

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Coordenação de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Uma análise comparativa do padrão IEEE
802.11 operando em 2,4 GHz e 900 MHz.

Rafael de Brito Cândido Gomes

Área de Concentração: Ciência da Computação

Linha de Pesquisa: Redes de Computadores

Marco Aurélio Spohn

(Orientador)

Campina Grande, Paraíba, Brasil

© Rafael de Brito Cândido Gomes, 14/03/2012

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Coordenação de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Uma análise comparativa do padrão IEEE 802.11
operando em 2,4 GHz e 900 MHz.

Rafael de Brito Cândido Gomes

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em
Ciência da Computação da Universidade Federal de Campina Grande -
Campus I como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau
de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Ciência da Computação

Linha de Pesquisa: Redes de Computadores

Marco Aurélio Spohn

(Orientador)

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Rafael de Brito Cândido Gomes, 06/03/2012





FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G633a Gomes, Rafael de Brito Cândido
Uma análise comparativa do padrão IEEE 802.11 operando em 2,4 GHz e 900 MHz / Rafael de Brito Cândido Gomes. – Campina Grande, 2012.
66 f.: il. : color.

Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Spohn.
Referências.

1. Rede sem Fio. 2. 900 MHz. 3. 2,4 GHz. 4. IEEE 802.11. I.
Título.

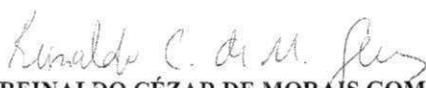
CDU 004.7 (043)

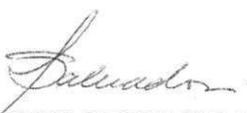
"UMA ANÁLISE COMPARATIVA DO PADRÃO IEEE 802.11 OPERANDO EM 2.4 GHz E
900 MHz"

RAFAEL DE BRITO CANDIDO GOMES

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 27/02/2012


MARCO AURELIO SPOHN, Ph.D
Orientador(a)


REINALDO CÉZAR DE MORAIS GOMES, Dr.
Examinador(a)


FABIANO SALVADORI, D.Sc
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Resumo

O uso da comunicação sem fio é bastante difundido na atualidade. A sociedade moderna utiliza, de forma frequente, em aparelhos como celulares, PDAs, notebooks, rádio e televisão para acessar uma variada gama de informações. Tais equipamentos utilizam sistemas de transmissão de dados por radiofrequência (i.e., por meio de ondas eletromagnéticas). Nesse cenário, pode-se destacar a aplicação de redes sem fio para as mais diversas atividades, a exemplo do monitoramento de fábricas, no controle de semáforos, avaliação do fluxo de carros, monitoramento de linhas de transmissão de energia, situações de desastres ambientais e no suporte em campos de batalha.

Portanto, é comum observar em vários lugares uma ocupação intensa na faixa de frequência de 2,4 GHz, resultante das redes sem fio operando nessas faixas. O sinal de transmissão de cada uma dessas redes gera interferência nas demais redes vizinhas. Esta interferência acaba piorando a qualidade do sinal percebido pelos receptores, fazendo com que a qualidade da conexão entre os nós degrade proporcionalmente a ocupação da faixa espectral na vizinhança de operação da rede. Algumas redes, com intuito de tentar melhorar a qualidade da conexão, têm a potência do seu sinal aumentado até o limite permitido por lei, prejudicando ainda mais a operação das demais redes que operam dentro de limites de potências inferiores.

O nosso objetivo é verificar se o padrão IEEE 802.11b e IEEE 802.11g é adequado para operar na faixa de frequência de 900 MHz, fazendo uma análise comparativa de desempenho com uma rede operando na faixa de frequência de 2,4 GHz.

Abstract

The use of wireless communication is widespread today. The modern society uses so often, in devices such as mobile phones, PDAs, notebook computers, radio and television to access a wide range of information. Such devices use transmission data systems by radio frequency (ie, through electromagnetic waves). In this scenario, we can emphasize the implementation of wireless networks for many different activities, such as the factories's monitoring, traffic control lights, cars flow assessment, of power transmission lines's monitoring, environmental and disaster situations, and support on the battlefield.

Therefore, it is common to see several places in an intense occupation in the frequency range of 2.4 GHz, resulting from wireless networks operating in these regions. The transmission signal of each of these networks generates interference in other neighboring networks. This ends up worsening the interference signal quality perceived by the receptors, causing the quality of the connection between the nodes proportionally degrades the occupation of the spectral range in the vicinity of network operation. Some networks, in order to try to improve the quality of the connection, have the power of the signal increased to the extent permitted by law, further impairing the operation of other networks that operate within limits lower powers.

Our goal is to verify the IEEE 802.11b and IEEE 802.11g is suitable to operate in the frequency range of 900 MHz, making a comparative analysis of performance with a network operating in the frequency range 2.4 GHz.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por permitir que eu esteja vivo e tenha me ajudado durante a pesquisa. A Nossa Senhora pela intercessão e proteção durante os experimentos. Agradeço aos meus pais pelo apoio que me deram durante todos esses anos e compreensão ao chegar atrasado em casa. Para as minhas irmãs Rafaela de Brito Cândido Gomes e Gabriela de Brito Cândido Gomes por ajudar na revisão deste trabalho.

Agradeço ao professor Marco Aurélio Spohn, pela a sua orientação dada por todos esses anos, e aos professores Reinaldo Gomes, Fabiano Salvadori por estarem nesta banca de defesa de mestrado. Também agradeço ao pessoal da coordenação por ajudarem a resolver todos os problemas burocráticos que apareceram. Deixo meus agradecimentos à HP Brasil pela o auxílio via bolsa de estudo durante esses 2 anos.

Quero deixar meus agradecimentos ao Luiz Texeira Neto pelo seu trabalho com a organização dos dados obtidos pelos experimentos e a sua ajuda nas execução dos experimentos e manutenção das plaquinhas e para Ruan Delgano Gomes por ter desenvolvido um meio de observar os dados brutos dos Airview2 e Airview9.

Agradecimentos para Tiago e Athayde Neto pelos momentos de conversar no LATEC. Para Elmano Ramalho Cavalcanti e Sidney Doria pela orientação nos projetos de disciplinas no mestrado. Para todos aqueles que me ajudaram nestes dois anos e não tenha escrito o nome neste pequeno agradecimento, o meu muito obrigado.

Conteúdo

1	Introdução	11
1.1	Motivação	11
1.1.1	Redes sem fio	11
1.1.2	Poluição na Faixa de Frequência de 2,4 Ghz	12
1.2	Objetivo	13
1.3	Relevância do Trabalho	14
1.4	Estrutura da Dissertação	14
2	Redes Locais Sem Fio IEEE 802.11 Wi-Fi	16
2.1	Padrão IEEE 802.11b	17
2.2	Padrão IEEE 802.11g	19
2.3	Limitações do Padrão IEEE 802.11	20
2.4	Utilização do Padrão IEEE 802.11 em canais não padronizados	21
3	Análise Comparativa do IEEE 802.11 nas faixas de frequência de 2.4 GHz e 900 MHz	23
3.1	Descrição detalhada do problema	23
3.1.1	Hipóteses	25
3.2	Metodologia	28
3.2.1	Projeto de experimentos	28
3.2.2	Descrição das ferramentas	31
3.3	Experimento	37
3.4	Restrições dos experimentos	38
3.5	Resultados	39

3.6	Análise dos Resultados	46
4	Conclusão	49
4.1	Resumo	49
4.2	As principais Conclusões	51
4.3	Limitações	53
4.4	Trabalhos Futuros	53
A	Tamanho da amostra para determinar a média	57

Lista de Figuras

1.1	Configuração típica de uma rede sem fio.	12
2.1	Faixas de frequência do ISM regulamentadas para uso livre no Brasil [1].	16
2.2	Fluxograma do protocolo CSMA/CA [9].	18
2.3	Modulação OFDM: transmissão de dados.	20
2.4	Efeito <i>multipath fading</i> numa transmissão via rádio frequência.	20
3.1	A divisão da faixa de frequência de 2,4 GHz de acordo com o padrão IEEE 802.11b.	24
3.2	<i>Soerkis net5501-70</i> fechada dentro do <i>case</i>	32
3.3	<i>Soekris net5501-70</i> : placa principal interna.	32
3.4	A interface <i>wireless</i> para faixa de 2.4 GHz XR2 da <i>Ubiquiti</i>	34
3.5	Interface SR9 da <i>Ubiquiti</i> TM para faixa de frequência de 900 MHz.	35
3.6	Interface do Airview2 no computador.	36
3.7	Interface do Airview9 no computador.	37
3.8	Ilustração do experimento.	38
3.9	Ocupação espectral da faixa de frequência de 2,4 GHz para o canal 1.	40
3.10	Ocupação espectral da faixa de frequência de 2,4 GHz para o canal 11.	41
3.11	O desempenho da rede em 2,4 GHz.	42
3.12	Comparação de potência na frequência de 900 MHz no canal 3.	42
3.13	Comparação de potência na frequência de 900 MHz no canal 4.	43
3.14	O desempenho da rede em 900 MHz.	43
3.15	O desempenho da rede em 900 MHz, comparando entre modo infra-estruturado e o modo ad-hoc.	44

3.16 O desempenho da rede em 900 MHz, comparando entre modo infra-estruturado e o modo ad-hoc, mas separados por canais.	45
--	----

Lista de Tabelas

3.1	Tabela que demonstra a força de uma correlação de acordo com coeficientes de Pearson [4].	27
3.2	Distribuição dos canais para o padrão IEEE 802.11 na faixa de frequência de 900 MHz segundo o fabricante Ubiquiti TM	29
3.3	Tabela resumo do experimento ideal.	31
3.4	Resultados do coeficiente de correlação entre o canal e a potência para faixa de frequência de 2,4 GHz	47
3.5	Resultados do coeficiente de correlação entre o canal e a potência para faixa de frequência de 900 GHz.	47
3.6	Coeficiente de correlação entre as faixas de frequência de 900 Mhz e 2.4 GHz.	48
3.7	Coeficiente de Correlação entre o modo Ad-Hoc com o modo infra-estruturado na faixa de frequência de 900 MHz.	48
A.1	Quantidade mínima de experimentos com precisão de 1% (nível de confiança de 0,90).	58
A.2	Quantidade mínima de experimentos com precisão de 1% (nível de confiança de 0,95).	59
A.3	Quantidade mínima de experimentos com precisão de 1% (nível de confiança de 0,99).	60
A.4	Quantidade mínima de experimentos com precisão de 3% (nível de confiança de 0,90).	61
A.5	Quantidade mínima de experimentos com precisão de 3% (nível de confiança de 0,95).	62

A.6	Quantidade mínima de experimentos com precisão de 3% (nível de confiança de 0,99).	63
A.7	Quantidade mínima de experimentos com precisão de 5% (nível de confiança de 0,90).	64
A.8	Quantidade mínima de experimentos com precisão de 5% (nível de confiança de 0,95).	65
A.9	Quantidade mínima de experimentos com precisão de 5% (nível de confiança de 0,99).	66

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O uso da comunicação sem fio é bastante difundido na atualidade. A sociedade moderna utiliza, de forma frequente, aparelhos como celulares, PDAs, notebooks, rádio e televisão para acessar uma variada gama de informações. Tais equipamentos utilizam sistemas de transmissão de dados por radiofrequência (i.e. por meio de ondas eletromagnéticas). Nesse cenário, pode-se destacar a aplicação de redes sem fio para as mais diversas atividades, a exemplo do monitoramento de fábricas [13] [8], no controle de semáforos, avaliação do fluxo de carros [6], monitoramento de linhas de transmissão de energia [13], situações de desastres ambientais e no suporte em campos de batalha.

1.1.1 Redes sem fio

Redes sem fio são redes de computadores onde ocorre comunicação via radiofrequência; ou seja, não fazem uso de cabos como meio de transmissão de dados. Geralmente as redes sem fio são locais e possibilitam pontos de acesso a uma rede de maiores proporções (e.g., *Internet*). A figura 1.1 ilustra uma configuração típica de uma rede local sem fio cujo ponto de acesso está conectado a uma rede estruturada (i.e., cabeada) do tipo *Ethernet*.

Os sistemas mais difundidos para comunicação sem fio utilizam rádios transmissores que utilizam um conjunto de técnicas que exploram a radiofrequência como meio de comunicação. Essas técnicas implementadas fisicamente, aliadas a um conjunto de protocolos de

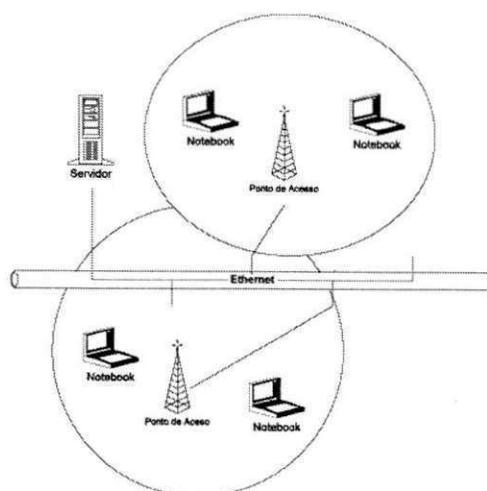


Figura 1.1: Configuração típica de uma rede sem fio.

acesso ao meio, completam qualquer solução de redes locais sem fio. Os protocolos mais difundidos são o IEEE 802.11 (popularmente conhecido como *Wireless-Fidelity (Wi-Fi)*, o *Bluetooth* e o *Zigbee*. O presente trabalho terá como enfoque as redes sem fios baseadas no padrão IEEE 802.11.

1.1.2 Poluição na Faixa de Frequência de 2,4 Ghz

Como referido anteriormente, os protocolos 802.11b e 802.11g são os mais utilizados, logo, é comum observar uma ocupação intensa na faixa de frequência de 2,4 GHz, resultante das redes sem fio operando nesses lugares. O sinal de transmissão de cada uma dessas redes gera interferência nas redes vizinhas. Essa interferência acaba piorando a qualidade do sinal percebido pelo receptores, fazendo com que a qualidade da conexão entre os nós degrade proporcionalmente à ocupação da faixa espectral na vizinhança de operação da rede. Algumas redes têm a potência do seus sinal aumentado até o limite permitido por lei, prejudicando ainda mais a operação das demais redes que operam dentro de limites de potências inferiores.

Esse super-povoamento das redes Wi-Fi funcionando na faixa de frequência de 2,4 GHz pode trazer desconforto para diversos usuários, resultando até na perda de alguns dos serviços realizados via rede como falhas no controle da temperatura do ar condicionado em lojas ou interrupções em sistemas de monitoramento eletrônico. Além da abusiva utilização dessa faixa do espectro eletromagnético, as WLANs concorrem com os sinais gerados por outros

tipos de equipamentos e tecnologias, a exemplo de forno de micro-ondas, outras redes sem fio que operam com outros tipos de protocolos (e.g., *Bluetooth*), telefones sem fio, equipamentos médicos e outras diversas fontes de ondas eletromagnéticas dentro ou próximas da faixa de 2,4 GHz.

Considerando a saturação desta faixa de frequência, questiona-se “por que não adotar outra faixa de frequência do ISM para fazer a portabilidade de algumas redes sem fio que estão operando no padrão IEEE 802.11b ou g?”. Indo nessa direção, há fabricantes que já tem buscado ofertar o padrão 802.11 implementando-o sobre uma camada física em faixas alternativas (e.g., 900 MHz) do ISM.

1.2 Objetivo

É notório que a faixa de frequência em 2,4 GHz encontra-se poluída, dada a intensa utilização das redes sem fio para as mais diversas finalidades nos últimos anos. Além disso, o ambiente em que a rede sem fio se encontra pode interferir na qualidade da comunicação. Em geral, quanto maior a frequência de onda, maior a interferência do meio na qualidade do sinal.

O desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo comparar as redes sem fio que utilizam o padrão IEEE 802.11 operando nas faixas de frequência de 900 MHz e 2,4 GHz, ambas definidas pela ISM como de uso livre. Estudou-se as vantagens que, porventura, cada uma dessas faixas apresenta, contemplando uma análise baseada nas principais métricas de avaliação de desempenho de redes de computadores.

A pesquisa permitirá uma análise mais profunda dos benefícios ao utilizar uma faixa de frequência inferior ao padrão. Verificará se os benefícios são significativos, a ponto de justificar a aplicação em larga escala de redes wi-fi operando em faixas de frequências de 900 MHz. Além disso, apurar-se-á as limitações que possam existir e quais seriam, por conseguinte, seus riscos na implementação de redes em tal faixa de frequência.

É fato que o ISM não disponibilizou apenas a faixa de 2,4 GHz para uso livre. Existem outras faixas que podem ser utilizadas livremente, a exemplo da faixa correspondente a 5,8 GHz. No entanto, também é fato que o padrão IEEE 802.11a possui limitações quanto ao alcance em ambientes com obstáculos, como escritórios, residências, entre outros. Nesse

contexto, observa-se a procura por outra faixa livre do ISM que não esteja especificada no padrão IEEE 802.11.

Existem alguns fabricantes que produzem rádios que operam na faixa de 900 MHz adaptados ao padrão IEEE 802.11g. No entanto, será que tais padrões estão realmente adequados para serem utilizados nessa faixa de frequência?

Este trabalho objetiva verificar se os padrões 802.11b e g estão realmente adequados para serem utilizados na faixa de frequência de 900 MHz, identificando também se há a necessidade de ajustes específicos para a sua correta operação. Para tanto, necessário é realizar uma comparação deste padrão operando em sua faixa de frequência nativa (i.e., 2,4 GHz) com a faixa de 900 MHz, baseando-se em métricas de desempenho de rede (i.e., atraso médio, *jitter* e taxa de entrega de pacotes).

1.3 Relevância do Trabalho

Este trabalho apresenta uma solução para a poluição espectral existente hoje na faixa de espectro de uso livre de 2,4 GHz. No entanto, mais importante do que apresentar uma alternativa, deve-se verificar sua viabilidade prática, identificando também eventuais limitações existentes em operar uma rede Wi-Fi na faixa de frequência de 900 MHz. Para tanto, analisa-se em detalhes a execução de uma rede Wi-Fi no modo infra-estruturado, comparando-se entre uma rede operando na faixa de frequência padrão de 2,4 GHz e a faixa de frequência de 900 MHz.

Adicionalmente, para o caso específico de uma rede Wi-Fi na faixa de frequência de 900 MHz, realiza-se uma comparação entre os modos de operação infra-estrutura e *ad hoc*, tentando observar possíveis formas de melhorias na operação da rede.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta Dissertação está estruturada na seguinte forma. No capítulo 1, realiza-se uma apresentação inicial do trabalho, oferecendo uma introdução sobre o problema e qual a sua relevância para a sociedade em geral.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão sobre o padrão IEEE 802.11, descrevendo prin-

principalmente os padrões IEEE 802.11b e IEEE 802.11g. Adicionalmente, descreve-se as limitações desses padrões operando na faixa de frequência de 2,4 GHz, bem como o emprego do padrão em outras faixas de frequência alternativa, tais como, por exemplo, a faixa de frequência de 900 MHz.

No capítulo 3, o problema em questão é descrito em detalhes, descrevendo a metodologia adotada bem como as ferramentas utilizadas, possibilitando assim a repetição do experimento por terceiros. Após a descrição dos experimentos e as restrições que existiram, os resultados obtidos são analisados.

Por último, no capítulo 4, apresenta-se a conclusão do trabalho. Inicialmente é apresentado um resumo de toda a pesquisa, com as principais observações obtidas na seção de análise dos resultados do capítulo 3. Posteriormente, levanta-se as principais conclusões obtidas dentro do trabalho e as suas limitações. Por fim, cita-se possíveis trabalhos futuros que poderão ser realizados a partir dessa temática.

Capítulo 2

Redes Locais Sem Fio IEEE 802.11

Wi-Fi

Em 1999 foi homologado o padrão IEEE 802.11 ou *Wireless local area network* (WLAN) ([16]). Esse padrão foi projetado com o propósito de elaborar uma especificação para o controle de acesso ao meio na comunicação sem fio em estações que estão paradas, em movimento ou portáteis. O 802.11 tornou a instalação e a configuração mais simples para os usuários, e também barateou o processo de desenvolvimento de equipamentos de comunicação sem fio [15]. Em pouco tempo, deu-se a popularização do uso das redes sem fio.

O padrão IEEE 802.11 opera nas faixas de frequências de uso livre de licenças dentro do espectro eletromagnético, definidas pela *International Telecommunication Union* (ITU) como as faixas para *Industrial Scientific and Medical* (ISM), e regulamentadas em vários países. A figura 2.1 mostra algumas das faixas do ISM que são de uso livre no Brasil, segundo a ANATEL [1].

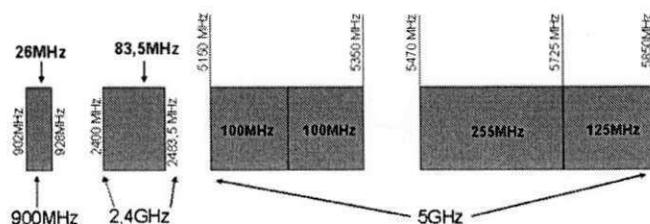


Figura 2.1: Faixas de frequência do ISM regulamentadas para uso livre no Brasil [1].

O IEEE 802.11 é um conjunto de protocolos que tem como meta a padronização do

meio de acesso nas mais diversas formas. Esse padrão trabalha nas faixas de frequência de 2,4 GHz (IEEE 802.11b [14] e IEEE 802.11g [14]) e 5,8 GHz (IEEE 802.11a [14]). Na atualidade, os protocolos 802.11b e 802.11g são os mais adotados nas implementações de redes sem fio.

2.1 Padrão IEEE 802.11b

O padrão IEEE 802.11 b ou IEEE 802.11 b - 1999 é um adendo para especificação do IEEE 802.11 [14]. Esse adendo aumenta a taxa de transferência de dados para 11 Mbit/s utilizando a faixa de frequência de 2,4 GHz. Este padrão é conhecido, sendo popularmente denominado *Wi-fi*.

Tal padrão utiliza o protocolo *Carrier sense with multiple access (CSMA)* para acessar o meio. De modo simplificado, o protocolo CSMA funciona da seguinte maneira: um nó que deseja transmitir primeiro escuta por um período de tempo predeterminado para determinar se há ou não algum nó por perto transmitindo. Caso o canal esteja **livre**, o dispositivo transmite. Caso contrário, o dispositivo deverá adiar a transmissão por um período de tempo aleatório. Ao terminar o período de espera, reinicia-se a escuta. Pode ainda ocorrer que o nó não consiga realizar a transmissão. Diz-se que o protocolo é probabilístico porque não há como estimar um tempo mínimo de espera até a conclusão da transmissão com sucesso.

O CSMA por si só não consegue resolver um dos principais problemas da comunicação sem fio: o problema do terminal escondido. Esse problema pode ser contornado pelo CSMA/CA (*collision avoidance*). O CSMA/CA apresenta uma fase adicional: depois de verificar se o meio está livre, o nó transmissor envia um pacote de controle denominado *Request to Send (RTS)*, e espera por uma resposta do tipo *Clear to Send (CTS)*. Caso o dispositivo receba um CTS corretamente, significa então que ele está autorizado para transmitir, e assim continua a transmissão. Caso contrário, volta para o estado de espera (como podemos ver na figura 2.2).

Como esquema de modulação, o padrão IEEE 802.11 b utiliza o *Complementary Code Keying (CCK)*, que é uma forma de espalhamento espectral baseado em códigos complementares binários. Esses códigos são sequências de mesmo tamanho, sendo que os pares de elementos separados dentro de uma sequência são iguais ao número de elementos diferentes

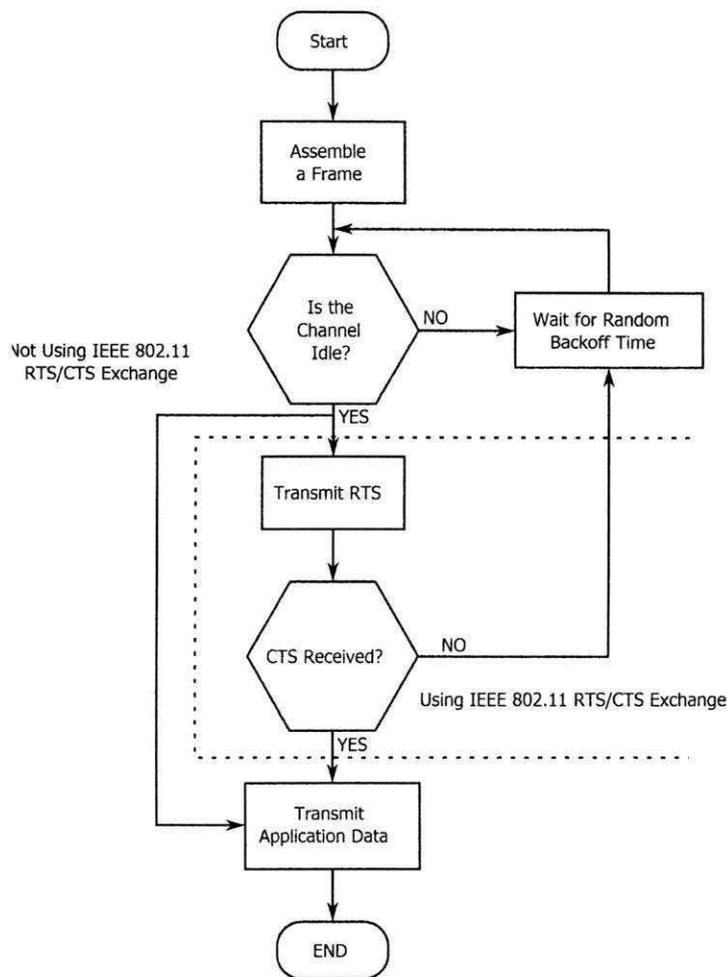


Figura 2.2: Fluxograma do protocolo CSMA/CA [9].

com a mesma separação entre a sequência complementar, e vice-versa. Essas sequências complementares se anulam.

Com o CCK, o padrão IEEE 802.11b consegue uma taxa nominal de transferência de dados de 11 Mbit/s. No entanto, a taxa pode ser ajustada para 1 Mbit/s, 2 Mbit/s e 5,5 Mbit/s, dependendo da qualidade do sinal dentro do ambiente. O padrão permite operação em modo infra-estrutura e *ad hoc* (i.e., auto organizável), permitindo também enlaces ponto-a-ponto que, dependendo da potência e das antenas empregadas, pode alcançar dezenas de quilômetros de distância (e.g., com antenas direcionais e com visada direta).

2.2 Padrão IEEE 802.11g

Em 2003 foi adicionada mais um adendo ao padrão IEEE 802.11, que é conhecida como IEEE 802.11g ou IEEE 802.11g-2003 [14]. Esse adendo expande a capacidade da taxa de transmissão de dados para 54 Mbit/s.

O IEEE 802.11g, por sua vez, adota outro padrão de modulação. Tal como no 802.11b, o padrão g também opera na faixa de frequência de 2,4 GHz, oferecendo retro-compatibilidade com o padrão b. Desta forma, existindo equipamentos que só operam com 802.11b dentro de uma rede com dispositivos compatíveis com o padrão 802.11g, fará com que a rede experiente uma queda na qualidade do desempenho devido a operação forçada em modo b.

O padrão IEEE 802.11g utiliza uma combinação de esquemas de modulação. Para controle de rede e compatibilidade para IEEE 802.11b, utiliza-se o esquema de modulação CCK. Para transmissão de dados é utilizado o esquema de modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)*.

A modulação OFDM utiliza diversas portadoras ortogonais para transmitir um sinal. Contudo, antes de ser modulado na portadora, os dados recebem diversos filtros para melhorar os resultados. Os dados são inicialmente tratados contra erros como, por exemplo, o embaralhamento dos bits do mesmo byte. Depois os bits são entrelaçados, sendo os bits subsequentes separados pelo tempo.

Na modulação, as diversas portadoras operam em frequências diversas, onde cada uma das portadoras envia alguns dos bits do sinal original que passaram pelos filtros. Essas portadoras são ortogonais entre si, para que não interfiram entre elas. Para tanto, existe um espaçamento entre as frequências (como ilustrado na figura 2.3).

Esse esquema de modulação já era empregado no padrão IEEE 802.11a para a faixa de 5,8 GHz e foi adaptado para a faixa de frequência de 2,4 GHz. O padrão IEEE 802.11g permite as seguintes taxas nominais de transferência de dados: 1 Mbit/s, 2 Mbit/s, 5,5 Mbit/s, 6 Mbit/s, 9 Mbit/s, 11 Mbit/s, 12 Mbit/s, 18 Mbit/s, 24 Mbit/s, 36 Mbit/s, 48 Mbit/s e 54 Mbit/s. Sendo que as taxas de 1 Mbit/s, 2 Mbit/s, 5,5 Mbit/s e 11 Mbit/s são empregadas no modo de compatibilidade com o padrão IEEE 802.11b.

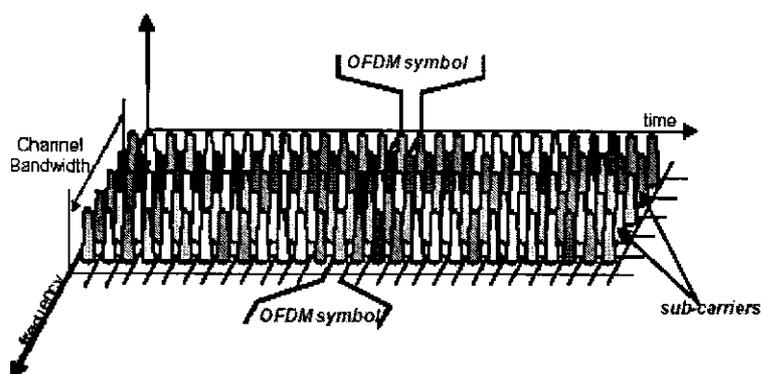
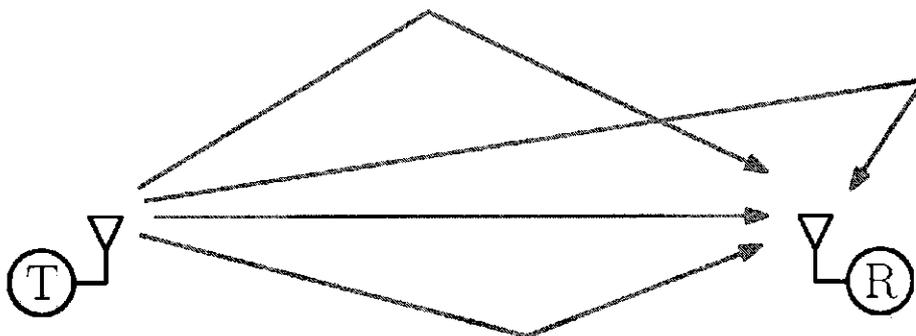


Figura 2.3: Modulação OFDM: transmissão de dados.

2.3 Limitações do Padrão IEEE 802.11

Existem alguns fatores prejudiciais à qualidade do sinal de uma determinada rede sem fio que não são dependentes de outra rede. Tais fatores são característicos do ambiente em que a rede WI-FI se encontra. O meio, de alguma forma, pode alterar a propagação da onda eletromagnética. As redes sem fio sofrem com os efeitos da reflexão, da refração, da difração e da absorção da onda.

Figura 2.4: Efeito *multipath fading* numa transmissão via rádio frequência.

A reflexão da onda do rádio do transmissor ocorre quando a onda encontra algum obstáculo ao longo do seu percurso e, ao encontrar tal obstáculo, a onda pode ser totalmente redirecionada com a mesma potência de sinal ou parcialmente redirecionada, mas com uma potência menor. Uma onda pode se propagar por várias direções, atingido alguma estação receptora após várias reflexões (como exemplificado na figura 2.4). Tal fenômeno é chamado de *multipath fading*. A reflexão da onda pode acarretar problemas no receptor, pois as com-

binações dos sinais que chegam ao receptor, incluindo o sinal que porventura venha direto da fonte (i.e. via um caminho sem obstáculo), pode ser ininteligível a ponto de impossibilitar a decodificação do sinal.

Outro fenômeno comumente danoso à qualidade do sinal é a absorção da onda perante a barreira. Quando ocorre a absorção, a onda continua com o mesmo caminho que estava previsto, entretanto há uma alteração na potência do sinal da onda de rádio. Quando a potência da onda que sai é maior que a potência da onda que entra, acontece uma amplificação no sinal. Caso seja o contrário, haverá uma atenuação no sinal da onda. Geralmente ocorre mais atenuação do que amplificação no sinal da onda, nos mais diversos tipos de materiais.

Existem alguns estudos que tentam modelar os efeitos desses fenômenos em diferentes faixas de frequência [2; 10]. Alguns descrevem os efeitos da absorção da onda [11; 8], enquanto outros tratam os efeitos da reflexão [13; 2; 10; 5]. Todavia, o que tais estudos indicam é que, quanto menor a frequência da onda de rádio, menor os efeitos desses fenômenos.

2.4 Utilização do Padrão IEEE 802.11 em canais não padronizados

Muitos dos trabalhos que utilizam redes que operam fora da faixa de frequência de 2,4 GHz e 5,8 GHz utilizam variantes dos protocolos **ZigBee** ou **Bluetooth**. Alguns focam mais na análise espectral em algum ambiente ou comportamento dos materiais de construção. Trabalhos como, por exemplo, o de *Weibing Fan* et al. [3], apresentam medidas para efeitos de isolamento para dois materiais de construção, mármore e madeiras, em redes operando nas faixas de frequências de 900 MHz e 2,4 GHz.

Já no artigo de *Tanghe* et al. [13], os autores realizam teste para compreender a ocupação espectral e os efeitos do *fading* em chão de fábrica. Com isso, eles conseguem modelos de comportamento para o *temporal fading* e *large-scale fading*. Esse é um dos exemplos dos trabalhos voltados ao uso do IEEE 802.11 fora da faixa de frequência de 2,4 GHz.

Kun-chan Lan et al. [7] foca na implementação de uma rede *wireless mesh* para o controle de tráfego em Sydney, Austrália, usando as faixas de frequência de 900 MHz, 2,4 GHz e 3,5 GHz, com enlaces Ethernet para alimentação. Os nós distam entre si de 200 a 500 metros.

Como interface de 900 MHz, utilizou-se a interface SR9 da UbiquitiTM, para a frequência padrão de 2,4 GHz, empregou-se a interface SR2 do mesmo fabricante. Nesse artigo, o autor observa que existe uma certa latência na transmissão em 900 MHz devido ao aumento da transmissão de pacotes da camada MAC. Todavia, os resultados não são conclusivos visto que a perda de pacotes não é analisada no estudo.

Capítulo 3

Análise Comparativa do IEEE 802.11 nas faixas de frequência de 2.4 GHz e 900 MHz

3.1 Descrição detalhada do problema

Desejamos realizar uma comparação do desempenho de uma rede sem fio que esteja operando na faixa de frequência não convencional de 900 MHz com uma rede operando na faixa de frequência padrão de 2,4 GHz conforme o padrão IEEE 802.11bg. Para tanto, precisa-se definir quais são as variáveis independentes e as variáveis dependentes do sistema, o que será constante e inalterável por hora. Definidos esses parâmetros, podemos elaborar hipóteses para serem testadas durante o conjunto de experimentos elaborados de acordo com as regras estabelecidas pelo *design* de experimento.

As **variáveis independentes** são aquelas nas quais é possível fazer alteração do seu valor durante a execução dos experimentos. Também podem ser chamadas como **variáveis de entrada**. Tais variáveis têm os seus valores alterados pelos usuários de acordo com o sistema a ser observado. Durante os nossos experimentos, os valores que utilizamos são limitados de acordo com a especificação dos equipamentos utilizados ou, então, devido as restrições legais. Abaixo segue a lista de variáveis independentes e suas definições.

- **Faixa de frequência** - É a faixa de frequência do espectro eletromagnético em que

- **Potência de recepção** - É a potência de sinal que a antena do rádio receptor capta durante uma recepção em uma determinada faixa de frequência ou canal. Pode também ser conceituado como a potência resultante da transmissão de diversas redes sem fio e de diversas outras fontes de transmissão que se combinam dentro do ambiente.
- **Delay** ou **Round Trip Time (RTT)** - É o tempo necessário para que um determinado sinal seja enviado por uma fonte, recebido pelo receptor e depois reenviado para a fonte. O RTT também pode ser chamado de *ping time*. É medido em segundos e não é preciso que haja sincronização dos relógios entre o transmissor e o receptor.
- **Jitter** - É o intervalo de tempo que se dá na recepção de um pacote para outro subsequente do mesmo transmissor.
- **Quantidade de pacotes perdidos** - É a quantidade de pacotes que foram perdidos ou tiveram algum erro e foram considerados perdidos pelo sistema.
- **Taxa de transmissão de dados por segundo** - É a quantidade de dados transmitidos via um enlace durante um determinado intervalo de tempo. Tem correspondência com o conceito de velocidade em física, apesar de indicar mais um fluxo ou vazão. A unidade é **bits por segundo (bps)**.

3.1.1 Hipóteses

Como visto anteriormente, precisamos identificar a importância das variáveis de entrada com a qualidade da rede, para que possamos responder ao questionamento principal deste trabalho: “**existe alguma diferença no desempenho de uma rede sem fio operando na faixa de frequência de 2,4 GHz comparativamente a uma rede operando na faixa de frequência de 900 MHz?**”. Para tanto, precisamos elaborar hipóteses que possam nos ajudar a elucidar esse questionamento.

Sendo assim, torna-se necessário definir qual a importância da potência de transmissão, **P_t**, na qualidade da rede *wireless*. Para isso, devemos verificar qual o grau de correlação entre a potência de transmissão com as variáveis dependentes; ou seja, verificar se existe alguma dependência dessas variáveis com a potência de transmissão. É possível verificar isso com o cálculo do coeficiente de correlação.

Porém, necessitamos antes definir o que seria qualidade da rede (Q). A qualidade de rede está relacionada com fatores como *delay* (d), *jitter* (j), quantidade de pacotes perdidos (P), e taxa de transmissão de dados (T_i). Por se tratar de rede sem fio, a potência de recepção (P_e) também é um fator que impacta na qualidade da rede. Nesse trabalho, a qualidade da rede será definida como sendo um conjunto de fatores.

$$Q = \{P_e, d, j, P, T_i\} \quad (3.1)$$

Logo, nossa primeira hipótese é saber se o coeficiente de correlação entre a potência de transmissão P_i e qualidade da rede Q é diferente de zero, como é possível observar na hipótese 3.2.

$$H_0 \rightarrow C(P_i, Q) \neq 0 \quad (3.2)$$

Para termos uma correlação entre dois fatores, só precisamos provar que o seu coeficiente de correlação (C) é diferente de zero. Existem pelo menos três coeficientes de correlação, sendo o mais famoso o coeficiente de correlação de *Pearson*, que verifica se existe uma correlação linear entre duas variáveis. Quanto mais próximo for o coeficiente de 1 ou -1 , mais forte é a relação linear entre as variáveis, sendo que um valor positivo é uma relação crescente e um valor negativo indica uma relação decrescente. Valor 0 para o coeficiente indica que não existe uma relação linear, mas isso não quer dizer que não exista outro tipo de correlação. Esse coeficiente apresenta ainda limitação quanto aos valores das variáveis, que devem ser paramétricas. Ademais, existe uma tabela (ver a tabela 3.1) de inferência que determina a força da relação.

Todavia, levando em consideração que a potência de transmissão não é um valor linear, é bem provável que o coeficiente de correlação de *Pearson* não seja capaz de determinar uma relação linear entre a potência de transmissão e a qualidade da rede. Para tanto, utilizaremos o coeficiente de correlação por *rank* de *Spearman* e o coeficiente de correlação *Kendall*. Ao contrário do coeficiente anterior, eles não indicam necessariamente uma correlação linear, mas sim uma correlação de qualquer natureza. Por isto, esses coeficientes são os mais adequados para as variáveis do nosso sistema.

Correlação	Negativa	Positiva
Nenhuma	-0,09 à 0,0	0,0 à 0,09
Pequena	-0,3 à -0,1	0,1 à 0,3
Média	-0,5 à -0,3	0,3 à 0,5
Forte	-1,0 à -0,5	0,5 à 1,0

Tabela 3.1: Tabela que demonstra a força de uma correlação de acordo com coeficientes de Pearson [4].

Precisamos lembrar que como a qualidade da rede é um conjunto de fatores, precisa-se fazer o teste de correlação para cada um deles. Juntando a tabela de inferência (ver a tabela 3.1) que também pode valer para os coeficientes Spearman e Kendall, podemos refazer a nossa primeira hipótese de maneira que não tenhamos uma correlação fraca. Lembrando de 3.1 e de 3.2, temos:

$$H_0 \rightarrow C(P_i, Q) \geq 0.3 \wedge C(P_i, Q) \leq -0.3 \quad (3.3)$$

$$H_0 \rightarrow |C(P_i, Q)| \geq 0.3 \quad (3.4)$$

Assim, temos nossa hipótese anterior reformulada para restringir nosso estudo para apenas as correlações que não são fracas. Segue então a adaptação que foi feita para cada um dos elementos do conjunto pela equação 3.5, para um nível de confiança de 0,95. Portanto, temos definida a nossa hipótese H_0 com a fórmula em 3.5.

$$H_0 \rightarrow |C(P_i, P_e)| \geq 0.3 \vee |C(P_i, j)| \geq 0.3 \vee |C(P_i, d)| \geq 0.3 \vee |C(P_i, P)| \geq 0.3 \vee |C(P_i, T_i)| \geq 0.3 \quad (3.5)$$

Uma vez verificada se existe correlação entre a variação de potência de transmissão com qualidade da rede, devemos verificar se existe alguma diferença na qualidade da rede com a alteração da faixa de frequência de operação da rede. Se não ocorre essa mudança, podemos demonstrar que o padrão IEEE 802.11 b ou g é adequado para operar na faixa de frequência

de 900 MHz. Resumindo a nossa hipótese H_1 como sendo: **“existe uma correlação não fraca entre faixa de frequência (F) com a qualidade da rede”**.

$$H_1 \rightarrow |C(F, Q)| \geq 0.3 \quad (3.6)$$

Seguindo, a equação 3.6 pode ter um desdobramento semelhante a H_0 , uma vez que a qualidade da rede é representada pela equação 3.4. Abaixo tem-se a resolução da equação 3.6.

$$\begin{aligned} H_1 \rightarrow |C(F, P_e)| \geq 0.3 \vee |C(F, j)| \geq 0.3 \vee |C(F, d)| \geq 0.3 \\ \vee |C(F, P)| \geq 0.3 \vee |C(F, T_i)| \geq 0.3 \\ \vee |C(F, T_p)| \geq 0.3 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Como visto na equação 3.5, temos uma relação semelhante para equação 3.7. A única diferença é que a faixa de frequência de operação da rede é um valor qualitativo; ou seja, representa uma qualidade do sistema e não uma quantidade. Dessa forma, podemos utilizar o método de correlação anterior, a correlação por rank de Spearman. Por último, é necessário saber qual o fator mais importante dentro do sistema, sendo este um questionamento a ser feito após a apuração da correlação desses fatores com a qualidade da rede.

3.2 Metodologia

3.2.1 Projeto de experimentos

O projeto de experimentos é uma técnica para se obter informações dentro de um sistema controlado com a variação de determinados valores. Em estatística, o experimento serve para observar os efeitos de um determinado processo ou intervenção dentro de um objeto de estudo que, no nosso caso, é uma rede sem fio utilizando o padrão IEEE 802.11 b ou g. A intervenção que se pretende fazer é a mudança da faixa de frequência de operação da rede wi-fi.

Como anteriormente comentado, os valores de entrada ou variáveis independentes, serão **a potência de transmissão, a faixa de frequência da rede e o canal de operação da rede.**

Canais 802.11 para faixa de frequência de 900 MHz.

Canais	Limite inferior	Limite Superior	Valor Central
3	902 MHz	912 MHz	907 MHz
4	907 MHz	917 MHz	912 MHz
5	912 MHz	922 MHz	917 MHz
6	917 MHz	927 MHz	922 MHz

Tabela 3.2: Distribuição dos canais para o padrão IEEE 802.11 na faixa de frequência de 900 MHz segundo o fabricante Ubiquiti™.

Os valores nos quais poderemos observar a reação do sistema que acreditamos ter algum grau de relação com o objeto estudado são as variáveis dependentes já descritas; quais sejam: **potência de recepção, jitter, delay, quantidade de pacotes perdidos, taxa de transmissão de dados e taxa de transmissão de pacotes**. Para tanto, as variáveis independentes tem valores limite a se atingir. Esses limites podem ser definidos pela limitação do equipamento, limitação legal ou simplesmente a intuição do cientista sobre o objeto a ser estudado. Observando os valores, variando dentro do limite, podemos ver a reação do sistema através das variáveis independentes.

Utilizaremos o projeto de experimentos chamado 2KR fatores, onde dado K fatores, de valor mínimo para o valor máximo, são repetidos R vezes. Os fatores são as variáveis independentes. O valor de R será comentado posteriormente. Com esse projeto podemos observar a correlação existente entre os fatores e as variáveis dependentes, ou até definir uma regressão linear para cada variável dependente. Para isso, devemos definir os valores mínimos e valores máximos de cada um dos fatores.

Na faixa de frequência, pode-se definir o menor valor, que é a rede operando na faixa de frequência de 900 MHz, e o maior valor, como sendo a faixa de frequência de 2,4 GHz. Já para o canal de operação da rede, temos que a faixa de frequência de 2,4 GHz tem os seus canais alocados conforme a especificação do padrão IEEE 802.11, conforme pode ser observado na figura 3.1.

Seguindo esse diagrama e, ainda a limitação imposta pela Anatel [1], temos o canal 1 como o de menor valor e o canal 11 sendo o de maior valor. Já para a rede operando na faixa de frequência de 900 MHz temos, segundo o fabricante Ubiquiti™, os valores de canais que

podem ser observados na tabela 3.2.

De acordo com a orientação da Anatel [1], só iremos trabalhar com os canais 3 e 4, sendo o 3 o de maior valor e 4 o de valor mínimo observado. Já a potência de transmissão terá como valor mínimo ideal a potência de 1 dBm (1 miliWatts) e, como potência máxima ideal, o valor de 28 dBm (630 miliWatts). A seguir temos a tabela 3.3 com o resumo dos valores ideais para os experimentos.

Para podermos ter valores aceitáveis, torna-se necessário realizar uma certa quantidade de replicações dos experimentos. Os valores exatos de replicações necessárias podem ser calculados estatisticamente, seguindo a equação 3.8¹. No entanto, para estimarmos quantos valores precisamos para realizar os experimentos, é preciso realizá-los uma certa quantidade de vezes. Dessa forma, foram realizados 60 vezes cada configuração, num total de 8 arranjos de fatores diferentes; ou seja, 480 experimentos realizados.

Com estes resultados, foi possível calcular a quantidade mínima de replicações para se obter o valor médio real de toda a população de experimentos. Alguns casos passavam de mais de 1 milhão de experimentos, como pode ser observado no apêndice A [4]. Considerando a inviabilidade em executar tal quantidade de experimentos, recorre-se ao teorema central do limite que estabelece que quando se tem mais de 30 médias amostrais é possível aproximar a distribuição de média amostral com a distribuição normal. Portanto, fazer 60 replicações é mais do que suficiente para podermos obter uma precisão adequada.

$$n = \left(\frac{100zs}{rx} \right)^2 \quad (3.8)$$

Numa segunda fase, realizamos experimentos variando a potência de transmissão de 4 dBm até atingir o limite de 28 dBm. Para isso, também temos a variação da faixa de frequência a observar quão próxima foi essa mudança, ao mudar de canal. Variando a potência, teremos 8 níveis para serem observados e, multiplicados pelos dois níveis de faixa de frequência, teríamos ao todo 16 arranjos de fatores diferentes. Ao contrário do experimento anterior, no

¹Esta equação serve para calcular a quantidade mínima de replicações de acordo com o nível de precisão que se deseja. Nela, n é a quantidade mínima de repetições, z é o valor na distribuição normal reduzida, o desvio padrão é s , r é a precisão que se deseja alcançar, e x é a média amostral inicial. Mais detalhes no apêndice A.

Fatores	Níveis de cada fatores	
	Nível Inferior	Nível Superior
Faixa de Frequência	900 MHz	2.4 GHz
Canal	3(900 MHz)/1(2.4GHz)	4(900 MHz)/11(2.4GHz)
Potência	1 dbm(1 mW)	28 dbm(630 mW)

Tabela 3.3: Tabela resumo do experimento ideal.

qual fizemos uma replicação de 60 vezes, neste, pela quantidade de fatores apresentados, foram feitas 10 replicações. Portanto, ao todo, foram produzidos 160 experimentos. Observe a Tabela 3.3 que apresenta de forma simplificada os valores realizados.

3.2.2 Descrição das ferramentas

Nesta seção iremos apresentar as ferramentas utilizadas na realização dos experimentos e na captura dos dados. Primeiramente, descreveremos a plataforma computacional adotada: uma *Single board computer*. Posteriormente, mostraremos a versão do sistema operacional Linux empregada nos experimentos, com requisitos específicos para os sistemas embarcados, e, por fim, a apresentação dos cartões mini-pci com as interfaces wireless. Uma vez apresentado o equipamento que realizará a transmissão, será feita a introdução do programa que gera os tráfegos de rede e que também é a ferramenta capaz de computar as métricas de desempenho da rede.

Plataforma *Single Board Computer*

Foi utilizado nos experimentos uma *single board computer* (SBC). Neste equipamento, todos os principais componentes de um computador estão presentes em uma única placa. É um equipamento com certa limitação quanto ao hardware, mas pode ser usado nas mais diversas situações e nos mais difíceis ambientes como, por exemplo, em desertos e regiões com neve. A SBC utilizada foi fabricada pela *SOEKRIS Engineering*TM[12].

O modelo utilizado é da série net5501 (ver as figuras 3.2 e 3.3) que, segundo o fabricante, utiliza um processador mais poderoso, mais memória, incorpora uma interface *Serial Advanced Technology Attachment*, mais energia para os *slots* PCI e o máximo de portas *Ethernet* já

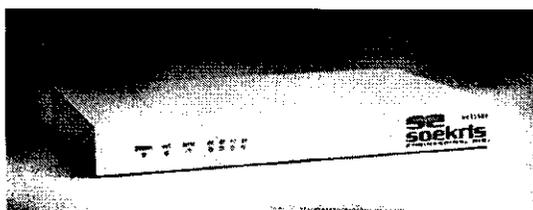


Figura 3.2: *Soekris net5501-70* fechada dentro do *case*.

disponibilizadas em uma versão padrão. A *Soekris* caracteriza este modelo como um computador de comunicação avançado, compacto, de baixo custo, baixo consumo e altíssima confiabilidade. Decidiu-se pela *Soekris net5501* devido aos seguintes fatores:

- Permite a instalação dos principais sistemas operacionais livres e de código aberto: Linux, FreeBSD, OpenBSD.
- Permite a instalação de interfaces sem fio *Wi-Fi* comumente utilizadas em *desktops* ou *notebooks*; portanto, suportadas pelos sistemas operacionais abertos e livres.
- É adotada em diversos sistemas em operação por todo o mundo.
- Familiaridade do autor em trabalhar com este equipamento.

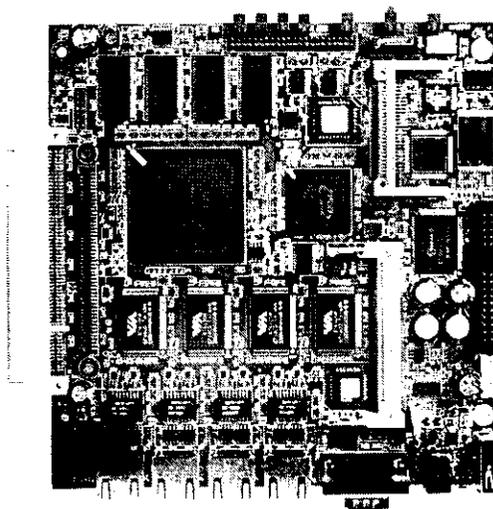


Figura 3.3: *Soekris net5501-70*: placa principal interna.

A seguir, as principais especificações:

- Processadores *AMD Geode* de 433 MHz até 500 MHz.
- 4 Mbit *BIOS/BOOT Flash*.
- *Socket* para *CompactFLASH*, com 1 *CompactFLASH* de 8 GByte.
- Interface Ultra DMA-100 de 44 pinos para discos rígidos de 2.5".
- Interface SATA 1.0 com +5 V e +12V.
- De 1 a 4 portas *Ethernet* VIA VT6105M 10/100 Mbit Auto MDIX, RJ-45.
- Duas portas seriais DB9 de 10 pinos.
- Duas interfaces USB 2-0: uma interna e uma externa.
- *Socket* miniPCI-III.
- 1 ou 2 slot PCI de 3.3V.
- Porta de I/O de propósito geral com 12 bits em 20 pinos.
- Temperatura de operação entre 0 $^{\circ}C$ e 60 $^{\circ}C$.

Sistema operacional

Adotou-se um sistema operacional de distribuição livre, sobretudo devido a facilidade de acesso a códigos fontes e uma grande comunidade mundial de usuários/adeptos. Após uma ampla pesquisa, optou-se pelo *Voyage Linux* por ser uma distribuição Linux derivada do *Debian* e por ter um ótimo desempenho em plataformas embarcadas baseados na arquitetura *x86*. A instalação básica requer 128 MBytes de espaço no disco, embora um maior espaço de armazenamento possibilite que mais pacotes sejam instalados. O *Voyage Linux* é tão pequeno que é o mais adequado para rodar firewall, dispositivo de armazenamento de rede, gateway, VoIP, e servir como *access point* para redes sem fio. As principais características do *Voyage Linux* são:

- Baseado no *Debian Sarge r3.1/Etch r4.0/Lenny r5.0*.
- Necessita de, no mínimo, 128 MB de espaço em disco.

- Fácil expansão através de sistema de gerenciamento de pacotes.
- Linux Kernel 2.6.
- Vem com *drivers madwifi(-ng)*, *hostap*, *prism54*, *optional ndiswrapper* e muitos outros *drivers* de dispositivos de rede sem fio.
- Suporte WPA através do *hostapd* e *wpa_supplicant*.
- Suporte WDS através do *hostap* e *madwifi drivers*.
- Entre outras características, muitas delas voltas a redes sem fio.

Interface Wi-FI em 2.4 GHz

Utilizamos a placa mini-PCI de interface *wireless* IEEE 802.11 XR2 fabricada pela *Ubiquiti*TM(ver a figura 3.4). Essa interface é voltada para o uso industrial, apresentando a seguinte configuração:

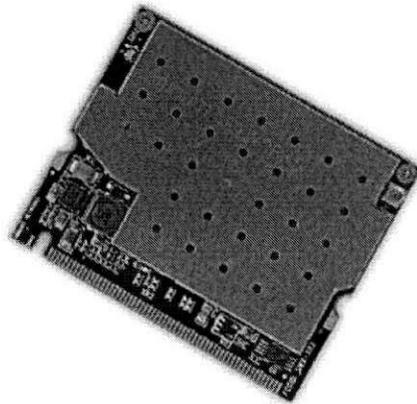


Figura 3.4: A interface *wireless* para faixa de 2.4 GHz XR2 da *Ubiquiti*.

- *Chipset Atheros* sexta geração AR5414 com suporte a SuperA/Turbo.
- Opera na faixa de frequência de 2,4 GHz.
- Trabalha com o padrão IEEE 802.11b e IEEE 802.11g.

- Segurança: WPA, WPA2, AES-CCM E TKIP *Encryption*, 802.1x, 64/128/152 bit WEP.
- Taxa de dados: 1 à 54 Mbps.
- Potência de saída: 24 - 28dBm (+- 1dB) 23 - 28dBm médias (+- 1,5dB).
- Alcance do sinal: 200 metros *indoor* (dependendo da antena) e 50 Km *outdoor* (dependendo da antena).

Interface Wi-Fi em 900 MHz

Para a realização dos experimentos na faixa de frequência de 900 MHz foi escolhida a interface SR9, fabricada também pela *Ubiquiti*TM. Como a XR2, ela é voltada para uso industrial mas apresenta a vantagem de operar segundo o padrão IEEE 802.11b e IEEE 802.11g. Abaixo seguem as especificações técnicas segundo o fabricante:

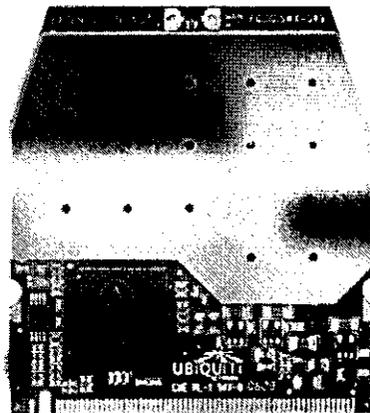


Figura 3.5: Interface SR9 da *Ubiquiti*TM para faixa de frequência de 900 MHz.

- Opera na faixa de frequência de 900 MHz baseado no IEEE 802.11b e 802.11g CCK/OFDM (*Complementary Code Keying/Orthogonal Frequency Division Multiplex*).
- Suporta até duas antenas.

- Opera na faixa de temperatura de -20 C até 70 C.
- Taxa de dados: 1 à 54 Mbps.
- Segurança: WPA, WPA2, AES-CCM E TKIP *Encryption*, 802.1x, 64/128/152 bit WEP.
- Potência média de transmissão: 28 dBm, +-1,5dB.
- Alcance do sinal: 100 metros *indoor* (dependendo da antena), e 1 Km *outdoor* (dependendo da antena).

Analizador de Espectro

Como ferramenta para analisar o espectro eletromagnético foi utilizado o kit de ferramentas *Airview*. Esse equipamento projetado para realizar a observação e a análise espectral para implementação de infra-estrutura de redes *wireless* é desenvolvido também pela UbiquitiTM. É um equipamento de fácil uso, que pode ser acoplado a qualquer computador ou *laptop* (ver a figura 3.6 e 3.7), apresentando versões para 2,4 GHz e 900 MHz. Para a realização da análise de espectro durante o experimento foi utilizado o *Airview2* e *Airview9*, que corresponde ao de 2.4 GHz e 900 MHz, respectivamente, para uso em ambiente interno.

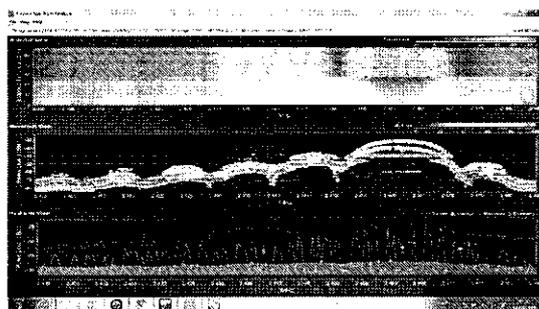


Figura 3.6: Interface do Airview2 no computador.

Porém, observar graficamente a evolução da ocupação espectral não permite realizar uma análise mais apurada dos dados captados pelas antenas *Airview2* e *Airview9*. No entanto, graças a uma ferramenta é possível ter acesso aos dados (valores quantitativos) coletados pela *Airview2* e *Airview9*. Assim, pode-se obter dados para um estudo mais detalhado quanto à potência captada no ambiente.



Figura 3.7: Interface do Airview9 no computador.

Gerador de tráfego

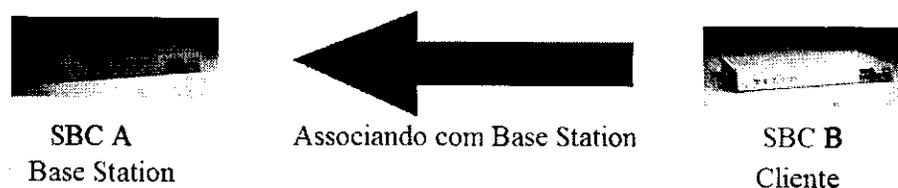
É preciso uma ferramenta que possa gerar tráfego de rede e que, idealmente, seja capaz também de realizar medições quanto ao delay e outras métricas de desempenho. Conseguimos encontrar uma ferramenta que satisfizesse às necessidades dessa pesquisa: o utilitário D-ITG. Este utilitário é capaz de realizar a geração de pacotes através do uso de processos estocásticos. A D-ITG é uma ferramenta *open source* que também realiza a medição ativa do delay, jitter, taxa de perda de pacotes, taxa de transmissão de dados e pacotes. Essa ferramenta pode ser utilizada tanto em máquinas com sistema operacional WindowsTM como em máquinas com Linux.

3.3 Experimento

O experimento (ver na figura 3.8) que foi realizado é a transmissão de fluxo constante de pacotes UDP entre duas SBC(*Single Board Computer*): placa A e placa B. A placa A fica estabelecida como ponto de acesso (*Base Station*). A placa B se associa com a placa A. Uma vez feita a associação entre as placas, a placa A inicia a transmissão do fluxo de pacotes UDP por um intervalo de tempo.

A escolha de um fluxo de pacotes UDP foi baseado no fato deste protocolo da camada de transporte não apresentar um mecanismo que faça com que a entrega de pacotes seja confiável, bem como não há controle de congestionamento. Dessa forma, fica mais fácil saber qual é taxa real de perda de pacotes, uma vez que é fixa a quantidade de pacotes que são gerados por segundo. Foi escolhido, com intuito de tentar saturar a interface de comunicação, o valor de 200 pacotes por segundos. Cada pacote tem o tamanho constante

Primeiramente: SBC B se associa com SBC A



Depois: Transmissão do fluxo de pacotes da SBC A para SBC B

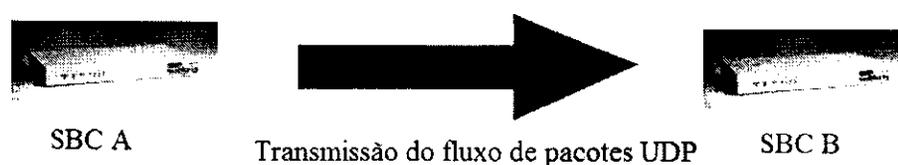


Figura 3.8: Ilustração do experimento.

de 1024 Bytes. Esse fluxo tem a duração de 10 minutos, sendo o padrão de tráfego constante em todos os experimentos.

Quanto a configuração da interface wireless. Ambas utilizaram o padrão IEEE 802.11 g para execução dos experimentos. Todos os valores que não seja o canal de operação da rede, e a faixa de frequência da rede, estavam no padrão. Como por exemplo a taxa de transferência de dados que estava no automático.

3.4 Restrições dos experimentos

Nesta seção, iremos apresentar alguns dos problemas que existiram durante a execução dos experimentos planejados de acordo com o projeto de experimento. Essas restrições vem de limitações de *hardware* ou *software*, como também limitações financeiras, físicas ou de logísticas.

A primeira restrição se dá pelo motivo de que os experimentos foram executados num ambiente não isolado eletromagneticamente. Apesar de executar os experimentos num ambiente real, que dá validade aos nossos resultados, não sabemos como seriam os desempenhos das redes sem fio num ambiente sem nenhuma interferência externa. Este seria o caso ideal, onde poderíamos fazer a comparação mais justa possível.

Seguindo a linha da restrição anterior, por questão de logística, faltou executar os experimentos em outros lugares, com o espectro eletromagnético ocupado de maneiras diversas. Os experimentos foram executados no mesmo laboratório dentro da UFCG. É preciso ver como se comportaria em ambientes como fábricas, campos abertos, escritórios, ambiente domiciliar, entre outros.

Os experimentos para os rádios de 900 Mhz não puderam ter potências de transmissão maiores que 16 dBm (aproximadamente 40 mW). Isso porque o *driver* para este *hardware* existente para o Linux limita a potência de transmissão dentro desses limites. Todavia, essa limitação é contornável por termos um leque maior de potência de transmissão para os rádios de 2,4 GHz. Portanto, para realizar a comparação entre as duas faixas, a potência de transmissão utilizada para comparação foi de 16 dBm para ambas as frequências.

3.5 Resultados

Inicialmente, mostraremos os resultados dos experimentos mudando a potência de transmissão de forma brusca no canal da faixa de frequência de 2,4 GHz. É preciso primeiro observar o comportamento do espectro magnético na faixa observada. Para isto obtivemos dados do analisador de espectro *AirView2* durante a execução dos testes. Esses valores podem ser observado nas figuras 3.9 e 3.10.

Observando as figuras 3.9 e 3.10, a potência captada no ambiente não passa da faixa de potência de -40 dBm. No momento que aumentamos a potência de transmissão para 18 dBm, não captamos nenhuma mudança na ocupação espectral. Nessas figuras não percebemos nenhuma mudança quanto ao valor da ocupação espectral. Portanto, é visível que o aumento da potência não influencia o sinal dentro do espectro eletromagnético, e que ela estaria concorrendo no acesso ao meio com as redes vizinhas. Porém, se aumentarmos a potência de transmissão da rede para 28 dBm observaremos que ocorre uma mudança na faixa de potência no espectro eletromagnético para -30 dBm. Isto significa que o sinal da rede de teste se sobressai aos dos demais sinais de transmissão de outras redes do ambiente.

Para podermos observar o efeito da mudança da potência e do canal de forma gradual no desempenho da rede, foi preciso realizarmos experimentos em que variamos a potência de transmissão em 4 dBm. Assim, podemos ver resultados para as métricas de desempenho

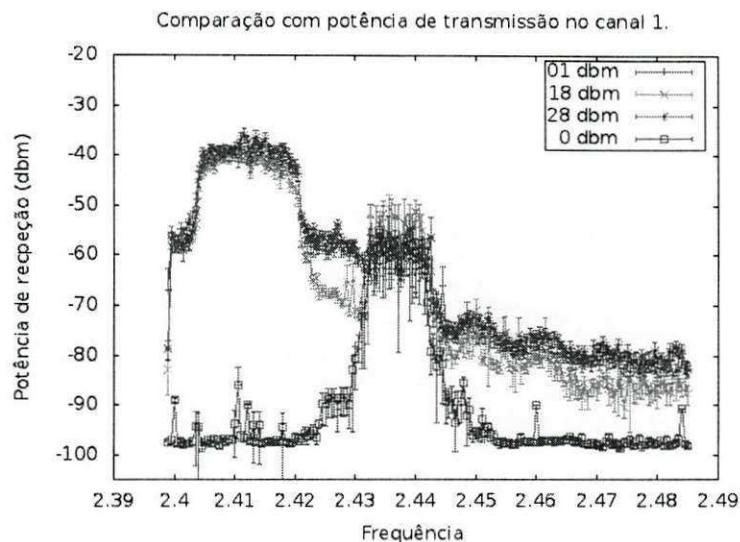


Figura 3.9: Ocupação espectral da faixa de frequência de 2,4 GHz para o canal 1.

da rede como jitter, delay, quantidade de pacotes perdidos (**resumido em perda**) e taxa de transferência de dados (**resumido em bitrate**). Esses valores são observados na figura 3.11.

Após observar os resultados para a faixa de frequência de 2,4 GHz, iremos ver os resultados dos mesmos experimentos agora executados nas faixa de frequência do espectro eletromagnético de 900 MHz, seguindo a linha apresentada anteriormente. De forma similar, podemos ver a ocupação espectral na faixa de frequência de 900 Mhz nas figuras 3.12 e 3.13. Vendo estas figuras, podemos notar que praticamente não existe nenhuma fonte alternativa de sinal que esteja operando dentro desta faixa, tanto que os sinais se sobrepõem. Não foi possível observar um aumento considerável, uma vez que estamos mudando de 9 dBm para 16 dBm. Por sua vez, ao variar progressivamente (figura 3.14), verifica-se que não existe nenhuma diferença em se mudar de canal ou aumentar a potência (seus intervalos de confiança se sobrepõem).

Após realizar os experimentos para as duas faixas de frequência, foram feitos experimentos na faixa de 900 Mhz, mas, desta vez, não utilizando o modo infra-estrutura, mas sim o modo *ad hoc* para efeito de comparação. Seguindo a literatura, onde a maioria dos experimentos em 900 Mhz é para *redes mesh*, pensamos na possibilidade de que no modo *ad hoc* possa haver alguma melhoria sobre o modo infra-estruturado nesta faixa de frequência específica. Os protocolos utilizados para redes ad-hoc foram o *Optimized Link State Routing*

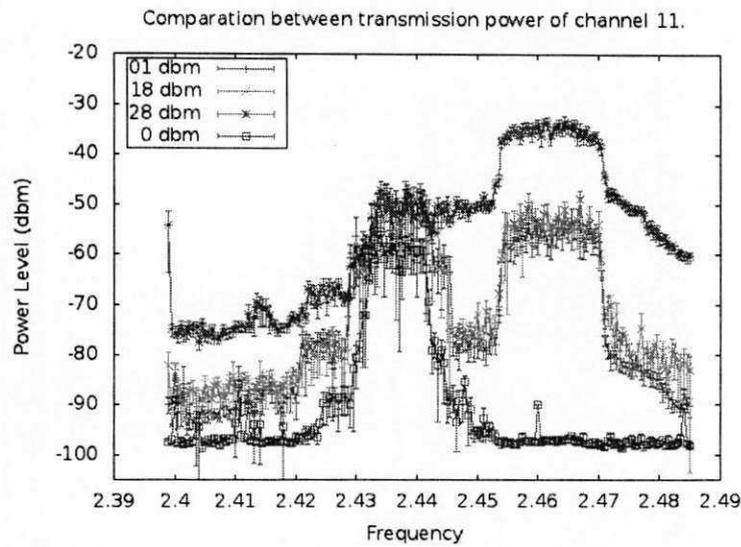


Figura 3.10: Ocupação espectral da faixa de frequência de 2,4 GHz para o canal 11.

(OLSR) e o *Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking* (BATMAN). Para este caso, não iremos observar a ocupação espectral para estes experimentos, uma vez que apresenta comportamento idêntico com o do modo estruturado. Para tanto, vamos observar na Figura 3.15 que não existe diferença acima de 10 dBm. Abaixo deste valor, existe uma piora considerável do modo infra-estrutura em relação aos dois protocolos de redes ad-hoc. Se separarmos os valores por canais, como mostra na figura 3.16, é visível que a tal queda de desempenho da rede no modo infra-estrutura ocorre drasticamente no canal 4. No entanto, no canal 3, nota-se um comportamento próximo e similar com os protocolos do modo ad-hoc.

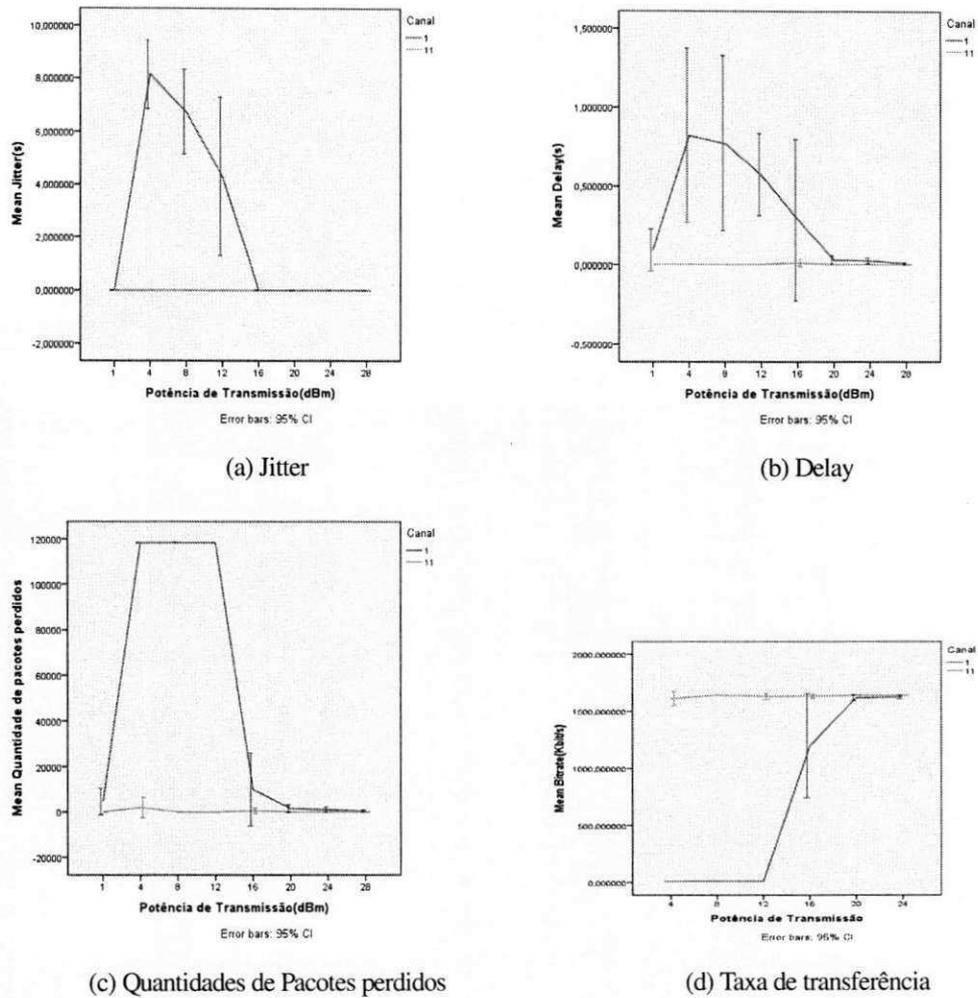


Figura 3.11: O desempenho da rede em 2,4 GHz.

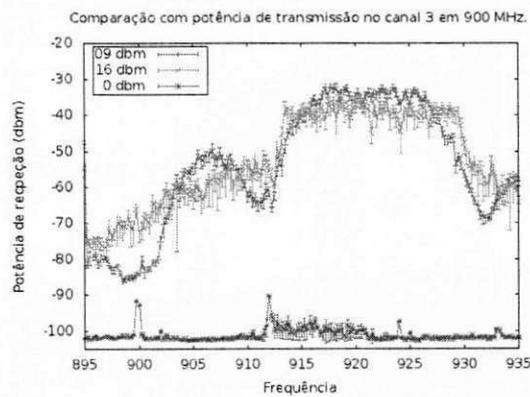


Figura 3.12: Comparação de potência na frequência de 900 MHz no canal 3.

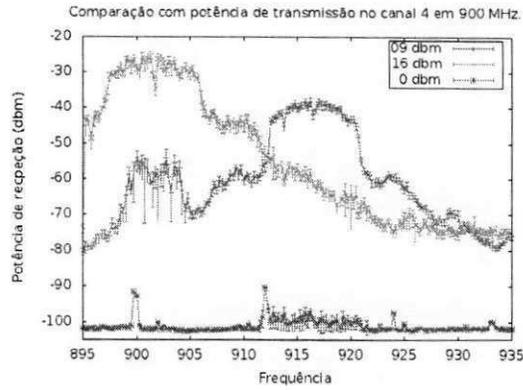


Figura 3.13: Comparação de potência na frequência de 900 MHz no canal 4.

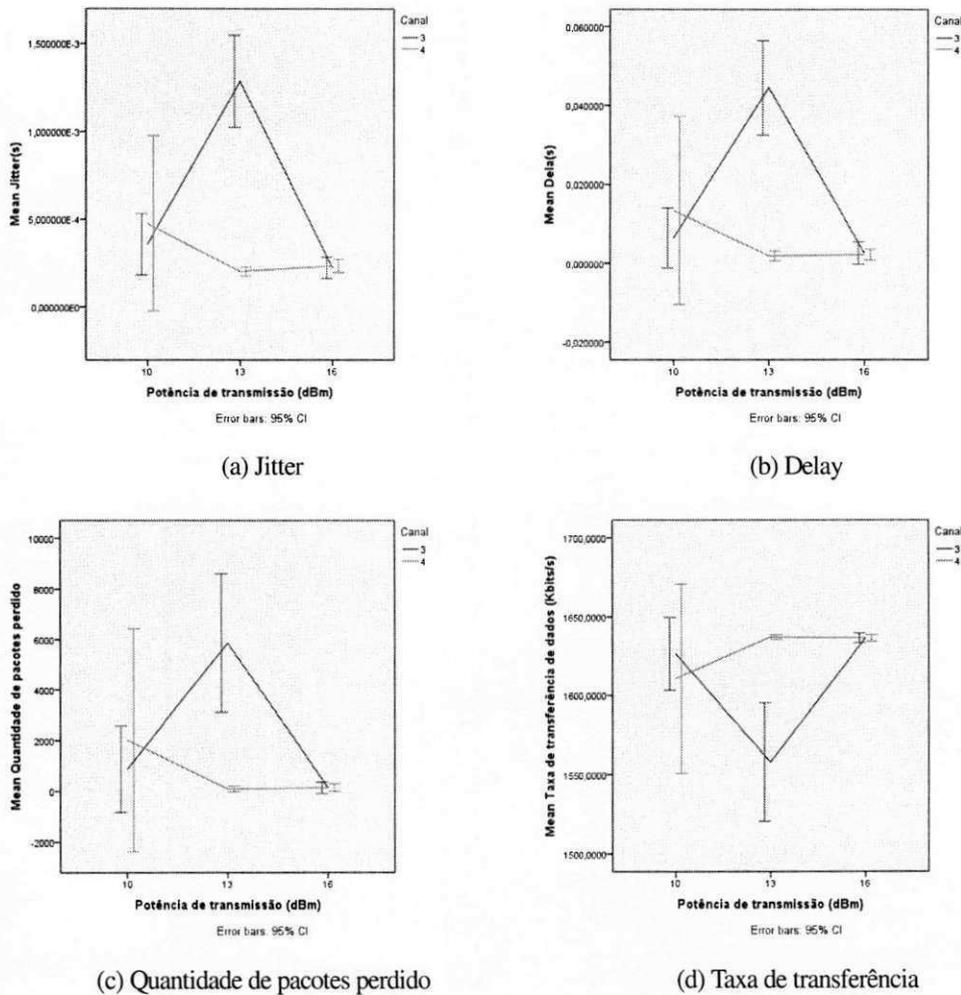
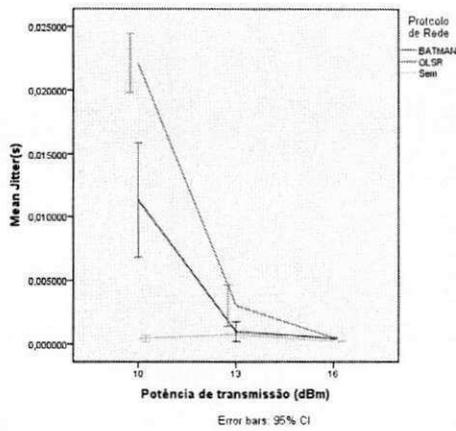
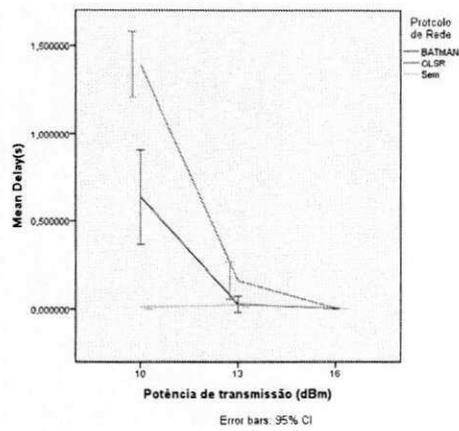


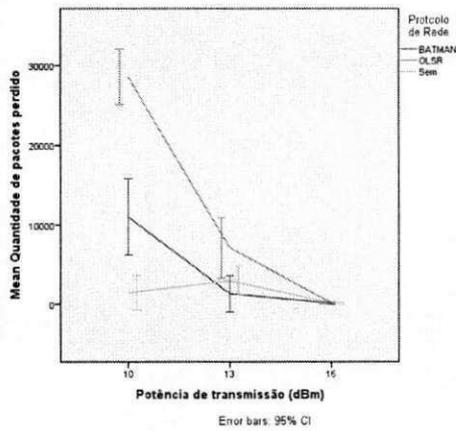
Figura 3.14: O desempenho da rede em 900 MHz.



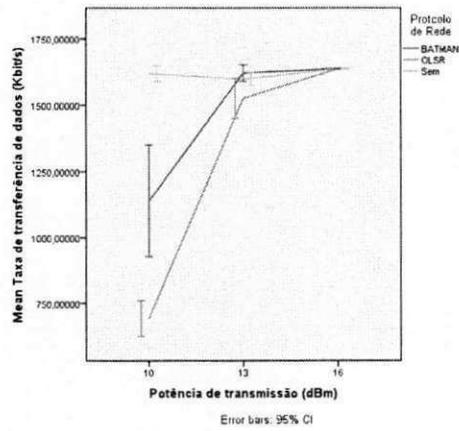
(a) Jitter



(b) Delay



(c) Quantidade de pacotes perdidos



(d) Taxa de transferência

Figura 3.15: O desempenho da rede em 900 MHz, comparando entre modo infra-estruturado e o modo ad-hoc.

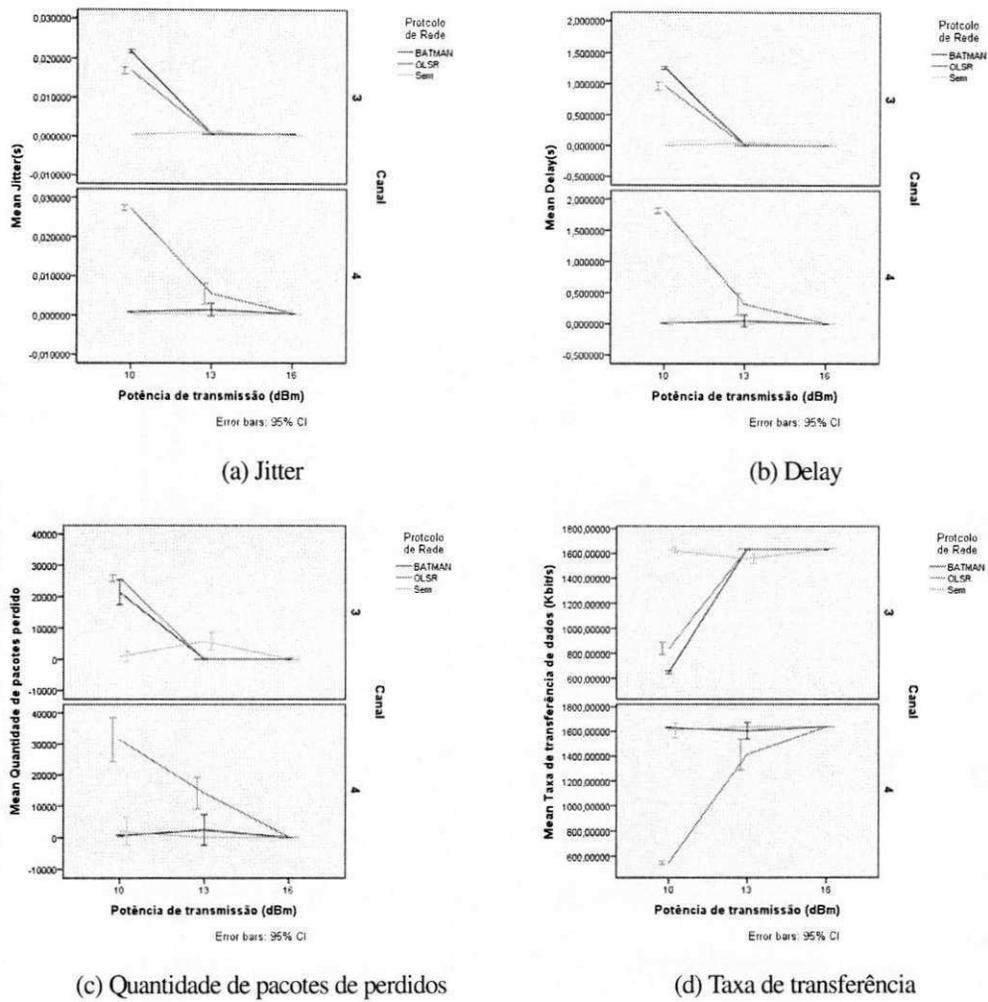


Figura 3.16: O desempenho da rede em 900 MHz, comparando entre modo infra-estruturado e o modo ad-hoc, mas separados por canais.

3.6 Análise dos Resultados

Com os resultados obtidos nos experimentos descritos anteriormente, pode-se fazer algumas observações pertinentes ao nosso objeto de estudo. Ao observar a figura 3.11, percebe-se que há uma diferença na qualidade do sinal. Esta diferença é notável quando temos redes operando na faixa inferior de 18 dBm. Porém, observando o espectro eletromagnético da faixa de frequência de 2,4 GHz quando não temos a nossa rede teste executando, tem-se o comportamento esperado.

Ao confrontar com as figuras 3.9 e 3.10, torna-se possível observar que o canal 6 apresenta atividade mais intensa na faixa de frequência de 2,4 GHz, seguido pelo canal 1. Quando mudamos o canal de operação da rede, é possível observar uma melhora na sua qualidade, explicável pelo fato de mudar a rede para um ambiente com menos ruídos representa uma mudança mais significativa do que alterar a potência de transmissão. Isto é confirmado com o cálculo do coeficiente de correlação (ver na tabela 3.4).

Pela tabela 3.4, observa-se que existe uma correlação muito forte entre o canal de comunicação e as métricas de desempenho da rede. Tanto para o coeficiente de correlação de Spearman, quanto para o coeficiente Kendall. Isto confirma que podemos observar que existe uma correlação entre o canal de transmissão e a qualidade da rede. Com isto, pode-se afirmar que se mudarmos para uma faixa de frequência com menos ruído que a faixa de frequência de 2,4 GHz, pode-se ter uma rede com uma boa qualidade do sinal. Entretanto, “o que aconteceria com uma rede operando na faixa de frequência de 900 MHz?”.

Pelos resultados obtidos nos experimentos, pode-se ver na figura 3.14 que os valores relativos a 10 dBm e 16 dBm são equivalentes. No entanto, para uma potência de transmissão de 13 dBm, existe uma grande divergência entre os valores. Esta diferença pode ser devido a alguma variação no ambiente, como temperatura ou umidade. Os valores dos coeficientes de correlação (veja tabela 3.5) indicam que não há coeficiente de correlação absoluto (que não leva em conta se é positivo ou negativo) acima de 0,3. Por isso, pode-se dizer que nesta faixa de frequência não temos nenhuma diferença, tanto para o canal quanto para a potência de transmissão, com a exceção para o coeficiente de correlação de Spearman para Potência de transmissão. No entanto, levando em conta o coeficiente de correlação de Kendall, o valor é abaixo de 0,3. Conforme ilustrado nas figuras 3.12 e 3.13, pode-se observar que não existe

Coeficiente de Correlações				
Spearman	Jitter	Delay	Pacotes Perdido	Taxa de Transmissão
Canal	-0,816	-0,824	-0,76	0,739
Potência	0,143	0,272	0,339	-0,318
Kendall	Jitter	Delay	Pacotes Perdido	Taxa de Transmissão
Canal	-0,667	-0,674	-0,662	0,605
Potência	0,106	0,199	0,287	-0,251

Tabela 3.4: Resultados do coeficiente de correlação entre o canal e a potência para faixa de frequência de 2, 4 GHz

Coeficiente de Correlação				
Kendall	Jitter	Delay	Pacotes Perdidos	Taxa de Transmissão
Potência	0,267	0,190	0,165	-0,156
Canal	-0,241	-0,192	-0,210	0,197
Spearman	Jitter	Delay	Pacotes Perdidos	Taxa de Transmissão
Potência	0,326	0,232	0,201	-0,191
Canal	-0,295	-0,235	-0,257	0,241

Tabela 3.5: Resultados do coeficiente de correlação entre o canal e a potência para faixa de frequência de 900 GHz.

praticamente nenhuma outra fonte de sinal; desta forma, podemos concluir que não existe correlação.

Com isso, pode-se fazer a análise entre as duas faixas de frequências analisadas. Ao fazer o cálculo (veja tabela 3.6), obtem-se uma correlação de Pearson abaixo de 0,3, com exceção para a taxa de transmissão de dados. No entanto, como estamos utilizando para tomada de decisão os coeficiente de correlação de Kendall e Spearman, observa-se coeficientes quase nulos para a Taxa de Transmissão de dados, mas, para o Delay e a Quantidade de pacotes perdidos, pode-se concluir que podem haver diferenças. É preciso, contudo, realizar mais experimentos para confirmar esses resultados.

Pensando na possibilidade de melhorar a faixa de 900 MHz, realizamos experimentos com o modo ad hoc e comparamos com o modo infra-estrutura. Podemos ver que existe

Faixa de Frequência	Coeficiente de Correlação			
	Jitter	Delay	Pacotes Perdido	Taxa de Transmissão
Kendall	-0,079	-0,514	-0,529	-0,003
Spearman	-0,097	-0,629	-0,624	-0,004

Tabela 3.6: Coeficiente de correlação entre as faixas de frequência de 900 Mhz e 2.4 GHz.

Ad-Hoc	Coeficiente de Correlação			
	Jitter	Delay	Pacotes Perdido	Taxa de Transmissão
Kendall	0,429	0,329	0,379	-0,339
Spearman	0,542	0,423	0,465	-0,436

Tabela 3.7: Coeficiente de Correlação entre o modo Ad-Hoc com o modo infra-estruturado na faixa de frequência de 900 MHz.

diferença entre os protocolos e o modo infra-estrutura. Na tabela 3.7 observa-se que, para todas as métricas avaliadas, tem-se uma correlação extremamente forte. Com isso, é possível encontrar meios de otimizar o protocolo IEEE 802.11 na faixa alternativa de 900 MHz.

Capítulo 4

Conclusão

4.1 Resumo

Na atualidade, as redes sem fio são bastante difundidas, estando, geralmente, conectadas a outras redes (cabeadas ou não, como podemos observar na figura 1.1). O padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi), homologado em 1999, certamente é o mais adotado (disponível na maioria dos computadores portáteis e *smartphones*).

Com a crescente saturação (poluição) nessa faixa do espectro, observa-se uma degradação crescente na qualidade de comunicação, causando transtornos aos usuários e serviços que dependem dessa tecnologia. Para mitigar o problema observado, alguns administradores/usuários apelam para potências exorbitantes ou a mudança para canais menos saturados.

Porém, existe a possibilidade de continuar utilizando o protocolo 802.11 em frequências alternativas ou então proprietárias. Uma possível solução seria utilizar a faixa de frequência de 5,8 GHz, para a qual temos o padrão IEEE 802.11a. No entanto, devido à grande ineficiência em ambientes fechados, essa faixa de frequência é pouco utilizada. Outra solução seria migrar para uma faixa de frequência inferior como, por exemplo, a faixa de 900 MHz, a qual também é uma faixa da ISM (vide figura 2.1).

Nessa linha, há fabricantes que oferecem interfaces em 900 MHz que utilizam a implementação dos padrões IEEE 802.11 b ou g. Porém, torna-se necessário investigar se tais padrões são adequados para operar na faixa de frequência de 900 MHz, a fim de se descobrir as suas limitações e vantagens.

O padrão IEEE 802.11b foi homologado em 1999, como um adendo ao padrão IEEE

802.11, com uma taxa nominal de transferência de dados de 11 Mbit/s. Já o padrão IEEE 802.11g foi homologado em 2003, também como um adendo. Esse padrão permitia a retro-compatibilidade com equipamentos que só operassem com o IEEE 802.11b. Como ele utiliza uma combinação do CCK com OFDM, permite taxas de transferência de até 54 Mbit/s.

Após toda a revisão dos problemas existentes, partimos para o planejamento dos experimentos. Foi necessário identificar as variáveis independentes e as dependentes. Em seguida, formalizou-se o problema principal a ser resolvido. Para tanto, elaborou-se hipóteses que serviram de guia.

Lista de variáveis independentes:

- Potência de transmissão.
- Faixa de Frequência.
- Canal de operação da rede.

Lista de variáveis dependentes:

- Jitter.
- Delay.
- Quantidade de pacotes perdido.
- Taxa de transferência de dados.
- Potência de recepção.

Hipóteses levantadas neste trabalho:

- A hipótese H0 (fórmula 3.5) diz que o coeficiente de correlação entre a potência de transmissão e a qualidade da rede sem fio é maior que 0,3 ou menor que -0,3.
- A hipótese H1 (fórmula 3.7) diz que o coeficiente de correlação entre a faixa de frequência e a qualidade da rede sem fio é maior que 0,3 ou menor que -0,3.

Destacamos também o projeto de experimentos elaborados para verificar as hipóteses levantadas, elaborada utilizando o projeto de 2KR fatores, no qual vamos escolhendo dois valores extremos dentro do ambiente, observando os K fatores e repetindo-os R vezes. Depois, apresentamos as ferramentas que foram utilizadas na execução do experimento. Desta forma, descrevemos o experimento utilizado, como pode ser observado na figura 3.8.

No final, apresentamos os resultados obtidos pelos experimentos. Nos resultados destacamos que não existe diferenciação na potência de transmissão para os canais da faixa de frequência de 2,4 GHz. No entanto, para a faixa de frequência de 900 MHz, observa-se uma variação da mudança de potência.

Destacamos que existe diferença na qualidade da rede na mudança de canal para a faixa de frequência de 2,4 GHz. Contudo, não existe mudança na faixa de frequência de 900 MHz, pelo fato de não haver interferência por outras fontes. Porém, mudando de faixa de frequência, podemos destacar que existe uma mudança de qualidade para a faixa de frequência de 900 MHz em relação a faixa de frequência de 2,4 GHz.

4.2 As principais Conclusões

Estas conclusões são baseadas nos experimentos realizados. Dentro deste universo de resultados, iremos confirmar nossas hipóteses definidas na Seção 3.1.1. Nossas hipóteses estão sumarizadas nas equações 3.5 e 3.7, dentro de um nível de confiança de 0,95.

Considerando que a qualidade da rede sem fio é definido pela Equação 3.1, tem-se que a qualidade da rede é determinada pelas métricas jitter, delay, quantidade de pacotes perdidos e potência de recepção. Relembrando isso, verificaremos se a hipótese é H_0 (equação 3.5) é verdadeira ou falsa.

De acordo com a seção 3.6 (vide tabelas 3.4 e 3.5), vimos que o coeficiente de correlação para jitter, delay e quantidade de pacotes perdidos é menor que 0,3 e maior que $-0,3$ para potência de transmissão. Quando observamos as figuras 3.9, 3.10, 3.12 e 3.13, percebemos que quase não existe nenhuma diferença na potência de recepção captada. Com isso, podemos dizer que é falso. Portanto, **não existe correlação entre a potência de transmissão e qualidade da rede sem fio.**

Falta verificar se a hipótese H_1 (Equação 3.7) é verdadeira ou falsa. Se ela for verdadeira,

devemos descobrir qual a faixa de frequência que apresenta o desempenho melhor. Sendo falsa, podemos interpretar que o padrão IEEE 802.11 b e g é adequado, mas apenas no ambiente observado.

Como foi observado na seção 3.6, podemos destacar na tabela 3.6 que o coeficiente de correlação Kendall e Spearman para delay e quantidade de pacotes perdidos são menores que $-0,3$. No entanto, para os outros três valores não existe diferença. Logo, podemos dizer que esta hipótese é **verdadeira**. Portanto, existe algum ganho mudando para a faixa de 900 Mhz, principalmente pelo fato da faixa de frequência não ser povoada como a faixa de frequência em 2,4 Ghz.

Pensando na possibilidade de otimizar o protocolo, realizamos experimentos para comparar o modo de infraestrutura com o modo ad hoc, principalmente para protocolos de **redes mesh**. Com resultados obtidos conseguimos observar, de acordo com a tabela 3.7, que existe uma correlação entre os protocolos para rede mesh e a qualidade da rede. No entanto, como foi explicado nas seções 3.6 e 3.5, essa mudança precisa ser melhor investigada com mais experimentos para ter uma conclusão mais decisiva. Portanto deve haver fatores nos protocolos de **rede mesh** que fazem com que esta apresente um melhor desempenho. Obviamente, isto precisa ser testado mais vezes para ser confirmado.

Resumindo, temos as seguintes conclusões:

1. A potência de transmissão, dentro do escopo observado, não interfere na qualidade da rede sem fio.
2. Dependendo da ocupação espectral no ambiente da rede, mudar de canal de operação da rede melhora a qualidade da mesma.
3. Uma rede sem fio operando na faixa de frequência de 900 Mhz apresenta um desempenho melhor do que uma rede sem fio operando na faixa de 2,4 Ghz, dentro do escopo observado.
4. Na faixa de frequência de 900 Mhz, uma rede sem fio operando com protocolo de redes mesh (i.e., modo ad hoc) apresenta um desempenho pouco melhor que uma rede sem fio em modo infra-estrutura.

4.3 Limitações

Apesar do trabalho ter executado experimentos planejados dentro de todo um arcabouço baseado em projetos experimentais, existem limitações em todo o trabalho. Nesta seção serão apresentadas as principais limitações existentes. Estas limitações restringem o universo de aplicações das descobertas obtidas.

A nossa primeira restrição se dá pelo fato das interfaces sem fio, tanto para a faixa de frequência de 900 MHz como para a faixa de frequência em 2,4 GHz, pertencer ao mesmo fabricante e apresentar o mesmo *chipset*. Não sabemos se o que encontramos são fatores que só ocorre para estas placas, ou se os mesmos resultados ocorrem em outras placas de outros fabricantes, pois depende da implementação dos fabricantes.

Uma limitação é o fato de que não se variou a distância entre o rádio transmissor com o rádio receptor. A distância entre as antenas dos rádios era sempre fixa, mantendo-se uma distância média de 4,5 m. Isto é relativamente próximo, de acordo com os limites de alcance prometido pelo fabricante das interfaces sem fio. No entanto, por fatores de segurança do equipamento, não foi possível realizar experimentos em que pudéssemos mudar significativamente a distância entre os dispositivos.

Resumindo, as nossas limitações foram:

1. Os cartões mini-pci wifi para ambas as faixas são do mesmo fabricante.
2. Não foram realizados experimentos em que se mudasse a distância entre os rádios.

4.4 Trabalhos Futuros

Apesar de tudo, ainda existem meios de ampliar a abrangência dos resultados descobertos neste trabalho. Algumas limitações podem servir de base para uma possível lista de meios de melhorar o trabalho. Outras são ideias iniciais que não foram possíveis de serem executadas por falta de recursos ou por que não teríamos tempo.

A primeira ideia se baseia numa proposta inicial que não foi executada por falta de recursos e tempo. A proposta é observar o impacto dos diversos tipos de materiais, principalmente de construções, no desempenho da rede, comparando as duas faixas de frequência. A ideia seria uma ampliação do que foi feito neste trabalho: observar qual das faixas que sofreriam

menos na atenuação e na reflexão, visando conhecer melhor os efeitos destes materiais no desempenho da rede, uma vez que estão na constituição dos mais diversos ambientes que os seres humanos construíram.

A próxima proposta de trabalho futuro se baseia na primeira limitação apresentada na seção 4.3: reproduzir os experimentos utilizando interfaces de outros fabricantes. Operando na faixa dos 900 MHz, tem-se também as interfaces GZ-901 da Z-COMAX [17]. No entanto, mesmo operando na mesma faixa de frequência da interface SR9, os cartões de fabricantes diferentes não se comunicam entre si, por não existir um padrão IEEE 802.11 para essa faixa de frequência.

Continuando com as possibilidades de ampliar esta pesquisa, precisa-se procurar um ambiente que esteja livre de fontes externas em ambas as faixas de frequência do espectro eletromagnético. Nesse ambiente ideal, onde não encontraríamos ruídos externos, poderíamos ter resultados mais realistas e justos.

Dando prosseguimento à primeira ideia de trabalhos futuros, poderíamos realizar experimentos em outros tipos de ambientes, como o chão de fábrica, o qual pode apresentar diversas organizações para a distribuição das máquinas. Ou realizar experimentos em escritórios ou em uma residência comum. Esses ambientes podem apresentar diversas distribuições na ocupação do espectro eletromagnético, sem falar nos efeitos como atenuação e reflexão da onda nos ambientes.

Outra forma de ampliar os resultados descobertos aqui é mudar a distância entre as placas. Ao mudar a distância poderíamos testar da melhor maneira o efeito da potência de transmissão à qualidade da rede. No entanto, para isso, torna-se necessário observar tanto a segurança dos equipamentos bem como a ocupação espectral nas localidades de instalação dos rádios.

Bibliografia

- [1] Anexo à Resolução numero 365 Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita., 2004.
- [2] R Bultitude. Measurement, characterization and modeling of indoor 800/900 MHz radio channels for digital communications. *Communications Magazine, IEEE*, 25(6):5–12, 1987.
- [3] Weibing Fan, Mark Panitz, Steve Greedy, Xavier Ngu, and C. Christopoulos. On the shielding effectiveness measurements of building materials at radio communication frequencies in reverberation chambers. In *Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2010 Asia-Pacific Symposium on*, pages 1622–1625. IEEE, 2010.
- [4] R. Jain. *The Art Of Computer Systems Performance Analysis*:. Wiley India Pvt. Ltd., 2008.
- [5] Junseok Kim and Younggoo Kwon. Interference-aware geographical routing for sensor-nets in indoor environments. In *Information Networking, 2009. ICOIN 2009. International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2009.
- [6] Kun-chan Lan, Zhe Wang, Rodney Berriman, and T Moors. Implementation of a wireless mesh network testbed for traffic control. In *Internacional Conference of Computer Communications and Networks*, 2007.
- [7] Kun-chan Lan, Zhe Wang, Rodney Berriman, Tim Moors, Mahbub Hassan, Lavy Libman, Maximilian Ott, Bjorn Landfeldt, Zainab Zaidi, and Aruna Seneviratne. Implementation of a Wireless Mesh Network Testbed for Traffic Control. *2007 16th International Conference on Computer Communications and Networks*, pages 1022–1027, August 2007.

-
- [8] A Miaoudakis, A Lekkas, and G Kalivas. Radio channel characterization in industrial environments and spread spectrum modem performance. In *Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005. 10th IEEE Conference on*, volume 1, pages 87–93, 2005.
- [9] Miquel Oliver and Ana Escudero. Study of different CSMA / CA IEEE 802 . 11-based implementations. *EUNICE*, pages 1–3, 1999.
- [10] T.S. Rappaport and C.D. McGillem. UHF fading in factories. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 7(1):40–48, 1989.
- [11] Majdi Salem and Mahamod Ismail. An Investigation on the Effects of Wall Parameters on the Indoor Wireless Propagations. In *The 5 Student Conference on Research and Development*, number 12, pages 1–5. IEEE, 2007.
- [12] Soekris Engineering, 2012.
- [13] Emmeric Tanghe, Wout Joseph, Leen Verloock, Luc Martens, Henk Capoen, Kobe Herwegen, and Wim Vantomme. The industrial indoor channel: large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 MHz. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(7):2740–2751, 2008.
- [14] ANSI/IEEE Information Technology. IEEE Std 802.11., 2007.
- [15] ANSI/IEEE Information Technology. IEEE Std 802.11 Part 11 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications., 2007.
- [16] Wi-fi Alliance, 2012.
- [17] Z-COMAX Technologies., 2012.

Apêndice A

Tamanho da amostra para determinar a média

Para o cálculo dos valores da média amostral de um experimento é necessário realizar um cálculo inicial para determinar o valor médio dentro de uma precisão desejada [4]. Esta equação (Eq. A.1) é derivada da fórmula para o cálculo do intervalo de confiança.

$$n = \left(\frac{100zs}{rx} \right)^2 \quad (\text{A.1})$$

Na equação A.1 podemos destacar **n** como o número mínimo de repetições, **z** como o valor da distribuição normal reduzida, **s** o desvio padrão e **r** a precisão que se deseja, sendo **r** em porcentagem e **x** a média amostral mínima.

A seguir, temos os valores mínimos para as variáveis dependentes, variando a precisão necessária.

Váriavel Independente		Váriavel Depedente					Precisão de 1%			
Frequência	Canal	Potência	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	Nível de Confiança de 0,90			
							Jitter	Delay	Perda	Bitrate
2.400	11	1	0,0004	0,001	0	1.638,41	144	260	111.712	0
2.400	11	18	0,0005	0,0018	1	1.638,41	474	173	22.597	0
2.400	11	28	0,0004	0,0017	1	1.638,41	290	56	21.006	0
2.400	1	1	0,0409	0,0439	128	3.164,60	982.525	851.512	195.532	587
2.400	1	18	0,0254	0,0794	3.401	1.563,55	908.138	123.287	117.043	395
2.400	1	28	0,003	0,128	8.206	1.519,37	21.496	53.237	75.826	452
900	3	9	0,0018	0,0531	9.120	3.018,28	19.720	23.662	33.004	245
900	3	16	0,0005	0,0053	243	3.270,19	84	538	19.593	0
900	4	9	0,0243	0,0172	544	1.603,87	988.096	510.298	913.772	307
900	4	16	0,0275	0,0816	11.166	2.908,95	846.786	35.181	24.452	598

Tabela A.1: Quantidade mínima de experimentos com precisão de 1% (nível de confiança de 0,90).

Váriavel Independente		Váriavel Depedente					Precisão de 1%				
		Valores Médio					Nível de Confiança de 0,95				
Frequência	Canal	Potência	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	
2.400	11	1	0,0004	0,001	0	1.638,41	232	419	179.962	0	
2.400	11	18	0,0005	0,0018	1	1.638,41	763	279	36.403	0	
2.400	11	28	0,0004	0,0017	1	1.638,41	467	91	33.839	0	
2.400	1	1	0,0409	0,0439	128	3.164,60	1.582.795	1.371.740	314.991	946	
2.400	1	18	0,0254	0,0794	3.401	1.563,55	1.462.962	198.609	188.550	636	
2.400	1	28	0,003	0,128	8.206	1.519,37	34.629	85.762	122.152	728	
900	3	9	0,0018	0,0531	9.120	3.018,28	31.768	38.118	53.167	394	
900	3	16	0,0005	0,0053	243	3.270,19	135	867	31.564	0	
900	4	9	0,0243	0,0172	544	1.603,87	1.591.771	822.062	1.472.038	494	
900	4	16	0,0275	0,0816	11.166	2.908,95	1.364.128	56.674	39.390	963	

Tabela A.2: Quantidade mínima de experimentos com precisão de 1% (nível de confiança de 0,95).

Váriavel Independente		Váriavel Depedente					Precisão de 1%			
		Valores Médio					Nível de Confiança de 0,99			
Frequência	Canal	Potência	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	Jitter	Delay	Perda	Bitrate
2.400	11	1	0,0004	0,001	0	1.638,41	463	835	358.859	0
2.400	11	18	0,0005	0,0018	1	1.638,41	1.521	557	72.590	0
2.400	11	28	0,0004	0,0017	1	1.638,41	931	181	67.478	0
2.400	1	1	0,0409	0,0439	128	3.164,60	3.156.231	2.735.368	628.120	1.887
2.400	1	18	0,0254	0,0794	3.401	1.563,55	2.917.273	396.044	375.985	1.268
2.400	1	28	0,003	0,128	8.206	1.519,37	69.054	171.017	243.581	1.451
900	3	9	0,0018	0,0531	9.120	3.018,28	63.349	76.010	106.020	786
900	3	16	0,0005	0,0053	243	3.270,19	270	1.729	62.941	0
900	4	9	0,0243	0,0172	544	1.603,87	3.174.128	1.639.263	2.935.370	985
900	4	16	0,0275	0,0816	11.166	2.908,95	2.720.189	113.013	78.548	1.921

Tabela A.3: Quantidade mínima de experimentos com precisão de 1% (nível de confiança de 0,99).

Váriavel Independente		Váriavel Depedente					Precisão de 3%			
		Valores Médio					Nível de Confiança de 0,90			
Frequência	Canal	Potência	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	Jitter	Delay	Perda	Bitrate
2.400	11	1	0,0004	0,001	0	1.638,41	16	29	12.412	0
2.400	11	18	0,0005	0,0018	1	1.638,41	53	19	2.511	0
2.400	11	28	0,0004	0,0017	1	1.638,41	32	6	2.334	0
2.400	1	1	0,0409	0,0439	128	3.164,60	109.169	94.612	21.726	65
2.400	1	18	0,0254	0,0794	3.401	1.563,55	100.904	13.699	13.005	44
2.400	1	28	0,003	0,128	8.206	1.519,37	2.388	5.915	8.425	50
900	3	9	0,0018	0,0531	9.120	3.018,28	2.191	2.629	3.667	27
900	3	16	0,0005	0,0053	243	3.270,19	9	60	2.177	0
900	4	9	0,0243	0,0172	544	1.603,87	109.788	56.700	101.530	34
900	4	16	0,0275	0,0816	11.166	2.908,95	94.087	3.909	2.717	66

Tabela A.4: Quantidade mínima de experimentos com precisão de 3% (nível de confiança de 0,90).

Váriavel Independente		Váriavel Depedente					Precisão de 3%				
		Valores Médio					Nível de Confiança de 0,99				
Frequência	Canal	Potência	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	
2.400	11	1	0,0004	0,001	0	1.638,41	51	93	39.873	0	
2.400	11	18	0,0005	0,0018	1	1.638,41	169	62	8.066	0	
2.400	11	28	0,0004	0,0017	1	1.638,41	103	20	7.498	0	
2.400	1	1	0,0409	0,0439	128	3.164,60	350.692	303.930	69.791	210	
2.400	1	18	0,0254	0,0794	3.401	1.563,55	324.141	44.005	41.776	141	
2.400	1	28	0,003	0,128	8.206	1.519,37	7.673	19.002	27.065	161	
900	3	9	0,0018	0,0531	9.120	3.018,28	7.039	8.446	11.780	87	
900	3	16	0,0005	0,0053	243	3.270,19	30	192	6.993	0	
900	4	9	0,0243	0,0172	544	1.603,87	352.681	182.140	326.152	109	
900	4	16	0,0275	0,0816	11.166	2.908,95	302.243	12.557	8.728	213	

Tabela A.5: Quantidade mínima de experimentos com precisão de 3% (nível de confiança de 0,95).

Váriavel Independente		Váriavel Depedente					Precisão de 3%				
		Valores Médio					Nível de Confiança de 0,99				
Frequência	Canal	Potência	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	
2.400	11	1	0,0004	0,001	0	1.638,41	51	93	39.873	0	
2.400	11	18	0,0005	0,0018	1	1.638,41	169	62	8.066	0	
2.400	11	28	0,0004	0,0017	1	1.638,41	103	20	7.498	0	
2.400	1	1	0,0409	0,0439	128	3.164,60	350.692	303.930	69.791	210	
2.400	1	18	0,0254	0,0794	3.401	1.563,55	324.141	44.005	41.776	141	
2.400	1	28	0,003	0,128	8.206	1.519,37	7.673	19.002	27.065	161	
900	3	9	0,0018	0,0531	9.120	3.018,28	7.039	8.446	11.780	87	
900	3	16	0,0005	0,0053	243	3.270,19	30	192	6.993	0	
900	4	9	0,0243	0,0172	544	1.603,87	352.681	182.140	326.152	109	
900	4	16	0,0275	0,0816	11.166	2.908,95	302.243	12.557	8.728	213	

Tabela A.6: Quantidade mínima de experimentos com precisão de 3% (nível de confiança de 0,99).

Váriavel Independente		Váriavel Depedente					Precisão de 5%				
Frequência	Canal	Potência	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	Nível de Confiança de 0,90				
							Jitter	Delay	Perda	Bitrate	
2.400	11	1	0,0004	0,001	0	1.638,41	6	10	4.468	0	
2.400	11	18	0,0005	0,0018	1	1.638,41	19	7	904	0	
2.400	11	28	0,0004	0,0017	1	1.638,41	12	2	840	0	
2.400	1	1	0,0409	0,0439	128	3.164,60	39.301	34.060	7.821	23	
2.400	1	18	0,0254	0,0794	3.401	1.563,55	36.326	4.931	4.682	16	
2.400	1	28	0,003	0,128	8.206	1.519,37	860	2.129	3.033	18	
900	3	9	0,0018	0,0531	9.120	3.018,28	789	946	1.320	10	
900	3	16	0,0005	0,0053	243	3.270,19	3	22	784	0	
900	4	9	0,0243	0,0172	544	1.603,87	39.524	20.412	36.551	12	
900	4	16	0,0275	0,0816	11.166	2.908,95	33.871	1.407	978	24	

Tabela A.7: Quantidade mínima de experimentos com precisão de 5% (nível de confiança de 0,90).

Frequência	Canal	Váriavel Depedente					Precisão de 5%				
		Potência	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	Nível de Confiança de 0,95				
							Jitter	Delay	Perda	Bitrate	
2.400	11	1	0,0004	0,001	0	1.638,41	9	17	7.198	0	
2.400	11	18	0,0005	0,0018	1	1.638,41	31	11	1.456	0	
2.400	11	28	0,0004	0,0017	1	1.638,41	19	4	1.354	0	
2.400	1	1	0,0409	0,0439	128	3.164,60	63.312	54.870	12.600	38	
2.400	1	18	0,0254	0,0794	3.401	1.563,55	58.518	7.944	7.542	25	
2.400	1	28	0,003	0,128	8.206	1.519,37	1.385	3.430	4.886	29	
900	3	9	0,0018	0,0531	9.120	3.018,28	1.271	1.525	2.127	16	
900	3	16	0,0005	0,0053	243	3.270,19	5	35	1.263	0	
900	4	9	0,0243	0,0172	544	1.603,87	63.671	32.882	58.882	20	
900	4	16	0,0275	0,0816	11.166	2.908,95	54.565	2.267	1.576	39	

Tabela A.8: Quantidade mínima de experimentos com precisão de 5% (nível de confiança de 0,95).

Váriavel Independente		Váriavel Depedente					Precisão de 5%				
		Valores Médio					Nível de Confiança de 0,99				
Frequência	Canal	Potência	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	Jitter	Delay	Perda	Bitrate	
2.400	11	1	0,0004	0,001	0	1.638,41	19	33	14.354	0	
2.400	11	18	0,0005	0,0018	1	1.638,41	61	22	2.904	0	
2.400	11	28	0,0004	0,0017	1	1.638,41	37	7	2.699	0	
2.400	1	1	0,0409	0,0439	128	3.164,60	126.249	109.415	25.125	75	
2.400	1	18	0,0254	0,0794	3.401	1.563,55	116.691	15.842	15.039	51	
2.400	1	28	0,003	0,128	8.206	1.519,37	2.762	6.841	9.743	58	
900	3	9	0,0018	0,0531	9.120	3.018,28	2.534	3.040	4.241	31	
900	3	16	0,0005	0,0053	243	3.270,19	11	69	2.518	0	
900	4	9	0,0243	0,0172	544	1.603,87	126.965	65.571	117.415	39	
900	4	16	0,0275	0,0816	11.166	2.908,95	108.808	4.521	3.142	77	

Tabela A.9: Quantidade mínima de experimentos com precisão de 5% (nível de confiança de 0,99).