gn	50:C7:BF:9A:87:4F	RMA	-86	1.0	7.9	9.7 kbps		
2432/20/gn	84:16:F9:2D:27:38	HEALTHCARE	2.3	17.5		21.7 kbps		1
2432/20/gn	84:16:F9:2D:27:38	HEALTHCARE	-88	2.3	17.5	21.7 kbps		
2432/20/gn			13.5			93.0 kbps	2	3
2437/20/gn			3.4			21.7 kbps	0	0
2442/20/gn			6.7			51.2 kbps	0	1
2447/20/gn	4C:5E:0C:14:EC:62		-35	0.8	12.3	5.3 kbps		
2447/20/gn			5.8			51.2 kbps	0	0
2452/20/gn	00:1B:77:B0:86:B9	LTK-Lazer	-39	0.0	0.0	0 bps		
2452/20/gn	50:92:B9:A9:B1:94	LTK-Lazer	-38	0.0	0.0	0 bps		
2452/20/gn	00:00:00:FF:FF:C0		-39	0.0	0.0	0 bps		
2452/20/gn	00:00:88:01:00:00		-33	0.0	0.0	0 bps		
2452/20/gn	00:00:88:01:00:01		-37	0.0	0.0	0 bps		
2452/20/gn	98:FC:11:E0:7F:F9	DBR	0.8	10.8		7.1 kbps		1
2452/20/gn	98:FC:11:E0:7F:F9	DBR	-79	0.8	10.8	7.1 kbps		
2452/20/gn	D4:CA:6D:2D:85:35	Almoxarifado	2.6	35.4		23.7 kbps		1
2452/20/gn	D4:CA:6D:2D:85:35	Almoxarifado	-31	2.6	35.4	23.7 kbps		
2452/20/gn	D6:CA:6D:2D:85:35	LTK-Lazer	3.2	42.4		29.0 kbps		3
2452/20/gn	D6:CA:6D:2D:85:35	LTK-Lazer	-29	3.2	42.4	29.0 kbps		
2452/20/gn			7.5			65.4 kbps	3	8
2457/20/gn	00:0C:42:3A:FB:AB		-67	0.0	0.0	0 bps		
2457/20/gn			5.9			51.9 kbps	0	1
2462/20/gn	22:27:22:CF:7E:63			0.0	0.0	0 bps		1
2462/20/gn	00:FF:08:04:00:FE		-49	0.0	0.0	0 bps		
2462/20/gn	22:27:22:CF:7E:63		-90	0.0	0.0	0 bps		
2462/20/gn			2.3			20.0 kbps	1	2

Figura 4.7: Snooper - Análise na faixa de frequência de 2,4 GHz



Wireless Snooper (Running)

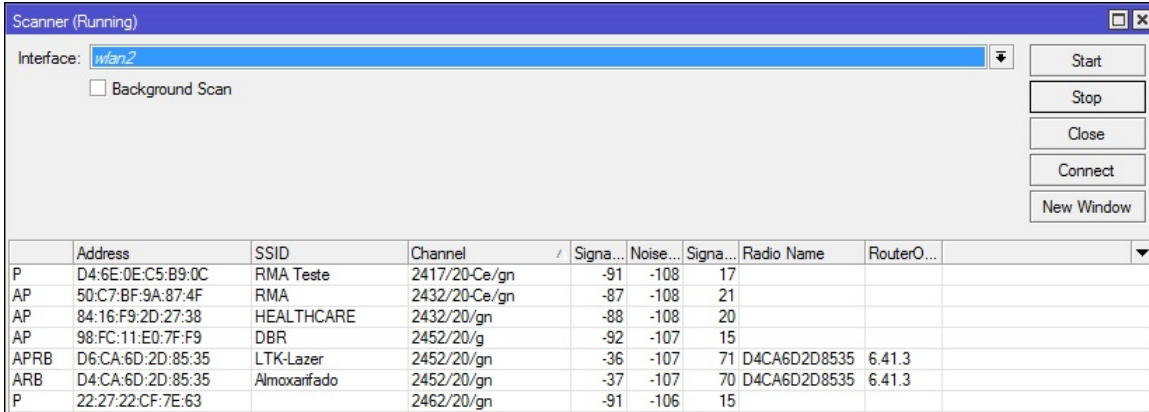
Interface: wlan1

Start
Stop
Close
Settings
New Window

Channel	Address	SSID	Signal	Of Freq. (%)	Of Traf. (%)	Bandwidth	Networks	Stations
5180/20/a				0.0		0 bps	0	0
5200/20/a				0.0		0 bps	0	0
5220/20/a				0.0		0 bps	0	0
5240/20/a	4C:5E:0C:8E:C3:13		-81	0.0	0.0	0 bps	0	0
5240/20/a				0.0		0 bps	0	1
5260/20/a/DP				0.0		0 bps	0	0
5280/20/a/DP				0.0		0 bps	0	0
5300/20/a/DP				0.0		0 bps	0	0
5320/20/a/DP				0.0		0 bps	0	0
5745/20/a	CC:2D:E0:1C:9A:FA		-36	0.0	0.0	0 bps		
5745/20/a	00:15:6D:F2:A3:58	LTKTelecom5		0.1	100.0	8.3 kbps		1
5745/20/a	00:15:6D:F2:A3:58	LTKTelecom5	-43	0.1	100.0	8.3 kbps		
5745/20/a				0.1		8.3 kbps	1	2
5765/20/a				0.0		0 bps	0	0
5785/20/a	FE:00:13:00:FF:18		-88	0.0	0.0	0 bps		
5785/20/a	00:27:22:5E:FB:00	PTPKB		0.3	11.7	13.7 kbps		1
5785/20/a	00:27:22:5E:FB:00	PTPKB	-87	0.3	11.7	13.7 kbps		
5785/20/a				3.0		13.7 kbps	1	2
5805/20/a				1.9		23.8 kbps	0	0
5825/20/a				0.0		0 bps	0	0

Figura 4.8: Snooper - Análise na faixa de frequência de 5 GHz

Complementando os dados obtidos através da ferramenta Snooper, é possível usar através do sistema operacional da fabricante 'x' a ferramenta *Scan*, onde esta exibe as estatísticas dos canais de forma mais resumida, como por exemplo informações em relação ao nível de sinal, ruído ambiental, SNR (*Signal To Noise*), dentre outras informações. Pela Fig. 4.9 observa-se a análise na faixa de 2,4 GHz e na Fig. 4.10 para a faixa de 5 GHz.



Scanner (Running)

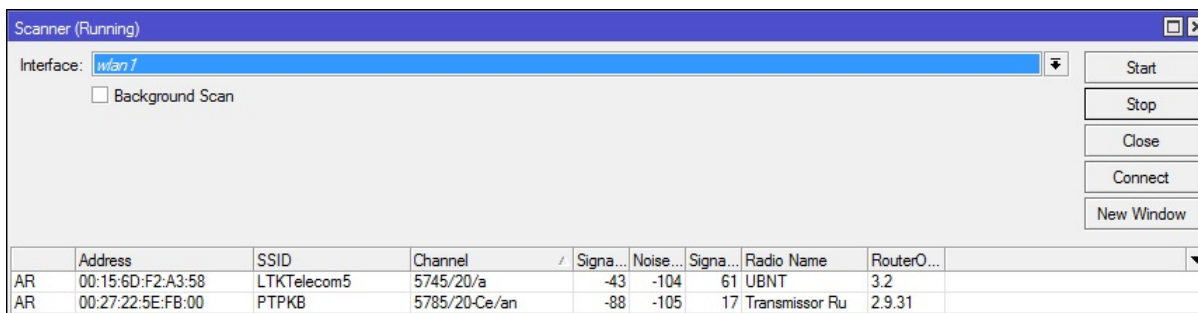
Interface: wlan2

☐ Background Scan

Start
Stop
Close
Connect
New Window

	Address	SSID	Channel	Signa...	Noise...	Signa...	Radio Name	RouterO...
P	D4:6E:0E:C5:B9:0C	RMA Teste	2417/20-Ce/gn	-91	-108	17		
AP	50:C7:BF:9A:87:4F	RMA	2432/20-Ce/gn	-87	-108	21		
AP	84:16:F9:2D:27:38	HEALTHCARE	2432/20/gn	-88	-108	20		
AP	98:FC:11:E0:7F:F9	DBR	2452/20/g	-92	-107	15		
APRB	D6:CA:6D:2D:85:35	LTK-Lazer	2452/20/gn	-36	-107	71	D4CA6D2D8535	6.41.3
ARB	D4:CA:6D:2D:85:35	Almoxarifado	2452/20/gn	-37	-107	70	D4CA6D2D8535	6.41.3
P	22:27:22:CF:7E:63		2462/20/gn	-91	-106	15		

Figura 4.9: Scan - Análise na faixa de frequência de 2,4 GHz



	Address	SSID	Channel	Signa...	Noise...	Signa...	Radio Name	RouterO...
AR	00:15:6D:F2:A3:58	LTKTelecom5	5745/20/a	-43	-104	61	UBNT	3.2
AR	00:27:22:5E:FB:00	PTPKB	5785/20-Ce/an	-88	-105	17	Transmissor Ru	2.9.31

Figura 4.10: Scan - Análise na faixa de frequência de 5 GHz

4.2 Hardware Empregado nos Testes

Rádio 5 GHz 802.11a/n/ac

Este equipamento possui um cartão WLAN de 5 GHz integrado, aliado a um slot miniPCI-e, possibilitando assim o uso de outro cartão *WLAN* de acordo com as necessidades do projeto.

Por ser uma solução de uso empresarial, este rádio destaca-se pelo seu processador de alto desempenho, proporcionando assim um alto rendimento para o objetivo em questão.

Visto que este rádio é vendido na forma de PCB (*Printed Circuit Board*), é necessário o uso de uma caixa hermética para sua acomodação, uso de antena externa, fonte de alimentação e também os cabos coaxiais para ligar a sua saída de RF a antena externa.

Como características de *hardware*, este possui:

- CPU: Atheros QCA9557 720 MHz
- Memória: 128 MB DDR2 SDRAM
- Padrões WLAN suportados para o cartão integrado: 802.11a/n/ac
- Canais de transmissão: MIMO 2x2
- Portas ethernet: 1x 10/100/1000 Mbps
- Potência máxima: 30 dBm

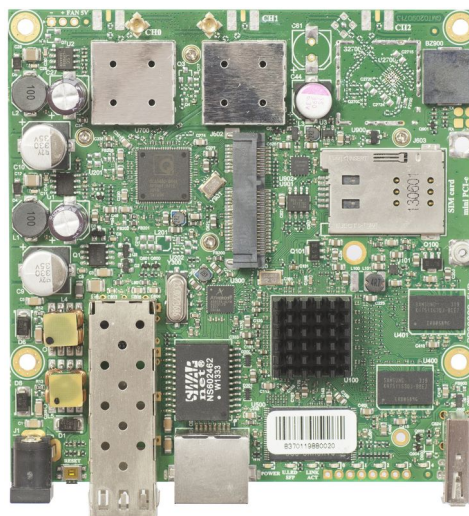


Figura 4.11: Rádio 5 GHz 802.11a/n/ac

Cartão *wireless* miniPCI-e 802.11b/g/n

Este cartão *wireless* miniPCI-e suporta o padrão 802.11b/g/n, onde é usado em conjunto com o rádio descrito anteriormente para adicionar o suporte a esses padrões WLAN supracitados.

Especificações

- Padrões *WLAN* suportados: 802.11b/g/n
- Canais de transmissão: MIMO 2x2
- Potência máxima: 29 dBm

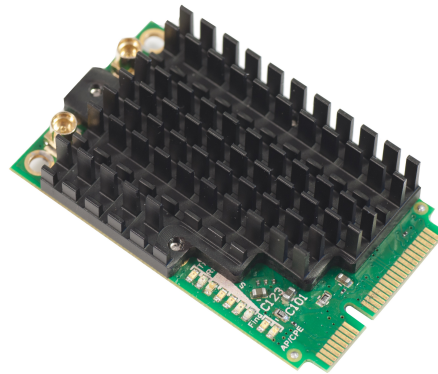


Figura 4.12: Cartão WLAN miniPCI-e

Antena Omni 6dBi - Dual Band

Esta antena é usada em conjunto com os equipamentos WLAN descrito anteriormente, onde por ser *dual band*, a mesma foi usada tanto para os testes na frequência de 2,4 GHz quanto na faixa de 5 GHz. É importante ressaltar que apesar dos rádios citados anteriormente suportarem a transmissão usando 2 canais (2x2), neste estudo todas as simulações foram feitos usando o padrão SISO (1x1), logo usa-se apenas uma antena por rádio.

Especificações

- Frequência: 2,4 GHz e 5 GHz (*Dual band*)
- Tipo de antena: omnidirecional
- Ambiente suportado: interno ou externo



Figura 4.13: Antena Omni 6dBi - Dual Band

Rádio WLAN 5 GHz usado para análise espectral

Este equipamento consiste no conjunto de rádio mais antena setorial integrada, funcionando na faixa de 5 GHz, onde seu uso é exclusivamente para utilizar-se de seu utilitário de análise de espectro denominado 'airView', contido nativamente em seu *firmware*, criado pela empresa 'y'.

Como esse equip. trabalha somente na faixa dos 5 GHz, seu uso foi empregado apenas para realizar a análise de espectro nos testes que envolvem os padrões 802.11a/n/ac.

Especificações

- Padrão wireless: *airMax ac (proprietário)
- Canais de transmissão: 2x2
- Potência máxima: 25 dBm

- Antena integrada: 5 GHz de 120°, com 16 dBi



Figura 4.14: Rádio WLAN 5 GHz usado para análise espectral

Servidor usado para simular os tráfegos

Esse equipamento é um servidor de arquitetura RISC produzido pela empresa 'x'.

Em sua estrutura de *hardware* temos um processador com 36 núcleos e 4 GB de memória RAM, onde com essas características é possível certificar-se de que este equipamento terá o processamento suficiente para gerar o tráfego que será injetado nos equipamentos sobre testes que estabelecem o enlace *wireless* naquele momento.

O utilitário utilizado para esse fim é o *Traffic Generator*, que é integrado nativamente ao sistema operacional deste servidor.

Especificações

- CPU: Tiler TLR4-03680CH-12CE-A3c 1.2 GHz (36 núcleos)
- Memória: 4 GB RAM
- 8 portas ethernet 10/100/1000 Mbps
- 2 slots SFP+



Capítulo 5

Ambiente de Testes e Medições

Todas as emulações e medidas são realizadas em um mesmo ambiente *indoor*, com uma distância média de 20m entre os equipamentos envolvidos nos testes. Tais equipamentos foram fixados numa mesma posição e num mesmo sentido de direcionamento entre os pares envolvidos na comunicação, ou seja, o ponto A foi direcionado para o ponto B e vice-versa, certificando-se de que tenham visada entre si.

É importante observar que antes de se realizar os testes de *throughput*, foi atendido todas as premissas descritas a seguir para os DUT (*Device Under Test*) ou dispositivos sobre testes.

Valores de referência para o enlace *wireless*

- Faixa SNR (*Signal To Noise*): > 50 dB
- Intensidade do sinal (RSSI): -43 á -51
- Potência EIRP: 13 dBm
- Condição de visada: LoS (Line of Sight)
- Ruído ambiental máximo: -100 dBm
- CCQ (*Client Connection Quality*): > 64 %

NOTAS:

SNR - Relação Sinal Ruído

Representa a relação do sinal recebido pelo ruído, onde o valor é exibido pela escala logarítmica, dado em decibéis.

Intensidade do sinal (RSSI)

Também conhecido como RSSI (*Received Signal Strength Indication*), refere-se a intensidade do sinal *wireless* recebido pela ponta remota

Potência EIRP

Potência isotrópica efetivamente irradiada, é um termo correspondente a potência máxima que seria enviada por uma antena isotrópica perfeita. Seu valor é dado em decibéis (dBm) e corresponde a potência final depois do sinal ser gerado pela fonte de sinal RF (radio frequência) até este ser amplificado pela antena, considerando também todas as perdas no caminho gerada pelos cabos coaxiais, conectores, dentre outros.

Condição de visada: LoS (*Line of Sight*)

A condição determinada como LoS se refere a um enlace totalmente desobstruído, ou seja, sem nenhum tipo de obstáculo entre os pontos envolvidos na comunicação, objetivando o menor nível de reflexão possível.

Ruído ambiental (*Noise floor*)

É considerado como ruído ambiental toda fonte de sinal não desejada causada por emissões de componentes elétricos presentes em determinados circuitos, tal como o ruído térmico necessário para seu funcionamento, ou seja, um fator intrínseco ao mesmo. (HRANAC; CURRIVAN, 2006)

CCQ - Qualidade de conexão do cliente

Valor exibido em porcentagem para representar a eficiência na transmissão, onde seu resultado é dado pela fórmula:

$$CCQ = \frac{T_{min}}{T_{real}}$$

Em que:

T_{min} : tempo de transmissão considerando a melhor condição possível, ou seja, sincronizado ao data rate máximo para o padrão escolhido, sem nenhuma presença de retransmissão de frames por erro ou colisão.

T_{real} : tempo de transmissão considerando todas as características atuais, como data rate sincronizado, retransmissão por colisão, etc.

Perfil de tráfego utilizado na emulação de *throughput*

- Tamanho dos frames usados na emulação: 64, 512, 1024 e 1500 bytes
- Tipo de fluxo: *unidirecional*
- Sistema de transmissão: SISO (*Single Input Single Output*)
- Topologia de teste: Ponto a ponto
- Testes realizados com o uso de múltiplos frames simultaneamente
- Camadas do modelo de referência OSI envolvidas: física e MAC
- Não será usado nenhum método de controle de acesso ao meio, como o RTS/CTS
- Duração de cada teste: no mínimo 30s
- Distância entre os rádios: 20m
- Meio de transmissão: não guiado (*wireless*)

Resultados a serem comparados

- *Throughput*
- Taxa de frames transferidos por segundos
- Latência média
- Jitter

Outras observações:

- Os testes são realizados usando apenas os padrões informados nesse estudo, abstendo-se de qualquer outro padrão proprietário;
- O enlace é feito usando-se do modo de operação *wireless* denominado WDS (*Wireless Distribution System*), devido a sua característica de trabalhar na camada 2 do modelo de referência OSI.

5.1 Relação entre os resultados teórico e prático

A seguir é exposto através de gráficos a projeção dos resultados, relacionando o *data rate* teórico e o resultado do *throughput* obtido através das equações expostas anteriormente com os

resultados adquiridos através dos experimentos práticos em campo, sobre as condições expostas no Capítulo 4.

O gráfico apresenta a curva para diferentes tamanhos de *frames*, de acordo com a variação do *data rate* teórico, aliado aos testes de *throughput* realizado em campo, onde nesse contexto foi considerado apenas a modulação máxima para cada um dos padrões em estudo.

Nota-se que a preferência pela escolha dos testes em campo serem feitos considerando apenas a modulação máxima de cada um dos padrões em análise nesse estudo deve-se a morosidade para a realização destes, onde num estudo futuro pode-se incluir testes adicionais em outros *data rates* teóricos.

5.1.1 Padrão 802.11b

Inicia-se com o gráfico da Fig. 5.1, representando os resultados para o padrão 802.11b, onde relaciona-se os valores obtidos através da Eq. 3.5 aos dos testes em campo.

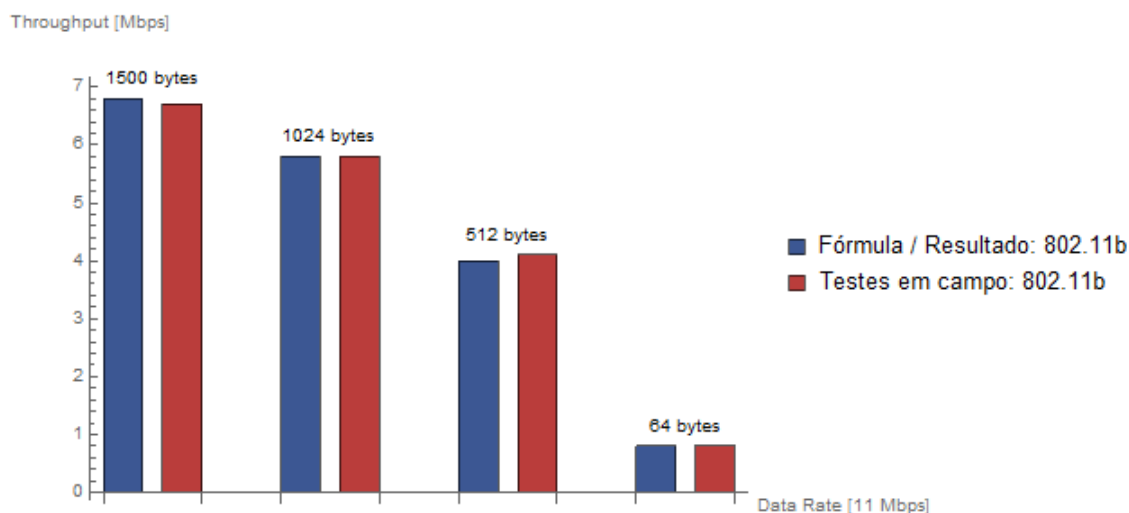


Figura 5.1: 802.11a - Resultado da fórmula vs. Testes em campo

Para a emulação usando *frames* de 1500 bytes de tamanho, observa-se uma diferença de 200 Kbps a mais quando relaciona-se os resultados obtidos através da Eq. 3.5 com os resultados dos testes em campo. Seguindo para os testes usando *frames* de 1024, 512 e 64 bytes, essa diferença é mínima.

Em resumo, a projeção dos resultados apresentados pela fórmula foram bem semelhantes aos obtidos com os dos testes em campo para o *data rate* máximo, logo a projeção para os outros *data rate* teóricos se mantém o mesmo, conforme exibido anteriormente pelo gráfico da Fig. 3.7.

A Tabela 5.1 exibe as estatísticas de comunicação observadas durante os testes usando-se do padrão 802.11b

Tabela 5.1: 802.11b - Estatísticas da comunicação

Tamanho dos frames	Data Rate Teórico	Consumo da CPU	Latência média	Jitter	frames por segundos
1500 bytes	11 Mbps	3%	374 ms	14 ms	560 pps
1024 bytes	11 Mbps	4%	420 ms	10 ms	715 pps
512 bytes	11 Mbps	4%	587 ms	16 ms	1 Kpps
64 bytes	11 Mbps	5%	390 ms	17 ms	1,5 Kpps

5.1.2 Padrão 802.11g

Segue-se agora com o gráfico da Fig. 5.2, exibindo os resultados para o padrão 802.11g, também obtidos pela Eq. 3.5, relacionando por fim aos valores obtidos pelos testes em campo.

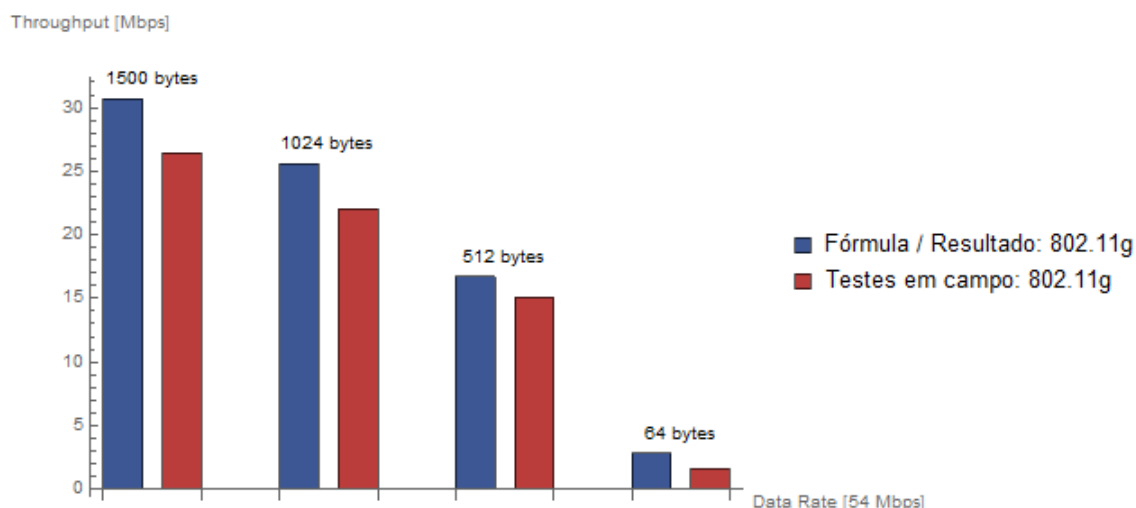


Figura 5.2: 802.11g - Resultado da fórmula vs. Testes em campo

Comparando os resultados, é possível notar a existência de uma considerável diferença entre os valores adquiridos através da emulação em campo com os resultados apresentados pela Eq. 3.5, onde essas diferenças são demonstradas pela Tabela 5.2

Tabela 5.2: 802.11g - Diferenças no throughput

Tamanho dos frames	Data Rate (Teórico)	Diferença no Throughput
1500 bytes	54 Mbps	A fórmula apresentou 4,3 Mbps a mais
1024 bytes	54 Mbps	A fórmula apresentou 3,6 Mbps a mais
512 bytes	54 Mbps	A fórmula apresentou 1,6 Mbps a mais
64 bytes	54 Mbps	A fórmula apresentou 1,2 Mbps a mais

A Tabela 5.3 exibe as estatísticas obtidas durante os testes usando o padrão 802.11g.

Tabela 5.3: 802.11g - Estatísticas da comunicação

Tamanho dos frames	Data Rate Teórico	Consumo da CPU	Latência média	Jitter	frames por segundos
1500 bytes	54 Mbps	8%	99 ms	13 ms	2,2 Kpps
1024 bytes	54 Mbps	8%	117 ms	12 ms	2,6 Kpps
512 bytes	54 Mbps	9%	185 ms	13 ms	3,6 Kpps
64 bytes	54 Mbps	10%	133 ms	14 ms	4,6 Kpps

A diferença de *throughput* exposta acima foi notória devido a ocorrência de erros na comunicação, visto que a Eq. 3.5 exibe resultados para uma comunicação onde não existam erros.

A fim de se projetar um resultado o mais próximo possível dos valores obtidos em campo, tentando identificar o valor referente ao BER que faz com que essa aproximação de valores ocorra, usou-se então da Eq. 3.10, onde o resultado é exposto através do gráfico da Fig. 5.3.

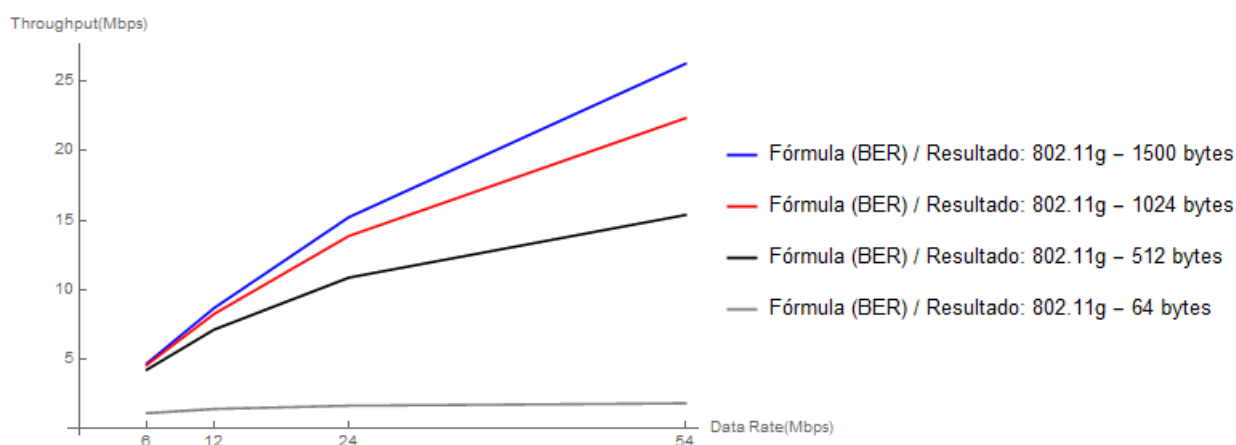


Figura 5.3: 802.11g - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER

Expondo os resultados obtidos pela Eq. 3.10 com os dos testes em campo após o ajuste do BER para a modulação máxima do padrão 802.11g, têm-se então os resultados exibidos pelo gráfico da Fig. 5.4.

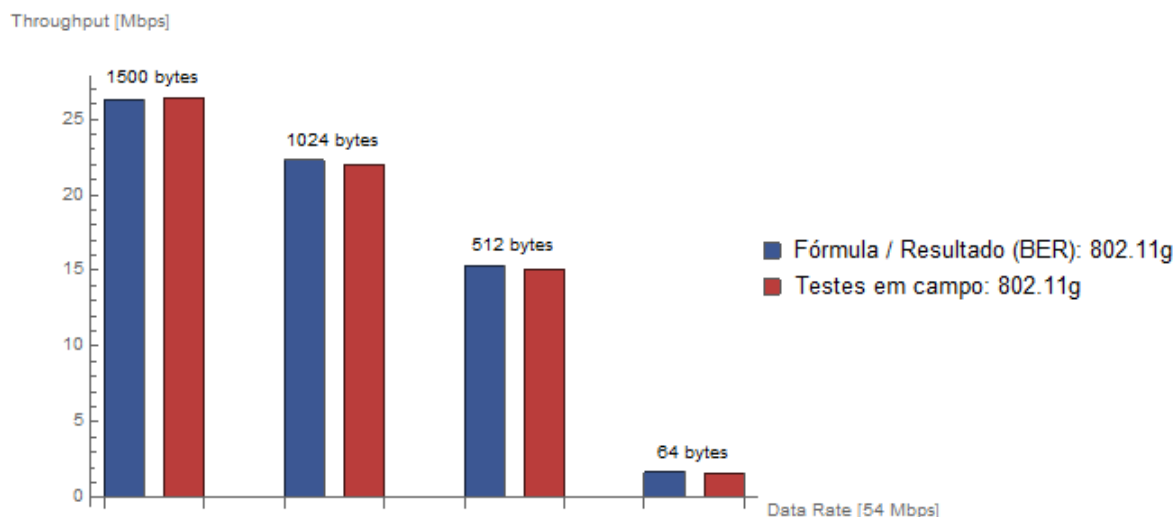


Figura 5.4: 802.11g - Considerando a incidência de BER para o data rate máximo

A Tabela 5.4 exibe os valores referente ao BER usado na Eq. 3.10 para se obter o mesmo *throughput* dos resultados obtidos em campo.

Tabela 5.4: 802.11g - Definição de valores referente ao BER (*Bit Error Rate*)

Tamanho dos frames	Data Rate Teórico	Valores referente ao BER usado na fórmula	Probabilidade de sucesso na transmissão
1500 bytes	54 Mbps	$10^{-5.5}$	95 %
1024 bytes	54 Mbps	$10^{-5.4}$	92 %
512 bytes	54 Mbps	$10^{-5.3}$	82 %
64 bytes	54 Mbps	$10^{-3.8}$	30 %

5.1.3 Padrão 802.11a

Através do gráfico da Fig. 5.5 é ilustrado os resultados da Eq. 3.5 com os dos testes em campo.

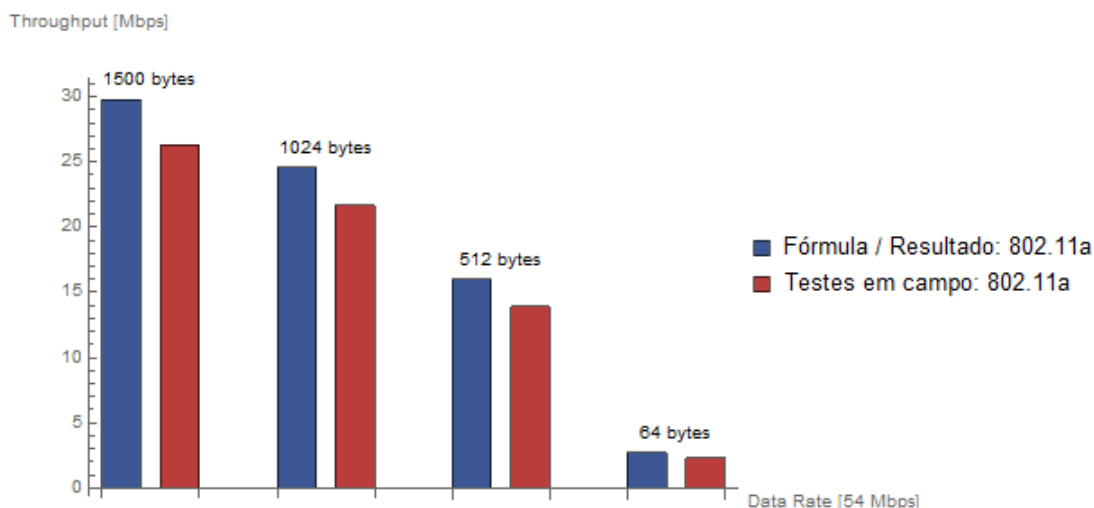


Figura 5.5: 802.11a - Resultado da fórmula vs. Testes em campo

As diferenças em relação aos valores obtidos com a Eq. 3.5 para os dos testes em campo é retratado pela Tabela 5.5

Tabela 5.5: 802.11a - Diferenças no *throughput*

Tamanho dos frames	Data Rate (Teórico)	Diferença no Throughput
1500 bytes	54 Mbps	A fórmula apresentou 3,5 Mbps a mais
1024 bytes	54 Mbps	A fórmula apresentou 2,9 Mbps a mais
512 bytes	54 Mbps	A fórmula apresentou 2 Mbps a mais
64 bytes	54 Mbps	A fórmula apresentou 300 Kbps a mais

As estatísticas obtidas para o padrão 802.11a é representado pela Tabela 5.6

Tabela 5.6: 802.11a - Estatísticas da comunicação

Tamanho dos frames	Data Rate Teórico	Consumo da CPU	Latência média	Jitter	frames por segundos
1500 bytes	54 Mbps	10%	97 ms	15 ms	2,1 Kpps
1024 bytes	54 Mbps	10%	113 ms	17 ms	2,7 Kpps
512 bytes	54 Mbps	12%	160 ms	17 ms	3,7 Kpps
64 bytes	54 Mbps	12%	190 ms	15 ms	3,2 Kpps

Assim como no padrão 802.11g, foi usado a Eq. 3.10 para refazer a simulação para o padrão 802.11a considerando a incidência de BER, onde o resultado é exibido no gráfico da Fig. 5.6.

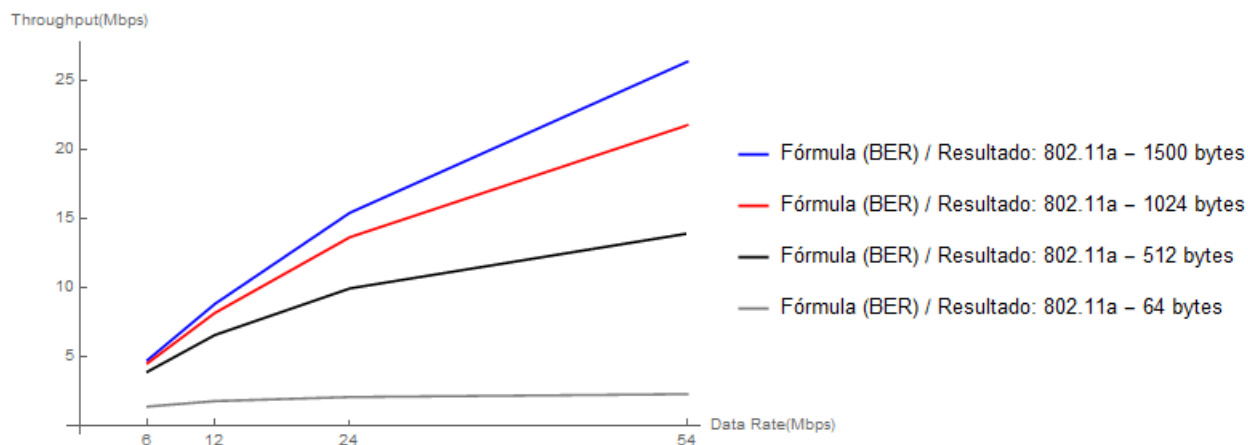


Figura 5.6: 802.11a - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER

Pelo gráfico da Fig. 5.7 é exibido os resultados para o padrão 802.11a após o ajuste dos valores referente ao BER.

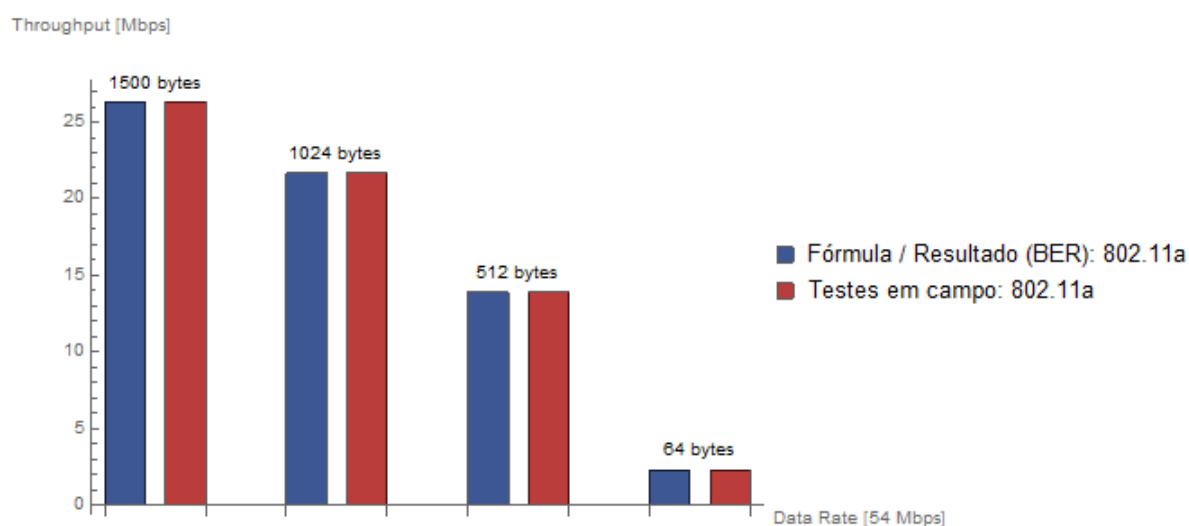


Figura 5.7: 802.11a - Considerando a incidência de BER para o data rate máximo

A Tabela 5.7 representa os valores de BER usado na Eq. 3.10 para a obtenção dos valores apresentados no gráfico da Fig. 5.6

Tabela 5.7: 802.11a - Definição de valores referente ao BER (*Bit Error Rate*)

Tamanho dos frames	Data Rate Teórico	Valores referente ao BER usado na fórmula	Probabilidade de sucesso na transmissão
1500 bytes	54 Mbps	$10^{-5.6}$	96 %
1024 bytes	54 Mbps	$10^{-5.4}$	95 %
512 bytes	54 Mbps	$10^{-5.1}$	96 %
64 bytes	54 Mbps	$10^{-4.3}$	22 %

5.1.4 Método de agregação A-MPDU

A agregação do tipo A-MPDU é a implementação mais usada nos *hardwares* de equipamentos que aderem a qualquer um dos padrões WLAN 802.11n/ac, seja para soluções que usam a faixa de frequência de 2,4 GHz ou 5 GHz. Logo, a emulação em campo foi realizada usando apenas este método agregação, onde nos gráficos a seguir são mostrados a comparação dos resultados obtidos pelas equações com as dos testes em campo.

Padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 20 MHz

Os gráficos representados pela Fig. 5.8 e a Fig. 5.9 expõe a correlação entre os resultados obtidos pela Eq. 3.16 com os resultados da emulação em campo, usando-se da agregação do tipo A-MPDU, na faixa de frequência de 5 GHz e com largura de canal de 20 MHz, usando-se do maior *data rate* para o padrão WLAN nas condições expostas.

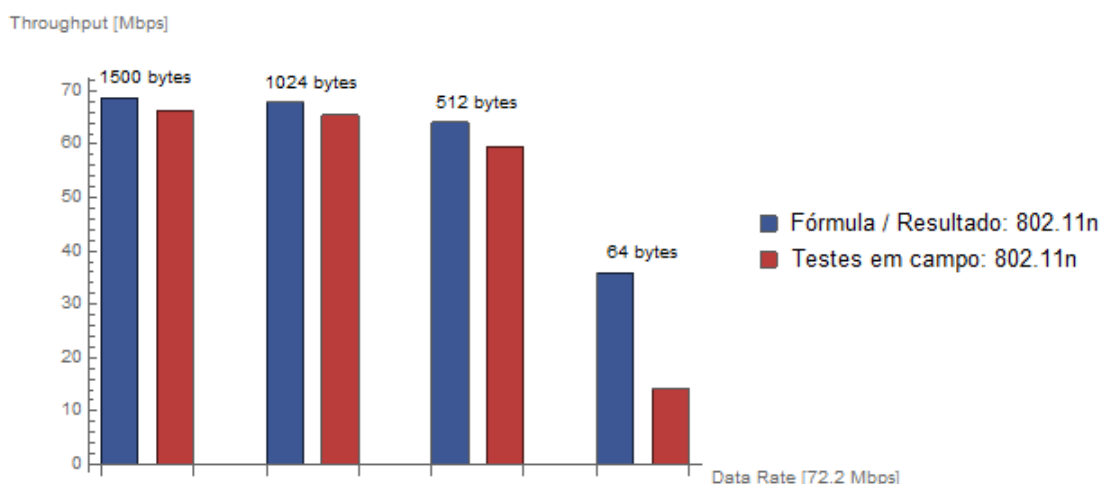


Figura 5.8: 802.11n - 5 GHz / 20 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo

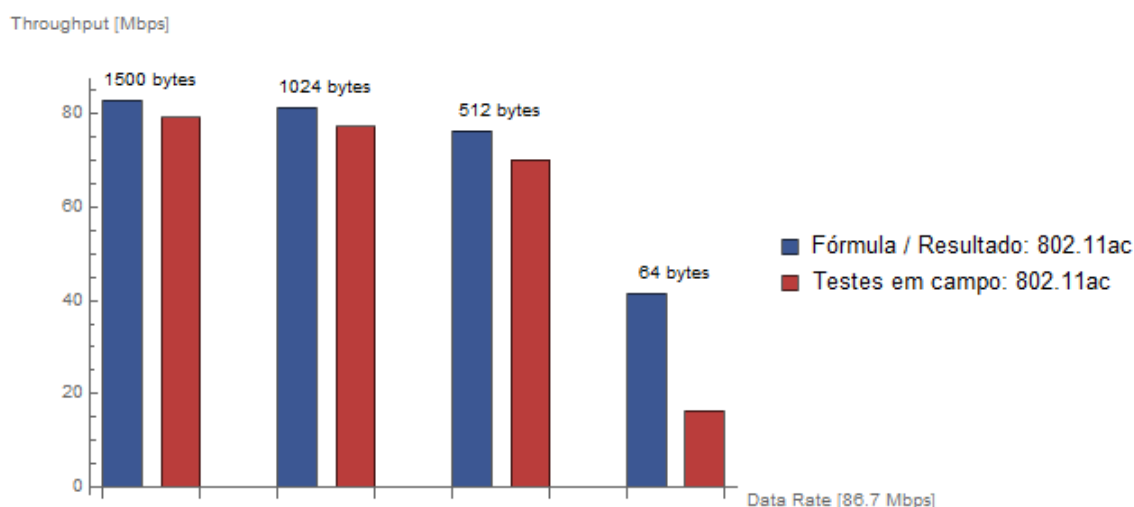


Figura 5.9: 802.11ac - 5 GHz / 20 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo

Considerando a diferença de *throughput* entre os resultados da Eq. 3.16 com o dos testes em campo, temos as seguintes estatísticas, conforme demonstrado na Tabela 5.8:

Tabela 5.8: A-MPDU, 5 GHz / 20 MHz - Diferenças no *throughput*

Tamanho dos frames	Padrão	Data Rate (Teórico)	Diferença no Throughput
1500 bytes	802.11n	72,2 Mbps	A fórmula apresentou 2,3 Mbps a mais
1500 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	A fórmula apresentou 3,8 Mbps a mais
1024 bytes	802.11n	72,2 Mbps	A fórmula apresentou 2,4 Mbps a mais
1024 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	A fórmula apresentou 4 Mbps a mais
512 bytes	802.11n	72,2 Mbps	A fórmula apresentou 4,4 Mbps a mais
512 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	A fórmula apresentou 6,2 Mbps a mais
64 bytes	802.11n	72,2 Mbps	A fórmula apresentou 21,7 Mbps a mais
64 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	A fórmula apresentou 25,1 Mbps a mais

Complementando os resultados obtidos pela emulação em campo, a Tabela 5.9 representa outras informações coletadas durante os testes.

Tabela 5.9: A-MPDU, 5 GHz / 20 MHz - Estatísticas de comunicação

Tamanho dos frames	Padrão	Data Rate Teórico	Consumo da CPU	Latência média	Jitter	frames por segundos
1500 bytes	802.11n	72,2 Mbps	20%	47,5 ms	12 ms	5,5 Kpps
1500 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	25%	41 ms	13 ms	6,6 Kpps
1024 bytes	802.11n	72,2 Mbps	29%	46 ms	13 ms	7,9 Kpps
1024 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	30%	39,4 ms	12 ms	9,4 Kpps
512 bytes	802.11n	72,2 Mbps	47%	45 ms	13 ms	14,5 Kpps
512 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	50%	38 ms	13 ms	17 Kpps
64 bytes	802.11n	72,2 Mbps	75%	26,3 ms	14 ms	27,7 Kpps
64 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	72%	23,4 ms	13 ms	31,7 Kpps

Considerando a ocorrência de BER, através da Eq. 3.10 podemos fazer ajustes para que os resultados apresentados por esta se assemelhem aos apresentados pelos testes em campo, obtendo-se por fim os resultados apresentados pelo gráfico exposto através da Fig. 5.10.

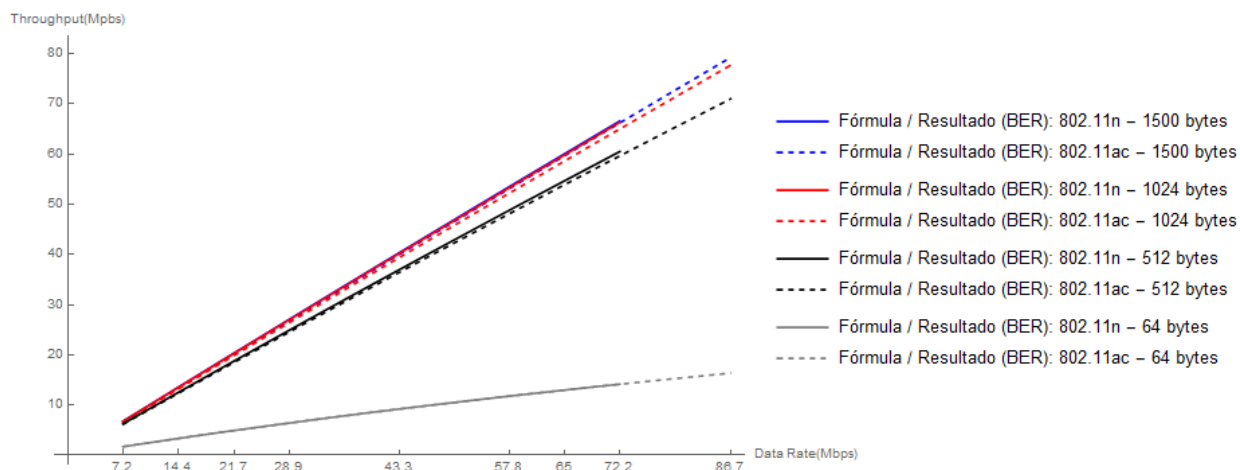


Figura 5.10: 802.11n/ac - A-MPDU em 5 GHz / 20 MHz - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER

As Fig. 5.11 e a Fig. 5.12 representa a comparação final entre os resultados obtidos pela Eq. 3.10 com os testes em campo para o *data rate* máximo.

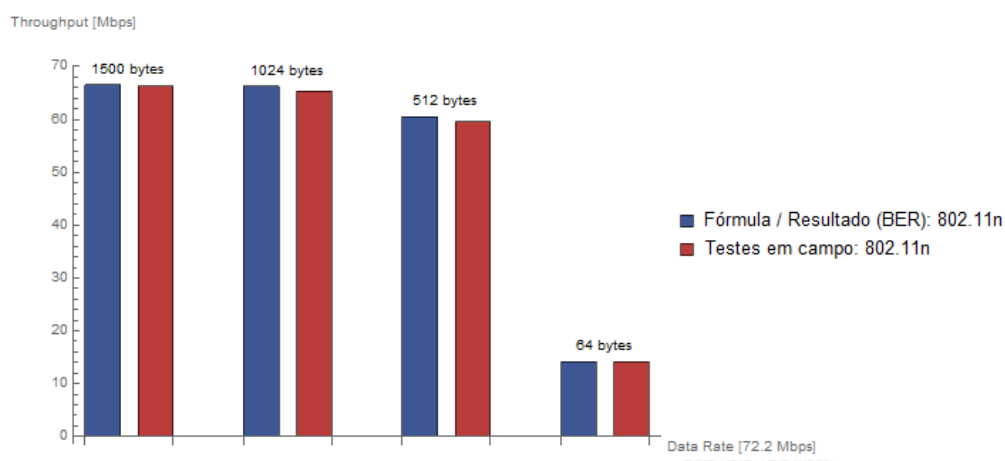


Figura 5.11: 802.11n - A-MPDU em 5 GHz / 20 MHz - Considerando a incidência de BER para o *date rate* máximo

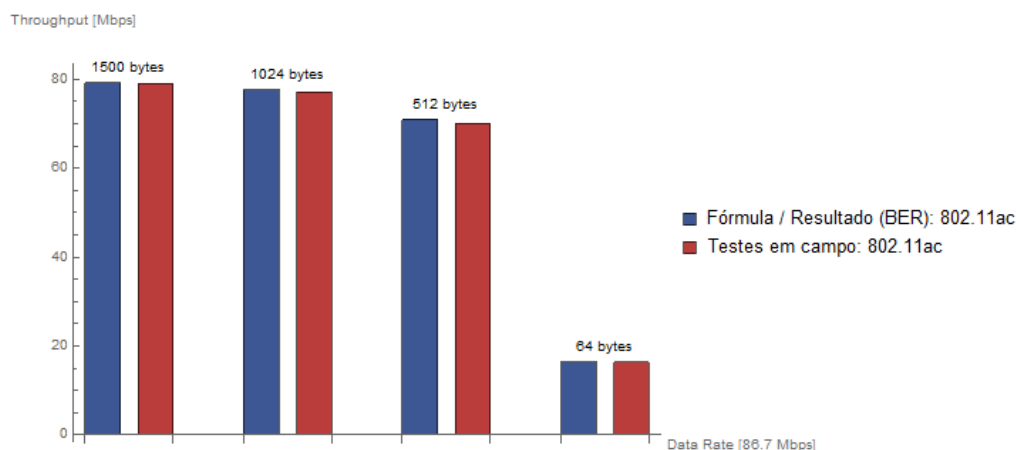


Figura 5.12: 802.11ac - A-MPDU em 5 GHz / 20 MHz - Considerando a incidência de BER para o *data rate* máximo

A Tabela 5.10 retrata o valor referente ao BER usado na Eq. 3.10

Tabela 5.10: A-MPDU em 5 GHz / 20 MHz - Definição de valores referente ao BER (*Bit Error Rate*)

Tamanho dos frames	Padrão	Data Rate Teórico	BER usado na fórmula	Probabilidade de sucesso na transmissão
1500 bytes	802.11n	72,2 Mbps	$10^{-5,6}$	97 %
1500 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	$10^{-6,0}$	98 %
1024 bytes	802.11n	72,2 Mbps	$10^{-6,2}$	99 %
1024 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	$10^{-5,9}$	98 %
512 bytes	802.11n	72,2 Mbps	$10^{-5,5}$	96 %
512 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	$10^{-5,4}$	95 %
64 bytes	802.11n	72,2 Mbps	$10^{-3,5}$	2 %
64 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	$10^{-3,5}$	2 %

Padrão 802.11n/ac, 5 GHz / 40 MHz

Segue-se agora com o gráfico representado pelas Fig. 5.13 e a Fig. 5.14, exibindo o comportamento para o padrão 802.11n/ac, na faixa de 5 GHz, porém agora com largura de canal de 40 MHz, considerando o maior *data rate* teórico nessas condições. Os resultados dessas projeções foram obtidos através da Eq. 3.16.

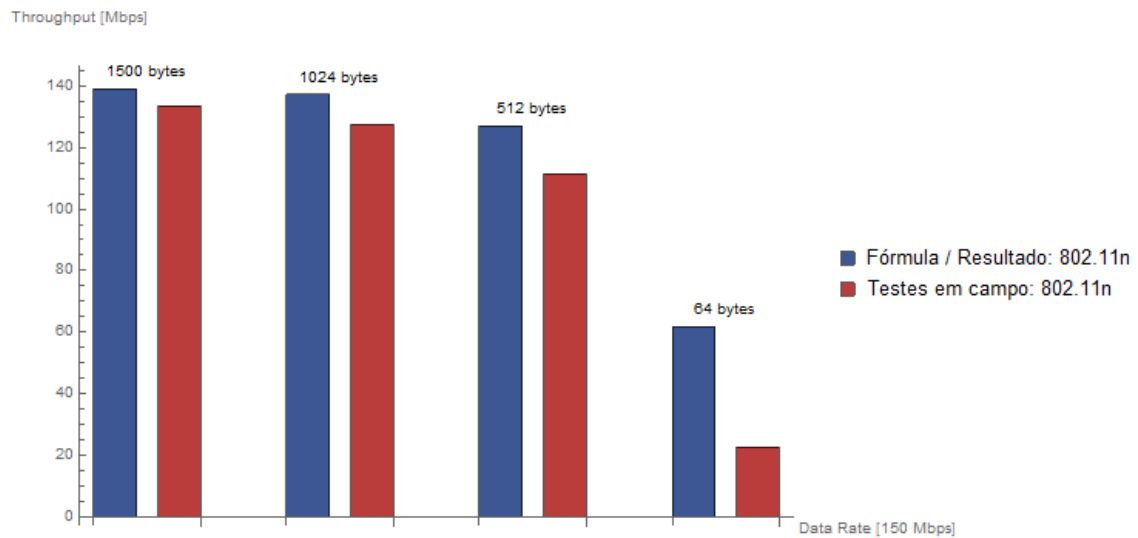


Figura 5.13: 802.11n - 5 GHz / 40 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo

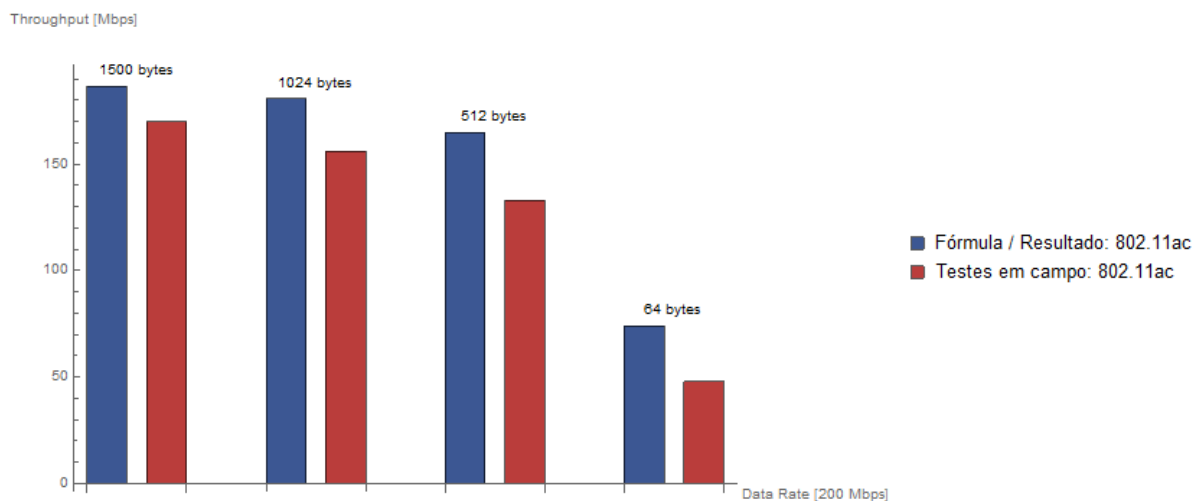


Figura 5.14: 802.11ac - 5 GHz / 40 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo

Pela Tabela 5.11 é possível observar as diferenças de *throughput* entre os resultados obtidos pela Eq. 3.16 com os dos testes em campo, quando usado canais com largura de 40 MHz.

Tabela 5.11: A-MPDU, 5 GHz / 40 MHz - Diferenças no *throughput*

Tamanho dos frames	Padrão	Data Rate (Teórico)	Diferença no Throughput
1500 bytes	802.11n	150 Mbps	A fórmula apresentou 5,5 Mbps a mais
1500 bytes	802.11ac	200 Mbps	A fórmula apresentou 16,4 Mbps a mais
1024 bytes	802.11n	150 Mbps	A fórmula apresentou 9,9 Mbps a mais
1024 bytes	802.11ac	200 Mbps	A fórmula apresentou 24,8 Mbps a mais
512 bytes	802.11n	150 Mbps	A fórmula apresentou 15,7 Mbps a mais
512 bytes	802.11ac	200 Mbps	A fórmula apresentou 31,8 Mbps a mais
64 bytes	802.11n	150 Mbps	A fórmula apresentou 39,1 Mbps a mais
64 bytes	802.11ac	200 Mbps	A fórmula apresentou 26 Mbps a mais

As estatísticas dos resultados referentes aos testes em campo para canais com 40 MHz de largura são exibidos pela Tabela 5.12.

Tabela 5.12: A-MPDU, 5 GHz / 40 MHz - Estatísticas de comunicação

Tamanho dos frames	Padrão	Data Rate Teórico	Consumo da CPU	Latência média	Jitter	frames por segundos
1500 bytes	802.11n	150 Mbps	40%	27 ms	10 ms	11,1 Kpps
1500 bytes	802.11ac	200 Mbps	40%	22 ms	12 ms	14,2 Kpps
1024 bytes	802.11n	150 Mbps	46%	25 ms	9 ms	15,55 Kpps
1024 bytes	802.11ac	200 Mbps	57%	21 ms	13 ms	19 Kpps
512 bytes	802.11n	150 Mbps	80%	25 ms	13 ms	27,3 Kpps
512 bytes	802.11ac	200 Mbps	80%	22 ms	14 ms	32 Kpps
64 bytes	802.11n	150 Mbps	80%	18,3 ms	13 ms	44,2 Kpps
64 bytes	802.11ac	200 Mbps	75%	17,2 ms	12 ms	48 Kpps

Fazendo-se os ajustes dos valores referente ao BER, o gráfico da Fig. 5.15 representa os resultados obtidos utilizando-se da Eq. 3.10.

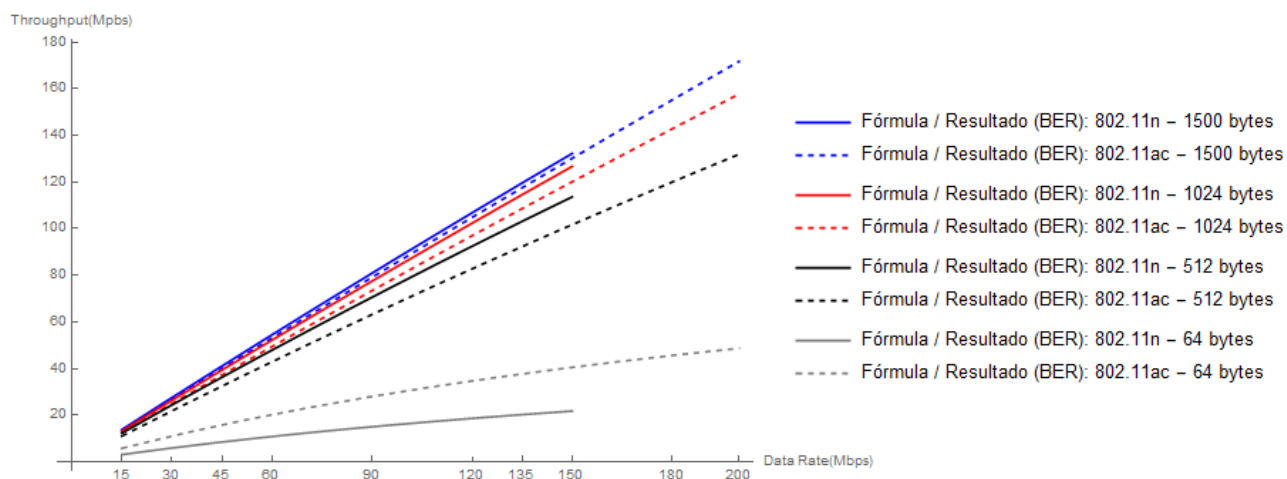


Figura 5.15: 802.11n/ac - A-MPDU em 5 GHz / 40 MHz - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER

Fazendo agora a comparação considerando apenas os maiores *data rate*, temos os resultados conforme apresentado pela Fig. 5.16 e a Fig. 5.17.

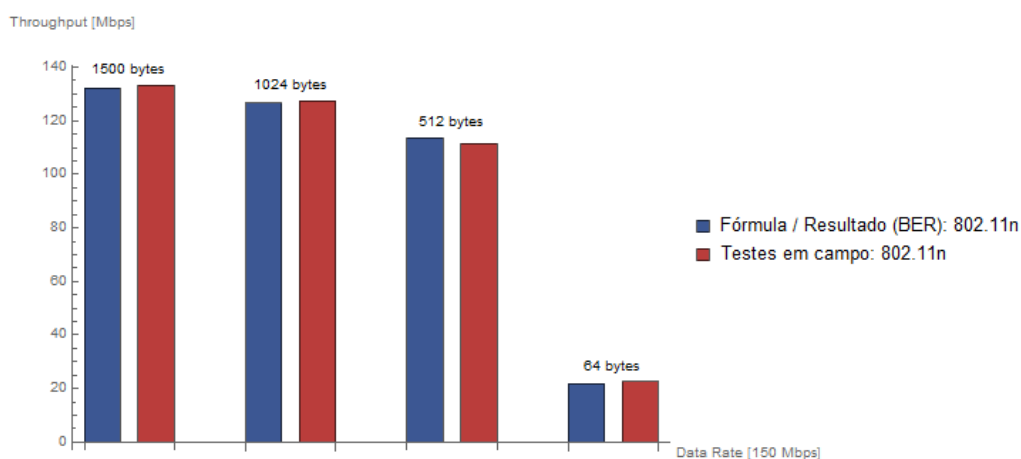


Figura 5.16: 802.11n - A-MPDU em 5 GHz / 40 MHz - Considerando a incidência de BER para o *data rate* máximo

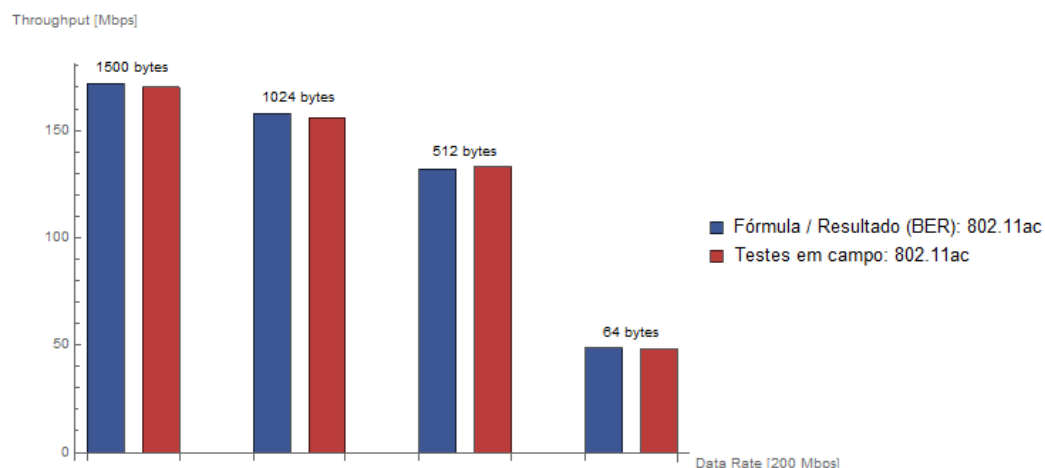


Figura 5.17: 802.11ac - A-MPDU em 5 GHz / 40 MHz - Considerando a incidência de BER para o *data rate* máximo

Os ajustes para os valores referente ao BER usado na Eq. 3.10 são representados pela Tabela 5.13

Tabela 5.13: A-MPDU em 5 GHz / 40 MHz - Definição de valores referente ao BER

Tamanho dos frames	Padrão	Data Rate Teórico	BER usado na fórmula	Probabilidade de sucesso na transmissão
1500 bytes	802.11n	72,2 Mbps	10^{-6}	98 %
1500 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	$10^{-5,7}$	97 %
1024 bytes	802.11n	72,2 Mbps	$10^{-5,6}$	97 %
1024 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	$10^{-5,4}$	95 %
512 bytes	802.11n	72,2 Mbps	$10^{-5,2}$	92 %
512 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	$10^{-4,9}$	86 %
64 bytes	802.11n	72,2 Mbps	$10^{-3,5}$	2 %
64 bytes	802.11ac	86,6 Mbps	$10^{-3,9}$	22 %

Padrão 802.11n, 2,4 GHz / 20 MHz

Conforme ressaltado anteriormente, o padrão 802.11ac não suporta a faixa de frequência de 2,4 GHz, logo o gráfico da Fig. 5.18 expõe os resultados obtidos através da Eq. 3.16 e também os valores adquiridos pelos testes em campo somente para o padrão 802.11n, considerando canais com 20 MHz de largura, usando-se do maior *data rate* para o padrão WLAN nessas condições.

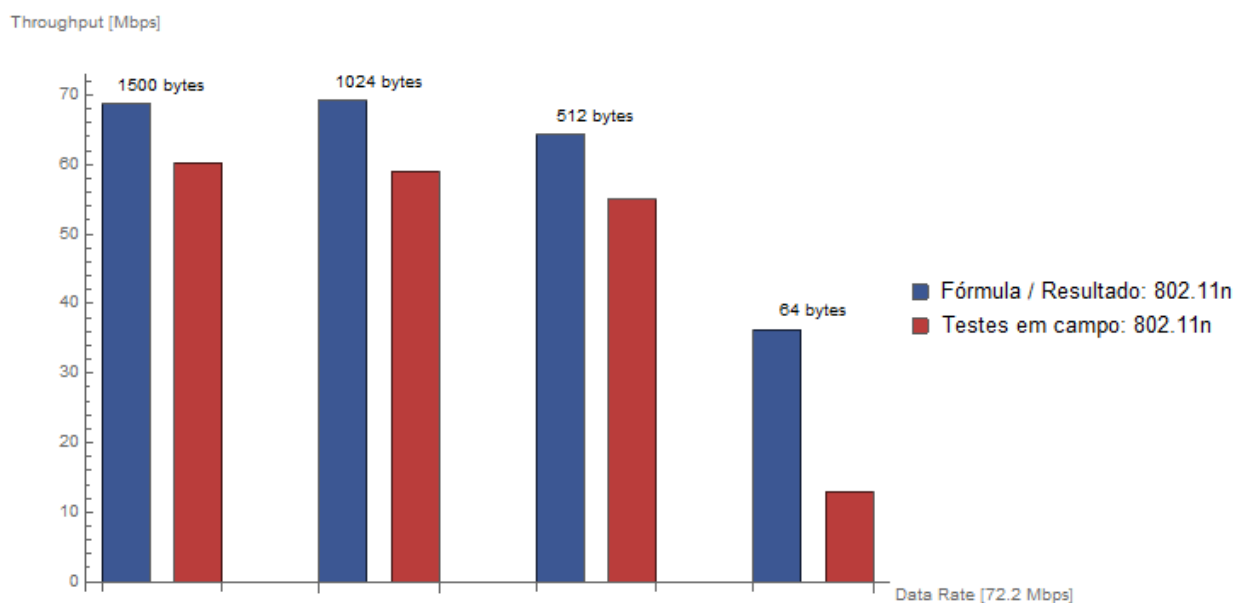


Figura 5.18: 802.11n - 2,4 GHz / 20 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo

Segue-se com a Tabela 5.14, representando a diferença no *throughput* exposta pelo gráfico da Fig. 5.18.

Tabela 5.14: 802.11n - A-MPDU, 2,4 GHz / 20 MHz - Diferenças no *throughput*

Tamanho dos frames	Data Rate (Teórico)	Diferença no Throughput
1500 bytes	72,2 Mbps	A fórmula apresentou 8,4 Mbps a mais
1024 bytes	72,2 Mbps	A fórmula apresentou 10,2 Mbps a mais
512 bytes	72,2 Mbps	A fórmula apresentou 9,2 Mbps a mais
64 bytes	72,2 Mbps	A fórmula apresentou 23,3 Mbps a mais

As estatísticas da comunicação são representadas pela Tabela 5.15.

Tabela 5.15: 802.11n - A-MPDU, 2,4 GHz / 20 MHz - Estatísticas de comunicação

Tamanho dos frames	Data Rate Teórico	Consumo da CPU	Latência média	Jitter	frames por segundos
1500 bytes	72,2 Mbps	10%	52 ms	21 ms	5 Kpps
1024 bytes	72,2 Mbps	15%	50 ms	25 ms	7,25 Kpps
512 bytes	72,2 Mbps	30%	49 ms	15 ms	13,6 Kpps
64 bytes	72,2 Mbps	60%	28 ms	14 ms	25,6 Kpps

Ajustando-se os valores referente ao BER através da Eq. 3.10, os resultados finais são exibidos através da Fig. 5.19.

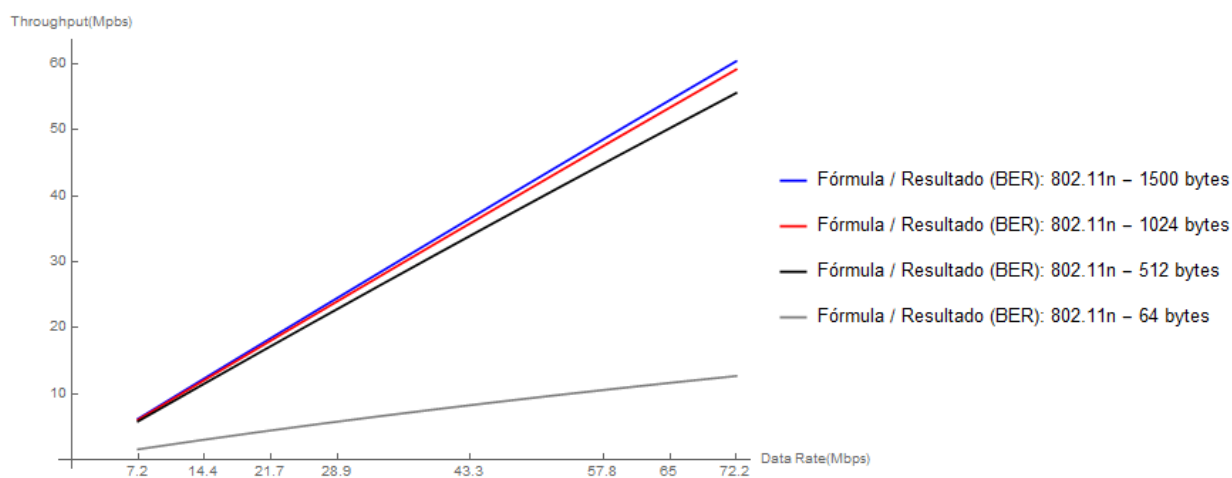


Figura 5.19: 802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 20 MHz - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER

Quando comparado os resultados da Eq. 3.10 aos valores obtidos em campo para o maior *data rate* nesta situação, é possível observar a similaridade entre os resultados, conforme exposto pela Fig. 5.20.

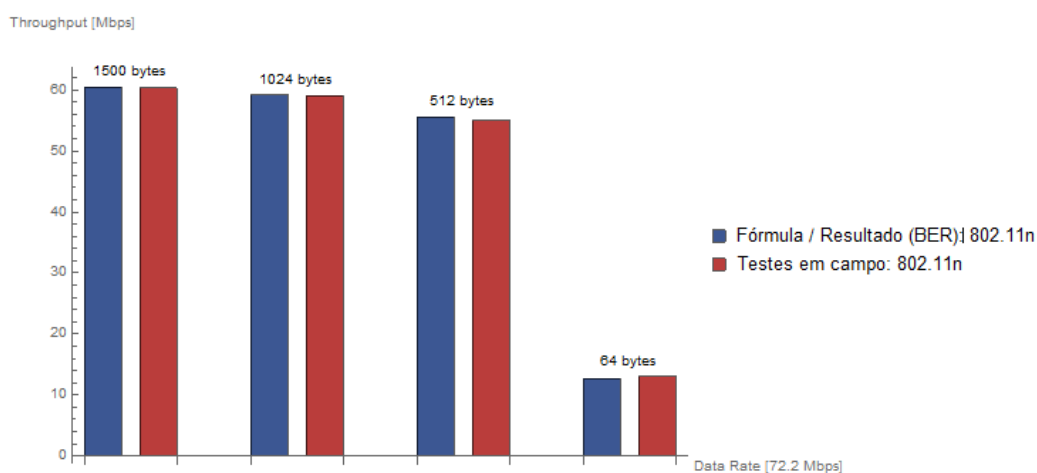


Figura 5.20: 802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 20 MHz - Considerando a incidência de BER para o *data rate* máximo

A Tabela 5.16 define o BER usado na Eq. 3.10 para se obter as curvas representadas pela gráfico da Fig. 5.19.

Tabela 5.16: 802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 20 MHz - Definição do BER (*Bit Error Rate*)

Tamanho dos frames	Data Rate Teórico	BER usado na fórmula	Probabilidade de sucesso na transmissão
1500 bytes	72,2 Mbps	$10^{-5,6}$	97 %
1024 bytes	72,2 Mbps	$10^{-5,4}$	95 %
512 bytes	72,2 Mbps	$10^{-5,1}$	90 %
64 bytes	72,2 Mbps	$10^{-3,5}$	2 %

Padrão 802.11n, 2,4 GHz / 40 MHz

Por fim, o gráfico da Fig. 5.21 expõem os resultados da agregação A-MPDU, usando-se da Eq. 3.16 na faixa de frequência de 2,4 GHz, porém agora usando canais com largura de 40 MHz, exibindo os resultados para o maior *data rate* teórico nas condições expostas.

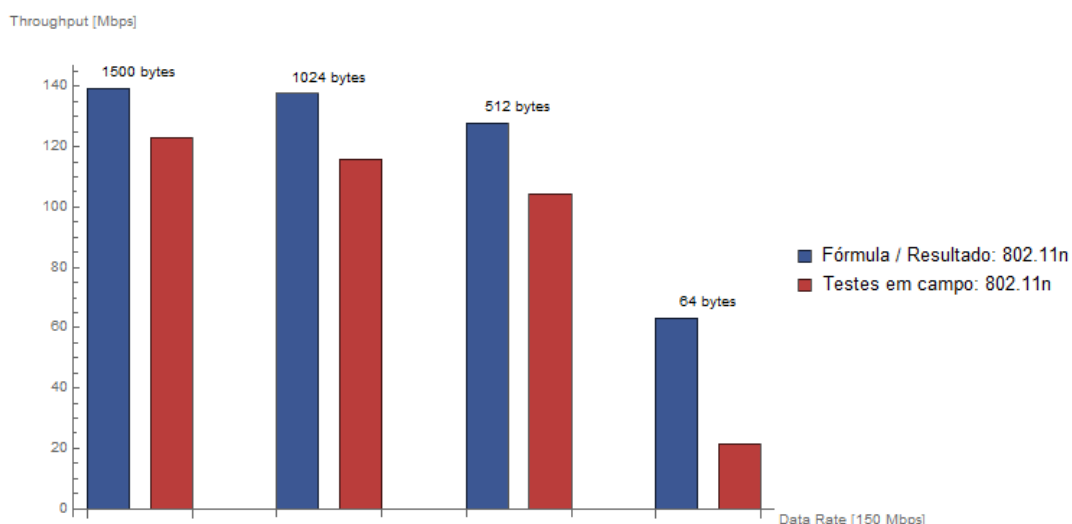


Figura 5.21: 802.11n - 2,4 GHz / 40 MHz / A-MPDU - Resultado da fórmula vs. Testes em campo

E na Tabela 5.17 são representadas as diferenças em relação ao *throughput* obtidos pela Eq. 3.16 com os valores alcançados nos testes em campo.

Tabela 5.17: 802.11n - A-MPDU, 2,4 GHz / 40 MHz - Diferenças no *throughput*

Tamanho dos frames	Data Rate (Teórico)	Diferença no <i>Throughput</i>
1500 bytes	150 Mbps	A fórmula apresentou 16,4 Mbps a mais
1024 bytes	150 Mbps	A fórmula apresentou 21,7 Mbps a mais
512 bytes	150 Mbps	A fórmula apresentou 23,3 Mbps a mais
64 bytes	150 Mbps	A fórmula apresentou 41,6 Mbps a mais

As estatísticas de comunicação adquiridas através dos testes usando canais com 40 MHz de largura são exibidas na Tabela 5.18.

Tabela 5.18: 802.11n - A-MPDU, 2,4 GHz / 40 MHz - Estatísticas de comunicação

Tamanho dos frames	Data Rate Teórico	Consumo da CPU	Latência média	Jitter	frames por segundos
1500 bytes	150 Mbps	20%	28 ms	16 ms	10,2 Kpps
1024 bytes	150 Mbps	34%	27 ms	14 ms	14,4 Kpps
512 bytes	150 Mbps	60%	26,5 ms	10 ms	25,6 Kpps
64 bytes	150 Mbps	70%	19 ms	11 ms	42 Kpps

Considerando agora a ocorrência de BER, usando-se da Eq. 3.10, chegamos a um valor de referência para o BER, de forma que com a aproximação feita considerando os resultados dos *throughputs* obtidos pelos testes em campo com os *throughputs* obtidos pela Eq. 3.10 após o ajuste dos valores referente ao BER, exibe-se através da Fig. 5.23 a projeção para todos os resultados dos *data rates*, baseado na aproximação apresentado pelo gráfico da Fig. 5.22.

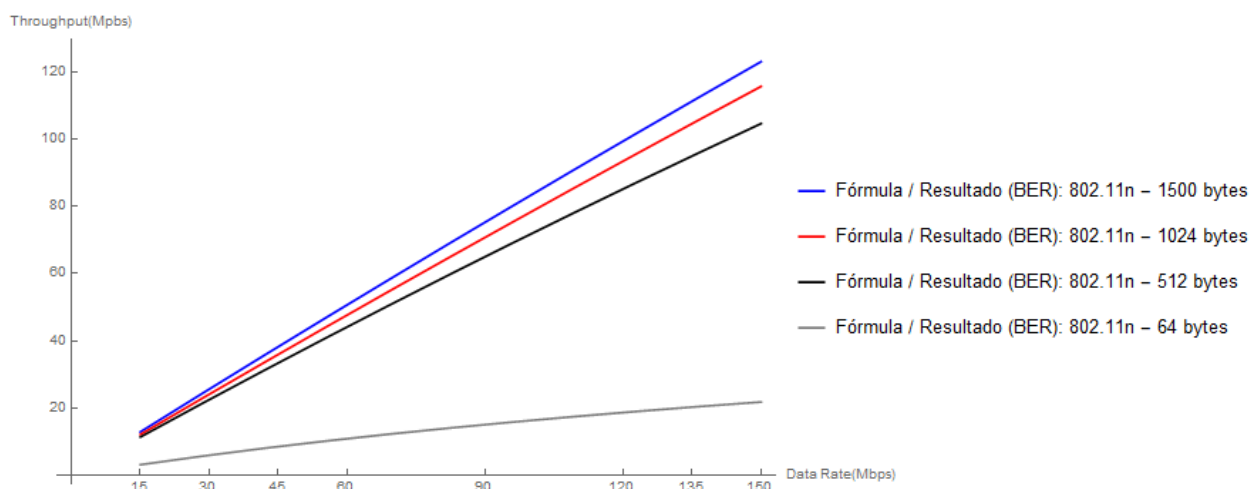


Figura 5.22: 802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 40 MHz - Resultado da fórmula considerando a incidência de BER

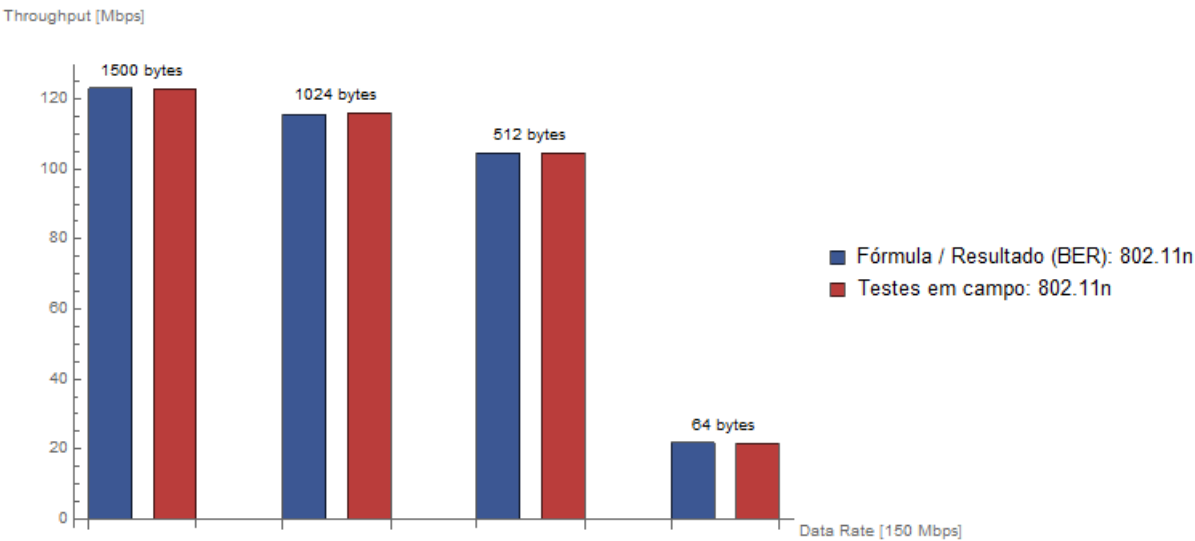


Figura 5.23: 802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 40 MHz - Considerando a incidência de BER para o *data rate* máximo

A Tabela 5.19 ilustra os valores de BER usados na Eq. 3.10, a fim de se obter as curvas apresentadas pela Fig. 5.22.

Tabela 5.19: 802.11n - A-MPDU em 2,4 GHz / 40 MHz - Definição de valores referente ao BER (*Bit Error Rate*)

Tamanho dos frames	Data Rate Teórico	BER usado na fórmula	Probabilidade de sucesso na transmissão
1500 bytes	150 Mbps	$10^{-5,6}$	97 %
1024 bytes	150 Mbps	$10^{-5,3}$	94 %
512 bytes	150 Mbps	$10^{-4,9}$	85 %
64 bytes	150 Mbps	$10^{-3,5}$	2 %

Capítulo 6

Conclusões

Observou-se no decorrer deste trabalho a relação entre o *data rate* teórico suportado pelos padrões 802.11a/b/g/n/ac, associado ao seu *throughput* em uma simulação sem considerar a incidência de erros na transmissão (BER) e por fim comparado aos resultados obtidos em campo, onde na ocasião houve incidência de erros.

Dessa forma, foi realizado então uma nova simulação, fazendo-se ajustes dos valores referentes ao BER (*Bit Error Rate*) usados na Eq. 3.10, tendo como resultado final a similaridade nas curvas entre os resultados derivados da Eq. 3.10 com os dos testes em campo.

Nota-se através dos resultados referentes ao BER, que o tamanho do *frame* e também a quantidade de *frames* usados nos padrões que suportam algum dos métodos de agregação descritos anteriormente possuem grande influência na probabilidade de sucesso na transmissão dos dados, onde *frames* de menor tamanho exigem maior processamento do dispositivo de RF usado para transmitir e/ou receber os dados, sendo estes dispositivos referenciados como rádio neste estudo.

Como as fórmulas usadas neste trabalho não levam em consideração o processamento dos rádios, para os *frames* de menor tamanho, como 64 bytes, exibe-se uma grande diferença entre os resultados adquiridos em campo com os obtidos pelas equações, logo o valor referente a probabilidade de sucesso na transmissão é consideravelmente baixo para *frames* desse tamanho.

Conforme abordado por Sharon e Alpert (2014), a taxa de BER é uma premissa extremamente útil para se determinar qual o melhor tamanho do *frame* final para se obter o melhor desempenho, minimizando perda de dados por erros na transmissão.

Fazendo uma comparação de forma macro, levando em consideração todos os padrões WLAN referenciados neste trabalho, é possível observar que quanto maior a banda livre disponível para o tráfego de dados, menores serão os valores relacionados à latência.

Dentre os padrões analisados, o 802.11b é o que possui menor *throughput*, contanto é o mais resistente a taxa de BER, visto que este usa-se de modulações que representam uma menor quantidade de bits por símbolo.

É importante ressaltar que o BER tende a aumentar conforme o aumento de condições referente a interferências, ruídos, desvanecimento do sinal *wireless*, processamento insuficiente para realizar a transmissão dos dados, etc.

O padrão WLAN 802.11a e o 802.11g possuem as mesmas características no âmbito das modulações suportadas, contudo estes apresentam *throughputs* ligeiramente distintos entre si devido suas diferenças em relação a alguns de seus parâmetros de funcionamento, como por

exemplo o valor referente ao SIFS (*Short Interframe Space*) e o DIFS (*DCF Interframe Space*), onde por fim o padrão 802.11g apresenta tempos menores quando comparado ao 802.11a, o que teoricamente faz com que seu *throughput* numa condição com total ausência de BER seja ligeiramente maior.

Nota-se contudo que na prática acontece justamente o contrário, onde o padrão 802.11a apresenta um *throughput* ligeiramente maior que o 802.11g, visto que seu funcionamento tem como premissa o uso da faixa de 5 GHz, além do fato de seus canais adjacentes não se sobreporem. Comparado a faixa de 2,4 GHz, a frequência de 5 GHz possui comprimento de onda de menor tamanho, logo seu campo de irradiação fica mais restrito, além do fato desta frequência possuir uma tendência a ter uma menor incidência de redes ativas (em funcionamento), onde no final das contas a interferência e o ruído incidente nas soluções que trabalham no padrão 802.11g, que por sinal usa-se da faixa de frequência de 2,4 GHz é bem maior quando comparado as soluções que funcionam sobre a faixa de 5 GHz, como por exemplo o padrão 802.11a.

Temos também o padrão 802.11n e o 802.11ac, que por sinal trouxeram alguns melhoramentos em relação aos padrões 802.11a/b/g, como a possibilidade do uso de vários canais de radio frequência, canais com maior largura, métodos de agregação para unir vários *frames* dentro um único *frame* agregado, modulações mais eficientes, aumento da quantidade de saídas RF, dentre outros.

Tanto o padrão 802.11n quanto o 802.11ac suportam os três métodos de agregação expostos no decorrer deste estudo, que no caso são os métodos A-MSDU, A-MPDU e o de dois níveis. Dentre esses métodos de agregação, o que possui maior desempenho é o de dois níveis, contudo este método não foi muito usado nas soluções de *hardware* por parte dos fabricantes, onde o método mais comum em relação a implementação em hardwares para uso nos equipamentos que aderem aos padrões 802.11n e/ou 802.11ac é o A-MPDU.

Dentre os padrões WLAN analisados, o que possui maior desempenho é o 802.11ac, pois este possui algumas características em sua implementação que faz com que seu *throughput* seja o maior dentre os padrões WLAN analisados nesse trabalho.

Mesmo não sendo foco desse trabalho, existem outros padrões WLAN da família 802.11 com desempenho bem superior ao 802.11ac, citando como exemplo o 802.11ad.

6.1 Trabalhos Futuros

Existem diversas extensões possíveis seguindo o perfil apresentado por este estudo, compreendendo os dados de aplicações que abrangem não somente as duas primeiras camadas do modelo OSI, mais também todas as sete camadas deste modelo, possibilitando dessa forma estudar qual o comportamento final referente ao *overhead* presente nessas camadas.

Apesar das simulações e dos testes em campo serem feitos usando-se de canal com 20 MHz de largura, chegando até 40 MHz para os padrões 802.11n/ac, também existe a possibilidade de num trabalho futuro incluir canais de faixa de maior largura para os padrões 802.11n/ac, usar-se de mais saídas RF, trabalhar com diferentes métodos de transmissão, como CSD (*Cyclic Shift Diversity*), TxBF (*Transmit Beamforming*), STBC (*Space Time Block Coding*), dentre outros (NETWORKS, 2014).

Nos testes em campo, percebe-se que apenas a modulação máxima de cada padrão WLAN foi usada na comparação com os resultados obtidos pelas equações. Futuramente pode-se também expandir este trabalho incluindo não somente a maior modulação dos padrões WLAN analisados, mais também considerar outros *data rate*

Referências Bibliográficas

BURTON, M. 802.11 Arbitration. *Certified Wireless Network Professional*, n. September, p. 24, 2009.

CANTÚ, E. C. D. *Redes de Computadores e Internet*. São José / SC: [s.n.], 2003. ISBN 9788560031368. Disponível em: <<http://www.das.ufsc.br/{~}montez/Disciplinas/materialRedes/ApostilaCantu.p>>.

Federal Communications Commission. *FCC 13-22 - 5 GHz Unlicensed Spectrum (UNII)*. [S.l.: s.n.], 2013.

GAST, M. *802.11 Wireless Networks*. [s.n.], 2002. 464 p. ISBN 0596001835. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/{~}ee05005/tese/arquivos/ieee80211.p>>.

HASSLINGER, G.; HOHLFELD, O. The Gilbert-Elliott Model for Packet Loss in Real Time Services on the Internet. *Measuring, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB), 2008 14th GI/ITG Conference -*, p. 1–15, 2008.

HRANAC, R.; CURRIVAN, B. Digital Transmission : Carrier-to-Noise Ratio , Signal-to-Noise Ratio , and Modulation Error Ratio. *Broadcom Corporation and Cisco Systems, Inc*, p. 1–42, 2006.

IEEE Standards Association. *IEEE Std 802.11-1997*. [S.l.]: IEEE Computer Society, 1997. 459 p.

IEEE Standards Association. *IEEE Std 802.11h-2003*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2003. ISBN 0738128201.

IEEE Standards Association. *IEEE Std 802.11n-2009*. [s.n.], 2009. 1–536 p. ISSN 0899-8205. ISBN 9780738160467. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11n-2009.pdf>>.

IEEE Standards Association. *IEEE Std 802.11ac-2013*. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2013. 1–425 p. ISBN 9780738188607.

IEEE Standards Association. *IEEE Std 802.11-2016*. [S.l.: s.n.], 2016. ISBN 9780738172118.

International Organization for Standardization. *ISO/IEC 7498-1:1994 Information Technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model*. [S.l.: s.n.], 1996. 1–68 p.

JUN, J.; PEDDABACHAGARI, P.; SICHITIU, M. Theoretical maximum throughput of IEEE 802.11 and its applications. *Proceedings - 2nd IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, NCA*, 2003.

LEE, H. C. DCF Throughput Analysis of IEEE 802 . 11a / g / n-based Mobile LAN over Correlated Fading Channel. v. 3, n. 4, 2011.

LIAO, R. et al. Uni-MUMAC: a unified down/up-link MU-MIMO MAC protocol for IEEE 802.11ac WLANs. *Wireless Networks*, Springer US, v. 21, n. 5, p. 1457–1472, 2015. ISSN 15728196. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11276-014-0861-4>>.

LIU, J.; YAO, M.; QIU, Z. Enhanced two-level frame aggregation with optimized aggregation level for IEEE 802.11n WLANs. *IEEE Communications Letters*, v. 19, n. 12, p. 2254–2257, 2015. ISSN 10897798.

NETWORKS, A. 802.11ac In-Depth. *Aruba White Paper*, v. 802.11ac I, p. 37, 2014.

SCHERRER, J. R.; SPAHNI, S. New opportunities for processing the OSI-7 layer protocols using parallel processing (transputers). *International Journal of Bio-Medical Computing*, v. 34, n. 1-4, p. 387–398, 1994. ISSN 00207101.

SHARON, O.; ALPERT, Y. MAC level Throughput comparison: 802.11ac vs. 802.11n. *Physical Communication*, Elsevier B.V., v. 12, p. 33–49, 2014. ISSN 18744907. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.phycom.2014.01.007>>.

Tektronix Inc. Wi-Fi : Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements. p. 44, 2013. ISSN 0018-9545. Disponível em: <<http://www.cnrood.com/public/docs/WiFi{\\}Physical{\\}Layer{\\}and{\\}Tra>>.

THAPA, A.; SHIN, S. Achievable Performance of IEEE 802.11n MIMO adapted WLANs with MAC Enhancements. In: *international information institute*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 15.

WEXLER, J. *Beating WLANs into submission, Part 2: Beamforming*. 2009.

Disponível em: <<http://www.networkworld.com/article/2262681/wireless/ beating-wlans-into-submission--part-2--beamforming.html>>.