

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ESTAÇÕES RÁDIO BASE
PARA A IMPLANTAÇÃO DO WIMAX NO DISTRITO
FEDERAL**

FILIFE ANDREI LIMA DE ANDRADE MOURA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRASÍLIA – DF

MAIO – 2009

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ESTAÇÕES RÁDIO BASE
PARA A IMPLANTAÇÃO DO WIMAX NO DISTRITO
FEDERAL**

FILIFE ANDREI LIMA DE ANDRADE MOURA

ORIENTADOR: ANTONIO JOSÉ MARTINS SOARES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 379/09

BRASÍLIA/DF: MAIO / 2009

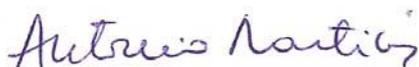
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ESTAÇÕES RÁDIO BASE PARA A
IMPLANTAÇÃO DO WIMAX NO DISTRITO FEDERAL

FILIPE ANDREI LIMA DE ANDRADE MOURA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



ANTÔNIO JOSÉ MARTINS SOARES, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)



LEONARDO RODRIGUES ARAÚJO XAVIER DE MENEZES, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)



PRISCILA AMÉRICA SOLÍS MENDEZ BARRETO, Dr^a., CIC/UNB
(EXAMINADORA EXTERNA)

BRASÍLIA, 29 DE MAIO DE 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

MOURA, FILIPE ANDREI LIMA DE ANDRADE

Estimativa do número de estações rádio base para a implantação do Wimax no Distrito Federal. [Distrito Federal] 2009.

xvi, 67 p., 210 x 297mm (ENE/FT/UnB, Mestre, engenharia Elétrica, 2009). Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1. WiMAX | 2. Capacidade das Antenas |
| 3. Modulações Adaptativas | 4. OFDMA |
| I. ENE/FT/UnB | II Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOURA, F. A. L. de A. (2009). ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ESTAÇÕES RÁDIO BASE PARA A IMPLANTAÇÃO DO WIMAX NO DISTRITO FEDERAL. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM - 379/2009, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 67 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Filipe Andrei Lima de Andrade Moura

TÍTULO: Estimativa do número de estações rádio base para a implantação do Wimax no Distrito Federal.

Grau: Mestre

ANO:2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva os direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Filipe Andrei Lima de Andrade Moura
SHIS QL 08, Lago Sul.
71.620-080 Brasília – DF - Brasil

**Dedico este trabalho
Aos meus pais, Regina e Josélio Moura
que sempre me apoiaram nos momentos difíceis**

AGRADECIMENTO

À Universidade de Brasília, pela oportunidade concedida para elaborar este trabalho, que representa o presente e futuro da telefonia móvel no Brasil e no Mundo. Espero que seja útil para embasar a geração de futuras tecnologias nessa área.

Ao Professor Doutor ANTÔNIO JOSÉ MARTINS SOARES, pelo espírito público, constante compreensão, orientação competente e o seu alto valor técnico e científico.

Aos estimados Mestres da Pós Graduação da Universidade de Brasília e aos distintos colegas, pela feliz convivência acadêmica, apoio e solidariedade.

Aos meus pais Josélio e Regina Moura e meu irmão Fabrício Moura que fazem parte de uma família muito unida e que sempre me incentivaram.

À Roberta Góes pelo carinho, apoio e compreensão em todos os momentos.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta dissertação.

RESUMO

ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ESTAÇÕES RÁDIO BASE PARA A IMPLANTAÇÃO DO WIMAX NO DISTRITO FEDERAL.

Autor: Filipe Andrei Lima de Andrade Moura

Orientador: Antonio José Martins Soares

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, maio de 2009

Nos últimos anos, os serviços de vídeo, de voz e de dados disponíveis nas redes de comunicações fixas têm sido demandados por usuários em mobilidade. Esse fato tem motivado o desenvolvimento de tecnologias que permitam o tráfego de uma grande quantidade de informação nas redes de telefonia celular. WiMAX e UMTS são tecnologias que podem dar vazão a esse tráfego. O WiMAX, designado como a quarta geração de celulares e desenvolvido primariamente para serviços de dados, apresenta, em relação ao UMTS, maior eficiência espectral, melhor qualidade de serviço e, conseqüentemente, maior taxa de transmissão, menor consumo de banda e menor custo da rede. Além do grande potencial para oferta de serviços, o WiMAX é apontado como uma das ferramentas para a convergência digital, e ainda tem sido lembrado como um candidato ao canal de retorno para os serviços de interatividade no Sistema Brasileiro de TV Digital.

Este trabalho tem por objetivo estimar a demanda de acessos a uma eventual rede WiMAX a ser implantada no Distrito Federal, a fim de se determinar o número de estações rádio base (BTS) necessárias para satisfazer os requisitos de capacidade e cobertura. Nesse sentido, serão utilizados dados disponíveis de densidade demográfica para subdividir o DF em regiões rural, suburbana, urbana e densamente urbana. Também será analisado o perfil do público alvo, que será classificado em usuário profissional, tecnológico e casual, de modo a permitir uma estimativa da demanda média de acesso por usuário em cada região. Para o cálculo da capacidade de cada BTS, serão consideradas tecnologias que oferecem um consumo eficiente da banda espectral, como a técnica OFDMA, modulações adaptativas, codificações e sistemas de múltiplas antenas. A condição de propagação do sinal é outro fator que afeta a quantidade de BTS, por isso, o modelo COST 231 será utilizado para se determinar o raio de cobertura máximo da BTS, com o intuito de se ajustar o número de estações de forma apropriada.

ABSTRACT

ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ESTAÇÕES RÁDIO BASE PARA A IMPLANTAÇÃO DO WIMAX NO DISTRITO FEDERAL.

Author: Filipe Andrei Lima de Andrade Moura

Supervisor: Antonio José Martins Soares

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, may of 2009

During the past years, the video, voice and data services available in the fixed communications networks have been requested by users in mobility. This fact has motivated the development of technologies that allow traffic of a lot of information in cellular telephone networks. WiMAX e UMTS are technologies that can help the traffic flow. The WiMAX, known as the fourth generation of cellular and developed primarily for data services, has, when comparing with UMTS, greater spectral efficiency, better quality of service, and therefore higher transmission rate, lower bandwidth consumption and lower network cost. Besides the great potential for provision of services, WiMAX is described as one of the tools for digital convergence, and also it has been remembered as a candidate for the return channel for interactive services of the Brazilian System of Digital TV.

The aim of this work is to estimate the demand for access to an eventual WiMAX network to be deployed in Distrito Federal (DF), in order to determine the number of *Base Transceiver Station* (BTS) necessary to meet the requirements of capacity and coverage. Accordingly, available data of demographic density will be used to subdivide the DF in rural, suburban, urban and densely urban regions. The profile of the target public will also be analyzed and will be classified in professional, technological and casual user, in order to allow an estimate of the average demand for access by users in each region. To calculate the capacity of each BTS, will be considered technologies that offer efficient spectral band consumption, such as the OFDMA technique, adaptive modulation, coding and multiple antenna systems. The signal propagation condition is another factor that affects the amount of BTS, therefore, the COST 231 model will be used to determine the maximum coverage radius of BTS, in order to adjust the number of stations adequately.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Tecnologia WiMAX.....	2
1.2. Investimentos em WiMAX.....	5
1.3. Objetivos do trabalho.....	9
2. CÁLCULO DA DEMANDA	11
2.1. Regiões demográficas típicas	12
2.2. Densidade populacional do Distrito Federal	13
2.3. Determinação da quantidade de usuários	17
2.3.1. Estimativa Populacional	17
2.3.2. Idade do público alvo	17
2.3.3. Penetração da operadora no publico alvo.....	17
2.3.4. Requisitos da mobilidade	18
2.4. Requisitos para o cálculo da demanda.....	19
2.4.1. Tipos de usuários.....	19
2.4.2. Atividade no horário de pico	20
2.5. Cálculo da demanda.....	23
3. CONCEITOS DA TECNOLOGIA WiMAX.....	24
3.1. Reúso de Frequência.....	25
3.2. Protocolo IEEE 802.16	26
3.3. Conceitos de OFDM.....	28
3.3.1. Parâmetros OFDMA.....	32
3.3.2. Tipos de Modulação	35
3.4. Modulação Adaptativa.....	38
3.4.1. Recursos avançados do OFDMA	41
4. CAPACIDADE DA ESTAÇÃO RÁDIO-BASE	44
4.1. Sistemas de Múltiplas Antenas.....	44
4.1.1. Capacidade da Estação Base SISO.....	47
4.1.2. Capacidade da Estação Base SIMO	48
4.1.3. Capacidade da Estação Base MIMO	48
4.2. Cálculo da quantidade de BS para implantação do WiMAX.....	52
5. PROPAGAÇÃO DO SINAL	55

5.1. Modelo de Propagação COST 231	55
5.2. Cálculo de cobertura	58
5.3. Comparação entre as frequências de 2,5 GHz e 3,5 GHz.....	60
6. CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Comparação entre diferentes tecnologias de comunicação sem fio.....	3
Figura 1.2: Aparelho WiMAX Nokia.....	4
Figura 1.3: Veículo da Chrysler com conexão WiMAX.....	5
Figura 1.4. Estatística de receita das operadoras em dados e voz.	6
Figura 1.5. Operadoras WiMAX pelo mundo.	7
Figura 1.6. Equipamento Samsung SMT-T3500 usado para testes WiMAX em Curitiba. ..	9
Figura 1.7. Equipamento Zyxel Max200-M1 usado para testes WiMAX em Curitiba.....	9
Figura 2.1: Regiões demográficas de uma área metropolitana.....	13
Figura 2.2: Regiões administrativas do Distrito Federal.	14
Figura 2.3: Classificação do Distrito Federal em função da densidade populacional.	16
Figura 2.4: Taxa disponível para download <i>versus</i> atividade na rede e usuários ativos.	22
Figura 3.1: BTS sem fator de reuso de frequência.	25
Figura 3.2: BTS com fator de reuso 3:1.	26
Figura 3.3. Evolução do padrão IEEE 802.16.	28
Figura 3.4: Sobreposição de frequências no espectro.....	29
Figura 3.5: Diagrama de blocos do sistema OFDM.....	31
Figura 3.6: Arquitetura básica do sistema OFDM.....	32
Figura 3.7: Acréscimo do intervalo de guarda.	32
Figura 3.8: Comparação entre OFDM e OFDMA.....	33
Figura 3.9: Estrutura básica de subportadoras OFDMA.	34
Figura 3.10: Estrutura completa de subportadoras OFDMA.....	34
Figura 3.11: Constelação BPSK.	35
Figura 3.12: Constelação QPSK.....	36
Figura 3.13: Constelação 16QAM.....	37
Figura 3.14: Constelação 64 QAM.....	38
Figura 3.15: Alteração da modulação referente a degradação do sinal.	40
Figura 3.16: Desempenho do sistema OFDMA com diferentes modulações.....	40
Figura 4.1: Diagrama de um sistema de transmissão MIMO.....	45
Figura 4.2: Tecnologias de múltiplas transmissões e recepções.	49
Figura 4.3: Eficiência espectral variando de acordo com o tipo de antena.	51
Figura 4.4: Variação da taxa de transmissão em função do tipo de antena.	52

Figura 4.5: Quantidade de BTS por região.....	53
Figura 5.1: Parâmetros utilizados no modelo COST 231	58
Figura 5.2: Potência recebida em relação à distância da BTS para os parâmetros da Tabela 5.1.	59
Figura 5.3: Potência recebida em função da distância para 2,5 e 3,5 GHz	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Densidade populacional detalhada do Distrito Federal, em 2008.	15
Tabela 2.2: Densidade populacional por região, no DF, em 2008	16
Tabela 2.3: Distribuição de celulares por operadora, em 2008.	18
Tabela 2.4: Número de usuários por região.....	19
Tabela 2.5: Estimativa do tráfego no PBH.	21
Tabela 2.6: Requisitos para o cálculo do número de usuários.....	22
Tabela 2.7: Requisitos de densidade de tráfego por área.	23
Tabela 3.1: Tipos de acesso WiMAX.....	28
Tabela 3.2: Parâmetros do OFDMA para o padrão 802.16e.	34
Tabela 3.3: Valores da SNR relativos à modulação para $BER = 10^{-4}$	41
Tabela 3.4: Codificação e modulação usadas no WiMAX móvel.....	41
Tabela 3.5: Taxa de transmissão do WiMAX para canais de 5 MHz e 10 MHz.	42
Tabela 3.6: Quantidade de BTS SISO para implantação do WiMAX.	43
Tabela 4.1: Variação da eficiência espectral com a respectiva taxa de transmissão.	51
Tabela 4.2: Variação na relação UL e DL.....	51
Tabela 4.3: Quantidade de BTS para os diferentes casos.....	53
Tabela 4.4: Raio e distância das BTS na região densamente urbana	54
Tabela 4.5: Raio e distância das BTS na região Rural	54
Tabela 5.1: Parâmetros típicos para sistema WiMAX	59
Tabela 5.2: Quantidade de BTS para os diferentes casos, incluindo estudo de propagação.	60
Tabela 5.4: Quantidade otimizada de BTS para atender todo o DF em 3,5 GHz.	62
Tabela 5.5: Quantidade de BTS para 2,5 GHz e 3,5 GHz.....	62

NOMECLATURA E ABREVIações

Sigla	Significado
3G	Terceira Geração
4G	Quarta Geração
AAS	Adaptative Antenna System
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AWGN	Additive White Gaussian Noise
AWS	Advanced Wireless Auction
BER	bit error ratio
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BTS	Base Transceiver Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix
CPE	Customer Premise Equipment
DF	Distrito Federal
DL	Download
FFT	Fast Fourier Transform
FTP	File Transfer Protocol
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICI	Inter-Channel interference
IEEE	Institute of Eletrical and Electronocs Engineers
IP	Internet Protocolo
ISI	Inter-Symbol interference
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service
NLOS	Non-line-of-sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiple
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PBH	Peak Busy Hour
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Qualidade de Serviço
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RA	Região Administrativa
SIMO	Single Input, Multiple Output
SISO	Single-Input and Single-Output
SLA	Service Level Agreement

SNR	Signal-to-noise ratio
SS	Subscriber Station
TDMA	Time Division Multiple Access
UL	Upload
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VoIP	Voz sobre IP
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do tráfego de vídeo, de voz e de dados através da Internet e a rápida penetração da telefonia celular têm gerado enormes expectativas quanto às aplicações multimídia móveis. Essa demanda tem motivado, nos últimos anos, o desenvolvimento de tecnologias que permitiram estender os serviços disponíveis às redes de comunicações fixas para usuários em mobilidade.

No campo das comunicações, podem ser identificadas as tendências de popularização das redes fixas de banda larga e o avanço da comunicação sem fio. O caminho natural é a convergência dessas duas linhas de desenvolvimento. Esse interesse gerou uma grande discussão sobre novas tecnologias sem fio e possíveis padrões que suportem taxas de transmissão em banda larga. Assim, a demanda presente no campo de comunicações sem fio é prover altas taxas de dados para usuário móvel, com o menor consumo de banda possível. Isto implica em alta eficiência espectral, a fim de garantir uma melhor utilização do espectro de frequências.

UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) e WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) são duas das principais tecnologias que permitem a referida convergência. O UMTS é uma evolução da rede GSM que tem a voz como principal serviço. A terceira geração de celulares, conhecida como 3G, é originária de uma rede criada para serviço de voz, na qual os serviços de dados foram disponibilizados de acordo com a demanda dos usuários. O WiMAX, designado por alguns autores como a quarta geração de celulares (4G), foi desenvolvido para serviços de dados, sendo que a transmissão de voz é uma entre as várias possibilidades disponibilizadas no ambiente IP. O WiMAX tem maiores taxas de transmissão, maior alcance por estação rádio base (*BTS-Base Transceiver Station*), menor custo de implantação dos equipamentos, otimização do espectro e, conseqüentemente, apresenta vantagens significativas em relação à rede 3G, no que se refere ao custo de tráfego por bit e à velocidade do tráfego de dados por usuário. Em relação ao Wi-Fi, o WiMAX apresenta vantagens em relação a cobertura, qualidade de serviço (QoS) e mobilidade irrestrita.

O acesso à banda larga em qualquer local com possibilidade de *handover*, como disponibilizado nos celulares, significa uma quebra de paradigma nas comunicações móveis. O WiMAX pode ser usado com um terminal multimídia fixo, portátil ou móvel, para serviços de navegação *web*, *downloads*, *videostreaming*, TV ao vivo, telefonia IP

(VoIP), mensagens instantâneas, entre outros, com baixo custo na transmissão de dados. Nesse sentido, o WiMAX revoluciona as transmissões de dados e vídeo, para dispositivos portáteis.

Até recentemente, discutia se o WiMAX viria para ficar, ou se seria um concorrente ou complementar a outras tecnologias, ou ainda qual o seu futuro no Brasil e no mundo globalizado. Mesmo que essa tecnologia tenha sido proposta há tão pouco tempo, esse tipo de debate é passado. Este é um fato estatístico e várias pesquisas demonstram isso. Uma delas, divulgada pela Research and Markets, em agosto de 2006 [1], realça que, além de sua utilização em serviços de banda larga como alternativa ao ADSL e ao *cable modem*, o WiMAX tem em aplicações móveis um mercado ainda maior.

As constatações e as previsões deixam claro que o WiMAX está maduro e que seus modelos de utilização estão em franco processo de maturação. O fato é que a tecnologia vem demonstrando eficiência na oferta de serviços de banda larga, grande potencial de ser um elemento catalisador de iniciativas de inclusão digital (como demonstram as redes implantadas nas cidades de Osasco e Parintins) e mostra ser promissora quando o assunto é mobilidade.

Além do grande potencial para oferta de serviços, o WiMAX ainda é apontado como importante ferramenta para a convergência digital, e tem sido indicado por especialistas como o canal de retorno ideal para os serviços de interatividade no Sistema Brasileiro de TV Digital [2].

1.1. Tecnologia WiMAX

Comparando-se o alcance, mobilidade e velocidade de conexão das principais tecnologias de banda larga, observa-se que o padrão IEEE 802.16e, que define as características do Wimax, engloba praticamente todos os parâmetros das outras tecnologias sem fio disponíveis, tendo assim um melhor desempenho, Figura 1.1.

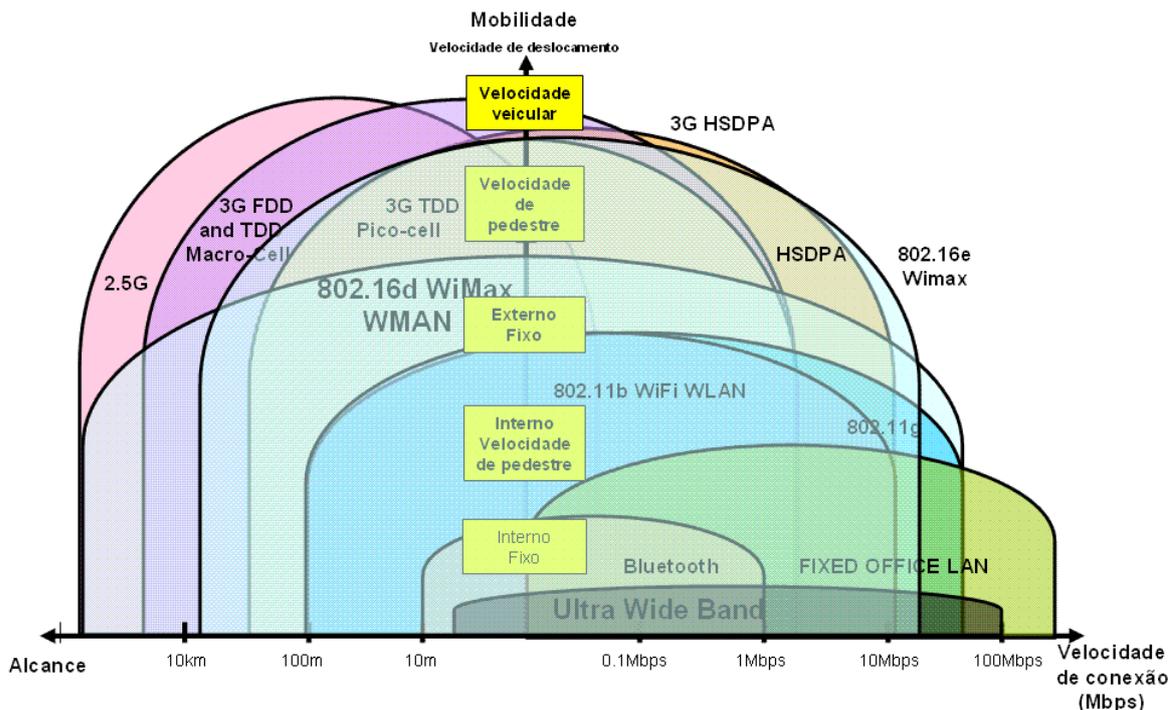


Figura 1.1: Comparação entre diferentes tecnologias de comunicação sem fio.

O WiMAX opera em quatro diferentes frequências, a de 3,5 GHz, que exige licitação, sendo mais utilizada no padrão fixo; a de 2,3 GHz e 2,5 GHz, que igualmente exige licitação e suporta o padrão móvel; e a de 5,8 GHz, também mais utilizada pelo padrão fixo, porém não licitada. O uso do WiMAX móvel é mais indicado na faixa de 2,5 GHz do espectro pois tem melhor eficiência na propagação, todavia, no Brasil, essa frequência é consignada às licenças de MMDS (*Multichannel Multipoint Distribution Service*) o que pode acarretar no atraso da licitação ou escolha de outra faixa de frequência [3].

Hoje, é possível utilizar o WiMAX na faixa de 5,8 GHz com equipamentos pré-WiMAX (não homologados pelo WiMAX Fórum, mas autorizados pela Anatel), entretanto o grande impulso comercial deve acontecer com a licitação de banda na frequência de 2,3 GHz, 2,5 GHz e de 3,5 GHz. Segundo o Plano Básico de Telecomunicações inicial foi lançado edital de licitação para abertura de propostas no dia 13 de julho de 2006, mas medida cautelar prolatada pelo Tribunal de Contas da União suspendeu, em 4 de setembro de 2006, a continuidade do processo licitatório até a manifestação final sobre o mérito processual [4].

As operadoras que ofertam os serviços MMDS irão disponibilizar aos usuários serviços *triplay*, acesso a Internet, TV por assinatura e telefonia. Mas a grande vantagem

comparativa do WiMAX é a mobilidade, podendo agregar todos esses serviços em um só aparelho, sempre no ambiente IP e, dessa forma, considera-se essa tecnologia a 4.^a geração de sistemas móveis.

Alguns fabricantes já lançaram aparelhos WiMAX. A Fig.1.2 mostra o modelo da Nokia n810 que foi lançado em 2008 com *display* de alta definição de 4,13 polegadas e acesso à Internet via Wi-Fi ou padrão IEEE 802.16e na frequência de 2,5 GHz [5]. Alguns recursos da estação móvel do usuário podem ser atualizados *on line* por GPS, como as rotas de determinadas vias de trânsito com menor movimento. Esse sistema já é equipamento original de fábrica em alguns modelos de automóveis da Chrysler. Além das informações sobre a previsão do tempo e tráfego nas vias em tempo real, será possível participar de vídeo conferências e jogos em rede, como ilustra a Fig.1.3 [6].



Figura 1.2: Aparelho WiMAX Nokia.



Figura 1.3: Veículo da Chrysler com conexão WiMAX.

1.2. Investimentos em WiMAX

A receita para utilização de serviços de dados vem crescendo em muitos países, nesses últimos anos, representando de 20% a 30%. O gráfico da Fig.1.4 foi elaborado com dados de 2004, ano de grande evolução nas comunicações, e apresenta previsão para a demanda de dados e voz em 2008 [7]. Nota-se que, com aumento da concorrência na telefonia móvel e com o desuso da telefonia fixa, há uma queda de 3,08% e 6,23% respectivamente na receita das operadoras. Por outro lado, a necessidade crescente do uso de dados estimula cada vez mais a entrada do WiMAX no mercado, com crescimento de 4,77% no acesso à Internet fixa e 20,2% na Internet móvel.

Para atender o cenário digital convergente atual, centenas de empresas, como Samsung e Intel, estão efetuando investimentos significativos no desenvolvimento do WiMAX. A Intel anunciou, em 18 de agosto de 2008, que lançará em 2009 um *chipset* em 2,3 GHz, 2,5 GHz e 3,5 GHz permitindo assim, a interoperabilidade entre as operadoras de frequências diferentes [8]. A Fig.1.5, relaciona algumas das 250 operadoras em 65 países que realizam testes com WiMAX móvel no mundo [9].

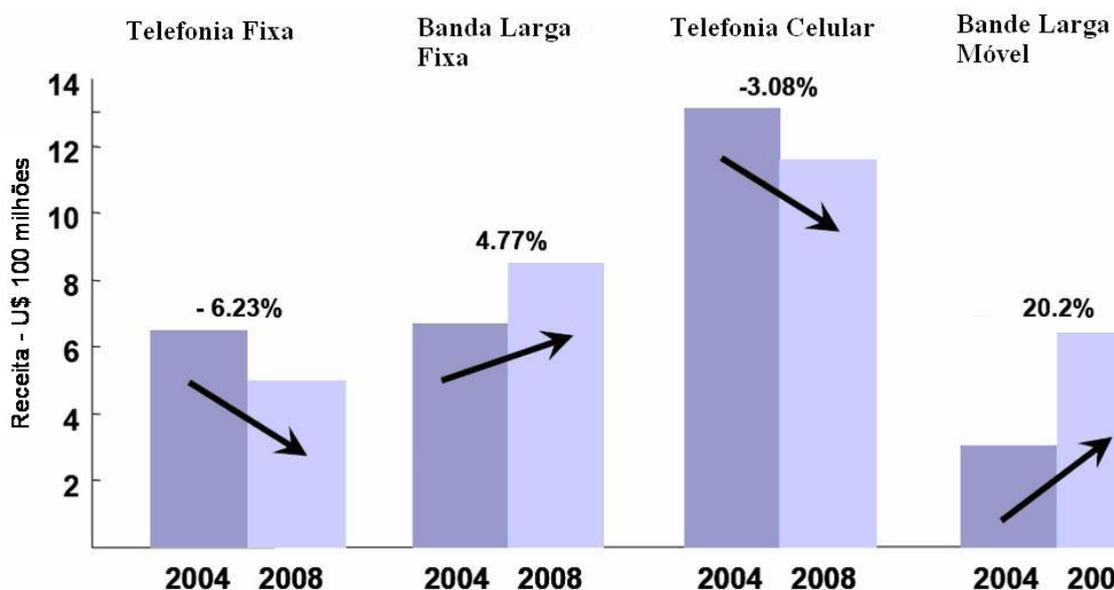


Figura 1.4. Estatística de receita das operadoras em dados e voz.

A Sprint Nextel, divulgou que uma rede WiMAX pode render quatro vezes mais, a um décimo do custo da 3G (UMTS). Vai investir 5 bilhões de dólares até o final de 2010 para construir uma rede de banda larga sem fio baseada na tecnologia WiMAX [10]. A operadora encomendou 50 milhões de aparelhos nessa tecnologia para os próximos três anos, com parceria para a oferta de serviços das empresas Nokia, Samsung Electronics e Motorola. A rede começou a ser implantada no quarto trimestre de 2006 e deve atender 125 milhões de pessoas até 2010, gerando uma receita de 2,5 bilhões de dólares. Nesse mesmo ano, a tecnologia deve se tornar a mais utilizada para acesso à banda larga sem fio, graças ao suporte dos grandes fabricantes de equipamentos.

De acordo com a Research and Markets, o WiMAX vem se adaptando às características específicas de diversos mercados [1]. A região Ásia-Pacífico, por exemplo, desponta com o maior número de assinantes, fator atribuído ao grande número de habitantes e à natureza emergente de suas economias. No Leste Europeu e na América Latina, a tecnologia surge como melhor opção para o aumento da penetração dos serviços de banda larga. Em regiões mais desenvolvidas, como a Europa e os Estados Unidos, a tecnologia se consolida com altos níveis na oferta de serviços de banda larga. Somente nos Estados Unidos há 394 empresas com licenças WiMAX.



Figura 1.5. Operadoras WiMAX pelo mundo.

Nos Estados Unidos, o WiMAX, cada vez mais, se consolida no conceito entre as empresas e operadoras como meio para a distribuição de conteúdo multimídia em banda larga. Em julho de 2006, a Intel e a Motorola anunciaram um investimento de US\$ 900 milhões na Clearwire, uma empresa de transmissão de dados em alta velocidade, especialmente para acelerar o desenvolvimento e a implantação do WiMAX. Enquanto a Motorola fornecerá equipamentos para as redes da Clearwire, a Intel fomentará a proliferação da tecnologia, incluindo *chips quatriband* WiMAX nos computadores pessoais de nova geração [7]. Em setembro de 2006, a Spectrum Co. um consórcio entre as empresas Comcast, Time Warner, Cox Communication e Advance/Newhouse com Sprint Nextel, investiu US\$ 2,4 bilhões na compra de espectro na faixa de 2,5 GHz. O total arrecadado neste leilão, da AWS (Advanced Wireless Auction), para licenças *wireless* na faixa de 2,5 GHz, foi de cerca de US\$ 14 bilhões.

Esses números têm seus reflexos no mercado brasileiro. Estudo divulgado em abril de 2006 pelo Instituto Maravedis faz algumas comparações que dão a medida sobre o potencial do crescimento do WiMAX no Brasil [11]. Os fornecedores de equipamentos WiMAX movimentaram cerca de US\$ 6 milhões no país em 2006.

A previsão é que esse mercado alcance US\$ 300 milhões em 2010, alavancado por fatores como o leilão de novas licenças, a certificação e a redução do custo de novos equipamentos. O estudo também revela que, em 2010, haverá cerca de 770 mil assinantes,

incluindo usuários residenciais e corporativos e a previsão é que 70% deste público seja formado por usuários de serviços móveis, predominantemente residenciais, enquanto o WiMAX fixo, como conhecido hoje, continuará consolidando sua posição nas grandes corporações e nas pequenas e médias empresas.

A Anatel realizou em 2007 uma licitação de frequências em 1900/2100 MHz para a implantação de redes 3G [12]. As empresas que adquiriram estas frequências foram: Vivo, Tim, Claro, Oi, Brt e CTBC. Estas redes entraram em operação em 2008 aumentando consideravelmente as possibilidades de acesso a serviços de dados. A Claro se antecipou e lançou a rede 3G no segundo semestre de 2007 da mesma forma da Cingular Telecom usando a antiga frequência de TDMA (850 MHz) e posteriormente irá migrar para frequência de 2.100 MHz adquirida em 2007.

A Embratel, a Brasil Telecom e a Neovia são algumas das operadoras que já possuíam espectro na faixa de 3,5 GHz, adquirido por meio de licitação realizada em 2002, para ponto-multiponto, antes de se definir que essa frequência seria usada para o WiMAX. A Neovia é uma provedora de Internet, que se fundiu com a DirectNet em 2005, e atua em mais de 50 municípios do Estado de São Paulo oferecendo serviços ilimitados em *downloads* e *uploads* [13].

A TVA já fornece serviços de banda larga e VoIP através da mesma frequência onde transmite os sinais de TV por assinatura. Essa empresa testou a rede WiMAX com equipamentos Samsung em São Paulo, e com equipamentos da Motorola, no Rio de Janeiro. Em Curitiba foi iniciada a implantação da rede em agosto de 2007 em caráter experimental, de acordo com autorização da ANATEL através do ato nº.66.824 de 28 de agosto de 2007. Os equipamentos usados na *base station* (BS) são U-RAS Mini da Samsung com 20 W de potência de transmissão e 18 dB de ganho da antena. Na *subscriber station* (SS) são SMT-S3500 da Samsung com 230 mW de potência de transmissão e de 2 dB de ganho da antena, apresentada na Fig.1.6, e MAX200-M1 do Fabricante Zyxel com 500 mW (27 dBm) de potência de transmissão e 2 dB de ganho da antena, apresentada na Fig.1.7.



Figura 1.6. Equipamento Samsung SMT-T3500 usado para testes WiMAX em Curitiba.



Figura 1.7. Equipamento ZyXel Max200-M1 usado para testes WiMAX em Curitiba.

1.3. Objetivos do trabalho

Do exposto anteriormente, pode-se concluir que a tecnologia WiMAX apresenta diversas características que a credenciam como uma possibilidade para o acesso em mobilidade, com banda larga, às redes de comunicação fixas. Neste sentido, o presente estudo tem com objetivo estimar a demanda de acessos à rede WiMAX em diferentes regiões demográficas do Distrito Federal (DF) e determinar o número de estações base

necessárias para satisfazer os requisitos de capacidade e cobertura em uma eventual implantação da tecnologia no DF.

Para isso, serão utilizados os dados de habitantes por km² do IBGE para subdividir o DF em regiões rural, suburbana, urbana e densamente urbana, como será mostrado no capítulo 2. Neste capítulo também será analisado o perfil do público alvo classificando em usuário profissional, tecnológico e casual, o que permitirá estimar a demanda média de acesso por usuário em cada região.

No capítulo 3 estão descritos os protocolos IEEE 802.16, que especificam o WiMAX, mostrando as vantagens do uso das portadoras ortogonais com variações nas modulações e codificações. Será calculada, nesse capítulo, a taxa de transmissão de uma BTS usando antenas SISO.

No capítulo 4 será feita uma análise de como a taxa de transmissão pode ser otimizada para aumentar a capacidade das antenas, por meio dos sistemas SIMO e MIMO. Em seguida, os dados da demanda por área serão usados para o cálculo da quantidade de BTS por região.

No capítulo 5, o problema da distância entre as BTS será considerado, para avaliar as limitações impostas pela propagação do sinal. Para calcular esse fator limitante, será usado o modelo Walfisch-Ikegami modificado pelo COST 231. Devido a indefinição pela ANATEL das frequências a serem utilizadas no WiMAX apresenta-se uma comparação entre as frequências mais usadas no WiMAX analisando o impacto na quantidade de BTS.

2. CÁLCULO DA DEMANDA

O objetivo principal na implantação de uma rede sem fio é atingir cobertura de toda uma área metropolitana. Isso requer considerações diferenciadas, que dependem do terreno, da densidade das construções, da altura dos edifícios grandes áreas com espelho d'água, entre outros fatores que podem afetar a propagação do sinal. Além disso, em aplicações móveis, é necessário manter cobertura com capacidade robusta independentemente de o usuário estar em visada, em um veículo em movimento rápido ou no interior de um edifício.

As redes celulares foram inicialmente desenvolvidas para alcançar cobertura com poucos requisitos de capacidade. O único serviço oferecido era voz, para um mercado incerto. Voz é um serviço que necessita de baixa taxa de transmissão de dados permitindo alcançar ampla cobertura *indoor* e *outdoor*. Como o número de usuários cresceu e mais serviços foram oferecidos, houve necessidade de implantação de mais estações bases para satisfazer as crescentes exigências de capacidade.

Com o WiMAX móvel, no entanto, as operadoras poderão oferecer uma ampla gama de serviços de banda larga com qualidade de serviço (QoS). Para satisfazer as expectativas dos usuários para esses tipos de serviços, será necessário predeterminar os requisitos da capacidade. A implantação planejada, antecipando-se à crescente demanda dos clientes, vai garantir qualidade aos usuários quando a rede estiver em sua plena atividade. Isto será importante em áreas densamente povoadas, onde a probabilidade de crescimento de usuários do sistema é maior.

Neste capítulo, serão estabelecidas as premissas para se calcular a demanda de acessos a uma rede de comunicação sem fio na região rural, suburbana, urbana e densamente urbana do DF. Os tópicos que se seguem irão apresentar características de densidade populacional do DF, convergindo ao público alvo. Será analisado o perfil do público alvo e a taxa média de dados necessária por usuário. Com essas informações, a quantidade de BTS será determinada por áreas de densidade de usuários: para densidade elevada, o cálculo será por demanda; para baixa densidade, por cobertura. Esses cálculos serão mostrados nos capítulos seguintes.

2.1. Regiões demográficas típicas

As áreas metropolitanas são, em geral, compostas por um centro densamente povoado cercado por áreas de menor densidade populacional até se chegar à denominada zona rural. Dessa forma, para análise, é conveniente dividir a área metropolitana nas regiões demográficas conforme ilustrado na Fig.2.1, descritas a seguir.

- **Região densamente urbana**

A área densamente urbana é um local no centro da cidade onde muitas empresas estão localizadas e tendo elevada densidade residencial em unidades múltiplas de habitação. Nessas áreas, o ambiente representa um desafio devido à propagação multipercurso causada pela reflexão nos edifícios. Essas áreas têm densidade superior a 3.000 habitantes por km².

- **Região urbana**

Nas áreas urbanas que rodeiam o centro da cidade encontram-se normalmente empresas de médio porte e alta densidade de unidades habitacionais, constituídas por edifícios de média altura. A avaliação da propagação neste ambiente é igualmente desafiadora. Essas áreas têm densidade entre 800 a 2.500 habitantes por km².

- **Região suburbana**

As áreas suburbanas têm baixa densidade habitacional, sendo formadas principalmente por casas e algumas empresas. Os edifícios são baixos e espaçados entre si, o que cria um ambiente mais favorável à propagação. Essas áreas têm densidade entre 100 a 800 habitantes por km².

- **Região rural**

Ao longo de toda a área metropolitana existirão áreas de espaço aberto. Isso inclui parques, lagos e outros tipos de áreas verdes. Estas áreas também requerem consideração para implantação, pois, a todo o momento podem ser frequentadas por um grande número de pessoas. Essas áreas têm densidade até 100 habitantes por km².

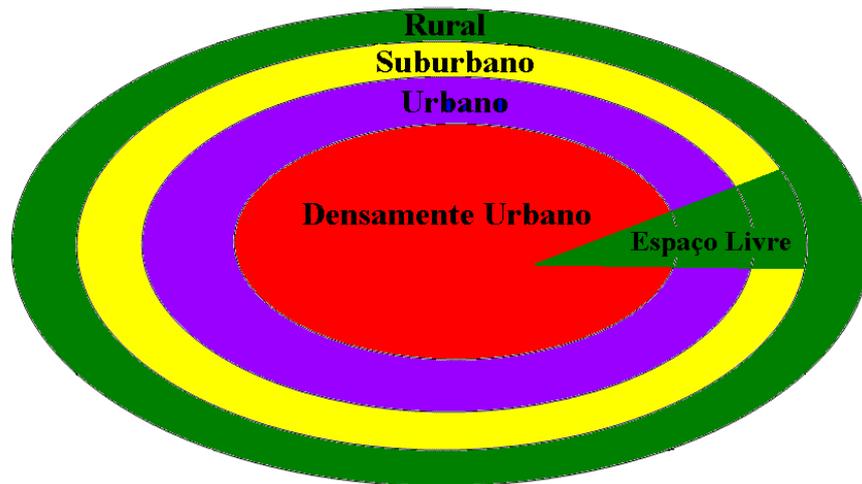


Figura 2.1: Regiões demográficas de uma área metropolitana.

2.2. Densidade populacional do Distrito Federal

Brasília representa uma típica cidade de tamanho médio geralmente encontrado em muitos outros países desenvolvidos. A Fig.2.2 mostra as 12 Regiões Administrativas do Distrito Federal (DF), que tem população total de 2.443.169 de habitantes distribuídos por 5.789,13 km², com densidade populacional de 422 habitantes por km². No norte do DF predomina as áreas rurais com densidade de até 100 habitantes por km².

Uma particularidade do Distrito Federal é que os moradores das cidades satélites migram diariamente para o Plano Piloto e para o Centro de Taguatinga, o que aumenta a demanda de possíveis usuários nessas localidades. Cada região administrativa tem variada densidade demográfica, subdividida conforme a Tabela 2.1 a partir de dados do IBGE de 2000, com algumas adaptações mencionadas a seguir [14].

As regiões de Brasília (Plano Piloto e Noroeste), Cruzeiro, Sudoeste, Águas Claras e Taguatinga foram classificadas como densamente urbanas pela concentração populacional estar acima de 3.000 habitantes por km². Apesar de Taguatinga ter 2.000 habitantes por km², no censo do IBGE de 2000 não existia Águas Claras. Essa região tem previsão para mais de 800 projeções de 15 andares, em média, 8 apartamentos por andar, estimando um crescimento de 300.000 habitantes nesse setor, o que significa 4.469 habitantes por km², como mostrado na Tabela 2.1. Os dados do setor Noroeste também foram atualizados, acrescentando-se 40.000 habitantes à região administrativa de Brasília, que totaliza 3.670 habitantes por km².

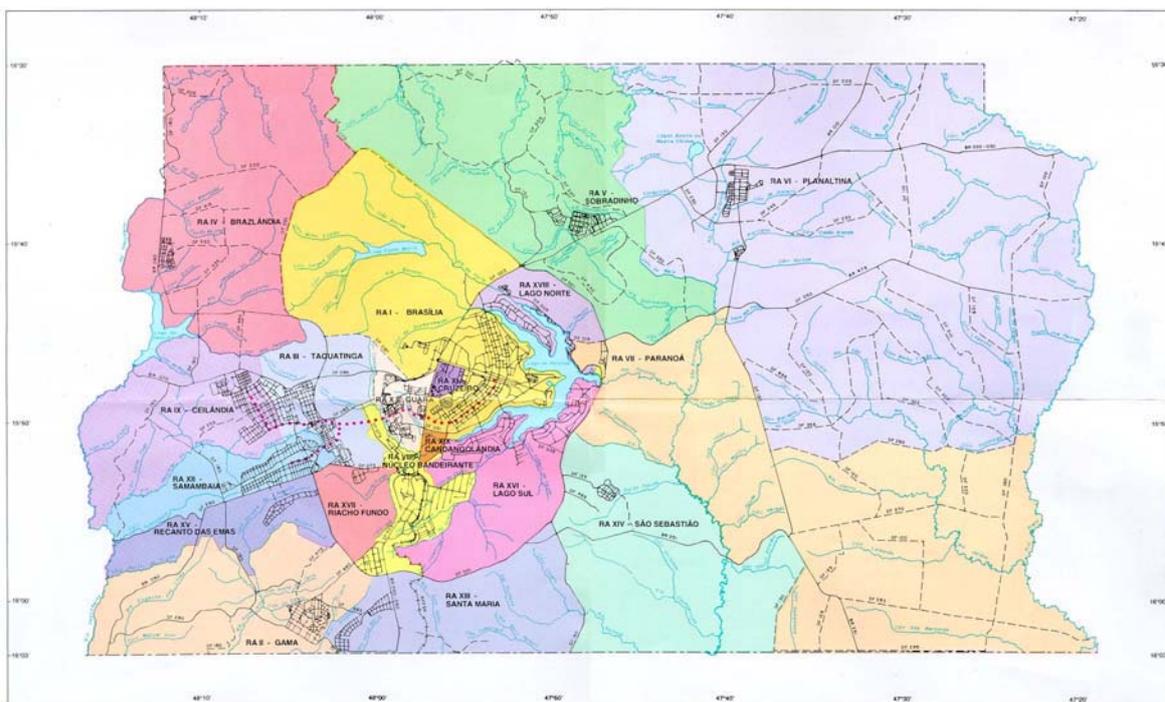


Figura 2.2: Regiões administrativas do Distrito Federal.

As regiões administrativas do Guará, Candangolândia, Samambaia, Ceilândia, Lago Norte e Lago Sul foram classificadas como regiões urbanas por terem uma concentração habitacional entre 1.500 a 2.500 habitantes por km². Nessa classificação também se incluiu os centros das cidades de Recanto das Emas, Riacho Fundo, Gama, Sobradinho, São Sebastião e Brazlândia.

Como regiões suburbanas foram consideradas as cidades de Planaltina, Paranoá, Itapuã e Vale do Amanhecer e o Jardim Botânico no Lago Sul que tem uma concentração habitacional entre 100 a 1.000 habitantes por km² e também as demais regiões administrativas de Recanto das Emas, Riacho Fundo, Gama, Sobradinho, São Sebastião e Brazlândia.

Por terem uma concentração habitacional menor que 100 habitantes por km², foram consideradas como áreas rurais o Parque Nacional, localizado na RA de Brasília, quase a totalidade da RA de Planaltina e Paranoá e algumas áreas da RA de Brazlândia, Sobradinho, São Sebastião e Santa Maria.

Tabela 2.1: Densidade populacional detalhada do Distrito Federal, em 2008.

Cidade	Habitantes	Área km ²	Habitantes/ km ²	Tipo de Região	
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	293.616	80,0	3.670	Densamente Urbano	
Cruzeiro (Sudoeste)	64.381	8,9	7.234		
Taguatinga (Águas Claras)	543.159	121,6	4.469		
Guará	115.192	45,4	2.536	Urbano	
Candangolândia	15.629	6,6	2.364		
Samambaia	163.000	105,7	1.542		
Ceilândia	308.700	131,3	2.351		
Lago Norte	29.603	66,1	448		
Lago Sul	23.219	47,4	490		
Recanto das Emas	46.500	21,0	2.214		
Riacho Fundo	20.689	12,0	1.724		
Gama	65.000	30,0	2.167		
Santa Maria	39.446	24,0	1.644		
Núcleo Bandeirante	36.441	80,4	453		
Cidade Sobradinho	51.624	56,7	911		
Cidade São Sebastião	25.677	10,0	2.568		
Cidade Brazlândia	21.078	8,0	2.635		
Lago Sul (Jardim Botânico)	5.000	136,0	37		Suburbano
Ceilândia	34.300	99,0	346		
Recanto das Emas	46.500	80,2	580		
Riacho Fundo	20.689	44,0	470		
Gama	65.000	246,3	264		
Cidade Santa Maria	39.446	32,0	1.233		
Condomínios Sobradinho	51.624	335,9	154		
São Sebastião	25.677	148,7	173		
Brazlândia	21.078	186,8	113		
Cidade Planaltina	73.531	57,8	1.272		
Cidade Paranoá	27.464	16,0	1.717		
Santa Maria	19.723	159,9	123	Rural	
Sobradinho	25.812	180,0	143		
São Sebastião	12.838	225,0	57		
Brazlândia	10.539	280,0	38		
Planaltina	73.531	1.476,9	50		
Paranoá	27.464	837,3	33		
Brasília (Parque Nacional)	0	392,12	0		
Total	2.443.169	5.789,13	422		

O mapa da Fig.2.3 retrata os diferentes aspectos das regiões administrativas de Brasília, variando de vastas áreas rurais e de preservação ambiental a áreas onde circulam 500.000 pessoas por dia. Nesse mapa, em vermelho tem-se a região densamente urbana de Brasília com média de 4.282 habitantes por km²; em roxo, a região urbana com densidade populacional de 1.500 habitantes por km²; em amarelo está a área suburbana de Brasília com densidade de 293 habitantes por km²; em verde, as áreas rurais e de proteção ambiental com 48 habitantes por km². Esses dados estão resumidos na Tabela 2.2.

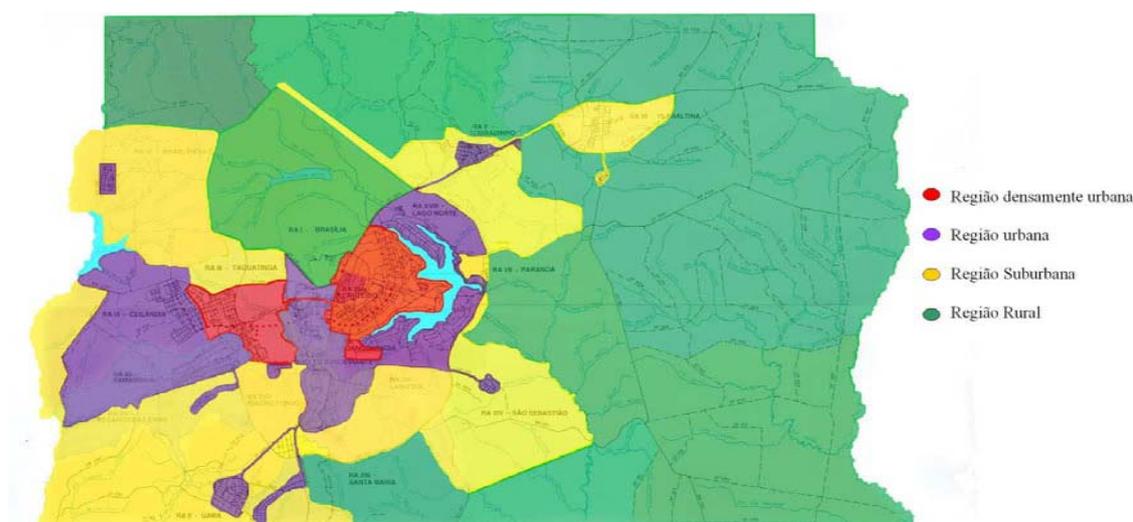


Figura 2.3: Classificação do Distrito Federal em função da densidade populacional.

Tabela 2.2: Densidade populacional por região, no DF, em 2008.

Região	Área, km ²	População	Densidade Populacional
Densamente Urbana	210	901.156	4.282 hab./km ²
Urbana	645	966.798	1.500 hab./km ²
Suburbana	1.383	405.308	293 hab./km ²
Rural	3.551	169.907	48 hab./km ²
Total	5.789	2.443.169	422 hab./km²

2.3. Determinação da quantidade de usuários

Somente uma parcela da população, evidentemente, vai usar o acesso WiMAX. Para calcular a quantidade de usuários, consideram-se três aspectos importantes: crescimento médio da população; idade do público alvo; e penetração da operadora dentro desse conjunto de pessoas. Outro aspecto importante é a mobilidade dos usuários no horário comercial ou horário de pico para as áreas densamente urbana e urbana, o que aumenta o número de usuários nesse período e nessas regiões.

2.3.1. Estimativa Populacional

Segundo Censo do IBGE, Brasília tinha 2.043.169 habitantes em 2000. Considerando um crescimento anual de 2,29%, a população em 2008 era de 2.448.892 habitantes, o que é bem próxima ao total de 2.443.169 estimado na tabela 2.1. Para delimitação do número de usuários, utilizou-se a população do DF em 2008 de 2.443.169 habitantes.

2.3.2. Idade do público alvo

O acesso à Internet e ao celular está começando cada dia mais cedo entre as crianças, por isso, uma criança de 10 anos de idade já está apta a ter acesso WiMAX e ser parte do público alvo. No caso de pessoas mais idosas, a tecnologia, em alguns casos, ainda é vista como algo de difícil internalização, mas até os 69 anos de idade têm-se muitos usuários de celular e Internet, e por esse motivo, também entrarão como público alvo.

Em Brasília, 79,5% da população têm entre 10 e 69 anos de idade o que representa 1.931.325 possíveis usuários [14].

2.3.3. Penetração da operadora no público alvo

Como o WiMAX é uma tecnologia recente, não haverá, no primeiro momento, duas operadoras concorrendo com essa tecnologia. Com isso, a estimativa de penetração é de 10% a 12% dos 1.931.325 do público alvo, que representaria 196.881 usuários [15].

Em agosto de 2008 o número de celulares em Brasília era de 3.214.000 celulares, distribuído entre as quatro operadoras, como mostrado na Tabela 2.3 [12]. Desse total, somente 20,42% das linhas representam os pós-pagos, sendo 104.230 da operadora TIM, 124.640 da Oi/BrT, 212.360 da CLARO e 215.069 da VIVO. O WiMAX terá particularidade de acesso ilimitado à internet e uma mensalidade fixa por mês, o que caracteriza um serviço pós-pago. A média de usuários WiMAX previsto nessa análise está dentro da variação de 104.230 a 215.069 de linhas celulares.

Tabela 2.3: Distribuição de celulares por operadora, em 2008.

DF	Vivo	Claro	Tim	Oi/BrT	Total
Pós Pago	215.069	212.360	104.230	124.640	656.299
Pré Pago	838.158	827.602	406.200	485.741	2.557.701
TOTAL	1.053.227	1.039.962	510.430	610.380	3.214.000

2.3.4. Requisitos da mobilidade

Depois de determinar a quantidade de usuários, é necessário analisar o impacto da mobilidade em toda a área metropolitana, que é outro fator usado para se calcular o número de usuários. Esse fator é mais importante nas zonas urbanas e nas zonas densamente urbanas, onde está localizada a maioria das empresas e órgãos públicos. Estas áreas normalmente recebem grande parte dos habitantes das zonas suburbanas e rurais nas primeiras horas da manhã, criando uma demanda adicional sobre a rede durante o horário comercial. Brasília é um típico exemplo onde os habitantes das áreas rurais, suburbanas e até mesmo das áreas urbanas migram todos os dias para as áreas densamente urbanas. Considerando-se as 12 regiões administrativas que compreendem o Distrito Federal, aproximadamente 37% da população vive na área densamente urbana, totalizando 901.156 habitantes. O número de pessoas que entra diariamente no centro do Plano Piloto e no centro de Taguatinga ultrapassa a 500.000 pessoas. Sendo assim, a migração diária para essas regiões aumenta cerca de 60%. Com isso o número previsto de usuários de 196.881 sobe para 283.327 como mostra a tabela 2.4.

Tabela 2.4: Número de usuários por região

Tipo de Região	Número de usuários	Acréscimo de usuários durante a PBH	Número de usuários no PBH
Densamente urbana	73.075	60%	116.920
Urbana	71.002	60%	113.603
Suburbana	37.207	0%	37.207
Rural	15.597	0%	15.597
TOTAL	196.881		283.327

2.4. Requisitos para o cálculo da demanda

Chegar a uma estimativa precisa das capacidades para os novos serviços de banda larga não é uma tarefa simples. É necessário prever como cada usuário irá fazer uso dos novos serviços oferecidos, quanto tempo estará conectado e ativo na rede, sempre dimensionando a demanda para o horário de pico.

2.4.1. Tipos de usuários

De acordo com Doug Gray, os possíveis usuários de um serviço de comunicações podem ser agrupados da maneira apresenta a seguir [15].

- **Usuário profissional.** O usuário profissional é aquele que exige acesso móvel em banda larga para fins comerciais e também para uso pessoal, em serviços como *e-mail*, vídeo-conferência, *downloads* de arquivos, acessos a serviços *on-line*, necessitando assim ter alta disponibilidade. Ainda que esses usuários fiquem a maior parte do tempo em locais fixos, o acesso móvel é necessário para manter comunicação com o escritório mesmo após o expediente. O usuário profissional representa 50% dos usuários da rede e representa a demanda de uma taxa de 600 kbps, o que é razoável para visualizar 30 páginas de *e-mail* com anexo, de alguns documentos com gráficos e imagens entre 250 e 350 kbits, em 4 segundos. É importante destacar que a taxa mínima para o horário de pico não é verdadeiramente garantida, a menos que seja programado em conjunto com nível de serviço (SLA)

mesclando o número de usuários conectados com o nível de atividade, mostrados na Tabela 2.5.

- **Usuário tecnológico.** O usuário tecnológico tem um perfil com alto poder aquisitivo e de acesso constante para aplicações de uso pessoal, em redes sociais e eventualmente de uso profissional. Sua principal destinação é navegação na *Web*, jogos em rede, *downloads* de música, foto e vídeo, demandando uma banda de 480 kbps.
- **Usuário casual.** O usuário casual representa 15% dos usuários na rede e tem perfil de acesso periódico, de navegação na Internet e visualização de *e-mails*. A taxa de 240 kbps para esse usuário é razoável para visualizar 5 *e-mails* com anexo, 250 e 350 kbits, em 6 segundos durante o PBH.

2.4.2. Atividade no horário de pico

O nível da atividade no horário de pico (PBH, *peak busy hour*) é provavelmente o maior desafio a se prever com algum grau de precisão, pois depende do tipo de aplicações e perfil dos usuários em determinada região. A previsão é ainda mais complicada por não haver um histórico de serviços a serem oferecidos na rede WiMAX para se ter uma estimativa no tráfego.

Atualmente, nas redes sem fio UMTS 3G, o *download* (DL) predomina em relação ao *upload* (UL) no uso entre todos os perfis de usuários mencionados anteriormente. Por isso, os cálculos das projeções de capacidade serão baseados no *download*.

Além de se estimar o número de clientes conectados na rede, é igualmente necessário estimar a parte do tempo dedicado à atividade de *download* versus *upload* e o período que o usuário fica ocioso. Estes intervalos caracterizam-se como ociosos quando o usuário conectado visualiza os arquivos recebidos. Para os serviços de voz, o tempo é dividido aproximadamente em 50% de DL e 50% de UL com pouco tempo ocioso durante a conversação. O tráfego de dados pode ser disperso se nos momentos que alguns usuários estiverem ociosos, outros usuários estiverem efetivamente usando a rede.

Considerando o horário comercial, de 7 horas diárias em 22 dias úteis, totalizam-se 154 horas mensais. Os brasileiros acessam 23h31min de Internet por mês [16], o que significa que somente 15% dos usuários ficam conectados no horário de pico. Esse tempo de conexão tende a aumentar 2% anualmente com a oferta de novos serviços e devido à

mobilidade estar mais presente aos dispositivos. Estimando-se os 5 primeiros anos de operação, esse aumento atingirá mais 10% de usuários conectados [15].

Desses usuários conectados, a maioria não está ativa na rede, ou seja, não está fazendo nem *download* nem *upload*, apenas utilizando desse meio para leitura de arquivos recebidos, digitação de e-mail ou outras atividades. Caso 25% dos usuários estiverem ativos na rede no horário de pico, significa que, durante o mesmo instante 4 usuários ativos estarão conectados compartilhando a mesma taxa de transmissão sem que haja a necessidade de aumentar essa taxa para suprir a demanda [17]. Esse compartilhamento é usual nas operadoras que fornecem acesso a internet, para otimização do uso da rede.

É importante manter o desempenho da rede no PBH e, por isso, deve-se determinar o nível mínimo desse desempenho para o cálculo da quantidade de BTS em cada região. A Tabela 2.5 mostra esse nível mínimo dividido em cada perfil de usuário.

Tabela 2.5: Estimativa do tráfego no PBH.

Tipo de usuário	Divisão de usuários	% de usuários conectados	Nível de atividade em horário de pico	Taxa razoável no PBH
Profissional	50%	20%	25%	600 kbps
Tecnológico	35%	14%	25%	480 kbps
Casual	15%	5%	25%	240 kbps
Total		15%	25%	504 kbps

O gráfico da Fig. 2.4 mostra a taxa disponível para DL baseada na porcentagem de usuários ativos e no nível de atividade na rede. Se o nível de atividade cair de 25% para 15% com 10% de usuários conectados na rede, a taxa disponível seria de 1,3 Mbps. Isso permitiria o DL das mesmas 30 páginas de *e-mail* em 1 segundo.

A Tabela 2.6 apresenta um resumo dos requisitos utilizados para se estimar a taxa de dados, em Mbps por km², que será usada para a determinação da quantidade de BS necessária para atender a demanda.

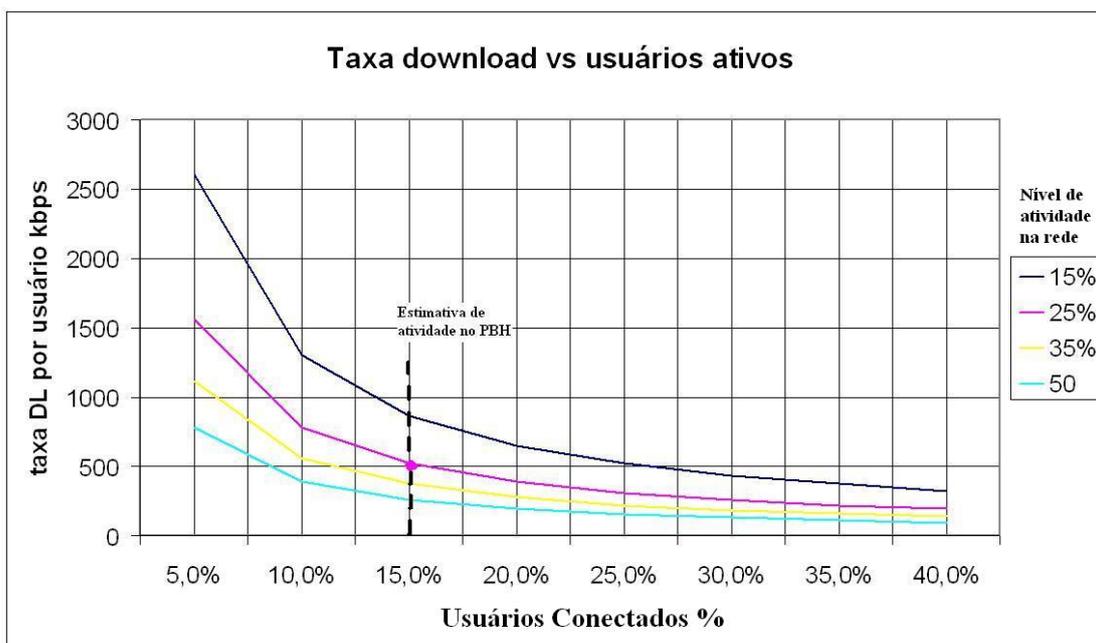


Figura 2.4: Taxa disponível para download *versus* atividade na rede e usuários ativos.

Tabela 2.6: Requisitos para o cálculo do número de usuários.

Etapas	Descrição	Análise
1	Densidade populacional	2.443.169 milhões de habitantes distribuídos por 5.789,13 km ²
2	Estimativa da população	Crescimento anual de 2,29% de 2000 a 2008
3	Idade do público alvo	Idade de 10 a 69 anos, que representa 79,5% da população. Dados de 2006.
4	Penetração no público alvo	10% a 12% em 5 anos (média de 10,4 ao longo da área metropolitana)
5	Tipos de usuários	50% de usuário profissional 35% de usuário tecnológico 15% de usuário casual
6	Efeitos da mobilidade	Estimativa de 60% de migração para as áreas urbana e densamente urbana
7	Atividade em horário de pico (PBH)	Variação mostrada na Tabela 2.5, de acordo com os tipos de usuários

2.5. Cálculo da demanda

A quantidade de usuários no horário de pico mostrados na Tabela 2.4 combinada com a estimativa do tráfego no PBH mostrada na Tabela 2.5 resulta na densidade de tráfego por área mostrado na tabela 2.7.

O número de usuários no horário de pico na região densamente urbana é 116.920, sendo 25% dos usuários conectados e desses somente 25% com atividades de *download* ou *upload*. A taxa média para suprir a necessidade dos diversos tipos de usuários é de 504 kbps, assim o tráfego necessário para os 210 km² nesta região é de 21,04 Mbps/km².

Tabela 2.7: Requisitos de densidade de tráfego por área.

Tipo de Região	Número de usuários	Acréscimo de usuários durante a PBH	Densidade de Tráfego por região Mbps/km ²
Densamente urbana	116.920	60%	21,04 Mbps/km ² na área de 210 km ²
Urbana	113.603	60%	6,13 Mbps/km ² na área de 645 km ²
Suburbana	37.207	0%	0,83 Mbps/km ² na área de 1.383 km ²
Rural	15.597	0%	0,12 Mbps/km ² na área de 3.551 km ²

Estes requisitos de densidade de tráfego, juntamente com a capacidade da BTS demonstrados nos capítulos seguintes, constitui nos parâmetros para o cálculo da quantidade de BTS para a implantação do WiMAX no DF. Estes requisitos e outras variáveis são específicos para a cidade de Brasília, como metrópole de médio porte. Outros centros urbanos considerados megalópoles, como Nova York, Chicago, Londres e São Paulo, o nível de densidade dos usuários é muito mais elevado do que os números encontrados na Tabela 2.7. Como exemplo, o centro urbano da Cidade de Nova Iorque tem uma demanda de 30 a 40 Mbps por km².

3. CONCEITOS DA TECNOLOGIA WiMAX

WiMAX é um padrão aberto (tecnologia não-proprietária), certificado pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). As diretrizes da tecnologia ficam a cargo do WiMAX Fórum, uma organização formada por dezenas de empresas mundialmente reconhecidas no setor de comunicações, tais como Intel, ATT, Motorola, Nortel e Samsung [17].

O WiMAX aprimora questões como acessibilidade, disponibilidade e raio de cobertura, permitindo a comunicação de dados em taxas de até 75 Mbps por canal com mobilidade total até 120 km/h. O WiMAX pode ser usado como um terminal multimídia fixo, portátil ou móvel, para serviços de *web browsing*, *downloads*, *videostreaming*, videoconferência, telefonia IP (VoIP), jogos em rede, *messenger*, entre outros, com baixo custo na transmissão de dados. Nesse cenário, o WiMAX revoluciona as transmissões de dados, voz e vídeo para dispositivos móveis.

Existem quatro padrões do WiMAX: IEEE 802.16a e 802.16c, que já nasceram ultrapassados; 802.16d com portabilidade, mais usado na frequência de 3,5 GHz; e 802.16e, mais usado na frequência de 2,5 GHz, e que permite mobilidade ao usuário, inclusive com *handover (roaming)* entre células. A largura de banda do espectro é definida pelos órgãos reguladores, no caso do Brasil, pela ANATEL.

O uso mundial da tecnologia está bastante adiantado em relação ao Brasil. Há investimentos maciços tanto por parte das operadoras como por parte dos fornecedores. No Brasil, algumas empresas que adquiriram anteriormente licenças para operação estão em fase de teste e até mesmo comercializando serviço de banda larga no padrão 802.16d, como é o caso da Neovia e da BrasilTelecom.

Nos tópicos que se seguem, apresenta-se os diversos protocolos do padrão WiMAX, detalhando-se os conceitos de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), codificação e modulação. Em seguida será mostrado como o espectro pode ser otimizado por meio do uso do sinal OFDM em antenas adaptativas, com análise de casos em diferentes tipos de regiões demográficas. Essa análise resulta na quantidade de BTS necessária para a implantação do sistema WiMAX em cada caso.

3.1. Reúso de Frequência

As faixas de frequências mais usadas atualmente no WiMAX são as de 2,5 GHz e 3,5 GHz. Nos Estados Unidos estão sendo usadas as faixas de 2,5 GHz e 2,7 GHz, sendo dois terços dessa banda consumida pela Sprint e Nextel [18]. No Brasil, a Embratel dispõe da faixa de 3,5 GHz e a BrasilTelecom detém as faixas de 3,5 GHz e 10,5 GHz. Cada operadora tem uma faixa no espectro que varia de 10 MHz a 40 MHz. Normalmente, no mundo, a operadora dispõe de 30 MHz no espectro, sendo utilizado 10 MHz em cada setor da BTS.

A setorização é uma prática muito utilizada em tecnologias como CDMA, GSM, TDMA e UMTS, diminuindo as interferências entre canais e melhorando a eficiência integral do espectro. A Fig.3.1 mostra a situação em que o fator de reúso é igual a 1, ou seja, não é usada a setorização, na qual se aplica a mesma banda do espectro em todos os setores, ocasionando interferência entre canais.

Em geral, utiliza-se o fator de reúso igual a 3, no qual a banda total do espectro disponível é dividida por 3 canais. Assim, os setores adjacentes utilizarão diferentes frequências, aumentando a separação espacial de setores de mesma frequência, o que evita a interferência na borda da célula, como mostrado na Fig.3.2. Quanto menos interferência melhor fica a utilização das subportadoras, o que melhora a eficiência espectral de cada canal.

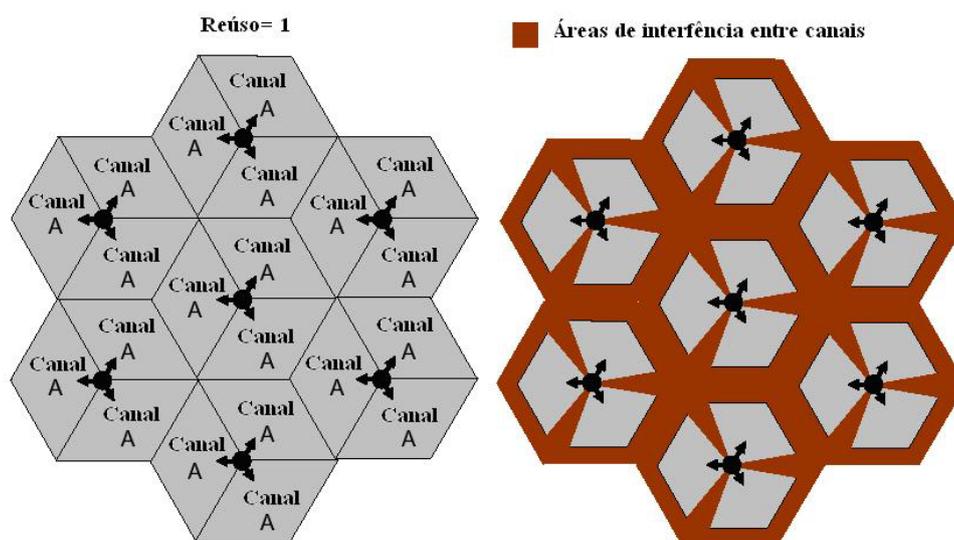


Figura 3.1: BTS sem fator de reúso de frequência.

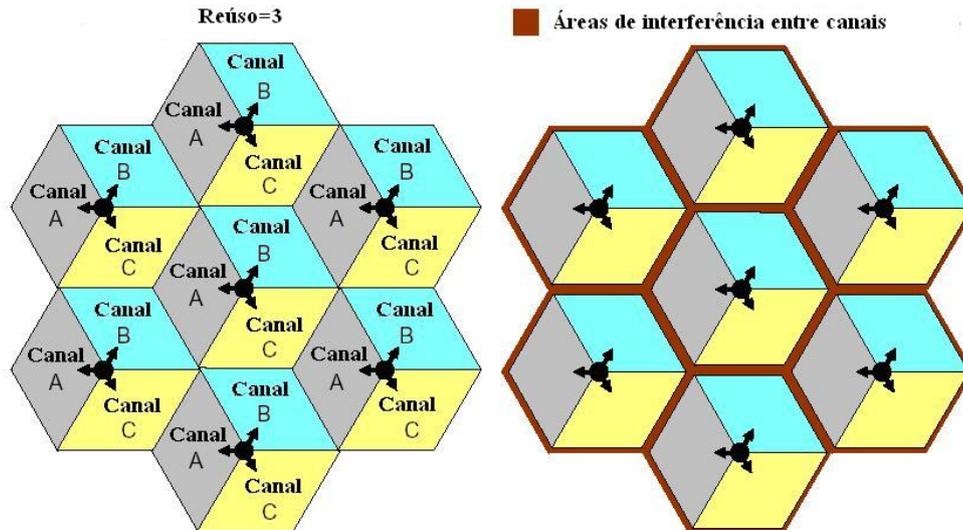


Figura 3.2: BTS com fator de reuso 3:1.

3.2. Protocolo IEEE 802.16

WiMAX suporta acesso fixo (ponto-a-ponto), nomádico (ponto-multiponto), portátil e móvel. O padrão IEEE 802.16 inicial foi aperfeiçoado por diversos grupos de trabalho, o que resultou em quatro versões para endereçar diferentes tipos de necessidades de acesso [19].

A primeira versão efetiva do padrão foi a norma IEEE 802.16a, que definiu o espectro de operação para a faixa de 2 GHz a 11 GHz, além de especificar três diferentes tipos de modulações: portadora única; OFDM com 256 portadoras; e OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplex Access*). O uso de frequências mais baixas permite operação sem linha de visada (NLOS – *Non Line of Sight*), que é auxiliada pela habilidade da modulação OFDM em operar com multipercursos.

A versão IEEE 802.16c inclui recomendações para o detalhamento dos perfis de sistema de modo a contribuir com a interoperabilidade, enquanto que a versão IEEE 802.16b tratou especificamente dos aspectos relativos à qualidade de serviço (QoS).

O padrão 802.16d, uma evolução do padrão 802.16a, denominado WiMAX Fixo, permite a incorporação opcional de sistemas de múltiplas antenas (MIMO), codificação no espaço e no tempo (STC), e suporte a antenas inteligentes (AAS), oferecendo a possibilidade de utilização de terminais menores e com baixo consumo de energia. Esse padrão usa OFDM, suporta acesso fixo e ponto-multiponto e opera em linha de visada

(LOS – *Line of Sight*) ou em NLOS. Para esse tipo de sistema, fornecedores estão desenvolvendo equipamentos *outdoor* e *indoor* para o usuário final (SS ou CPE - Customer Premise Equipment) bem como cartões PCMCIA e modem USB para computadores. Inicialmente, os perfis de interesse baseiam-se no uso das faixas de frequências de 3,5 GHz e 5,8 GHz.

O padrão 802.16e, denominado WiMAX Móvel, adota o OFDMA. Essa técnica de múltiplo acesso usa subcanalização segundo os princípios do OFDM, provendo um novo esquema de modulação escalável, que utiliza transformada rápida de Fourier (FFT) com tamanhos variáveis de 128, 512, 1.024 e 2.048, além de também incorporar na mesma subportadora vários usuários. Estas novas especificações são fornecidas de modo a permitir mobilidade da estação móvel a uma velocidade de até 120 km/h e suporte para *handoff* e *roaming*. As faixas de frequências candidatas às implementações iniciais são 2,3 GHz e 2,5 GHz.

O padrão 802.16d não evolui para o padrão 802.16e, assim sendo, as operadoras que já investiram nesse padrão não podem mudar sem um novo investimento [20]. Isso retarda ainda mais a entrada a tecnologia no Brasil, pois as operadoras vão seguir a tendência mundial para que o investimento em um padrão não seja em vão.

A Fig.3.3 ilustra a evolução do padrão IEEE 802.16, mostrando que os padrões IEEE 802.16a e 802.16c foram substituídos pelo padrão IEEE 802.16d para aplicações fixas, enquanto que o padrão IEEE 802.16e foi desenvolvido especificamente para permitir aplicações móveis. A Tabela 3.1 apresenta um sumário dos tipos de acesso de sistemas WiMAX, relacionando ao padrão que possibilita os principais acessos [3].

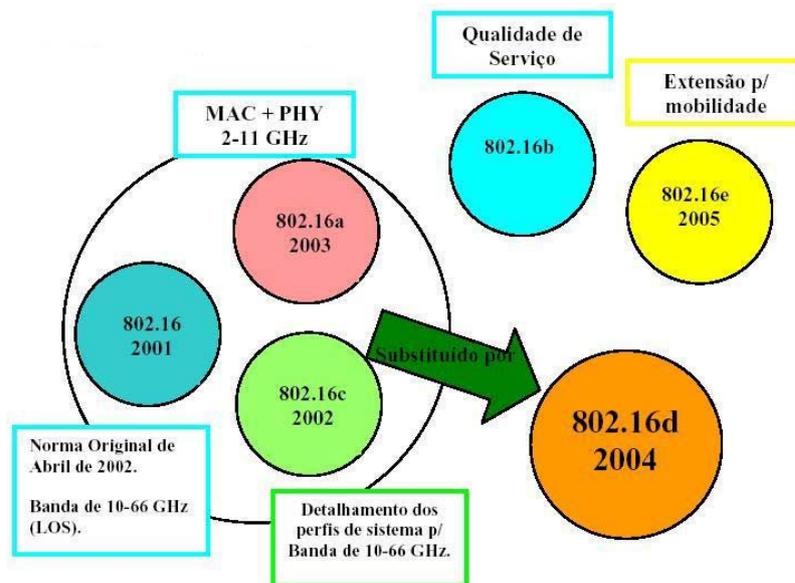


Figura 3.3. Evolução do padrão IEEE 802.16.

Tabela 3.1: Tipos de acesso WiMAX.

Definição	Dispositivos	Localidade/ Velocidade	Handoff	802.16d	802.16e
Acesso Fixo	CPEs indoor e outdoor	Simples/Estacionário	Não	Sim	Sim
Acesso Nomádico	CPEs indoor, cartões PCMCIA	Múltiplas/Estacionário	Não	Sim	Sim
Portabilidade	Cartões PCMCIA ou minimodems (USB)	Múltiplas/Velocidade de Pedestre	Hard Handoff	Não	Sim
Mobilidade Simples	Cartões PCMCIA ou minicartões ou smartphones	Múltipla/Baixa velocidade de automóvel	Hard Handoff	Não	Sim
Mobilidade Total	Cartões PCMCIA ou minicartões ou smartphones	Múltipla/Alta velocidade de automóvel	Soft Handoff	Não	Sim

3.3. Conceitos de OFDM

A técnica OFDM foi inicialmente proposta em 1968 por Chang e Gibby e patenteada nos Estados Unidos em 1970. A primeira aplicação do OFDM data de 1985. Desde então essa técnica vem sendo empregada em aplicações de radiodifusão como o DAB (*Digital Audio Broadcasting*) e o DVB (*Digital Video Broadcasting*) [21]; em redes sem fio como IEEE 802.11 e IEEE 802.16; e também em transmissão digital em linhas telefônicas como ADSL e HDSL. Essa técnica tem sido largamente utilizada em sistemas de comunicações digitais devido a sua robustez e aos avanços da eletrônica permitindo que o sistema IEEE 802.16 opere com grandes espalhamentos temporais (*delay spread*) de sinal, típicos dos ambientes NLOS onde se espera que tais sistemas sejam implantados [22].

A técnica OFDM pode ser compreendida como uma extensão da técnica FDM de transmissão paralela baseada no princípio da modulação de multiportadoras. No entanto, ao invés de posicionar as subportadoras lado a lado no espectro, ela permite a superposição das subportadoras no espectro de forma ortogonal, como mostrado na Fig.3.4, de modo a permitir a recuperação completa da informação no receptor.

O objetivo do OFDM é realizar uma transmissão paralela de dados a baixas velocidades e com multiplexação de frequências em subcanais sobrepostos, o que evita o uso de equalização e explora de maneira eficiente a largura de banda disponível [23].

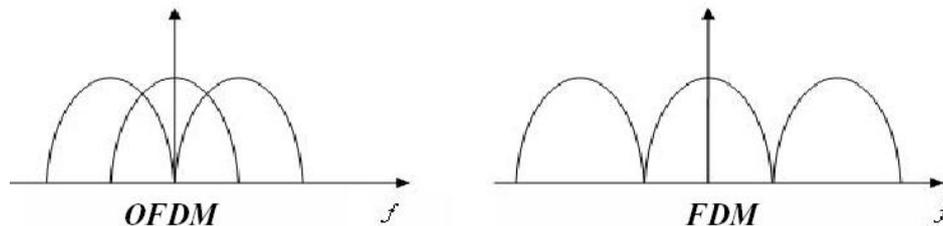


Figura 3.4: Sobreposição de frequências no espectro.

A Fig. 3.5 ilustra um diagrama de blocos da técnica OFDM que possuem as seguintes características [23].

- Camada MAC Tx, responsável pela entrega das sequências de bits para a camada física;
- Randomizador, responsável por evitar a presença de longas sequências de 0s e 1s e, conseqüentemente, diminuir problemas de equalização;
- FEC, bloco de codificação responsável por introduzir redundância controlada nas sequências transmitidas com o propósito de reduzir a probabilidade de bits errados no receptor;
- Entrelaçador, tem por função redistribuir os bits de uma sequência evitando, assim, perda de uma sequência de bits devido a rajada de ruídos.
- Modulação, mapeia os dados em símbolos que serão efetivamente transmitidos;
- Montagem do Símbolo: gera a sequência a ser submetida ao bloco IFFT;
- Preâmbulo, gera um símbolo conhecido, no início da transmissão, para a estimação do canal;
- IFFT gera o símbolo OFDM;
- Adiciona CP, acrescenta o intervalo de guarda na sequência gerada pelo bloco IFFT;
- Conversor P/S, transforma o sinal paralelo a ser transmitido pelo canal em série;

- Canal e Ruído Aditivo: é neste bloco que os efeitos de propagação e ruídos são considerados;
- Conversor S/P, o sinal serialmente recebido é transformado em paralelo para ser demodulado;
- Remove CP, exclui o intervalo de guarda;
- FFT, realiza a Transformada de Fourier;
- Estimação do Canal PLC, estima a resposta impulsiva do canal;
- Equalização, equaliza o sinal recebido antes da demodulação;
- Demodulação, demodula os símbolos de cada sub-portadora recebidos;
- Inversa do Entrelaçador, este bloco rearranja os bits;
- Decodificação, procura decodificar e corrigir os dados recebidos a partir da redundância introduzida;
- Inversa do Randomizador, executa a operação inversa do randomizador;
- Camada MAC Rx, disponibiliza os dados para o receptor.

Uma das principais razões do uso do OFDM é o aumento da robustez em relação a desvanecimentos seletivos em frequência ou à interferência de banda estreita. Em sistemas de portadora única, desvanecimento ou sinal interferente pode fazer o enlace inteiro falhar, mas, em sistemas com multiportadoras, somente parte das subportadoras serão afetadas.

Devido aos recentes avanços da tecnologia de processamento digital de sinais os obstáculos iniciais para a implantação do OFDM, tais como massivas multiplicações complexas e acessos à memória em alta velocidade, não existem mais. Além disso, o uso dos algoritmos de FFT eliminou a necessidade de vários osciladores e de modulação coerente, tornando o uso da tecnologia economicamente viável. O OFDM tem, entre outras, as vantagens a seguir.

- É uma maneira eficiente de lidar com os multipercursos. Para um dado atraso de espalhamento, a complexidade de implantação é significativamente menor que a de um sistema de portadora única com equalizador.
- É robusto em relação a interferentes de banda estreita porque tal interferência afeta somente uma pequena porcentagem de subportadoras.
- Em canais com variação lenta no tempo, é possível aumentar o desempenho de modo significativo pela adaptação da taxa de dados por subportadora de acordo com a relação sinal-ruído (SNR) de cada subportadora.

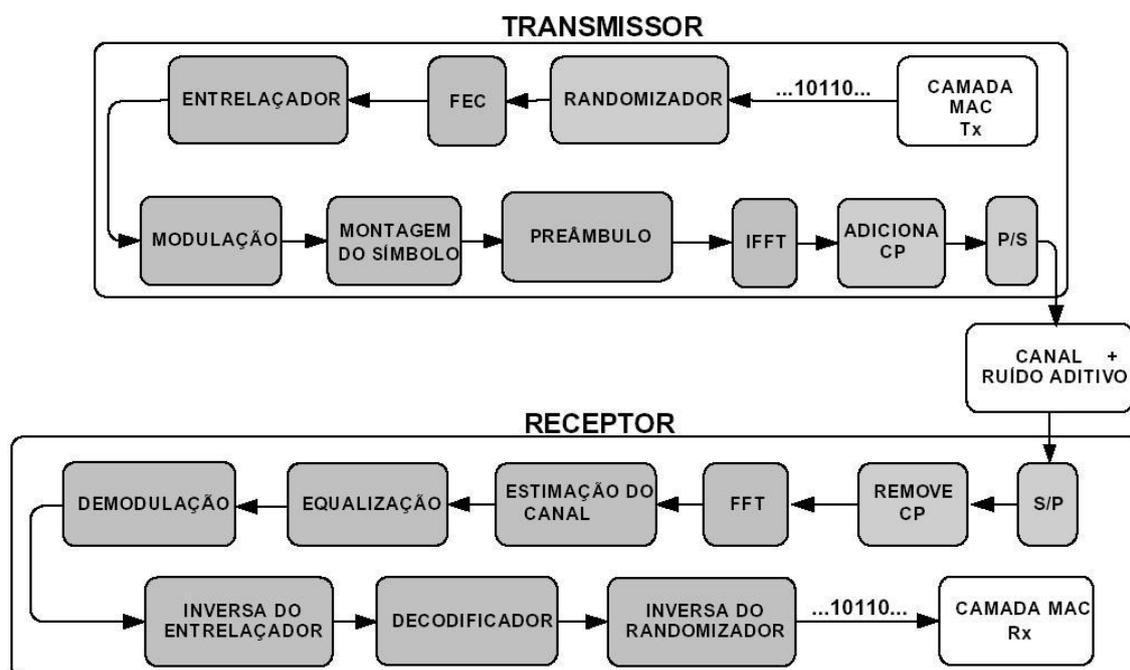


Figura 3.5: Diagrama de blocos do sistema OFDM

A Fig.3.6 mostra a arquitetura básica de um sistema OFDM, em que os sinais seriais são divididos em diversos sinais paralelos com taxas reduzidas, aumentando, em consequência, a duração de cada símbolo transmitido. Cada subportadora transporta uma parte da informação total na forma de uma sequência de símbolos modulados digitalmente, por exemplo, um sinal QPSK ou QAM, com taxas de transmissão por portadoras tão menores quanto maior for o número de portadoras. Como o símbolo resultante possui duração maior que o símbolo da sequência original, a interferência entre símbolos (ISI – *Inter-Symbol Interference*), provocada pelo espalhamento temporal do canal devido à propagação por múltiplos percursos, será menor. A interferência entre canais (ICI – *Inter-Carrier Interference*) ocorre quando é perdida a ortogonalidade entre as portadoras na recepção.

O problema da interferência dos sinais OFDM, que causa a interferência entre símbolos (ISI), foi resolvido pela introdução do intervalo de guarda (CP – *cyclic prefix*) por Peled e Ruiz [24]. Ao invés de usar um intervalo de guarda vazio, este é preenchido com uma extensão cíclica do símbolo OFDM, repetindo-se as amostras de dados da última parte do bloco no início dos dados do próximo bloco, conforme apresentado na Fig.3.7.

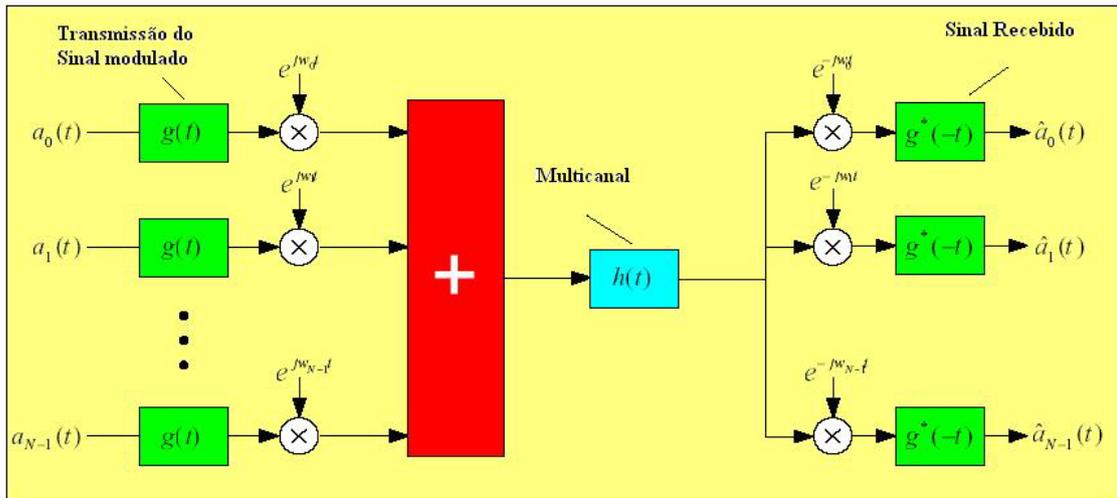


Figura 3.6: Arquitetura básica do sistema OFDM.

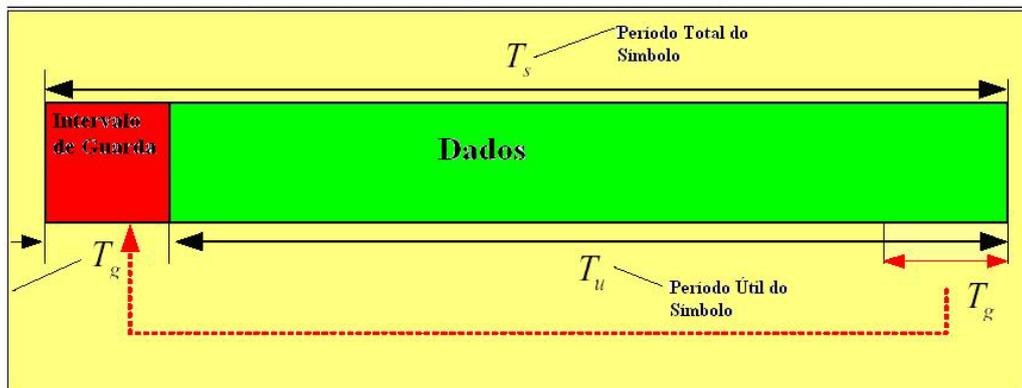


Figura 3.7: Acréscimo do intervalo de guarda.

3.3.1. Parâmetros OFDMA

No OFDMA, cada subcanal pode ser utilizado por um grupo diferente de usuários, como mostrado na Fig. 3.8, distribuindo-se melhor os usuários em subcanais ociosos e aumentando a capacidade do sistema. A Fig.3.9 e 3.10 mostra a estrutura das subportadoras OFDMA, que consiste em três tipos de subportadoras: para transmissão de dados; a piloto, com objetivo de sincronização; e as nulas usadas para banda de guarda. As subportadoras ativas (dados e piloto) estão agrupadas formando subcanais. O WiMAX suporta a subcanalização tanto no *download* - DL quanto no *upload* - UL.

A norma IEE 802.16d é baseada nos parâmetros do OFDM, e a norma IEEE 802.16e, nos parâmetros do OFDMA, o qual suporta uma largura de banda de até 20 MHz por canal e possui flexibilidade de usuários nas portadoras para atender às necessidades de diferente utilização do espectro e exigências do modelo. Como a ANATEL ainda não definiu o

tamanho da banda para cada operadora, neste trabalho será considerado o espectro total de 30 MHz com canais de 5 MHz ou 10 MHz com o padrão OFDMA, que é o padrão usado na maioria dos países que estão utilizando o WiMAX. Os parâmetros do OFDMA estão listados na Tabela 3.2. A frequência de amostragem é calculada por:

$$F_s = n \times BW \quad (3.1)$$

onde BW é a largura de banda e n , o fator de amostragem. O fator de amostragem pode ser $8/7$, $86/75$, $144/125$, $316/275$ ou $57/50$ para OFDM e $8/7$ ou $28/25$ para OFDMA. No padrão IEEE 802.16 é usado $28/25$. A frequência de amostragem dividida pelo número de portadoras é igual a 10,94 kHz, que corresponde à largura de banda no espectro de cada subportadora e que equivale ao tempo útil de cada símbolo (T_b) de 91,43 μ s. A esse tempo é acrescentado o intervalo de guarda (T_g) que pode ter o valor de $1/4$, $1/8$, $1/16$ ou $1/32$ do tempo útil. O mais usual é de $1/8$ do tempo útil que equivale a 11,43 μ s. O tempo total do símbolo OFDMA, nas condições descritas, é igual à soma do tempo útil com o tempo do intervalo de guarda: $T_s = T_b + T_g = 102,86 \mu$ s. Sabendo que um quadro contém 48 símbolos e o tempo total (T_s) de um símbolo OFDMA é de 102,86 μ s, então o tempo de um quadro é de 5 ms.

A quantidade de subportadoras equivale a largura de faixa total da FFT, com isso, a largura de faixa que cada subportadora ocupa no espectro são fixas em 10,94 kHz [25]. Uma vez que essa faixa e a duração dos símbolos são fixas, o impacto nas camadas superiores é mínimo, quando espalhados randomicamente no espectro.



Figura 3.8: Comparação entre OFDM e OFDMA.

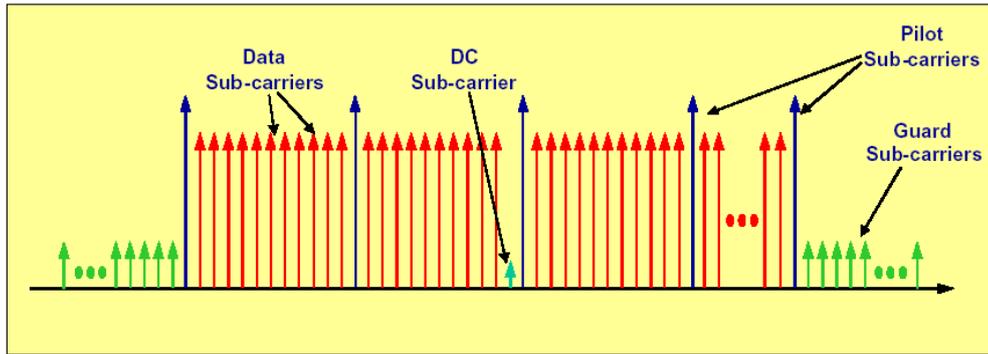


Figura 3.9: Estrutura básica de subportadoras OFDMA.

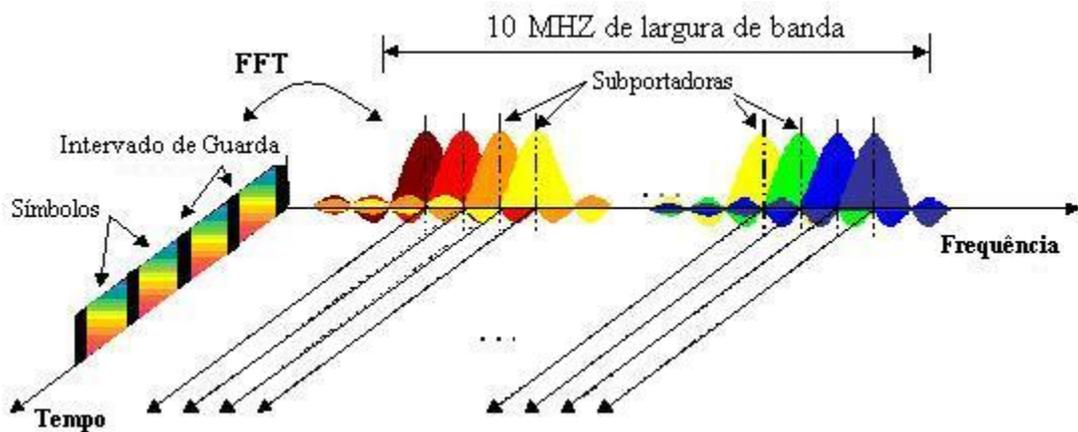


Figura 3.10: Estrutura completa de subportadoras OFDMA.

Tabela 3.2: Parâmetros do OFDMA para o padrão 802.16e.

Parâmetros	Valores	
Largura de banda do canal em MHz (BW)	5 MHz	10 MHz
Frequência de amostragem em MHz (F_p)	5,6 MHz	11,2 MHz
Tamanho FFT (N_{FFT})	512	1024
Número de subcanais	8	16
Frequência de amostragem de cada subportadora	10,94 kHz	
Tempo útil de cada símbolo (T_b)	91,43 μ s	
Duração do Intervado de Guarda (T_g)	11,43 μ s	
Duração do símbolo OFDMA (T_s)	102,86 μ s	
Número de símbolos OFDMA	48	

3.3.2. Tipos de Modulação

Os sistemas WiMAX utilizam as modulações BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM, com taxas de codificação de 1/2, 2/3, 3/4 e 5/6. As modulações BPSK e QPSK são mais robustas, permitem um alcance com maior raio, mas com taxas de transmissão menor. Já as modulações 16QAM e 64QAM são menos robustas, permitem taxas maiores, mas com menor alcance.

PSK – Phase Shift Keying

PSK é uma forma de modulação em que a informação do sinal digital é inserida nos parâmetros de fase da portadora. Neste sistema de modulação, quando há uma transição de um bit 0 para um bit 1 ou de um bit 1 para um bit 0, a onda portadora sofre uma alteração de fase de 180 graus. Esta forma de particular do PSK é denominada de BPSK (Binary Phase Shift Keying). Quando não há nenhuma dessas transições, ou seja, quando bits subsequentes são iguais, a portadora continua a ser transmitida com a mesma fase.

Por ser uma modulação por fase, na qual é utilizado somente um bit, BPSK fornece alta imunidade contra interferências e ruído, o que a torna uma modulação muito robusta. A Fig.3.11 mostra a constelação e os valores dos bits $b_0 = 0$ e $b_1 = 1$.

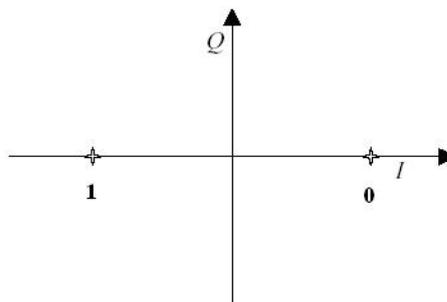


Figura 3.11: Constelação BPSK.

A modulação QPSK é uma técnica de modulação derivada do BPSK, porém, neste caso, são utilizados parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para modular o sinal de informação. Como agora são utilizados dois parâmetros, existem mais tipos possíveis de símbolos, o que permite que sejam transmitidos mais bits por símbolo. Neste caso, tem-se 4 tipos de símbolos possíveis, a portadora pode assumir 4 valores de fase

diferentes, como por exemplo, 45° , 135° , 225° e 315° . A Figura 3.12 ilustra em um diagrama de fase e quadratura (IQ) os 4 possíveis símbolos gerados pela modulação QPSK usando 2 bits por símbolo.

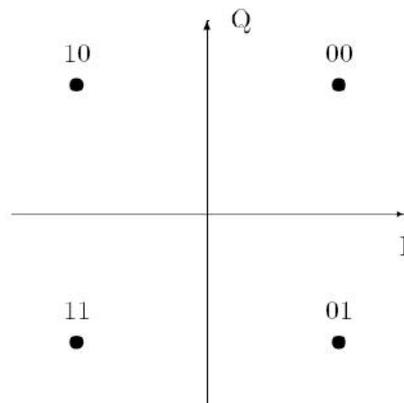


Figura 3.12: Constelação QPSK.

Na situação de canal AWGN, o desempenho do sistema OFDMA com modulação QPSK é obtido em termos da BER (Bit Error Rate) pela equação [26]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{SNR}) \quad (3.2)$$

onde a função erro complementar (*erfc*), dada pela equação:

$$\operatorname{erfc}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-y^2} dy \quad (3.3)$$

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

O esquema de mapeamento QAM consiste em um processo de separação da sequência de bits e de entrelaçamento pouco diferente dos esquemas apresentados anteriormente. Os símbolos são mapeados em um diagrama de fase e quadratura, sendo que cada símbolo apresenta uma distância específica da origem do diagrama. Essa distância representa a amplitude, diferentemente da modulação PSK, na qual todos os símbolos estão a igual distância da origem. Isto significa que as informações são inseridas nos parâmetros de amplitude e quadratura da onda portadora.

No 16QAM, a constelação apresenta 16 símbolos, sendo 4 em cada quadrante do diagrama, tal que cada símbolo representa 4 bits. Diferentemente do QPSK, que está restrita a guardar apenas a informação de fase do símbolo, o 16QAM guarda informações de fase e de amplitude simultaneamente. O mapa desta constelação é apresentado na Fig.3.13, e nela pode ser constatado que existem símbolos com amplitudes distintas e fases iguais, e fases distintas com amplitudes iguais [27].

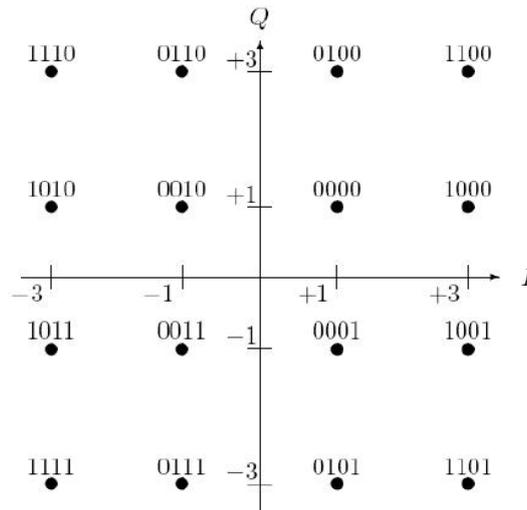


Figura 3.13: Constelação 16QAM.

O desempenho do sistema OFDMA, na situação de canal AWGN, com modulação 16QAM é determinado pela equação [26]:

$$BER(SNR) = \frac{3}{8} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{2}{5}} \times SNR \right) - \frac{9}{64} \operatorname{erfc}^2 \left(\sqrt{\frac{2}{5}} \times SNR \right) \quad (3.4)$$

No mapeamento 64QAM, o processo é muito semelhante ao 16QAM. As únicas diferenças entre eles estão apenas no número de bits que compõem cada símbolo, e conseqüentemente no número de símbolos que compõem cada constelação. Desta forma, o processo de separação do fluxo serial de bits e o processo de mapeamento também devem ser adaptados para suportar essa mudança. Em uma constelação de 64 símbolos, são necessários seis bits para representar cada símbolo, e então a sequência serial será dividida em seis fluxos independentes. No entrelaçamento, os atrasos são inseridos proporcionalmente aos fluxos.

O processo de mapeamento do 64QAM também codifica suas informações na fase e na amplitude dos seus símbolos. Assim como no 16QAM, a constelação é composta por símbolos de fases diferentes e amplitudes iguais e fases iguais e amplitudes diferentes, mostrada na Fig.3.14.

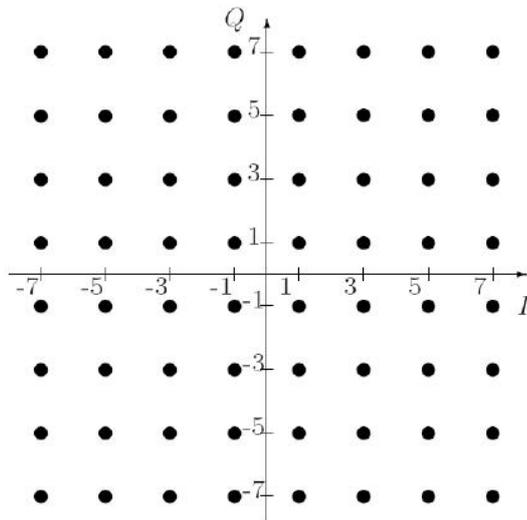


Figura 3.14: Constelação 64 QAM.

Na modulação 16QAM, a taxa de transmissão é menor que no 64QAM, uma vez que cada símbolo transporta um número menor de bits. No entanto, no modo 16QAM, a distância euclidiana entre os símbolos é maior que no 64QAM. Isto permite que o modo 16QAM possibilite uma melhor qualidade de serviço (QoS), pois a maior distância entre os símbolos dificulta erros de interpretação no receptor quando este detecta um símbolo.

Para o cálculo do desempenho do sistema OFDMA na situação de canal AWGN, com modulação 64QAM é usada a seguinte equação [26]:

$$BER(SNR) = \frac{7}{24} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{7} \times SNR} \right) - \frac{49}{384} \operatorname{erfc}^2 \left(\sqrt{\frac{1}{7} \times SNR} \right) \quad (3.5)$$

3.4. Modulação Adaptativa

A capacidade de alterar dinamicamente entre os vários esquemas de modulação é uma das mais interessantes características da camada física do padrão IEEE 802.16. Basicamente, a escolha da modulação a ser adotada é realizada pelo requisito de taxa de

transferência do usuário e pela relação sinal-ruído (SNR) do enlace, garantindo enlace robusto e taxa otimizada para cada usuário. Quando a SNR for elevada, o esquema de modulação menos robusto é aplicado, elevando a capacidade de transmissão do sistema. Quando ocorre degradação na SNR, o sistema utiliza um o esquema de modulação, mais robusto, mantendo a qualidade do enlace, porém com redução da taxa de transmissão.

Como mostrado, as modulações BPSK e QPSK permitem que o usuário envie em um único ciclo de transmissão de sinal (símbolo OFDM) 1 e 2 bits de informação, enquanto as modulações 16QAM e 64QAM são capazes de transmitir 4 e 6 bits, respectivamente. A principal função da modulação adaptativa é aumentar a faixa na qual uma modulação de mais alta ordem pode atuar, uma vez que é feita adaptação conforme distância e condições de desvanecimento (particularmente crítico em ambientes NLOS), ao invés de manter um esquema de modulação fixo como nos sistemas tradicionais.

Baseado na SNR medida do sinal e na modulação que será utilizada, é possível estimar a taxa de perdas de transmissão, ou BER. Como regulador da qualidade da transmissão, muitos modelos de tráfego, como FTP, VoIP e outros, possuem taxas máximas de erro, denominadas BER alvo [27]. Em condições de propagação severas ou enlaces de longa distância, requerem esquemas de modulação mais robustos. Nesse caso, em detrimento de taxa de transmissão, é garantida uma comunicação estável a taxas mais baixas tipicamente usando modulações BPSK e QPSK. Quando altas taxas são necessárias e as condições de propagação são favoráveis, usualmente enlaces de curta a média distância, modulações de alta eficiência espectral são empregados, normalmente modulações 16QAM e 64QAM.

A Fig.3.15 apresenta esse conceito por meio de diagrama simplificado. Os valores das taxas de transmissão são alterados de acordo com a distância do usuário à BTS. À medida que a estação móvel (usuário) vai se distanciando da BTS, a SNR vai diminuindo e, com isso, a BER aumenta o que exige a troca por uma modulação mais robusta, resultando numa diminuição na taxa de transmissão. O usuário próximo à BTS consegue atingir uma taxa de transmissão de 31,68 Mbps, e ao deslocar-se à borda da célula, utiliza somente 9,5 Mbps. Esses valores serão detalhados no tópico seguinte.

Na Fig.3.16 é mostrada a variação da BER em função da SNR, calculada a partir das equações (3.2), (3.4) e (3.5), para cada modulação sem o uso de codificação. Quando a BER aumenta e atinge o valor de 10^{-4} , a qualidade do sinal diminui forçando a troca da modulação por uma com menos bits por símbolo, melhorando assim a qualidade do sinal. A Tabela 3.3 formada por valores da SNR, em $BER=10^{-4}$, nas diferentes modulações com

codificações especificadas no padrão 802.16e [23]. Essa variação de valores de SNR será usada no tópico seguinte para o cálculo da taxa de transmissão em diferentes tipos de antenas adaptativas.

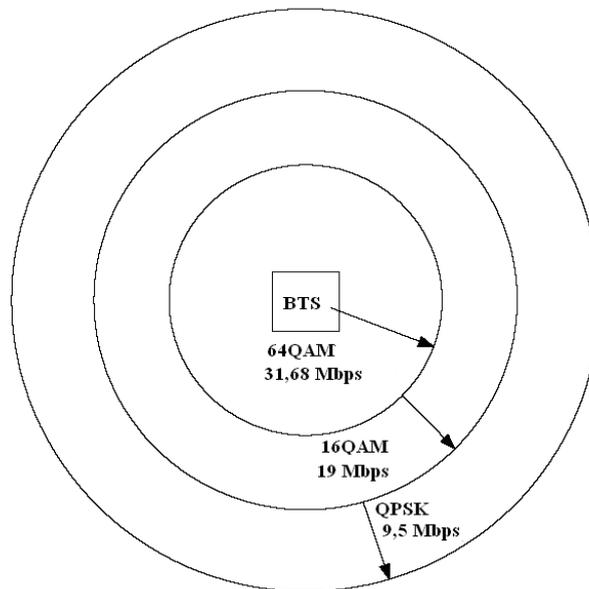


Figura 3.15: Alteração da modulação referente a degradação do sinal.

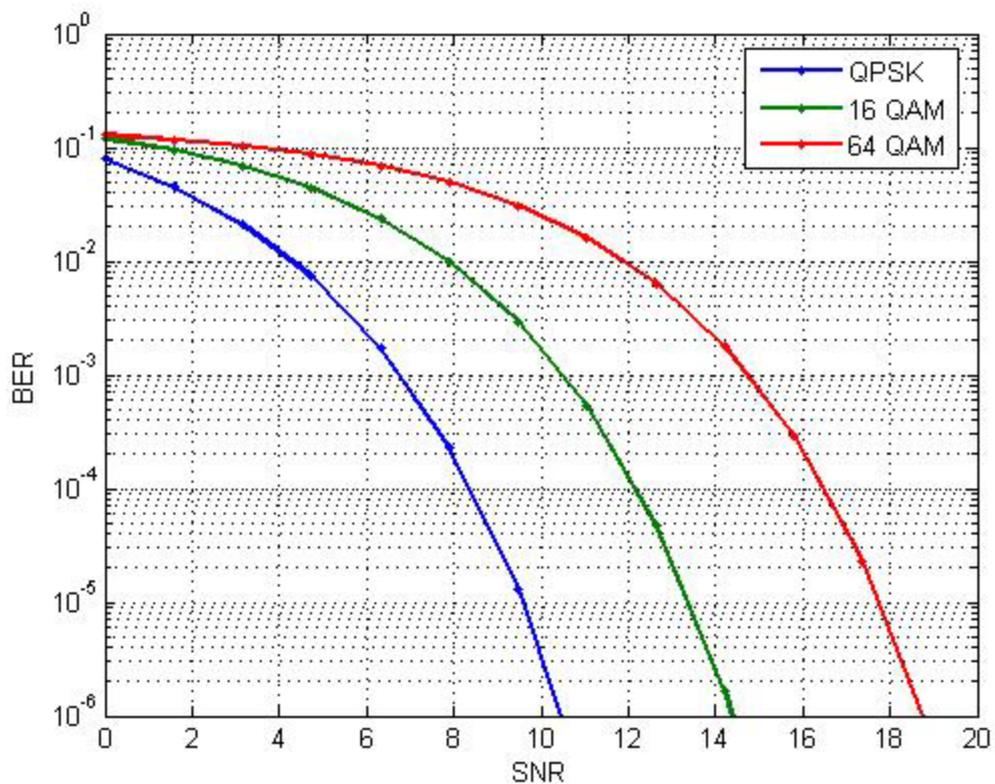


Figura 3.16: Desempenho do sistema OFDMA com diferentes modulações.

Tabela 3.3: Valores da SNR relativos à modulação para BER = 10⁻⁴.

Modulação	Codificação	SNR
QPSK	1/2	6
	2/3	7,5
	3/4	9
16QAM	1/2	12
	2/3	14,5
	3/4	15
	5/6	17,5
64QAM	1/2	18
	2/3	20
	3/4	21
	5/6	23

3.4.1. Recursos avançados do OFDMA

A estação base ajusta a taxa de transmissão de acordo com o tamanho e localização de cada quadro, dependendo das condições do canal no receptor. Um indicador de qualidade do canal (CQI) é utilizado para fornecer informações do usuário para a estação base pelo protocolo CQICH.

Os protocolos de codificação e modulação adaptativa (AMC), *hybrid automatic repeat request* (HARQ) e *fast channel feedback* (CQICH) foram inseridos no WiMAX para aumentar a cobertura e a capacidade em aplicações móveis. As modulações QPSK, 16QAM e 64QAM são usadas no DL e UL, sendo a 64QAM opcional no UL. Tanto no *convolutional code* (CC) quanto no *convolutional turbo code* (CTC) são aplicadas repetições e variação na taxa dos códigos, o que aumenta a eficiência na taxa de transmissão. A Tabela 3.4 resume a codificação e a modulação suportadas no WiMAX móvel.

Tabela 3.4: Codificação e modulação usadas no WiMAX móvel.

	DL	UL
Modulação	QPSK, 16QAM e 64QAM	QPSK, 16QAM e 64QAM
Codificação CC	1/2, 2/3, 3/4 e 5/6	1/2, 2/3, 5/6

As combinações de diferentes modulações e codificações resultam em diferentes taxas de transmissão, como mostra a Tabela 3.5 para canais de 5 MHz e 10 MHz. A duração do quadro é de 5 ms. Cada quadro contém 48 símbolos OFDMA, sendo 44 símbolos OFDMA disponíveis para a transmissão de dados. A taxa de transmissão é obtida de acordo com a equação

$$B = \frac{Q_s \times CC}{T_s} \quad (3.6)$$

onde Q_s é a quantidade de subportadoras de dados, T_s é o período total do quadro dividido pela quantidade de símbolos de dados e CC é a taxa codificada de bits por símbolo.

Tabela 3.5: Taxa de transmissão do WiMAX para canais de 5 MHz e 10 MHz.

Parâmetros		Download	Upload	Download	Upload
Largura do Canal		5 MHz		10 MHz	
Tamanho da FFT		512		1024	
Subportadoras Nulas		92	104	184	184
Subportadoras Piloto		60	136	120	280
Subportadoras de Dados		360	272	720	560
Subcanais		15	17	30	35
Período dos símbolos - T_s		102,9 μ s			
Duração dos Quadros		5 ms			
Símbolos OFDM por Quadro		48			
Símbolos OFDM de Dados por Quadro		44			
Modulação	Codificação - CC	Canal de 5MHz		Canal de 10 MHz	
		Taxa de transmissão no DL - Mbps	Taxa de transmissão no UL - Mbps	Taxa de transmissão no DL - Mbps	Taxa de transmissão no UL - Mbps
QPSK	1/2 CC, 6x	0,53	0,38	1,06	0,78
	1/2 CC, 4x	0,79	0,57	1,58	1,18
	1/2 CC, 2x	1,58	1,14	3,17	2,35
	1/2 CC, 1x	3,17	2,28	6,34	4,70
	3/4 CC	4,75	3,43	9,50	7,06
16QAM	1/2 CC	6,34	4,57	12,67	9,41
	3/4 CC	9,50	6,85	19,01	14,11
64QAM	1/2 CC	9,50	6,85	19,01	14,11
	2/3 CC	12,67	9,14	25,34	18,82
	3/4 CC	14,26	10,28	28,51	21,17
	5/6 CC	15,84	11,42	31,68	23,52

Assim, ao se utilizar um canal de 10 MHz com 720 subportadoras, 44 símbolos de dados em cada subportadora moduladas a 64QAM (6 bits) e codificadas a 5/6 CTC, a taxa de transmissão é dada por

$$B = \frac{720 \times 44}{5 \times 10^{-3}} \times 6 \times \frac{5}{6} = 31,68 \text{ Mbps}$$

Portanto, com essa taxa de transmissão é possível determinar a capacidade de uma BTS SISO e sua quantidade para implantação do sistema WiMAX em Brasília. Uma BTS com fator de reuso 3:1 possui 3 canais de 10 MHz com capacidade total de 95,04 Mbps (3 x 31,68 Mbps).

De acordo com o capítulo 2, os requisitos de densidade de tráfego por área onde na região densamente urbana há uma demanda de 21,04 Mbps/km² em 210 km², com tráfego bruto de 4.419 Mbps em toda região. Essa demanda dividida pela capacidade da BTS SISO resulta em 47 BTS para essa região, conforme Tabela 3.6. O mesmo cálculo é feito para as regiões urbana, suburbana e rural, cuja quantidade de BTS é respectivamente, 42 BTS, 13 BTS e 5 BTS.

Logo, para implantação do sistema WiMAX em todo o DF é necessário 117 BTS usando antenas SISO . Ainda assim, essa quantidade de BTS pode ser otimizada aumentando a capacidade das antenas, utilizando sistema SIMO e MIMO, os quais serão analisados no próximo capítulo.

Tabela 3.6: Quantidade de BTS SISO para implantação do WiMAX.

Tipo de Região	Número de usuários	Capacidade da BTS SISO com 3 setores Mbps	Tráfego necessário Mbps/km²	Tráfego Bruto por região	Quantidade de BTS
Densamente urbana	116.920	95 Mbps	21,04 Mbps/km ² na área de 210 km ²	4.419 Mbps	47
Urbana	113.603	95 Mbps	6,13 Mbps/km ² na área de 645 km ²	3.951 Mbps	42
Suburbana	37.207	95 Mbps	0,83 Mbps/km ² na área de 1.383 km ²	1.150 Mbps	13
Rural	15.597	95 Mbps	0,12 Mbps/km ² na área de 3.551 km ²	434 Mbps	5
Total	283.327	95 Mbps	-	10.765 Mbps	117

4. CAPACIDADE DA ESTAÇÃO RÁDIO-BASE

No capítulo anterior, analisou-se a capacidade de uma estação rádio-base usando antena SISO, a partir dos parâmetros de canal OFDMA com variação de modulação e codificação. Neste capítulo será realizada a comparação de capacidade da BTS com antenas SISO, SIMO e MIMO. Posteriormente, os dados da demanda por área demográfica serão usados para a determinação da quantidade de BTS por região para cada sistema de antenas.

4.1. Sistemas de Múltiplas Antenas

Em sistemas de comunicação móvel, o sinal sofre múltiplas reflexões, refrações e difrações no caminho entre transmissor e receptor, o que causa desvanecimento, um efeito inerente do canal em comunicações sem fio. O sinal recebido é a somatória dessas reflexões, refrações e difrações que ocorrem durante o percurso de transmissão. Por isso, a intensidade do sinal na recepção, apresenta variações que podem limitar a capacidade do sistema de comunicação [25].

Esquemas que utilizam múltiplas antenas transmissoras e múltiplas antenas receptoras (MIMO – *Multiple Input Multiple Output*) podem ser utilizados para diminuir o efeito do desvanecimento, melhorando a confiabilidade da comunicação e aumentando a taxa de transmissão [28].

Na formulação do modelo de canal MIMO, considera-se a utilização de um sistema formado por M antenas transmissoras e N receptoras no qual os sinais transmitidos através de cada antena transmissora sofrem desvanecimentos independentes dos demais sinais transmitidos pelas outras antenas. O sinal recebido por cada uma das antenas receptoras é constituído pela superposição de versões dos sinais transmitidos. A Figura 4.1 mostra um diagrama em blocos de um sistema MIMO. Assume-se, no modelo de transmissão, que os canais sejam planos no domínio da frequência, e são afetadas pela presença de ruído aditivo gaussiano branco (AWGN, *additive White Gaussian Noise*). A potência máxima de transmissão é considerada fixa, de valor unitário igualmente dividido entre as antenas transmissoras. O desvanecimento do canal é assumido ser quase-estático, ou seja, o canal

se mantém constante durante o comprimento do quadro, ou pacote de dados, e se altera de forma independente entre quadros consecutivos.

No emprego de múltiplas antenas, a chamada “distância de coerência” representa a mínima distância entre duas antenas tal que elas possam receber desvanecimentos independentes [29]. Quando as antenas são espaçadas umas das outras de forma adequada, o ambiente produz espalhamento suficiente do sinal na recepção de modo que o sinal recebido em cada uma das antenas receptoras seja a soma de vários componentes de multipercursos e o canal pode ser modelado como tendo caminhos independentes e descorrelacionados [30].

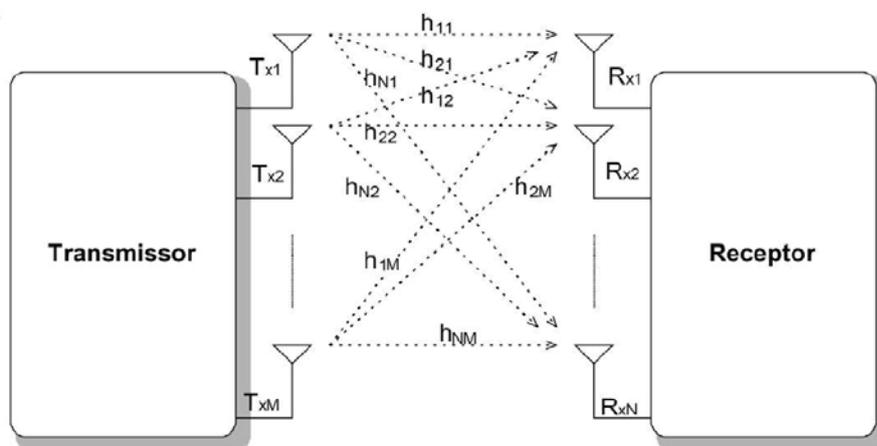


Figura 4.1: Diagrama de um sistema de transmissão MIMO.

Quando explorados devidamente, os sistemas MIMO podem fazer que os ambientes ricos em multipercursos apresentem grandes ganhos de capacidade [31]. Para isso, ao se avaliar o desempenho dos sistemas MIMO é necessário que o canal MIMO esteja modelado adequadamente. Sendo o sistema perfeitamente sincronizado, o modelo de transmissão MIMO para um instante de tempo k pode ser equacionado por

$$x(k) = Hs(k) + z(k) \quad (4.1)$$

O vetor $s(k)$, de dimensão $M \times 1$, corresponde ao sinal transmitido no instante k pelas antenas transmissoras. O vetor $x(k)$ representa o sinal recebido pelas antenas receptoras no instante de tempo k e tem dimensão $N \times 1$. H tem dimensão $N \times M$ e representa matriz do canal MIMO.

Os elementos h_{nm} da matriz H são complexos e correspondem à m -ésima e n -ésima antena transmissora e receptora respectivamente. A amplitude desses elementos possui uma distribuição do tipo Rayleigh, o que caracteriza uma transmissão sem visada direta entre transmissor e receptor [32]. Por fim, o vetor $z(k)$, em (4.1), representa o ruído aditivo gaussiano branco.

Os canais MIMO, em virtude de sua grande capacidade de transmissão, tornam-se seletivos em frequência diante das características de multipercursos presentes no canal sem fio. Quando o canal é modelado como seletivo em frequência, cada frequência será atenuada de forma diferente. Tais canais ocorrem quando os atrasos de multipercursos são significantes em relação ao período da taxa de símbolos [28]. Nesse caso, ocorre a interferência intersimbólica, trazendo atrasos severos e atenuações acentuadas ao sinal que chega ao receptor em múltiplas versões do sinal original transmitido.

Portanto, o sinal pode ser considerado como sendo formado pela combinação linear de símbolos atuais e símbolos anteriores, e a seletividade em frequência é modelada como tendo memória de comprimento L . O modelo de cada canal h_{nm} é dado pela equação:

$$h_{nm}(\tau) = \sum_{l=1}^L \alpha_{nm}^l \delta(t - \tau_{nm}^l) \quad (4.2)$$

onde α_{nm} representa o ganho complexo e τ_{nm} o atraso do l -ésimo caminho [54].

Os sistemas de antenas adaptativas (AAS - *Adaptive Antenna System*), especificado no padrão IEEE 802.16, consistem de técnicas de conformação de feixe (*beam-forming*). Esse conjunto de antenas é usado na estação rádio-base (BS) com o objetivo de aumentar o ganho na direção da estação móvel (SS) desejada, e anular, ou minimizar ao máximo, interferência de outras SSs e de outras fontes de interferência. As técnicas AAS são usadas para possibilitar SDMA (*Spatial Division Multiple Access*), de forma que múltiplas SSs, separadas no espaço, podem transmitir e receber no mesmo subcanal, ao mesmo tempo. Pelo uso de conformação de feixe, a BS tem a habilidade de direcionar o sinal desejado para as diferentes SSs, bem como distinguir entre os sinais oriundos das diferentes SSs, ainda que estejam operando nos mesmos subcanais.

Em linhas gerais, os sistemas de antenas adaptativas ajustam-se de forma a atender determinado critério de desempenho preestabelecido, como a maximização da SNR. Há três categorias para os AAS.

- Troca de feixes (*switched beam*). Várias antenas estão disponíveis para transmissão e recepção em cada setor do *hub* servidor. Os apontamentos das antenas e diagrama de radiação de cada uma são fixos (o que é um limitante da técnica), constituindo um esquema semelhante à diversidade de duas antenas já conhecida. A cada momento, é escolhido o melhor feixe de comunicação com o terminal.

- Direcionamento de feixe (*beam steering*). Aponta o máximo ganho da antena do setor em direção ao terminal do usuário, maximizando a SNR. Pode ser usado em terminais móveis ou fixos e é de complexidade intermediária entre a técnica de troca de feixes e a próxima técnica, de combinação.

- Combinação para ótima relação SNR: Sistema de realimentação, pelo qual é verificado se a saída coincide com um sinal de referência, e tenta-se extrair qualquer ruído ou interferência. É o esquema de mais complexa implementação (ajustes de parâmetros de filtragem).

Apesar de todas essas funcionalidades encontradas na BS, a SS terá, em todos os casos analisados, a configuração com uma antena transmissora e duas receptoras por limitação de bateria e tamanho.

4.1.1. Capacidade da Estação Base SISO

O sistema de antenas SISO (*Single-Input, Single-Output*) é usado quando se deseja fazer uma simples conexão entre a antena receptora e a antena transmissora. Essa configuração utiliza uma antena de cada lado, podendo-se transmitir e receber o sinal simultaneamente. As transmissões analógicas de TV e rádio utilizam esse sistema para comunicação.

O conceito de capacidade para um único canal foi introduzido por Shannon em 1948 [33]. Em sua proposta de sistema de comunicação, os sinais na entrada do canal são considerados funções contínuas no tempo enquanto, na saída, estão as versões dos mesmos sinais, mas com perturbações.

Para um canal com uma única antena transmissora e outra receptora, semelhante a um canal “com fio”, corrompido por um ruído aditivo gaussiano branco (AWGN), a capacidade, dada pela taxa alcançada sem codificação de canal ou complexidade de sinalização, pode ser obtida pela equação [34]:

$$C = \log_2(1 + \rho) \text{ bps/Hz} \quad (4.3)$$

em que C é a capacidade do sistema em bps/Hz, e ρ representa o valor relação SNR, que varia de acordo com a distância entre as estações base e móvel. Assim, a cada diminuição de 3dB na SNR tem-se menos um bps por Hertz na capacidade do canal.

Os canais sem fio são variantes no tempo e sofrem desvanecimentos aleatórios. Nesse caso, (4.3) é reescrita acrescentando-se uma variável h , que representa a amplitude gaussiana complexa do canal [35], conforme a equação:

$$C = \log_2(1 + \rho|h|^2) \text{ bps/Hz} \quad (4.4)$$

4.1.2. Capacidade da Estação Base SIMO

Mesmo com apenas uma única antena para transmitir, a configuração SIMO leva vantagem de multipercursos em relação ao SISO. Com duas antenas para receber tanto na BTS como na SS, o sinal recebido é mais forte, resultado da combinação das técnicas de diversidade com a potência máxima dos rádios. Com N antenas receptoras, o sistema se torna do tipo SIMO e a capacidade é dada pela equação [28]-[36]:

$$C = \log_2\left(1 + \rho \sum_{n=1}^N |h_n|^2\right) \text{ bps/Hz} \quad (4.5)$$

4.1.3. Capacidade da Estação Base MIMO

A BTS MIMO utiliza múltiplas antenas para transmissão e recepção para melhorar o desempenho. Quando dois transmissores e dois ou mais receptores são usados, dois canais de transmissão podem ser utilizados duplicando a taxa de transferência de dados, além de aumentar a distância entre os equipamentos.

Várias são as vantagens de se utilizar múltiplas antenas ao invés de uma. Entretanto, os termos *input* e *output* são relativos às transmissões no ar e não aos equipamentos. Nessa notação particular, múltiplos *inputs* (MI) significa que múltiplos transmissores enviam

múltiplos fluxos de dados no ar; múltiplos *outputs* (MO) significa que múltiplos receptores estão recebendo múltiplos fluxos de dados através do ar.

A Fig. 4.2 mostra as formas possíveis de transmissão e recepção utilizando a tecnologia de múltiplas transmissões e recepções.

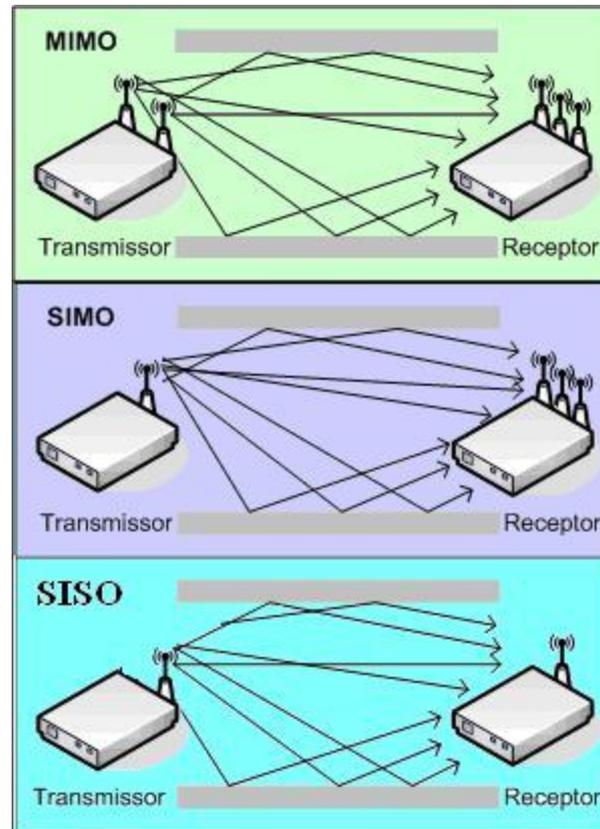


Figura 4.2: Tecnologias de múltiplas transmissões e recepções.

O sistema MIMO pode ser considerado como sendo uma combinação dos sistemas SIMO e MISO. A capacidade para M antenas transmissoras e N receptoras é dada pela equação [30]:

$$C = \log_2 \left(1 + \rho \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N |h_{ji}|^2 \right) \quad \text{bps/Hz} \quad (4.6)$$

No entanto, assim como nas configurações anteriores, a capacidade aumenta através da maximização da relação SNR, quando um único sinal é transmitido por todas as antenas. Na arquitetura MIMO, a capacidade pode ser aumentada significativamente se a transmissão adotada for de sinais distintos transmitidos por antenas correspondentes

distintas. Nesse esquema, há um aproveitamento melhor dos múltiplos canais paralelos proporcionados pelas antenas adaptativas. Essa solução de antenas adaptativas não será levada em consideração neste trabalho.

A partir das equações (4.4), (4.5) e (4.6), pode-se obter as curvas da Fig.4.3, que mostram a eficiência espectral das antenas em função da SNR. Utilizando os valores da eficiência espectral multiplicados pela capacidade do canal resulta na taxa de transmissão de cada antena ou setor, como mostrado na Tabela 4.1. Para os canais de 10 MHz, existem 720 subportadoras de dados; cada subportadora transmite 10,94 kHz, totalizando 7,87 MHz. Com isso, se for implantado um sistema SIMO e o usuário estiver a uma distância da BTS com SNR de 6 dB que equivale a eficiência de 2 bps/Hz, poderá realizar o *download* a uma taxa de 15,75 Mbps. Essa taxa pode aumentar com a aproximação do usuário com a BTS devido à mudança de modulação.

Analisando a Tabela 4.1 nota-se que, utilizando a antena MIMO, a taxa máxima atingida é de 74,83 Mbps onde todos os símbolos são dedicados ao DL. Outro fator importante é a análise do UL, pois os serviços oferecidos pelas operadoras dependem da relação entre UL e DL e isso afeta a taxa de transmissão. Para VoIP, a relação tem que ser 1:1, ou seja, o mesmo número de símbolos para DL quanto para UL, pois, durante a conversação, tanto o remetente quanto o destinatário usufruem a mesma quantidade de canais. Para serviços de navegação na Internet, o UL não é tão importante, a relação com o DL podendo ser de relação 3:1, isso só depende de que tipo de serviço que a operadora irá oferecer. Na relação 3:1, divide-se os 44 símbolos destinados anteriormente ao DL em 11 símbolos para o cabeçalho, 28 símbolos para DL e 9 para UL. A relação 1:1, são 22 símbolos para DL e 15 símbolos para o UL [15]. Como isso, a taxa de transmissão varia de acordo com a quantidade de símbolos alocados em cada quadro, resultando na Tabela 4.2, que mostra os valores de taxa de transmissão na modulação 64QAM.

A Figura 4.4 é a representação da Tabela 4.2 em gráfico, mostrando em colunas a variação na taxa de transmissão no DL segundo a quantidade de símbolos alocados para DL e UL e a variação na taxa de transmissão no DL de acordo com o tipo de antena.

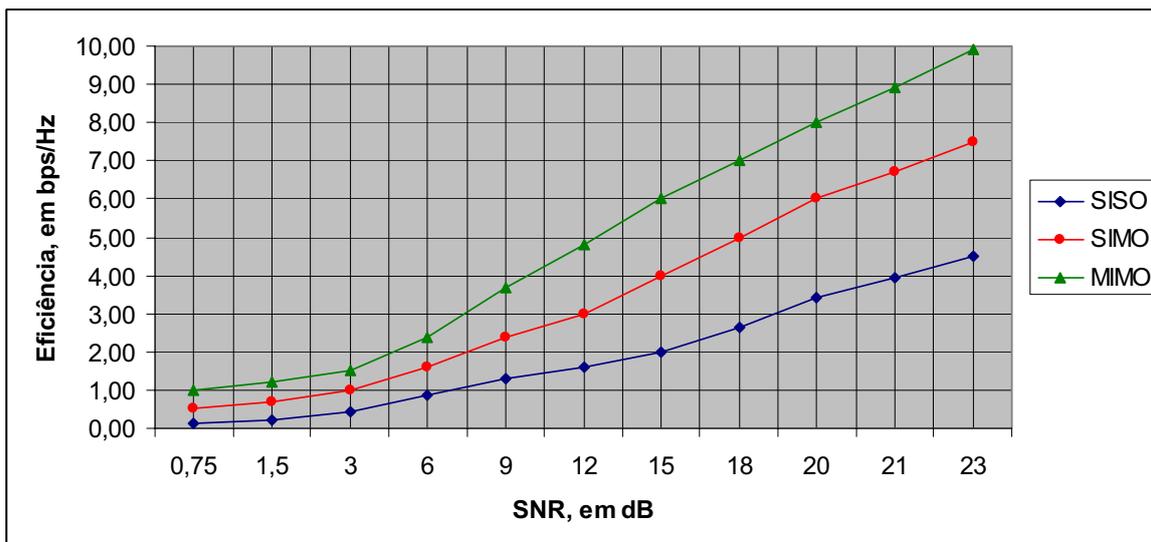


Figura 4.3: Eficiência espectral variando de acordo com o tipo de antena.

Tabela 4.1: Variação da eficiência espectral com a respectiva taxa de transmissão.

Modulação	CC	SNR	SISO		SIMO		MIMO	
			Taxa DL (Mbps)	Eficiência bits/Hz	Taxa DL (Mbps)	Eficiência bits/Hz	Taxa DL (Mbps)	Eficiência bits/Hz
QPSK	1/2 CTC, 6x	0,75	1,056	0,13	3,94	0,50	7,88	1,00
	1/2 CTC, 4x	1,5	1,584	0,20	5,51	0,70	9,45	1,20
	1/2 CTC, 2x	3	3,168	0,40	7,88	1,00	11,82	1,50
	1/2 CTC, 1x	6	6,336	0,80	15,75	2,00	18,90	2,40
	3/4 CTC	9	9,504	1,21	18,90	2,40	29,93	3,80
16 QAM	1/2 CTC	12	12,672	1,61	23,63	3,00	35,45	4,50
	3/4 CTC	15	15,00	2,00	31,51	4,00	48,05	6,10
64 QAM	1/2 CTC	18	19,08	2,41	39,38	5,00	63,01	8,00
	2/3 CTC	20	25,34	3,22	47,26	6,00	68,53	8,70
	3/4 CTC	21	28,51	3,62	52,77	6,70	70,10	8,90
	5/6 CTC	23	31,68	4,02	55,14	7,00	74,83	9,50

Tabela 4.2: Variação na relação UL e DL.

Modulação	DL:UL	SISO	SIMO	MIMO
		Taxa DL (Mbps)	Taxa DL (Mbps)	Taxa DL (Mbps)
64 QAM 5/6 CTC	1:0	31,68	55,14	74,83
	3:1	20,16	32,16	43,65
	1:1	13,68	21,83	29,62

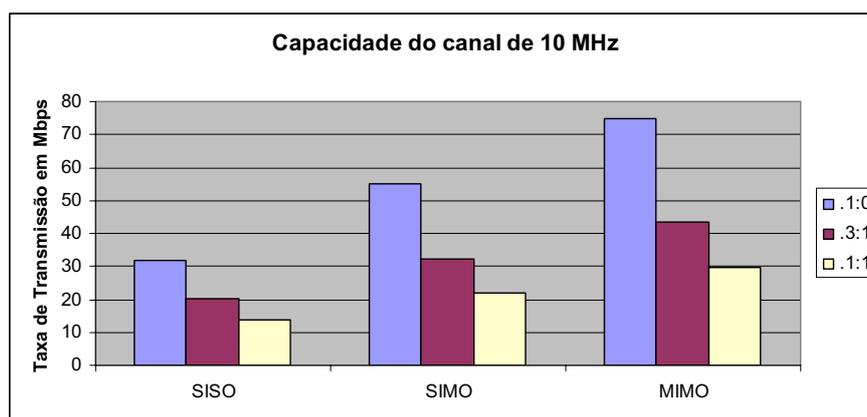


Figura 4.4: Variação da taxa de transmissão em função do tipo de antena.

4.2. Cálculo da quantidade de BS para implantação do WiMAX

Sabendo a capacidade máxima por cada tipo de antena, pode-se calcular o total de BTS necessárias em determinadas regiões. No capítulo 2, determinou-se a necessidade de taxa de transmissão por região. Neste capítulo, foi analisada a capacidade do canal de cada setor, obtendo assim a capacidade da BTS. Juntando esses dois dados, acha-se a quantidade de BTS necessárias para implantar a tecnologia WiMAX em determinada região, como mostrado na Tabela 4.3

Para a análise de diferentes tipos de antenas em diferentes tipos de ambientes, foram considerados quatro casos: sistema SISO em todas as regiões; sistema SIMO em todas as regiões; sistema MIMO em todas as regiões; sistema MIMO nas regiões densamente urbana e urbana, SIMO na suburbana e SISO na região rural.

Admitiu-se 3 setores em cada BTS, e o cálculo foi feito pela multiplicação da densidade de tráfego de certa região (Mbps/km^2) pela área da região (km^2) para se obter quantidade total em Mbps por região. A seguir multiplicou-se a capacidade de certo tipo de antena por 3 (3 setores) para calcular a capacidade total de uma BTS. A quantidade de BTS, Q_{BTS} , foi determinada pela equação:

$$Q_{BTS} = \frac{D_{região} \times A}{T_{DL} \times Q_{setor}} \quad (4.7)$$

em que $D_{região}$ é a densidade de tráfego por região, A é a área dessa região, T_{DL} é a capacidade de *download* da antena e Q_{setor} é a quantidade de setor por BTS. Para o caso 1,

a densidade de tráfego na região densamente urbana é de 4,4 Gbps ($21,04 \text{ Mbps/km}^2 \times 210 \text{ km}^2$) sendo que a capacidade de uma antena SISO nas condições mostradas (3DL:1UL) é de 20,16 Mbps. Ainda no caso 1, a BTS possui 3 setores cada um com uma antena SISO com capacidade total de DL de 60,48 Mbps. A partir dessas grandezas, encontra-se o total de 75 BTS para esse caso. A Fig.4.5 apresenta a quantidade de BTS necessária para cada situação considerada.

Tabela 4.3: Quantidade de BTS para os diferentes casos.

Tipo de Região	Número de usuários	Área	Tráfego Mbps/km ²	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4	
				SISO	75	SIMO	46	MIMO	34	MIMO	34
Densamente Urbana	116.920	210	21,5	SISO	75	SIMO	46	MIMO	34	MIMO	34
Urbana	113.603	645	6,8	SISO	66	SIMO	41	MIMO	31	MIMO	31
Suburbana	37.207	1.383	1,04	SISO	19	SIMO	12	MIMO	9	SIMO	12
Rural	15.597	3.551	0,12	SISO	7	SIMO	5	MIMO	3	SISO	7
Total	283.327	5.789	29,46		166	104		77		84	

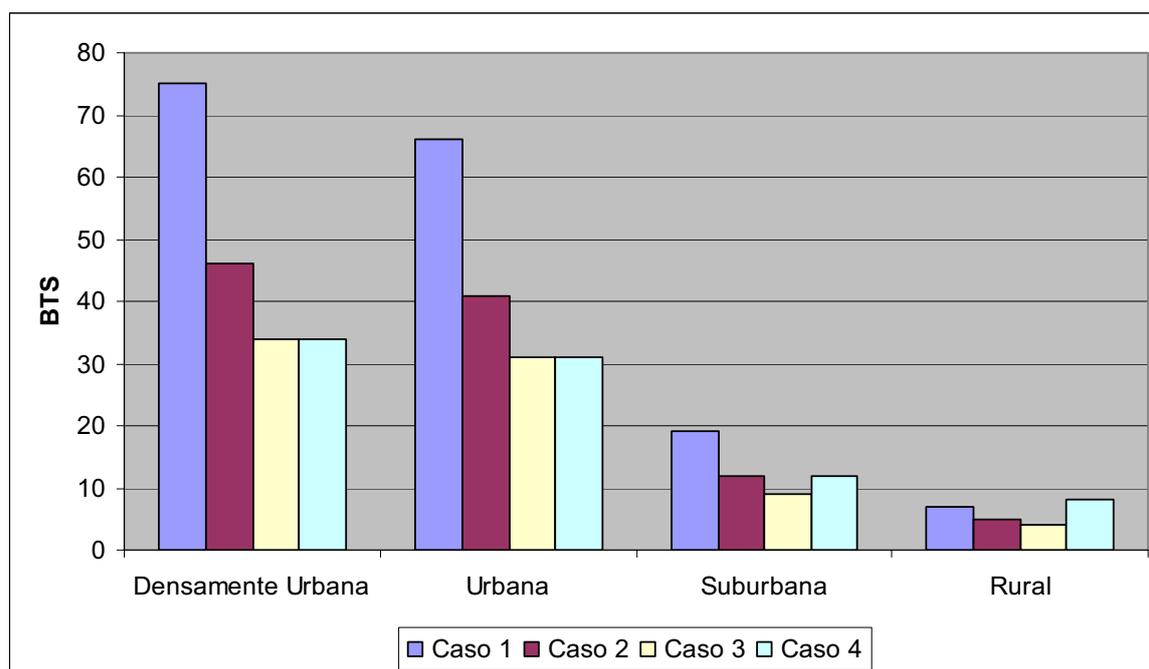


Figura 4.5: Quantidade de BTS por região.

Analisando a Tabela 4.3 e a Fig. 4.5, observa-se que a região densamente urbana é inteiramente coberta usando 75 BTS com antenas SISO. Esse número vai diminuindo de acordo com o avanço de tecnologia das antenas. Usando antenas SIMO o número de BTS

se reduz para 46 e, com MIMO, para 34. Nos 210 km² dessa região, a distância entre cada BTS fica em 2,08 km, usando SISO, e 3,09 km, usando MIMO, como mostra a Tabela 4.4. Com essas distâncias, os efeitos de desvanecimentos são mínimos.

Nas regiões suburbana e rural, esses efeitos podem influenciar na quantidade de BTS. A quantidade de BTS na área rural varia de 3, usando MIMO, à 7 usando SISO. Com isso, a distância entre as BTS varia de 27,95 km com SISO a 42,69 km com MIMO, Tabela 4.5.

Essa distância afeta a comunicação entre a BTS e o usuário. Até este capítulo foi analisada a demanda por usuários e a capacidade das antenas no cálculo da quantidade de BTS para implantação do WiMAX no DF. No capítulo seguinte, será analisada a propagação e suas consequências na cobertura e na quantidade de BTS por região.

Tabela 4.4: Raio e distância das BTS na região densamente urbana

Densamente urbano			
75 BTSs usando SISO		34 BTS usando MIMO	
Raio da BTS	Distância entre BTS	Raio da BTS	Distância entre BTS
1,04 km	2,08 km	1,54 km	3,09 km

Tabela 4.5: Raio e distância das BTS na região Rural

Rural			
7 BTSs usando SISO		3 BTS usando MIMO	
Raio da BTS	Distância entre BTS	Raio da BTS	Distância entre BTS
13,97 km	27,95 km	21,35 km	42,69 km

5. PROPAGAÇÃO DO SINAL

No capítulo anterior, estabeleceram-se os parâmetros para quantificar o total de BTS por região, em função da demanda por usuários, na forma relatada no capítulo 2. Um fator importante que deve ser considerado é a distância entre as BTS, devido à limitação de propagação. Esse problema será discutido neste capítulo através de um modelo de propagação que foi debatido no Wimax Fórum, o Walfisch-Ikegami modificado pelo COST 231.

5.1. Modelo de Propagação COST 231

Um modelo de propagação tem por objetivo simular a propagação da onda eletromagnética e surge a partir de algoritmos matemáticos gerados por meio de medidas ou comprovações físicas, considerando os seguintes parâmetros [25]:

- Difração devido a obstruções no percurso por obstáculos sob condições de propagação adversas;
- Desvanecimento devido ao efeito multipercurso atmosférico ou espalhamento de irradiação associado com camadas anormais de refração;
- Atenuação devido a gases atmosféricos;
- Desvanecimento (*fading*) devido ao efeito multipercurso resultante das reflexões das ondas em superfícies;
- Atenuação devido à chuva ou a partículas sólidas na atmosfera;
- Variação do ângulo de recepção no receptor e o ângulo de transmissão no transmissor devido a refração;
- Redução da discriminação de polarização cruzada em multipercurso ou em condições de precipitação;
- Distorção do sinal devido ao desvanecimento seletivo da frequência e atraso durante a propagação multipercurso.

Analisando esses efeitos, nota-se a complexidade e a dificuldade em se definir com precisão todas as características do meio de propagação e, assim, calcular as perdas de transmissão. Um dos modelos que aborda esses parâmetros e se adequa às principais

frequências do WiMAX é o Walfisch-Ikegami modificado pelo COST 231. Este modelo foi proposto pela COST (Cooperação Européia no Campo de Pesquisas Científicas e Tecnológicas), e se formou na combinação dos modelos de Walfisch e Ikegami. Segundo este modelo, a atenuação básica de propagação no espaço livre, para linha de visada direta e antenas isotrópicas é dada pela equação [37]:

$$L_0 = 32,4 + 20 \log d_{\text{km}} + 20 \log f_{\text{MHz}} \quad (5.1)$$

onde d é a distância entre o usuário e a BTS em km, e f é a frequência do rádio em MHz. Quando a propagação não ocorre em linha de visada direta, situação normalmente encontrada na maioria do tempo em sistemas móveis e será o padrão adotado neste trabalho, a atenuação básica é dada por três termos:

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad (5.2)$$

onde L_{rts} é devido à difração nos prédios e espalhamento do sinal, e L_{msd} está associado a multipercursos. O fator L_{rts} é dado pela equação:

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f_{\text{MHz}} + 20 \log \Delta h_{\text{usuário}} + L_{ori} \quad (5.3)$$

onde w é a largura média das ruas, em metros, e $\Delta h_{\text{usuário}} = h_{\text{prédio}} - h_{\text{usuário}}$, onde $h_{\text{prédio}}$ é a altura média dos prédios e $h_{\text{usuário}}$ é a altura da estação móvel. O fator L_{ori} é a atenuação provocada pela orientação da rua em relação ao raio diretivo, variando de acordo com o ângulo ϕ formado entre a orientação da rua onde se localiza a estação móvel e a onda incidente (graus), de acordo com as relações.

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\phi & 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,007(\phi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4 - 0,114(\phi - 55) & 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases} \quad (5.4)$$

O termo L_{msd} da equação (5.2) é dado pela equação:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d_{\text{km}} + k_f \log f_{\text{MHz}} - 9 \log b \quad (5.5)$$

em que b é a distância entre os edifícios, em metros, L_{bsh} e k_a são os coeficientes que representam o aumento das perdas no caminho devido à baixa altura da BTS, obtidos segundo as equações (5.6) e (5.7). Nessas equações, o fator $\Delta h_{BTS} = h_{BTS} - h_{\text{prédio}}$, h_{BTS} é a altura da BTS, $h_{\text{prédio}}$ é a altura dos prédios (m).

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{BTS}) & h_{BTS} > h_{\text{prédio}} \\ 0 & h_{BTS} \leq h_{\text{prédio}} \end{cases} \quad (5.6)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & d \geq 0,5\text{km} & e & h_{BTS} > h_{\text{prédio}} \\ 54 - 0,8\Delta h_{BTS} & d \geq 0,5\text{km} & e & h_{BTS} \leq h_{\text{prédio}} \\ 54 - 1,6\Delta h_{BTS}d & d < 0,5\text{km} & e & h_{BTS} \leq h_{\text{prédio}} \end{cases} \quad (5.7)$$

Em (5.5), os termos k_d e k_f representam, respectivamente, a perda da difração de multipercursos versus a distancia entre a BTS e o usuário e a frequência usada nos rádios, conforme as equações (5.8), (5.9) e (5.10).

$$k_d = \begin{cases} 18 & h_{BTS} > h_{\text{prédio}} \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_{BTS}}{h_{\text{prédio}}} & h_{BTS} \leq h_{\text{prédio}} \end{cases} \quad (5.8)$$

Nas zonas rurais e suburbanas com densidade moderada de árvores e em regiões densamente povoadas utilizam-se, respectivamente, as equações:

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f_{\text{MHz}}}{925} - 1 \right) \quad (5.9)$$

$$k_f = -4 + 1,5 \left(\frac{f_{\text{MHz}}}{925} - 1 \right) \quad (5.10)$$

Os principais parâmetros anteriormente descritos estão ilustrados na figura 5.1.

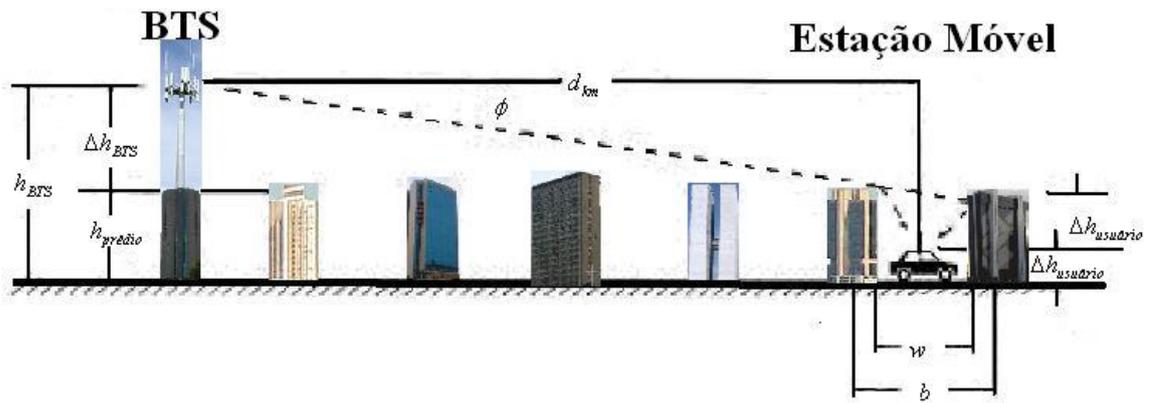


Figura 5.1: Parâmetros utilizados no modelo COST 231

5.2. Cálculo de cobertura

A potência do sinal na recepção é calculada pela seguinte equação:

$$P_r = P_t + G_t - L_b + G_r \quad (5.14)$$

onde P_r é a potência recebida, em dBm, P_t é a potência transmitida, G_t é o ganho da antena transmissora, L_b é a atenuação devido à propagação e G_r é o ganho da antena receptora. Os valores típicos para o sistema Wimax com aspectos topográficos de Brasília estão especificados na Tabela 5.1.

A partir desses parâmetros, pode-se determinar a variação da distância entre a BTS e a estação móvel e da potência recebida, P_r , usando o modelo COST 231. O resultado é mostrado na Figura 5.2.

Tabela 5.1: Parâmetros típicos para sistema WiMAX

Parâmetros	Valores
Frequência	2.500 MHz
Banda do canal	10 MHz
Potência máxima de transmissão na BTS - P_{IBTS}	40 dBm (10 W)
Potência máxima de transmissão na MS - usuário - P_{IMS}	23 dBm (200 mW)
Ganho da BTS - G_t	15 dBi
Ganho da MS - G_r	-1 dBi
Altura média das BTSs h_{BTS}	20 m
Altura média das MSs $h_{usuário}$	1,5 m
Altura média dos prédios $h_{prédio}$	18 m
Largura média das ruas w	10 m
Separação entre os edifícios b	60 m

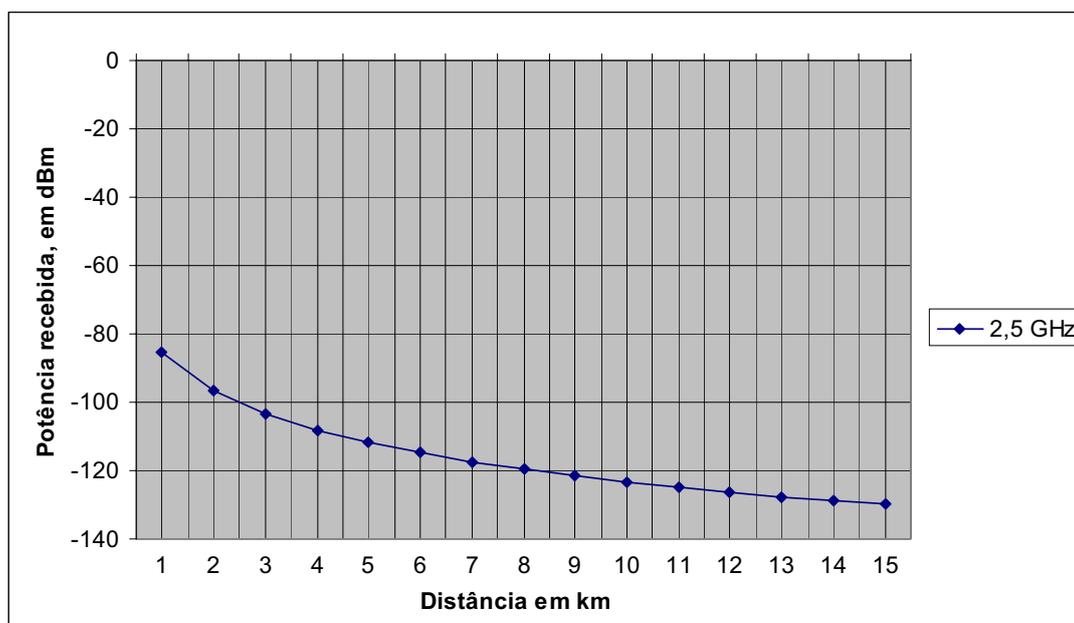


Figura 5.2: Potência recebida em relação à distância da BTS para os parâmetros da Tabela 5.1.

Os receptores móveis têm sensibilidade máxima em torno de -110 dBm a -120 dBm. Dessa forma, a distância máxima alcançada no WiMAX está entre 8 a 9 km. No capítulo anterior, concluiu-se que a demanda na zona rural seria atendida com 3 BTS, com raios de 21,3 km. A análise de propagação demonstra que, embora a quantidade de BTS seja suficiente para atender a demanda, não é para cobrir toda a área rural. Nas áreas suburbanas e rurais, o fator limitante é a área de cobertura. Diminuindo o raio de cobertura de 21,3 km para 8 km, a quantidade necessária de BTS aumenta para 22. Nas demais regiões os raios das BTS são inferiores a 8 km. Com isso, para cobrir todo o Distrito Federal serão necessários 96 BTS no caso 3 com o uso de antenas MIMO e 182 BTS no caso 1 com o uso de antenas SISO, como mostrado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Quantidade de BTS para os diferentes casos, incluindo estudo de propagação.

Tipo de Região	Número de usuários	Área	Tráfego Mbps/km ²	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4	
				SISO	MIMO	SISO	MIMO	SISO	MIMO	SISO	MIMO
Densamente Urbana	116.920	210	21,04	SISO	75	SIMO	46	MIMO	34	MIMO	34
Urbana	113.603	645	6,13	SISO	66	SIMO	41	MIMO	31	MIMO	31
Suburbana	37.207	1.383	0,83	SISO	19	SIMO	12	MIMO	9	SIMO	12
Rural	15.597	3.551	0,12	SISO	22	SIMO	22	MIMO	22	SISO	22
Total	283.327	5.789			182		121		96		99

5.3. Comparação entre as frequências de 2,5 GHz e 3,5 GHz

A ANATEL não definiu ainda qual a frequência que será utilizada na tecnologia WiMAX, portanto, será realizada uma comparação entre as duas frequências mais usadas no mundo, além de analisar a otimização na quantidade de BTS. Nos casos anteriores foi usada a frequência de 2,5 GHz, padrão empregado nos Estados Unidos e Ásia, totalizando 96 BTS; na Europa e América Latina, é usada a frequência de 3,5 GHz. A falta de padronização das frequências pode acarretar problemas em *roaming* entre operadoras nacionais e internacionais, perda de escala e interoperabilidade. Isso poderá ser resolvido se forem disponibilizados aos usuários aparelhos *triband* ou *quadriband*, como os

utilizados na tecnologia GSM. A Intel anunciou, em 18 de agosto de 2008, que lançará em 2009 um *chipset* WiMAX que suporta as frequências 2,3 GHz, 2,5 GHz e 3,5 GHz [7].

O sinal é atenuado mais rapidamente na frequência de 3,5 GHz do que em 2,5 GHz, em consequência, há variação no total de BTS, conforme mostra a Fig. 5.3.

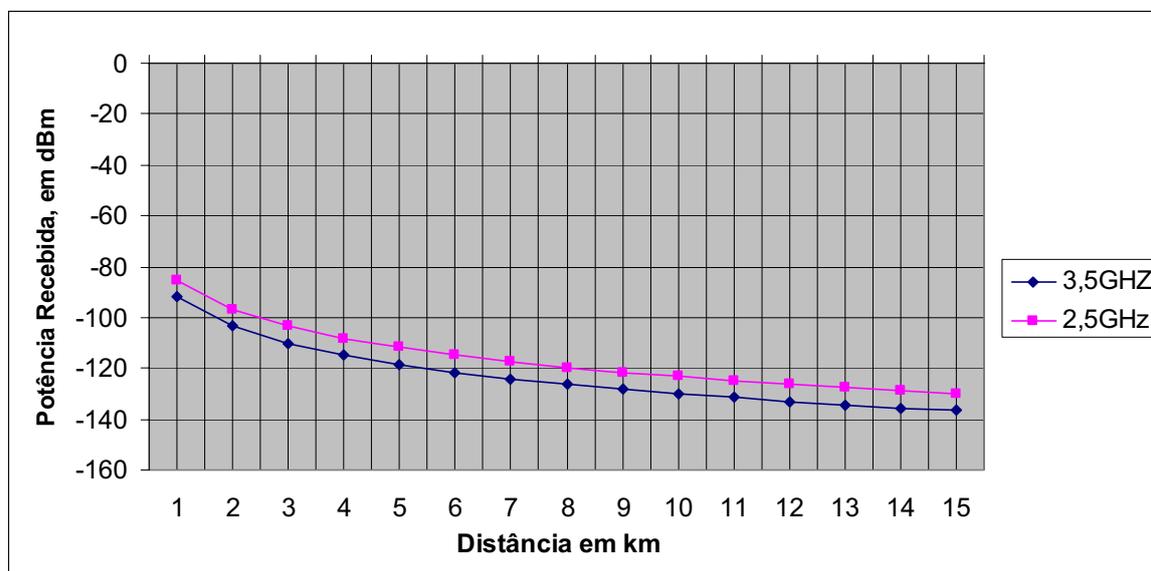


Figura 5.3: Potência recebida em função da distância para 2,5 e 3,5 GHz

Nota-se que, com a mudança de frequência de 2,5 GHz para 3,5 GHz, a distância máxima de propagação entre a BTS e a estação móvel diminuiu de 8 km para 5 km, a uma potência recebida de -120 dBm. Isso afeta a quantidade de BTS nas regiões rurais e suburbanas as quais irão precisar diminuir a distância entre si e, em consequência aumentar a quantidade em cada região.

Para 2,5GHz, segundo a análise anterior, o raio das BTS na região rural diminuiu de 21,3 km para 8 km. Se a frequência usada 3,5 GHz, o raio diminuiu de 21,3 km para 5 km. Neste caso, a quantidade de BTS aumenta de 22 para 55 BTS, cerca de 150%.

Na região suburbana, o raio das BTS diminuiu de 7,69 km para 5 km, e a quantidade aumenta de 9 para 22 BTS, como mostra Tabela 5.4. Com o uso de antenas SISO, o raio da BTS é igual a 5,3 km, próximo aos 5 km anterior, optando assim para seu uso em todos os 4 casos. Nota-se que, com o uso da frequência 2,5 GHz, não houve alteração na quantidade de BTS para essa região.

A ANATEL deverá usar essas análises na definição da melhor frequência para licitar o padrão WiMAX, caso tenha disponibilidade no espectro. As operadoras se puderem escolher a frequência, deverão optar por 2,5 GHz, a qual tem melhor propagação que 3,5

GHz, diminuindo em mais de 40% o total de BTS e reduzindo custos no final do projeto de implantação, conforme resumo na Tabela 5.5.

Tabela 5.4: Quantidade otimizada de BTS para atender todo o DF em 3,5 GHz.

Tipo de Região	Número de usuários	Área km ²	Tráfego Mbps/km ²	Quantidade de BTS	
Densamente Urbana	116.920	210	21,5	MIMO	34
Urbana	113.603	645	6,8	MIMO	31
Suburbana	37.207	1.383	1,04	SIMO	22
Rural	15.597	3.551	0,12	SISO	55
Total	283.327	5.789	29,46		142

Tabela 5.5: Quantidade de BTS para 2,5 GHz e 3,5 GHz.

Tipo de Região	Caso 1			Caso 2			Caso 3			Caso 4		
	Antena	2,5 GHz	3,5 GHz									
Densamente Urbana	SISO	75	75	SIMO	47	47	MIMO	34	34	MIMO	34	34
Urbana	SISO	66	66	SIMO	41	41	MIMO	31	31	MIMO	31	31
Suburbana	SISO	19	22	SIMO	12	22	MIMO	9	22	SIMO	12	22
Rural	SISO	22	55	SIMO	22	55	MIMO	22	55	SISO	22	55
Total	total	182	218	total	122	165	total	96	142	total	99	142

6. CONCLUSÕES

WiMAX é uma das tecnologias de telecomunicações que mais cresce no mercado mundial, mostrando-se inovadora ao agregar e ofertar diferentes tipos de serviços. Essa tecnologia permite, a usuários em mobilidade, acesso a serviços *triple play*, antes disponíveis apenas por meio de redes de comunicações fixas. A liberdade e a rapidez de utilização oferecidas pelo WiMAX representam facilidades aos usuários em mobilidade, que, cada vez mais, usam *laptops*, PDAs, celulares e outros dispositivos portáteis, dando origem, dessa maneira, a uma nova forma de comunicação.

Hoje, uma das possibilidades de se informar acerca das condições de trânsito é por meio de programas de TV ou rádio. Contudo, usando uma rede WiMAX, um usuário poderá utilizar um aparelho GPS para acessar informações de tráfego em tempo real, enquanto dirige, e calcular a melhor alternativa de rota para o seu deslocamento. A TV digital é outro serviço oferecido ao usuário com a possibilidade de utilização de canal de entretenimento interativo via sistema WiMAX.

Em relação a outras tecnologias de acesso banda larga, WiMAX oferece uma maior eficiência espectral e melhor qualidade de serviço, e conseqüentemente maior taxa de transmissão, com menor consumo de banda.

O WiMAX é um padrão *wireless* bastante robusto, com tendências a assumir o posto da quarta geração de comunicações móveis, agregando facilidades aos serviços e aparelhos IP tais como: VoIP, IPTV, *videostreaming*, entre outros serviços disponibilizados pela Internet, com a ampla vantagem da mobilidade.

Neste trabalho, estimou-se a demanda de acessos a uma eventual rede WiMAX considerando-se as diferentes regiões demográficas do Distrito Federal. A partir dessa estimativa, determinou-se o número de estações base necessárias para satisfazer os requisitos de capacidade e cobertura, caso essa rede fosse efetivamente implantada no DF.

De acordo com a densidade populacional, o DF foi dividido em regiões rural, suburbana, urbana e densamente urbana, utilizando-se os dados de habitantes por km² do IBGE. A demanda média de acesso por usuário em cada região foi calculada analisando-se o perfil do público alvo, que foi classificado em usuário profissional, tecnológico e casual.

Tendo como base o protocolo IEEE 802.16, que especifica a tecnologia WiMAX, realizou-se o cálculo da capacidade de uma BTS com antenas SISO usando portadoras ortogonais com variações nas modulações e codificações. A taxa de transmissão pode ser

otimizada com o aumento da capacidade das antenas, por meio dos sistemas SIMO e MIMO. Os dados da demanda por área foram usados para calcular a quantidade de BTS por região.

Nas regiões de alta densidade populacional, encontraram-se as menores distâncias entre as BTS, devido à elevada demanda. Nas regiões rural e suburbana, o tráfego por km² é reduzido, e o raio da BTS, em função da demanda, foi estimado em 21,35 km e 7,69 km, respectivamente. Nesse caso, a distância entre as BTS exigiu uma avaliação das limitações impostas pela propagação do sinal, que foi realizada usando-se o modelo COST 231. Considerando as características topográficas das regiões de menor densidade populacional, o raio da BTS limitou-se a 8 km para uma frequência de operação na faixa de 2,5 GHz e 5 km, em 3,5 GHz.

A quantidade de BTS foi recalculada nas regiões onde o tamanho do raio de cobertura ultrapassou a distância máxima imposta pela propagação do sinal. O número de BTS, em 2,5 GHz, aumentou de 3 para 22 na região rural. Na faixa de 3,5 GHz, essa quantidade aumentou, na região rural, de 22 para 55, e de 9 para 22, na região suburbana.

Em resumo, com base no desenvolvimento de diversos fatores que integram o padrão IEEE 802.16e, conclui-se que para implantar a tecnologia WiMAX em toda a área geográfica de 5.789 km² do Distrito Federal, serão necessárias, no mínimo, 96 estações rádio-base em 2,5 GHz e 142, em 3,5 GHz; esses valores aumentam para 182 e 218, respectivamente, de acordo com a configuração das antenas.

Como proposta de estudo para trabalhos futuros, recomenda-se incluir uma especificação mais detalhada do perfil do usuário, com inclusão de aplicações ponto a ponto (p2p). Indica-se também a análise do custo total de cada BTS, com a estimativa em relação à quantidade de rádios, tipos de antena e infraestrutura que possibilitem estabelecer os diversos tipos de configuração. Dependendo da complexidade do sistema radiante da BTS, sua cotação pode atingir valores consideráveis se comparadas a uma estação simples. Em uma região em que a quantidade de BTS com antenas MIMO esteja próxima a quantidade de BTS com antenas SISO, a segunda opção pode apresentar-se mais viável economicamente. Esse estudo comparativo pode auxiliar na redução de custo de projetos, principalmente em redes implantadas em nível nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Coutinho, M.; “WiMAX está maduro e pronto para acontecer”; Disponível em <<http://webinsider.uol.com.br/index.php/2007/04/11>>; acesso em 15 mai. 2007.
- [2] Ivo, P.; “Centros de pesquisa desenvolvem WiMax para usar com TV digital”; jornal O Estado de São Paulo; 08 de outubro de 2007.
- [3] WiMAX Forum - "Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks"; Novembro/2005, Senza Fili Consulting.
- [4] Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL; “Sistema de esclarecimentos”. Disponível em <<http://sistemas.anatel.gov.br/SAE/Edital/Esclarecimento>>; acesso em 25 jan. 2007.
- [5] Disponível em: <www.nokia.com>; acesso em 10 ago. 2008.
- [6] Ferrari, B.; “Chrysler terá carros com WiMax integrado”; 2008. Disponível em: <<http://info.abril.com.br/aberto/infonews/012008/15012008-11.shl>>; acesso em 18 ago. 2008.
- [7] WiMAX Forum; “Mobile WiMAX: The Best Personal Broadband Experience”; 2006. Disponível em <<http://www.wimaxforum.org>>; acesso em 25 jan. 2007.
- [8] Lemom S.; “Centrino 2 deve suportar WiMax em 2,3 GHz e 3,5 GHz até 2009”; Disponível em: <<http://cio.uol.com.br/tecnologia/2008/08/18/centrino2-deve-suportar-wimax-em-2-3-ghz-e-3-5-ghz-ate-2009/>>; acesso em 28 mar. 2009.
- [9] Choi B. K.; “Mobile in Korea: The WiMAX service”; KT Management Research, mar. 2008.
- [10] Lawson S.; “Sprint Nextel anuncia criação de rede 4G baseada em WiMAX”; Disponível em <http://www.fndc.org.br/internas.php?p=noticias&cont_key=81880>; acesso em 8 mai. 2007.
- [11] Disponível em: <<http://www.revistafatorbrasil.com.br>>; acesso em 13 abr. 2007.
- [12] Agência nacional de Telecomunicações – ANATEL; “Portal de notícias”; Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNoticias>>; acesso em 16 ago. 2008.
- [13] Disponível em: <<http://www.neovia.com.br>>; acesso 12 mar. 2008.
- [14] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. “Dados do censo demográfico 2000”, Brasília: IBGE, 2001. Disponível em: <www.ibge.gov.br>; acesso em 30 jul. 2007.

- [15] GRAY, D.; “A Comparative Analysis of Mobile WiMAX Deployment Alternatives in the Access Network”; May, 2007. Disponível em: <www.wimaxforum.org>; acesso em 09 jun. 2007.
- [16] Disponível em <<http://www.sembrasil.com.br/noticias>>; acesso em 15 jun. 2008.
- [17] WiMax Fórum; “Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation”. Disponível em: <www.wimaxforum.org>; acesso em 17 mar. 2007.
- [18] Prado, E.; “WiMAX em Bancos”; WirelessBR. 2004. Disponível em: <http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/eduardo_prado/artigo_40.html>; acesso em 25 fev. 2007.
- [19] Marks, R. B.; “The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless”; IEEE Network, Volume 13, Issue 2, 1999.
- [20] Chang, D. S. K.; “IEEE 802.16 Technical Backgrounder”. Disponível em: <<http://ieee802.org/16>>; acesso em 25 mar. 2007.
- [21] Kevin, F. R. S.; “The Road to Broadband Wireless”, Redline Communications, Jul. 2004. Disponível em: <<http://www.redlinecommunications.com>>; acesso em 24 mar. 2007.
- [22] Porter, J.W. and Thweatt, J.A.; “Microwave Propagation Characteristics in the MMDS Frequency Band”; IEEE International Conference on Communications, Volume 3. 2000
- [23] IEEE; “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems”, IEEE Standard, 801.16 , 2004.
- [24] Peled, A. and Ruiz, A.; “Frequency Domain Data Transmission Using Reduced Computational Complexity Algorithms,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP’80), 1980.
- [25] Rappaport T. S.; “Wireless Communications: Principles and Practice”, Prentice Hall, 2001.
- [26] Harada, H. and Prasad, R.; “Simulation and Software Radio for Mobile Communication”, Boston: Artech House, 2002.
- [27] Keller, T. and Hanzo, L.; “Adaptive Modulation Techniques for Duplex OFDM Transmission,” IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 49, no. 5. September, 2000.

- [28] Foschini, G. J. e Gans, M. J.; “On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas”, *Wireless Personal Communications*, vol. 6, March 1998.
- [29] Yang, H.; “A Road to Future Broadband Wireless Access: MIMO-OFDM-Based Air Interface”, *IEEE Communications Magazine*, volume 43, issue 1, jan. 2005.
- [30] Trepkowski, R.; “Channel Estimation Strategies for Coded MIMO Systems”, M.S. Thesis.- Virginia Polytechnic Institute and State University. 2004.
- [31] Foschini, G. J. and Gans, M.J.; “On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas.”; *Wireless Personal Communications*. Publisher: Kluwer Academic Publishers, Netherlands, vol.6, no.3,pp.311-335, Mar. 1998.
- [32] Lacerda Neto, R. L.; “Receptores MIMO Baseados em Algoritmos de Decomposição” Fortaleza, 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Teleinformática – Universidade Federal do Ceará.
- [33] Gesbert, D., and Akhtar, J.; “Breaking the barriers of Shannon’s capacity: An overview of MIMO wireless systems,” *Teletronikk Telenor Journal*. Jan. 2002;
- [34] Proakis, J.G.; “Digital communications.”; 4th. Ed., Mc Graw Hill, 2000.
- [35] Gesbert, D.; Shafl, M.; Da-Sahn Shiu; Smith, P.J.; “From Theory to Practice: an Overview of MIMO Space-Time Codec Wireless System.” *IEEE Journal on Slected Areas in Communications*, vol. 21, issue 3. April 2003.
- [36] Telatar, E. “Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*,”; nov. 1999.
- [37] Sarkar, T. K.; Wicks, M. C.; Bonneau, R. J., “Smart Antennas”; New York: John Wiley & Sons, 2003.