



**PUC**  
**CAMPINAS**  
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS  
E DE TECNOLOGIAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO-SENSU***

**KERLLA DE SOUZA LUZ OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DA INSTABILIDADE DA MODULAÇÃO  
EM DIFERENTES AMBIENTES**

**PUC CAMPINAS**

**2008**

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS**

**GRÃO-CHANCELER**

Dom Bruno Gamberini

**MAGNÍFICO REITOR**

Prof. Pe. Wilson Denadai

**VICE-REITORA**

Prof<sup>a</sup>. Dra. Ângela de Mendonça Engelbrecht

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

Prof<sup>a</sup>. Dra. Vera Engler Cury

**DIRETOR DO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE  
TECNOLOGIAS**

Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella

**COORDENADOR DO PROGRAMA DE**

**PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO DE REDES DE  
TELECOMUNICAÇÕES**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GESTÃO DE REDES E SERVIÇOS**

Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella

Ficha Catalográfica  
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e  
Informação – SBI – PUC-Campinas

t621.381536 Oliveira, Kerlla de Souza Luz  
O48a Avaliação da instabilidade da modulação em diferentes ambientes / Kerlla de Souza  
Luz Oliveira - Campinas: PUC-Campinas, 2008.  
75p.

Orientadora: Norma Reggiani  
Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências  
Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Inclui bibliografia.

1. Modulação digital. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3. Sistemas de telecomunicações.  
4. Redes de computação. 5. Comunicações digitais. I. Reggiani, Norma. II. Pontifícia Universidade  
Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica. III. Título.

22.ed.CDD – t621.381536

**KERLLA DE SOUZA LUZ OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DA INSTABILIDADE DA MODULAÇÃO  
EM DIFERENTES AMBIENTES**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-Graduação na área de concentração Gestão de Redes e Serviços, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Norma Reggiani

**PUC CAMPINAS**

**2008**

**KERLLA DE SOUZA LUZ OLIVEIRA**

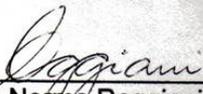
**AVALIAÇÃO DA INSTABILIDADE DA MODULAÇÃO EM  
DIFERENTES AMBIENTES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

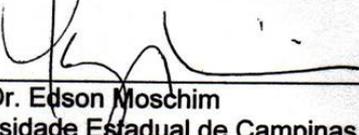
Área de Concentração: Gestão de Redes e Serviços .

Orientadora: Profa. Dra. Norma Reggiani

Dissertação defendida e aprovada em 29 de maio de 2008 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Norma Reggiani  
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Edson Moschim  
Universidade Estadual de Campinas

Dedico este trabalho à minha família: meu esposo, minha mãe, ao meu pai e a minha irmã, como prova de agradecimento pelo carinho e pela força que jamais me negaram. À Kamilla que mesmo antes de nascer já tomou conta do meu ser.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é resultado final de uma longa jornada que por vezes pareceu, incerta. Conflitos internos me fizeram, muitas vezes, sofrer pelas escolhas tomadas, mas ao mesmo tempo me fizeram crescer.

Para dar o crédito a quem o merece, não posso deixar de mencionar algumas pessoas que me deram um suporte imensurável nesta tão sonhada vitória.

Em primeiro lugar, à senhora Luizinha, minha mãe que sempre serviu e serve de exemplo para me tornar quem sou hoje. Ao senhor Pedro, meu pai, a quem daria o mundo de presente, se pudesse pelo grande coração que tem. Ao Klecio meu esposo, que há cinco anos me apóia de alguma forma, nunca colocando barreiras em cada loucura que proponho fazer. À Dona Lourdes que sempre acreditou em mim, comprando comigo todos os meus sonhos. Aos inúmeros familiares e amigos que acreditaram em mim. Aos amigos professores do ITPAC que sempre tiveram uma palavra de encorajamento para falar.

Sem nenhum exagero, preciso agradecer muitíssimo aos professores: Norma Reggiani e Omar Branquinho, por tudo: atenção, compreensão, paciência, companheirismo e amizade, eu devo esse trabalho a cada um deles.

Não posso deixar de lembrar dos amigos que fiz durante as aulas do mestrado: Alessandra, Ranieri, Lotito, Lino, Rodovalho e Eduardo, cada um contribuiu de alguma forma para o fortalecimento do meu conhecimento.

Por fim, e mais importante, gostaria de agradecer a Deus por ser tão presente em minha vida e me orientar a fazer a escolha certa.

Apesar de longo e incerto, esse caminho da pesquisa é o percurso no qual pretendo me manter durante os próximos anos, e é bom saber que posso continuar contando com todos aqueles que acabo de mencionar.

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota”.

Theodore Roosevelt - Prêmio Nobel da Paz (1906)  
(1858 – 1919)

# RESUMO

Oliveira, Kerlla de Souza Luz. Avaliação da Instabilidade da Modulação em Diferentes Ambientes. Folhas de acordo com ficha catalográfica t621.381536. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, 2008.

Este trabalho avalia a cobertura de uma *WMAN* (*Wireless Metropolitan Area Network*), com características de um sistema *WiMAX* (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) operando em 5.8GHz, de acordo com a modulação utilizada. Para tanto, empregaram-se tanto predições de cobertura quanto medidas de campo. A modulação de uma antena depende do valor da potência recebida e a atenuação desta potência varia de acordo com a região por onde o sinal se propaga. Neste trabalho foi avaliada a mudança da modulação dentro da área de cobertura, utilizando-se o modelo de *Shadowing* para descrever a atenuação do sinal de acordo com o ambiente considerado. Como resultado pôde-se observar a associação de áreas com dois tipos de modulações possíveis, devido às faixas de sobreposição de modulação geradas pelo desvio padrão do valor médio do sinal.

## Palavras-Chave

*Worldwide Interoperability for Microwave Access, Shadowing, modelo de propagação.*

# ABSTRACT

Oliveira, Kerlla de Souza Luz. Evaluation of the Instability of the Modulation in Different Environments. Folhas de acordo com ficha catalográfica t621.381536. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, 2008.

*This work evaluates the coverage of a WMAN (Wireless Metropolitan Area Network), with characteristics of a system WiMAX (Worldwide Interoperability will be Microwave Access) operating in 5.8GHz, in accordance with the used modulation. In order to reach this goal, predictions of field covering were used and measurements were made. The modulation of a adaptative antenna depends on the value of the received power and the attenuation of this power varies according to the region where the signal propagates. In this work the distribution of the modulation in the coverage area was evaluated using the Shadowing model to describe the attenuation of the signal in accordance with the considered environment. As a result, it could be observed the association of areas with two types of possible modulation due to the overlap of modulation bands generated by the standard deviation of the signal medium value.*

## **Key Words**

*Worldwide Interoperability for Microwave Access, Shadowing, propagation model.*

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DE MODULAÇÃO ADAPTATIVA DO PADRÃO IEEE 802.16 .....	26
FIGURA 2 – REFLEXÃO E REFRAÇÃO DO FEIXE DE LUZ AO PASSAR DO AR À ÁGUA .....	29
FIGURA 3 – EFEITOS DA REFRAÇÃO.....	30
FIGURA 4 – ELIPSÓIDE DE FRESNEL.....	32
FIGURA 5 – CONSTELAÇÃO DO SINAL QPSK.....	43
FIGURA 6 – CONSTELAÇÃO DO SINAL 16QAM.....	44
FIGURA 7 – ÁREAS DO ESTUDO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ERRO. ....	45
FIGURA 8 – CURVAS DO BER PARA SISTEMAS SEM CORREÇÃO DE ERRO.....	46
FIGURA 9 – CURVAS DO BER DE SISTEMAS DE CORREÇÃO DE ERROS.....	47
FIGURA 10 – MODULAÇÃO OFDM IMPLEMENTADA POR MEIO DE BANCO DE FILTROS .....	51
FIGURA 11 - COMPORTAMENTO DO BER EM FUNÇÃO DO SNR PARA DIFERENTES TIPOS DE MODULAÇÃO .....	54
FIGURA 12 – TAXA DE ERRO PARA SISTEMAS PSK E QAM.....	54
FIGURA 13 – ATENUAÇÃO DO SINAL PARA $B = 3,2$ E $B = 5,0$ .....	57
FIGURA 14 – MAPA DE MODULAÇÃO COM NÍVEIS DE SENSIBILIDADE PARA $B = 3,2$ .....	59
FIGURA 15 – MAPA DE MODULAÇÃO COM NÍVEL DE SENSIBILIDADE PARA $B = 5$ .....	59
FIGURA 16 – ATENUAÇÃO DO SINAL COM NÍVEIS DE SENSIBILIDADE PARA $B = 3,2$ .....	60
FIGURA 17 – ATENUAÇÃO DO SINAL COM NÍVEIS DE SENSIBILIDADE PARA $B = 5$ .....	61

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA O PADRÃO 802.16.....	24
QUADRO 2 - VALORES DE BETA PARA DIFERENTES AMBIENTES .....	39
QUADRO 3– RUÍDO TÉRMICO VARIÁVEL (RUÍDO DE FM) .....	52
QUADRO 4 – PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO.....	56
QUADRO 5 – SENSIBILIDADE PARA CADA NÍVEL DE MODULAÇÃO.....	56
QUADRO 6 – LEGENDA COMPLEMENTAR DA FIG. 12, ASSOCIANDO OS NÚMEROS DE M=1 A M=8 ÀS MODULAÇÕES.....	58
QUADRO 7 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM DIFERENTES AMBIENTES .....	62
QUADRO 8 - DADOS EXTRAÍDOS DA ANÁLISE DAS MEDIDAS DE CAMPO.....	64
QUADRO 9 - CÁLCULO DA ATENUAÇÃO COM DIFERENTES VALORES DE B .....	66
QUADRO 10 – VALORES DE QUI-QUADRADO .....	66
QUADRO 11 - ESPECIFICAÇÕES RÁDIO .....	67
QUADRO 12 - NÍVEL MÁXIMO DE MODULAÇÃO RECOMENDADO PELA <i>ALVARION</i> .....	67

# LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - RELAÇÃO ENTRE O VALORES DE SNR E A FAIXA DE VARIAÇÃO DEVIDO AO DESVIO PADRÃO.....	68
GRÁFICO 2 - MODULAÇÃO MEDIDA E LIMITE INFERIOR DA FAIXA DE MODULAÇÃO ESPERADA .....	69
GRÁFICO 3 - MODULAÇÃO MEDIDA E LIMITE SUPERIOR DA FAIXA DE MODULAÇÃO ESPERADA .....	69

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADSL	=	Asymmetric Digital Subscriber Line
AP	=	Access Point
BER	=	Bit Error Rate
CDMA	=	Code Division Multiple Access
DQPSK	=	Differential Quadrature Phase Shift Keying
E.I.R.P.	=	Equivalent Isotropic Radiated Power
ERB	=	Estação Rádio Bases
FDMA	=	Frequency Division Multiple Access
IEEE	=	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ITU-T	=	International Telecommunication Union – Radiocommunication Group
LAN	=	Local Area Network
LF	=	Low Frequency
LLC	=	Logical Link Control
LOS	=	Line Of Sight
MAC	=	Media Access Control
MIB	=	Management Information Base
NLOS	=	Non Line Of Sight
OFDM	=	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PSK	=	Phase Shift Keying
QAM	=	Quadrature Amplitude Modulation
RF	=	Radio Freqüência
S/N	=	Signal/ Noise ratio
SHF	=	Super High Frequency
SNR	=	Signal Noise Ratio
TDMA	=	Time Division Multiple Access
UHF	=	Ultra High Frequency
VHF	=	Very High Frequency
VLf	=	Very Low Frequency
WAN	=	Wide Area Network
WEP	=	Wired Equivalent Privacy
Wi-Fi	=	Wireless Fidelity
WLAN	=	Wireless Local Area Network
WMAN	=	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	=	Wireless Personal Area Network

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1. Contextualização do Problema .....	18
1.2. Justificativa para o desenvolvimento do trabalho.....	19
1.3. Objetivo do trabalho.....	20
1.4. Resultados esperados .....	20
1.5. Delimitação da pesquisa.....	21
1.6. Metodologia utilizada .....	21
1.7. Organização da dissertação .....	21
<b>2. REDES METROPOLITANAS SEM FIO</b> .....	<b>22</b>
2.1. O Padrão IEEE 802.16.....	22
2.2. Características da camada física do IEEE 802.16.....	25
2.3. <i>Quality of Service</i> (QoS) para redes banda larga sem fio .....	26
<b>3. PROPAGAÇÃO E PREDIÇÃO</b> .....	<b>28</b>
3.1. Mecanismos de Propagação.....	28
3.1.1. Reflexão.....	28
3.1.2. Refração .....	30
3.1.3. Difração .....	31

3.1.4. Espalhamento .....	33
3.2. Atenuação do Sinal.....	33
3.2.1. Modelo de propagação no espaço livre.....	33
3.2.2. Modelo de Okumura .....	34
3.2.3. Modelo de Hata .....	36
3.2.4. Modelo de <i>Shadowing</i> .....	37
3.3. Desvanecimento .....	39
4. MODULAÇÃO .....	41
4.1. Modulação adaptativa .....	41
4.1.1. QPSK.....	42
4.1.2. QAM .....	43
4.2. Taxa de erro nas comunicações digitais .....	45
4.2.1. <i>Bit error rate (BER)</i> .....	45
4.2.2. Corretor de erros .....	47
4.3. Técnicas de múltiplo acesso .....	48
4.3.1. <i>Frequency Division Multiple Access (FDMA)</i> .....	48
4.3.2. <i>Time Division Multiple Access (TDMA)</i> .....	49
4.3.3. <i>Code Division Multiple Access (CDMA)</i> .....	49

4.3.4. <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)</i> .....	50
4.4. <i>Signal Noise Rate (SNR)</i> .....	52
4.5. Modulação X BER .....	53
5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	55
5.1. Resultados dos cálculos.....	55
5.1.1. Resultados para $\beta=3,2$ e $\beta=5$ .....	57
5.1.2. Regiões de superposição .....	61
5.2. Medidas de campo.....	62
5.2.1. Valores de SNR e modulações medidas.....	62
5.2.2. Modelo de <i>Shadowing</i> .....	64
5.2.3. Determinação da modulação .....	67
6. CONCLUSÃO.....	70
6.1. Trabalhos Futuros .....	71
7. REFERÊNCIAS .....	72
8. BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS .....	74

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização do Problema

Vivemos um momento em que se torna cada dia mais intenso o debate no mercado sobre redes sem fio, em particular redes em grandes áreas – *Wireless Metropolitan Area Network (WMAN)*, cujo padrão é o IEEE 802.16<sup>1</sup>, também conhecido como *Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)*. É cada vez maior a necessidade de transmissão sem fio, móvel ou não, em banda larga, para dados, voz e multimídia. A implantação de um padrão nos leva a alguns questionamentos, acerca de parâmetros como: frequência, cobertura e, principalmente, a qualidade final do serviço ao usuário.

Tendo em vista que a modulação adapta-se de acordo com a potência do sinal e que o valor da potência pode variar em torno de um valor médio, conclui-se que dessa forma, a propagação do sinal sofre variações para um mesmo ponto. Uma vez que, esta variação de modulação pode afetar a qualidade do serviço oferecido, o presente trabalho visa avaliar esta possível variação de modulação, para diferentes ambientes.

Neste trabalho trataremos a tecnologia que serviu como base para os estudos de pré-WiMAX (fixo) ao invés de IEEE 802.16. Pois, os testes realizados, os quais estão melhores explanados no Capítulo 5, não foram medidos com uma antena puramente WiMAX. No então momento, tínhamos à disposição uma antena cujo padrão é o IEEE 802.11 antecessor ao IEEE 802.16 funcionando sob a técnica de modulação

---

<sup>1</sup> Conhecida como WIMAX acesso banda larga capaz de conectar grandes áreas geográficas sem a necessidade de investimento em infra-estrutura de alto custo através de antenas localizadas nas estações rádio base.

*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), que estará melhor descrita no Capítulo 4.

## **1.2. Justificativa para o desenvolvimento do trabalho**

Pode-se facilmente observar que no Brasil nos últimos anos houve um crescimento da necessidade de acesso banda larga por uma considerável porcentagem da população. Visto que há também, um grande interesse comercial pelas tecnologias de transmissão de dados em banda larga que é resultante desse crescimento, uma vez que é rentável o atendimento dessa demanda.

O padrão IEEE 802.16 apareceu como proposta para solucionar o problema de acesso banda larga à última milha, oferecendo conexão *outdoor* aos provedores de serviço de comunicação. Para os operadores e provedores de serviço, os sistemas construídos sob o padrão 802.16 representam um terceiro canal, de fácil implantação, capaz de conectar residências e corporações ao núcleo das redes de telecomunicações em todo o mundo (LIMA, 2004).

Tendo em vista o foco de serviços propostos pelo padrão IEEE 802.16, dos quais podemos citar:

Banda Larga sob Demanda, onde a conexão à Internet em banda larga tem se tornado crítica para várias empresas, que tendem a se deslocar para regiões onde o serviço esteja imediatamente disponível; demora para instalação quando há disponibilidade; construções antigas podem representar dificuldades na passagem do cabeamento por não terem sido projetadas para esta finalidade; portabilidade (fixa ou móvel) para que se torne disponível conexão em alta-velocidade sob demanda para eventos temporários.

Banda Larga Residencial, onde restrições gerenciais e geográficas impossibilitam que as tecnologias a cabo e DSL<sup>2</sup> cheguem a muitos consumidores de banda larga em potencial.

Áreas não assistidas, onde a tecnologia sem fio tende a ser a alternativa chave para áreas rurais e áreas com pouca densidade populacional. Nestas áreas, o custo para implementação de redes cabeadas não compensa o retorno sobre o investimento (ROI).

### **1.3. Objetivo do trabalho**

O objetivo geral desta dissertação é mensurar e avaliar a cobertura de um sistema WMAN operando em 5.8GHz para um padrão fixo de rede sem fio, empregando tanto predição de cobertura, quanto medidas de campo. Em particular, no caso da modulação adaptativa, analisar a existência de faixas de instabilidade de modulação levando em consideração o tipo de ambiente onde o sinal se propaga.

### **1.4. Resultados esperados**

Apresentar positivamente valores e previsões que possam contribuir para adequação da tecnologia estudada. Determinar o raio limite de cobertura para cada nível de modulação levando em consideração as faixas de instabilidades entre os níveis.

---

<sup>2</sup> Digital Subscriber Line (No caso de residências é mais comum encontrarmos ADSL - Asynchronous DSL) provê conectividade banda larga através das linhas telefônicas normais.

### 1.5. Delimitação da pesquisa

O foco desse trabalho é o estudo da propagação do sinal em diferentes ambientes *outdoor* com condições de visibilidade variando entre *Line of Sight (LOS)* e *No Line Of Sight (NLOS)*. Nesse estudo foi utilizado o padrão pré-*WiMAX* (fixo) para *WMAN* operando em 5.8GHz.

### 1.6. Metodologia utilizada

A metodologia adotada na presente pesquisa tem como foco uma rede *WMAN* de acesso fixo. Através de etapas presentes no estudo de redes, além das atividades de **pesquisa e levantamento bibliográfico**, onde o desenvolvimento do trabalho se deu através de uma pesquisa levando em consideração o estado da arte, bem como o estudo dos modelos e padrões a cerca das: tecnologias de rede sem fio, propagação, modulação e atenuação além da comparação entre os diversos padrões. A partir de então buscou-se elaborar um **modelo conceitual**, através do estabelecimento da rede através da esquematização das antenas, computadores e ferramentas de apoio. Foram efetuados **testes**, para verificação da eficiência das antenas através do seu adequado posicionamento, identificação das possíveis interferências, verificação da velocidade de transmissão, verificação da atenuação. Os testes foram realizados na cidade de Campinas/SP, mais precisamente na região de entorno da PUC-Campinas e UNICAMP, utilizando-se entre outros o laboratório de redes sem fio da universidade. Por fim a **avaliação**, que considerou o desempenho da conexão acerca de parâmetros tais como: alcance, degradação, interferências, velocidade e relativas perdas.

### 1.7. Organização da dissertação

Além desta seção introdutória, este trabalho é composto por mais seis capítulos. No capítulo 2, fundamenta-se e caracteriza-se o padrão IEEE 802.16 para *WMAN*. No capítulo 3, modelos e mecanismos de propagação são discutidos. No capítulo 4, apresentam-se os níveis de modulação. No capítulo 5, descreve-se os resultados

obtidos a partir do estudo e da simulação dos testes; no capítulo 6, conclui-se este estudo apresentando sugestões para trabalhos futuros. Finalmente, nos capítulos 7 e 8 respectivamente, são apresentadas as referências e as bibliografias utilizadas neste estudo.

## 2. REDES METROPOLITANAS SEM FIO

A finalidade deste capítulo é descrever brevemente as principais características sobre redes sem fio metropolitanas (WMAN), que também são chamadas de redes sem fio de banda larga (SILVA, 2004). Considera-se, neste contexto, a transmissão de dados em alta velocidade ocorrida dentro de uma infra-estrutura de pontos fixos.

### 2.1. O Padrão IEEE 802.16

Conhecido como *WIMAX*<sup>3</sup> essa nova infra-estrutura motiva o sucesso e até mesmo a troca por redes metropolitanas sem fio. Uma *WMAN* deve prover acesso banda larga capaz de conectar grandes áreas geográficas sem a necessidade de investimento em infra-estrutura de alto custo através de antenas localizadas nas estações rádio base.

O *WIMAX* contrasta às limitações do padrão IEEE 802.11, associado às redes locais sem fio (*WLAN*), que apresentam perdas consideráveis de desempenho em ambientes *NLOS* ou *PLOS*<sup>4</sup>. Porém, um sistema *WMAN/WIMAX* viabiliza comunicação banda larga à distâncias consideráveis sem linha de visada, fazendo uso apenas do mecanismo de reflexão (LIMA, 2004), detalhado no capítulo 3.

---

<sup>3</sup> Refere-se ao *WIMAX Fórum*, que tem como missão, garantir a interoperabilidade entre os equipamentos baseados no padrão IEEE 802.16 composto predominantemente por fabricantes de equipamentos e *chipsets* (FIGUEIREDO, 2004).

<sup>4</sup> Caracterização do ambiente de propagação com visada parcial ou sem linha de visada: *NLOS* – No line of sight e *PLOS* - *Parcial Line Of Sight*

Entre as especificações técnicas do *WiMAX* destacam-se (SOUZA, 2006):

- Faixa de Frequência: foco na faixa licenciada e não-licenciada de 2GHz a 11GHz, especificada para uso em NLOS.
- Modulação Adaptativa: trata-se da seleção da modulação a ser utilizada na camada física que pode ser *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK), *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), *16-State Quadrature Amplitude Modulation* (QAM-16) ou *64-State Quadrature Amplitude Modulation* (QAM-64). Maiores detalhes serão encontrados no Capítulo 3. Esta escolha é feita através do nível da relação sinal - ruído (SNR) percebido no receptor. A partir da negociação entre a estação rádio-base e a estação do assinante, a modulação a ser adotada é dinamicamente adaptada às condições do enlace de rádio.
- Duplexação: suporta os sistemas de operação *Time Division Duplexing* (TDD) e *Frequency Division Duplexing* (FDD), que permitem comunicação simultânea em canais diferentes para *downlink* e *uplink*, ao contrário do TDD que utiliza o mesmo canal, mas em sistema *half-duplex*.
- Taxa de Transmissão: variante até 75 Mbps de pico para fixo, e até 30 Mbps para o móvel, em condições ideais de propagação.
- Área de Cobertura: em torno de 50 km, dependendo dos fatores de propagação.

Atualmente, a tecnologia *WiMAX* está voltada para redes metropolitanas fixas, uma vez que se trata de uma tecnologia 3G, atualmente complementar às redes celulares. No QUADRO 1 apresenta-se a evolução das especificações do IEEE para o padrão 802.16 de acordo com (SOUZA, 2006) e (DIAS, 2005):

QUADRO 1 – Especificações técnicas para o padrão 802.16

PADRÃO	CARACTERÍSTICAS
<b>IEEE 802.16</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aprovada em dezembro de 2001;</li> <li>- Faixa de freqüência – 10 a 66 GHz;</li> <li>- Operação somente em LOS;</li> <li>- Corresponde à especificação original, projetado para padronizar implementações LMDS (<i>Local Multipoint Distribution System</i>).</li> </ul>
<b>IEEE 802.16.2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Especificação de práticas para operação de múltiplos sistemas BWA;</li> <li>- Faixa de freqüência – 10 a 66 GHz;</li> </ul>
<b>IEEE 802.16 c</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aprovada em dezembro de 2002;</li> <li>- Interoperabilidade das freqüências até 66 GHz LOS</li> <li>- Especificação de perfis visando interoperabilidade entre equipamentos de vários fabricantes;</li> </ul>
<b>IEEE 802.16 a</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aprovada em outubro de 2003;</li> <li>- Faixa de freqüência licenciada e não-licenciada – 2 a 11 GHz;</li> <li>- Operação em NLOS; Alcance de 50 km</li> </ul>
<b>IEEE 802.16 b</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de aplicações permitindo o uso da faixa de freqüência – 5 a 6 GHz não licenciadas;</li> <li>- Trata aspectos relativos à qualidade de serviço.</li> </ul>
<b>IEEE 802.16 d</b> <b>ou</b> <b>802.16-2004</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Publicado em outubro de 2004;</li> <li>- Também chamada de 802.16-2004 ou WiMAX fixo;</li> <li>- Especificação de regras para interoperabilidade nas freqüências até 66 GHz;</li> <li>- Definição de uso de subcanalização;</li> <li>- Suporta arranjos de antenas inteligentes;</li> <li>- Atualização do padrão 802.16 que consolida as revisões dos padrões 802.16a e 802.16c em um único padrão, substituindo o 802.16a como o padrão base. Entre as alterações pode-se destacar a provisão de suporte para antenas mimo (<i>multiple-input multiple-output</i>), o que aumenta a confiabilidade do alcance com multipercorso. Facilita instalações com o uso de antenas <i>indoor</i>.</li> </ul>
<b>IEEE 802.16 e</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratificada em dezembro de 2005;</li> <li>- Também chamada de 802.16-2005 ou WiMAX móvel;</li> <li>- Incompatível com o WiMAX fixo;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faixa de frequência licenciada e não-licenciada – 2 a 6 GHz;</li> <li>- Mobilidade até 60km e controle de potência;</li> <li>- Usa a Modulação S-OFDMA.</li> </ul>
<b>IEEE 802.16 f</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Publicado em agosto de 2004</li> <li>- Introduziu conceito de redes em malha (<i>mesh networks</i>)</li> </ul>
<b>IEEE 802.16 g</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Publicado em agosto de 2004</li> <li>- Evolução para suporte a mobilidade</li> </ul>

## 2.2. Características da Camada Física do IEEE 802.16

A versão do padrão IEEE 802.16 (802.16-2004) especifica a interface aérea para frequência até 66GHz e inclui a camada de enlace de dados (MAC) e múltiplas camadas físicas (*Physical Layer* - PHY) (FIGUEIREDO, 2004). Esse padrão permite dois modos de alocação de banda possíveis: TDD e FDD, que também suporta os modos *half-duplex* e *full-duplex*<sup>5</sup> (DIAS, 2005).

Nos dois casos o padrão suporta um esquema adaptativo em que os parâmetros de transmissão, incluindo esquemas de modulação e codificação, podem ser ajustados individualmente para cada estação cliente (SS) durante a transmissão quadro a quadro. Esse esquema adaptativo consiste na seleção do tipo de modulação (QPSK, QAM-16 e QAM-64) a partir do nível da SNR percebida pelo receptor. A partir da negociação entre a estação base (BS) e a SS, o tipo de modulação a ser adotada é dinamicamente adaptado à condição do enlace de rádio. A FIG. 1 ilustra este esquema adaptativo.

---

<sup>5</sup> Característica de transmissão quando temos um dispositivo Transmissor e outro Receptor, sendo que quando os dois podem transmitir dados simultaneamente em ambos os sentidos (*full-duplex*) e quando ambos podem transmitir e receber dados, porém não simultaneamente (*half-duplex*).

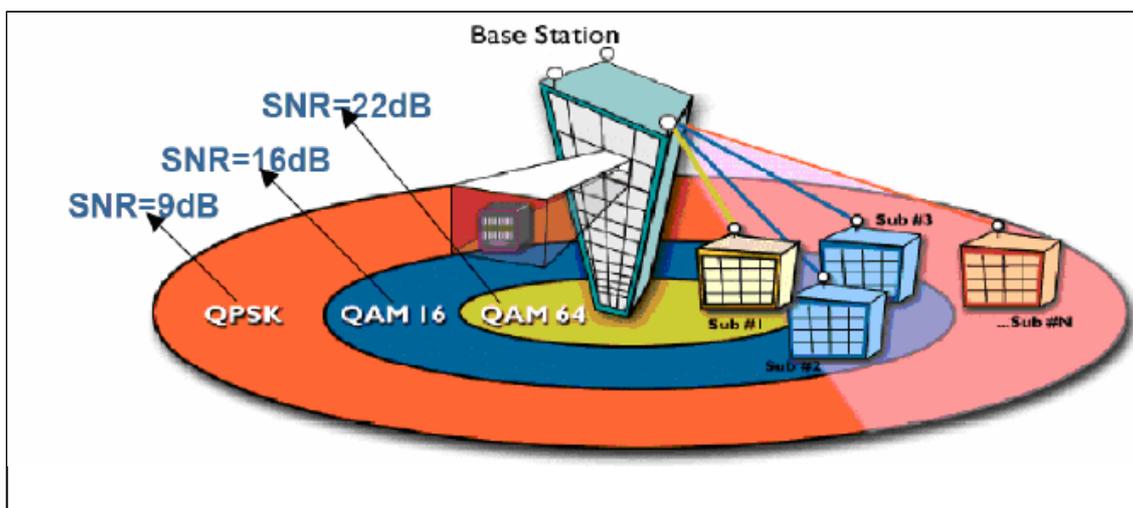


FIGURA 1 - Esquema de modulação adaptativa do padrão IEEE 802.16

FONTE – Figueiredo (2004)

Um esquema adaptativo como esse permite um alto grau de flexibilidade de forma a permitir aos provedores de serviço a possibilidade de otimizar o sistema em função do planejamento da área de cobertura, custo, capacidades dos equipamentos, serviços oferecidos, entre outros.

O padrão suporta ainda esquema de correção de erro - *Forward Error Correction* (FEC). Com tamanho de bloco variável este esquema é combinado com um Código Convolutacional de Bloco Interno (*inner block convolutional code*) para transmissão de dados críticos, tais como quadro de controle e acessos iniciais. A opção de esquema FEC é casada com QPSK, 16-QAM e 64-QAM para formar perfis de rajada de diversificada robustez e eficiência. O canal de *uplink* (UL) é baseado na combinação de *Time Division Multiple Access* (TDMA) e *Demand Assignment Multiple Access* (DAMA). O canal é dividido em segmentos de tempo e estes alocados para vários tipos de uso (registro, contenção, controle ou tráfego de usuário) sendo o controle feito pela BS (DIAS, 2005).

### 2.3. *Quality Of Service* (QoS) para redes banda larga sem fio

O padrão 802.16 confirma-se tendo como ponto diferencial, o fato de transmitir dado ou tráfego multimídia com alto suporte de qualidade de serviço (QoS), a fim de

garantir qualidade de serviço para a comunicação de telefonia e de multimídia, as quais não admitem atrasos.

A camada MAC tem a função de controle de acesso ao meio e de garantia do nível de QoS na interface aérea, por meio de mecanismos dinâmicos de reserva de banda e priorização de tráfego. Adicionalmente, o suporte a múltiplas interfaces para camadas físicas e para a rede-núcleo bem como os mecanismos de sincronismo e de segurança da informação constituem o conjunto principal de funcionalidades da MAC especificada no padrão 802.16 (FIGUEIREDO, 2004).

Diferentemente do 802.11, o padrão 802.16 oferece suporte a múltiplas conexões e a um conjunto completo de parâmetros de *quality of service (QoS)*. Além disso, oferece um classificador de pacotes para mapear as conexões entre os vários usuários e interfaces, indo desde *Ethernet* a ATM. Essa flexibilidade garantida pelo padrão IEEE 802.16 aumenta a complexidade do desenvolvimento e a implantação de serviços para as redes de acesso banda larga sem fio, fixa e móveis (GOVINDAN, 2004).

### **3. PROPAGAÇÃO E PREDIÇÃO**

Neste capítulo são apresentados conceitos referentes à propagação das ondas de rádio comumente utilizados no planejamento das áreas de cobertura de sistemas com interface aérea. Focalizando principalmente a propagação nas ligações em microondas com visibilidade parcial - *Partial Line of Sight* (PLOS) ou nenhuma visibilidade (NLOS) que são características dos sistemas *WMAN*.

#### **3.1. Mecanismos de Propagação**

A propagação rádio *outdoor* é determinada pelos mecanismos de propagação: reflexão, refração, difração e espalhamento.

Estes mecanismos são brevemente explanados nos subtítulos 3.3.1 a 3.1.4.

##### **3.1.1. Reflexão**

Surge quando as ondas eletromagnéticas atingem um obstáculo com dimensões consideravelmente superiores ao comprimento de onda da onda incidente. A onda refletida pode vir a reforçar ou a degradar o nível do sinal no ponto de recepção, dependendo da fase com que chega. “Poderá, por isso, apresentar uma influência construtiva ou destrutiva quando somada às restantes amostras do sinal” (LOPES, 2004).

Genericamente, o fenômeno da reflexão de uma onda eletromagnética numa superfície pode ser ilustrado com o modo como a luz é refletida num espelho. Ao ângulo que a onda incidente apresenta em relação à normal à superfície refletora chama-se de ângulo de incidência, sendo que o ângulo entre o raio refletido e a normal denomina-se ângulo de reflexão. Este ângulo é sempre igual ao ângulo incidente. A FIG. 2 ilustra esse efeito. O efeito da reflexão tem uma grande

preponderância sobre os restantes, pois é o principal causador do multipercurso<sup>6</sup> (LOPES, 2004).

“O feixe de ondas pode ser fortemente refletido em superfícies relativamente regulares, como um terreno sem acidentes de relevo ou mares e lagos, da mesma forma que um feixe de luz é fortemente refletido numa superfície espelhada. O sinal refletido ao se compor com o sinal direto entre as antenas pode, dependendo da defasagem entre estes, causar grande atenuação no campo resultante, chegando em certos casos a produzir o cancelamento do mesmo” (SILVA, 1978).

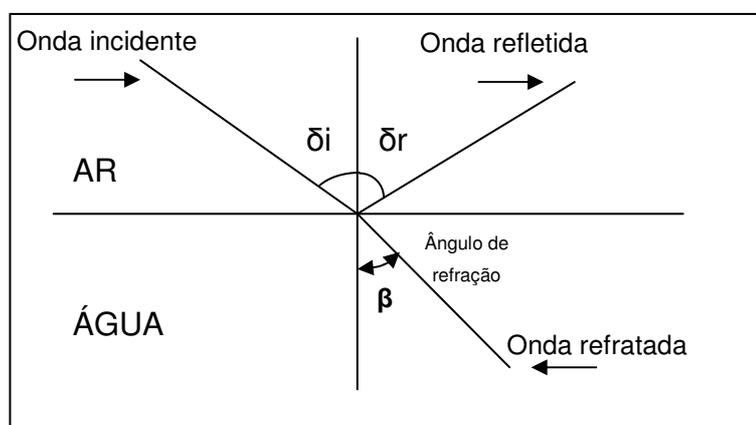


FIGURA 2 – Reflexão e refração do feixe de luz ao passar do ar à água

Fonte: baseado em Silva (1978) pág. 42.

---

<sup>6</sup> O sinal resultante recebido é a soma de um raio direto entre as antenas e outros raios que seguem trajetos distintos desse raio direto. Esses trajetos distintos, designados por múltiplos percursos, são originados das refrações e reflexões (ainda que de pequena intensidade) resultantes de irregularidades na constante dielétrica da atmosfera com a altitude.

“A energia transportada através desses percursos múltiplos é, em geral, bem inferior à associada ao feixe principal (aproximadamente 10 vezes menor). Entretanto, quando o feixe principal, por um motivo qualquer, por exemplo, obstrução parcial ou interferência por reflexão, sofre uma atenuação considerável, a energia recebida através dos percursos múltiplos passa a desempenhar um papel importante, dando origem a fenômenos de interferência apreciáveis. O efeito desse fenômeno de múltiplo percurso além de variar ao longo do tempo é função da frequência da ligação conhecido como, *fading* seletivo com a frequência; comprimento da mesma e tipo de terreno’ (SILVA, 1978).

### 3.1.2. Refração

A atmosfera pode refratar as ondas de rádio e radar, ou seja, desviar ou quebrar a direção dos raios. Sempre que uma frente de onda se propaga por um meio onde ocorre uma variação do índice de refração, haverá um desvio do feixe.

As ondas eletromagnéticas são refratadas na atmosfera devido a pequenas diferenças de velocidade de propagação em consequência das variações de temperatura, umidade e pressão. Em função da atmosfera a qual é heterogênea, os gradientes de refração variam e, como resultado, gera zonas onde há “refração normal”, onde como consequência tem-se um suave encurvamento dos feixes praticamente acompanhando a curvatura da terra, “super-refração” ou “sub-refração”. Esses coeficientes variáveis podem causar a um feixe de ondas os seguintes:

- Encurvamento brusco, reduzindo o alcance;
- Subdivisão de feixe em diversas partes, causando zonas de sombras e dutos, falhas e concentração de energia.

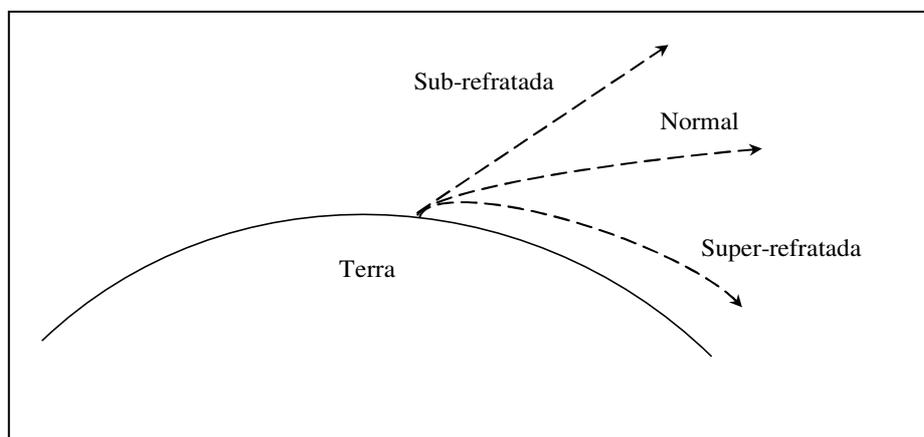


FIGURA 3 – Efeitos da refração

Fonte: Noções sobre ondas eletromagnéticas e acústicas. <http://www.mar.mil.br/dhn/bhmn/> .

### 3.1.3. Difração

As ondas podem contornar obstáculos e fendas e esse efeito denomina-se difração. O quanto uma onda irá contornar um obstáculo dependerá do seu comprimento de onda e das dimensões do obstáculo ou da fenda.

O estudo do enlace torna-se mais complexo quando o percurso está obstruído. As obstruções possíveis de serem vencidas por difração da onda possuem a forma de gume de faca<sup>7</sup>, mais comum ou de obstáculo esférico. A onda difratada, chega à antena receptora com fraca intensidade, mas a potência do sinal recebido dependerá principalmente da potência de transmissão e dos ganhos das antenas (MEDEIROS, 2004).

A influência que um obstáculo pode provocar na transmissão de um sinal pode ser avaliada através das zonas de Fresnel. Sabe-se que as ondas interferentes originam áreas de luz e áreas de sombra, em forma de anéis, chamadas de zonas de *Fresnel*. Esse fenômeno também ocorre nas comunicações rádio com ondas eletromagnéticas de frequências super altas (MEDEIROS, 2004).

A importância da primeira zona de Fresnel é capital para o estudo de viabilidade do enlace com o percurso da onda obstruído. A potência direcionada à antena receptora é constituída por diversas frentes de onda que formam um elipsóide, que recebeu o nome de elipsóide de *Fresnel*.

Elipsóide de Fresnel é definido como o lugar geométrico de todos os pontos para os quais a soma das distâncias entre as duas antenas supera a distância de visada direta de um número inteiro “n”, de meio comprimento de onda ou  $n\lambda/2$ . Conforme mostra a FIG. 4, as antenas do enlace encontram-se posicionadas nos focos A e B do elipsóide, enquanto o obstáculo está em C. A distância D mais  $0,5\lambda$  (meio comprimento de onda) corresponde a 1ª zona de Fresnel (MEDEIROS, 2004).

---

<sup>7</sup> “Um obstáculo deste tipo permite o estudo da variação da energia recebida por obstrução variável, sem introduzir efeitos decorrentes de uma segunda onda refletida que chegue à antena receptora” (SILVA, 1978).

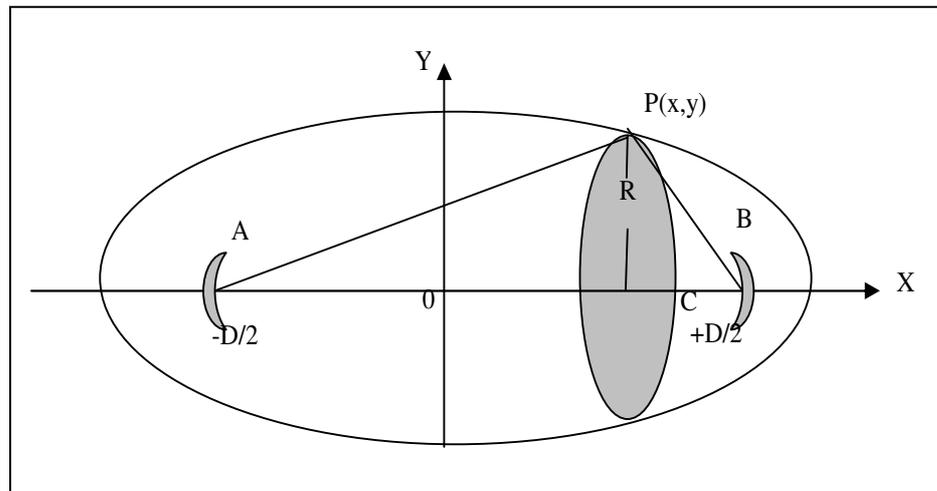


FIGURA 4 – Elipsóide de Fresnel

FONTE: baseado em Medeiros (2004)

Um percurso é considerado desobstruído quando a 1ª zona de *Fresnel* está livre de obstáculos. Quando obstruído, a condição inicial de viabilidade do enlace por difração da onda é dada pela expressão a seguir e válido para  $h \gg \lambda$ .

$$h \leq 0,6 R$$

(3.1)

onde,  $h$  é altura do obstáculo e  $R$ , o raio da 1ª zona de Fresnel, que em metros é dado pela expressão 3.2.

$$R = \left( \frac{d_1 d_2 \lambda}{d_1 + d_2} \right)^{1/2}$$

(3.2)

### 3.1.4. Espalhamento

O espalhamento ocorre quando as ondas eletromagnéticas se deparam com obstáculos com tamanhos da mesma ordem de grandeza ou menores que seu comprimento de onda. O espalhamento obedece aos mesmos princípios físicos da difração espalhando a energia do sinal do transmissor em muitas direções (MEDEIROS, 2004).

O conceito de tamanho do obstáculo com relação ao comprimento de onda é função da frequência. Já para o padrão 802.11 a, obstáculos de dimensões menores podem causar atenuações mais severas (MEDEIROS, 2004).

## 3.2. Atenuação do Sinal

Nesta seção descrevem-se os principais modelos de propagação voltados tanto para ambientes *outdoor* quanto *indoor*. Estes modelos são usados para prever a intensidade do sinal recebido através do cálculo da diminuição da intensidade da onda com a distância, denominada atenuação.

### 3.2.1. Modelo de propagação no espaço livre

Todos os modelos partem do modelo de atenuação de espaço livre (LOPES, 2004). O modelo de propagação no espaço livre é usado para estimar a intensidade de sinal recebido quando o transmissor e receptor possuem um caminho de linha de visada desobstruída e clara entre si (RAPPAPORT, 1996). Vale ressaltar que linha de visada das ondas de rádio não significa visada ótica, pois para as ondas de rádio, visada implica em ter pelo menos 55 % do raio da primeira zona de *Fresnel* inferior desobstruída (YEE, 2002). A atenuação dada em um enlace entre duas antenas distantes  $d$  quilômetros uma da outra, operando em condição de visada direta totalmente desobstruída, tendo a frequência de operação dada em megahertz, pode ser determinada a partir da equação de Friis (RAPPAPORT, 1996). Esta equação é dada por:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (3.3)$$

onde,  $P_r(d)$  é a força recebida cujo, é função da separação  $d$ ,  $P_t$  é a força transmitida,  $G_t$  e  $G_r$  representam respectivamente o ganho da antena transmissora e receptora,  $\lambda$  é o comprimento de onda em metros,  $d$  é a distância de separação entre as antenas em metros e  $L$  representa o fator de perda.

### 3.2.2. Modelo de Okumura

Segundo (RAPPAPORT, 1996), o modelo de Okumura é um dos mais usados para predição do sinal em áreas urbanas. Este modelo é aplicado num intervalo de freqüências entre 150 a 1920MHz (tipicamente extrapolado para 3000MHz), e distâncias de 1 a 100km. Pode ser usado para antenas com altura entre 30 a 1000m. Este modelo foi desenvolvido inicialmente a partir de medidas na cidade de Tokyo e estendido para áreas suburbanas e abertas. Estas medidas foram feitas em área urbana de relevo suave, com a antena de estação base de altura 200m e antena móvel com altura de 3m. A expressão é dada por:

$$L(dB) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \quad (3.4)$$

onde,  $L_F$  representa a perda do espaço livre, dado por:  $L_f = 10 \log \left[ \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \right]$ ,  $A_{mu}(f, d)$

é a atenuação média com relação ao espaço livre,  $G(h_{te})$  representa o ganho da antena base (transmissor), dado por  $G(h_{te}) = 20 \log \left( \frac{h_{te}}{200} \right)$  para  $1000 \text{ m} > h_{te} > 30 \text{ m}$  e  $G(h_{re})$  é o ganho da antena móvel (receptor), dado por:

$G(h_{re}) = 10 \log \left( \frac{h_{re}}{3} \right)$  para  $h_{re} \leq 3 \text{ m}$  e  $G(h_{re}) = 20 \log \left( \frac{h_{re}}{3} \right)$  para  $10 \text{ m} > h_{re} > 3 \text{ m}$  e

$G_{AREA}$  representa o ganho devido ao tipo de ambiente. Os valores de  $A_{mu}(f,d)$  e  $G_{\acute{a}rea}$  em função da freqüência são apresentados nos GRAF. 1 e 2.

O modelo de Okumura é um modelo baseado em medições, as quais levaram ao desenvolvimento de um conjunto de curvas de referência (Curvas de Okumura), totalmente baseado em medições, não possuindo qualquer explicação analítica (MATEUS, 1998).

Okumura propõe que a atenuação em um ambiente móvel se dá pela atenuação do espaço livre somada à atenuação causada por um ambiente com morfologia urbana, incluindo termos de correção para situações diferentes das utilizadas em suas medidas iniciais, realizadas na cidade de Tokyo (RAMALHO, 2006).

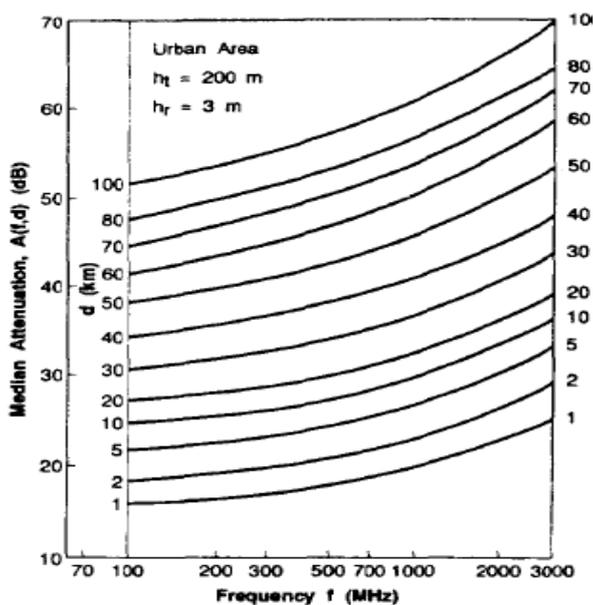


GRÁFICO 1 – Atenuação média relativa ao espaço livre  
FONTE: Rappaport (1996)

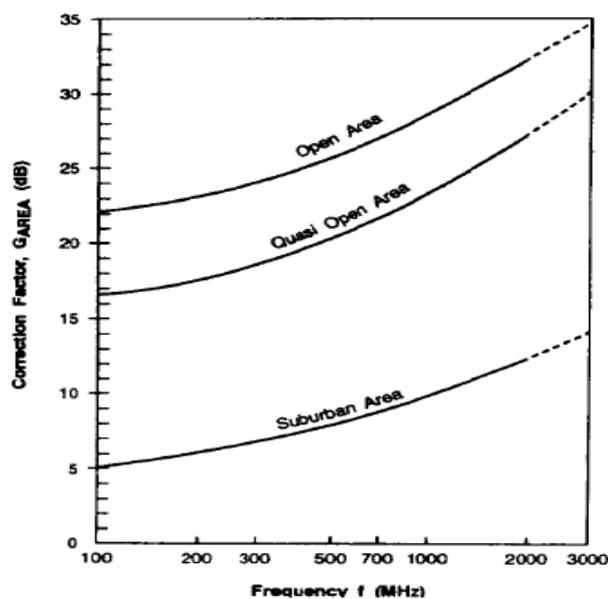


GRÁFICO 2 – Fator de correção para diferentes tipos de terrenos  
FONTE: Rappaport (1996)

Para se trabalhar melhor com este modelo utiliza-se as expressões ajustadas por Hata descritos na seção seguinte.

### 3.2.3. Modelo de Hata

O modelo de Hata é uma formulação empírica dos dados gráficos do modelo de Okumura. É válida para frequência entre 150 a 1500MHz. Hata apresentou a perda numa propagação em área urbana como uma formula padrão e supõe uma equação de correção para aplicações em outras situações (RAPAPPORT, 1996).

Outra consideração quanto à sua utilização refere-se ao fato de ser aplicável em ambientes quase planos, sem irregularidades. No modelo de Hata é apresentada uma fórmula padrão para área urbana e fatores de correções devem ser considerados para outras áreas (RAMALHO, 2006). A fórmula básica para a determinação da atenuação para ambientes urbanos, suburbanos e áreas abertas são dados por:

Áreas urbanas:

$$L(dB) = 69,55 + 26,16 \log(f_c) - 13,82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) * \log(d) \quad (3.5)$$

Áreas suburbanas:

$$L(dB) = L(urbana) - 2[\log(f / 28)]^2 - 5,4 \quad (3.6)$$

Áreas abertas:

$$L(dB) = L(urbana) - 4,78(\log f_c)^2 + 18,33 \log f_c - 40,94 \quad (3.7)$$

onde,  $f_c$  é frequência variando de 150MHz a 1500 MHz,  $h_{te}$  é a altura da antena transmissora variando de 30 a 200 m,  $h_{re}$  é a altura da antena receptora variando de 1 a 10 m,  $d$  é a separação entre transmissor e receptor (em km) e  $a(h_{re})$  é o fator de correção dado pelas expressões:

Para cidades pequenas e médias:

$$a(h_{re}) = (1,1 \log f_c - 0,7)h_{re} - (1,56 \log f_c - 0,8)dB \quad (3.8)$$

Para uma cidade grande:

$$a(h_{re}) = 8,29(\log 1,54 h_{re})^2 - 1,1dB \text{ para } f_c < 300\text{MHz} \quad (3.9)$$

$$a(h_{re}) = 3,2(\log 11,75 h_{re})^2 - 4,97 dB \text{ para } f_c > 300\text{MHz} \quad (3.10)$$

Os valores obtidos são bem próximos dos apresentados pelo Modelo de Okumura desde que a distancia  $d$  (entre transmissor e receptor) seja maior que 1 km. Sendo que o mesmo é melhor apropriado para sistemas celulares compostos de grandes células. Porém, apresenta uma extensão do modelo para uso em PCS<sup>8</sup> (MATEUS, 1998).

### 3.2.4. Modelo de *Shadowing*

O modelo de *shadowing*, leva em consideração a existência de ambientes diferenciados para o percurso do sinal, a partir de onde se calcula uma atenuação

---

<sup>8</sup> Sistemas de Comunicação Pessoal - A propagação de sinais de rádio em ambientes fechados diferencia da propagação de sinais de rádio tradicional em dois aspectos: as distâncias envolvidas são muito menores e a variabilidade de ambientes é muito maior para uma mesma distância. Foi observado que a propagação de sinais em ambientes fechados é fortemente influenciada por fatores específicos tais como: o *layout* do edifício, o material de construção usado e o tipo de construção (MATEUS, 1998).

para o sinal através do valor do parâmetro beta. Este parâmetro, caracteriza a atenuação da intensidade do sinal ao longo do caminho por onde ele será propagado, de forma que, para ambientes com alta visibilidade entre as antenas tem-se um valor de beta igual a dois; em contrapartida, para um caminho altamente obstruído pode-se caracterizá-lo com valor de beta igual a cinco (RAPPAPORT, 1996).

O valor de  $\beta$  é decisivo para determinação da cobertura por índice de modulação (SALDANHA, 2007). Considerando-se o aspecto mobilidade, diferentes situações podem ocorrer em uma rede sem fio. Transmitir sem a interferência de nenhum obstáculo seria um cenário perfeito, porém, diversos obstáculos podem tornar a transmissão mais difícil requerendo a avaliação a partir de modelos de propagação mais específicos (OLIVEIRA, 2007).

A atenuação do sinal descrita pelo modelo de *shadowing* (RAPPAPORT, 1996) é dada por:

$$\left[ \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10 \beta \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{dB} \quad (3.11)$$

onde  $P_r(d)$  é a potência recebida na distância  $d$ ,  $P_r(d_0)$  é a potência na distância de referência  $d_0$ ,  $\beta$  é o parâmetro que caracteriza a atenuação para diferentes ambientes,  $X_{dB}$  é uma variável aleatória com distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão  $\sigma$ . Tanto a variável aleatória  $X_{dB}$ , quanto o seu desvio padrão possuem valores expressos em dB.

O valor de  $P_r(d_0)$  pode ser medido ou avaliado usando o modelo de propagação no espaço livre que é dado pela equação de Friis (RAPPAPORT, 1996), já descrita na seção 3.3.1, calculado em dB pela expressão:

$$[P_r (d_0)]_{dB} = 10 \log \left[ \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4 \pi d)^2 L} \right] \quad (3.12)$$

Quando a atenuação é calculada em ambientes internos, freqüentemente usa-se  $d_0=1\text{m}$ , distância cuja atenuação no espaço livre é considerada adequada. Para ambientes externos,  $d_0=100\text{m}$  (RAPPAPORT, 1996 PAG 73).

Com o parâmetro  $\beta$  definido é possível avaliar o cenário mudando o seu valor a fim de representar desde percursos extremamente obstruídos a ambientes mais amenos. O valor de  $\beta$  pode variar entre 2 a 5 para ambientes externos, como mostrado no QUADRO 2 (RAPPAPORT, 1996).

QUADRO 2 - Valores de beta para diferentes ambientes

Ambiente	Valor de $\beta$
Espaço Livre	2
Área urbana	2.7 a 3.5
Área urbana sombreada	3 a 5

### 3.3. Desvanecimento

*Desvanecimento ou "Fading"*, é o nome dado para se caracterizar o fenômeno da existência de variações ao longo do tempo da intensidade do sinal recebido. Esta variação pode ter como causa a propagação através de múltiplos percursos e atraso temporal.

- Ondas de multipercurso

Nas comunicações rádio, uma parte do volume de energia irradiada pela antena transmissora forma uma onda direta, o restante da energia se dispersa transformando-se em ondas secundárias de diferentes percursos, denominadas

ondas de multipercurso, que chegam à antena receptora com diferentes intensidades, defasadas entre si e da onda principal. Para o receptor o sinal instantâneo resultante é a soma vetorial dos diversos sinais captados pela antena.

O sinal varia de intensidade a cada instante, aumenta e diminui, passa por um nulo ou zero de tensão, resultado da composição vetorial instantânea, quando ocorre no modelo de propagação em visibilidade, o valor típico é de 40 dB, calculado pela média das variações do sinal recebido, obtidas de um aparelho registrador gráfico. Nos cálculos de enlaces, esse valor costuma ser acrescentado com perda adicional (MEDEIROS, 2004).

- Atraso temporal (retardo)

O retardo ou *delay* denomina o tempo gasto para o sinal atravessar o canal de comunicações. O tempo de retardo  $\Delta t$  é calculado dividindo-se a distância percorrida pela onda no enlace dos dois pontos, pela velocidade de propagação da onda no meio de propagação.

Cada tipo de equipamento impõe ao sinal um tempo de retardo próprio do circuito eletrônico, quase sempre de pequeno valor, mas nem sempre desprezível (MEDEIROS, 2004). Efeito de chuvas em situações de chuvas muito intensas, pode-se chegar à condição de completa interrupção da ligação, afetando todos os canais rádio em operação.

Por reflexão (já citado anteriormente), é por vezes considerado como um caso especial de *fading* por múltiplos percursos, que pode, entretanto causar atenuações mais profundas e duradouras do que as indicadas quando da análise da situação de múltiplos percursos.

## 4. MODULAÇÃO

Neste capítulo pretende-se apresentar o esquema de multiplexação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), bem como, a utilização da modulação adaptativa, a qual permite seleção automática do tipo a ser utilizado na camada física (QPSK, QAM 16 E QAM 64)<sup>9</sup> a partir do nível da relação sinal-ruído (SNR) percebida no receptor. A utilização dessas duas técnicas permite que a tecnologia WiMAX forneça maior robustez e flexibilidade ao sistema.

Modulação pode ser definida como sendo:

“O processo eletrônico no qual o sinal elétrico de informação modifica pelo menos um dos parâmetros da onda portadora: amplitude, frequência ou fase. A onda portadora modulada viaja no canal de comunicações transportando os sinais da informação, denominando-a de portadora ou *carrier*. A modulação digital ocorre quando uma portadora de pulsos interage com os sinais analógicos da informação” (MEDEIROS, 2004).

### 4.1. Modulação adaptativa

O IEEE 802.16 pode utilizar tanto modulação QPSK quanto QAM. A partir da negociação entre as estações base e cliente, a modulação a ser adotada é dinamicamente adaptada às condições do enlace de rádio. As modulações utilizadas dependem da especificação de cada modelo de camada física. Modulações com muitos símbolos alcançam taxas de dados elevadas, mas possuem alcances reduzidos.

---

<sup>9</sup> QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying* e QAM – *Quadrature Amplitude Modulation* com constelação de 16, 64 e 256 símbolos.

#### 4.1.1. QPSK

No chaveamento por desvio de fase, este, é feito de modo a alterar a fase da portadora em um ou mais pontos do período da senóide<sup>10</sup> (entre 0 e  $2\pi$ ), mantendo-se constantes a amplitude e a frequência da onda. A modulação QPSK ou PSK quaternário, é caracterizada pela alteração da fase da portadora em quatro pontos do ciclo da senóide, devido ao chaveamento da portadora em dibit ou dois bits por vez, são gerados quatro níveis ou quatro pontos na constelação:  $2^2 = 4$  (MEDEIROS, 2004).

Na modulação QPSK, a fase da portadora carrega a informação relativa a qual bit está sendo transmitido. São utilizadas as fases de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$  para carregar informação (DUARTE, 2004). Variante do PSK, esta modulação apresenta a melhor imunidade a ruídos e um significativo aumento da velocidade de transmissão, quando usada uma codificação multibit na modulação. Com esta modulação têm-se a possibilidade concreta de se aumentar a velocidade de transmissão pela modulação simultânea de dois ou mais bits de cada vez. Para isso tornou-se necessário o uso de um sistema de modulação bidimensional por meio de duas portadoras de mesma frequência, porém defasadas em  $90^\circ$  (NASCIMENTO, 1999).

O modulador QPSK é composto por duas componentes de sinal em quadratura e permite o envio de dois bits toda vez que ele modula. Assim, sua velocidade de transmissão é igual ao dobro da velocidade de modulação<sup>11</sup>. O processo usado para demodular o seu sinal é através do uso de dois demoduladores de fase, um para a

---

<sup>10</sup> Senóide é um sinal contínuo e periódico, que se caracteriza fundamentalmente por três parâmetros: amplitude, frequência e fase (SILVA, 1978). Curvas resultantes do desenvolvimento das funções seno e co-seno respectivamente (MEDEIROS, 2004).

<sup>11</sup> A relação entre a velocidade de transmissão e a velocidade de modulação é igual ao número de bits codificados em cada símbolo transmitido. O número de símbolos, M, é igual a  $(M=2^N)$ , sendo N o número de bits codificados em cada símbolo. Vm representa a velocidade de modulação em bauds e Vt representa a velocidade de transmissão em bps ( $Vt = NVm$ ).

componente I e outro para a componente Q (NASCIMENTO, 1999). De acordo com a FIG. 5.

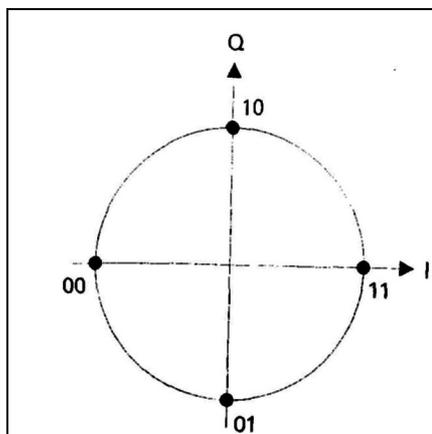


FIGURA 5 – Constelação do sinal QPSK

FONTE - Nascimento (2005)

O circuito de decisão recebe os sinais I e Q, provenientes dos respectivos detectores de amplitude. Em seguida, comparadores de tensão detectam a presença de sinais e sua polaridade, fornecendo sinais de saída que são aplicados a circuitos lógicos combinacionais. Na saída desses circuitos, teremos os bits de dados correspondentes ao sinal modulado em quadratura (NASCIMENTO, 1999). Os sinais I e Q podem assumir, respectivamente, os seguintes valores: símbolo 00, -1 e 0, símbolo 01, 0 e -1, símbolo 10, 0 e 1 e símbolo 11, 1 e 0.

#### 4.1.2. QAM

A modulação QAM é utilizada em *modems* analógicos e rádios digitais de alta velocidade. É muito semelhante à modulação QPSK, por utilizar as mesmas técnicas para a modulação e demodulação. Porém, em relação ao QPSK, o QAM apresenta as seguintes diferenças: amplitude do sinal variável, maior taxa de erro para o mesmo SNR e velocidade de transmissão, maior velocidade de modulação por permitir maior número de símbolos em sua constelação embora exija amplificadores lineares nos equipamentos de transmissão, o que torna o seu uso mais complicado (NASCIMENTO, 1999).

O QAM é um sistema otimizado de modulação que modifica duas características da portadora: amplitude e fase. Opera em quadribit, sendo o primeiro bit modulado em amplitude e os demais em fase. Por existir em diversos outros níveis, é tratado por M-QAM, sendo M um múltiplo de dois, como 16-QAM (16, 32, 64, 128, 256, 512 QAM) (MEDEIROS, 2004).

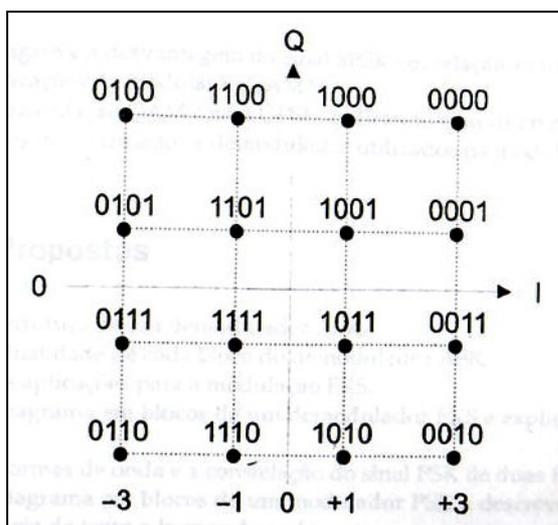


FIGURA 6 – Constelação do sinal 16QAM

FONTE - Nascimento (2005)

Na modulação QAM, tanto a fase como a amplitude variam e o receptor tem que receber este sinal modulado, detectar a modulação e transformá-la de volta no sinal original. A constelação do sinal 16QAM é exibida na FIG. 6, onde cada símbolo representa 4 bits, ao contrário de cada símbolo representando 2 bits como é o caso do QPSK (DUARTE, 2004). Isto significa que, a sua velocidade de transmissão é quatro vezes maior que a de modulação. O fato de utilizar uma constelação mais densa faz com que o sinal 16QAM seja mais suscetível a ruídos do que outros sinais como, por exemplo, o sinal 8PSK (NASCIMENTO, 1999).

A modulação 64-QAM permite mandar ainda mais bits por símbolo do que a modulação 16-QAM, porém é necessária uma melhor SNR para ser possível sobrepor as interferências e manter uma determinada taxa de erro de bits (DUARTE, 2004).

## 4.2. Taxa de erro nas comunicações digitais

O erro nas comunicações digitais ocorre quando se transmite 1 e o decisor decide por 0 e inversamente, a troca de 0 por 1. No rádio, os erros ocorrem principalmente devido ao ruído elétrico e as ondas de multipercusos. O decisor é um estágio do receptor do modem que restaura os bits 1 e 0 a partir da onda portadora chaveada. Em geral, a polaridade da tensão contínua, à saída do demodulador, determina os dois estados possíveis (bits 1 ou 0). O mascaramento do sinal pelo ruído pode gerar situações indefinidas, que induzem o decisor ao erro. (MEDEIROS, 2004).

O gráfico da FIG. 7 mostra as regiões de decisão: 1 e 0 bem como a área comum, de indefinição, no estudo de probabilidade de ocorrência de erro.

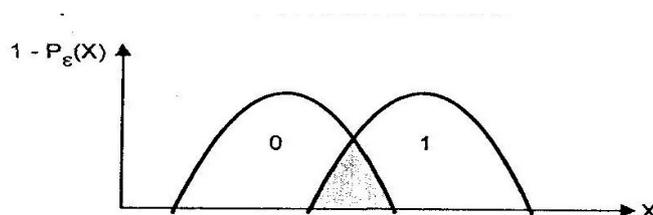


FIGURA 7 – Áreas do estudo da probabilidade de ocorrência de erro.

FONTE: Medeiros (2004)

A taxa de erros nas comunicações digitais pode ser prevista em função da relação de  $\frac{E_b}{N_0}$ , onde se tem a energia do bit dividido pela densidade espectral de ruído.

Onde,  $E_b$  representa a energia por bit e  $N_0$  representa o ruído em Hz.

### 4.2.1. Bit error rate (BER)

A taxa de erro por bit, avalia a quantidade de bits com erro dentro de um lote. Todos os padrões de redes trazem especificações do BER como uma forma de garantir que os sinais sejam recebidos com poucas distorções. O BER está diretamente relacionado ao SNR, pois quanto menor o nível de ruído menores serão as distorções e conseqüentemente menores serão as proporções de bits com erro.

A taxa de erro em bits em valores relativos pode ser obtida pelo gráfico. Onde constam a família de curvas correspondentes aos processos de modulação digital (FSK, MSK e PSK), com as suas variações, sem correção de erro no sistema (MEDEIROS, 2004).

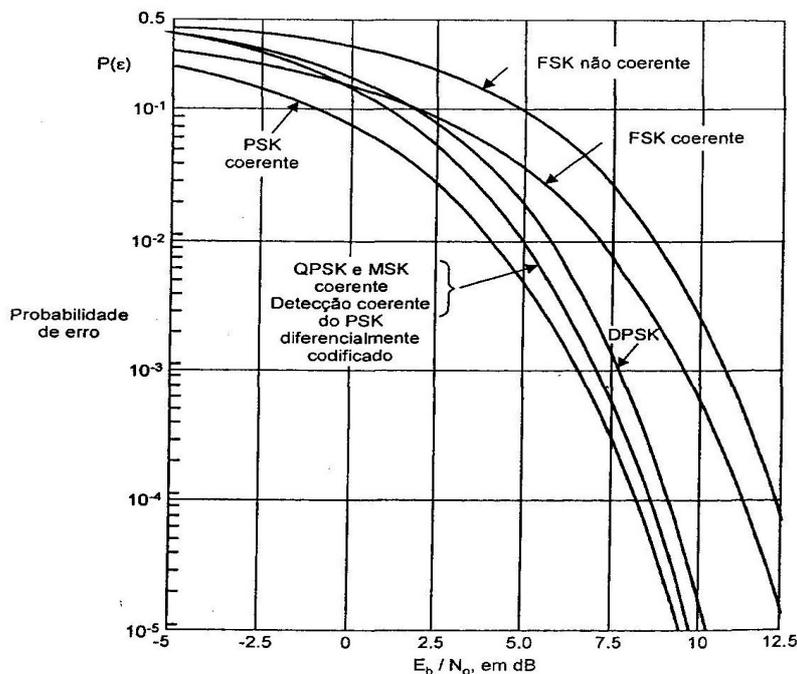


FIGURA 8 – Curvas do BER para sistemas sem correção de erro

FONTE: Medeiros (2004) retirado de *Digital Communications* (Simon Haykin)

Ao aplicar o valor de  $\frac{E_b}{N_0}$ , em dB, no eixo horizontal, subindo verticalmente até encontrar a curva desejada, tira-se o BER do eixo vertical, de graduação logarítmica.

Como os bits são recuperados do sinal senoidal da portadora chaveada, é preciso

conhecer a relação  $\frac{E_b}{N_0}$ , equivalente à relação sinal/ruído  $\frac{S}{N}$  da portadora. A densidade espectral de ruído é a potência do ruído por hertz da faixa.

#### 4.2.2. Corretor de erros

Devido à fragilidade do sistema digital, a adoção de pelo menos um código de correção de erros é de extrema necessidade. A aplicação do código para correção de erros é feita com o auxílio de sofisticados circuitos eletrônicos, mediante a inserção de blocos de bits de correção. O sistema de correção inicia-se na transmissão com a inserção de bits, o código de correção em segmentos de bits de informação. A eficácia na correção dos erros detectados na recepção, basicamente, depende do código de correção<sup>12</sup> utilizado. É notável a melhoria introduzida por qualquer dos códigos quando comparada à curva sem correção, como pode ser visto na FIG. 9 (MEDEIROS, 2004).

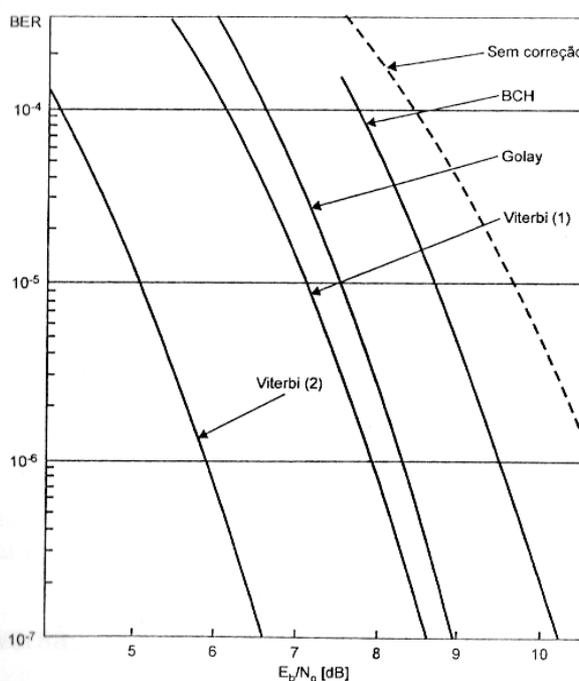


FIGURA 9 – Curvas do BER de sistemas de correção de erros.

FONTE: Medeiros (2004) retirado de *Communications Satellite systems* (J. Martin)

<sup>12</sup> Os códigos de correção podem ser agrupados em três tipos: de bloco, cíclico e convolucional. Alguns dos mais importantes códigos são: Hamming, Reed Solomon (RS), Golay, BCH e Viterbi.

Em recepção de radiodigital, quando ocorre uma descarga elétrica (raio), uma quantidade significativa de bits de uma seqüência é destruída. Esse tipo de destruição dá-se o nome de rajada, podendo ser considerada como a pior das situações, e somente um código poderoso de correção consegue restaurar os bits destruídos da informação. As ondas de multipercurso também podem ocasionar erros quando da recuperação do sinal pelo receptor (MEDEIROS, 2004).

### **4.3. Técnicas de múltiplo acesso**

Os sistemas que permitem vários usuários compartilhar um mesmo equipamento sem a necessidade de outros equipamentos intermediários de multiplexação são denominados genericamente de sistemas de múltiplo acesso. Fazem parte desses sistemas: telefonia celular, o *paging*, o *trunking*<sup>13</sup>, *WiMAX* e os sistemas de multiacesso propriamente ditos (GASPARINI 2005). As técnicas de múltiplo acesso utilizadas podem ser analógicas e digitais.

#### **4.3.1. *Frequency Division Multiple Access (FDMA)***

Permite o múltiplo acesso no domínio da freqüência. Foi a primeira a ser utilizada nos sistemas de rádio. A primeira geração de sistemas multiacesso era constituída de vários rádios monocal nas faixas de VHF e UHF, sendo que cada usuário possuía a sua freqüência exclusiva e utilizava o mesmo equipamento de transmissão e entroncamento com a central pública de outros usuários (GASPARINI, 2005).

---

<sup>13</sup> Serviço de telecomunicações móvel terrestre de interesse coletivo que utiliza sistema de radiocomunicação, basicamente, para a realização de operações do tipo despacho e outras formas de telecomunicações. Caracteriza-se pela mobilidade do usuário. O SME é prestado em regime privado, mediante autorização, conforme disposto na Lei n.º 9.472, de 16 de julho de 1997 e é destinado a pessoas jurídicas ou grupos de pessoas, naturais ou jurídicas, caracterizados pela realização de atividade específica. Nomes populares: "*TRUNKING*", "*TRUNK*", "*SISTEMA TRONCALIZADO*". Disponível em: [www.teleco.com.br](http://www.teleco.com.br).

A evolução dos sistemas de múltiplo acesso ocorreu com os sistemas celulares, pois os usuários não estão presos a uma determinada frequência, utilizando então qualquer canal que esteja disponível (GASPARINI, 2005).

#### **4.3.2. Time Division Multiple Access (TDMA)**

Possibilita o múltiplo acesso no domínio do tempo. Foi muito utilizada inicialmente na transmissão de bits por meio de *modems* com multiplexação. No segmento dos sistemas celulares, a técnica TDMA foi escolhida para constituir a segunda geração desses sistemas.

O TDMA dispõe de dois tipos básicos de canais: canais de tráfego digital, que são utilizados para a transmissão dos sinais de voz entre ERB e o telefone celular (canal de tráfego digital direto) e entre o telefone celular e a ERB (canal de tráfego digital reverso), e canais de controle digitais que também atuam no sentido direto e reverso (NASCIMENTO, 1999).

#### **4.3.3. Code Division Multiple Access (CDMA)**

O acesso múltiplo por divisão de código, utiliza princípios totalmente diferentes dos utilizados na comunicação via rádio convencional, devido ao espalhamento espectral (*spread spectrum*<sup>14</sup>) que pode ser obtido de duas maneiras: pelo salto de frequência, que pode ser lento ou rápido, ou pela seqüência direta (NASCIMENTO, 1999).

A sincronização das seqüências pseudo-aleatórias usadas no CDMA exige que as ERBs possuam um controle extremamente preciso de frequência e tempo. Esta técnica usa a diversidade como meio de melhorar a qualidade da comunicação, além

---

<sup>14</sup> Técnica de transmissão surgida com o objetivo de dificultar a escuta indevida das mensagens transmitidas via rádio e torná-las mais resistentes às interferências propositas.

de permitir que uma grande quantidade de usuários utilize um canal de banda larga simultaneamente (NASCIMENTO, 1999).

No CDMA, cada sinal consiste de uma seqüência binária pseudo-aleatória diferente, que modula a portadora, espalhando o espectro da forma de onda. Um grande número de sinais CDMA compartilha o mesmo espectro de freqüência, sendo que, se o CDMA for visto no domínio da freqüência ou no domínio do tempo, os sinais de acesso múltiplo parecem estar superpostos.

#### **4.3.4. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)**

Trata-se de uma técnica de multiplexação de informações em um conjunto de subcanais<sup>15</sup> modulados por subportadoras de banda estreita ortogonais entre si. Esse esquema de modulação pode ser implementado como um banco de filtros, como mostra a FIG. 10. Nesse caso, uma seqüência de bits transmitida a uma taxa de R bits/s sobre cada subportadora (FIGUEIREDO, 2004).

---

<sup>15</sup> Subcanais – um dos problemas comum em redes sem fio baseadas em topologia Ponto-Multiponto é o desbalanceamento de cobertura entre os enlaces direto (*downlink*) e reverso (*uplink*). Em vários cenários práticos, as estações clientes sofrem restrições quanto ao consumo de potência e à potência máxima de transmissão, resultando em uma tendência natural para que a cobertura seja limitada pelo enlace reverso. Para minimizar esse problema a técnica de subcanais adotada pelo IEEE 802.16, estabelece que a informação seja transmitida em apenas 25% das subportadoras disponíveis. O preço a ser pago pelo aumento de cobertura por meio da subcanalização é a redução na vazão máxima suportada pelo enlace (FIGUEIREDO, 2004).

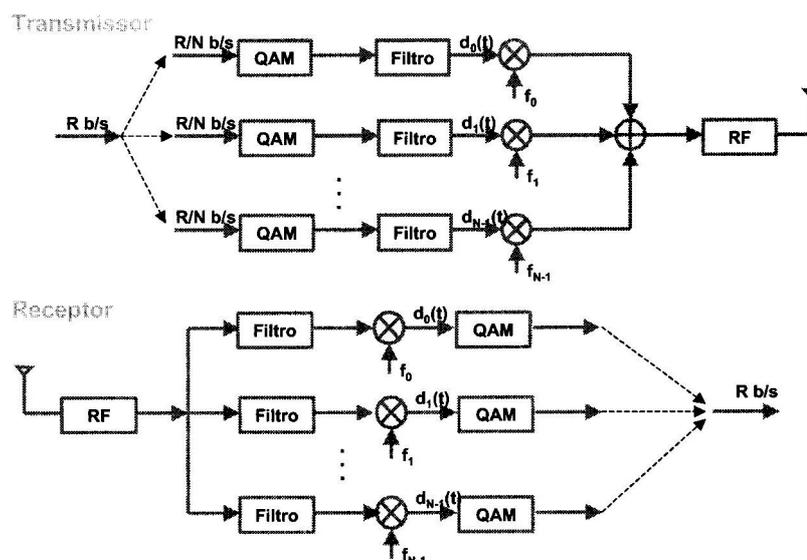


FIGURA 10 – Modulação OFDM implementada por meio de banco de filtros

FONTE: Figueiredo (2004)

A utilização da técnica de OFDM para acesso ao canal suporta apenas acesso fixo, o que significa que não permite o acesso a *BS* em movimento. Suporta ambientes LOS na banda de 11 a 66 GHz e NLOS para bandas inferiores a 11GHz, além do melhoramento em QoS que oferece suporte necessário para uso de voz sobre IP (VoIP) e *Streaming* (transmissão de áudio e vídeo) e segurança. Fazendo-se um elemento fundamental para suportar operação sem linha de visada na tecnologia WiMAX, em razão do alto desempenho alcançado (FIGUEIREDO, 2004). Em um ambiente NLOS, uma parte do sinal de rádio é refletida pelos prédios e paredes. No entanto, as reflexões causam atenuações em algumas faixas de frequências, sendo assim, o protocolo utilizado deve ser capaz de lidar com a perda causada por estas atenuações. O OFDM ao contrário do FHSS ou DSSS<sup>16</sup>, pode transmitir centenas de portadoras ao mesmo tempo.

<sup>16</sup> *Frequency Hopping Spread Spectrum* é também chamada de Salto de Frequência. O objetivo desta tecnologia é transmitir dados sempre em um canal diferente, tendo um tempo de mudança de canais, que é o *Hop-time*, e um tempo de transmissão nos canais, que é o *Dwell-time*. *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) - para atingir uma operação confiável em taxas superiores a 2-Mbps e uma extensão da área de operação, o DSSS substituiu o FHSS como método de modulação.

#### 4.4. Signal Noise Rate (SNR)

Um sinal transmitido através de um sistema de telecomunicações sofre perturbações de várias naturezas. Uma das formas possíveis de se classificar essas perturbações é através dos tipos de ruídos. Na tabela abaixo de acordo com Silva (2004), expõem-se os principais ruídos encontrados nos sistemas de microondas.

QUADRO 3– Ruído térmico variável (ruído de FM)

RUÍDO DE EQUIPAMENTO	Ruído térmico fixo ou ruído básico.	
	Ruído de intermodulação.	Ruído de MODEM e amplificadores de B.B.
		Ruído de TX-RX.
RUÍDO DE INTERFERÊNCIA	Interferência co-canal.	
	Interferência de canal adjacente.	
	Interferência de equipamentos da mesma estação.	
	Interferência devido a intermodulação entre portadoras.	
	Interferência de outros sistemas.	
RUÍDO DE ECO	Reflexão no trajeto entre as antenas.	
	Reflexão no sistema de guia de onda.	

Os ruídos são sinais espúrios que aparecem agregados ao sinal desejado, sendo independentes da natureza deste. O ruído térmico tem sua origem no ruído branco<sup>17</sup> gerado pelos circuitos existentes na cadeia de recepção (SILVA, 2004).

A relação sinal/ruído (S/N) é expressa em dB, é obtida através do cálculo do logaritmo da relação entre a potência do sinal e a potência do ruído na recepção (MEDEIROS, 2004):

$$\frac{S}{N} = 10 \log \frac{\text{Potência do sinal}}{\text{Potência do ruído}}$$

---

<sup>17</sup> Aquele presente em todo espectro de frequências com densidade espectral constante (MEDEIROS, 2004).

(4.1)

Comparativamente ao sinal, o ruído elevado pode tornar a informação ininteligível e até inviabilizar as comunicações. Para a obtenção da relação S/N à entrada do circuito demodulador de um radioreceptor são considerados nos cálculos matemáticos: a abertura da antena, os ganhos dos estágios de RF do receptor e a figura de ruído<sup>18</sup> do receptor. (MEDEIROS, 2004).

Os diferentes enlaces de comunicações, analógicos e digitais, requerem um valor mínimo de S/N na recepção, para que as comunicações possam ocorrer com boa qualidade de sinal.

#### 4.5. Modulação X BER

A alteração da modulação visa manter o valor de BER dentro de um limite como pode ser visto nas FIG. 11 e 12.

---

<sup>18</sup> Equivale à potência de ruído interno gerado por um dispositivo. Pode ser definido pela relação entre duas potências medidas:

$$F = \frac{\text{Potência de ruído medido na saída do dispositivo, à temperatura ambiente}}{\text{Potência de saída do dispositivo, como se o dispositivo não gerasse ruído}}$$

Nas FIG. 11 e 12 pode-se observar a mudança ocorrida dos níveis de modulação devido ao encontro com o limite máximo de BER em função do SNR, de forma que quanto menor forem os níveis de ruído menores serão as distorções.

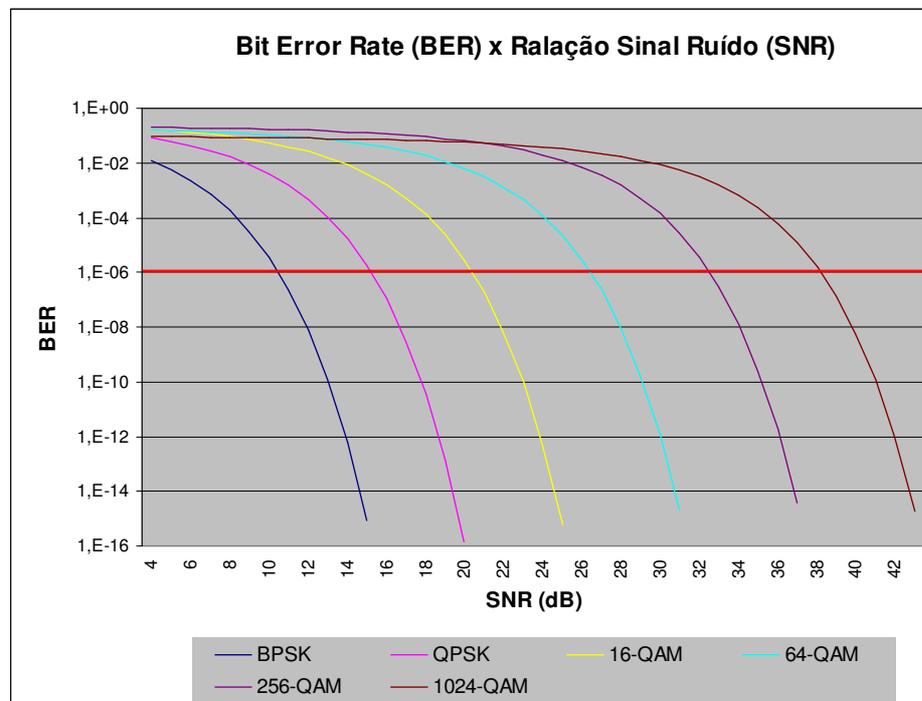


FIGURA 11 - Comportamento do BER em função do SNR para diferentes tipos de modulação

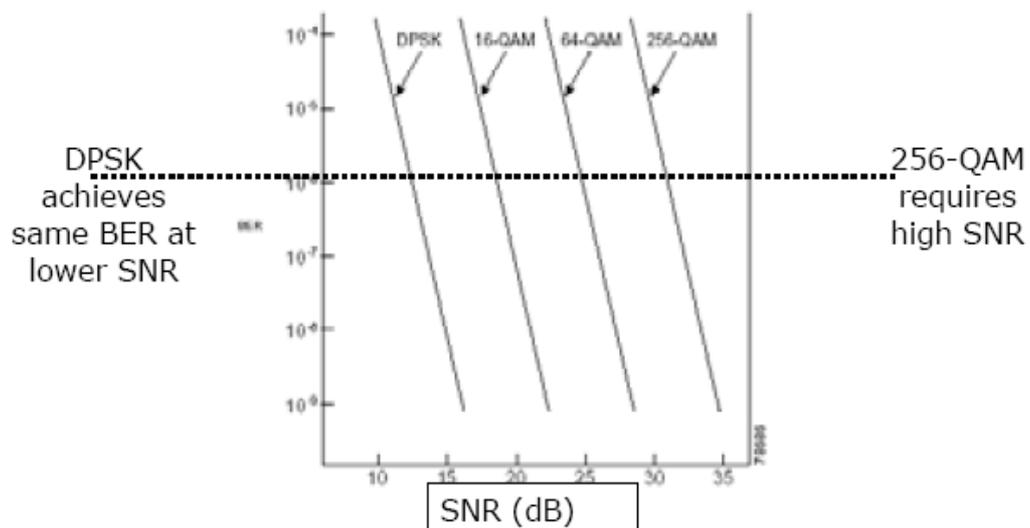


FIGURA 12 – Taxa de erro para sistemas PSK e QAM

## 5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Resultados dos cálculos

Estudar o comportamento de sistemas de comunicação sem fio é extremamente complexo e demanda pela consideração de vários parâmetros paralelamente. Neste trabalho como o título sugere, foi proposto a “Avaliação da instabilidade da modulação em diferentes ambientes”. O objetivo é considerar os diferentes tipos de ambientes para propagação do sinal representado pelo parâmetro beta, principalmente a verificação do impacto nas mudanças de modulação adaptativa que é uma das principais características da tecnologia estudada.

A fim analisar sobre as questões levantadas foi utilizado o programa *WiMAXTest*<sup>19</sup>, que provê a simulação de alguns parâmetros, bem como a predição de cobertura e medidas de campo.

Para calcular a potência recebida usou-se o modelo de *shadowing* (RAPAPPORT, 1996), já comentado no Capítulo 3, considerando  $\beta=3,2$  e  $\beta=5$  de forma a termos duas referências base do tipo de ambiente para propagação, além dos parâmetros mostrados no QUADRO 4. Estes parâmetros são do sistema *WiMAX* e podem ser encontrados no documento 8F/1079-E (BRAZIL EVALUATION GROUP – IMT2000). Estes valores puderam ser mudados durante os cálculos para possibilitar a análise de muitos tipos de situações as quais o sistema possa ser submetido.

---

<sup>19</sup> Programa de autoria de Adriano Góes, então aluno de graduação do curso de engenharia elétrica da PUCCampinas.

QUADRO 4 – Parâmetros da simulação

PARÂMETROS	SÍMBOLOS	VALORES	UNIDADES
Operation Frequency	F	2.5	GHz
Mobile station power transmit	PMt	-10	dBm
Base station power transmit	PBt	23	dBm
Base station gain of antenna	Gt	15	dBi
Mobile station gain of antenna	Gr	-1	dBi
Standard Deviation	$\Delta$	2	dB
Antenna degree	$\theta$	120	degrees
Channel	Ch	10	Mbits/s
Flow	Flow	Downlink	-
Initial distance	d0	1	meter
Variable distance	d	10	meter

A modulação de cada antena depende da potência recebida. Neste trabalho considerou-se os seguintes limites máximos para cada tipo de modulação de acordo com o manual da antena (SYSTEM MANUAL ALVARION BREEZE ACCESS, 2006):

QUADRO 5 – Sensibilidade para cada nível de modulação

NÍVEIS DE MODULAÇÃO	PARÂMETROS RÁDIO	
	CANAL 10 (dBm)	CANAL 5 (dBm)
QPSK 1/2	-88.5	-91.5
QPSK 3/4	-85.1	-88.1
16QAM 1/2	-82.8	-85.8
16QAM 3/4	-78.7	-81.7
64QAM 1/2	-77.6	-80.6
64QAM 2/3	-74.5	-77.5
64QAM 3/4	-73.4	-76.4
64QAM 5/6	-71.5	-74.5

FONTE: *System Manual Alvarion Breeze Access*, 2006

### 5.1.1. Resultados para $\beta=3,2$ e $\beta=5$

Utilizando-se o modelo de *shadowing* para descrever a atenuação, obtêm-se a curva apresentada na FIG. 13 para valores de  $\beta=3,2$  e  $\beta=5$ , respectivamente. As linhas horizontais correspondem às diferentes modulações, determinando as regiões que cada modulação irá alcançar.

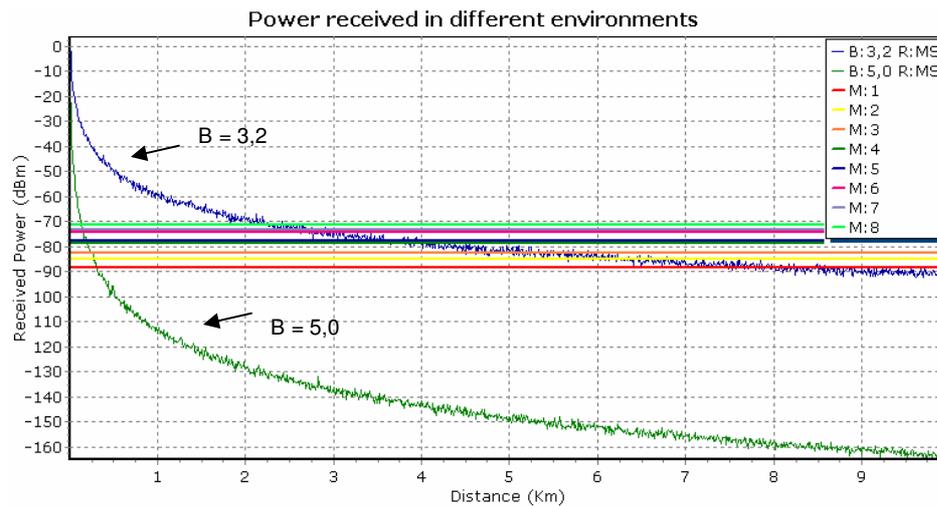


FIGURA 13 – Atenuação do sinal para  $\beta = 3,2$  e  $\beta = 5,0$ .

FONTE: Reggiani (2007)

As modulações, de  $M=1$  a  $M=8$ , correspondentes a cada linha estão explicitadas no QUADRO 6.

QUADRO 6 – Legenda complementar da FIG. 13, associando os números de M:1 a M:8 às modulações

NÍVEIS DE MODULAÇÃO	
1	QPSK $\frac{1}{2}$
2	QPSK $\frac{3}{4}$
3	16 QAM $\frac{1}{2}$
4	16 QAM $\frac{3}{4}$
5	64 QAM $\frac{1}{2}$
6	64 QAM $\frac{2}{3}$
7	64 QAM $\frac{3}{4}$
8	64 QAM $\frac{5}{6}$

Observa-se na FIG. 13, que para valores de  $\beta$  mais altos a atenuação acentua-se e o limite para cada modulação é denominada por regiões menores para transmissão. Isto é ilustrado nas FIG. 14 e 15 para  $\beta=3,2$  e  $\beta=5,0$ , respectivamente. Nestas figuras a distribuição da modulação é apresentada numa escala normalizada. Isto é, a distância máxima do sinal recebido não é a mesma nos dois casos. A distância máxima em cada caso é determinada pela intersecção da atenuação da potência com a linha horizontal, que indica o limite de sensibilidade para cada modulação. Estas figuras mostram que para  $\beta=5,0$ , a região com modulação 64QAM-5/6 é maior do que a região com esta modulação para  $\beta=3,2$ , proporcionalmente à área total de cobertura em cada valor de  $\beta$ . Porém, a região com modulação 64QAM-5/6 cobre uma distância menor para  $\beta=5$  do que para  $\beta=3,2$ , devido ao fato de que a atenuação para  $\beta=5$  é muito mais forte e o ponto inicial de sensibilidade é alcançada numa distância menor do transmissor.

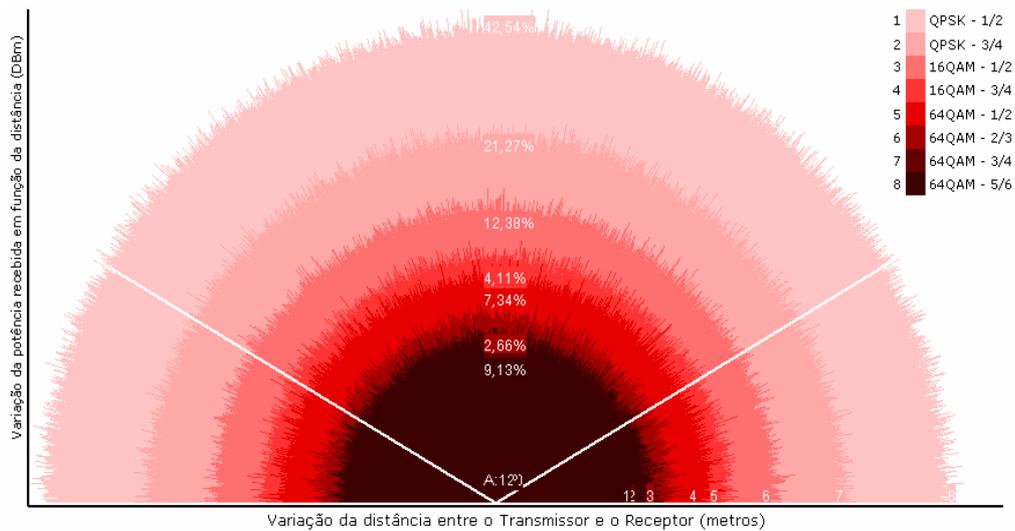


FIGURA 14 – Mapa de modulação com níveis de sensibilidade para  $\beta = 3,2$

FONTE: Reggiani (2007)

Na FIG. 15 o valor do parâmetro beta é alto, significando que a distribuição do nível de modulação torna-se concentrado em uma pequena área de propagação.

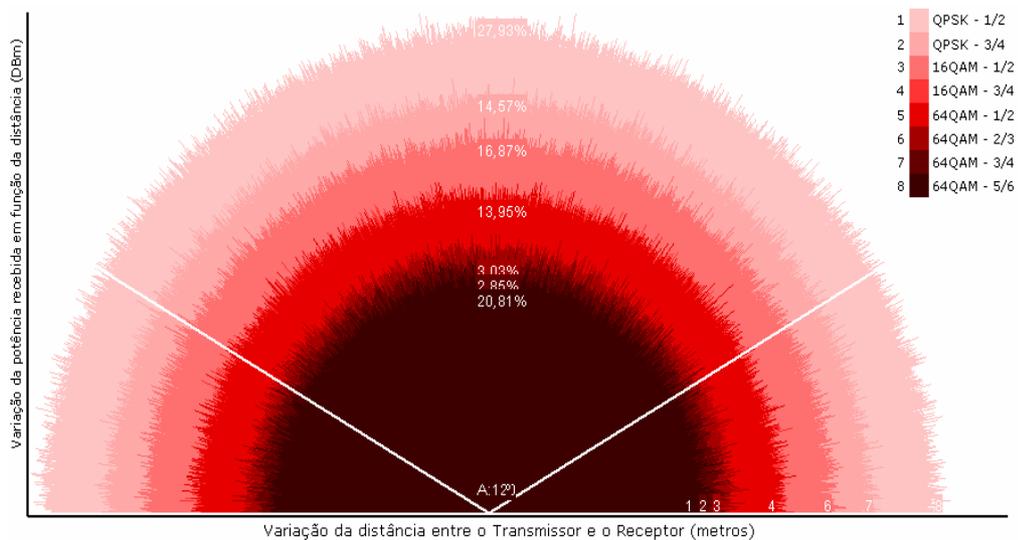


FIGURA 15 – Mapa de modulação com nível de sensibilidade para  $\beta = 5$

FONTE: Reggiani (2007)

De acordo com o modelo de *shadowing*, os valores de potência apresentam uma distribuição gaussiana em torno dos valores médios. Determinado pelo desvio padrão. Desta forma, haverá regiões às quais pode-se associar dois tipos de modulação. Este fenômeno pode gerar uma instabilidade que possivelmente afetará a oferta de serviços.

Para avaliar estas regiões de instabilidade esboçou-se a curva de atenuação com desvio padrão. As duas curvas apresentadas nas FIG. 16 e 17 para  $\beta=3,2$  e  $\beta=5,0$ , respectivamente, mostram que para valores de  $\beta$  menores o efeito do desvio padrão é mais significativo. Neste caso, a intensidade do sinal varia entre dois níveis de modulação em regiões largas ao longo do raio de cobertura.

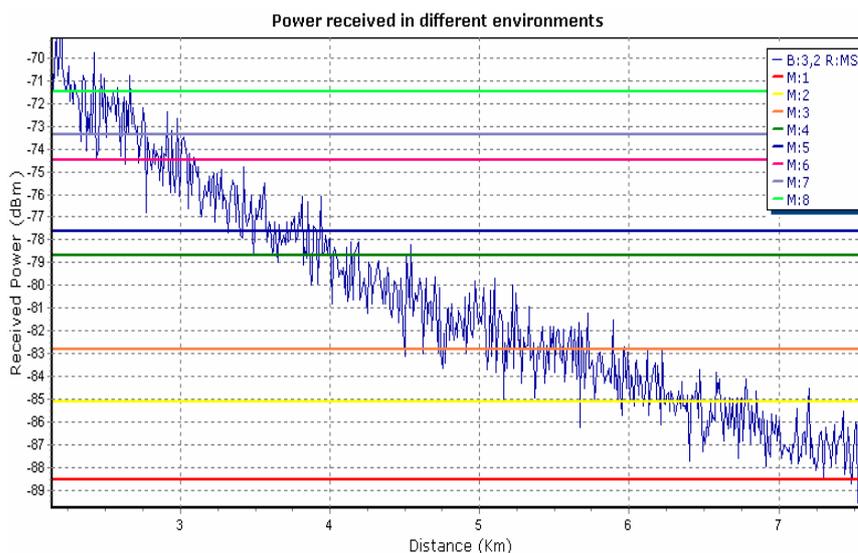


FIGURA 16 – Atenuação do sinal com níveis de sensibilidade para  $\beta = 3,2$

FONTE: Reggiani (2007)

Os valores do desvio padrão são os mesmos para ambos valores do parâmetro beta. O efeito do desvio padrão apresenta diferença nas FIG. 16 e 17, isto é causado pela escala de comprimento não ser a mesma para ambos os casos. Na FIG. 16 apresenta-se um gráfico da distância com  $d=7,5$  km, enquanto na FIG. 17 a distância máxima atinge  $d=0,35$ km. Isto foi feito para mostrar a intersecção da curva da intensidade do sinal com linhas horizontais que indicam as regiões de modulação.



FIGURA 17 – Atenuação do sinal com níveis de sensibilidade para  $\beta = 5$

FONTE: Reggiani (2007)

### 5.1.2. Regiões de superposição

Observa-se que para valores maiores de  $\beta$  a ocorrência de regiões com duas possibilidades de modulação é pequena, indicando que nestes casos a instabilidade ocorre com menos frequência. Isto é mostrado no QUADRO 7 para  $\beta=3,2$ ,  $\beta=5$  e um desvio padrão de 2dB.

Na primeira coluna apresentam-se os tipos de modulações, na segunda e quinta colunas, os valores predefinidos nos quais a modulação muda, na terceira e sexta colunas, a largura das regiões de instabilidade entre os tipos de modulações, e na quarta e sétima colunas, os valores das áreas de instabilidade com suas respectivas áreas de cobertura (que são diferentes para cada valor  $\beta$ ).

Observa-se que para  $\beta = 5,0$  as regiões de instabilidade são muito menores do que para  $\beta = 3,2$ . Isto indica que para altos valores de  $\beta$ , tem-se menos regiões de instabilidade comparado a valores de  $\beta$  menores, para os quais a atenuação é menos acentuada.

QUADRO 7 – Resultados da simulação com diferentes ambientes

MODULATION LEVEL	B=3,2 e $\Delta=2$ dB			B=5,0 e $\Delta=2$ dB		
	R(m)	$\Delta R$ (m)	A(%)	R(m)	$\Delta R$ (m)	A(%)
QPSK 1/2	7,481	2,330	38,07	331	10	24,07
QPSK 3/4	5,670	2,690	18,89	280	9	10,79
16QAM 1/2	4,519	1,721	18,35	249	8	19,11
16QAM 3/4	3,653	589	4,61	210	0	8,31
64QAM 1/2	3,321	700	7,43	209	2	7,49
64QAM 2/3	2,631	600	1,51	171	0	3,43
64QAM 3/4	2,628	600	2,19	162	1	3,23
64QAM 5/6	2,261	400	8,95	153	0	23,57

## 5.2. Medidas de campo

Os testes foram realizados nas mediações da PUC-Campinas e UNICAMP. Foram realizadas medidas em condição NLOS com alcance de até 1650 metros, medidos através da utilização de um equipamento de posicionamento global (GPS). Foram utilizados equipamentos *Alvarion* AN1248 de frequência de 5,8 Ghz, ganho de 21dbi da antena transmissora e 14dBi da antena receptora sendo ambas de polarização vertical. Estes equipamentos empregam as modulações BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), QAM16 e QAM64 (*Quadrature Amplitude Modulation* 16 e 64) com tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) para multiplexação já explicitados no Capítulo 4.

### 5.2.1. Valores de SNR e modulações medidas

Neste trabalho foram realizados testes com antenas *Alvarion* 5,8GHz, a fim de compararmos valores teóricos e práticos a partir de alguns parâmetros extraídos da

*Management Information Base (MIB)*<sup>20</sup> das antenas BS e SS. O principal motivo desse levantamento é a caracterização da propagação em diferentes ambientes, já que como pode ser visto nas seções anteriores, em algumas situações a variação do sinal faz com que uma das principais características do *WiMAX*, que é a modulação adaptativa, seja acionada. Esse fenômeno nos coloca de frente a alguns questionamentos uma vez que há uma sobreposição das faixas de modulação, pois o sinal pode fazer uso de duas modulações.

O resultado das medidas realizadas na região PUC-Campinas/UNICAMP está apresentado no QUADRO 8.

---

<sup>20</sup> Na estrutura de MIB, cada nó(equipamento monitorado) possui um nome simbólico e um identificador numérico associado. Assim, determina-se cada objeto por um identificador único. A MIB é uma base de dados de gerenciamento (SOUSA, 2007).

QUADRO 8 - Dados extraídos da análise das medidas de campo

MODULAÇÃO MÉDIA	DISTÂNCIA (m)	SNR MÉDIO (dB)	DESVIO PADRÃO MÉDIO (dB)
4	1090	10,30	0,75
3	1104	6,70	0,54
5	1120	9,50	1,79
1	1137	5,00	1,91
3	1160	6,60	0,71
3	1180	6,70	0,64
5	1210	14,40	0,55
4	1220	9,50	0,78
2	1237	6,90	0,52
1	1260	3,90	1,41
3	1280	4,70	0,51
6	1310	13,00	1,16
4	1360	11,50	0,84
5	1370	11,60	0,63
3	1420	6,80	3,88
1	1460	6,19	0,48
4	1500	7,60	0,74
5	1600	11,10	0,90
4	1610	7,90	0,53
5	1630	9,80	0,58
3	1650	6,80	2,16

Onde, a modulação média representa os valores médios encontrados durante trinta minutos de transmissão *downlink*, a distância representa o intervalo em metros entre a BS e a SS. A terceira e a quarta colunas mostram o SNR médio e o desvio padrão da relação sinal ruído medida.

### 5.2.2. Modelo de *Shadowing*

Nos cálculos anteriores, quando se mostrou a superposição de diferentes modulações devido ao desvio padrão, utilizou-se o modelo de *shadowing* para

descrever a atenuação do sinal. Para saber quais seriam as faixas de modulação esperadas para as medidas realizadas, analisamos qual o valor do parâmetro beta que melhor descreveria os dados medidos. Para tanto calculamos os valores de SNR partindo do mesmo ponto de referência e alteramos os valores de beta. Para determinar a melhor curva calculamos o desvio padrão, que descreve quão próximos estão os pontos medidos da curva calculada. No QUADRO 9 são apresentados os valores de atenuação para  $\beta = 2, 3, 4$  e  $5$ , considerando-se como a distância de referência o ponto mais próximo ao transmissor onde as medidas foram feitas. No QUADRO 10 apresenta-se os resultados do desvio padrão, indicando que a curva para a qual  $\beta = 2$  é a que melhor descreve as medidas de campo.

QUADRO 9 - Cálculo da atenuação com diferentes valores de  $\beta$ 

DISTÂNCIA (m)	SNR MÉDIO (dB)	SNR CALCULADO $\beta = 2$ (dB)	SNR CALCULADO $\beta = 3$ (dB)	SNR CALCULADO $\beta = 4$ (dB)	SNR CALCULADO $\beta = 5$ (dB)
1090*	10,30*				
1104	6,70	10,2	10,1	10,1	10,0
1120	9,50	10,1	9,9	9,8	9,7
1137	5,00	9,9	9,7	9,6	9,4
1160	6,60	9,8	9,5	9,2	8,9
1180	6,70	9,6	9,3	8,9	8,6
1210	14,40	9,4	8,9	8,5	8,0
1220	9,50	9,3	8,8	8,3	7,9
1237	6,90	9,2	8,7	8,1	7,6
1260	3,90	9,0	8,4	7,8	7,2
1280	4,70	8,9	8,2	7,5	6,8
1310	13,00	8,7	7,9	7,1	6,3
1360	11,50	8,4	7,4	6,5	5,5
1370	11,60	8,3	7,3	6,3	5,3
1420	6,80	8,0	6,9	5,7	4,6
1460	6,19	7,8	6,5	5,2	4,0
1500	7,60	7,5	6,1	4,8	3,4
1600	11,10	7,0	5,3	3,6	2,0
1610	7,90	6,9	5,2	3,5	1,8
1630	9,80	6,8	5,1	3,3	1,6
1650	6,80	6,7	4,9	3,1	1,3

- Valores de referências iniciais das medidas.

QUADRO 10 – Valores de qui-quadrado

VALORES DE $\beta$	Qui-quadrado
2	3,24
3	3,60
4	4,19
5	4,94

### 5.2.3. Determinação da modulação

Os níveis de modulação de acordo com os valores de SNR da antena utilizada no experimento são mostrados nos QUADROS 11 e 12 de acordo com o manual da antena da marca *Alvarion*.

QUADRO 11 - Especificações Rádio

Sensitivity, typical (dBm at antenna port, PER<10%, 20 MHz bandwidth <sup>3</sup> )	Modulation Level <sup>4</sup>	Sensitivity (HW Rev. A)	Sensitivity (HW Rev. B/C)	Min. SNR
	1	-87 dBm	-89 dBm	6 dB
	2	-86 dBm	-88 dBm	7 dB
	3	-85 dBm	-86 dBm	9 dB
	4	-83 dBm	-84 dBm	11 dB
	5	-80 dBm	-81 dBm	14 dB
	6	-78 dBm	-77 dBm	18 dB
	7	-71 dBm	-73 dBm	22 dB
	8 <sup>5</sup>	-69 dBm	-71 dBm	23 dB
Modulation	OFDM modulation, 64 FFT points; BPSK, QPSK, QAM16, QAM64			

Fonte: *System manual Alvarion Breeze Access* – 2006.

QUADRO 12 - Nível máximo de modulação recomendado pela *ALVARION*

Recommended Maximum Modulation Level*	
SNR	Maximum Modulation Level
SNR > 23 dB	8
21 dB < SNR < 23 dB	7
16 dB < SNR < 21 dB	6
13 dB < SNR < 16 dB	5
10 dB < SNR < 13 dB	4
8 dB < SNR < 10 dB	3
7 dB < SNR < 8 dB	2
6 dB < SNR < 7 dB	1

Fonte: *System manual Alvarion Breeze Access* – 2006.

No GRAF. 1 mostra-se o comportamento da atenuação para valores de distância que variam de 1104 a 1650 m. A curva central é a SNR médio, a curva

superior é o [SNR + Desvio Padrão] e a curva inferior é o [SNR – Desvio Padrão]. Deste modo podemos ver quais seriam as possíveis modulações esperadas considerando-se uma atenuação descrita pelo modelo de *shadowing*, com  $\beta = 2$  e desvio padrão de 3,24 dB.

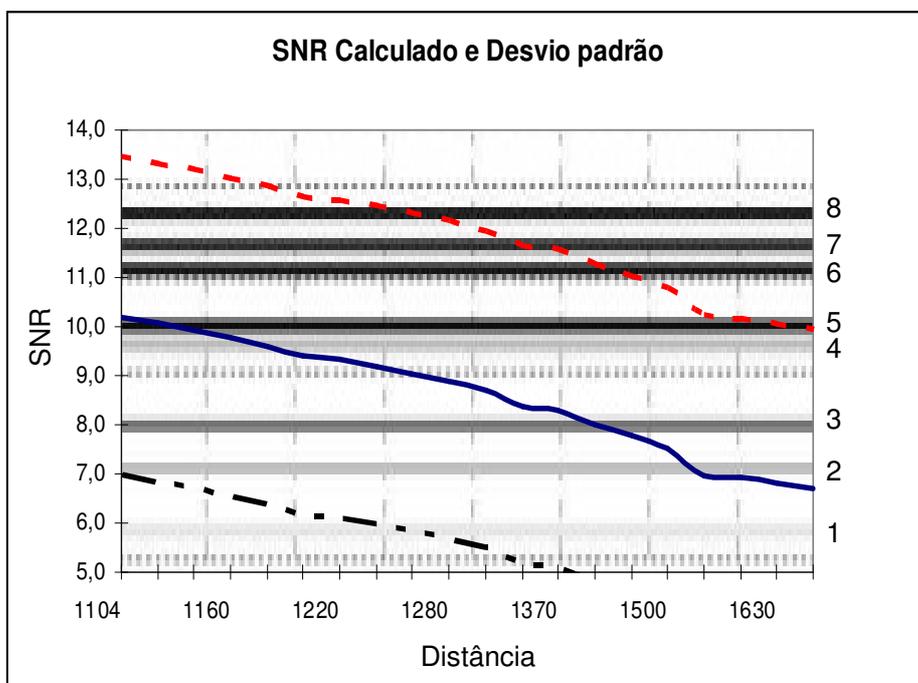


GRÁFICO 1 - Relação entre o valores de SNR e a faixa de variação devido ao desvio padrão

Nos GRAF. 2 e 3 estão mostrados os valores de modulação medidos e os limites inferior e superior da modulação quando se considera as medidas descritas pelo modelo de *shadowing* com  $\beta = 2$  e desvio padrão 3,24.

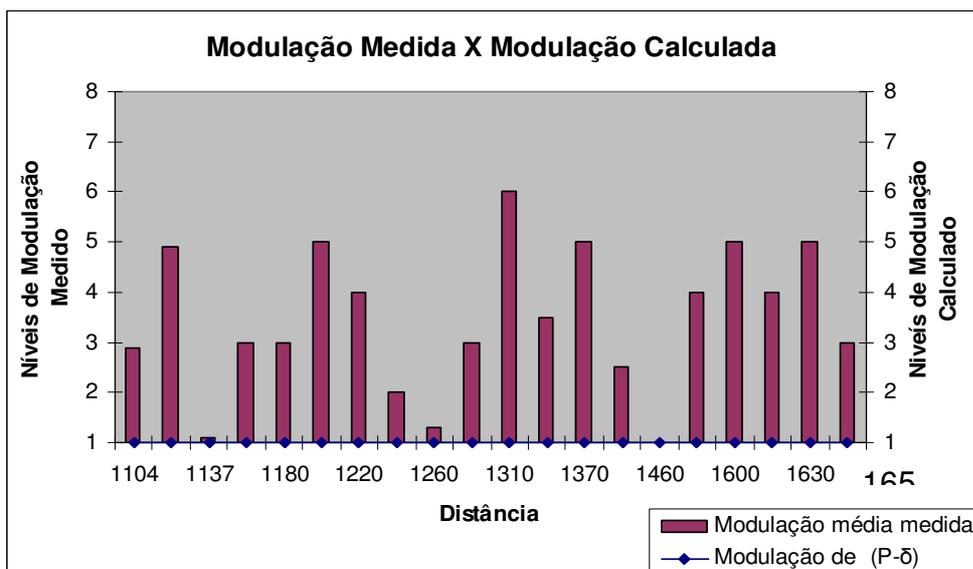


GRÁFICO 2 - Modulação medida e limite inferior da faixa de modulação esperada

É possível observar que a maior parte das modulações medidas se encontra dentro da faixa de modulação esperada quando se descreve a atenuação com o modelo de *shadowing* com  $\beta=2$  e desvio padrão de 3,24 dB.

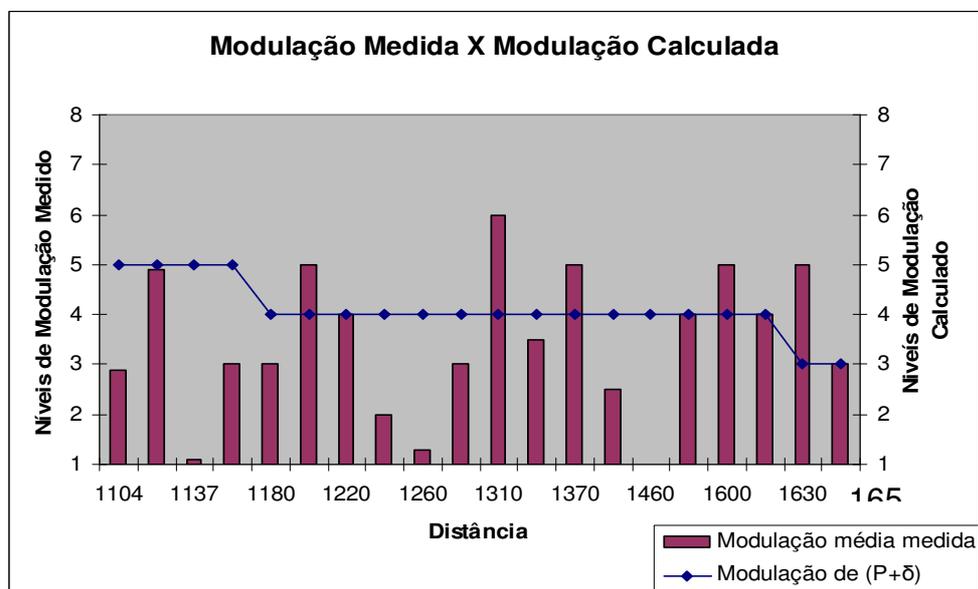


GRÁFICO 3 - Modulação medida e limite superior da faixa de modulação esperada

## 6. CONCLUSÃO

A crescente aceitação de tecnologias de serviços móveis convém como forte indicadora da necessidade de estudos cada vez mais aprofundados de soluções robustas e que vai ao encontro da demanda do mercado por esses serviços.

O padrão IEEE 802.16 tem indícios bastante convincentes de que pode oferecer inclusão à internet em regiões hoje não alcançadas pelo acesso banda larga, além de englobar a gama de serviços propostos por tecnologias *triple play* (SALDANHA, 2007).

A predição da atenuação da onda eletromagnética em um enlace de rádio móvel é fundamental para que as estimativas da intensidade média de sinal recebido sejam efetuadas e de posse dos resultados, se possa concluir sobre a viabilidade de um dado serviço a ser oferecido (RAMALHO, 2006).

Para este estudo, o modelo de *shadowing* foi utilizado para embasar o cálculo da atenuação na propagação do sinal fazendo uso do padrão pré-*WiMAX* (fixo) para WMAN operando em 5.8Ghz.

Para valores de  $\beta$  maiores, tem-se uma maior atenuação do sinal. Portanto, se espera uma maior área de cobertura quando se tem uma área com maior visibilidade como é o caso das áreas caracterizadas pelo valor de  $\beta = 2$ . Porém, observou-se que devido ao fato dos valores da intensidade de sinal estarem dispersos em torno de um valor médio – descrito pelo desvio padrão – existe a possibilidade de superposição de modulações. Dependendo do caso considerado isto pode prejudicar a qualidade do serviço oferecido. E esta superposição acontece mais fortemente para valores de  $\beta$  menores.

Faz-se necessário testes de serviços que possam servir como ponto chave a implantação da tecnologia, tais como navegação à internet ou Voz sobre IP (VoIP), a fim de certificar a reação da atenuação aplicada em diferentes serviços.

## 6.1. Trabalhos Futuros

As seguintes questões foram identificadas para a continuação deste trabalho:

- Análise da instabilidade do sinal mediante testes de alguns serviços específicos para transmissão WiMAX. Nesse trabalho avaliamos de uma forma genérica a instabilidade do sinal mediante o ambiente de propagação, o que de certa forma poderia ser complementado com a análise de serviços tais como VoIP e Vídeo sobre Demanda (VoD).
- Comparação ainda que via simulação entre tecnologias sem fio, a fim de indicar a melhor alternativa de conexão focada em algum tipo de serviço. Como por exemplo, os padrões 802.11 e 802.16 com suas variações móveis e fixas.
- Análise de adequação tendo em vista um tipo de serviço específico e a indicação do melhor padrão de transmissão sem fio.

## 7. REFERÊNCIAS

DIAS, G. N. **Estudo sobre o Padrão IEEE 802.16 para Redes Metropolitanas Sem Fio de Banda Larga**. Laboratório de Redes de Alta Velocidade – RAVEL - Programa de Engenharia de Sistemas e Computação - PESC/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.

DUARTE, O. C. M. B. **WIMAX X WIFI**, UFRJ. 2004. Disponível em: <[http://www.gta.ufrj.br/grad/04\\_2/wimax/introducao.htm](http://www.gta.ufrj.br/grad/04_2/wimax/introducao.htm)> Acesso em: maio 2007.

FIGUEIREDO, F. L. **Fundamentos da Tecnologia WIMAX**, On-Line: <http://www.cpqd.com.br>, CPqD Telecom & IT Solutions, Relatório Técnico, Out. 2004. Acesso em: junho de 2007.

GASPARINI, A. F. L. **Projetos para Redes Metropolitanas e de Longa Distância – MAN, Campus e WAN Backbone Designer**. 2ed. São Paulo: Erika, 2005.

GOVINDAN, N. et al. **IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning**. Intel Technology Journal. Volume 08, Issue 03. August 20, 2004. Disponível em: < <http://developer.intel.com/>> Acesso em: Agosto de 2007.

LIMA, L. S., et all. **“WIMAX: Padrão IEEE 802.16 para Banda Larga Sem Fio”**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. Rio de Janeiro, 2004.

LOPES, R. M. J. **Modelos e Planeamento para Redes Locais de Acesso Via Rádio**, ISEL. Lisboa, Portugal. 2004.

MATEUS, R. G.; Loureiro, A. F. **Introdução à computação móvel**. 11a Escola de Computação, COPPE/Sistemas, NCE/UFRJ, 1998.

MEDEIROS, J.C.O. **Princípios de telecomunicações: teoria e prática**. São Paulo: Érica, 2004.

NASCIMENTO, J. **Telecomunicações**. 2ª ed. São Paulo: Makron Books, 1999.

RAMALHO, G. R. **Uma Ferramenta De Predição E Avaliação De Cobertura Para Sistemas De Comunicação Ponto-Área**. Inatel, St<sup>a</sup> Rita do Sapucaí, 2006.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

REGGIANNI, N. et all. **Profile of the Modulation Instabilities in Different Enviroments**", SBMO/IEEE MIT-S (IMOC) congress. Salvador, 2007.

SALDANHA, C. A. **“Wimax – triple play: concepting innovative solutions for the digital inclusion”**. 4th Contecsi - International Conference on Information Systems and Technology Management. São Paulo, 2007.

SILVA, G. V. F. **Telecomunicações: sistemas de radiovisibilidade**. Orientador e revisor técnico: Ovídio César Machado Barradas. Rio de Janeiro: LTC, 1978.

SILVA, M. F. et all. **Redes Sem Fio Metropolitanas Baseadas No Padrão 802.16: Um Estudo de Caso Para Belém-PA**. UFPA. Belém, 2004.

SOUZA, A. P. et all. **“A Expectativa sobre a tecnologia WiMAX no Mercado de Telecomunicações”**. IV FÓRUM ABEE–EEEC/UFG, Inovação Tecnológica: Missão do Engenheiro. Goiânia, 2006.

SOUSA, L. B. **Projetos e implementação de redes: fundamentos, soluções, arquiteturas e planejamento**. 1ed. São Paulo: Érica, 2007.

TANENBAUM, A. S. **Redes de Computadores**. 3ed. Rio de Janeiro: Campus, 1997.

YEE, J.; Esfahani, H. P. **Understanding wireless LAN performance tradeoffs, Communication Systems Design**, p. 32-35, nov. 2002. Disponível em: <<http://i.cmpnet.com/commsdesign/csd/2002/nov02/feat3-nov02.pdf>> Acesso em: maio de 2007.

## 8. BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

**A REVIEW OF SPECTRUM REQUIREMENTS FOR MOBILE WIMAX EQUIPMENT TO SUPPORT WIRELESS PERSONAL BROADBAND SERVICES.** White Paper WiMAX Forum. 2004. Disponível em:<[http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Spectrum\\_Requirements\\_for\\_Mobile\\_WiMAX\\_Sept2007.pdf](http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Spectrum_Requirements_for_Mobile_WiMAX_Sept2007.pdf)> Acesso em outubro de 2007.

**BUSINESS CASE MODELS FOR FIXED BROADBAND WIRELESS ACCESS BASED ON WIMAX TECHNOLOGY AND THE 802.16 STANDARD.** White Paper WiMAX Forum. 2004. Disponível em:<[http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAX-The\\_Business\\_Case-Rev3.pdf](http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAX-The_Business_Case-Rev3.pdf) /> Acesso em outubro de 2007.

**BRAZIL EVALUATION GROUP** – IMT2000, Disponível em:<[http://www.ic.unicamp.br/~omar/IMT\\_Brazil-EG.htm](http://www.ic.unicamp.br/~omar/IMT_Brazil-EG.htm)>, Acesso em abril de 2007.

DORIA F. U. **Desvio-padrão.** In: Doria Filho U, editor. Introdução à bioestatística: para simples mortais. São Paulo: Negócio Editora; 1999. p. 32-3.

FARIAS, P. C. B. **Treinamento Profissional em Redes Wireless.** São Paulo: Digerati Books, 2006.

IEEE 802.16-2004. **IEEE STANDARD FOR LOCAL AND METROPOLITAN AREA NETWORKS.** Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. Disponível em:<<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2004.pdf>> acesso em abril de 2007.

PRADO, E. **Simplesmente o máximo: WiMAX.** Revista do WiMAX, 2004. Disponível em: <[www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/eduardo\\_prado/artigo\\_33.html](http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/eduardo_prado/artigo_33.html)>. Acesso em: setembro de 2007.

SILVA, Marcel William Rocha. **Alocação de Canal em Redes Sem Fio IEEE 802.11 Independentes** 2006 XII, 71 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2006) Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

OLIVEIRA, K.S.L. et all. **“Avaliação do impacto da variação do ambiente nos índices de modulação em um sistema WIMAX”**, SMSI, 2007.

**WIMAX’S TECHNOLOGY FOR LOS AND NLOS ENVIRONMENTS.** White Paper WiMAXForum. Disponível em:<<http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAXNLOSgeneral-versionaug04.pdf> />. Acesso em outubro de 2007.

**WIMAX AND IMT - 2000.** White Paper WiMAX Forum. 2007. Disponível em:<[http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAX\\_and\\_IMT\\_2000.pdf](http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAX_and_IMT_2000.pdf)> Acesso em outubro de 2007.

WIMAX/WiBRO. **General Information about the standard 802.16.**  
Rohde&Schwarz. Disponível em: <<http://www.rohde-schwarz.com>>. Acesso em:  
maio de 2007.