

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Victor de Andrade Machado

***UM MODELO CROSS LAYER PARA PREDIÇÃO DE  
PARÂMETROS DE DESEMPENHO EM REDES SEM FIO  
BASEADAS EM OFDM***

**DM-34/2011**

**Belém – Pará  
Novembro – 2011**

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Victor de Andrade Machado

***UM MODELO CROSS LAYER PARA PREDIÇÃO DE  
PARÂMETROS DE DESEMPENHO EM REDES SEM FIO  
BASEADAS EM OFDM***

Dissertação de mestrado apresentada  
como exigência parcial para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia  
Elétrica, elaborada sob orientação do  
Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês

**DM-34/2011**

**Belém – Pará  
Novembro – 2011**

---

M149m Machado, Victor de Andrade

Modelo cross layer para predição de parâmetros de desempenho em redes sem fio baseados em OFDM / Victor de Andrade Machado; orientador, Carlos Renato Lisboa Francês.-2011.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2011.

1. Sistemas de comunicação sem fio – modelos matemáticos. 2. Redes locais sem fio. I. orientador. II. título.

CDD 22. ed. 621.38456

---

**UM MODELO CROSS LAYER PARA PREDIÇÃO DE PARÂMETROS DE  
DESEMPENHO EM REDES SEM FIO BASEADAS EM OFDM**

VICTOR DE ANDRADE MACHADO

Este trabalho foi julgado adequado para a **Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica**, na área de Computação Aplicada, e aprovado na sua forma final pela banca examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará em 28 de novembro de 2011.

**BANCA EXAMINADORA:**



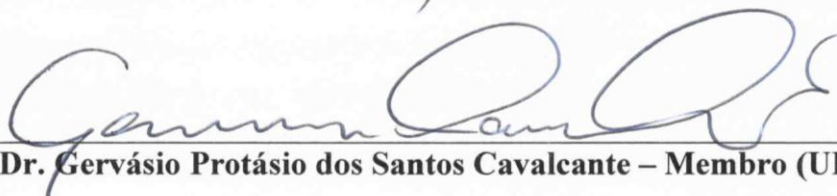
---

**Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês – Orientador (UFPA)**



---

**Prof. Dr. Celso Massaki Hirata – Membro Externo (ITA)**



---

**Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante – Membro (UFPA)**

**VISTO:**

---

**Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes - Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA**

Belém – Pará  
Novembro – 2011

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, principalmente aos meus pais, Regina e Samuel, que em todos os momentos estiveram me apoiando e ensinando os verdadeiros valores da vida.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado forças e estar sempre me acompanhando em todos os momentos de minha vida.

A meus pais, Regina e Samuel, por em todos os momentos estarem me apoiando, me incentivando, opinando e fazendo o possível para o sucesso nos meus estudos, além de minha irmã, Milla, que sempre me deu seu apoio.

A toda minha família, que sempre me dá força e incentivo em todos os momentos de minha vida, me ajudando e me acolhendo, sendo pessoas muito importantes em minha vida em toda minha jornada.

A todos os amigos de mestrado, por também me ajudarem e me aguentarem durante dois anos de curso, como o Bruno, que me ajudou bastante na execução do trabalho.

Às pessoas queridas, como Cibelli, Gerson e outros que, perto ou longe, estiveram me apoiando, torcendo “e pegando no pé” quando necessário.

Ao pessoal do LPRAD, onde faço trabalho, que sempre ajudaram no trabalho, proporcionando bons entendimentos, boas festas e risadas.

Aos professores da UFPA, que durante esses cinco anos passaram um pouco dos seus conhecimentos para mim, ajudando em minha formação, mesmo que às vezes de forma um tanto forçada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato Francês, que possibilitou a participação de muitos estudos no meio do grupo do LPRAD, pesquisas, descobertas e oportunidades de ensino, além do meu próprio crescimento profissional.

À UFPA, que me acolheu durante o período de cinco anos de graduação mais dois anos no mestrado.

Ao CNPq, financiadora da minha bolsa de Mestrado, a qual me ajudou muito em minha evolução dentro do programa e na execução de meus trabalhos.

A CAPES, financiadora de muitos dos projetos os quais possibilitam viagens para apresentação de trabalho, incentivos de pesquisa.

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	v
AGRADECIMENTOS .....	vi
SUMÁRIO .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE SIGLAS .....	xi
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	6
2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE PROPAGAÇÃO .....	6
2.2.1 Propagação Em Espaço Livre .....	7
2.3 WiMAX .....	7
2.3.1 Características Gerais .....	7
2.3.2 Camada Física .....	10
2.3.2.1 Subcanalização .....	10
2.3.2.2 Camada MAC .....	12
2.3.2.3 Mecanismos de Acesso ao Canal .....	13
2.3.2.4 Qualidade de Serviço .....	14
2.3.3 Padrões IEEE 802.16 .....	15
2.3.4 Considerações Finais .....	18
2.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO .....	18
2.4.1 Considerações Iniciais .....	18
2.4.2 Técnicas de Aferição .....	19
2.4.2.1 Coleta de Dados .....	20
2.4.2.2 Benchmarking .....	20
2.4.2.3 Prototipação .....	21
2.4.3 Técnicas De Modelagem .....	21
2.4.4 Considerações Finais .....	22
3. TRABALHOS CORRELATOS .....	23
4. PROPOSTA DO MODELO <i>CROSS LAYER</i> .....	26
4.1 MEDIÇÕES E COLETA DE DADOS .....	26
4.1.1 Estudo de Caso .....	27
4.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS .....	29
4.3 MODELO EMPÍRICO PROPOSTO .....	29

4.4	MÉTODO DE AJUSTE POR MÍNIMOS QUADRADOS LINEARES .....	32
4.5	AJUSTE DO MODELO PROPOSTO .....	34
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	35
5.	ESTUDO DE CASO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS .....	36
5.1	ESTUDO DE CASO .....	36
5.1.1	Filtragem Dos Dados .....	36
5.1.2	Ajustes Dos Parâmetros Utilizados .....	38
5.1.2.1	Ajuste Do Parâmetro $K_0$ .....	38
5.1.2.2	Ajuste Dos Parâmetros $K_1$ , $K_2$ E $K_3$ .....	39
5.1.3	Modelo Proposto Ajustado .....	40
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	45
6.	CONCLUSÕES .....	46
	REFERÊNCIAS .....	48



**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 2.1</b> - Esquema básico do funcionamento do WiMAX .....	9
<b>Figura 2.2</b> - Segmentação e Concatenação em MAC PDUS.....	13
<b>Figura 4.1</b> - Pontos de Medição na UFPA.....	28
<b>Figura 4.2</b> - Setup de recepção da transmissão no cenário de testes .....	28
<b>Figura 4.3</b> - Metodologia utilizada durante o trabalho de dissertação .....	35
<b>Figura 5.1</b> - Dados coletados para perda de propagação (potência).....	37
<b>Figura 5.2</b> - Dados coletados para perda de quadros.....	37
<b>Figura 5.3</b> - Dados coletados para vazão.....	38
<b>Figura 5.4</b> - Curva otimizada e desvio padrão dos dados para perda de potência em relação à distância .....	40
<b>Figura 5.5</b> - Curva otimizada e desvio padrão dos dados para perda de quadros versus SNR .....	41
<b>Figura 5.6</b> - Curva otimizada e desvio padrão dos dados para vazão versus SNR .....	41
<b>Figura 5.7</b> - Predição de cobertura para altura de transmissão a 10 m.....	42
<b>Figura 5.8</b> - Predição de cobertura para altura de transmissão a 30 m.....	43
<b>Figura 5.9</b> - Predição de vazão para altura de transmissão a 30 m.....	43
<b>Figura 5.10</b> - Predição de perda de quadros para altura de transmissão a 30 m.....	44
<b>Figura 5.11</b> - Comparação entre o modelo proposto e os de MSUI e COST-231 Hata .....	45

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Parâmetros do OFDMA escalável .....	12
<b>Tabela 2.2</b> - Comparação entre os padrões básicos 802.16 .....	17
<b>Tabela 5.1</b> - Parâmetros para cada intervalo de distância.....	38
<b>Tabela 5.2</b> - Valores obtidos para os parâmetros restantes de perda de potência.....	39
<b>Tabela 5.3</b> - Valores obtidos para os parâmetros de vazão e perda de quadros .....	39
<b>Tabela 5.4</b> - Comparação estatística do modelo proposto com os citados no trabalho .....	44

## LISTA DE SIGLAS

<b>ARQ</b>	<i>Automatic Repeat Request</i>
<b>BS</b>	<i>Base Station</i>
<b>CPE</b>	<i>Customer Premises Equipment</i>
<b>EAP</b>	<i>Extensible Authentication Protocol</i>
<b>FEC</b>	<i>Forward Error Correction</i>
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<b>FWA</b>	<i>Fixed Wireless Access</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>ISM</b>	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
<b>ISP</b>	<i>Internet Service Provider</i>
<b>ITU-R</b>	<i>International Telecommunications Union –Radiocommunications Sector</i>
<b>LMS</b>	<i>Least Mean Square</i>
<b>LoS</b>	<i>Line of Sight</i>
<b>LPRAD</b>	<i>Laboratório de Planejamento de redes de Alto Desempenho</i>
<b>MPDU</b>	<i>MAC Protocol Data Units</i>
<b>MPLS</b>	<i>Multiprotocol Label Switching</i>
<b>MLQ</b>	<i>Mínimos Quadrados Lineares</i>
<b>MSDU</b>	<i>MAC Service Data Unit</i>
<b>NLoS</b>	<i>Non Line of Sight</i>
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
<b>PDU</b>	<i>Protocol Data Units</i>
<b>PUSC</b>	<i>Partial Usage of Subcarriers</i>
<b>QAM</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<b>QoE</b>	<i>Quality of Experience</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i>
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square</i>
<b>SDU</b>	<i>Service Data Unit</i>
<b>SFID</b>	<i>Service Flow Identifier</i>
<b>SLA</b>	<i>Service Level Agreement</i>

<b>SNMP</b>	<i>Simple Network Management Protocol</i>
<b>SNR</b>	<i>Signal-Noise Rate</i>
<b>S-OFDMA</b>	<i>Scalable OFDMA</i>
<b>SS</b>	<i>Subscriber Station</i>
<b>TCP</b>	<i>Transmission Control Protocol</i>
<b>UDP</b>	<i>User Datagram Protocol</i>
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
<b>WiFi</b>	<i>Wireless Fidelity</i>
<b>WiMAX</b>	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
<b>WLAN</b>	<i>Wireless Local Area Network</i>
<b>WMAN</b>	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>

## RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático capaz de ajustar dados obtidos através de campanhas de medição por meio de um protótipo de um cenário da tecnologia WiMAX. As campanhas de medição foram feitas na Universidade Federal do Pará. Foram utilizadas antenas WiMAX, sendo uma como servidor, localizada em cima do prédio do Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho (LPRAD), e a outra, receptora, que ficou em cima de um móvel para que os pontos fossem coletados. O método de ajuste utilizado foi o dos Mínimos Quadrados Lineares. Por meio dos dados coletados, aplica-se o método e estuda seu comportamento, verificando o quanto a otimização foi eficiente nos casos apresentados. A utilização da tecnologia em questão como acesso à Internet em alguns programas como o NAVEGAPARÁ, a busca de melhoramentos ou criação de modelos de propagação e a análise *cross-layer* das métricas utilizadas no trabalho, como a influência da relação sinal-ruído na perda de quadros, são fatores motivadores para a pesquisa desta dissertação.

*Palavras-chave:* **Otimização, WiMAX, OFDM, cross-layer.**

### ***ABSTRACT***

This dissertation work aims to create a mathematical model that performs the adjustment of data obtained from measurement campaigns using a prototype of a WiMAX scenario. The measurement campaigns were made at the Federal University of Para, using equipment which would enable such work. WiMAX antennas were used, one as a server, located in the building up of High Performance Network Planning Laboratory (LPRAD), and the other receiver, who was on top of a vehicle so that the points were collected. The adjustment method used was the Linear Least Squares. Through the collected data, the method is applied and their behavior is studied, checking how the optimization was effective in the cases presented. The use of relevant technology such as Internet access in some programs like NAVEGAPARÁ, the search for improvements or creation of propagation models and cross-layer analysis of the metrics used in the work, as the influence of signal to noise ratio in the loss frame, are motivating factors for this dissertation research.

***Keywords: Optimization, WiMAX, OFDM, cross-layer.***

## 1. INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias de banda larga sem fio é claramente perceptível nos últimos anos. As empresas e instituições de pesquisa vêm se aperfeiçoando nessa área a fim de acompanhar este crescimento e suas demandas. Não se pode esquecer ainda que cada vez mais usuários domésticos também se utilizam da rede sem fio como acesso à Internet, focando-se no padrão IEEE 802.11 (WiFi) [IEEE Standard 802.11v, 2011]. Paralelamente, cresce também a demanda de aplicações multimídia (áudio e vídeo). Muitos dados são necessários para que essas aplicações possam trafegar na rede e, além disso, a entrega do serviço ao usuário deve ser feita com qualidade e rapidez.

Dado este cenário, novas alternativas de rede sem fio vêm sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas. Um exemplo é o WiMAX [ANDREWS, J. et al, 2007], pertencente ao padrão IEEE 802.16 [IEEE Standard 802.16h, 2010], que possui uma área de cobertura - cerca de 20 a 50 quilômetros; muito maior que a da WiFi, que abrange cerca de 100 metros. Contudo, a necessidade de uma antena receptora no lado cliente torna inviável o uso da tecnologia pura como acesso à Internet, já que o custo ainda é relativamente alto.

Um dos grandes alvos desse avanço é a inclusão digital/social. Um exemplo de projeto visando à inclusão digital na região Amazônica é o projeto NAVEGAPARÁ [NAVEGAPARÁ, 2009] que, dentre outras formas, procura proporcionar a inclusão digital através da interconexão entre os principais órgãos e instituições do Estado do Pará por meio de Internet de alta velocidade, viabilizando ações como tele-educação, telenegócios, telemedicina, entre outros.

Avanços recentes na tecnologia digital fizeram com que aumentasse a prática de compressão de sinais de vídeo digital. A padronização tem sido muito importante no desenvolvimento de métodos de compressão comuns para serem utilizados em novos serviços e produtos que são agora possíveis. Isso permite que os novos serviços possam se comunicar uns com os outros e incentiva o investimento necessário em circuitos integrados para tornar a tecnologia barata.

É importante notar que, com a atual configuração tecnológica, focando a inclusão digital, a viabilização de serviços como telessaúde, Internet, entre outros, a locais desprivilegiados – difícil acesso, distantes e com população de baixa renda – é um grande passo para que a referida inclusão seja efetivamente levada a toda população quanto

possível. Não basta, no entanto, apenas oferecer os serviços. A qualidade desses serviços atualmente não é algo opcional, mas uma necessidade.

Portanto, as pesquisas para aperfeiçoamento de tecnologias de acesso visam principalmente melhorar a qualidade das transmissões e buscar uma solução adequada em relação ao acesso do usuário final.

Quando se trata de aplicações multimídia, é preciso um atendimento eficiente, com rapidez e qualidade, para uma melhor satisfação do usuário. Desse modo, parâmetros de QoS (*Quality of Service* ou Qualidade de Serviço), tais como atraso, *jitter*, perda de pacotes e vazão de dados são utilizados para verificar se a rede atende ou não um certo tráfego de dados [ANDREWS, J. et al, 2007]. As métricas de QoS influenciam diretamente no planejamento de uma topologia de uma rede, podendo indicar a necessidade de algumas adequações. Um dos principais tipos de tráfego multimídia que demanda qualidade de serviço, e que é objeto de estudo deste trabalho, é o vídeo. Desse modo, a codificação utilizada na compressão é de grande importância no que diz respeito à manutenção da qualidade do serviço oferecido.

A análise QoS, apesar de eficiente em muitos casos, possui alguns problemas no que se refere à avaliação. Não são consideradas características em relação à opinião do usuário final, ou seja, sua percepção em relação à qualidade do vídeo recebido. Para lidar com essa limitação e inserir o ponto de vista do usuário, métricas de QoE (Qualidade de Experiência) também têm sido estudadas e introduzidas na avaliação de desempenho de redes de computadores. Neste trabalho, porém, apenas a abordagem QoS será considerada, deixando QoE para próximos trabalhos.

Em se tratando de avaliação de desempenho, existem escolhas adequadas para que se possa estabelecer uma correta avaliação do sistema a ser analisado, que depende de alguns fatores como sua pré-existência, se é real em funcionamento ou protótipo, se ainda não existe, se é possível utilizar-se de determinada técnica de acordo com as características do sistema etc.

O ponto crítico será a capacidade para suportar aplicações de multimídia, incluindo streaming de VoIP (*Voice over IP* ou Voz sobre IP), vídeo, jogos online, telemedicina, e assim por diante. É bem entendido que essas aplicações representam restrições rigorosas sobre rendimento de perda de pacotes e atraso; para este objetivo, o padrão IEEE 802.16 engloba quatro classes diferentes de QoS, e fornece sinalização básica entre a Estação Base



(BS) e as Estações de Assinante (SSs), a fim de apoiar as solicitações de serviço/subsídios [SCALABRINO, N. et al, 2007].

Para lidar com os problemas encontrados no planejamento, gerenciamento, avaliação e otimização de redes sem fio, como WiMAX, são necessários estudos e análises de como é o comportamento da rede sobre vários tipos de tráfego. Estudos baseados em medição podem mostrar um resultado mais próximo da realidade do que estudos de simulação ou modelagem. No entanto, integrar a medição, simulação e modelagem são boas soluções para identificar o comportamento de avaliação em larga escala e obter resultados mais próximos aos sistemas reais, sem a necessidade de instalar um sistema em larga escala de fato [JAIN, R., 1991].

Um importante aspecto a ser observado em uma rede de computadores, por exemplo, é a característica do meio de propagação. Seja em uma rede cabeada ou sem fio, para uma análise mais precisa de seu desempenho, é interessante verificar como está se comportando o meio, seja em aspecto de interferência, potência do sinal, área de cobertura, distância entre hosts, etc. Em uma rede WiMAX é imprescindível considerar todos esses aspectos, além de outros, como serão citados no capítulo 2. Por esse motivo, foi feito um estudo aprofundado sobre essa tecnologia para que a modelagem seja mais fiel possível às condições reais e que os resultados sejam bastante pertinentes.

Para esse propósito de avaliação, [GREENGRASS, J. et al, 2009] atribui “níveis de serviço” (SLAs ou *Service Level Agreement*), que são níveis mínimos aceitáveis avaliados para se prover um QoS considerável para a aplicação. Os principais requisitos são atraso, *jitter* e perda de pacotes.

Para que sistemas sem fio em geral possam ser implantados, inicialmente faz-se uma estimativa de sua área de cobertura, considerando o raio da célula, baseando-se essa implementação no conceito celular. São descritos na literatura diversos métodos e equações matemáticas que fazem uma predição da perda de propagação para que, a nível aceitável, sejam usados na descrição e dimensionamento de redes sem fio.

Em regiões como a Amazônia muitas vezes os modelos propostos não refletem de forma satisfatória o comportamento da rede, já que diversos dos testes de medição e coleta de dados foram feitos em locais que não apresentam características semelhantes às da região, como altura das árvores, alta incidência de chuvas, ventos, concreto etc. Esses, dentre outros problemas, são fatores que motivam novas pesquisas e soluções em

modelagem de propagação visando um melhor desempenho do modelo e, consequentemente, adequação a outros ambientes.

Existem diversas fases ou metodologias existentes para que seja feito um modelo de forma aceitável, no que se refere ao desempenho e fidelidade [JAIN, R., 1991]. Dentre eles podemos citar: planejamento e coleta de dados, tratamento dos dados, como verificação de *outliers* [BARNETT, V. e LEWIS T., 1994] e ajustes do modelo aos dados coletados.

Pela existência de poucos modelos de propagação desenvolvidos para a tecnologia WiMAX na faixa de 5.8 GHz, torna-se viável um estudo e desenvolvimento de tais modelos para melhorias e/ou adequações na tecnologia, principalmente no que diz respeito ao ambiente característico, como citado anteriormente. De fato, o uso dessa faixa de frequência, por ser livre, é um fator fundamental nos programas de inclusão social-digital.

É importante ressaltar que apesar de um modelo poder apresentar um excelente desempenho em relação à propagação de sinal, as questões de QoS e QoE não podem ser descartadas. Além de uma avaliação positiva na camada física, as camadas de aplicação e de rede também devem ser analisadas juntamente com o modelo proposto; a análise *Cross Layer* [ENDROYONO e HENDRANTORO, G., 2008] vem justamente verificar a influência de uma camada em outra, e assim poder gerar novos modelos e/ou correlações entre elas.

A busca de uma predição eficiente para o comportamento da propagação do sinal em 5.8 GHz é de fundamental importância, podendo ser apresentado por um modelo que represente melhor as perdas de propagação e a qualidade das transmissões em ambientes com as características iguais ou similares à região onde se realizaram os testes.

O objetivo principal desse trabalho de dissertação de mestrado é propor um modelo de propagação, que retrate as perdas na faixa ISM 5.8 GHz, utilizando-se dos dados coletados nas campanhas de medições em estudo de caso, dentro da Universidade Federal do Pará (UFPA), que possui características típicas de propagação com visada clara e também obstruída.

Será analisada a influência de métricas como o SNR em parâmetros de QoS. Os dados também serão relacionados e visualizados graficamente para se ter uma noção mais clara de suas possíveis interdependências.

O ajuste do modelo será baseado no método dos Mínimos Quadrados Lineares (MQL), que servirá para a obtenção de parâmetros necessários para os cálculos e ajustes do modelo proposto, observando, ainda, o grau de importância que os fatores ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ) possuem na equação final da proposta da dissertação.

Este trabalho de dissertação está dividido de acordo com o mostrado a seguir: no capítulo 2 serão feitas diversas fundamentações teóricas a respeito dos assuntos abordados durante o desenvolvimento; no capítulo 3 são mostradas algumas literaturas referentes aos temas explanados no trabalho, elencando pontos positivos e negativos; a metodologia e o modelo proposto serão vistos no capítulo 4; o capítulo 5 apresenta os estudos de casos com os resultados obtidos pelo modelo proposto e; o capítulo 6 mostra as conclusões, incluindo contribuições, dificuldades e trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo aborda aspectos, incluindo compressão, codificação, entre outros, e os tipos de avaliação de desempenho, enfatizando, principalmente, aqueles que são usados na etapa de testes. Na seção 2.2 são comentados aspectos referentes à propagação e modulação. Na seção 2.3 são elencadas diversas características sobre a tecnologia WiMAX, conceitos básicos necessários para este trabalho. As importantes características e tipos de avaliação de desempenho são discutidos na seção 2.4.

### 2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE PROPAGAÇÃO

A principal limitação existente em sistemas de propagação sem fio é decorrente de condições impostas pelo canal de propagação. É necessário, então, um estudo e entendimento a cerca das influências sofridas pelo sinal no percurso entre emissor e receptor. Os meios de propagação podem ser com linha de visada (LoS – *Line of Sight*), quando não há obstrução no trajeto do sinal entre emissor e receptor; e sem linha de visada (NLoS – *Non Line of Sight*), quando existem obstáculos entre emissor e receptor, como árvores e prédios.

De acordo com [RAPPAPORT, T., 2000], existem três mecanismos básicos de propagação:

- 1) Difração, ocorre quando o percurso da onda de rádio entre transmissor e receptor é obstruído por uma superfície que possui irregularidades pontiagudas, como pontes de concreto;
- 2) Reflexão, ocorre quando uma propagação de onda eletromagnética colide em objeto que possui dimensões muito largas comparada com o comprimento de onda da onda em propagação;
- 3) Espalhamento, acontece quando o meio pelo qual a onda passa consiste de objetos com dimensões muito pequenas comparadas com o comprimento de onda e o número de obstáculos por unidade de volume é grande.

### 2.2.1 PROPAGAÇÃO EM ESPAÇO LIVRE

A propagação em espaço livre é caracterizada pela não obstrução do caminho de propagação entre emissor-receptor. É chamado de transmissão com uma clara Linha de Visada (LOS), onde os rádios se “enxergam” sem nenhum obstáculo entre eles. Teoricamente, o termo espaço livre caracteriza o vácuo, contudo, em nível de projeto o termo é utilizado para indicar propagação de ondas de rádio em meios desobstruídos, como ocorre na tecnologia WiMAX, como será visto na subseção a seguir.

### 2.3 WiMAX

A necessidade da comunicação sem fio é percebida há muito tempo, visto as limitações impostas pelas redes cabeadas – como mobilidade, alcance, custo. Além disso, o crescente número de usuários para acessar a Internet fez com que se começasse a pensar em uma alternativa para a distribuição do serviço entre os possíveis assinantes. A comunicação por banda-estreita é bastante instável e lenta. O acesso à Internet e outros serviços de telecomunicação com qualidade começava a se tornar uma necessidade, e não uma possibilidade.

Em [PEH, E., 2008], é mostrado que a implantação crescente da infraestrutura *wireless* permite uma variedade de novas aplicações, que necessitam de suporte flexível e robusto por parte da rede, como por exemplo, aplicações multimídia, que incluem fluxo de vídeo (*streaming* de vídeo) e voz sobre IP (VoIP), os quais necessitam de uma considerável sensibilidade da entrega em tempo real. Sendo assim, as aplicações e a rede devem se adaptar à variabilidade dos canais de comunicação sem fio, para que o serviço seja fornecido adequadamente.

#### 2.3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Pode-se definir um sistema WiMAX como composto de duas partes básicas:

- a) Uma torre WiMAX (BS) – ou cluster, que em seu conceito é semelhante a uma torre de telefonia celular: uma única torre WiMAX pode fornecer cobertura para uma área muito grande, que pode chegar a aproximadamente 8.000 km<sup>2</sup> (APROXIMADAMENTE 50 Km de raio) [ANDREWS, J. et al,2007]. Este equipamento é o responsável por controlar o acesso e prover a conexão entre os

clientes e o provedor de acesso à Internet. Sua manutenção e seu gerenciamento são responsabilidades do provedor de acesso;

- b) Um receptor/emissor WiMAX (SS): o receptor e a antena poderiam ser uma pequena caixa ou um cartão PCMCIA; poderiam ser integrados ao laptop de forma similar aos dispositivos WiFi; antenas receptoras, como as usadas nos testes do trabalho corrente e que serão apresentadas posteriormente neste documento. Este equipamento é responsável pela recepção e emissão do sinal do usuário, e se comunica com a BS. A transmissão é feita ponto – a – ponto, Ponto - Multiponto ou Mesh.

Basicamente, o funcionamento dos sistemas WiMAX se dá da seguinte forma: uma torre WiMAX pode estabelecer uma conexão à Internet por cabo de alta taxa de transmissão (linha T3, por exemplo – linha digital de taxa máxima teórica de 45 Mbps, ou fibra óptica). Além disso, pode haver conexão com outra torre WiMAX usando micro-ondas com LOS. Esta conexão a uma segunda torre (geralmente chamada de *backhaul*) é o que permite ao WiMAX fornecer cobertura a áreas rurais remotas (como áreas de mata fechada, a exemplo da vegetação amazônica).

A Figura 2.2 mostra um esquema básico do funcionamento da tecnologia WiMAX. Pode-se notar na figura o termo REDE ISP. O Provedor de acesso à Internet (ISP - *Internet Service Provider*) é um serviço que oferece principalmente acesso à Internet, somando a ele outros serviços relacionados, como *e-mail*, *blogs*, serviços de hospedagem de sites, entre outros.



Figura 2.1: Esquema básico do funcionamento do WiMAX

Fazendo um pequeno comparativo do WiMAX com a rede Wi-Fi (IEEE 802.11), esta última, em sua conexão antes do surgimento da **banda n**, conseguia transmitir até 54 Megabits por segundo sob boas condições. A tecnologia WiMAX era capaz de transmitir até 75 Megabits por segundo. Dividindo-se ainda estes 75 Mbps dezenas de empresas ou centenas de residências, ainda assim cada usuário terá taxas de transferência pelo menos equivalentes às da Internet a cabo.

É importante elencar que hoje existe o padrão **IEEE 802.11 banda n** [IEEE Standard 802.11n, 2009], com taxas de vazão a partir de 100 Mbps. O Padrão atual pertencente ao WiMAX, IEEE 802.16m-2011, pode ter taxa nominal de transmissões de até 300 Mbps.

A grande diferença não é a velocidade, mas sim o alcance da tecnologia WiMAX, que é muito superior a do Wi-Fi. Este pode alcançar até 400 metros se não houver obstáculos, enquanto a tecnologia WiMAX pode cobrir um raio de 50 quilômetros com acesso sem fio. O alcance maior é devido às frequências usadas, modulação e à capacidade do transmissor. Porém, deve-se considerar que a esta distância, terrenos, clima e grandes

construções acabam reduzindo o alcance máximo em alguns casos, mas o potencial para cobrir grandes áreas existe.

Contudo, este pequeno comparativo é apenas para mostrar como as redes sem fio evoluíram nos últimos 10 anos, visto que esta comparação tende a não ser justa, pois as duas tecnologias possuem objetivos distintos, o WiFi foi desenvolvido para a construção de redes locais (WLAN – *Wireless Local Area Network*), enquanto que o WiMAX foi desenvolvido para a construção de redes metropolitanas (WMAN – *Wireless Metropolitan Area Network*).

Os equipamentos certificados como WiMAX estão habilitados a suportar um fluxo com picos de até aproximadamente 75 Mbps. Por isso, o WiMAX torna-se um grande competidor frente às tecnologias 3G, e vários serviços de acesso via fio de cobre e à tecnologia pertencente ao padrão IEEE 802.11. As versões iniciais possuíam uma largura de banda fixa de 20, 25 ou 28 MHz. Depois de reformas, e com a modulação OFDMA, passaram a ter uma variação de 1.5 a 20 MHz.

### 2.3.2 CAMADA FÍSICA

Neste item, serão abordadas algumas características a respeito da camada física da tecnologia WiMAX. A camada física da tecnologia WiMAX é baseada no esquema OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* ou Multiplexação por divisão de frequência Ortogonal), esquema que oferece uma boa resistência a multipercurso, e permite que o WiMAX opere em condições sem linha de visada (NLOS). Algumas características serão vistas nos subitens a seguir.

#### 2.3.2.1 SUBCANALIZAÇÃO

As subportadoras disponíveis podem ser divididas em vários grupos de subportadoras, chamados de subcanais. O WiMAX fixo, baseado no OFDM-PHY permite uma forma de subcanalização limitada apenas para *uplink* (canal de comunicação no sentido do usuário para a estação rádio base). O padrão define 16 subcanais, onde 1, 2, 4, 8 ou todos os grupos podem ser atribuídos a uma estação do usuário em *uplink*.

A subcanalização de *uplink* em estações WiMAX fixas permite ao assinante transmitir usando apenas uma fração da largura de banda (frações baixas, como  $1/16$ ) que lhe é atribuído pela estação base, e que possibilita melhorias no acesso da conexão que



podem ser usadas para melhorar o alcance da rede e/ou melhorar o tempo de vida útil das baterias das estações do lado do usuário (MS - *Mobile Subscriber*). Uma subcanalização de fator  $1/16$  fornece uma melhora de 12 dB no enlace de rádio, ou seja, uma potência de transmissão melhor para os dados [ANDREWS,J. et al,2007; WiMAX Fórum, 2010].

O WiMAX móvel, baseado no OFDMA-PHY [WiMAX Fórum, 2006], permitindo subcanalização tanto no *uplink* quanto no *downlink* (canal de comunicação no sentido estação rádio base para o usuário). Aqui, os subcanais formam a frequência mínima dos recursos alocados por unidade pela estação base. Diferentes subcanais podem ser alocados para diferentes usuários como um mecanismo de múltiplo acesso. Esse esquema de múltiplo acesso é chamado de Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDMA ou *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*).

Os subcanais podem ser constituídos usando tanto subportadoras contínuas como pseudorrandômicas, distribuídas pelo espectro de frequência. Os subcanais formados usando subportadoras distribuídas fornecem uma maior diversidade de frequência, muito útil para aplicações móveis. A tecnologia WiMAX define vários esquemas de subcanalização baseados em portadoras distribuídas tanto para *uplink* quanto para *downlink*. Uma delas, chamada *Partial Usage of Subcarriers* – PUSC (Uso Parcial de Subportadoras), é obrigatória para todas as implementações WiMAX. Os perfis iniciais da tecnologia definem 15 e 17 subcanais para *downlink* e *uplink*, respectivamente, para operação do PUSC com largura de banda igual a 5 MHz. Para operação em 10 MHz, são usados 30 e 35 canais, respectivamente.

É importante considerar também o conceito de S-OFDMA (*Scalable OFDMA*) [WiMAX Fórum, 2006], que apoia uma série de larguras de banda para que se possa variar o número de subportadoras, suportando, por exemplo, o acesso simultâneo de múltiplos usuários à Internet. Na Tabela 2.1 são listados parâmetros da S-OFDMA. Os desenvolvimentos iniciais do grupo WiMAX Fórum focaram as larguras de banda de 5 e 10 MHz.

A tecnologia WiMAX tem uma arquitetura de camada física escalável, que permite a taxa de dados ser facilmente escalada com largura da banda do canal disponível. Esta escalabilidade é apoiada no modo de OFDMA onde o ajuste da FFT (*Fast Fourier Transform*) pode ser escalado baseado na largura da banda de canal disponível. Por

exemplo, um sistema de WiMAX pode usar FFTs de 128, 512 ou 1024 Bits, se a largura da banda de canal é 1.25MHz, 5MHz, 10MHz ou 20MHz, respectivamente.

Tabela 2.1. Parâmetros do OFDMA escalável

Parâmetros	Valores			
Largura de Banda do Canal (MHz)	1.25	5	10	20
Amostra de Frequência ( $F_p$ em MHz)	1.4	5.6	11.2	22.4
Tamanho da FFT	128	512	1024	2048
Número de Subcanais	2	8	16	32
Distância em Frequência entre Subportadoras	10.94 kHz			
Tempo Útil de Símbolo ( $T_b = 1/f$ )	91.4 $\mu$ s			
Tempo de Guarda ( $T_g = T_b/8$ )	11.4 $\mu$ s			
Duração do Símbolo OFDMA ( $T_s = T_b + T_g$ )	102.9 $\mu$ s			
Número de Símbolos OFDMA (Frames de 5ms)	48			

### 2.3.2.2 CAMADA MAC

Será visto neste item uma breve descrição sobre a camada MAC do WiMAX. Esta camada é projetada para suportar altas taxas de bits, e ao mesmo tempo deve oferecer qualidade de serviço (QoS). O protocolo MAC deve suportar tanto tráfego contínuo quanto em rajadas.

O *WiMAX-MAC* usa um MPDU (MAC PDUs - *Protocol Data Units*) de comprimento variável e oferece bastante flexibilidade para permitir a eficiência de sua transmissão. Por exemplo, vários MPDUs de tamanhos iguais ou diferentes podem ser agregados em uma única rajada para proteger a camada PHY de sobrecarga. As MSDUs (MAC *Service Data Unit* (SDU)) múltiplas, a partir do mesmo serviço da camada superior podem ser concatenadas em uma única MPDU para salvar cabeçalhos MAC genéricos. Por outro lado, grandes MSDUs podem ser fragmentadas em pequenas MPDUs e enviadas em vários frames. A Figura 2.2 [ANDREWS, J. et al, 2007] mostra exemplos de vários frames MAC PDU – unidades de pacotes de dados.

Cada quadro MAC é prefixado com um cabeçalho MAC genérico (GMH - *Generic MAC Header*) que contém um identificador de ligação (CID), o comprimento do frame, e bits para qualificar a presença de CRC - checagem cíclica de redundância, subcabeçalhos, e se o *payload* – os dados essenciais que estão sendo carregados dentro de um pacote ou

outras unidades de transmissão – é codificado e em caso afirmativo, com que chave isso é feito. O pacote de carga MAC é um transporte ou uma mensagem de gerência. Além de MSDUs, o transporte da carga pode conter as requisições de banda ou pedidos de retransmissão.

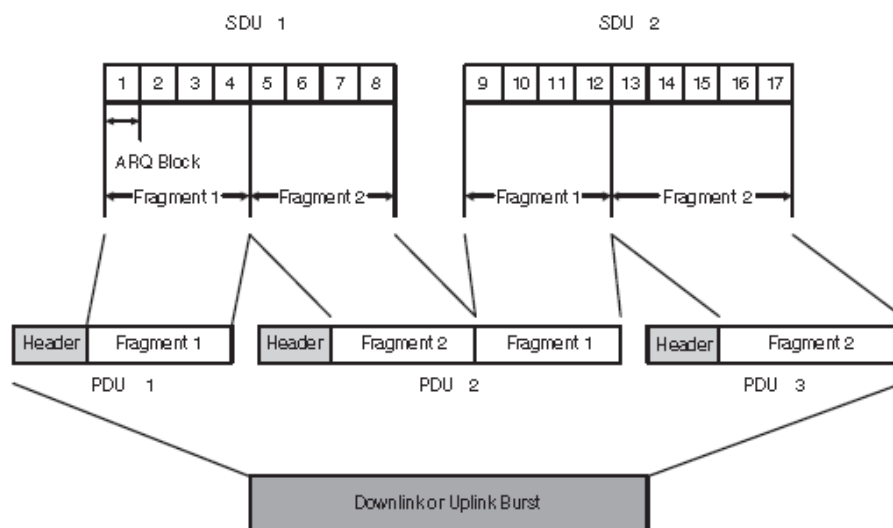


Figura 2.2. Segmentação e concatenação em MAC PDUs [ANDREWS, J. et al, 2007].

O tipo de transporte da carga é identificado pelo subcabeçalho que precede imediatamente ao pacote. Exemplos de subcabeçalhos são os de empacotamento e de fragmentação. WiMAX MAC também suporta ARQ (*Automatic Repeat Request* ou Requisição de Repetição automática), que pode ser utilizado para solicitar a retransmissão de MSDUs desfragmentados e MSDUs fragmentados. O comprimento máximo do quadro é 2.047 bytes, representado por 11 bits no GMH [ANDREWS, J. et al, 2007; WiMAX Fórum, 2006].

### 2.3.2.3 MECANISMOS DE ACESSO AO CANAL

No WiMAX, a camada MAC na estação base é a responsável pela atribuição de largura de banda para todos os usuários, tanto em *uplink* como em *downlink*. A única vez que o MS tem algum controle sobre a alocação de banda é quando ele tem várias sessões ou conexões com a BS. Todas as outras programações no *downlink* e no *uplink* são feitas pela BS. Para o *downlink*, a BS pode alocar largura de banda para cada MS, com base nas necessidades de tráfego futuro, sem envolver o MS. Para o *uplink*, as alocações têm de ser baseadas em pedidos do MS.

O padrão IEEE 802.16 suporta vários mecanismos pelos quais um MS pode solicitar e obter conexão banda larga. Dependendo dos parâmetros QoS e do tráfego associado a um serviço, um ou mais destes mecanismos podem ser utilizados pelo MS. A BS aloca recursos dedicados ou compartilhados periodicamente a cada MS, que pode utilizar para solicitar largura de faixa. Esse processo é chamado de *polling* [ANDREWS, J. et al, 2007; NIYATO, D. et al, 2007]. O *polling* pode ser feito tanto individualmente (*unicast*) quanto em grupos (*multicast*). O *polling multicast* é feito quando há largura de banda insuficiente para nomear cada MS individualmente.

Quando o *polling* é feito em *multicast*, o *slot* alocado para fazer requisição de banda é compartilhado, onde todos os MS indicados tentam usar. WiMAX define um mecanismo de contenção de acesso e de resolução para o caso, quando mais de uma MS tenta utilizar o *slot* partilhado. Se ele já tem uma alocação para o envio de tráfego, o MS não é escolhido. Em vez disso, é permitido requisitar mais largura de banda das seguintes formas [ANDREWS, J. et al, 2007]:

- a) transmitindo uma única requisição de MPDU na largura de banda;
- b) enviando um pedido de banda utilizando a variação de canal, ou;
- c) adicionando uma requisição de banda nos pacotes MAC genéricos.

#### 2.3.2.4 QUALIDADE DE SERVIÇO

O Suporte para QoS é uma das principais partes do *design* da camada MAC do WiMAX. A tecnologia utiliza algumas das principais ideias básicas que estão por de trás do *design* de QoS do *cable-modem* padrão DOCSIS [DOCSIS, 2011]. O forte controle de QoS é obtido usando uma arquitetura MAC orientada à conexão, onde todas as conexões de *downlink* e *uplink* são controladas pelo serviço da BS.

Antes de qualquer transmissão de dados acontecer, a BS e o MS estabelecem uma ligação lógica unidirecional, chamada de conexão, entre os dois pares de camada MAC. Cada ligação é representada por um *identificador de conexão* (CID), que serve como um endereço temporário para transmissões de dados sobre o link específico. Além de ligações para transferir dados do usuário, o WiMAX MAC define três gerenciamentos de conexões: a básica, a primária, e as conexões secundárias.

WiMAX também define o conceito de um fluxo de serviços. É um fluxo unidirecional de pacotes com um determinado conjunto de parâmetros QoS, e é

identificado por um SFID – identificador de fluxo de serviços. Dentre os parâmetros de QoS, poderão ser incluídos: prioridade de tráfego, manutenção da taxa mínima de tráfego, rajadas de transmissão com taxa máxima, taxa mínima tolerável, tipo de programação, tipo de ARQ, atraso máximo, *jitter* tolerado, tipo e tamanho do serviço de unidade de dados, mecanismo de requisição de largura de banda a ser utilizado, formação de regras para transmissão de PDU, entre outras.

Os fluxos de serviços podem ser criados através de um sistema de gerenciamento de rede ou criados dinamicamente através de mecanismos de sinalização definidos no padrão. A estação base é responsável pela emissão do SFID e o mapear para um único CID. Esses fluxos também podem ser mapeados para pontos de código **DiffServ** ou rótulos de fluxo **MPLS** para fornecer QoS baseado em IP fim-a-fim [ANDREWS, J. et al, 2007].

### 2.3.3 PADRÕES IEEE 802.16

Em Dezembro de 2001 foi homologado o primeiro padrão **IEEE 802.16-2001** [IEEE 802.16-2001, 2001], ou **802.16** padrão. Este especifica, dentre outras características, a interface aérea, funcionalidades e mudanças na camada MAC para redes sem fio metropolitanas (WMAN). É basicamente composto por uma estação base (BS) e estações terminais (SS).

A BS é onde se coleta todos os dados das estações terminais (tanto *uplink* quanto *downlink*) dentro de uma célula. As suas antenas têm feixes relativamente largos, divididos em setores, de modo que a cobertura seja de 360°. Uma SS é formada basicamente por uma antena e uma unidade de radio externa, que farão a interface com o usuário final por uma unidade interna.

As primeiras pesquisas em WiMAX voltavam-se para faixas de frequências de 10 GHz a 66 GHz, com modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Contudo, as operações da tecnologia eram feitas apenas em condições de LOS. Ou seja, o receptor tinha que estar em visão direta com o *cluster*, além da necessidade das antenas receptoras e dos equipamentos que utilizarão as aplicações por WiMAX estarem fixos. Isso era um problema em se considerando grandes distâncias ou ambientes com obstáculos no percurso do sinal [IEEE 802.16-2001, 2001].

A partir daí, extensões e adaptações foram criadas com o intuito de melhorar e propor alguma nova funcionalidade da tecnologia. Os principais padrões 802.16 são:

- **802.16a:** Reforma do 802.16 e que inclui:

- a) Transmissões FWA (*Fixed Wireless Access*) – Destinado a tecnologias para WiMAX fixo;
- b) Opera em espectro de 2 GHz a 11 GHz;
- c) Passa a operar também em condições NLOS, superando a questão da obrigatoriedade da visada direta com a torre principal;
- d) A taxa de transmissão pode chegar a um pico de 75 Mbps, com canalização de 20 MB;
- e) A modulação para transmissão utiliza a tecnologia OFDM, de 256 portadoras, usando QPSK, 16QAM, 64QAM;
- f) A largura de banda de transmissão está na faixa entre 1.5 e 20 MHz.

Mais sobre o padrão 802.16a pode ser visto em [IEEE Standard 802.16a, 2003].

- **802.16d (2004):** Revisão do padrão 802.16a, define um esquema de subcanalização que permite que fabricantes de *chips-set* utilizem amplificadores de potência menores e com melhor custo, além da diminuição do consumo energético e dos CPEs (*Customer Premises Equipment*) – equipamentos terminais localizados no ambiente do cliente e conectados à rede telefônica, tais como: aparelhos telefônicos, modems, etc. [IEEE Standard 802.16-2004].

- **802.16e (2005):** Este padrão faz referência ao WiMAX móvel. Em 2003, o grupo 802.16 iniciou um trabalho de aprimoramentos das especificações para possibilitar aplicações móveis em veículos. Esta revisão foi completada em Dezembro de 2005, e publicada formalmente como 802.16e-2005. Ela especifica OFDM escalável para a camada física, e faz ainda algumas modificações na camada MAC para ajustar a mobilidade de alta velocidade. Permite conexões com velocidades de até *100 km/h*, e também pode operar em LOS e NLOS [IEEE Standard 802.16e-2005]. Algumas características do padrão são citadas a seguir:

- a) A banda de frequência opera de 2 GHz a 11 GHz para WiMAX fixo e de 2GHz a 6GHz para WiMAX móvel;
- b) Opera tanto em linha com visada como em linha sem visada;
- c) Possui esquema de transmissão com: portadora simples, 256 OFDM ou OFDM escalável com 128, 512, 1024 ou 2048 subportadoras;

- d) A modulação pode ser feita usando QPSK, 16 QAM, 64 QAM;  
 e) A taxa de dados está incluída na faixa de 1 Mbps a 75 Mbps;

Melhorias em relação à versão anterior:

- ✓ Possibilidade de mobilidade do equipamento do usuário;
- ✓ O aumento do ganho do sinal, melhorando a penetração em ambientes indoor;
- ✓ Suporte à QoS;
- ✓ Suporte à segurança – autenticação EAP, criptografia AES-CCM.

A seguir, uma tabela comparativa entre os padrões 802.16 inicial, 802.16d (fixo) e 802.16e (móvel).

Tabela 2.2. Comparação entre padrões básicos 802.16

<b>Padrões Propriedades</b>	<b>802.16</b>	<b>802.16-2004</b>	<b>802.16e-2005</b>
<b>Status</b>	Concluído em Dezembro/2001	Concluído em Junho/2004	Concluído em Dezembro/2005
<b>Faixa de Frequência</b>	10 GHz – 66 GHz	2 GHz – 11 GHz	2 GHz – 11 GHz para fixo; 2 GHz – 6 GHz para móveis
<b>Aplicação</b>	Fixas, LOS	Fixas, NLOS	Fixas e móveis, NLOS
<b>Arquitetura MAC</b>	Ponto-multiponto; Mesh	Ponto-multiponto; Mesh	Ponto-multiponto; Mesh
<b>Esquema de Transmissão</b>	Portadora simples	Portadora simples, 256 OFDM ou 2048 OFDM	Portadora simples, 256 OFDM ou OFDM escalável com 128, 512, 1024 ou 2048 subportadoras
<b>Modulação</b>	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
<b>Taxa Total de dados</b>	32 Mbps – 134.4 Mbps	1 Mbps – 75 Mbps	1 Mbps – 75 Mbps
<b>Multiplexação</b>	Burst TDM/TDMA	Burst TDM/TDMA/ OFDMA	Burst TDM/TDMA/ OFDMA
<b>Duplexação</b>	TDD e FDD	TDD e FDD	TDD e FDD
<b>Tamanho do Canal</b>	20 MHz, 25 MHz, 28 MHz	1.75 MHz, 3.5 MHz, 7 MHz, 14 MHz, 1.25 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 8.75 MHz	1.75 MHz, 3.5 MHz, 7 MHz, 14 MHz, 1.25 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 8.75 MHz
<b>Designação da Interface Aérea</b>	Wireless MAN-SC	Wireless MAN-SCa Wireless MAN-OFDM Wireless MAN-OFDMA Wireless HUMAN	Wireless MAN-SCa Wireless MAN-OFDM Wireless MAN-OFDMA Wireless HUMAN
<b>Implementação WiMAX</b>	Não	256 – OFDM com WiMAX Fixo	OFDMA escalável com WiMAX Móvel

- **802.16 (versão: 2009):** Esta alteração atualiza e expande o padrão IEEE 802.16, especificando a camada física OFDMA e melhoramento da camada para controle de acesso do IEEE 802.16 para bandas licenciadas a fim de permitir o funcionamento da estação de transmissão. Não são mudadas as especificações da estação de assinante. A partir da data de publicação, a atual versão aplicável do padrão IEEE 802.16 é IEEE 802.16-2009, alterada pela [IEEE Standard 802.16j-2009];

- **802.16m (2011):** Reforma do padrão 802.16-2009, esta alteração especifica a interface *Air WirelessMAN-Advanced*, uma interface aérea melhorada designada como “*IMT-Advanced*” pela União Internacional das Telecomunicações - Setor de Radiocomunicações (UIT-R). A alteração é baseada na especificação *WirelessMAN-OFDMA* e fornece apoio permanente para as estações de assinante legados [IEEE Standard 802.16m-2011].

#### 2.3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do exposto nesta seção, a tecnologia WiMAX possui diversas características que proporcionam seu uso como tecnologia de acesso nos serviços de inclusão digital. A questão do LOS, características de regiões tipo a amazônica, a interoperabilidade, a alta taxa de transmissão e o suporte a qualidade de serviço são fatores fundamentais que podem ser usados a favor da tecnologia no processo de inclusão digital, bem como a resolução da questão da “última milha”.

#### 2.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

##### 2.4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No dia-a-dia dos programadores, analistas de sistemas e *designers*, surgem muitos desafios relativos à forma, modo e conteúdo para que se faça uma avaliação de desempenho, estabelecer requisitos de sistemas, parâmetros de comparações, entre outros. Exemplos desses problemas é a determinação de número e tamanho de componentes (capacidade de planejamento), caracterização da carga de trabalho (distribuição, probabilidade), comparação entre dois ou mais sistemas, predição de desempenho, etc. Pode ser considerado sistema qualquer conjunto de *firmware*, *hardware* e *software*.



De forma mais geral, as técnicas de avaliação de desempenho podem ser divididas em dois grupos, que de certa forma, podem ser vistos como complementares. No primeiro grupo encontram-se as técnicas que obtêm medidas para a avaliação a partir de experimentações no sistema real, enquanto que no segundo grupo estão as técnicas que obtêm tais medidas através de abstrações criadas para representar o comportamento desse sistema. Uma taxonomia para essas técnicas é proposta em [SANTANA, M. et al, 1997], onde os autores sugerem uma divisão em duas classes: as técnicas de aferição e as de modelagem, respectivamente, para o primeiro e o segundo grupo.

Por essa divisão, pode-se observar que a escolha da técnica está diretamente relacionada ao estágio do ciclo de vida em que o sistema se encontra. Para os casos em que o sistema já existe e, conseqüentemente, seu desempenho pode ser examinado empiricamente, as técnicas de aferição são mais recomendadas. Estão nessa classe, por exemplo, os *benchmarks*, os protótipos e a coleta de dados (através de monitores de hardware e/ou de software) [JAIN, R., 1991].

Em contrapartida, para os sistemas inexistentes, utilizam-se as técnicas de modelagem. No contexto de avaliação de desempenho, modelagem é um processo complexo e com um forte teor matemático, mas que de maneira simplista pode ser definida como a utilização de uma abstração que contemple em seu cerne as características essenciais de um sistema real, sendo que, por meio da solução desse modelo, pode-se ter uma aproximação de como o sistema se comportaria se fosse efetivado [JAIN, R., 1991].

Este trabalho tem como característica a abordagem das técnicas de avaliação de desempenho anteriormente citadas, que são a modelagem e a aferição. Será elencada uma série de características de cada técnica e sua relação com este trabalho. Nas próximas subseções serão vistas as principais técnicas de avaliação de desempenho. Em 2.4.2 serão elencadas algumas técnicas de aferição, e na seção 2.4.3 será feita uma caracterização das técnicas de modelagem.

#### 2.4.2 TÉCNICAS DE AFERIÇÃO

A seguir serão apresentados os conceitos básicos e as principais técnicas de aferição: Coleta de Dados, Prototipação e Benchmarking.

#### 2.4.2.1 COLETA DE DADOS

Este método de aferição consiste em coletar uma série de dados produzidos em um sistema real para que sejam feitas as análises. Em uma rede de computadores, por exemplo, podemos elencar alguns métodos de coleta de dados: efetuar consultas aos dispositivos da rede; observar tráfego existente na rede com foco para elementos de desempenho; gerar tráfego na rede para teste de desempenho e; observar o comportamento dos dados, como sua distribuição, probabilidades de ocorrência.

É importante ressaltar que na coleta de dados, o sistema já se encontra em operação e a análise é realizada em condições reais de operação, incluindo a carga de trabalho atendida pelo sistema.

#### 2.4.2.2 BENCHMARKING

Quando há diversos sistemas computacionais a serem comparados, e deseja-se descobrir qual deles possui um melhor desempenho, utiliza-se então um conjunto de aplicações específicas, no qual cada aplicação é responsável por testar uma determinada característica, sendo que o conjunto de aplicações como um todo é responsável por testar as características mais significativas do sistema em relação ao objetivo a qual o mesmo terá quando entrar em operação. A este conjunto de aplicativos é dado o nome de *Benchmark* e ao processo de comparação é dado o nome de Benchmarking. Em muitas situações o termo *benchmark* também é utilizado como sinônimo de carga de trabalho.

Para realizar um *benchmarking*, não é necessário ter mais de um sistema para realizar a comparação. Em diversos experimentos, pretende-se comparar o sistema existente com uma versão alterada do mesmo para fins de estudo sobre que mudanças são benéficas ao desempenho do mesmo. Por exemplo, inclui-se um novo servidor em um determinado sistema para evitar que outros servidores já existentes no sistema fiquem sobrecarregados, então se compara qual foi a utilização de cada servidor antes e depois da alteração do sistema. Para realizar essa comparação, utiliza-se, então, um benchmark apropriado para testar os servidores sob condições semelhantes às condições reais de operação do sistema.

### 2.4.2.3 PROTOTIPAÇÃO

A prototipação é uma técnica que aborda uma visão ampla de um sistema em uma “réplica” do que poderá ser o sistema em termos reais. Ou seja, esta abordagem envolve a produção de versões iniciais – protótipos – de um sistema futuro com o qual se podem fazer verificações, experimentações e medições para se avaliar algumas de suas qualidades, funções e desempenho antes que o sistema venha realmente a ser implementado.

### 2.4.3 TÉCNICAS DE MODELAGEM

Em muitos casos, algumas necessidades e particularidades de um sistema apontam para a escolha da modelagem. Esta técnica é usada quando se pretende fazer uma avaliação analítica do sistema, principalmente quando está em regime permanente. Os passos principais de um processo de modelagem são:

- ✓ Especificação do Modelo;
- ✓ Parametrização do Modelo;
- ✓ Solução do Modelo;
- ✓ Apresentação dos Resultados.

Em Modelagem, não necessariamente o sistema deverá existir. Seria uma espécie de abstração do sistema, seja em construção ou mesmo inexistente, para se conhecer seu comportamento futuro, um exemplo seria a modelagem de um sistema de rede de computadores (tráfego na rede). Existem casos em que a simulação pode ser uma alternativa mais viável do que uma construção de hardware [PIDD, M., 2004].

Usa-se a modelagem, também, quando não se pode efetuar experimentos em sistemas reais, podendo causar sua destruição. Existem nesse caso técnicas de solução analítica, baseada em definições lógico-matemáticas, que requerem uma alta complexidade à medida que aumenta a dificuldade da solução. A solução por simulação modela o sistema para torná-lo um programa para desempenhar um papel de um sistema real. Recomenda-se essa técnica para sistemas não implementados. Necessita de cuidados de verificação e validação, em relação à confiança dos resultados. Isso pode aumentar a dificuldade em fazer modificações no modelo, podendo levar muito tempo e alto custo.

Os modelos são fundamentais para a tomada de decisão em determinado sistema. Alguns exemplos de modelos para esse tipo de área de pesquisa são as Cadeias de Markov e as Redes de filas, que são modelagens matemáticas.

#### 2.4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que obtenham resultados que sejam representativos de um sistema efetivamente real, é necessária uma série de técnicas para que se tenham métricas coerentes para avaliação de desempenho. É importante definir o escopo do sistema, quais métricas terão mais impacto sobre o sistema, como a modelagem deve ser feita, quais fatores externos influenciam, entre outros, para que a avaliação de desempenho não contenha erros significativos, que possam prejudicar a decisão sobre o sistema (se possível, sem erros).

A partir de um estudo sobre o que e como se deve simular, testar e/ou medir em um sistema, tem-se uma linha certa a se seguir, com objetivos concisos e métricas corretas a serem determinadas. Obter métricas corretas significa poupar tempo e reduzir gastos, equilibrando a relação custo-benefício.

Neste trabalho de dissertação de mestrado são usadas ambas as técnicas de avaliação de desempenho: Aferição e Modelagem, enfatizando a pertinência do modelo proposto aos dados ajustados.

### 3. TRABALHOS CORRELATOS

As pesquisas na área modulação e propagação de ondas têm grande força principalmente no que diz respeito à modelagem do comportamento de determinada rede, incluindo tráfego, ambiente, interferências e topologias. O estudo em relação às tecnologias sem fio, QoS, QoE e otimização também possuem respeitável valor na literatura, sempre buscando uma forma de melhorar os trabalhos existentes e fornecer um possível avanço para a área em questão.

Em [DELANNOY, P. et al, 2009] são elencados métodos de estimativa de QoS e medições em redes WiMAX. São apresentadas medidas de desempenho sobre as taxas viáveis para transmissão de dados ou multimídia, e estimativas da perda de percurso devido aos edifícios, metal, vidro, obstáculos naturais, como vegetação, as condições climáticas e velocidade. A modulação OFDMA permite ao WiMAX adaptar a sua transmissão sobre a largura de banda de cada subcanal, a fim de compensar as perturbações de transmissão, como atenuação e possíveis transmissões em multipercurso. [ANDREWS, J. et al, 2007].

O estudo de modelos de propagação possui como grande contribuição dos resultados a possibilidade de uma reestruturação e/ou adaptação da tecnologia para determinados tipos de ambientes com características semelhantes entre si. O trabalho de [BEGOVIC, P. et al, 2011] apresenta algumas possibilidades de análises para usar abordagens analíticas generalizadas, desenvolvidas principalmente para sistemas GSM e UMTS, no planejamento de cobertura WiMAX. Alguns desvios de parâmetros calculados a partir da relevância de fatores da realidade física são feitos para a criação de novos modelos. Assim, os autores sugerem uma nova abordagem para avaliar a aplicabilidade de modelos empíricos de propagação existentes, utilizando um raio de cobertura, ou precisamente erro relativo de previsão do raio da célula.

O grande valor da abordagem proposta é de aplicabilidade durante a engenharia preliminar da tecnologia WiMAX e em tipos de topografia bastantes diferentes (rural, urbano e suburbano) e, portanto, é de natureza generalizada. Contudo, apesar de todas essas características relevantes, o conjunto QoS – QoE não é considerado no trabalho, que enfatiza apenas o modelo em si, deixando de avaliar as aplicações nos respectivos meios de propagação.

Para muitos dos casos, um dos recursos mais utilizados para obtenção de parâmetros e ajustes de valores é a técnica de otimização. Estas abordagens incluem desde modelos matemáticos empíricos até a utilização de inteligência computacional. Um método bastante utilizado são os Mínimos Quadrados Lineares [RILEY, K. F. et al, 2006] [MOON, T. K. e STIRLING, W. C. et al, 1999]. ABOUL-DAHAB, M. A. (2009) utiliza esta técnica para tratar perdas no caminho de propagação e análise a fim de encontrar melhor metodologia para o cálculo dos limites superior e inferior para tal métrica. Isso ajuda designers de rede a ter uma visão clara das perdas. Uma comparação entre outros modelos de perda de propagação também é apresentado.

CASTRO, B. L. et al (2010) mostra a comparação de desempenho entre modelos COST231-Hata e SUI através de algoritmo de ajuste LMS (*Least Mean Squares*, neste trabalho representado pela sigla MQL) para largura de banda com frequência 5,8 GHz. O ambiente estudado é baseado em cidades localizadas na Região Amazônica, mesmas características desta dissertação de mestrado. Após os ajustes e as simulações, o modelo SUI mostrou um menor erro RMS (*Root Mean Square* – Erro Médio Quadrático) quando comparado ao modelo COST231-Hata. Diferentemente, esse trabalho possui seu próprio modelo de propagação, também com a obtenção de parâmetros por meio do LMS, considerando a perda de percurso e a vazão, bem como outro cenário considerando métricas de QoE.

O modelo COST-231 Hata é uma extensão do modelo de Hata-Okumura desenvolvido por Hata a partir do modelo original de perda de propagação de Okumura e é usado para a previsão de perda de propagação para sistemas móveis sem fio em ambientes urbanos. Fatores de correção para o uso deste modelo em ambientes suburbanos são fornecidos em [ABHAYAWARDHANA et al., 2005]. Em [MARDENI, R. e PRIYA, T., 2010] é mostrada a otimização do modelo para a obtenção da perda de propagação sofrida em transmissões na tecnologia WiMAX.

As análises de desempenho de QoS geralmente eram feitas a nível de camadas de modelo de rede (OSI/TCP-IP) sem a preocupação da influência de uma camada em outra. A abordagem *cross-layer* é uma evolução que tem sido estudada e aplicada com o intuito de ter uma avaliação melhor, mais robusta, provando que tais camadas possuem certa interdependência. O trabalho de [UKIL, A., 2009] propôs um *framework cross-layer* para redes WiMAX a fim de otimizar o desempenho do sistema, bem como a manutenção do

QoS fim-a-fim dos usuários. É discutida a alocação de recursos *cross-layer* e o esquema de escalonamento da tecnologia WiMAX, e proposto um algoritmo para atender a necessidade de melhor gerenciamento dos recursos, especialmente em relação ao QoS de aplicações em redes 4G.

Este trabalho de dissertação faz uma modelagem *cross-layer* para predição de métricas de QoS em um cenário característico, discutindo a influência da camada física de uma tecnologia com modulação OFDM (nos estudos de caso foi usada a tecnologia WiMAX) nas outras camadas, como a de aplicação, bem como o ajuste dos dados buscando otimização.

#### 4. PROPOSTA DO MODELO *CROSS LAYER*

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, que irá incluir as etapas, ferramentas, cenário, equipamentos e modelo matemático. É mostrado o percurso feito durante as medições e os passos utilizados durante todo o processo de obtenção dos dados, desde a coleta até sua utilização no modelo empírico utilizado para a análise e avaliação de desempenho das métricas obtidas.

Na seção 4.1 o processo de medições e coletas de dados é descrito. Depois, em 4.2 é feita uma explanação do tratamento estatístico feito no trabalho. Em 4.3 a 4.5 é discutido, respectivamente, sobre o modelo proposto empírico, o método de ajuste por MQL e passos de ajuste do modelo proposto.

##### 4.1 MEDIÇÕES E COLETA DE DADOS

As medições foram a primeira fase do processo utilizado para a obtenção e análise de dados. Juntamente, o processo de coleta de dados é feito. Durante as campanhas de medição, quatro passos foram necessários, e serão vistos a seguir.

1. Escolher o percurso no qual os dados serão coletados;
2. Escolher os tipos de dados que serão usados para estudos;
3. Reunir a unidade móvel e os coletores de dados necessários para a medição;
4. Realizar a coleta e armazenamento dos dados para análise.

Para as medições foram utilizados os seguintes acessórios e ferramentas:

- ✓ Veículo Automotor;
- ✓ Tripé Regulável;
- ✓ Notebook;
- ✓ Inversor de Corrente;
- ✓ GPS;
- ✓ Radio Cliente (receptor do sinal);
- ✓ Antena Omnidirecional;
- ✓ Software MatLab®.

Os passos acima citados são aplicados no estudo de caso de acordo com as características do cenário, como será visto nos próximos subitens.



#### 4.1.1 ESTUDO DE CASO

No primeiro passo foi escolhido um percurso dentro da Universidade Federal do Pará. Durante esse percurso, são encontradas diversas características do canal de propagação, sendo uma a distância em relação à Estação Base WiMAX, que opera na faixa ISM 5,8 GHz, e outra são os possíveis obstáculos que se localizam entre receptor e transmissor, como construções e árvores.

Para o segundo passo, através de pesquisas na literatura, características do canal de propagação e diversos testes já realizados, foram escolhidas como métricas a distância, perda de potência e vazão.

No *setup* do processo de medição e coleta de dados, como mostrado na Figura 4.2, foi necessário o uso de um carro comum com um conversor de corrente para recarregar todos os equipamentos, fornecendo energia por um tempo maior, evitando interrupções durante as transmissões.

Durante a coleta de dados, foi usado um notebook com um programa desenvolvido no MatLab [CHAPMAN, S. J., 2008] usando o protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*) para obter algumas informações fornecidas pelo rádio. Para georeferenciar todos os dados, o programa também se conecta a um GPS para que, a partir das coordenadas, tenhamos os valores da distância e área de cobertura.

O tráfego utilizado foi um streaming UDP para minimizar os problemas de protocolos como os que necessitam de inicialização, a exemplo do TCP [KUROSE, J. e ROSS, K., 2010]. Nas campanhas de medição, para cada volta do percurso aproximadamente 60 rajadas de dados foram coletadas. Para este trabalho de dissertação, foram efetuadas quinze voltas no percurso escolhido. Os dados coletados para as análises foram perda de quadros e vazão.

A Figura 4.1 mostra os pontos de medição no percurso do cenário em questão.



Figura 4.1. Pontos de medição na UFPA.

A Figura 4.2 mostra o setup da recepção das transmissões no cenário de testes.

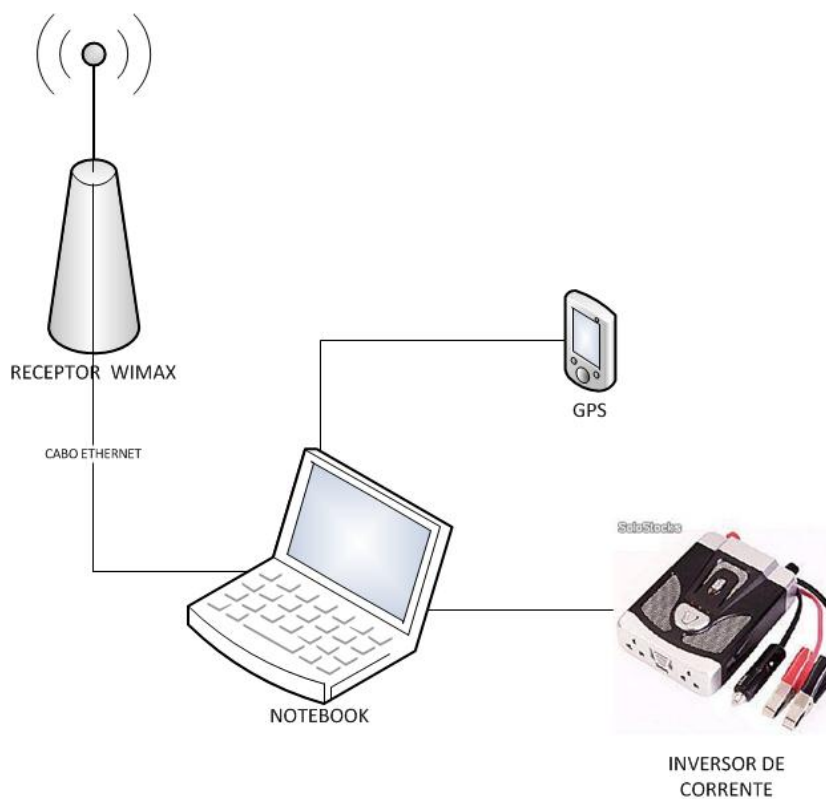


Figura 4.2. Setup de recepção da transmissão no cenário de testes.

## 4.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Antes de qualquer procedimento de ajuste em função de dados coletados, é necessário filtrar os dados considerados espúrios, conhecidos como *outliers*, ocasionados possivelmente por diferentes obstruções durante a trajetória do sinal. Utiliza-se neste trabalho o desvio padrão das medidas como procedimento para a filtragem. Essa métrica estatística é usada como fator limitante dos dados coletados para a análise.

Considerando  $D_p$  o desvio padrão das medidas e  $C_M$  como a curva de ajuste médio dos dados coletados, obtida pela expressão abaixo:

$$a + b \cdot \log(x) \quad (4.1)$$

Então, para que um dado  $Y_i$  seja considerado um *outlier*, as seguintes condições devem ser obedecidas:

$$Y_i \text{ é outlier se } Y_i > C_M + D_p \quad (4.2)$$

$$Y_i \text{ é outlier se } Y_i < C_M - D_p \quad (4.3)$$

Em resumo, significa dizer que se um dado  $Y_i$  possuir um valor maior ou menor que o desvio padrão em relação à curva ajustada, este será considerado como *outlier*.

## 4.3 MODELO EMPÍRICO PROPOSTO

O modelo empírico proposto nessa dissertação é baseado na literatura, em trabalhos passados e em medições e coleta de dados que foram feitas durante o trabalho. Muitas das expressões são adaptações de modelos já existentes focando o comportamento das transmissões nos cenários de testes. O principal objetivo é mostrar sua melhor eficiência em relação a modelos similares citados neste trabalho.

Para a predição de atenuação, vazão e perda de pacotes, está sendo proposto um modelo matemático empírico. Modelos empíricos são baseados em observações e análises em ambientes reais, e pretendem representar o comportamento dos dados coletados [PIDD, M., 2004]. A equação do modelo de perda no percurso, baseada no trabalho de [CASTRO, B., 2010] é mostrada em (4.4). As perdas nos cabos de alimentação não foram descontadas.

$$L = K_1 \log_{10}(d) + K_2 \log_{10}(f) + K_3 + K_0 \quad (4.4)$$

Onde:

$L$  - Perda no percurso prevista, em dB;

- $d$  - Distância, em metros;  
 $f$  - Frequência da Portadora, em MHz;  
 $K_0$  - Fator de ajuste.

Os parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  são obtidos através dos ajustes para perda no percurso mensurado. Tal procedimento é alcançado utilizando método de ajuste dos mínimos quadrados, como mostrado mais adiante.

O fator  $K_0$  relaciona as alturas das antenas de transmissão, recepção e de prováveis obstruções, como construções e vegetações. Possui relação também com o comprimento de onda, de acordo com o mostrado na equação (4.6). Se tiver visada direta, o termo  $K_0$  é omitido da equação (4.4).

Assim, o fator de ajuste  $K_0$  é determinado pela seguinte expressão:

$$K_0 = a - bX \quad (4.5)$$

Onde:

- $a$  e  $b$  – Parâmetros ajustados por mínimos quadrados lineares;  
 $X$  – Variável do polinômio.

A escolha da expressão 4.5 é motivada pelo fato de que o ajuste pretendido é modelado por uma reta. Por isso, é usada uma equação do primeiro grau. Além disso, já foi usada por um trabalho em condições semelhantes de ambiente e que a operação ocorreu na mesma faixa de frequência trabalhada nesta dissertação.

A variável  $X$  é definida de acordo com a equação a seguir:

$$X = \frac{(H_T + H_R)\lambda}{0.1H_{OB}} \quad (4.6)$$

Onde:

- $H_T$  – Altura da transmissão, em metros;  
 $H_R$  – Altura de recepção, em metros;  
 $\lambda$  – Comprimento de ondas, em metros;  
 $H_{OB}$  – Altura da obstrução, em metros.

Uma vez que a previsão de perda no percurso é realizada, uma derivação SNR (*Signal Noise Ratio* ou Relação Sinal-Ruído) pode ser encontrada usando o método mostrado em (4.7) e (4.8).

$$SNR = P_R - N \quad (4.7)$$

Onde:

$P_R$  – Potência Recebida, em dBm;

$N$  – Ruído, em dBm.

O Ruído pode ser encontrado de acordo com a equação (4.8):

$$RUIDO = KTB \quad (4.8)$$

Onde:

$K$  – Constante de Boltzmann =  $1.38 \times 10^{-23} J/K$ ;

$T$  – Temperatura ambiente, em Kelvin;

$B$  – Largura de banda do Sistema, em Hertz.

A equação para perda de propagação é mostrada em (4.9), que é usando também no trabalho de [ABOUL-DAHAB, M.A, 2009].

$$L = P_T + G_T + G_R - P_R \quad (4.9)$$

Onde:

$P_R$  – Potência Recebida, em dBm;

$P_T$  – Potência Transmitida, em dBm;

$G_T$  – Ganho de Transmissão, em dB.

$G_R$  – Ganho de Recepção, em dB.

$L$  – Perda de propagação, em dB.

Neste trabalho é definido que a perda de quadros e a vazão estão relacionadas com o SNR do sistema. Assim, as equações para predição desses parâmetros são mostradas em (4.10) e (4.12).

$$V_{AZ} = (K_1 + K_2 \log_{10}(SNR)) fct \quad (4.10)$$

Onde:

$V_{AZ}$  – Vazão Predita, em Kbps.

O fator  $fct$  é mostrado em (4.11).

$$fct = N \left( \frac{T_{SR}}{T_S} \right) \left( \frac{COD}{COD_R} \right) \quad (4.11)$$

Onde:

$N$  - Número de Bits transmitidos por símbolo;

$T_{SR}$  - Duração do símbolo de Referência = 6.4  $\mu$ s;

$T_S$  - Duração do símbolo, em  $\mu$ s;

$COD$  - Codificação FEC;

$COD_R$  - Codificação FEC de referência =  $\frac{1}{2}$ .

Os valores de referência da codificação FEC (*Forward Error Correction*) e da duração de símbolos são usados para expandir a predição para outras configurações de equipamentos sem fio. O número de bits por símbolo transmitidos é definido pela modulação usada no processo de transmissão e recepção.

Esse fator de correção é usado para um ajuste em função do tipo de equipamento utilizado. Ou seja, se o equipamento for igual, o valor do fator será 1 (um). Caso for diferente, isto é, ter valor de duração de símbolo e/ou codificação FEC diferentes, será ajustado para que a vazão predita seja aproximada para o valor real.

A equação para perda de quadros preditos é mostrada em (4.12).

$$FL = K_1 + K_2 \log_{10}(SNR) \quad (4.12)$$

Onde:

$FL$  - Perda de Quadros predita.

Os valores para  $K_1$  e  $K_2$  nos modelos de vazão e perda de quadros são diferentes. Em ambos os modelos esses valores foram encontrados na otimização LS quando vazão e perda de quadros medidos foram usadas como referência.

#### 4.4 MÉTODO DE AJUSTE POR MÍNIMOS QUADRADOS LINEARES

Mínimos Quadrados Lineares é uma técnica para a construção de um modelo matemático ou estatístico para dados em casos onde o valor ideal fornecido pelo modelo para qualquer ponto é expresso de forma linear em termos dos parâmetros desconhecidos. O modelo resultante montado pode ser usado para resumir os dados, prever valores não observados a partir do mesmo sistema, e compreender os mecanismos que podem ser a base do sistema.

Este método é bastante utilizado na literatura, como em [YANG, M. e SHI, W., 2008], [CHEN, Y. e HSICH, K., 2006] e [CASTRO, B. L. et al, 2010], que o utilizam para

ajustar parâmetros de modelo de propagação usando como referência dados coletados em campanhas de medição.

A abordagem é chamada de Mínimos Quadrados “Lineares” já que a solução possui relação linear sobre os dados. O princípio básico desse processo é a minimização do somatório entre os dados reais (coletados) e os dados simulados. Ou seja, ocorre a minimização dos chamados resíduos, também conhecidos como função objetivo, como mostrado na equação a seguir:

$$F_{ob} = \sum_{i=1}^N (C_i - S_i)^2 \quad (4.13)$$

Onde:

$C_i$  – Dados Coletados (vazão, perdas de propagação e de quadros);

$S_i$  – Dados Simulados.

Para ajustar os parâmetros por meio da solução de MQL, podem-se utilizar derivadas parciais, focando a minimização da função objetivo. O exemplo a seguir mostra um polinômio que deve sofrer o ajuste para determinados dados coletados.

Seja  $C_i = a + b X_i + c X_i^2$ . Seguindo o critério das derivadas parciais em relação aos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$ , aplicando-se em (4.13) e igualando a zero, temos o seguinte:

$$\frac{\partial F_{ob}}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^N (C_i - S_i) \frac{\partial C_i}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial F_{ob}}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^N (C_i - S_i) \frac{\partial C_i}{\partial b} = 0$$

$$\frac{\partial F_{ob}}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^N (C_i - S_i) \frac{\partial C_i}{\partial c} = 0$$

As equações acima formam um sistema cuja solução resulta na obtenção dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$ . De modo análogo, é feito para se calcular os fatores  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ .

A resolução dos mínimos quadrados também pode ser feita por matriz. Este método é o que será utilizado no trabalho, pois poderá ser feito em dois passos e verificar uma melhor influência dos parâmetros no modelo. Pode-se ver a seguir o exemplo do método a ser utilizado, com a mesma equação utilizada no exemplo anterior:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & X_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_i & X_i^2 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_i \end{bmatrix}; \quad x = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Com a definição em (4.14), a solução por MQL pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (4.15)$$

O vetor  $x$  representa a solução dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$ . A resolução pode ser encontrada utilizando o software MatLab. Este foi o método utilizado neste trabalho.

#### 4.5 AJUSTE DO MODELO PROPOSTO

O ajuste do modelo será feito como o trabalho de [CASTRO, B. L., 2010] que, diferentemente de [PALLARDÓ, G. R., 2008], obteve esse ajuste em dois passos:

- a) Passo 1: O cálculo inicial é de ajuste do parâmetro  $K_0$ , utilizando-se da equação (4.5). Primeiramente deve-se considerar a curva de ajuste – que melhor se adequa aos dados coletados. A diferença entre esta curva e os dados coletados origina o vetor de resíduos. Isso pode ser calculado de acordo com a equação (4.16):

$$R_c = C - C_{AJ} \quad (4.16)$$

Onde:

$R_c$  = Vetor de Resíduos;

$C$  = Dados Coletados;

$C_{AJ}$  = Dados obtidos pela curva de ajuste.

- b) Passo 2: Nesta etapa é feito o ajuste dos demais parâmetros do modelo proposto. Teremos um segundo vetor de resíduos como referência para o ajuste, que será expresso como mostrado em (4.17):

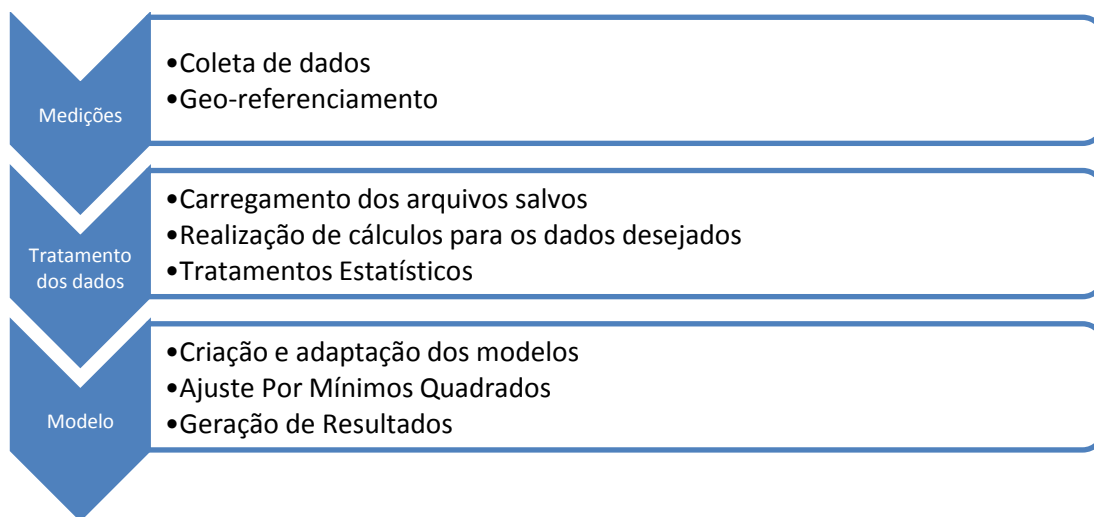
$$R2_c = C - K_0 \quad (4.17)$$

O termo  $K_0$  aparece no cálculo por já ter sido ajustado. Assim, ao invés de utilizar diretamente a curva de ajuste, esta deverá ser subtraída de  $K_0$  para um resultado mais correto, para que não seja ajustado novamente.



Com o vetor de resíduos pronto, o mesmo procedimento do passo 1 é tomado para a obtenção dos coeficientes ( $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ ). Assim, o modelo proposto final de perda de potência com a distância será formado pela união de todos esses coeficientes calculados por MQL.

O processo feito neste trabalho pode ser resumido de acordo com a Figura 4.3.



**Figura 4.3. Metodologia utilizada durante o trabalho de dissertação.**

#### 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi visto neste capítulo uma proposta de metodologia que objetiva um melhor ajuste dos dados coletados e, conseqüentemente, uma melhor predição de perda de propagação e vazão. Além disso, obteve-se ajuste para outras métricas de QoS, como atraso e *Jitter*, bem como de métricas de QoE, como MOS.

No capítulo seguinte serão mostrados o estudo de caso e os resultados, explanando os ajustes, os valores considerados ótimos. Além disso, serão discutidas possíveis influências da camada física nas aplicações, observando se há alguma curva de interdependência entre as métricas e fazendo uma comparação com outro modelo proposto na literatura.

## 5. ESTUDO DE CASO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Serão explicados nesse capítulo os resultados obtidos nas campanhas de medição realizadas de acordo com o exposto anteriormente, tendo como referência os gráficos e tabelas, bem como o modelo gerado a partir de todas as medições e ajustes realizados. Além disso, o resultado dos ajustes, nível de confiança e eficiência em relação a outros modelos também serão elencados.

### 5.1 ESTUDO DE CASO

A partir da metodologia vista no capítulo anterior, com as etapas definidas, é feito o ajuste do modelo no ambiente MatLab®. Primeiramente, a técnica MQL é usada no termo que vincula o comprimento de onda, a altura das antenas de transmissão, recepção e dos obstáculos. Em seguida, serão realizados os ajustes nos termos que dependem da distância e da frequência de operação do sistema.

CASTRO, B. L. (2010) afirma que essa divisão em duas etapas é necessária para que se possa haver um controle da influência de cada termo na predição de perda total do modelo proposto. Isso pôde ser comprovado no modelo de perda de potência utilizado neste trabalho.

#### 5.1.1 FILTRAGEM DOS DADOS

Também visto no capítulo 4, a filtragem dos dados espúrios, ou *outliers*, é importante para que se possam excluir os pontos que estão fora de um comportamento médio dos ambientes de propagação (válido para ambos os cenários). Desta forma, haverá um limite que, estatisticamente, manterá os dados dentro de uma melhor caracterização do modelo. As perdas obtidas durante as medições no cenário em função da distância são mostradas na Figura 5.1.



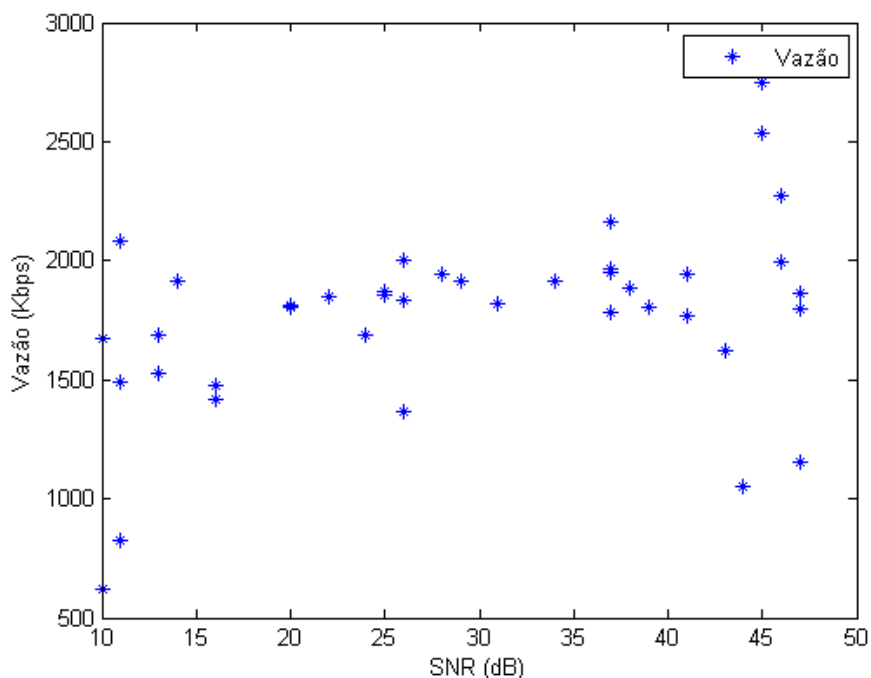


Figura 5.3. Dados coletados para Vazão

## 5.1.2 AJUSTES DOS PARÂMETROS UTILIZADOS

Serão mostrados nesta sessão o processo de ajuste dos parâmetros  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ .

### 5.1.2.1 AJUSTE DO PARÂMETRO $K_0$

Para que o parâmetro  $K_0$  seja ajustado, utilizou-se dos parâmetros do trabalho de [CASTRO, B. L., 2010]. O modelo é validado através dos testes realizados em cidades com ambientes semelhantes aos testes deste trabalho de dissertação. Alguns intervalos de distâncias foram testados enfatizando a perda de potência com a altura de recepção. A partir do conjunto de dados, foi montada a Tabela 5.1, que mostra valores calculados de  $a$  e  $b$ , conforme as equações (4.5) e (4.6), e o valor médio.

Tabela 5.1. Parâmetros obtidos para cada intervalo de distância

Distâncias	Parâmetro $a$	Parâmetro $b$
Entre 80 e 150 metros	79,6	15,5
Entre 750 e 850 metros	27,9	5,8
Entre 0,95 e 1,05 quilômetros	41,8	7,5
Entre 1,5 e 1,6 quilômetros	31,9	5,8
Entre 2,4 e 2,5 quilômetros	31	5,6
<b>Total Médio</b>	<b>42,49</b>	<b>7,68</b>

Esses valores médios de **a** e **b** são os utilizados para o parâmetro  $K_0$ . Assim, a formulação (4.5) ficará de acordo (5.1):

$$K_0 = 42.49 - 7.68X \quad (5.1)$$

O valor de  $X$  é calculado usando a equação 4.6, e o valor obtido é 0.5870. Fazendo o cálculo, tem-se que o parâmetro  $K_0$  é aproximadamente 37,98.

#### 5.1.2.2 AJUSTE DOS PARÂMETROS $K_1$ , $K_2$ E $K_3$

Como explicado no capítulo anterior, os parâmetros  $K_1$  e  $K_2$  são calculados de forma independente para perda de potência, vazão e perda de quadros. Já  $K_3$ , que assim como  $K_0$  aparece apenas uma vez, é calculado apenas uma vez. Utilizando-se dos procedimentos elencados, através dos mínimos quadrados, os valores desses parâmetros para a perda de potência são mostrados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2. Valores obtidos para os parâmetros restantes de perda de potência**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor Encontrado</b>
$K_1$	51.5451
$K_2$	-2.4947
$K_3$	0.00

A Tabela 5.3 mostra os valores de  $K_1$  e  $K_2$  obtidos para a vazão e para perda de quadros durante a transmissão.

**Tabela 5.3. Valores obtidos para os parâmetros de vazão e perda de quadros**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor Para Vazão</b>	<b>Valor Para Perda</b>
$K_1$	6.454	5.489
$K_2$	7.924	-3.177

Com os dados da tabela anterior, e aplicando-os nas equações (4.10) e (4.12), obtêm-se as seguintes formulações:

$$Vaz = (6.454 + 7.924 \log_{10}(SNR)) fct \quad (5.2)$$

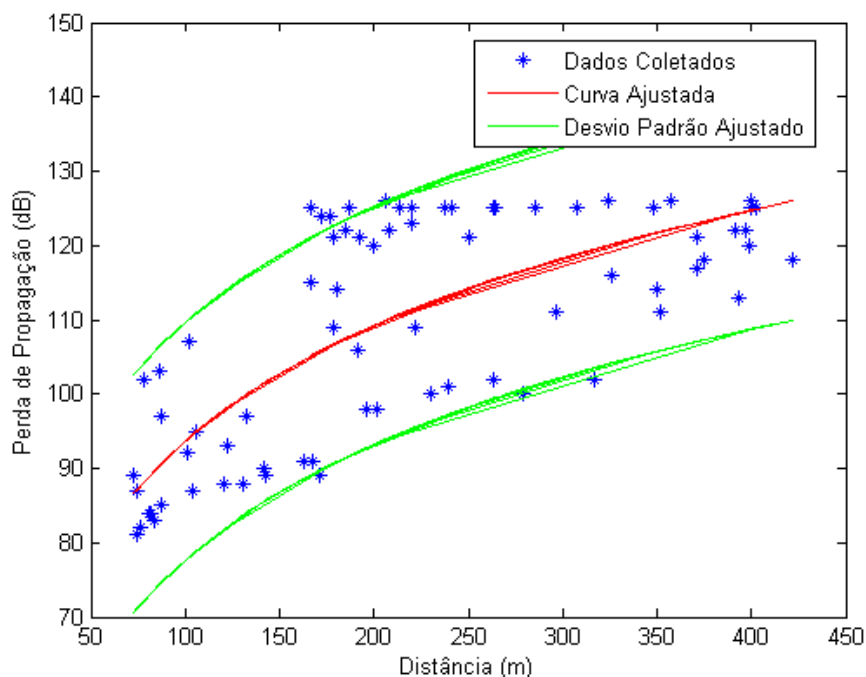
$$FL = 5.489 - 3.177 \log_{10}(SNR) \quad (5.3)$$

Como não houve alteração no equipamento, de acordo com o explicado no capítulo anterior, e utilizando-se da equação (4.11), o valor do fator  $fct$  em (5.2) é igual a 1 (um).

### 5.1.3 MODELO PROPOSTO AJUSTADO

Nesta sessão são apresentados os resultados decorrentes da aplicação das técnicas e fórmulas elencadas no capítulo anterior.

As Figuras de 5.4 a 5.6 mostram a representação gráfica para os ajustes obtidos no item 5.2.2. As curvas de desvio padrão ajustadas foram obtidas pelo uso do MQL, pela equação (4.1) e pelas condições mostradas nas equações (4.2) e (4.3).



**Figura 5.4.** Curva ajustada e desvio padrão dos dados para perda de propagação versus distância

Observa-se que o comportamento da curva ajustada procura englobar, juntamente com o limite estabelecido pelo desvio padrão, a grande maioria dos dados obtidos nas campanhas de medição. O objetivo principal é estabelecer qual seria o comportamento próximo do ideal para os dados coletados, isto é, a distribuição dos dados de forma otimizada, mantendo uma relação perda versus distância sempre de acordo com o modelo proposto neste trabalho.

Esta mesma ideia é usada para as outras métricas, que são a perda de quadros e a vazão. A Figura 5.5 mostra o ajuste da perda de quadros em relação ao SNR.

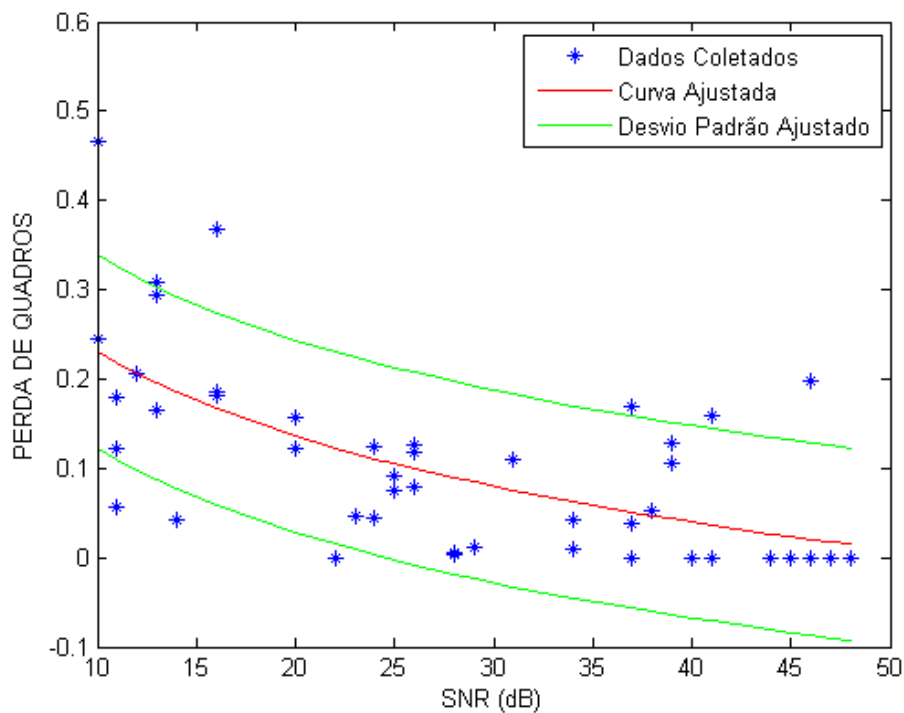


Figura 5.5. Curva ajustada e desvio padrão dos dados para perda de quadros versus SNR

A Figura 5.6 mostra a curva ajustada para a vazão em relação ao SNR.

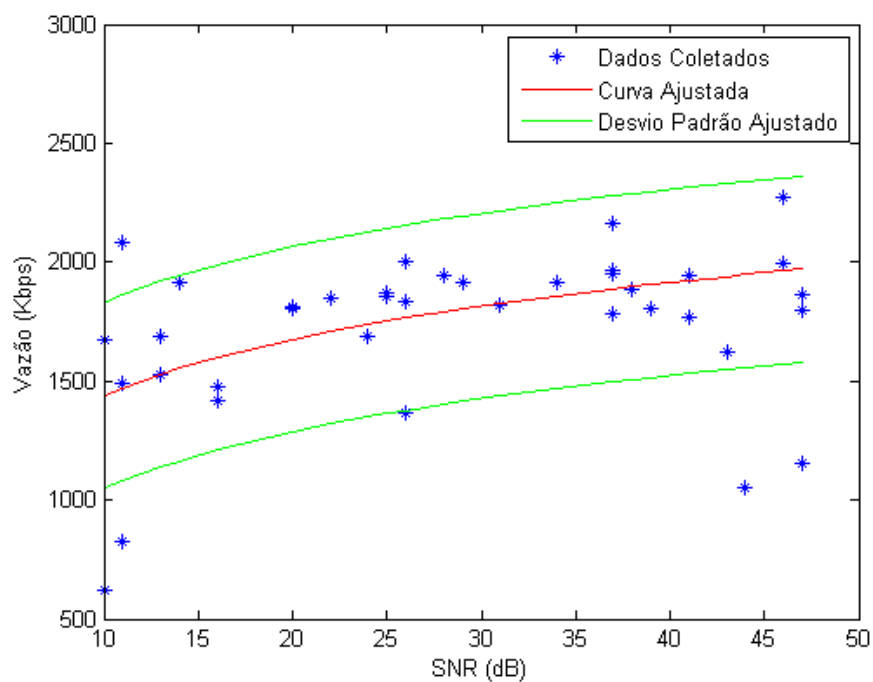
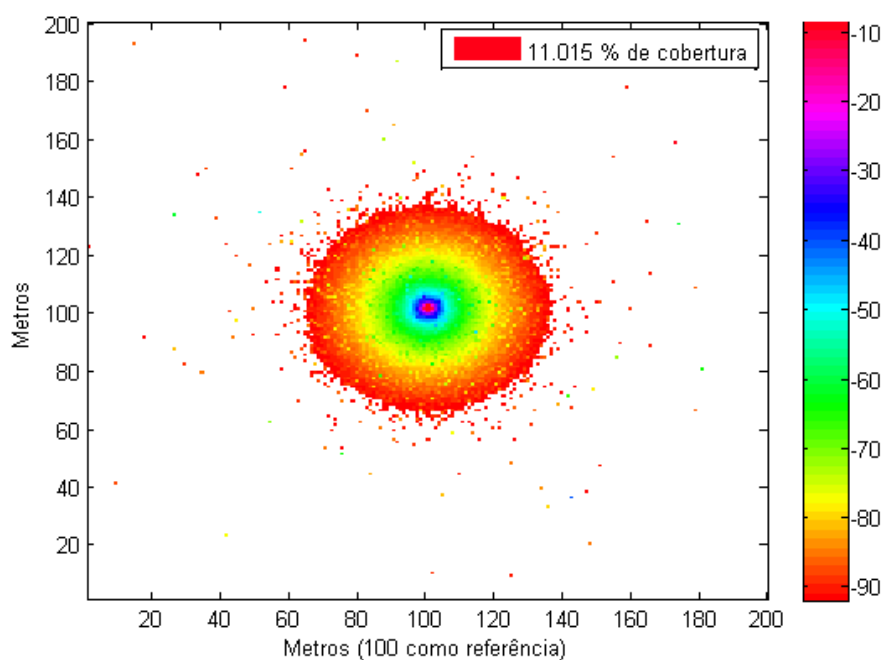


Figura 5.6. Curva ajustada e desvio padrão dos dados para Vazão versus SNR

Observa-se uma aproximação bastante pertinente, em que cerca de 90% dos dados encontram-se na faixa aceitável do modelo otimizado.

Considerando uma área de 2 km x 2 km com resolução de 10 metros, simulações foram feitas usando os modelos obtidos. Desse modo, a título de observação, procurou-se prever o comportamento das métricas utilizadas com uma altura de transmissão diferente da usada neste trabalho, a fim de verificar o desempenho de acordo com o provável de ocorrer a transmissões em que a torre encontra-se a alturas mais elevadas. As Figuras 5.7 a 5.10 mostram os resultados dessas simulações, apresentando cobertura e as métricas utilizadas para a avaliação.

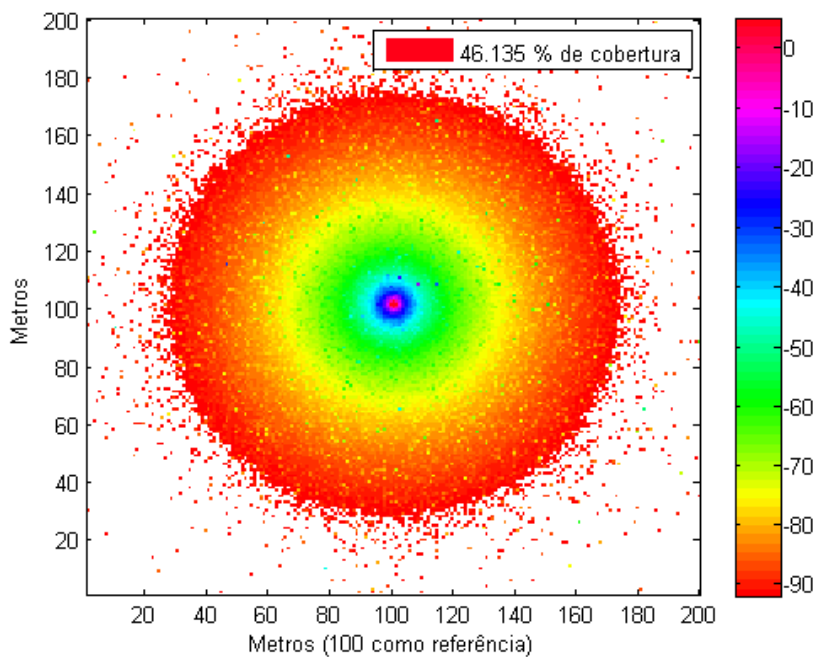


**Figura 5.7. Predição de Cobertura para altura inicial de transmissão (10m)**

A escala de cor, para cada gráfico, refere-se ao valor do parâmetro em questão.

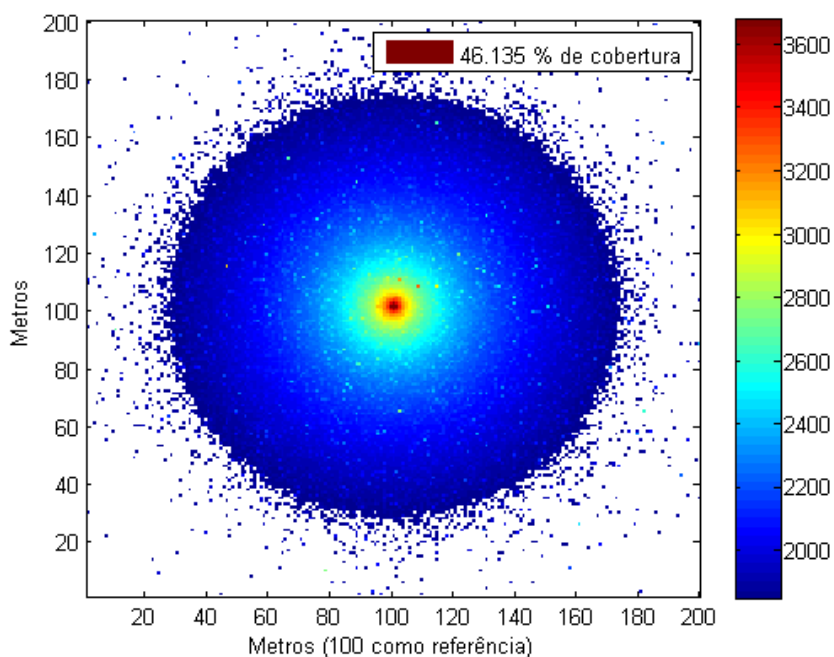
Na Figura 5.8 é mostrado o comportamento da predição de cobertura para transmissão com altura de 30 metros.





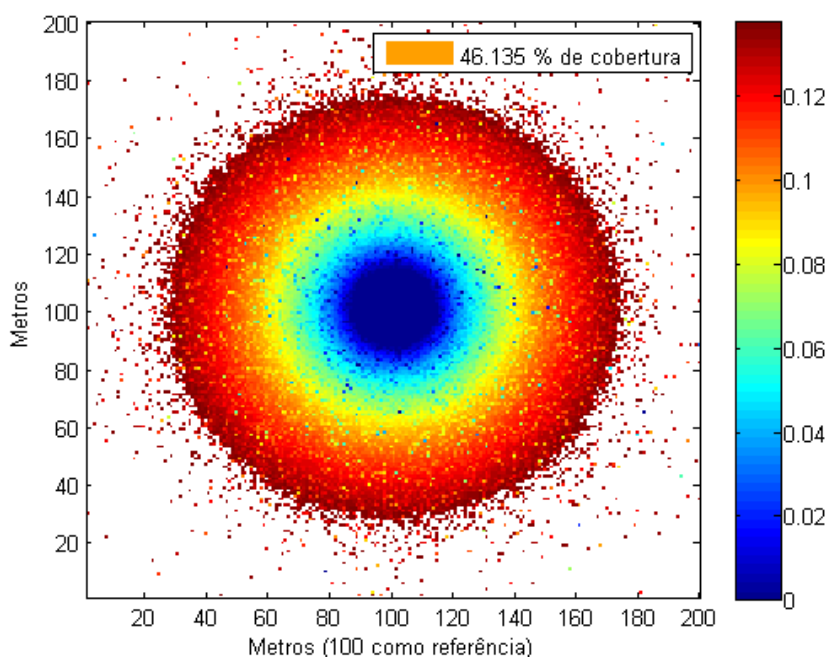
**Figura 5.8. Predição de Cobertura para altura de transmissão de 30m**

A Figura 5.9 apresenta a predição da vazão para altura de transmissão de 30 metros.



**Figura 5.9. Predição de vazão para altura de transmissão de 30m**

A Figura 5.10 mostra a predição de perda de quadros para altura de transmissão de 30 metros.



**Figura 5.10. Predição de perda de quadros para altura de transmissão de 30m**

É possível observar, como se esperava, que a vazão da rede sem fio tende a um melhor comportamento quanto mais próximo da antena de recepção. Cerca de 46,14% de cobertura abrange os pontos com vazão de maior valor.

Para efeitos comparativos, o modelo proposto foi comparado com outros modelos encontrados na literatura. É possível observar na Figura 5.11 as curvas ajustadas para cada modelo. É necessário considerar, porém, que os modelos também foram ajustados aos dados coletados. Assim, os modelos estavam adaptados e em condições de igualdade.

A Tabela a seguir refere-se à Figura 5.11, mostrando um comparativo entre o modelo proposto e os da literatura utilizados para a comparação.

**Tabela 5.4. Comparação estatística do modelo proposto com os citados no trabalho**

<b>Modelos</b>	<b>RMS</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Modelo Proposto</b>	9,7	12,43
<b>COST-231 Hata</b>	11,5	9,60
<b>Modelo MSUI</b>	11,1	16,43

Não se podem avaliar as curvas pelo desvio padrão. Como a melhor aproximação se dá pelo menos erro, é bem provável que o menor desvio padrão não seja da curva ajustada no modelo proposto nesse trabalho.

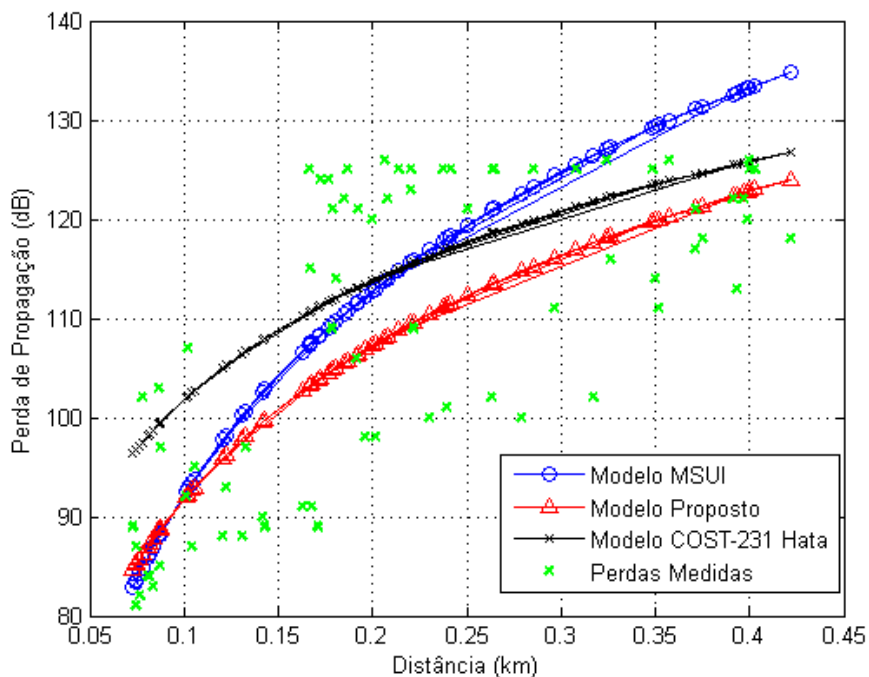


Figura 5.11. Comparação entre o modelo proposto e os de MSUI e COST-231 Hata

## 5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi observado, com os resultados obtidos, que o modelo proposto apresenta uma predição muito boa para os dados. Pelo uso do MQL, a curva de ajuste mostrou-se em uma concordância bastante relevante com o ajuste procurado pela modelagem dos dados. Assim, a metodologia do trabalho, que buscava um eficiente ajuste do modelo proposto, pode ser avaliada como objetivo alcançado.

É importante considerar que, o bom comportamento do modelo proposto vem apontar novas possibilidades de estudos para implementações de redes cujos cenários possuem características que se aproximam com as do cenário de testes utilizado nesse trabalho.

A avaliação de desempenho do modelo proposto com outros dados é pretendida, visto que ajustes futuros no modelo proposto poderão ser feitos para torna-lo capaz de prever com eficiência, as perdas de propagação em ambientes que apresentem mobilidade do receptor em relação ao transmissor.

## 6. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo para predições de medidas de desempenho em tecnologia WiMAX na faixa ISM 5.8 GHz. Foi feita uma comparação entre o modelo proposto e os de MSUI e COST-231 Hata.

As etapas da obtenção do modelo foram desde as campanhas de medição, após a montagem de protótipo na UFPA, com geo-referenciamento para o tratamento dos dados, passando por análises estatísticas, modelagem com equações de propagação baseadas em trabalhos anteriores e em literaturas, ajuste por mínimos quadrados lineares e simulação dos modelos com os dados coletados para a obtenção dos resultados.

Observou-se um ótimo comportamento da curva de ajuste, mantendo, mesmo após a delimitação dos dados utilizando-se do desvio padrão, uma porcentagem de quase 90% dos dados para a análise.

A importância dos modelos é percebida pelas diferenças dos erros RMS. Para a perda de propagação, o modelo proposto teve um erro de aproximadamente 9 dB, enquanto os modelos utilizados para comparação tiveram erros acima de 11. Para os dados coletados no estudo de caso utilizado, isso mostra que o modelo proposto possui um melhor comportamento em comparação com os modelos MSUI e COST-231 Hata, validando sua eficiência ao cenário.

Como trabalhos futuros, pretende-se a generalização do modelo para outros cenários, utilização de aplicações multimídia para as transmissões, avaliando outras métricas de QoS, dentre as quais atraso e *jitter*. Além disso, fazer também uma avaliação de métricas de QoE, enfatizando a relação da camada física com a percepção da aplicação pelo usuário.

Dentre algumas dificuldades encontradas, destacam-se: uma série de testes teve que ser feita com as antenas para que se pudessem obter configurações de transmissão desejadas. O processo de modelagem utilizando o MatLab precisou de um tempo considerável, visto a necessidade dos estudos em relação ao método de ajuste utilizado, que foi o MQL. Outra dificuldade foi a tentativa de obter, já neste trabalho, as métricas de QoE por meio da ferramenta EvalVid, que pelo tempo e pelo insucesso de transmissões, não puderam ser incluídas neste trabalho, passando a incorporar como parte dos trabalhos futuros.

Algumas contribuições desta dissertação foram:

- a) Aperfeiçoamento pessoal em relação ao método de otimização dos Mínimos Quadrados Lineares;
- b) O uso de várias técnicas de avaliação de desempenho, incluindo a aferição – por meio de prototipação e coleta de dados – e modelagem matemática, para a geração do modelo proposto neste trabalho;
- c) O possível uso deste documento para alunos de graduação, a fim de aumentar conhecimento sobre possibilidades de testes, além da teoria revisada;
- d) Produção de literatura científica, artigos, etc.;
- e) Possibilidades de uso desse modelo para outros dados e melhoramento para contribuição no âmbito de desempenho da tecnologia WiMAX;
- f) Eficiência do modelo em relação aos comparados permite seu uso para outros tipos de aplicações, como *streaming* de vídeo.

Alguns artigos foram publicados durante a pesquisa:

1. **A Cross Layer Model to Predict Performance Parameter on OFDM-Based Wireless Networks.** In: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE - IMOC, 2011, Natal - RN.
2. **A New Proposal to Provide Estimation of QoS and QoE over WiMAX Networks: An approach based on computational intelligence and discrete-event simulation.** In: Latin-American Conference on Communications - LATINCOM, 2011, Belém - PARÁ. IEEE LATINCOM 2011 / Communication QoS, Reliability and Performance Modeling, 2011.

## REFERÊNCIAS

- ABHAYAWARDHANA, V. S.; WASSELL, I. J.; CROSBY, D.; SELLARS M. P. e BROWN, M.G., **Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems**. Proceedings of IEEE Conference on Vehicular Technology, Stockholm, Sweden, Vol. 1, pp. 73-77, 2005.
- ABOUL-DAHAB, M.A.; KAMEL, H.M., **Methodology for Calculating Path Loss Upper and Lower Bounds for WiMAX New Technologies**, Mobility and Security (NTMS), 2009, 3<sup>rd</sup> International Conference on, pp. 1-5, 2009.
- ANDREWS, J.; GHOSH, A. e MUHAMED, R., **Fundamentals of WiMAX - Understanding Broadband Wireless Networking**, Prentice Hall, 2007.
- BARNETT, V. e LEWIS T., **Outliers in Statistical Data**, 3<sup>rd</sup> edition. J. Wiley & Sons 1994, XVII. 582 pp.
- BEGOVIC, P.; BEHLILOVIC, N. e AVDIC, E., **A novel approach for evaluating applicability of existing empirical propagation models to coverage planning in 3.5 GHz WiMAX systems**, Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2011 18<sup>th</sup> International Conference on, pp.1-9, 2011.
- CASTRO, B. L., **Modelo de Propagação Para Redes Sem Fio Fixas da Banda de 5,8 Ghz em Cidades Típicas da Região Amazônica**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 2010.
- CASTRO, B. L.; GOMES, I. R.; RIBEIRO, F. C. J. e CAVALCANTE, G. P. S., **COST231-Hata and SUI Models Performance Using a LMS Tuning Algorithm on 5.8 GHz in Amazon Region Cities**, European Conference on Antennas and Propagation-EUCAP, Barcelona, Julho de 2010.
- CHAPMAN, S. J., **Essentials of MATLAB Programming**, CL-Engineering, 2<sup>a</sup> edição, Novembro de 2008.
- CHEN, Y. e HSICH, K., **A Dual Least-Square Approach of Tuning Optimal Propagation Model for Existing 3G Radio Network**, IEEE 63<sup>rd</sup> Vehicular Technology Conference, Vol.6, pp. 2942-2946, Maio de 2006.
- DELANNOY, P.; MAROT, M. e BECKER, M., **WiMAX quality-of-service estimations and measurement**, Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronics Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009.1st International Conference on, vol., no., pp. 503-509, Maio de 2009.
- DOCSIS Specifications, 2011, disponível em <http://www.cablelabs.com>.
- ENDROYONO e HENDRANTORO, G., **Cross-layer Optimization Performance Evaluation of OFDM Broadband Network on Millimeter Wave Channels**, Wireless and Optical Communications Networks, 2008, WOCN '08. 5th IFIP International Conference on pp.1-5, 2008.
- GREENGRASS, J.; EVANS, J.; e BEGEN, A., **Not All Packets Are Equal, Part I: Streaming Video Coding and SLA Requirements**, IEEE Internet Computing, 2009, pp. 70 - 75.
- IEEE Standard 802.11n-2009 –IEEE Standard for Local and metropolitan area networks **Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications.Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput**.

IEEE Standard 802.11v-2011 – **IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications.**

IEEE Standard 802.16-2001 – **IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**, disponível em: <http://ieee802.org/16/published.html>.

IEEE Standard 802.16-2004 – **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**, disponível em: <http://ieee802.org/16/published.html>.

IEEE Standard 802.16f-2005 - **IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems-Amendment 1: Management Information Base**, disponível em: <http://ieee802.org/16/published.html>.

IEEE Standard 802.16h-2010 – **IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Improved Coexistence Mechanisms for License-Exempt Operation.**

IEEE Standard 802.16j-2009 – **IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 1: Multiple Relay Specification**, disponível em <http://ieee802.org/16/published.html>.

IEEE Standard 802.m-2011 – **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems - Amendment 3: Advanced Air Interface**, disponível em: <http://ieee802.org/16/pubs/80216m.html>.

JAIN, R., **Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques For Experimental Design Measurements Simulation And Modeling**, Abril de 1991.

MARDENI, R. e PRIYA, T., **Optimised COST-231 Hata Models for WiMAX Path Loss Prediction in Suburban and Open Urban Environments**, Modern Applied Science Vol. 4, No. 9; Setembro de 2010.

MOON, T. K. e STIRLING, W. C., **Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing**, Prentice Hall, 1999.

NIYATO, D.; HOSSAIN, E.; e DIAMOND, J., **IEEE 802.16/WiMAX-Based Broadband Wireless Access and Its Application for Telemedicine/E-health Services**, Wireless Communications, IEEE , vol.14, no.1, pp.72-83, Fevereiro de 2007.

PALLARDÓ, G. R., **On DVB-H Radio Frequency Planning: Adjustment of a Propagation Model Through Measurement Campaign Results**, Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Gävle, Suécia, Março de 2008.

PEH, E. W. C., **Experimental Study of Voice over IP Services over Broadband Wireless Networks**, 22<sup>nd</sup> International Conference on Advanced Information Networking and Applications, pp. 834 – 839, 2008.

PIDD, M., **Computer Simulation in Management Science**, John Wiley & Sons, 5<sup>th</sup> edition, 2004.

RAPPAPORT, T., **Wireless Communications: Principles and Practice**, Prentice Hall and Emerging Technologies Series, 2<sup>nd</sup> edition, 2000.

RILEY, K.F., HOBSON, M.P. e BENCE, S. J., **Mathematical Methods for Physics and Engineering**, Cambridge University Press, 3<sup>th</sup> edition, 2006.

SANTANA, M. J.; SANTANA, R. H.; FRANCES, C. R. L. e ORLANDI, E. R. C., **Tools and Methodologies For Performance Evaluation of Distributed Systems – A Comparison Study**. In The Proceedings of the: Summer Computer Simulation Conference, Arlington, Virginia, Arlington, p. 124-28, 1997.

SCALABRINO, N.; DE PELLEGRINI, F.; RIGGIO, R.; MAESTRINI, A.; COSTA, C.; e CHLAMTAC, I., **Measuring the Quality of VoIP Traffic on a WiMAX Testbed**, 3rd International Conference on Testbeds and Research Infrastructure for the Development of Networks and Communities, 2007. TridentCom 2007, pp. 1-10.

Site do projeto NAVEGAPARÁ. Acessado entre Julho e Outubro de 2011. Disponível em <http://www.navegapara.pa.gov.br>.

UKIL, A., **Cross-layer optimization in QoS aware next generation wireless networks Information**, Communications and Signal Processing, 2009. ICICS 2009. 7<sup>th</sup> International Conference on, pp. 1-5, 2009.

WiMAX Forum, 2006, **Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation**, disponível em: <http://www.wimaxforum.org>. Acessado entre Junho e Agosto de 2011.

WiMAX Forum, 2010, **WiMAX and the IEEE 802.16m Air Interface Standard**, disponível em <http://www.wimaxforum.org>. Acessado em Outubro de 2011.

WiMAX Fórum, Release 1.0, disponível em <http://www.wimaxforum.org/news>.

Yang, M. e Shi, M., **A Linear Least Square Method of propagation Model Tuning for 3G Radio Network Planning**, Fourth International Conference on Natural Computation, Vol. 6, pp. 150-154, Outubro de 2008.