

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Dimensionamento de Redes WiMax 700 MHz

**Andressa Borges Ribeiro
Carlos Renato Kusumoto Souza**

Brasília, dezembro de 2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO
Dimensionamento de Redes WiMax 700 MHz

Andressa Borges Ribeiro
Carlos Renato Kusumoto Souza

Relatório submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica
como requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro de Redes de Comunicação

Banca Examinadora

Prof. Dr. Lúcio Martins da Silva, ENE/UnB
(Orientador)

Prof. Dr. Antonio José Martins Soares,
ENE/UnB
(Membro Interno)

Prof. Dr. Leonardo R.A.X Menezes, ENE/UnB
(Membro Interno)

FICHA CATALOGRÁFICA

RIBEIRO, A. B.. SOUZA, C. R. K.
Dimensionamento de Redes WiMax 700 MHz
[Distrito Federal] 2009.
v, 40p. (ENE/FT/UnB, Engenheiro de Redes de Comunicação, 2009)
Monografia de Graduação - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Elétrica.

1. WiMax	2. Demanda
3. Tecnologias aplicadas ao WiMax	4. Propagação
I. ENE/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RIBEIRO, A. B. e SOUZA, C. R. K. (2009). Dimensionamento de Redes WiMax 700 MHz Monografia de Graduação, Publicação ENE 02/2009, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 40p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOMES DOS AUTORES: Andressa Borges Ribeiro e Carlos Renato Kusumoto Souza.

TÍTULO: Dimensionamento de Redes WiMax 700 MHz

GRAU / ANO: Engenheiro de Redes de Comunicação / 2009.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

Andressa Borges Ribeiro

Carlos Renato Kusumoto Souza

Agradecimentos

Agradeço somente a Deus. A Deus, por me proporcionar um lar tão especial repleto de carinho e amor; pais maravilhosos que sempre me apoiaram e lutaram ao meu lado; e meu irmão que sempre esteve disposto a me ouvir e me incentivar. A Deus, por me proporcionar estes anos de estudo com os melhores professores, que me orientaram e ensinaram, ajudando a formar a pessoa que sou hoje. A Deus por me apresentar a uma outra família, os grandes e melhores amigos que conquistei e espero levá-los no coração por toda minha vida. Obrigada, Senhor.

Andressa Borges Ribeiro

Agradeço primeiramente a Deus. Às duas jóias presentes em minha vida, Ana e Carlos, meus pais. Ao meu irmão. Ao nosso professor e orientador que nos guiou neste trabalho. Aos meus bons e queridos amigos.

Carlos Renato Kusumoto Souza

A mobilidade para acesso aos diversos serviços de dados, vídeo e voz tornou-se necessidade real no contexto atual. Esses serviços demandam cada vez mais taxa de transmissão e desenvolvimento de tecnologias que sejam capazes de dar vazão a esses tráfegos requeridos. Além disso, cobrir áreas distantes de centros urbanos, ou de difícil acesso, ganha importância no que tange à inclusão digital.

Características como eficiência espectral, alta taxa de transmissão e maior raio de cobertura, evidenciam o WiMax como tecnologia factível neste escopo.

O objetivo deste projeto é estimar a demanda de acessos e número de estações rádio-base, BTS, de uma rede WiMax 700 MHz, portanto, operando em frequência inferior as de WiMax convencionais de 2,5 GHz e 3,5 GHz, visando seu emprego como canal de interatividade para a TV Digital. Então, o dimensionamento será feito escolhendo-se quatro cidades do Distrito Federal com características distintas e levando-se em consideração também: densidade populacional, perfil de usuário, chegando-se a uma demanda média para cada cidade.

O número de BTS será calculado com base nessa demanda e, posteriormente, a mesma estimativa será feita analisando-se os efeitos da propagação. Para esta parte, o modelo de propagação COST231 será utilizado.

Em um outro momento, a rede dimensionada para o WiMAX 700 MHz será comparada à rede dimensionada para o perfil de 2,5 GHz, então será possível uma análise do desempenho dos dois perfis frente à demanda e à propagação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	WIMAX FORUM	2
1.2	APLICAÇÕES WIMAX	2
1.3	WIMAX NO BRASIL	3
1.4	WIMAX 700 MHZ COMO CANAL DE INTERATIVIDADE DA TV DIGITAL	4
2	CÁLCULO DA DEMANDA	7
2.1	CLASSIFICAÇÃO DAS REGIÕES DEMOGRÁFICAS	8
2.2	DADOS SOBRE A POPULAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL	9
2.3	AFUNILAMENTO DA QUANTIDADE REAL DE USUÁRIOS	11
2.3.1	DETERMINAÇÃO DA FAIXA ETÁRIA DO PÚBLICO ALVO	12
2.3.2	PENETRAÇÃO DE MERCADO DA OPERADORA	12
2.3.3	MOBILIDADE DA POPULAÇÃO	12
2.4	CARACTERIZAÇÃO DO USUÁRIO	13
2.4.1	PERFIS DE USUÁRIOS	13
2.4.2	ANÁLISE DO ACESSO À REDE	14
2.5	DENSIDADE DE TRÁFEGO POR REGIÃO	16
3	TECNOLOGIAS APLICADAS AO WIMAX	17
3.1	OFDM	18
3.2	OFDMA	19
3.2.1	SCALABLE OFDMA (S-OFDMA)	20
3.3	TDD - TIME DIVISION DUPLEX	20
3.4	MODULAÇÕES SUPORTADAS	21
3.4.1	PSK	22
3.4.2	QAM	23
3.5	TAXAS DE TRANSMISSÃO WIMAX 700 MHZ	24
4	ESTUDO DA PROPAGAÇÃO	27
4.1	PROPAGAÇÃO WIRELESS	27
4.2	PROPAGAÇÃO PELO MODELO COST 231 WALFISCH-IKEGAMI	29
4.2.1	PARÂMETROS DO MODELO	30
4.3	RAIO DE COBERTURA	32
4.4	CRUZAMENTO DE DADOS	34
4.5	EFICIÊNCIA ESPECTRAL	36
5	CONCLUSÃO	37
5.1	TRABALHOS FUTUROS	38
	REFERÊNCIAS	39

LISTA DE FIGURAS

1.1	WiMax Forum.....	2
1.2	Bandas de frequências de produtos WiMax pelo mundo	3
1.3	WiMax em Parintins	4
1.4	Possibilidades de Canal de Retorno.....	5
2.1	Regiões administrativas do Distrito Federal	9
3.1	Arquitetura de um Sistema OFDM.....	18
3.2	Comparação entre as técnicas FDM e OFDM.....	19
3.3	Esquema do prefixo cíclico no símbolo OFDM.....	19
3.4	Estrutura OFDMA de subportadoras	20
3.5	Estrutura de quadro OFDM com implementação TDD	21
3.6	Raio de alcance para diferentes modulações.....	22
3.7	Modulação BPSK	22
3.8	Modulação QPSK	23
3.9	Modulação 16-QAM.....	23
3.10	Diagrama de fase e quadratura da modulação 64-QAM	24
4.1	Panorama da propagação wireless.....	27
4.2	As três escalas para variação do sinal em um receptor móvel	28
4.3	Sinal resultante e detalhes do sinal.....	29
4.4	Modelo de canal seletivo em frequência e variante no tempo	29
4.5	Situação típica de propagação e definição dos parâmetros para o COST231-WI.....	30
4.6	Ângulo ϕ formado pela orientação da rua com a onda incidente	31
4.7	Gráfico Distância x Potência recebida.....	33
4.8	Gráfico Distância x Potência recebida.....	34
4.9	Número de BTS na faixa de 700 MHz e 2,5 GHz	36

LISTA DE TABELAS

2.1	Regiões densamente urbanas do Distrito Federal.....	10
2.2	Regiões urbanas do Distrito Federal.....	10
2.3	Regiões suburbanas do Distrito Federal.....	11
2.4	Regiões rurais do Distrito Federal.....	11
2.5	Regiões administrativas que irão representar cada região demográfica típica.....	11
2.6	Filtro da população baseado na faixa etária.....	12
2.7	Filtro da população baseado na penetração de mercado.....	13
2.8	Número de usuários considerando a mobilidade nos horários comerciais.....	13
2.9	Estimativa de tráfego no PBH.....	15
2.10	Demanda de tráfego por região.....	16
3.1	Parâmetros de escalabilidade OFDMA.....	20
3.2	Parâmetros WiMax 700 MHz para canais de 6 MHz e 12 MHz.....	25
3.3	Taxas de transmissão para WiMax 700 MHz.....	26
3.4	Quantidade de BTS necessárias considerando melhor taxa de transmissão.....	26
3.5	Quantidade de BTS necessárias considerando pior taxa de transmissão.....	26
4.1	Argumentos para o COST231 no Distrito Federal.....	33
4.2	Área de cobertura para cada faixa de frequência de utilização do WiMAX.....	34
4.3	Número de BTS de acordo com a propagação do sinal.....	34
4.4	Número de BTS cruzando dados de propagação e demanda.....	35
4.5	Comparativo da eficiência espectral.....	36

Siglas

ADSL	Assymmetric Digital Subscriber Line
ARQ	Automatic Repeat reQuest
ASN	Access Service Network
BTS	Base Transceiver Station
CCI	Co-Channel Interference
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix
DL	Downlink
DVB	Digital Video Broadcast
FCH	Frame Control Header
FDD	Frequency Division Duplex
FFT	Fast Fourier Transform
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HO	Hand-Off or Hand Over
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ISI	Inter-Symbol Interference
LOS	Line of Sight
MAC	Media Access Control
MS	Mobile Station
NLOS	Non Line-of-Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PBH	Peak Busy Hour
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SS	Subscriber Station
TDD	Time Division Duplex
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telephone System
VoIP	Voice over Internet Protocol
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

1 INTRODUÇÃO

O número de pessoas que acessam a Internet cresceu expressivamente nas últimas décadas. A Internet tem sido cada vez mais indispensável no dia a dia, tanto em casa, no trabalho, nas escolas e em outros pontos de acesso.

Todavia, nos últimos anos, é observada a necessidade de mobilidade para o acesso à Internet. O que antes era feito de lugares fixos (casa, escritório), hoje, existe demanda de acesso em engarrafamentos, restaurantes, ou enquanto se espera no aeroporto, por exemplo.

Para tanto, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que dêem suporte a essa demanda. Elas precisam ser desenvolvidas de forma que forneçam qualidade, velocidade e confiabilidade similares aos serviços antes prestados pelas redes de comunicações fixas.

Para prover convergência entre campo da comunicação sem fio e altas taxas de transmissão, aparecem as soluções WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access), considerado a quarta geração de celulares. Ele foi desenvolvido tendo em vista os serviços de dados, sendo voz uma de suas várias possibilidades de aplicação em ambiente IP.

A tecnologia WiMax apresenta diversas vantagens em relação à tecnologia Wi-Fi, dentre elas, taxa que pode chegar a 75 Mbps por canal, cobertura de maiores distâncias entre a estação base e a estação móvel e, principalmente, restrição reduzida quanto à mobilidade dessa. Pode oferecer não apenas acesso banda larga tomando espaço da ADSL, mas também diversos serviços de transmissão de dados como voz sobre IP, downloads e uploads, acesso à TV digital, videoconferência, entre outros muito visados pelo mercado.

O Laboratório de Processamento Digital de Sinais de Multimídia em Tempo Real da Unicamp e o Instituto Eldorado estudam a viabilidade do WiMax 700 MHz como canal de retorno da TV digital e também de transmissão em alta velocidade[1]. O WiMax operando em 700 MHz tem desempenho otimizado em relação à propagação do sinal e custo minimizado para a implementação da rede.

Atualmente, o WiMax atende 430 milhões de pessoas em 135 países. Segundo projeções do WiMax Forum, a cobertura desta tecnologia deve dobrar com a obtenção de novas licenças de espectro que devem acontecer em países como Brasil e Índia, entre outros. Acredita-se que, até o final do ano de 2010, 800 milhões de pessoas em todo o mundo acessarão a internet em alta velocidade utilizando a tecnologia WiMax [2].

1.1 WIMAX FORUM

Empresas fabricantes de equipamentos e componentes formaram uma organização com objetivo de promover a utilização de redes multiponto, com operação nas faixas entre 2 GHz e 11GHz, consolidando como padrão o IEEE 802.16. Tal organização, que visa estabelecer as diretrizes do WiMax, é denominada WiMax Fórum. O certificado WiMax é fornecido a um fabricante se o produto seguir a norma e garantir a interoperabilidade com os outros equipamentos certificados. Dentre seus membros, pode-se destacar: Samsung, Intel, AT&T e Motorola, Figura 1.1.



Figura 1.1: WiMax Forum

1.2 APLICAÇÕES WIMAX

No escopo das aplicações possíveis para o WiMax, pode-se citar:

- Redes municipais e privadas: acesso a serviços de banda larga;
- Acesso a última milha;
- Utilização do 802.16 em backbones celulares;
- Redes com mobilidade: serviços de informação em tempo real e banda larga em um veículo, por exemplo;
- Voip: voz transmitida sobre rede IP a um baixo custo.

Pelo mundo, as faixas comumente adotadas são as 2,5 GHz, 2,7 GHz, 3,5 GHz e 5,8 GHz, Figura 1.2, oferecendo-se 30 MHz a cada operadora. As faixas de frequências usualmente usadas no Brasil para o WiMax são as de 2,5 GHz e 3,5 GHz. Embratel, Brasil Telecom, Neovia e WKVE são exemplos de empresas que adquiriram blocos de frequência na faixa de 3,5 GHz.

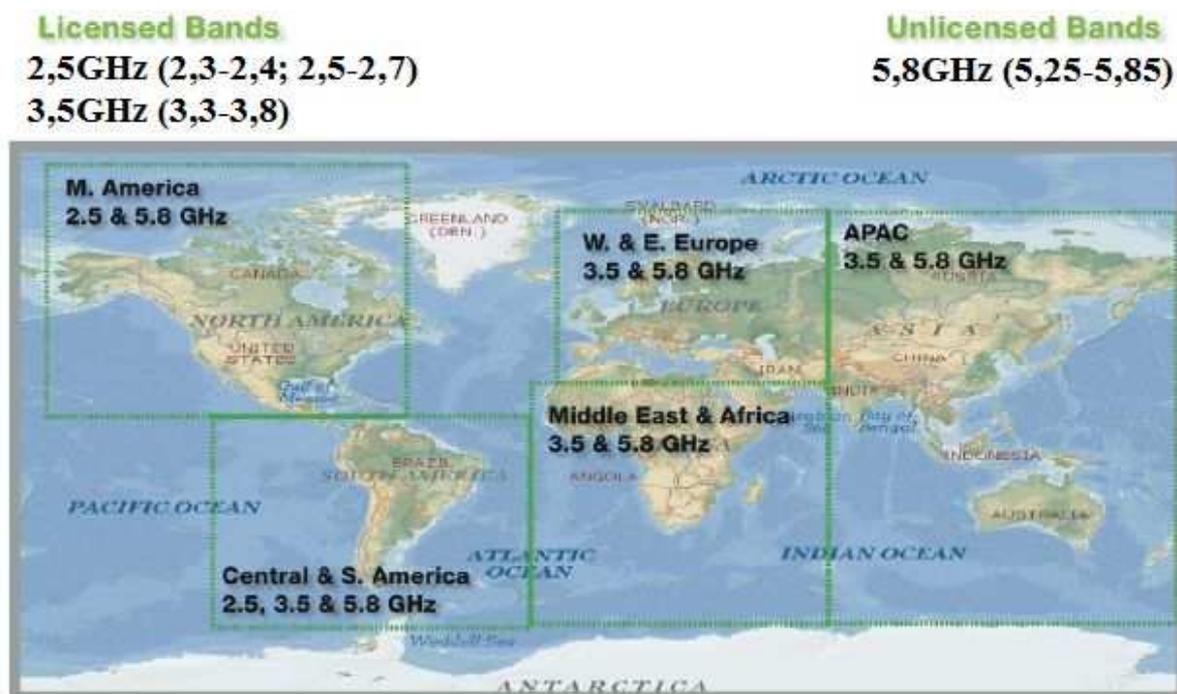


Figura 1.2: Bandas de frequências de produtos WiMax pelo mundo [3]

1.3 WIMAX NO BRASIL

Devido ao relevo acidentado e às restrições a intervenção local, pelo fato de ser considerada patrimônio histórico brasileiro, a cidade de Ouro Preto optou pelo WiMax como projeto da Intel, RNP e Mec, visando interligar instituições de ensino na faixa de operação de 3,5 GHz. Embora se esperasse uma taxa de 75 Mbps, obteve-se a taxa efetiva de 14 Mbps. Essa diferença pode ser explicada pelos diversos fatores que interferem na taxa de transmissão, como a distância, linha de visada, equipamentos, etc. Outro projeto que utiliza WiMax, que pode ser ressaltado, é o World Ahead da Intel que visa o acesso à tecnologia, favorecendo a inclusão digital de pessoas moradores de lugares mais remotos. Uma rede WiMax, em Parintins - AM, cobre uma região de 48 quilômetros, abrangendo 114 mil moradores da cidade. Interliga um centro de saúde, duas escolas públicas, um centro comunitário e a Universidade da Amazônia, Figura

1.3.



Figura 1.3: WiMax em Parintins
[4]

A Embratel, operadora autorizada a operar na faixa de 3,5 GHz pela Anatel, também oferece serviço WiMax no Brasil. O projeto teve investimento inicial de 175 milhões de reais, e dentre as cidades atendidas, podem-se destacar: Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Fortaleza, Goiânia, Recife, Rio de Janeiro, Salvador, São Luís e São Paulo. Tal investimento pode alcançar a quantia de 600 milhões. Este projeto oferece conexão de 1 Mbps e telefone[5].

1.4 WIMAX 700 MHZ COMO CANAL DE INTERATIVIDADE DA TV DIGITAL

O programa do Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD), baseado no padrão japonês ISDB (Integrated System Digital Broadcasting), foi lançado pelo decreto presidencial No. 4.901, em 26 de novembro de 2003, mas somente em dezembro de 2007, as transmissões comerciais com padrão SBTVD iniciaram-se. Dentre alguns aspectos do decreto que se buscava oferecer, pode-se ressaltar[6]:

- Inclusão digital;
- E-gov: levar serviços públicos para mais próximo da população;
- Disseminação cultural;
- Integração social;

- Criação de rede universal de educação à distância.

Logo, para haver tais aplicações, o SBTVD foi concebido como um sistema interativo, capaz de solicitar e receber informações da emissora de televisão e/ou internet. Essas informações podem ser desde programação, sinopse de filmes, meteorologia quanto transações bancárias, compras, cotação monetária, etc. Para que exista essa interatividade, faz-se necessária a comunicação de dados dos aparelhos set-top boxes (conversores digitais) para o transmissor do sinal broadcast de TVD. O sistema que torna isso possível denomina-se canal de retorno, Figura 1.4. No Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre, SBTVD-T, o canal de retorno é full duplex e tem como candidatos: Wi-Fi, ADSL, WiMAX, entre outros.

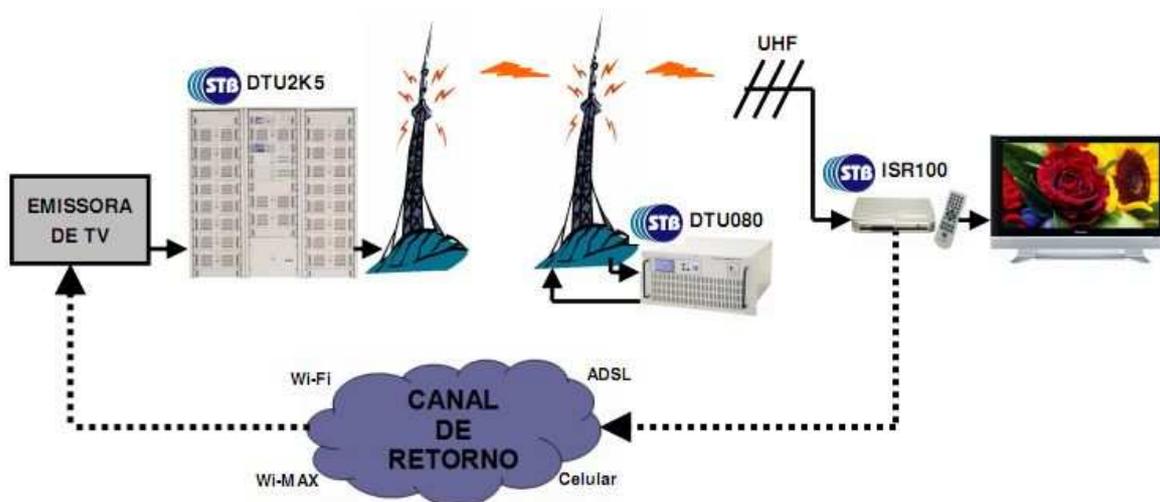


Figura 1.4: Possibilidades de Canal de Retorno [7]

Nesse contexto, o WiMAX 700 MHz surge como tecnologia capaz de desempenhar este papel de canal de interatividade, cobrindo a banda de 400 MHz a 900 MHz - canais de TV UHF - e 54 MHz a 400 MHz - VHF - oferecendo alta taxa de bits aos usuários, além de poder oferecer acesso à Internet.

O objetivo deste trabalho é, portanto, o dimensionamento de redes WiMAX 700 MHz, tenha-se em consideração sua possibilidade de canal de retorno para a TVD, bem como sua viabilidade frente aos perfis mais utilizados de 2,5 GHz e 3,5 GHz. Entre as motivações que nos auxiliaram na escolha desse perfil, pode-se mencionar [8]:

- Alcance de até 65 km, bastante atraente para o uso em áreas de baixa densidade populacional, reduzindo os gastos com capital;
- Penetração indoor melhor em 700 MHz que em frequências superiores, uma vez que essa característica é prejudicada com o aumento da frequência;

- O perfil 700 MHz necessita de aproximadamente 10% do número de BTS necessárias para a cobertura de uma dada região no perfil de 3,5 GHz;
- O sistema atua harmonicamente com padrões de TVD, e é compatível com ISDB internacional. Suportando as mesmas modulações, sistema de transmissão e duplexação, por exemplo.

2 CÁLCULO DA DEMANDA

Uma rede sem fio tem o objetivo principal de atingir cobertura de uma determinada área que se deseja prover um serviço. Para o cálculo dessa cobertura são necessários inúmeros dados, tanto da região quanto da população. Informações sobre a região abrangem, por exemplo, tipo de relevo, densidade e quantidade de construções, altura média dos edifícios, índice pluviométrico, condições atmosféricas, entre outros fatores que podem afetar a propagação do sinal. Outro ponto importante é manter a robustez da comunicação para usuários sem linha de visada, como usuários em um veículo, por exemplo.

Sabemos como as tecnologias avançam rápido nos dias de hoje. Aumentam principalmente as taxas de transmissão de dados devido ao também crescente número de serviços oferecidos. As operadoras de celulares costumavam projetar suas redes para coberturas oferecendo apenas serviços de voz, o qual requer pouca capacidade de transmissão. Projeções afirmam que até 2015, já haverá mais aparelhos celulares que habitantes no Brasil, o que já é realidade em Brasília e Ribeirão Preto desde 2004. No cenário mundial, o número de usuários ultrapassará 3 bilhões num contexto de 7,2 bilhões de habitantes[9].

Assim como ao passar do tempo aumenta a demanda por serviços e taxa de transmissão, surgem também novas tecnologias que prometem melhorar a eficiência da transmissão de dados e qualidade do serviço. Esse é o caso do WiMax móvel que oferece uma alta taxa para serviços banda larga garantindo qualidade de serviço (QoS). Para cálculo de demanda de uma certa região, é necessário estabelecer determinados parâmetros da dada região, como demanda por usuário, penetração de mercado etc. O planejamento bem feito de uma rede irá garantir que quando o sistema estiver em seu máximo uso, ele consiga desempenhar a qualidade de serviço e taxa mínima prevista. É ainda necessário prever o crescimento da população e o nascimento de grandes centros de trabalho, como é o caso, por exemplo, da Cidade Digital.

A definição desses parâmetros é a finalidade desse capítulo. A partir de várias referências encontradas, será construído um cenário com esses parâmetros. A partir desse cenário, será possível calcular uma demanda, em kbps, para cada região do Distrito Federal. As áreas do DF serão classificadas em região rural, suburbana, urbana e densamente urbana. Cada uma dessas regiões será caracterizada no início desse capítulo e então poderemos passar a análise do público alvo em cada região. Como as regiões não são contínuas, ou seja, não são necessariamente vizinhas, o cálculo será feito apenas para um exemplo de cada tipo de região. Depois de feito a primeira vez, o cálculo poderá ser repetido para outras cidades usando o mesmo algoritmo.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS REGIÕES DEMOGRÁFICAS

Normalmente uma grande área urbanizada é formada por um centro superpopuloso e por cidade adjacentes que dão suporte ao grande centro. Esse também é o caso do DF, entretanto, com o crescimento acentuado característico, é possível destacar mais de um centro superpopuloso. Primeiramente, será feita uma descrição das características das regiões demográficas típicas[10].

– **Densamente urbana**

Localidades com essa característica estão nos centros das cidades, sendo composto por muitos estabelecimentos comerciais e também unidades residenciais (edifícios e casas). Pode apresentar um núcleo isolado de área verde, como é o caso do Central Park, em Nova York e do Parque da cidade, em Brasília. Áreas densamente urbana possuem uma densidade igual ou superior a 3.000 habitantes por km^2 , mas esse número pode aumentar bastante se analisarmos o condado de Manhattan que chega a quase 28.000 hab/ km^2 [11]. Essas regiões apresentam a maior dificuldade de propagação do sinal.

– **Urbana**

Essas localidades ficam bem próximas aos centros urbanos, geralmente com elevada densidade residencial e alguma concentração empresarial. A altura das construções é mediana, caracterizando também uma grande dificuldade para a propagação do sinal. A densidade populacional está entre 800 e 3.000 hab/ km^2 .

– **Suburbana**

Áreas suburbanas são essencialmente residenciais e composta essencialmente por casas, ou seja, a altura das construções são bem baixas, não oferecendo grandes desafios à propagação do sinal, comparando com as regiões caracterizadas acima. Têm densidade populacional entre 150 e 800 hab/ km^2 .

– **Rural**

Essas regiões são aquelas com densidade populacional bem baixa, formada principalmente por fazendas, sítios e chácaras afastadas das regiões metropolitanas. Contudo, também podem ser adicionados nessa classificação aqueles núcleos isolados de lagos, parques ou áreas verdes dentro das regiões densamente urbanas.

2.2 DADOS SOBRE A POPULAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL

O Distrito Federal é um caso atípico que apresenta sua estrutura sub-dividida em 28 regiões administrativas, como mostra a Figura 2.1 . Possui uma densidade populacional média de 443 hab/km², o que o coloca em 1^o no ranking dentre todas as unidades federativas do Brasil e segundo as projeções para 2010 do IBGE, alcançará 2.385.230 habitantes ocupando uma região total de aproximadamente 5.789,13 km².



Figura 2.1: Regiões administrativas do Distrito Federal [12]

As regiões administrativas do DF poderiam ser facilmente classificadas dentre as regiões tipicamente urbanas descritas anteriormente, entretanto a RA-I Brasília apresenta uma peculiaridade: os moradores da maioria das outras regiões administrativas migram diariamente para a RA-I durante o horário comercial, causando um aumento considerável no número de usuários de uma tecnologia móvel nessa região.

A partir dos dados do CENSO do IBGE de 2000, foram construídas as tabelas a seguir classificando cada região administrativa. Foram feitas algumas adaptações em decorrência da criação de alguns centros urbanos que não estavam previstos no ano 2000, como o nascimento do setor Noroeste, acrescentado a população de Brasília, e de Águas Claras, acrescentada à população de Taguatinga.

Assim, as regiões com densidade populacional maior que 3.000 hab/km² são: Brasília (Plano Piloto e Noroeste), Cruzeiro (inclusive o Sudoeste) e Taguatinga (inclusive Águas Claras). Para calcular quantos habitantes Águas Claras adicionaria à região de Taguatinga, foi realizado um cálculo baseado na previsão de 800 projeções de aproximadamente 15 andares, resultando em um acréscimo de 300.000 habitantes nesse setor e causando um aumento na densidade demográfica de Taguatinga para 4.469 habitantes por km². Já para o Noroeste, os dados foram atualizados aumentando a população de Brasília em 40.000 habitantes, resultando em 3.670 habitantes por km², como mostra a Tabela 2.1

Tabela 2.1: Regiões densamente urbanas do Distrito Federal

Cidades satélites	Área (km ²)	Nº de habitantes	Habitantes/km ²
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	80,0	293.616	3.670,2
Cruzeiro (Sudoeste)	8,9	64.381	7.233,8
Taguatinga (Aguas Claras)	121,6	543.159	4.466,8

Para um melhor dimensionamento, algumas regiões administrativas foram divididas em centro e periferia, é o caso das cidades de Santa Maria, Riacho Fundo, Sobradinho, Gama, São Sebastião, Brazlândia e Recanto das Emas. Assim, o centro dessas cidades puderam ser classificados em regiões tipicamente urbanas, ou seja, têm densidade populacional entre 800 e 3.000 hab/ km². Além dos centros dessas cidades, as RAs Ceilândia, Guará e Candangolândia foram classificadas com regiões tipicamente urbanas como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Regiões urbanas do Distrito Federal

Cidades satélites	Área (km ²)	Nº de habitantes	Habitantes/km ²
Santa Maria	24,0	39.446	1.643,6
Guará	45,4	115.192	2.537,3
Candangolândia	6,6	15.629	2.368,0
Samambaia	105,7	163.000	1.542,1
Ceilândia	131,3	308.700	2.351,1
Recanto das Emas	21,0	46.500	2.214,3
Riacho Fundo	12,0	20.689	1.724,1
Gama	30,0	65.000	2.166,7
Cidade de Sobradinho	56,7	51.624	910,5
Cidade de São Sebastião	10,0	25.677	2.567,7
Cidade de Brazlândia	8,0	21.078	2.634,8
Cidade de Santa Maria	32,0	39.446	1.232,7
Cidade de Planaltina	57,8	73.531	1.272,2
Cidade do Paranoá	16,0	21.464	1.341,5

As regiões periféricas das RAs citadas acima se enquadraram como regiões tipicamente suburbanas segundo suas densidades populacionais. Somando-se à estas, aparecem as RAs do Lago Sul e Lago Norte, Núcleo Bandeirante, Itapuã e o Valo do Amanhecer, apresentando uma concentração urbana de 150 à 800 hab/ km² como mostra a Tabela 2.3.

Finalmente, enquadrando-se em regiões tipicamente rurais algumas áreas mais afastadas das RAs de Sobradinho, São Sebastião, Santa Maria, Jardim Botânico e Brazlândia, o Parque Nacional de Brasília que não apresenta nenhum morador oficialmente e quase a área total das RAs de Planaltina e do Paranoá como mostra a Tabela 2.4.

Para realizar os cálculos e estimativas, foram escolhidas quatro regiões, uma de cada tipo (densamente

Tabela 2.3: Regiões suburbanas do Distrito Federal

Cidades satélites	Área (km ²)	Nº de habitantes	Habitantes/km ²
Núcleo Bandeirantes	80,4	36.441	453,2
Lago Norte	66,1	29.603	447,9
Lago Sul	47,4	23.219	489,9
Gama	246,3	65.000	263,9
Ceilândia	99,0	34.300	346,5
Recanto das Emas	80,2	46.500	579,8
Riacho Fundo	44,0	20.689	470,2
Condomínios Sobradinho	335,9	51.624	153,7
São Sebastião	148,7	25.677	172,7
Brazlândia	186,8	21.078	112,8

Tabela 2.4: Regiões rurais do Distrito Federal

Cidades satélites	Área (km ²)	Nº de habitantes	Habitantes/km ²
Santa Maria	159,9	19.723	123,3
Sobradinho	180,0	25.723	142,9
São Sebastião	225,0	12.838	57,1
Brazlândia	280,0	10.539	37,6
Planaltina	1476,9	73.531	49,8
Paranoá	837,3	27.464	32,8
Jardim Botânico	136,0	5.000	36,8
Parque Nacional de Brasília	392,1	0	0,0

urbana, urbana, suburbana e rural. Depois de construído o algoritmo para essa estimativa, se tornará fácil fazer o cálculo para regiões tipicamente iguais. As RAs escolhidas estão apresentadas na Tabela 2.5

Tabela 2.5: Regiões administrativas que irão representar cada região demográfica típica

Tipo da região	Cidades satélites	Área (km ²)	Nº de habitantes	Habitantes/km ²
Densamente urbana	Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	80,0	293.616	3.670,2
Urbana	Ceilândia	131,3	308.700	2.351,1
Suburbana	Gama	246,3	65.000	263,9
Rural	Sobradinho	180,0	25.723	142,9

2.3 AFUNILAMENTO DA QUANTIDADE REAL DE USUÁRIOS

Os números apresentados anteriormente só expressam o número de habitantes de cada região administrativa, incluindo todas as faixas etárias, todos os níveis sociais e todos os perfis de pessoas. É evidente que os usuários de uma tecnologia não são todos os habitantes da região, todavia o público alvo pode ser filtrado sob três aspectos principais: a faixa etária, a mobilidade da população nos horários comerciais e

também a penetração da operadora prestadora do serviço.

2.3.1 Determinação da faixa etária do público alvo

O IBGE realizou em 2005 a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD sobre acesso à Internet e posse de telefone móvel celular para uso pessoal. Essa pesquisa revela dados valiosos para a determinação de um público alvo para o acesso a tecnologia WiMax no DF. Ela mostra que o DF tem o dobro do percentual nacional de internautas, o que permite inferir que o DF seria um bom cenário para implementação de uma tecnologia de acesso à banda larga com altas taxas. A pesquisa também revela que a idade média da população que acessa Internet é de 28,1 anos mas ressalta que a concentração maior de usuários está em um público muito jovem: no grupo etário de 10 à 14 anos, 24,4% são internautas. Olhando a base da pirâmide da população com mais idade, o percentual de internautas cai expressivamente para 7,3% para pessoas acima de 50 anos. Embasado nas informações da pesquisa, para dados de penetração na população foi considerado uma faixa etária alvo entre 10 e 69 anos. O que representa 79,5% da população do DF, resultando nos números da Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Filtro da população baseado na faixa etária

Cidades satélites	Nº de habitantes	Faixa etária alvo	Densidade de usuários com o filtro de faixa etária (hab/km ²)
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	293.616	233.425	2.918
Ceilândia	308.700	245.417	1.869
Gama	65.000	51.675	210
Sobradinho	25.723	20.450	114

2.3.2 Penetração de mercado da operadora

Em um primeiro momento, é razoável afirmar que só haverá uma operadora disponibilizando serviços através da tecnologia WiMAX, portanto a penetração de mercado deve ficar entre 10 à 12% [13].

2.3.3 Mobilidade da população

Como o estudo que está sendo feito é para a implantação de uma rede de WiMax móvel, é essencial saber onde o usuário vai estar e como já foi comentado, no DF acontece um caso peculiar de migração de grande parte dos habitantes das regiões suburbanas e rurais para a RA-I (Brasília), onde estão localizados

Tabela 2.7: Filtro da população baseado na penetração de mercado

Cidades satélites	Nº de habitantes	Nº de usuários	Densidade de usuários com o filtro de faixa etária (hab/km ²)
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	293.616	25.677	321
Ceilândia	308.700	26.996	206
Gama	65.000	5.684	23
Sobradinho	25.723	2.249	12

grande parte dos órgãos públicos e empresas grandes. Essa migração culminará no incremento de usuários utilizando aquela rede num determinado período do dia como demonstra a Tabela 2.8.

Segundo estatísticas, o número de pessoas que entram em Brasília e Taguatinga (áreas densamente urbanas) nas primeiras horas da manhã chega a 500 mil pessoas, representando um acréscimo percentual de 60% para a população que realmente tem sua moradia nessas regiões.

Tabela 2.8: Número de usuários considerando a mobilidade nos horários comerciais

Cidades satélites	Nº de habitantes	Nº de usuários	Considerando mobilidade acréscimo de 60%
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	293.616	25.677	41.083
Ceilândia	308.700	26.996	26.996
Gama	65.000	5.684	5.684
Sobradinho	25.723	2.249	2.249

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO USUÁRIO

Um dimensionamento de uma rede, quando bem estruturado, garante que a rede oferecerá um serviço com o QoS mínimo desejado mesmo nas piores condições e durante o período de maior acesso à rede. Entretanto, a dificuldade para se dimensionar esse número de usuários e qual taxa cada usuário irá precisar é enorme devido ao grande número de variáveis que devem ser levadas em consideração. Para determinar a taxa de cada usuário é necessário traçar perfis de pessoas que vão acessar essa rede e quanto cada perfil representa no contexto geral.

2.4.1 Perfis de usuários

Serão descritos alguns perfis de usuários exemplificados com serviços mais gerais para ser possível o cálculo de uma demanda por uma certa banda em cada região. Os perfis de usuários foram agrupados da

seguinte forma:

– **Usuário esporádico**

É definido como aquele usuário que utiliza esse serviço apenas para complementar outro acesso, ou seja, ele possui o acesso a banda larga fixa em casa ou no trabalho e só utiliza esse acesso quando está no engarrafamento, por exemplo. Uma taxa razoável para esse tipo de usuário seria 360kbps [14], o que possibilitaria a visualização de 5 emails com anexos de 280kbits, em média, no tempo de 4 segundos durante o PBH.

– **Usuário jovem**

Esse usuário utiliza a tecnologia para acesso constante, principalmente destinado à navegação Web, jogos em rede, downloads de fotos, músicas e vídeos, acesso à redes de relacionamento e eventualmente para uso profissional. Demanda uma taxa de 720kbps [14] durante o PBH.

– **Usuário intelectual**

Esse tipo de usuário utiliza o acesso à banda larga móvel com alta frequência para fins comerciais e também pessoais. Os serviços desses usuários exigem uma taxa maior e de alta disponibilidade como serviços de vídeo-conferência, acesso à páginas de bancos, serviços on-line, downloads de arquivos, etc. Considera-se uma taxa razoável para esses serviços de 900kbps[14].

– **Usuário TVD**

Esse usuário utiliza essa tecnologia para acesso do canal de retorno, também chamado de canal de interatividade, da TV Digital. O WiMax nessa faixa de frequência está sendo muito discutido para se tornar a principal tecnologia para o acesso do canal de retorno por apresentar diversas vantagens. Uma taxa razoável para esse serviço é 300kbps.

2.4.2 Análise do acesso à rede

Todos os números apresentados até agora exprimem meras estimativas de como se imagina uma rede WiMAX, por isso é muito difícil de apresentar uma previsão real do que acontecerá no horário de pico (PBH). Ainda mais considerando que o WiMAX é uma tecnologia nova e ainda não apresenta nenhum feedback de serviços oferecidos por ela.

Por isso, para dar mais credibilidade à nossa análise, será utilizada como base de comparação a rede sem

o UMTS 3G, que foi lançada a pouco tempo em Brasília mas teve altos índices de aderência, contribuindo também para a hipótese de boa aderência ao mercado do WiMAX, se implantado.

Nas redes UMTS 3G, o tráfego de *Download* predomina sobre o tráfego de *Upload* para todos os perfis de usuários que estão sendo analisados, logo é bastante razoável que as projeções sejam baseadas na capacidade de *Download*.

Um outro dado muito importante a ser analisado, é estimar quanto do tempo que o usuário está conectado, ele realmente está utilizando a rede. Quando se abre um email, por exemplo, todo o restante do tempo que o usuário se encontra lendo ou respondendo esse email, ele estará ocioso na rede, ou seja, ele está conectado mas não está utilizando recursos da rede. Mas considerando outro serviço oferecido, como os serviços de voz, os períodos de ociosidade caem consideravelmente, sendo o tempo praticamente todo que o usuário está conectado à rede dividido em 50% de *Download* e 50% de *Upload*.

Analisando o acesso à banda larga no Brasil, os brasileiros ficam conectados durante 23h31m por mês. Considerando o horário comercial de 7 horas diárias e 22 dias mensais, é possível concluir que somente 15% dos usuários ficam conectados durante os horários de pico.

Como dito anteriormente, a maioria dos usuários conectados à rede não estão realmente utilizando-a. Uma boa estimativa é que para cada 4 usuários conectados, apenas um está transmitindo ou recebendo dados. Os outros três estão realizando atividades que não utilizam banda da rede. Dessa nova informação, deduz-se que 4 usuários compartilham o acesso sem que seja necessário aumentar a taxa disponível para suprir a demanda desses usuários [15].

Reunindo todas as análises feitas acima, é possível construir a Tabela 2.9:

Tabela 2.9: Estimativa de tráfego no PBH

Perfis	Distribuição dos perfis	Usuários conectados no PBH	Usuários ativos na rede	Taxa
Esporádico	15%	15%	25%	360 kbps
Jovem	30%	15%	25%	720 kbps
Intelectual	45%	15%	25%	900 kbps
TVD	10%	15%	25%	300 kbps
Média	-	-	-	705 kbps

2.5 DENSIDADE DE TRÁFEGO POR REGIÃO

Cruzando todos os dados obtidos com a análise do acesso à rede WiMAX com os dados apresentados anteriormente de cálculo da demanda de usuários por região, é possível construir a Tabela 2.10

Tabela 2.10: Demanda de tráfego por região

Cidades satélites	Nº de usuários	Usuários ativos no PBH	Mbps/km ²
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	41.083	1.541	13,577
Ceilândia	26.996	1.012	5,436
Gama	5.684	213	0,610
Sobradinho	2.249	84	0,330

Para a estimativa da cidade de Brasília, o número de usuários é 41.083 usuários, considerando os 15% de usuários conectados no horário de pico e desses 25% realmente acessando à rede, culmina em 1.541 usuários no PBH e um tráfego de 13,577 Mbps/km

3 TECNOLOGIAS APLICADAS AO WIMAX

O WiMAX é uma tecnologia para redes sem fio em longa distância baseada no padrão 802.16 do IEEE, e tem dois padrões principais atualmente: fixo ou nomádico, e móvel.

O padrão IEEE 802.16 surgiu com reunião de alguns grupos de trabalho que se reuniram e produziram quatro versões para conseguiu abranger diferentes demandas de acesso. Inicialmente, o padrão operava somente em ambientes com linha de visada, LOS, em bandas de alta frequência (10 - 66 GHz), por meio de técnicas de modulação de portadora única, (QAM) quadrature amplitude modulation. Um adendo ao então padrão foi proposto para que o sistema pudesse operar em ambientes sem linha de visada, NLOS, operando em faixa de frequência mais baixa (2 - 11 GHz).

Posteriormente, os padrões 802.16b e 802.16c promoveram principalmente aspectos relativos à qualidade de serviço (QoS) e interoperabilidade, respectivamente. Em 2004, o padrão 802.16d implementou o uso do OFDM tanto no downlink, quanto no uplink, promovendo atributos como: modulação adaptativa e codificação baseada em HARQ, técnicas usadas anteriormente pela 3GPP/3GPP2, em sistemas como EDGE, HSDPA e EVDO; novos esquemas de correção de erro incluindo CTC (convolution turbo code) e LDPC (low density parity check); suporte a multi-antenas[16].

O padrão IEEE 802.16d (fixo) estabelece o acesso sem fio de banda larga fixa que teve os primeiros equipamentos homologados em janeiro de 2006, baseando-se no uso das faixas de 3,5 GHz e 5,8 GHz inicialmente. Ele fornece taxa de transmissão de até 70 Mbps por estação rádio-base.

Já o padrão IEEE 802.16e (móvel) diz respeito ao acesso sem fio de banda larga móvel, assegurando conectividade em velocidades superiores a 100 km/h, fazendo da mobilidade sua principal característica. Garante acesso nomádico, portátil e móvel, suporta handoff entre células e faixas de frequência para implementações iniciais de 2,3 GHz e 2,5 GHz.

Com a evolução do padrão 802.16 ao longo do tempo, é possível enumerar alguns benefícios alcançados pelo WiMAX:

- Altas taxas de transmissão de dados;
- Diminuição dos custos de infra-estrutura de banda larga para conexão com o usuário final;
- Criação de uma rede de cobertura de conexão de Internet similar à de cobertura celular, permitindo

acesso à Internet mesmo em movimento;

- Oferta de conexão internet banda larga em regiões onde não existe infra-estrutura de cabeamento telefônico ou de TV a cabo;

Nas seções seguintes serão retratadas as tecnologias que contribuem para as características acima descritas.

3.1 OFDM

Esta técnica é muito utilizada em tecnologias de transmissão sem fio e cabeada, como na transmissão de linhas telefônicas ADSL e também em aplicações DVB (Digital Video Broadcasting) sendo apropriada por sua robustez e bons resultados em sistemas típicos de ambientes NLOS [10]. O princípio básico da técnica OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) é a conversão de dados que antes eram transmitidos de forma serial para modo paralelo. Esses dados em paralelo são modulados por sub-portadoras ortogonais entre si, isto é, sobrepostas em frequência e conseqüentemente não há interferência umas com as outras, Figura 3.1. O WiMax a utiliza para fazer modulação dos dados transmitidos. A banda disponível é dividida entre as várias sub-portadoras a uma taxa menor que a taxa serial original, fazendo com que a duração de cada símbolo aumente. As sub-portadoras não precisam estar lado a lado como na técnica FDM, são sobrepostas na frequência de maneira ortogonal, como mostrado na Figura 3.2.

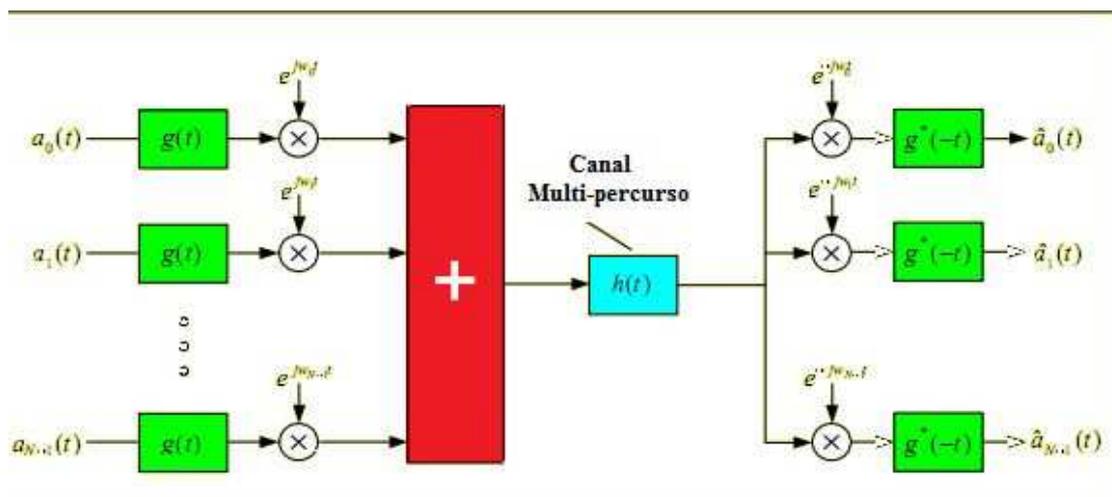


Figura 3.1: Arquitetura de um Sistema OFDM [15]

Para aumentar a robustez do sistema, além da maior duração do símbolo, que faz o sistema resis-

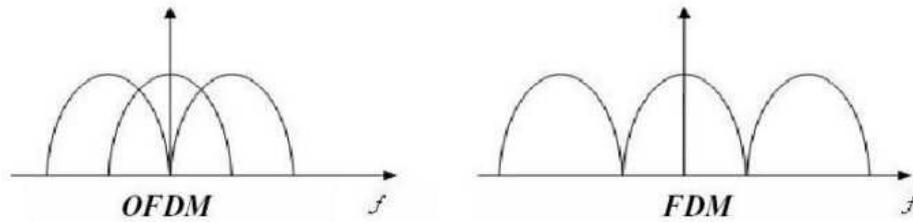


Figura 3.2: Comparação entre as técnicas FDM e OFDM

tente a atrasos na recepção causado por múltiplos percursos, é introduzido, no início de cada símbolo, o chamado prefixo cíclico (CP). Ele garante a ortogonalidade entre as portadoras e elimina a interferência inter-simbólica, uma vez que o período do prefixo cíclico é sempre maior que o atraso causado pelo canal. O prefixo cíclico é composto por amostras dos dados que se encontram no final do bloco que está sendo enviado, como está exemplificado na Figura 3.3. A desvantagem é diminuição a eficiência espectral por incluir bits desnecessários [15].

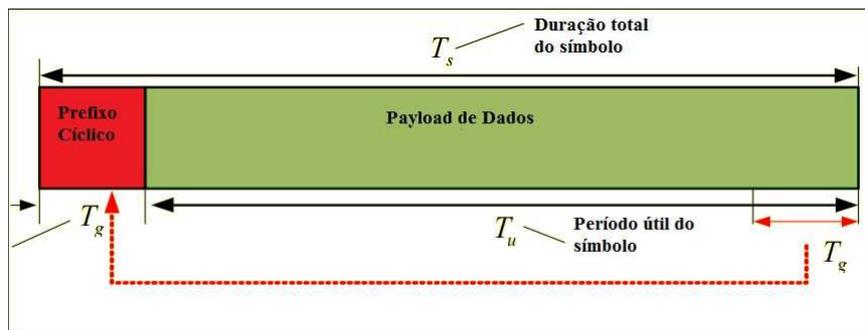


Figura 3.3: Esquema do prefixo cíclico no símbolo OFDM [15]

3.2 OFDMA

Um símbolo OFDMA possui três tipos de sub-portadoras: as portadoras de dados, as quais realmente carregarão os bits informação; as portadoras-piloto, com a finalidade de sincronização e estimativas e as portadoras usadas para banda de guarda, Figura 3.4. O agrupamento de sub-portadoras ativas é chamada sub-canalização, cada sub-canal deve ter no mínimo 48 sub-portadoras. A seleção das sub-portadoras para canalização pode ser feita de forma randômica ou não.

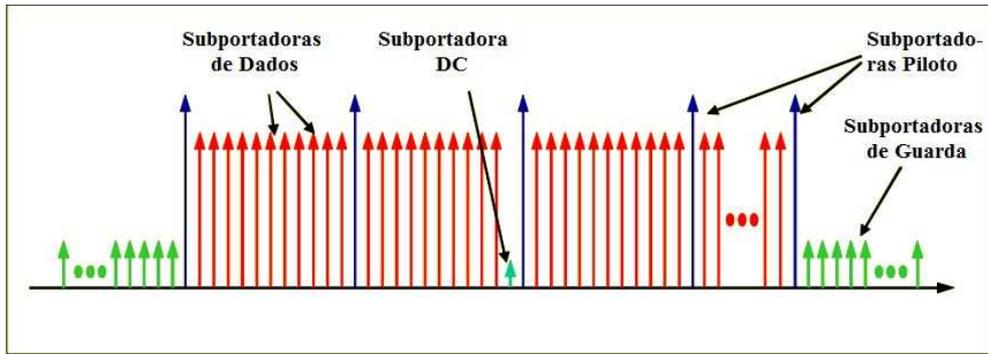


Figura 3.4: Estrutura OFDMA de subportadoras [15]

3.2.1 Scalable OFDMA (S-OFDMA)

O Scalable OFDMA é uma adaptação do OFDMA proposto pelo padrão IEEE 802.16e que permite os canais adaptarem-se a bandas escaláveis de 1,25MHz à 20MHz. Tal característica permite o suporte a diferentes alocações do espectro. Essa escalabilidade é implementada variando-se o tamanho da FFT e fixando o espaçamento entre as sub-portadoras em 10,94kHz. A Tabela 3.1 lista os parâmetros definidos pelo padrão.

Tabela 3.1: Parâmetros de escalabilidade OFDMA

Parâmetros	Valores			
Largura da banda do canal em MHz	1,25	5	10	20
Tamanho da FFT	128	512	1024	2048
Número de subcanais	2	8	16	32
Frequencia de espaçamento entre subportadoras	10,94 kHz			
Tempo útil de cada símbolo (T_B)	91,43 μ s			
Duração do intervalo 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 TDD - TIME DIVISION DUPLEX

De acordo com o padrão 802.16e, a versão inicial do mobile WiMax irá incluir apenas suporte TDD, apesar de suportar também full e half-duplex FDD (Frequency Division Duplex). A Figura 3.5 mostra o esquema de um símbolo OFDM para o tipo de implementação Time Division Duplex. Existe um intervalo entre os frames de download e upload também mostrado na mesma figura.

O primeiro símbolo OFDM é destinado apenas a sincronização. O preâmbulo é seguido pelo FHC

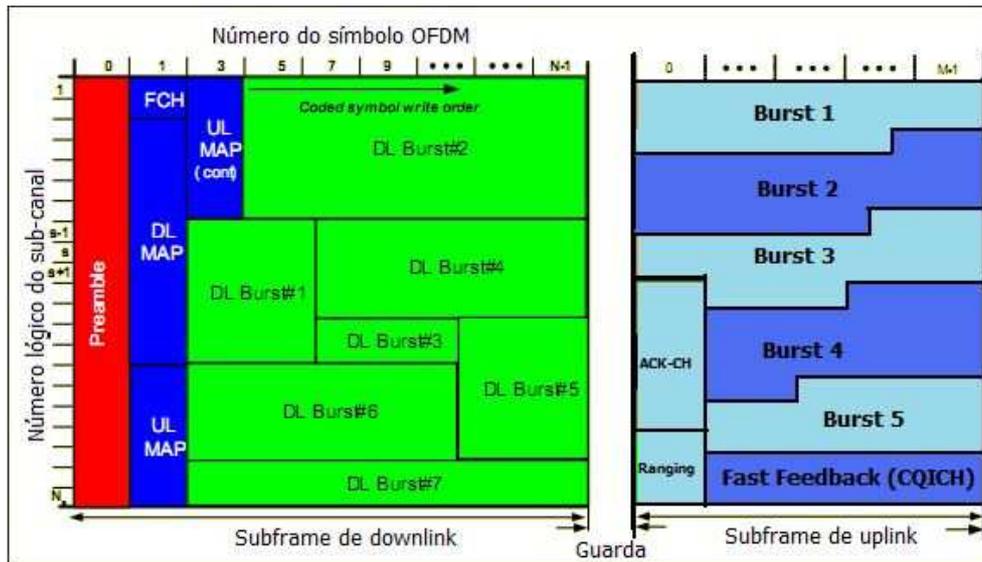


Figura 3.5: Estrutura de quadro OFMD com implementação TDD [15]

(Frame Control Header) que provê informação sobre o frame, tais como tamanho do frame e modulação utilizada. O mapa de download (DL Map) e o mapa de upload (UL Map) contêm outras informações de alocação dos sub-canais.

No sub-frame de uplink, existe também o símbolo de ranging que é usado por estações móveis para fechar o loop de informações como ajuste de potência, frequência e requisição de banda. Com a finalidade parecida, o campo CQICH é utilizado pelo móvel para avaliar o canal e informar a estação-base.

3.4 MODULAÇÕES SUPORTADAS

O sistema WiMax foi projetado para suportar as modulações BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM. As duas primeiras permitem alcançar maiores distâncias de cobertura, entretanto apresentam menores taxas. Já as duas últimas têm limitação de distância, mas transmitem a taxas muito maiores. A Figura 3.6 exemplifica o compromisso taxa x distância.

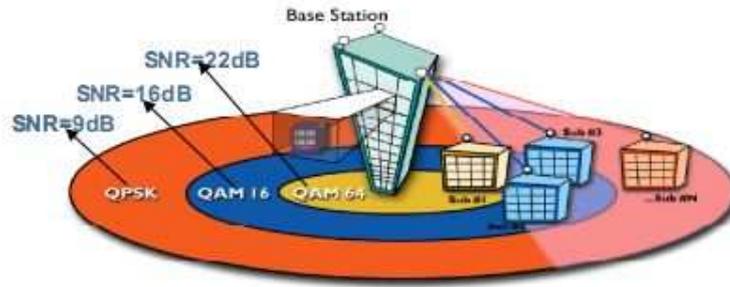


Figura 3.6: Raio de alcance para diferentes modulações [17]

3.4.1 PSK

PSK significa chaveamento por fase (Phase Shift Keying). Nessa modulação, a forma de mostrar a mudança de estado é mudando a fase da portadora. No caso do BPSK, existem apenas dois estados o que confere a essa modulação elevada robustez e conseqüentemente grande imunidade à ruído. A Figura 3.7 mostra um exemplo desse chaveamento.

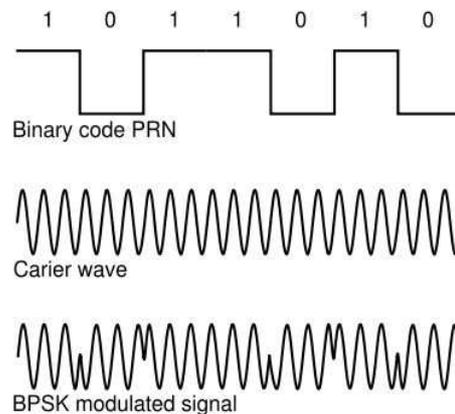


Figura 3.7: Modulação BPSK

No caso do QPSK, a cada dois bits é transmitido um único símbolo, o que permite a esse sistema uma taxa de transmissão um pouco maior que a modulação BPSK. São possíveis quatro tipos de símbolos e a fase da portadora também pode assumir quatro valores distintos, igualmente espaçados em quadratura, fazendo com que a probabilidade de erro de símbolo seja igual para qualquer símbolo. Um exemplo de modulação QPSK pode ser observado na Figura 3.8.

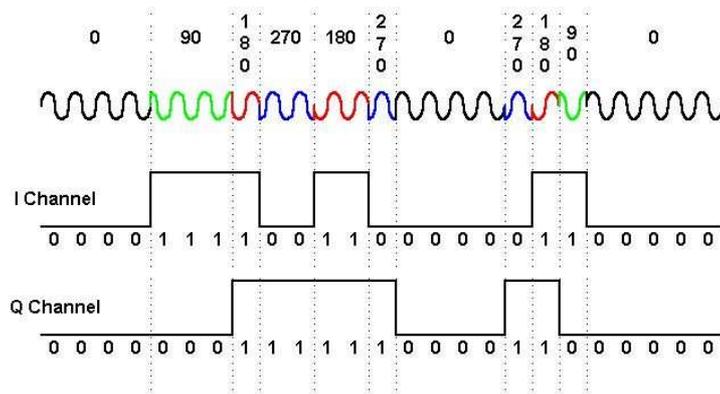


Figura 3.8: Modulação QPSK

3.4.2 QAM

A modulação do tipo QAM utiliza tanto os parâmetros de fase (como no PSK) como os parâmetros de amplitude da portadora. No diagrama de fase e quadratura, cada símbolo possui uma distância definida do centro (amplitude) e também uma posição específica (fase). No caso da modulação 16-QAM, existem dezesseis símbolos disponíveis para enviar dados e conseqüentemente quatro bits são utilizados em cada um desses símbolos. A modulação 16-QAM é representada na Figura 3.9.

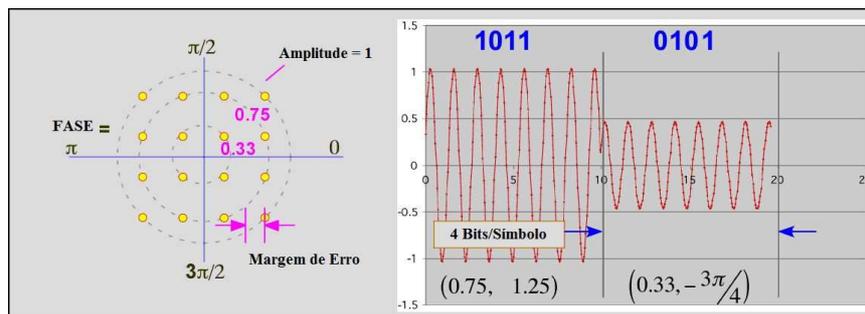


Figura 3.9: Modulação 16-QAM

As únicas diferenças entre o 16-QAM e 64-QAM são o número de símbolos e conseqüentemente o número de bits por símbolo, pois a forma de modular é exatamente igual (tanto em amplitude como em fase). Na modulação 64-QAM existem 64 símbolos e 6 bits por cada símbolo. Como o número de símbolos é grande, a portadora varia muito pouco e assim é de difícil visualização, portanto, a Figura 3.10 de modulação do 64-QAM exemplificará apenas o diagrama de fase e quadratura.

Por esse diagrama, pode-se notar facilmente que existem símbolos com a mesma amplitude, mas nesse caso a fase é distinta; assim como existem símbolos com a mesma fase, mas com amplitude diferente.

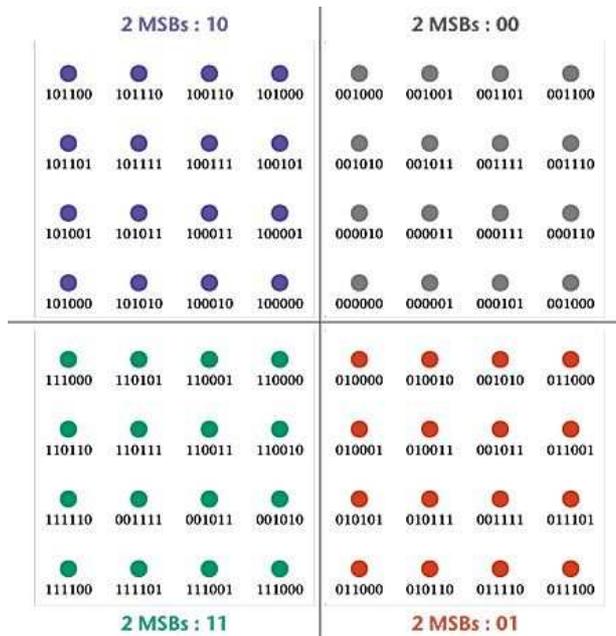


Figura 3.10: Diagrama de fase e quadratura da modulação 64-QAM

3.5 TAXAS DE TRANSMISSÃO WIMAX 700 MHZ

O WiMax permite a alteração dos esquemas de modulação de forma dinâmica, considerando como requisitos a taxa de transferência e relação sinal-ruído, SNR. Com uma alta SNR, aplica-se a modulação menos robusta, aumentando-se a capacidade de transmissão do sistema. Já em situação inversa, quando tem-se SNR reduzida, o esquema de modulação mais robusto é utilizado, reduzindo-se a taxa de transmissão, mas mantendo-se a qualidade do enlace. Esta característica é denominada modulação adaptativa, e tem por objetivo aumentar a faixa de atuação de uma modulação de ordem mais alta, considerando-se distância e desvanecimento, fatores a serem levados em consideração em ambientes sem linha de visada, NLOS (Non-line-of-sight) .

As distintas taxas de transmissão no WiMax são resultantes, portanto, das várias possibilidades de combinação entre modulação e codificação. Uma maneira de obter-se a taxa de transmissão - R - é dada pela equação(3.1).

$$R = \frac{Q_s \times CC}{T_s}. \quad (3.1)$$

Como parâmetros, tem-se[10]:

- Q_s : número de subportadoras de dados;

- T_s : duração do quadro dividida pela quantidade de símbolos de dados;
- CC: taxa codificada de bits por símbolo.

Para o cálculo da taxa, outros parâmetros também devem ser considerados, como os da Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros WiMax 700 MHz para canais de 6 MHz e 12 MHz

Parâmetros	DL	UL	DL	UL
Largura do canal (MHz)	6		12	
Largura banda ocupada (MHz)	5,514	5,251	11,028	11,028
Largura banda ocupada (%)	91,90	87,52	91,90	91,90
Tamanho da FFT	512		1024	
Subportadoras Nulas	8	32	16	16
Subportadoras Piloto	72	160	144	336
Subportadoras Dados	432	320	864	672
Subcanais	18	20	36	42
Periodo do simbolo - T_s	102,9 μ s			
Duração dos quadros	5 ms			
Simbolo OFDM/quadro	48			
Simbolo OFDM de dados/quadro	44			

Então, sabendo-se que um quadro, que tem duração de 5 ms, possui 48 símbolos OFDMA, com 44 desses destinados à transmissão de dados, considerando um canal de 12 MHz, 864 subportadoras, modulação 64QAM e CTC de 5/6, obtém-se uma taxa de transmissão de 38,016 Mbps, observada na Tabela 3.3, que apresenta os vários esquemas de modulação e codificação, e suas respectivas taxas.

$$R = \frac{864 \times 44}{5 \times 10^{-3}} \times 6 \times \frac{5}{6} = 38,016 \text{ Mbps.} \quad (3.2)$$

Com essa taxa de download, considerando antenas SISO, fator de reuso 3:1, chega-se a capacidade de uma BTS de $3 \times 38,016 = 114,048$ Mbps. Por exemplo, como há a demanda de $13,577 \text{ Mbps/km}^2$ no Plano Piloto, que possui uma área de 80 km^2 , Tabela 2.5, chega-se a uma demanda total de $1.086,16$ Mbps, que dividido pela capacidade da BTS em questão, resulta em 10 BTS necessárias para essa região, conforme a Tabela 3.4. Esse é o caso considerando-se a melhor taxa. Por outro lado, esse número aumentaria para 572 BTS, Tabela 3.5, fazendo-se uso da pior taxa, $0,634$ Mbps.

Tabela 3.3: Taxas de transmissão para WiMax 700 MHz

Modulação	Codificação - CC	Canal 6 MHz		Canal 12 MHz	
		Tx transmissão DL - Mbps	Tx transmissão UL - Mbps	Tx transmissão DL - Mbps	Tx transmissão UL - Mbps
QPSK	1/2 CC, 6x	0,634	0,469	1,267	0,986
	1/2 CC, 4x	0,950	0,704	1,901	1,478
	1/2 CC, 2x	1,901	1,408	3,802	2,957
	1/2 CC, 1x	3,802	2,816	7,603	5,914
	3/4 CC	5,702	4,224	11,405	8,870
16 QAM	1/2 CC	7,603	5,632	15,206	11,827
	3/4 CC	11,405	8,448	22,810	17,741
64 QAM	1/2 CC	11,405	8,448	22,810	17,741
	2/3 CC	15,206	11,264	30,413	23,654
	3/4 CC	17,107	12,672	34,214	26,611
	5/6 CC	19,008	14,080	38,016	29,568

Tabela 3.4: Quantidade de BTS necessárias considerando melhor taxa de transmissão

Região	Capacidade da BTS SISO com 3 setores (Mbps)	Tráfego por Região	Quantidade de BTS
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	114.048	1.086,16	10
Ceilândia	114.048	713,747	7
Gama	114.048	150,243	2
Sobradinho	114.048	59,4	1

Tabela 3.5: Quantidade de BTS necessárias considerando pior taxa de transmissão

Região	Capacidade da BTS SISO com 3 setores (Mbps)	Tráfego por Região	Quantidade de BTS
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	1,902	1.086,16	572
Ceilândia	1,902	713,747	376
Gama	1,902	150,243	79
Sobradinho	1,902	59,4	31

4 ESTUDO DA PROPAGAÇÃO

Até agora foram analisados aspectos com relação a capacidade da BTS, levando em consideração apenas a demanda requerida por usuário em cada região. Entretanto, existe um fator muito importante que pode ser limitante para a determinação do número de BTS: a propagação do sinal. Portanto, é necessário fazer um estudo da propagação do sinal na frequência 700 MHz e de acordo com as circunstâncias de propagação para cada região, os resultados possam ser cruzados com os encontrados anteriormente, e assim concluir qual dos fatores é limitante em cada situação.

4.1 PROPAGAÇÃO WIRELESS

Utilizar um modelo significa poder estimar a soma de todas as perdas de sinal causadas por reflexões, refrações e difrações no percurso entre transmissor e receptor. Isso acontece em absolutamente todos os canais de comunicação, mas é muito mais relevantes em meios de comunicação sem fio.

As variações na intensidade do sinal recebido podem limitar a distância que uma antena pode transmitir sem perder qualidade do serviço.

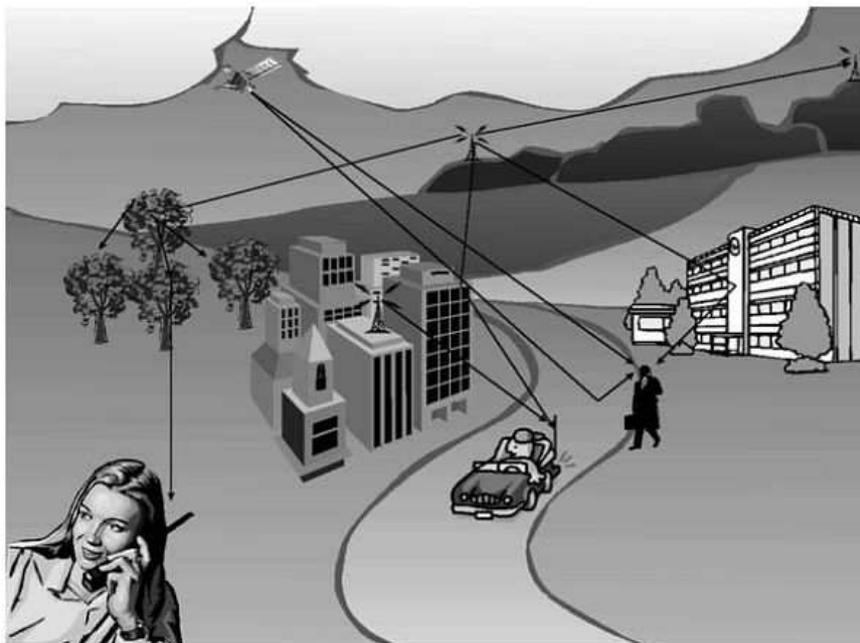


Figura 4.1: Panorama da propagação wireless
[18]

Nas comunicações wireless, a perda pode ser classificada principalmente em três escalas de variação, como mostra a Figura 4.2:

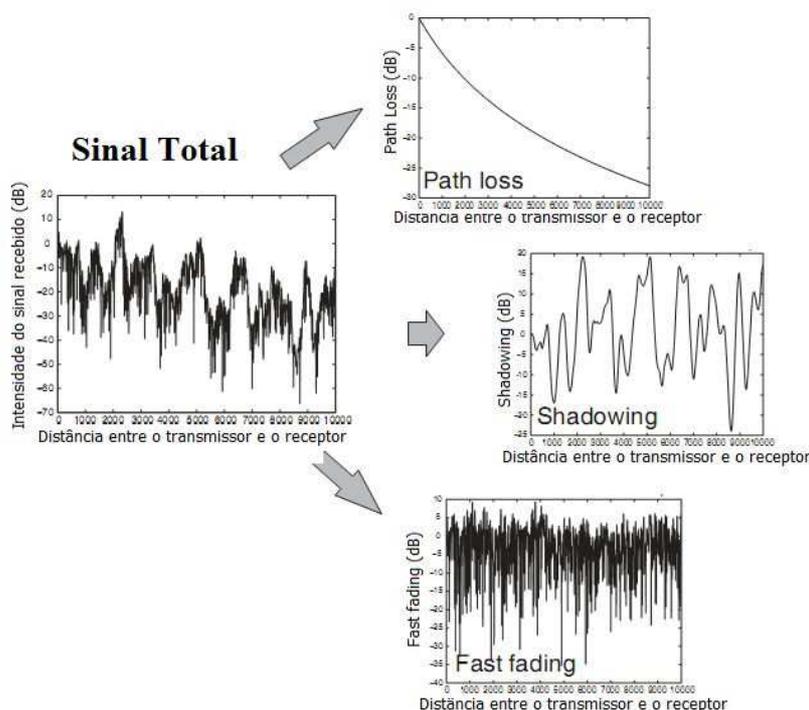


Figura 4.2: As três escalas para variação do sinal em um receptor móvel [18]

– *Path Loss*

Resultado do espalhamento do sinal, obstrução de prédios, árvores ou qualquer tipo de obstáculo. Essa modalidade pode chegar até a 150dB nos piores casos[18].

– *Shadowing*

É resultado da variação do padrão de obstrução no movimento do receptor móvel, podendo chegar em até 20dB em poucos metros[18]

– *Fast Fading*

Variação em escala de $(\lambda/2)$, sendo o resultados das interferências construtivas e destrutivas entre as diversas versões do sinal que chega no receptor, podendo atingir até 40dB [18]

A Figura 4.3 mostra em que escala cada um dos parâmetros influencia no sinal resultante recebido pelo móvel.

Um canal seletivo em frequência e variante no tempo deve se comportar conforme a Figura 4.4.

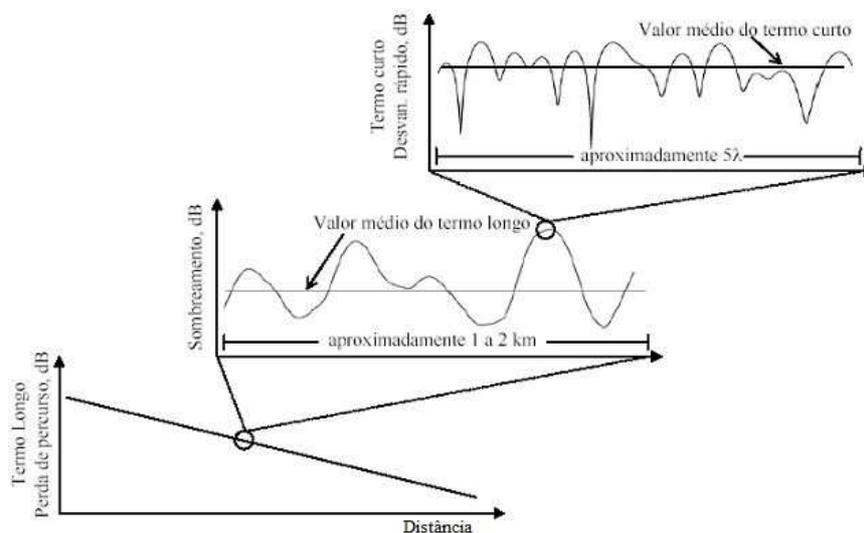


Figura 4.3: Sinal resultante e detalhes do sinal [18]

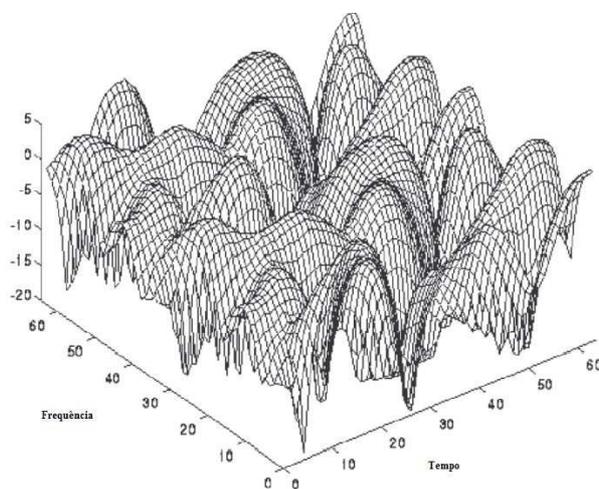


Figura 4.4: Modelo de canal seletivo em frequência e variante no tempo [18]

4.2 PROPAGAÇÃO PELO MODELO COST 231 WALFISCH-IKEGAMI

O modelo empírico é a combinação dos modelos de J. Walfisch e F. Ikegami. Posteriormente foi reforçado pelo projeto do COST231 (Cooperação Européia no Campo de Pesquisas Científicas e Tecnológicas), passando a se chamar modelo COST-Walfisch-Ikegami [19].

Esse modelo considera que os prédios estão no plano vertical no caminho entre o transmissor e o receptor. A largura das vias, altura das construções, altura das BTS e do móvel são também consideradas. O modelo é baseado nas medições realizadas na cidade de Estocolmo.

A acurácia desse modelo é bastante elevado, principalmente devido ao fato de que em ambientes ur-

banos, a propagação no plano vertical e sobre os telhados (difrações múltiplas) é predominante. Especialmente se os transmissores estiverem localizados em níveis acima dos telhados dos prédios, como é o caso de Brasília.

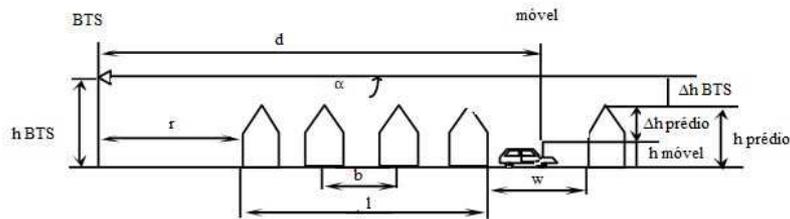


Figura 4.5: Situação típica de propagação e definição dos parâmetros para o COST231-WI [18]

O modelo foi utilizado para análise da propagação do sinal na tecnologia WiMAX de acordo com a referência [20] e da indicação pelo WiMAX Forum.

4.2.1 Parâmetros do modelo

A grande inovação do modelo é fazer distinção entre a propagação em situações com linha de visada (LOS) e sem linha de visada (NLOS). Na situação com linha de visada, é utilizada a fórmula [4.1], diferente da fórmula para espaço livre.

$$L_b(dB) = 42,6 + 26\log_{10}(d_{km}) + 20\log_{10}(f_{MHz}) \quad \text{para } d \geq 0 \quad (4.1)$$

onde d é a distância entre a BTS e o móvel, em km, e f é a frequência utilizada, em MHz. Para os outros casos sem linha de visada, a perda é dada por:

$$L_b(dB) = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 & \text{para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

onde L_0 é a perda no espaço livre, L_{rts} é a difração do topo dos prédios para as ruas e espalhamento do sinal e L_{msd} é a perda devido à difrações por multipercurso. L_0 é dado por:

$$L_b(dB) = 32,4 + 20\log_{10}(d_{km}) + 20\log_{10}(f_{MHz}) \quad (4.3)$$

A determinação de L_{rts} é baseada principalmente no modelo Ikegami, levando em consideração a

largura média das ruas w , em metros, a diferença de altura entre o prédio e o usuário $\Delta h_{\text{usuário}}$ ($h_{\text{prédio}} - h_{\text{usuário}}$), em metros, e o fator L_{ori} . L_{rts} é dada por:

$$L_{\text{rts}} = -16,9 - 10\log_{10}(w_m) + 10\log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 20\log_{10}(\Delta h_{\text{usuário}}) + L_{\text{ori}} \quad (4.4)$$

L_{ori} é um fator empírico de correção dado por (4.5). Leva em consideração o ângulo ϕ , Figura 4.6, definido como o ângulo entre a orientação da rua que o móvel está percorrendo e a onda incidente do sinal (4.6), em graus.

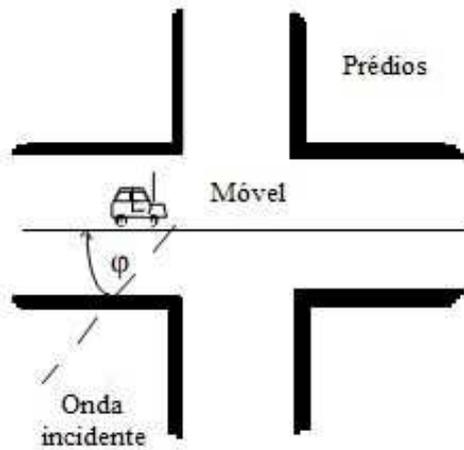


Figura 4.6: Ângulo ϕ formado pela orientação da rua com a onda incidente [18]

$$L_{\text{ori}} = \begin{cases} -10 + 0,354\phi & \text{para } 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,007(\phi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4 - 0,114(\phi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases} \quad (4.5)$$

A fórmula para multipercursos resulta em uma integral para qual o modelo COST231 aproximou para uma medição empírica baseada na altura dos prédios e a separação entre eles. O termo L_{msd} é dado por:

$$L_{\text{msd}} = L_{\text{bsh}} + k_a + k_d \log_{10}(d_{\text{km}}) + k_f \log_{10}(f_{\text{MHz}}) - 9 \log_{10}(b_m) \quad (4.6)$$

onde b representa a distância entre os edifícios, em metros. k_a representa um aumento na perda para antenas das BTS localizadas abaixo da linha média de altura dos prédios adjacentes. Os termos k_d e k_f controlam a dependência da perda por difração multipercurso versus a distância e frequência, respectivamente.

O fator L_{bsh} é dado por:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_{BTS}) & \text{para } h_{BTS} > h_{\text{prédio}} \\ 0 & \text{para } h_{BTS} \leq h_{\text{prédio}} \end{cases} \quad (4.7)$$

onde

$$\Delta h_{BTS} = h_{BTS} - h_{\text{prédio}} \quad (4.8)$$

A constante k_a é dada por:

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_{BTS} > h_{\text{prédio}} \\ 54 - 0,8\Delta h_{BTS} & \text{para } d \geq 0,5\text{km} \text{ e } h_{BTS} \leq h_{\text{prédio}} \\ 54 - 1,6d\Delta h_{BTS} & \text{para } d < 0,5\text{km} \text{ e } h_{BTS} \leq h_{\text{prédio}} \end{cases} \quad (4.9)$$

A constante k_d é dada por:

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_{BTS} > h_{\text{prédio}} \\ 18 - 15\left(\frac{\Delta h_{BTS}}{h_{\text{prédio}}}\right) & \text{para } h_{BTS} \leq h_{\text{prédio}} \end{cases} \quad (4.10)$$

A constante k_f diferencia o modelos em centros metropolitanos, ou seja, regiões densamente urbanas, e cidades de médio porte e centros suburbanos com densidade moderada de árvores, ou seja, regiões suburbanas. k_f é dada por:

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7\left(\frac{f_{MHz}}{925} - 1\right) & \text{para regiões densamente urbanas} \\ -4 + 1,5\left(\frac{f_{MHz}}{925} - 1\right) & \text{para regiões suburbanas} \end{cases} \quad (4.11)$$

4.3 RAI DE COBERTURA

A potência recebida (P_r) por um móvel é dada pela soma da potência transmitida (P_t), o ganho da antena transmissora (G_t), o ganho da antena receptora (G_r) e o oposto da atenuação devido à propagação ($-L_b$).

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_b \quad (4.12)$$

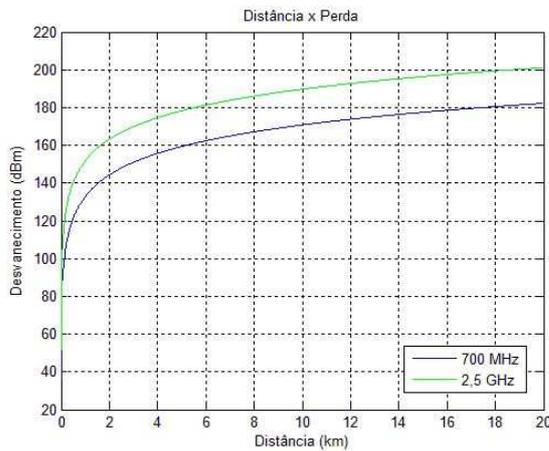
Para realizar a simulação e construir os gráficos do modelo de propagação foi utilizado o software *MATLAB 7.0*. Os parâmetros típicos para a topologia do Distrito Federal estão expostos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Argumentos para o COST231 no Distrito Federal

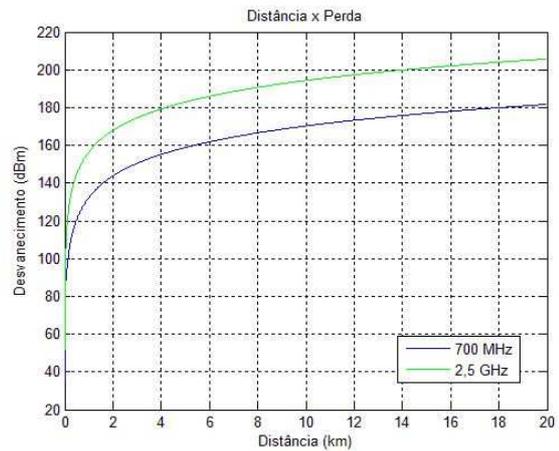
Argumentos	Valores
Faixa de frequência	700 MHz
Potência de transmissão	40 dBm
Ganho da antena transmissora	15dBi
Ganho da antena receptora	(-)1dBi
Altura média das BTS	20m
Altura média do móvel	1,5m
Altura média dos prédios	18m
Largura média das ruas	10m
Separação entre os edifícios	60m
ϕ	90°

Quando o ângulo ϕ não é conhecido, recomenda-se utilizar 90° [21].

Os gráficos da Figura 4.7 mostram a relação distância x perda do sinal nas frequências de 700 MHz e 2,5 GHz.



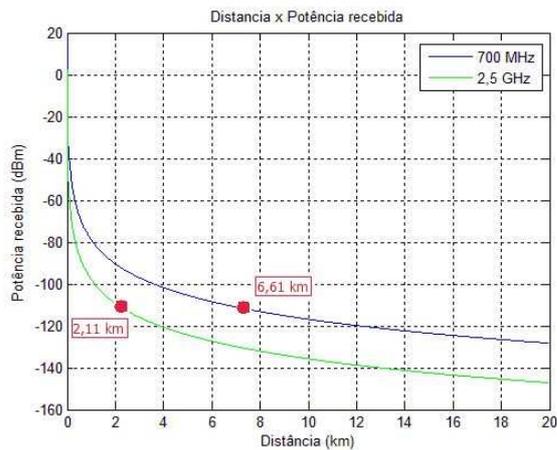
(a) Distância x Perda para regiões suburbanas



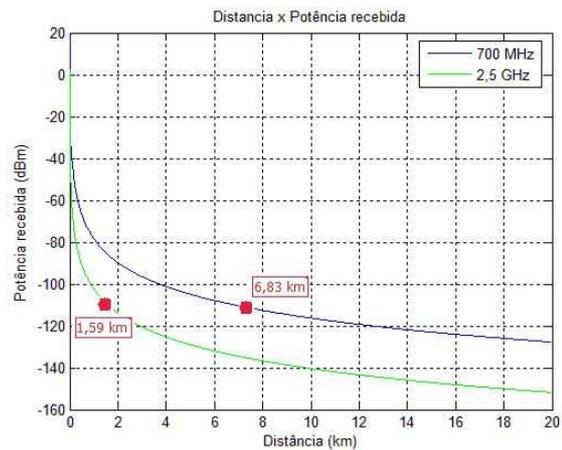
(b) Distância x Perda para regiões densamente urbanas

Figura 4.7: Gráfico Distância x Potência recebida

E os gráficos da Figura 4.8 mostram propriamente a relação distância x potência recebida pelo usuário, a qual iremos utilizar para definir a distância máxima que o móvel pode estar distante da BTS para que ele consiga receber o sinal e decodificá-lo corretamente.



(a) Distância x Potência recebida para regiões suburbanas



(b) Distância x Potência recebida para regiões densamente urbanas

Figura 4.8: Gráfico Distância x Potência recebida

Sabendo que a potência máxima na qual o móvel consegue receber o sinal corretamente está entre -110dBm e -120dBm (para fins de cálculo foi utilizado -110dBm), pode construir a Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Área de cobertura para cada faixa de frequência de utilização do WiMAX

Ambiente	Frequência	Raio (km)	Área de cobertura (km ²)
Densamente urbano	700MHz	6,83	121,197
	2,5GHz	1,59	6,568
Suburbano	700MHz	6,61	113,515
	2,5GHz	2,11	11,567

Levando em consideração apenas o fator raio de cobertura atingido pela propagação do sinal nas regiões administrativas que estão sendo estudadas, o número de BTS seria como demonstrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Número de BTS de acordo com a propagação do sinal

Cidades satélites	Área (km ²)	Número de BTS para 700MHz	Número de BTS para 2,5GHz
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	80,0	1	13
Ceilândia	131,3	2	20
Gama	246,3	3	22
Sobradinho	180,0	2	16

4.4 CRUZAMENTO DE DADOS

Depois de concluir os cálculos finais para o número de BTS definido pela demanda e definido pela propagação do sinal, é necessário analisar qual fator é limitante em cada região, observando as Tabelas 4.3 e 3.4.

Nota-se que no caso do WiMAX 700 MHz, seria necessária apenas 1 BTS para satisfazer o fator propagação, enquanto para satisfazer o fator demanda seriam necessárias 10 BTS, devido ao altíssimo tráfego em Mbps/km² na região. Expandindo essa mesma análise para as demais regiões e também para a frequência de 2,5 GHz, conclui-se que a propagação do sinal é fator limitante para todos os casos de regiões no WiMAX 2,5 GHz e também para as regiões suburbanas e rurais no WiMAX 700 MHz. A demanda só é fator limitante nas regiões densamente urbanas e urbanas no WiMAX 700 MHz, colocando-o em posição mais vantajosa em relação à frequência de 2,5 GHz.

Ainda é possível fazer outro tipo de análise dentro do contexto do WiMAX 700 MHz. É viável uma melhoria na modulação e codificação do sinal nas regiões suburbanas e rurais, incrementando, assim, a robustez do sinal. Essa alteração pode ser feitas nessas regiões e não nas regiões urbanas devido a certa folga no número de BTS com relação à demanda.

A Tabela 4.4 mostra o número de BTS para cada região administrativa depois de relacionados os fatores de demanda e propagação do sinal.

Tabela 4.4: Número de BTS cruzando dados de propagação e demanda

Cidades satélites	Área (km ²)	Número de usuários	Mbps/km ²	Número de BTS para 700MHz	Número de BTS para 2,5GHz
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	80,0	41.083	13,577	10	13
Ceilândia	131,3	26.996	5,436	7	20
Gama	246,3	5.684	0,610	3	22
Sobradinho	180,0	2.249	0,330	2	16

 Número de BTS limitado pela demanda
 Número de BTS limitado pela propagação

Analisando o Gráfico 4.9 é mais fácil visualizar as vantagens decorrentes da implementação de uma rede na faixa de 700 MHz, comparando-se o número de BTS totais em cada uma das faixas de frequência. Uma visão panorâmica do cenário criado nas simulações mostra que seria necessário apenas 30% do número de BTS do WiMAX 2,5 GHz para implementar uma rede WiMAX 700 MHz. Essa porcentagem é bastante expressiva, haja vista o alto valor de implementação de cada BTS.

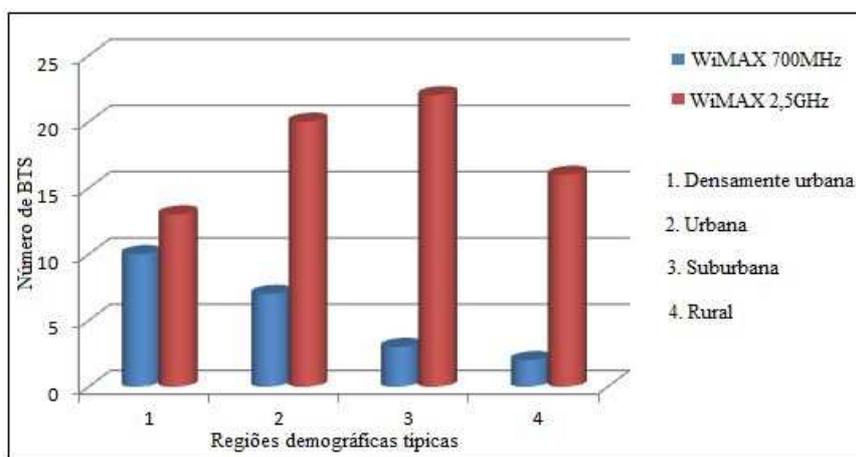


Figura 4.9: Número de BTS na faixa de 700 MHz e 2,5 GHz

4.5 EFICIÊNCIA ESPECTRAL

A eficiência espectral quantifica o quanto de tráfego uma rede pode carregar com um dado espectro. Além disso, quanto melhor a performance de uma transmissão de rádio-frequência, maior o QoS oferecido pelo sistema para o usuário final.

A rede é espectralmente mais eficiente se para um certo padrão de QoS e uma mesma banda, ela consegue carregar uma maior quantidade de bits.

A Tabela 4.5 mostra um comparativo da eficiência espectral para o cenário desenvolvido, comparando-se as faixas de frequência de 700 MHz e 2,5 GHz. Constatou-se que o WiMAX é mais eficiente em todos os modelos de região e analisando um sistema como um todo, ou seja, considerando a soma dos tráfegos de cada região e a soma do número de BTS, a eficiência espectral em 700 MHz é mais de três vezes maior do que em 2,5 GHz. O valor encontrado é bastante próximo para a simulação realizada pelo NS-2 em 700 MHz: 2bps/Hz [20].

Tabela 4.5: Comparativo da eficiência espectral

Cidades satélites	Eficiência espectral para 700MHz (bps/Hz)	Eficiência espectral para 2,5GHz (bps/Hz)
Brasília (Plano Piloto e Noroeste)	3,017	2,321
Ceilândia	2,832	0,991
Gama	1,391	0,190
Sobradinho	0,826	0,103
Sistema como um todo	2,537	0,786

5 CONCLUSÃO

Uma das principais características que evidencia a globalização é a velocidade com a qual as informações percorrem o mundo. Deseja-se saber notícias de qualquer lugar do planeta, em qualquer lugar ou hora. Tal demanda por informação gera a crescente necessidade de estar-se sempre conectado, juntamente com outro quesito fundamental atualmente, a mobilidade dos meios de comunicação.

Estudos revelam que o número de linhas fixas em países desenvolvidos está caindo, e o crescimento do número dessas nos países em desenvolvimento é mínimo. Em contrapartida, a penetração móvel global atingiu mais de 40% para serviços de voz no ano de 2006 [22]. Assim, fica evidente a preferência dos serviços móveis em detrimento das alternativas fixas.

Neste contexto, o WiMax 700 MHz é capaz de desempenhar importante papel, oferecendo a possibilidade de serviço banda larga sem fio, tanto a áreas densamente urbanas, que exigem células menores com alta capacidade, quanto a áreas rurais, onde o fator limitante é o alcance do sinal.

Este trabalho consistiu no dimensionamento de redes WiMax 700 MHz para quatro cidades do Distrito Federal (Brasília, Ceilândia, Gama e Sobradinho) com características distintas levadas em consideração: densidade populacional, perfil de usuário, chegando-se a uma demanda média para cada cidade. Por meio da capacidade de uma estação rádio-base, de acordo com o esquema de modulação e codificação adotado, foi possível encontrar o número de BTS necessárias para cobrir cada cidade, considerando o aspecto da demanda.

A propagação foi outro ponto levado em conta. O modelo adotado para esta parte foi o cost231 Walfisch-Ikegami, e com o auxílio dos raios de cobertura obtidos nas simulações e da área de cada região, calcularam-se as BTS necessárias e confrontaram-se demanda e propagação. Com a finalidade de enriquecimento do assunto, esses processos também foram realizados para WiMax 2,5 GHz.

Então, adiante, foi constatado que o fator propagação do sinal foi limitante para todas as cidades para o sistema em 2,5 GHz. Já para a operação em 700 MHz, a propagação foi limitante apenas para as cidades suburbanas e rurais. As cidades densamente urbana e urbana tiveram a demanda como fator limitante, aspecto este justificado pelo alto tráfego requerido nessas regiões.

A operação do WiMax em 700 MHz mostrou-se mais eficaz que em 2,5 GHz, haja vista a possibilidade de implementação de redes com número de BTS inferior a implementação de redes em 2,5 GHz. Operar,

portanto, em frequência inferior, acarreta melhor propagação do sinal - resultado esperado pois simulações e estudos analíticos mostram que o path loss em 700 MHz é 26,5 dB menor [22]. Tal resultado reflete um melhor equilíbrio entre o custo da rede e a capacidade do sistema.

O WiMax 700 MHz surge, desta maneira, como uma grande alternativa de sistema de comunicação móvel, podendo estabelecer serviços VoIP, canal de interatividade da TV digital, *videostreaming*, entre outros. É, também, possível aliado no processo de inclusão digital de locais distantes dos centros urbanos, por meio da capacidade de prover acesso banda larga com a cobertura de áreas remotas.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

O WiMax 700 MHz, utilizando BTS com antenas SISO, mostrou-se superior ao WiMax 2,5 GHz em termos de dimensionamento. Fato justificado pela melhor propagação do sinal nos diferentes tipos de região estabelecidos neste projeto. A otimização da taxa de transmissão, por meio de sistemas SIMO (*single input, multiple output*) e MIMO (*multiple input, multiple output*), na faixa de operação de 700 MHz, constitui um leque de possibilidades para estudos futuros.

REFERÊNCIAS

- [1] MARQUES, M. *Instituto Eldorado desenvolve WiMAX para operação em frequência de UHF*. [S.l.], 2009. Disponível em <<http://www.telecomonline.com.br/noticias/instituto-eldorado-desenvolve-wimax-para-operacao-em-frequencia-de-uhf/>> Acesso em: 25 de novembro de 2009.
- [2] WiMAX Forum. *Projects Over 800 Million People to Have Access to Next-Generation WiMAX Networks by 2010*. [S.l.], February 2009. Disponível em <<http://www.wimaxforum.org/node/644>> Acesso em: 20 de novembro de 2009.
- [3] FERNANDES, I. *WiMAX*. [S.l.]. Disponível em <<http://paginas.fe.up.pt/~ee99207/Tecnologias/WMAN/WIMAX.html>>.
- [4] NOW, I. *WiMAX no Brasil*. [S.l.], 2009. Disponível em <http://idgnow.uol.com.br/galerias/wimax_exemplos/> Acesso em: 28 de agosto de 2009.
- [5] ZMOGINSKI, F. *Embratel conclui redes WiMAX em 12 cidades*. [S.l.], March 2008. Disponível em <<http://info.abril.com.br/aberto/infonews/032008/19032008-18.shl>> eem<\url{http://www.oficinadanet.com.br/noticias_web/1639/embratel_lanca_wimax_em_porto_alegre}> Acesso em: 19 de novembro de 2009.
- [6] DECRETO Presidencial No. 4.901. [S.l.].
- [7] RIBEIRO, J. P. *Introdução à TV Digital, Funcionamento do sistema e suas aplicações*. [S.l.], 2009. Disponível em <<http://www.stb.ind.br/catalogos/Apostila\%20TV\%20Digital\%20ver1.2.pdf>> Acesso em: 15 de outubro de 2009.
- [8] Kwang-Cheng Chen, José Roberto B. de Marca. *Mobile WiMAX*. [S.l.]: Wiley, 2008.
- [9] PAPOULIS, A. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. [S.l.]: McGraw Hill.
- [10] MOURA, F. A. L. de A. *Estimativa do número de estações radio base para a implantação do WiMax no DF*. 2009.
- [11] WIKIPEDIA. *Manhattan*. [S.l.]. Disponível em <<http://en.wikipedia.org/wiki/Manhattan>>.

- [12] GDF. [S.l.]. Disponível em <<http://www.gdf.gov.br/>>.
- [13] GRAY, D. A comparative analysis of mobile wimax deployment alternatives in the access network. *WiMax FORUM*, May 2007.
- [14] A Comparative Analysis of Spectrum Alternatives for WiMAX Networks with Deployment Scenarios Based on the U.S. 700 MHz Band. *WiMax FORUM*, June 2008.
- [15] WiMaxForum. Mobile WiMAX Part1 Overview and Performance. August 2006.
- [16] Fan Wang, Amitava Ghosh, Chandy Sankaran, Philip J Fleming, Frank Hsieh, and Stanley J. Benes. Mobile wimax systems: Performance and evolution. *IEEE Communications Magazine*, October 2008.
- [17] FIGUEIREDO, F. L. *Fundamentos da Tecnologia WiMAX*. [S.l.]. Disponível em <http://www.cpqd.com.br/file.upload/sas1437_tecnologia_wimax_port_v02.pdf>Acesso em: 3 de setembro de 2009.
- [18] SAUNDERS, S. R.; ZAVALA, A. A. *Antennas and Propagation for Wireless Communication System*. [S.l.]: John Wiley & Sons LTDA, 2007.
- [19] DAMOSSO, E. Digital mobile radio towards future generation systems. *COST 231 Final Report*.
- [20] MELONI, L. G. P. Return channel for the brazilian digital television system-terrestrial.
- [21] RINNE, J. Cost-231 path-loss models. *Tampere University of Technology - Institute of Communications Engineering*, 2003.
- [22] WIMAXFORUM. Position paper for wimax technology in the 700 mhz band. *WiMax FORUM*, March 2008.