

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**Proposta de uma rede de acesso banda larga sem fio
rural padrão IEEE 802.16**

Abadio dos Reis Silva Leite

Uberlândia – 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Proposta de uma rede de acesso banda larga sem fio
rural padrão IEEE 802.16**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Ciências, submetida em 01 de
Março de 2013 a banca examinadora:

Paulo Roberto Guardieiro, Dr. – Orientador (UFU)
Márcio Andrey Teixeira, Dr. (IFSP)
Éderson Rosa da Silva, Dr. (UFU)

Proposta de uma rede de acesso banda larga sem fio rural padrão IEEE 802.16

Abadio dos Reis Silva Leite

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Prof. Paulo Roberto Guardieiro, Dr.
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

Dedicatória

Dedico esse trabalho em memoria de meus pais Sebastião Vicente Leite e Luzia da Silva Leite, que com certeza lá do céu puderam acompanhar a minha luta para chegar até aqui e com muita saudade que não tenho palavras para descrever. Sinto muito a falta de vocês. Que o grande Arquiteto do Universo possa sempre dar luz para vocês.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus a oportunidade de chegar até aqui com vida, saúde e acima de tudo com muita paz, até a conclusão desse trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Guardieiro pela paciência, confiança, incentivo, pelo valioso aprendizado que me proporcionou ao longo desse trabalho, tenha certeza de que jamais o esquecerei que Deus continue iluminando sempre o seu caminho e de toda a sua família.

Aos meus Pais que já não estão mais aqui na terra, rezo todas as noites agradecendo a Deus, pois de onde estiverem, estarão sempre perto de mim.

Ao meu irmão Lazaro dos Reis Leite, pelo incentivo e apoio.

A minha querida e amada esposa Regina Beatriz Lopes Leite, peço desculpas pelo tempo que estive ausente, e quero do fundo do meu coração agradecer a paciência e compreensão, sabendo do quanto é importante para mim esse título de mestre.

Ao meu filho e companheiro flamenguista Luccas Lopes Leite, quero pedir desculpas pelo que deixei de fazer com você esses anos, porém um dia tenho a certeza que vai me compreender, pois todo esse sacrifício foi visando proporcionar dias melhores para você.

Aos professores da UFU (Universidade Federal de Uberlândia), em especial Edgard Lamonier e Alexandre Cardoso, o meu muito obrigado, que Deus lhe dê muita saúde para continuarem suas caminhadas.

Ao IFTM (Instituto Federal do Triângulo Mineiro), pela parceria entre UFU x IFTM, sem ela não poderia ter chegado até aqui.

Ao amigo J. R. Smolka sou eterno agradecido, que o Grande Arquiteto do Universo possa dar a você muitos anos de vida.

Aos colegas do MINTER, Alexandre, Camilo, Deusdete, Ernani, Frederico, Jairo, Leonice, Mauro, Reginaldo, José Ricardo, Weverson, José Flávio, Einar e a Raquel, pela ótima convivência, pelos trabalhos até altas madrugadas, sábados, domingos, feriados e também com boas risadas, muito obrigado a todos.

Ao prof. William Alexandre Manzam, agradeço o tempo dedicado a coordenação do MINTER, pela humildade, seriedade, serenidade e transparência nas reuniões.

Aos colegas do Laboratório de Redes, pela ótima convivência durante esta caminhada, pelos almoços juntos, as boas risadas, as preocupações, muito obrigado a vocês.

Aos Irmãos da loja Maçonica Sete Colinas de Uberaba-MG, pelo incentivo e apoio.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

"A amizade deveria ser algo completamente sem interesses, como nossos olhos. Eles piscam juntos, eles se movem juntos, eles choram juntos, eles veem coisas juntos e eles dormem juntos, embora eles nunca vejam um ao outro estão sempre juntos..." (Fernando Toscano, "adaptado").

Resumo

Leite, A. R. S., Proposta de uma rede de acesso banda larga sem fio rural padrão 802.16, UFU, Uberlândia, Brasil, 2013, 104p.

Nos últimos anos, as tecnologias de redes de acesso banda larga sem fio com integração de dados, vídeo e voz estavam limitadas em relação à distância, QoS (*Quality of Service*) e largura de banda, principalmente em áreas desprovidas de infraestrutura e de difícil acesso, como o meio rural. O padrão IEEE 802.16 foi criado para prover conectividade em banda larga sem fio para usuários fixos e móveis em uma ampla área de cobertura com altas taxas de transferência de dados, procurando solucionar as barreiras encontradas nas tecnologias anteriores, permitindo taxas de transferência de dados de até 1 Gbps para usuários fixos e 100 Mbps para usuários móveis e QoS para as aplicações. Neste trabalho propõe-se uma rede de acesso banda larga sem fio rural padrão IEEE 802.16, destinada ao atendimento dos requisitos de comunicação de uma comunidade rural modelo. O planejamento desta rede de acesso permitiu definir uma comunidade rural que servirá de modelo para outras comunidades com características parecidas. O *Site-Survey* permitiu a coleta de dados e as informações necessárias para o dimensionamento de cobertura e capacidade para determinar a quantidade de BSs necessárias para cobrir a área especificada e o levantamento de demanda permitiu determinar a quantidade de SSs. Em função das SSs apontadas, levantou-se a demanda por largura de banda para atendimento às aplicações dos usuários no PBH (*Peak Busy Hour*).

Palavras-chave: IEEE 802.16, WiMAX, Rede de Acesso Rural, Dimensionamento e Planejamento.

Abstract

Leite, A. R. S., *Proposal for a communal rural wireless network broadband access in 802.16 standard*, UFU, Uberlândia, Brasil, 2013, 104p.

In recent years, the wireless network technologies of broadband access with integrated data, video and voice were limited in relation to distance, QoS (Quality of Service) and bandwidth, especially in areas with lack of infrastructure and difficult access, such as rural. The IEEE 802.16 standard was created to provide broadband connectivity to wireless fixed and mobile users in a wide coverage area with high rates of data transfer, also seeking to address the barriers found in previous technologies, promising data transfer rates of up to 1 Gbps for fixed users and 100 Mbps for mobile users and QoS for those applications. This paper aims to highlight the IEEE 802.16 standard features and also to present a proposal for an wireless rural broadband network access IEEE 802.16 standard, designed to meet communication requirements of a rural community model. The planning allowed to define a rural community that will serve as a model for other communities with similar characteristics. The Site-Survey enabled the collecting of data and information needed to adequate coverage and to determine the amount of BSs needed to cover the specified area, and the mapping of demand to determine the SSs quantity. In terms of the highlighted SS's, the demand for bandwidth to meet the user applications in PBH (*Peak Busy Hour*) was mapped.

Keywords: IEEE 802.16, WiMAX, Rural Access Network, Sizing and Planning.

Sumário

Lista de Figuras.....	xiv
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Abreviaturas e Siglas	xvii
1 - INTRODUÇÃO.....	21
2 - O PADRÃO IEEE 802.16	27
2.1 Introdução	27
2.2 A evolução do padrão IEEE 802.16	28
2.3 Topologias do padrão 802.16.....	31
2.3.1 Topologia Ponto-Multiponto	31
2.3.2 Topologia em malha ou mesh.....	32
2.4 Modelo de Referência.....	33
2.4.1 Camada Física.....	33
2.4.1.1 Especificação WirelessMAN-SC PHY.....	34
2.4.1.2 Especificação WirelessMAN-SCa PHY	34
2.4.1.3 Especificação WirelessMAN-OFDM PHY	35
2.4.1.4 Especificação WirelessMAN-OFDMA PHY	35
2.4.1.5 Especificação High-speed Unlicensed MAN (HUMAN).....	36
2.4.1.6 Técnicas de Duplexação	36
2.4.1.6.1 Técnica de Duplexação por Divisão do Tempo	36
2.4.1.6.2 Técnica de Duplexação por Divisão de Frequência.....	37
2.4.1.7 Multiplexação.....	37
2.4.1.7.1 FDM - Multiplexação por Divisão de Frequência	38

2.4.1.7.2	OFDM-Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal	38
2.4.1.8	Tipos de Antenas	38
2.4.1.8.1	Antena - Tecnologia SISO	40
2.4.1.8.2	Antena - Tecnologia MIMO.....	41
2.4.1.8.3	Antena - Tecnologia SIMO	41
2.4.1.8.4	Antena - Tecnologia MISO	42
2.4.1.9	Propagação	42
2.4.1.9.1	Propagação NLOS	43
2.4.1.9.2	Propagação LOS	44
2.4.2	Camada MAC	45
2.4.2.1	Subcamada de Convergência Especifica	46
2.4.2.2	Subcamada de Convergência Comum.....	46
2.4.2.3	Subcamada de Segurança.....	48
2.4.2.4	QoS – Qualidade de Serviço	49
2.4.2.4.1	Classe UGS.....	49
2.4.2.4.2	Classe rtPS.....	50
2.4.2.4.3	Classe ertPS	50
2.4.2.4.4	Classe nrtpS.....	50
2.4.2.4.5	Classe BE	51
2.4.2.5	Escalonamento de Pacotes	51
2.4.2.6	CAC - Controle de Admissão de Conexões.....	51
2.5	Considerações Finais	52
3 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O PLANEJAMENTO DE REDES WIMAX	54	

3.1	Introdução	54
3.2	Características das Áreas Urbana, Suburbana e Rural	56
3.3	Análise de <i>link budget</i>	58
3.3.1	Link budget – <i>Downlink</i>	59
3.3.2	Link budget – <i>Uplink</i>	60
3.4	Cálculo do Raio Teórico	61
3.4.1	Cálculo da perda no espaço livre	63
3.4.2	Cálculo da correção de frequência de operação	63
3.4.3	Cálculo da correção de altura da antena receptora	63
3.4.4	Cálculo da perda do caminho em função da altura da antena transmissora...	64
3.4.5	Cálculo do máximo throughput teórico.....	65
3.4.6	Cálculo da máxima eficiência espectral.....	68
3.4.7	Cálculo da capacidade do canal e da relação sinal/ruído	69
3.5	Cálculo do Raio em Função da Modulação e SNR	73
3.6	Considerações finais	77

4 - ESTUDO DE CASO: PROPOSTA DE UMA REDE DE ACESSO BANDA LARGA SEM FIO RURAL PADRÃO IEEE 802.16 79

4.1	Introdução	79
4.2	Definição do Cenário de Implantação	80
4.3	Definições de Aplicações e largura de banda no PBH	81
4.4	Escolha de Frequência de operação.....	82
4.5	Dimensionamento (da BS) para Cobertura.....	82
4.6	Dimensionamento (da BS) para capacidade	83
4.7	O <i>Backhaul</i>	84

4.8 Dimensionamento do ASN-GW	87
4.9 Projeto de Rede	90
4.10 A ferramenta (<i>software</i>) TEA/WiMAX.....	92
4.11 Considerações finais	96
5 - CONCLUSÕES GERAIS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

Lista de Figuras

Figura 1 - Banda Larga nos domicílios brasileiros [22].....	24
Figura 2 - Modo de operação PMP (adaptado de [06]).....	31
Figura 3 - Modo de operação em mesh (adaptado de [06]).....	32
Figura 4 - Modelo de referência do padrão IEEE 802.16 (adaptado de [03]).....	33
Figura 5 - Eficiência espectral da técnica OFDM (adaptado de [07]).....	35
Figura 6 - Modo de duplexação – TDD – (adaptado de [9]).....	36
Figura 7 - Modelo de duplexação FDD – (adaptado de [9]).....	37
Figura 8 - Feixes das Antenas [15].	39
Figura 9 - Tecnologia SISO (adaptado de [11]).	41
Figura 10 - Tecnologia MIMO (adaptado de [11]).	41
Figura 11 - Tecnologia SIMO (adaptado de [11]).	41
Figura 12 - Tecnologia MISO (adaptado de [11]).	42
Figura 13 - Circuito com LOS e zona de liberação de Fresnel (adapatado de [25]).	45
Figura 14 - Modelo de Referência de protocolo WiMAX - (adaptado de [07]).....	46
Figura 15 - <i>Throughput</i> na camada física do WiMAX	68
Figura 16 - Eficiência espectral do WiMAX.....	68
Figura 17 - <i>Throughput</i> x distância (BW = 05 MHz)	76
Figura 18 – <i>Throughput</i> x distância (BW = 10 MHz)	76
Figura 19 - <i>Throughput</i> x distância (BW = 15 MHz).	77
Figura 20 - <i>Throughput</i> x distância (BW = 20 MHz)	77
Figura 21 - Localização da comunidade rural modelo.....	80
Figura 22 - Arquitetura de rede WiMAX (adaptado de [61])	89
Figura 23 - Processo de planejamento (adaptado de [72]).....	90

Figura 24 - Topologia adotada na comunidade rural modelo (adaptado de [67])	92
Figura 25 – Logomarca da empresa TEA/WiMAX [78].	93
Figura 26 – Área da comunidade rural modelo definida e dimensionada.....	94
Figura 27 - Resultado do cálculo do <i>link budget – Uplink</i>	94
Figura 28 - <i>Throughput</i> (Mbps) para a largura de banda de 10 MHz.....	95
Figura 29 - Quantidade de BS dimensionada para atender a comunidade rural modelo.....	96

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características das regiões demográficas (adaptado de [62]).....	57
Tabela 2 - Valores dos parâmetros para o <i>link budget</i> de <i>downlink</i> (adaptado de [65], [75])..	60
Tabela 3 - Valores dos parâmetros para o <i>link budget</i> de <i>uplink</i> (adaptado de [65], [75]).....	60
Tabela 4 - Parâmetros dos terrenos [07].....	62
Tabela 5 - Valores calculados no <i>link budget</i>	64
Tabela 6 - Largura de banda e subportadoras WiMAX (adaptado de [65]).....	65
Tabela 7 - Capacidade de bits por símbolo das modulações utilizadas (adaptado de [65])....	65
Tabela 8 - <i>Throughput</i> para a largura de banda de 5 MHz.	66
Tabela 9 - <i>Throughput</i> para a largura de banda de 10 MHz.....	67
Tabela 10 - <i>Throughput</i> para a largura de banda de 15 MHz.....	67
Tabela 11 - <i>Throughput</i> para a largura de banda de 20 MHz.....	67
Tabela 12 - Taxa de código de modulação.....	70
Tabela 13 – Taxa de códigos, <i>throughput</i> para a largura de banda de 5 MHz.....	70
Tabela 14 - Taxa de códigos, <i>throughput</i> para a largura de banda de 10 MHz.....	71
Tabela 15 - Taxa de códigos, <i>throughput</i> para a largura de banda de 15 MHz.....	71
Tabela 16 - Taxa de códigos, <i>throughput</i> para a largura de banda de 20 MHz.....	72
Tabela 17 - SNR requerida para modulações e taxa de códigos.	73
Tabela 18 – <i>Throughput</i> requerido para as respectivas modulações e taxas de códigos.	74
Tabela 19 - Valores dos parâmetros para o <i>link budget</i> de <i>uplink</i> (adaptado de [65]).	74
Tabela 20 - Raio de atuação das modulações e as taxas de códigos (MCS).	75
Tabela 21 – Aplicação e largura de banda WiMAX [34] [63]	81
Tabela 22 - <i>Throughput</i> dimensionado para o limite com SNR de 1,43 dB.....	84
Tabela 23 - Parâmetros para o dimensionamento do ASN–GW (adaptado de [66]).....	88

Lista de Abreviaturas e Siglas

ASN	<i>Access Service Network</i>
ASN-GW	<i>Access Service Network-Gateway</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BE	<i>Best Effort</i>
BER	<i>Bit error rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BS	<i>Base Station</i>
BWA	<i>Broadband Wireless Access</i>
CAC	<i>Connection Admission Control</i>
CI	<i>CRC Indicator</i>
CID	<i>Connection Identifier</i>
CPE	<i>Customer-premises equipment</i>
CSN	<i>Connectivity Service Network</i>
DAMA	<i>Demand Assigned Multiple Access</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
DL	<i>Downlink</i>
DL-MAP	<i>Downlink Map</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
ERTPS	<i>Extended Real-Time Polling Service</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>

FUSC	<i>Full Usage of Subchannels</i>
HTTPS	<i>HyperText Transfer Protocol Secure</i>
GHz	<i>Gigahertz</i>
HUMAN	<i>High-speed Unlicensed MAN</i>
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPTV	<i>Internet Protocol television</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
Km	Quilômetro
Km ²	Quilômetro quadrado
LAN	<i>Local Area Network</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MAC-PDU	<i>Media Access Control - Protocol Data Unit</i>
MAC-SDU	<i>Media Access Control - Service Data Unit</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MAPL	<i>Maximum Allowable Path Loss</i>
Mbps	<i>Mega Bits Per Second</i>
MCS	<i>Modulation Coding Scheme</i>
MIB	<i>Management Information Base</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>
MPEG	<i>Moving Pictures Experts Group</i>
MS	<i>Mobile Station</i>

NLOS	<i>No line of Sight</i>
NRTPS	<i>Non Real-Time Polling Service</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
P2P	<i>Peer to Peer</i>
PBH	<i>Peak Busy Hour</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
PHS	<i>Packet Header Supression</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PME	<i>Small and Medium Business</i>
PUSC	<i>Partial Usage of Subcarries</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
rtPS	<i>Real Time Polling Service</i>
SC	<i>Single Carrier</i>
SCa	<i>Single Carrier Adaptive</i>
SDU	<i>Service Data Unit</i>
SFID	<i>Service Flow Identifier</i>
SIMO	<i>Single Input Multiple Output</i>
SISO	<i>Single-Input Single-Output</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>

SOHO	<i>Small office/home office</i>
SS	<i>Subscriber Station</i>
SUI	<i>Stanford University Interim</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UGS	<i>Unsolicited Grant Service</i>
UL	<i>Uplink</i>
UL-MAP	<i>Uplink Map</i>
UL-DL	<i>Uplink - Downlink</i>
VoIP	<i>Voice Over Internet Protocol</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos percebeu-se um crescimento da oferta de aplicações multimídia, tais como as aplicações de áudio e vídeo e isso tem provocado uma grande demanda por redes de acesso banda larga sem fio, também denominadas redes BWA (*Broadband Wireless Access*).

Em 1999, foi criado por um grupo específico do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), o grupo de trabalho IEEE 802.16, com a intenção de padronizar as redes sem fio banda larga. O padrão IEEE 802.16, teve sua primeira versão aprovada em dezembro de 2001, seguida por três novas versões, chamadas de: 802.16a, 802.16b e 802.16c. As novas versões abordavam, respectivamente, problemas relacionados com o espectro de frequências, a QoS (*Quality of Service*) e a interoperabilidade com outras redes.

Em junho de 2001 foi formado o WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) Forum, sendo uma organização sem fins lucrativos formada para promover e certificar compatibilidade e interoperabilidade para equipamentos de rede de acesso sem fio em banda larga, que estejam em conformidade com o padrão IEEE 802.16. Sua função principal é certificar equipamentos industriais e produtos comerciais que estejam em conformidade, além de promover o uso desta tecnologia. Dentre seus mais de 230 membros destacam-se empresas como a Intel, Ericsson, Motorola, France Telecom e Microsoft [04].

Em setembro de 2003 foi lançada a primeira revisão do projeto IEEE 802.16, focando maior conformidade com os aspectos do padrão e maior detalhamento de especificações de teste. A revisão foi chamada de IEEE 802.16 REVd . O documento final do projeto IEEE 802.16 foi concluído e lançado em 2004 com suas versões "a", "b" e "c". No entanto, algumas versões foram autorizadas desde então, como por exemplo, a versão IEEE 802.16e, que inclui o suporte à mobilidade ao padrão IEEE 802.16, concluída em 2005 e lançada em

fevereiro de 2006. A versão foi chamada de IEEE 802.16-2005, na qual o novo padrão permite conectividade fixa, nômade, portável e móvel sem a necessidade de visada direta com uma BS (estação base). E também a versão IEEE 802.16m, ratificada em Maio de 2011, onde as taxas de transmissão podem chegar a 100 Mbps para usuários móveis e 01 Gbps para usuários fixos.

O WiMAX foi desenvolvido para atender as necessidades de acesso fixo, móvel e de banda larga para a última milha, serviço este que atualmente é atendido por conexões com fio, que usam a infraestrutura da rede telefônica, de TV a cabo ou especializada. Porém, estas conexões não atendem mais o mundo dos negócios que está cada vez mais rápido, e dinâmico, e principalmente, as zonas rurais [04].

De modo simplificado, o WiMAX utiliza estações rádio-base, de forma semelhante à de telefonia celular, que transmite o sinal aos terminais de assinantes que, por sua vez, utilizam um equipamento especializado para a recepção do sinal, que pode ficar, por exemplo, no alto (telhado) de uma casa ou de um prédio, ao lado do computador de mesa, ou até mesmo embutido em notebooks ou dispositivos portáteis, onde também podem ser utilizadas placas e adaptação.

Essa não é a única tecnologia que permite acesso sem fio à Internet, é possível acessar também através da popular tecnologia *WiFi* (*Wireless Fidelity*). O WiMAX tem como principal diferencial o alcance: enquanto o *WiFi* provê conexões de curto alcance, da ordem de dezenas de metros, o alcance do WiMAX é da ordem de quilômetros. Em uma rede *WiFi* para se cobrir grandes áreas, é necessária a instalação de diversos pontos de acesso, interligados entre si usando cabeamento tradicional [37].

O WiMAX incorpora diversos avanços tecnológicos, sendo capaz de atender melhor a diferentes requisitos de tráfego garantindo qualidade na transmissão de voz, vídeo e de segurança, bem como os requisitos de transmissão em ambientes metropolitanos.

Não se pode pensar que o WiMAX é o substituto do *WiFi*, no entanto cada tecnologia tem melhor desempenho em função da aplicação, com o *WiFi* sendo mais adequado para situações que exigem conectividade local e de curto alcance. Porém estas duas tecnologias que parecem tão similares podem se complementar, com o WiMAX interligando os pontos de acesso *WiFi* em grandes áreas, juntando a conveniência do *WiFi* com o alcance do WiMAX.

O WiMAX não necessita de instalação de cabos, por isso diminui o tempo de instalação bem como os investimentos necessários para que as operadoras possam disponibilizar o serviço, oferecendo concorrência acirrada contra as operadoras de serviço com fio. Também permite que o serviço de banda larga seja ofertado em lugares não atendidos atualmente por ser economicamente inviável ou de alto custo, tais como regiões rurais, remotas e com pouca densidade de usuários [06].

Além das aplicações convencionais já citadas, ao se explorarem os diferenciais da tecnologia, é possível visualizar aplicações inovadoras de multimídia em dispositivos especializados ou integrados nos dispositivos móveis tradicionais (notebooks, palmtops, celulares) que demandem taxas de transmissão mais altas. A mobilidade e alcance do WiMAX permitem que tais aplicações sejam utilizadas em qualquer lugar coberto pelo serviço, ao contrário do *WiFi*, que exige que se esteja próximo a um ponto de acesso.

O acesso a Internet de banda larga atualmente é considerada um aspecto importante e estratégico para as empresas, residências, profissionais autônomos, a classe médica, o setor universitário educacional e o pequeno produtor, entre outros [01]. Além do aumento da qualidade de vida, com as melhorias em cada lar, a Internet por meio da banda larga tem um forte impacto econômico. Entretanto, ainda existe um fosso digital entre o urbano e o rural. Isso implica dizer que mais de 75 milhões de famílias e empresas não possuem acesso satisfatório à Internet. No Brasil essa exclusão digital é principalmente causada pelas

restrições econômicas, porque o desenvolvimento e a implementação de redes de banda larga com fio, especialmente no meio rural, é dispendiosa [02].

Na verdade, os usuários em zonas rurais estão enfrentando uma desvantagem de acesso de banda larga cada vez maior em relação a seus pares urbanos. Existe certa preocupação que esta dessemelhança pode se acentuar cada vez mais, e contribuir para o aumento da exclusão digital, inclusive a evasão dos moradores do meio rural.

Nas últimas décadas, o meio rural sofreu profundas alterações, em que os pequenos produtores tiveram que se adaptar a mudanças nas formas de produção, de comercialização e, até mesmo, de relações sociais, que implicam a necessidade de aderir a inovações tecnológicas, rever a gestão das propriedades e adequar-se à visão empresarial de administração do negócio agrícola. Diante desse contexto, a difusão da tecnologia da informação e comunicação, especialmente a Internet, tornou-se uma necessidade para o meio rural, tanto quanto para o urbano, objetivando atender à demanda por conhecimento e informações atualizadas e constantes[51].

A Figura 1 mostra a evolução da banda larga nos domicílios brasileiros ao longo dos anos. Além disso, esta figura ilustra que nos domicílios rurais apenas 6% da população rural possui acesso e 94% não possui acesso a Internet.

Banda larga nos domicílios brasileiros

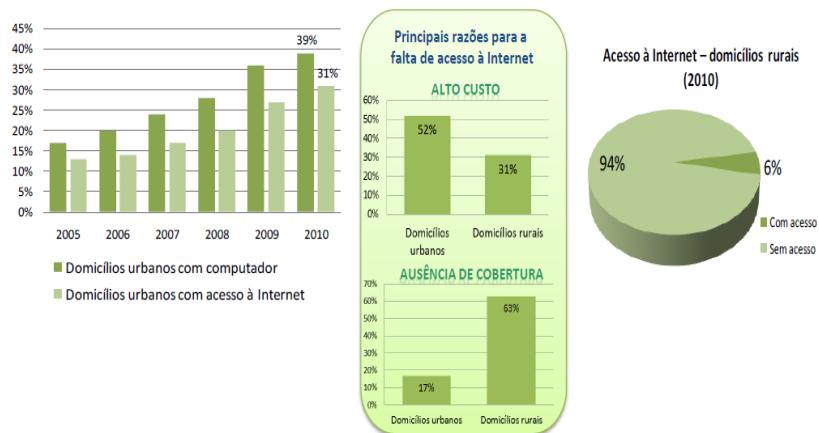


Figura 1 - Banda larga nos domicílios brasileiros [22].

Nessa perspectiva, segundo o Comitê Gestor da Internet no Brasil, a redução efetiva de exclusão digital por meio de investimentos em conectividade não se limita à ajuda em equipamentos, mas abrange uma série de esforços e serviços basilares para o desenvolvimento humano na era digital. Dessa forma, o desafio principal da conectividade é a integração das populações com menos recursos e geograficamente marginalizadas em relação ao processo de desenvolvimento nacional e regional no contexto da sociedade do conhecimento [05].

Neste contexto, apresenta-se uma proposta que visa atender uma comunidade rural, localizada a 12 km do meio urbano, comunidade esta que apresenta características típicas de muitas outras comunidades rurais brasileiras, assim sendo, ela é considerada como modelo de comunidade rural, pois outras comunidades com características parecidas poderão implementar suas redes baseadas neste modelo, fazendo apenas alguns pequenos ajustes. Quanto à infraestrutura a comunidade rural modelo não possui nenhum tipo de acesso à conectividade, sendo muito importante a rede de banda larga no dia a dia desta comunidade de pequenos produtores, por exemplo: na pesquisa de preço, compra de insumos, divulgação dos eventos, vendas de seus produtos pela Internet, emissão de notas fiscais, acesso aos serviços bancários, previsão do tempo, sistema de telefonia, televisão, videoconferência, realização de cursos à distância, participação em treinamentos e outros [16]. Em vista disso, o presente trabalho apresenta uma proposta de planejamento e dimensionamento de uma rede de acesso banda larga rural sem fio padrão IEEE 802.16.

O restante da dissertação está organizado como descrito a seguir.

No Capítulo 2 são apresentadas as principais características do padrão IEEE 802.16 no que diz respeito à arquitetura, modos de operação e modelo de referência. De inicio apresenta-se um breve histórico sobre toda a evolução da família de padrões do IEEE 802.16, desde a primeira versão até os dias atuais. Em seguida as arquiteturas, de ponto-multiponto e em malha são descritas de maneira resumidas. A camada Física é apresentada destacando-se as

técnicas de duplexação, multiplexação, tipos de antenas e propagação. A camada MAC (controle de acesso ao meio) é também abordada, apresentando-se as camadas e as classes de qualidade de serviço.

No Capítulo 3 apresentam-se as considerações gerais sobre a implantação de redes WiMAX no padrão IEEE 802.16. Inicialmente apresenta-se uma introdução ao planejamento de redes WiMAX. Em seguida abordam-se as características das áreas urbana, suburbana e rural e a análise de *link budget*, o capítulo é finalizado com as considerações finais.

No Capítulo 4 apresenta-se um estudo de caso para uma proposta de uma rede de acesso banda larga sem fio rural no padrão IEEE 802.16. Inicialmente na Seção 4.2 apresenta-se a definição do cenário de implantação. Posteriormente na Seção 4.3 abordam-se as definições de aplicações e a largura de banda no PBH¹. Na Seção 4.4 aborda-se a escolha da frequência de operação. Na Seção 4.5 é tratado o dimensionamento da BS para cobertura. Posteriormente na Seção 4.6 descreve-se sobre o dimensionamento da BS para capacidade. Na Seção seguinte 4.7 aborda-se sobre o *Backhaul*. Na Seção 4.8 descreve-se sobre o dimensionamento do ASN-GW. Na Seção 4.9 aborda-se sobre o projeto de rede e, finalizando, na Seção 4.10 aborda-se uma ferramenta (*software*) TEA/WiMAX para automatizar o processo de dimensionamento. Na Seção 4.11 abordam-se as considerações finais.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais relacionadas a este trabalho, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

PBH¹ - (*Peak Busy Hour*) é o período de 60 minutos durante o intervalo que ocorre a carga máxima de tráfego total em um dado período de 24 horas [69].

Capítulo 2

O PADRÃO IEEE 802.16

2.1 Introdução

O padrão IEEE 802.16 também conhecido por WiMAX, evidencia um novo paradigma em relação ao modo de trafegar dados em alta velocidade, vídeo e voz sobre redes sem fios [03], a um custo de implantação relativamente baixo, sobretudo em regiões sem infraestrutura, a exemplo do meio rural, onde os custos para instalação de rede cabeada é bastante oneroso [68].

Trata-se de uma norma para ligação de Internet sem fios que está se tornando cada vez mais popular para as comunicações ponto a ponto e ponto multiponto, pois permite a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes [49]. A primeira versão deste padrão foi aprovada em Janeiro de 2003. Naturalmente, antes do IEEE 802.16 já existiam vários projetos de redes sem fios, a maioria utilizando equipamentos 802.11b (*WiFi*) e antenas de ganhos elevados. Ainda assim, as distâncias não superavam poucos quilômetros, fazendo com que fossem necessários vários repetidores intermediários para atingir distâncias maiores. A partir de certo limite, a única opção são as transmissões via satélite, bem mais dispendiosas [42].

Nessa linha de pensamento, de acordo com o Comitê Gestor da Internet no Brasil, a redução efetiva da exclusão digital por meio de investimentos em conectividade não se reduz a investir em equipamentos, mas abrange uma série de esforços e serviços essenciais para o desenvolvimento humano na era digital. De fato, o desafio central da conectividade é a integração dos indivíduos com baixo poder aquisitivo, especialmente excluídos em relação ao processo de desenvolvimento urbano no contexto da sociedade do conhecimento [5].

Diante do exposto, a finalidade do presente capítulo é apresentar a estrutura geral do padrão IEEE 802.16, incluindo, na Seção 2.2 a evolução do padrão IEEE 802.16. Em seguida, na Seção 2.3, é apresentada a topologia do padrão IEEE 802.16, seguida da Seção 2.4 que trata do modelo de referência e, finalmente na Seção 2.5 as considerações finais são realizadas.

2.2 A evolução do padrão IEEE 802.16

A evolução do padrão IEEE 802.16 ao longo dos últimos anos, conforme descrição das versões relacionadas abaixo [40], [41]:

Versão: 802.16

Ano: 2001

Principais características da versão: o padrão destaca-se pela linha de visada LOS (*Line of Sight*), operação no modo PMP (*Point-to-multipoint*), definição da camada MAC (*Media Access Control*), camada Física e pela frequência de 10 a 66 GHz.

Versão: 802.16a

Ano: 2003

Principais características da versão: o padrão destaca-se pela operação sem linha de visada NLOS (*No line of Sight*), mudança na camada MAC e da camada Física para poder operar entre as frequências de 02 a 11 GHz.

Versão: 802.16b

Ano: 2003

Principais características da versão: o padrão foi abandonado pelo grupo de trabalho do IEEE.

Versão: 802.16c

Ano: 2002

Principais características da versão: foram feitas adequações ao espectro de frequência entre 2 a 66 GHz, para LOS e NLOS.

Versão: 802.16d

Ano: 2003

Principais características da versão: foram feitas revisões nas versões: 802.16, 802.16a e 802.16c.

Versão: 802.16-2004

Ano: 2004

Principais características da versão: foram incorporadas à camada física. As técnicas OFDM, OFDMA e suporte às antenas MIMO.

Versão: 802.16e-2005

Ano: 2005

Principais características da versão: suporte à mobilidade e à operação combinada entre estações móveis e fixas, melhoramento da camada OFDMA, incorporação de novas operações de *handover* e aprimoramento dos aspectos relacionados à mobilidade.

Versão: 802.16f

Ano: 2005

Principais características da versão: definição da MIB (*Management Information Base*) para a camada MAC e camada PHY.

Versão: 802.16g

Ano: 2007

Principais características da versão: definição de um plano de gerenciamento e procedimentos.

Versão: 802.16h

Ano: 2010

Principais características da versão: aperfeiçoamento das operações em faixas de frequências não licenciadas.

Versão: 802.16j

Ano: 2009

Principais características da versão: estações com capacidade de retransmissão.

Versão: 802.16-2009

Ano: 2009

Principais características da versão: possibilidade das SSs operarem no modo *Half-duplex*, refinamento das operações envolvendo mobilidade e o FDD em OFDMA.

Versão: 802.16m

Ano: 2007

Principais características da versão: uso de OFDMA em ambos os sentidos *downlink* e *uplink*, novos esquemas de subcanalização (*overhead* menor) e a introdução de um super quadro que permite um rápido acesso ao enlace [44].

2.3 Topologias do padrão 802.16

O padrão IEEE 802.16 especifica dois modos de como as SSs vão se comunicar na rede, sendo o mais tradicional o PMP (Ponto-Multiponto), além do modo de operação em *Mesh* (malha), os quais serão detalhados em seguida [06].

2.3.1 Topologia Ponto-Multiponto

O padrão IEEE 802.16 foi projetado para ser uma opção de rede de acesso mais viável, ou seja, com melhor custo benefício em relação às principais tecnologias cabeadas, especialmente em regiões onde não há infraestrutura e os custos para implantação de uma rede são bastante onerosos [60].

Nesse sentido, o padrão define que o modo PMP consiste de uma BS ligada a uma ou várias estações SSs. Nesse tipo de operação todas as SSs recebem a mesma transmissão da BS e as transmissões feitas pelas SSs são diretamente direcionadas para a BS. Esta é o ponto central que controla toda a comunicação, configurando-se no único ponto de falha da rede, pois caso apresente algum problema todas as SSs ficarão impossibilitadas de se comunicar. A BS deve ser posicionada num ponto estratégico, para fornecer alcance para várias SSs simultaneamente [06], conforme mostra a Figura 2.

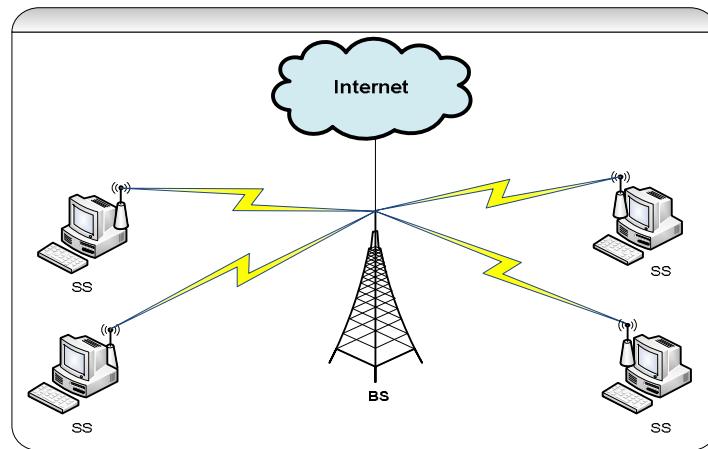


Figura 2 - Modo de operação PMP (adaptado de [06]).

No modo PMP, as SSs de um determinado setor recebe, por meio da BS, o mesmo sinal enviado em broadcast, porém apenas uma SS poderá capturar e processar os pacotes enviados, os outros pacotes são descartados, o que torna a rede leve em termos de *software* [06].

2.3.2 Topologia em malha ou *mesh*

Nessa topologia, o modo foi projetado para que uma SS possa se comunicar com outra SS sem a intervenção da BS. Porém estas SSs devem ser providas tanto em nível de *hardware* como de *software* como as BSs (PMP), dessa maneira as estações são dinamicamente autoconfiguradas e precisam adotar a arquitetura *ad hoc*, o que torna o processo de comunicação mais complexo. Nesse modelo, as SSs apresentam-se como uma alternativa para roteamento de tráfego na célula. Essa topologia exige algoritmos de roteamento complexos e operam sem a necessidade de um ponto central [06], conforme mostra a Figura 3.

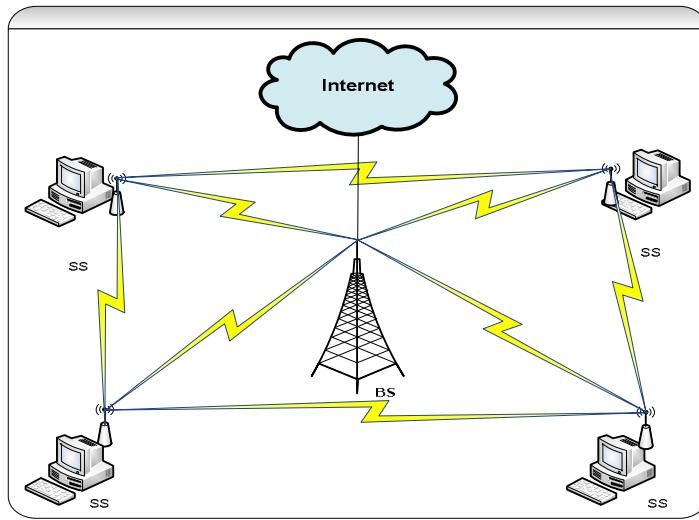


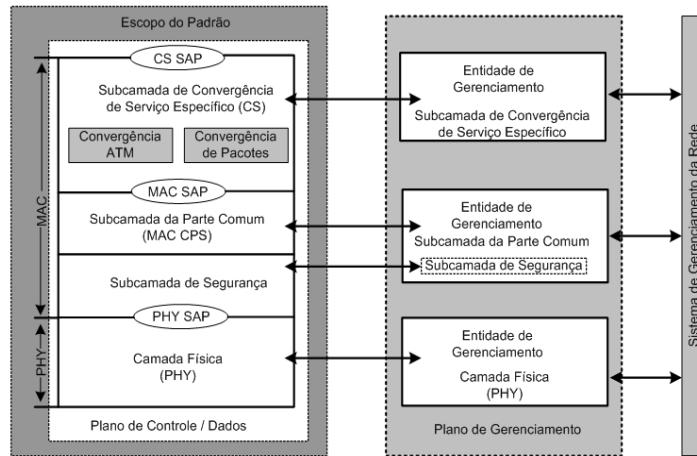
Figura 3 - Modo de operação em mesh (adaptado de [06]).

No entanto, a topologia se mostra mais adequada para os atuais sistemas de comunicações sem fio, sendo que não impõe limitações quanto à posição das estações e não requerem equipamentos adicionais para um bom funcionamento em qualquer ambiente [28].

2.4 Modelo de Referência

O padrão 802.16 está fundamentado no modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) da ISO (*International Organization for Standardization*) que apresenta uma estrutura em camadas. O padrão especifica duas camadas sendo: a camada Física (*PHY – Physical Layer*) e a camada MAC (*Media Access Control*), para possibilitar o acesso a Internet em banda larga sem fio [36].

Além disso, o modelo apresenta três planos distintos para que sejam organizadas as funções dentro dessas camadas, onde temos: o plano de dados, plano de controle e plano de gerenciamento. O plano de dados é executado automaticamente pela rede, onde é definido como as informações dos usuários devem ser transportadas na rede. O plano de controle é também executado automaticamente pela rede, onde se tem como função, o balanceamento de carga e o controle de congestionamento. O plano de gerenciamento está a cargo do administrador da rede onde pode ser controlada a função de monitoramento dos parâmetros da rede [07]. A Figura 4 ilustra o modelo de referência do padrão IEEE 802.16 e seus três planos.



2.4.1 Camada Física

A função principal da camada física (*PHY*) é transportar os dados do usuário, na forma

de bits, entre os nós adjacentes da rede. Essa camada deve conter funções para codificar os bits dos usuários em formato adequado para a transmissão no meio sem fio.

Para a transmissão no meio físico, o padrão IEEE 802.16 define cinco especificações no que diz respeito à utilização do espectro de frequência: *Single Carrier* (SC), *Single Carrier A* (SCa), *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e *High-speed UnlicensedMAN (HUMAN)* [07], as quais são especificadas abaixo.

2.4.1.1 Especificação WirelessMAN-SC PHY

Este modelo foi desenvolvido para operar entre as frequências de 10 GHz a 66 GHz, com uma portadora única. Assim, possui boa flexibilidade, o que facilita o planejamento de células. Devido a sua frequência elevada, necessita que exista linha de visada entre as estações e que sejam utilizadas antenas direcionais na SS [43]. Podem ser utilizados quatro tipos de modulações: BPSK, QPSK, 16-QAM e 64 QAM, o que proporciona vários estágios de robustez e desempenho durante as rajadas. O *downlink* é baseado no TDM e o *uplink* em uma combinação de TDMA (*Time Division Multiple Access*) e o acesso múltiplo sob demanda (*DAMA – Demand Assigned Multiple Access*) [07].

2.4.1.2 Especificação WirelessMAN-SCa PHY

Esse modelo foi desenvolvido com tecnologia de portadora única e utiliza frequências abaixo de 11 GHz, para possibilitar transmissões fora de linha de visada. Além disso, é necessário existir o suporte de pelo menos um tipo de duplexação: FDD ou TDD. O *uplink* utiliza TDMA, e o *downlink* utiliza TDM ou TDMA. As modulações utilizadas são: *Spread BPSK*, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM, sendo a última opcional [07].

2.4.1.3 Especificação WirelessMAN-OFDM PHY

Este modelo foi desenvolvido para comunicação fora de linha de visada, utilizando frequências abaixo de 11 GHz e FTT (*Fast Fourier Transform*) com 256 portadoras [59]. No domínio de frequência, existem três tipos de subportadoras: para transmissão de dados; pilotos, (utilizadas em estimativas) e nulas, que não estão transmitindo no momento, utilizadas como bandas guarda, subportadoras inativas, ou subportadoras. As modulações utilizadas por este padrão são BPSK, QPSK com mapeamento de *Gray*, 16-QAM e 64-QAM (opcional em bandas que não precisam de licenciamento). A Figura 5 mostra a eficiência da técnica OFDM [07].

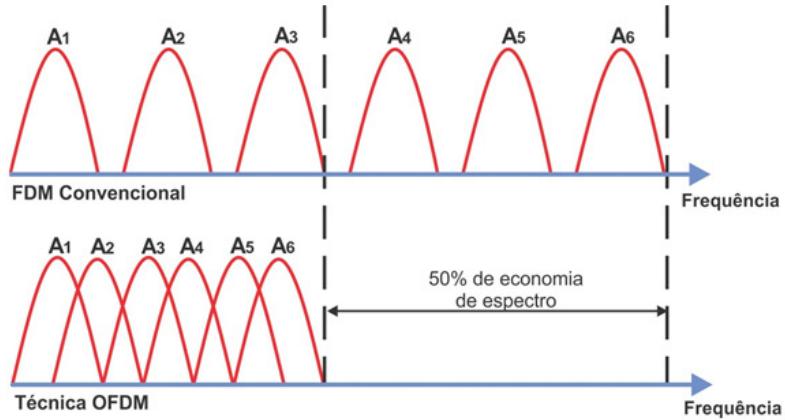


Figura 5 - Eficiência espectral da técnica OFDM (adaptado de [07]).

2.4.1.4 Especificação WirelessMAN-OFDMA PHY

Este modelo é multiusuário derivado do OFDM e foi desenvolvido para comunicação fora de linha de visada, utilizando frequências abaixo de 11 GHz e FTT (*Fast Fourier Transform*) com 2048 portadoras. O acesso a vários usuários é provido atribuindo um subconjunto de subportadoras para cada SS. A SS pode alocar quantidades diferentes de subportadoras, dessa forma, consegue-se taxas de transmissão e regras de QoS independente para cada SS [07].

2.4.1.5 Especificação *High-speed Unlicensed MAN (HUMAN)*

Este modelo é semelhante ao WirelessMAN-OFDM, designado para operar em bandas não licenciadas e modo de operação exclusivo TDD [07].

2.4.1.6 Técnicas de Duplexação

O padrão IEEE 802.16 especifica duas técnicas de duplexação para acesso ao meio físico. A primeira técnica é a duplexação por divisão do tempo TDD (*Time Division Duplexing*) e a segunda é a duplexação por divisão de frequência FDD (*Frequency Division Duplexing*) [08].

2.4.1.6.1 Técnica de Duplexação por Divisão do Tempo

Na duplexação por divisão do tempo (TDD) é utilizada a mesma frequência para tráfego de *downlink* e *uplink* e existe uma alternância entre a transmissão dos frames. Uma cota de tempo é destinada a transmissão de frames no canal de *downlink*, quando essa cota termina é dada a mesma cota de tempo para transmissão de frames no canal de *uplink* (simula uma comunicação full-duplex) e assim por diante. Uma vantagem sobre a FDD é a possibilidade de alocação do espectro em blocos adjacentes, o que facilita as operações do *hardware*. A Figura 6 mostra o modo de duplexação TDD.

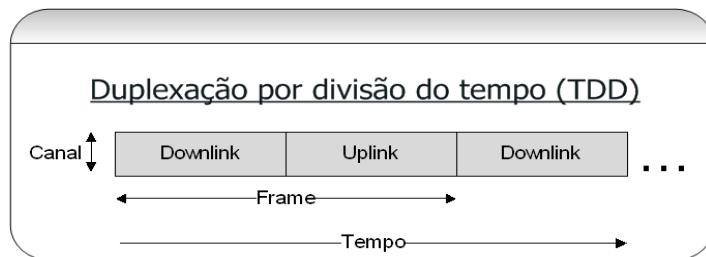


Figura 6 - Modo de duplexação – TDD – (adaptado de [9]).

2.4.1.6.2 Técnica de Duplexação por Divisão de Frequência

A duplexação por divisão de frequência (FDD) requer duas faixas de frequências separadas, uma para *downlink* e outra para *uplink*, sendo uma para cada direção, geralmente de 50 a 100 MHz, porém as transmissões são realizadas simultaneamente [9], conforme mostra a Figura 7.

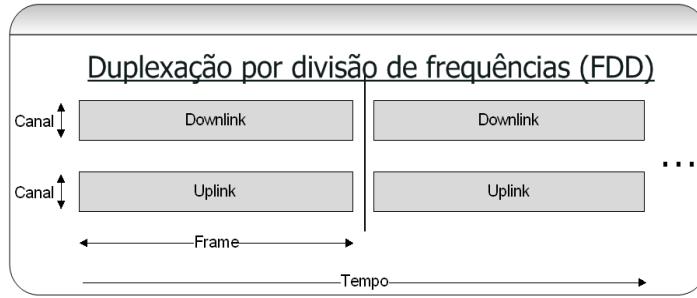


Figura 7 - Modelo de duplexação FDD – (adaptado de [9]).

2.4.1.7 Multiplexação

Multiplexação é uma técnica usada para colocar múltiplos sinais em um único canal de comunicação. Nesse caso, existem muitas estratégias para multiplexação, incluindo multiplexação por divisão por frequência, multiplexação por divisão de tempo, multiplexação estatística, multiplexação por acesso a demanda, multiplexação por divisão de comprimento de onda, acesso múltiplo a divisão de código e multiplexação inversa [44].

Toda vez que ocorre uma comunicação sem linha de visada, o padrão 802.16d utiliza um protocolo de multiplexação dos sinais a serem enviados. Antes de o sinal ser enviado do emissor para o receptor ocorre a multiplexação, que é um processo que possibilita que vários sinais sejam enviados ao mesmo tempo em um mesmo canal.

A multiplexação FDM (Multiplexação por Divisão de Frequência) não é utilizada pelo padrão 802.16d pelo fato dessa técnica esperar que um sinal seja totalmente transmitido para que em seguida o outro sinal possa ser enviado para o receptor [44].

O protocolo OFDM (Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal) é utilizado pelo padrão 802.16 e trabalha com sobreposição espectral de subportadoras sem que estas interferem umas às outras [10].

2.4.1.7.1 FDM - Multiplexação por Divisão de Frequência

Nessa técnica ocorre uma partição da faixa de frequência de transmissão disponível em faixas menores, cada uma tornando-se um canal separado. A ideia por traz da FDM é dividir a frequência principal em sub-frequências, cada uma ajustada para a largura de banda de dados a serem transportadas por ela. Com isso a FDM é econômica e eficiente, tendo como exemplo a transmissão usada por emissoras de televisão [10].

2.4.1.7.2 OFDM-Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal

A técnica de modulação OFDM consiste em modular um grande número de portadoras de banda estreita ortogonais, distribuídas lado a lado, de forma que uma não interfira na outra. Apesar do alto número de canais que um transmissor/receptor deve ser capaz de sintonizar, a pequena largura de cada canal torna possível considerar os transdutores lineares, facilitando sua implementação. Esse tipo de modulação oferece grande adaptabilidade ao sistema, pois é possível suprimir portadoras interferentes ou interferidas ou variar o carregamento (número de bits) de cada portadora de acordo com a relação sinal ruído ou atenuação do enlace. Esse sistema necessita de amplificadores altamente lineares sob pena das portadoras provocarem interferências [10].

2.4.1.8 Tipos de Antenas

As tecnologias de antenas inteligentes se baseiam em algoritmos para o processamento dos sinais provenientes de múltiplos elementos constituintes do conjunto de antenas, objetivando melhorar a relação entre sinal e ruído associada a uma estação terminal.

Caracteristicamente, esses algoritmos envolvem operações com vetores ou matrizes complexas associadas à caracterização do canal e à combinação e ponderação de sinais, provenientes ou transmitidos pelos elementos do conjunto de antenas.

A tecnologia OFDMA se mostra adequada à implementação de antenas inteligentes, uma vez que as subportadoras encontram-se sujeitas a desvanecimento que pode ser caracterizado como sendo plano. Essa propriedade, além de eliminar a necessidade de equalizadores complexos para compensar o efeito do desvanecimento seletivo, facilita a caracterização das condições de propagação de um subconjunto de subportadoras. Desse modo, o esquema OFDMA é bastante apropriado a tecnologias de antenas inteligentes, facilitando sua implementação [11].

As antenas usadas em modelos de redes sem fio dividem-se em direcionais e omnidirecionais [14], conforme Figura 8.

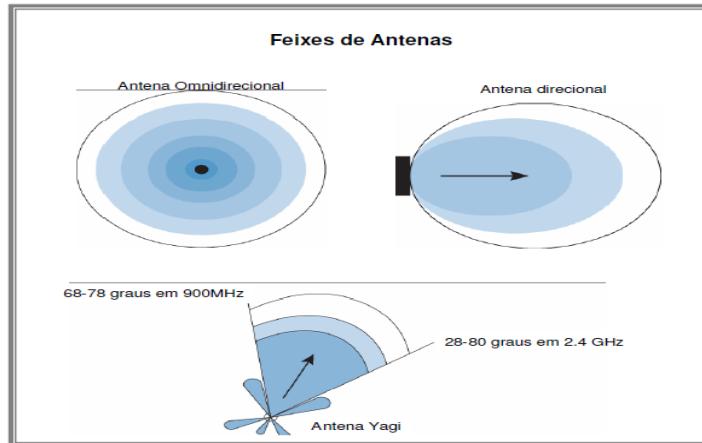


Figura 8 - Feixes das Antenas [15].

Antenas Direcionais: As antenas direcionais transmitem o sinal de maneira mais eficaz em algumas direções do que em outras. O feixe do sinal pode cobrir um setor que vai de 5 a 90 graus, enquanto que as antenas omnidirecionais cobrem 360 graus. Podemos classificar as antenas direcionais em semidirecionais e altamente direcionais, conforme o ganho e a concentração do feixe de transmissão. Estas antenas são específicas para levar

sinais a longas distâncias, ou seja, o foco do sinal tem uma direção específica, enviando o sinal a uma certa zona de cobertura, ou seja, um ângulo determinado. São conhecidas como setorizadas e parabólicas [14]:

- Setorizadas: são antenas projetas para dividir a área de cobertura circular em setores, com o ângulo de abrangência que pode ser de 30°, 60°, 90°, ou 120° graus, a fim de facilitar a alocação e o reuso. Geralmente as antenas setorizadas são utilizadas em arquitetura ponto multipontos [45].
- Parabólicas: são antenas usadas principalmente em transmissões via satélite.

Antenas Semidirecionais: Há vários tipos de antenas semidirecionais. Uma antena semidirecional tem pelo menos o dobro do alcance de uma antena omnidirecional. A antena mais utilizada para ligações metropolitanas é a antena *Yagi*, inventada pelo japonês *Hidetsugu Yagi*. Antenas semidirecionais podem ampliar em até 10 vezes o alcance de antenas comuns omnidirecionais. Estas são as mais utilizadas para aplicações que visam estender as redes wireless LAN [14].

Antenas Altamente Direcionais: Quando se deseja formar uma rede metropolitana, antenas semidirecionais não são normalmente suficientes para atingir as distâncias exigidas. Para estas necessidades são utilizadas antenas de alto ganho, com feixes extremamente estreitos, em média 10 graus. Antenas utilizadas para este fim têm forma de discos que concentram o feixe do sinal ou utilizam refletores parabólicos. Os refletores normalmente são acoplados a antenas semidirecionais, que são instaladas no foco da parábola. O sinal é concentrado pelo refletor, formando feixes extremamente estreitos [14].

2.4.1.8.1 Antena - Tecnologia SISO

O recurso SISO (*single-input single-output*) é uma tecnologia sem fio que utiliza uma antena transmissora e uma antena receptora para transferir dados, conforme mostra a Figura 9.

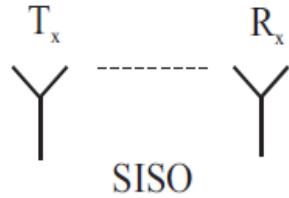


Figura 9 - Tecnologia SISO (adaptado de [11]).

2.4.1.8.2 Antena - Tecnologia MIMO

O recurso MIMO (*multiple-input multiple-output*) é uma tecnologia sem fio que utiliza várias antenas transmissoras e várias antenas receptoras para transferirem mais dados ao mesmo tempo, conforme mostra a Figura 10.

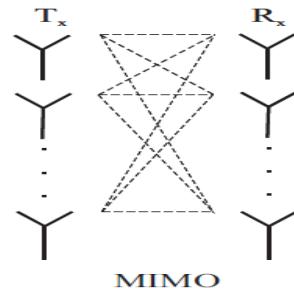


Figura 10 - Tecnologia MIMO (adaptado de [11]).

2.4.1.8.3 Antena - Tecnologia SIMO

O recurso SIMO (*single-input multiple-output*) é uma tecnologia sem fio que utiliza uma antena transmissora e várias antenas receptoras para transferir dados, conforme mostra a Figura 11.

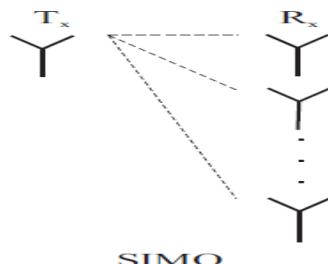


Figura 11 - Tecnologia SIMO (adaptado de [11]).

2.4.1.8.4 Antena - Tecnologia MISO

O recurso MISO (*multiple-input single-output*) é uma tecnologia sem fio que utiliza várias antenas transmissoras e uma antena receptora para transferir dados, conforme a Figura 12.

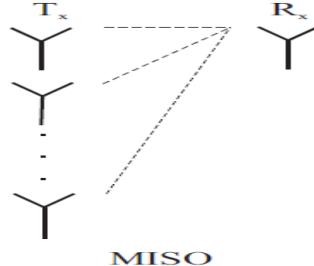


Figura 12 - Tecnologia MISO (adaptado de [11]).

2.4.1.9 Propagação

Qualquer dimensionamento de sistemas de comunicações sem fio depende, primordialmente, da adequada escolha de modelo de propagação. Basicamente, as três grandes categorias de modelos são [23]:

- Modelos empíricos: elaborados com base no resultado de campanhas de medidas realizadas em determinados tipos de ambientes e para faixas específicas de valores de parâmetros (alturas de antenas, frequências, etc.). Os modelos empíricos costumam apresentar relativa facilidade e rapidez na computação, porém geram resultados tão melhores quanto mais se aproximar a região de projeto da região de medições, para obtenção do modelo [24];
- Modelos semiempíricos: produzidos também com base em medidas de campo, mas suas equações guardam relação com modelos canônicos de propagação. Como exemplo, há modelos semiempíricos fundamentados na diminuição de espaço livre, em que a dependência com a frequência e distância é da mesma

forma, mas a constante aditiva é diferente, obtida por campanha de medições em determinada faixa de parâmetros [29];

- Modelos teóricos: criados com base em embasamentos meramente teóricos.

São muito usados no cálculo de enlaces ponto a ponto, incluindo a atenuação de espaço livre e formas de se considerar efeitos de difração e reflexão no terreno [19].

Ressalta-se que os canais para comunicação sem fio são geralmente descritos sendo com linha de visada (LOS) ou sem linha de visada (NLOS). Ao se considerar o padrão IEEE 802.16 nas suas primeiras tentativas, o alcance máximo estava entre 03 e 10 km, não condizendo com a determinação do padrão [58]. Esse alcance máximo se deve às frequências utilizadas no padrão inicial, ou seja, de 10 a 66 GHz. Nas frequências as ondas são incapazes de ultrapassarem obstáculos como, por exemplo, as estruturas de concreto, o que obrigava a comunicação com linha de visada, ou seja, o sistema transmissor-receptor precisa estar instalado em linha reta, e sem obstáculos entre os equipamentos de transmissão e recepção [13].

Nos últimos anos, houve um avanço bem expressivo a respeito dos modos de propagação e aos efeitos que os meios exercem sobre as características das ondas eletromagnéticas. Um exemplo é a utilização de frequência abaixo de 11 GHz, que integrou ao padrão a possibilidade de operar sem linha de visada, onde são permitidos obstáculos entre os equipamentos transmissores e receptores [24].

2.4.1.9.1 Propagação NLOS

Nesse arranjo, serão refletidos e difratados os sinais que forem transmitidos pelo circuito sem linha de visada. Dessa forma, os sinais que chegam ao receptor consistem em componentes do sinal enviado originalmente, já que tais sinais chegam por meio de caminhos diferentes o que causa atraso no tempo de chegada de alguns sinais componentes do sinal

original. Além de serem percebidas atenuações, polarizações e instabilidades relativas ao caminho original [65].

O fenômeno dos caminhos múltiplos pode inverter a polarização do sinal. A polarização invertida é, por vezes, utilizada como reuso de frequência em ambientes LOS, isto pode ser problemático para aplicações NLOS. Desse modo, não se deve utilizar a inversão de polarização como técnica de reuso de frequências para sistemas sem linha de visada [30].

Como os sistemas de rádio utilizam o mesmo esquema de caminhos múltiplos, esta vantagem parece ser a chave para comunicação sem linha de visada [12]. Isso porque há diferentes vantagens na utilização de sistema NLOS. Questões como exigências de projeto e restrições de altura frequentemente não permitem que as antenas LOS sejam posicionadas para NLOS. Em sistemas celulares extensos, em que o reuso de frequência é crítico, baixar a antena é vantajoso para reduzir interferências em co-canais de células adjacentes [25].

Contudo, baixar demais as antenas obriga as BSs a operarem sem linha de visada. Nesse sentido, não se torna viável reduzir consideravelmente as alturas das antenas das BSs de um sistema LOS, uma vez que encobriria a linha de visada exigida da SS para a BS.

2.4.1.9.2 Propagação LOS

Em um circuito LOS, o sinal trafega sobre um caminho direto e desobstruído. Um circuito LOS requer que o máximo da primeira zona de Fresnel esteja livre de qualquer obstrução. Se esse critério não for obedecido há uma queda significativa no sinal transmitido, dificultando sua recepção. A liberação necessária da zona de Fresnel depende da frequência operacional e da distância entre o transmissor e o receptor [25]. A Figura 13 mostra circuito com LOS e zona de liberação de Fresnel.

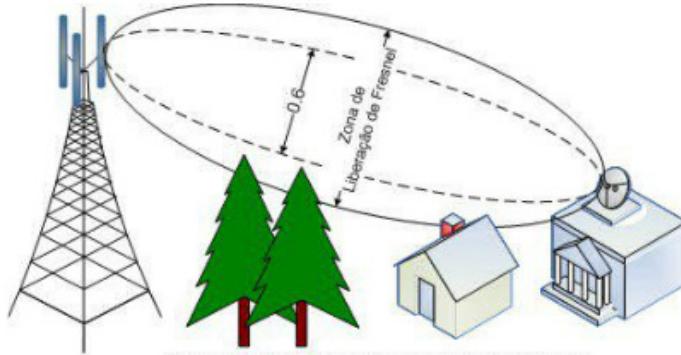


Figura 13 - Circuito com LOS e zona de liberação de Fresnel [25].

Uma vantagem da utilização de canal sem linha de visada é a redução de despesas de instalação da BS e a facilidade para a escolha adequada do local onde a BS será montada [31].

2.4.2 Camada MAC

A camada MAC tem a finalidade de prover a inteligência para a camada PHY, assegurando que os níveis de serviços ajustados sejam cumpridos, configurando os parâmetros de QoS. Essas funcionalidades não são encontradas em outros padrões de redes sem fio e foram projetadas para aplicações de banda larga sem fio ponto-multiponto [33].

A camada MAC tem a responsabilidade de adaptar o tráfego de outras tecnologias para a rede WiMAX, adaptar a transmissão em função do meio, multiplexar os fluxos de tráfego, escalonar e alocar dinamicamente recursos para os fluxos e oferecer suporte à segurança de comunicação [50].

Dividida em 03 subcamadas, a Subcamada de Convergência Específica, a Subcamada de Convergência Comum e a Subcamada de Segurança, dentre outras funcionalidades, são responsáveis por transportar os protocolos IP, PPP, Ethernet; oferecer suporte à camada física; inicializar as estações; oferecer suporte à qualidade de serviço, segurança e integridade dos fluxos. A Figura 14 mostra a camada MAC, do modelo de referência do padrão.

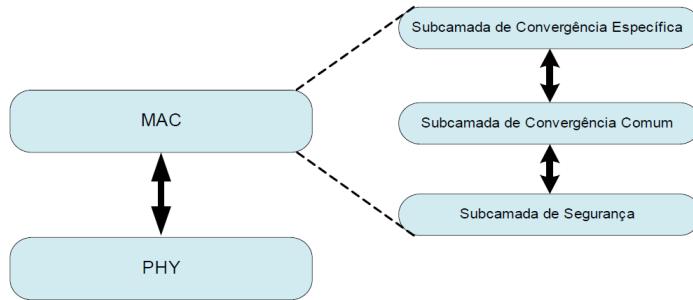


Figura 14 - Modelo de Referência de protocolo WiMAX - (adaptado de [07]).

2.4.2.1 Subcamada de Convergência Específica

Esta subcamada é responsável por realizar a convergência de outras tecnologias para os padrões IEEE 802.16. Como exemplo, a ATM CS é responsável por associar diferentes serviços ATM e suportar as convergências geradas em redes ATM aos PDUs WiMAX. A *Packet CS* utiliza PDUs WiMAX para transportar outros protocolos, como IP, PPP e *Ethernet*. O encapsulamento de outras tecnologias aos padrões IEEE 802.16 é sua principal função.

Ressalta-se que o serviço da subcamada de convergência específica provê transformações ou mapeamentos de dados de redes externas. Isto inclui classificação das SDUs de redes externas e associação com o próprio fluxo de serviço identificado pelo CID. Um fluxo de serviço é um fluxo unidirecional de pacotes aprovisionados com parâmetros particulares de QoS [07].

2.4.2.2 Subcamada de Convergência Comum

A Subcamada de Convergência Comum é responsável por alocar e escalonar, de modo dinâmico, os recursos de transmissão, estabelecer e realizar manutenção das conexões, construir o MAC PDU e oferecer suporte ao ajuste adaptativo das técnicas de transmissão, iniciando e oferecendo suporte à qualidade de serviço das estações.

WiMAX é uma tecnologia orientada à conexão, cujas conexões são identificadas por 16 bits, chamados de CID (*Connection ID*), que identificam e determinam no máximo 64.000

conexões para cada canal *uplink* e *downlink*. Além dos CIDs, cada SS conta com um *MAC ADDRESS* de 48 bits, identificando o equipamento juntamente com o CID.

Essas conexões são organizadas e estabelecidas por meio de 3 conexões básicas, com a meta de garantir a integridade e qualidade do enlace. Essas conexões podem ser iniciadas tanto pela BS quanto pela SS. Entretanto, na maioria das conexões é a SS que inicia a requisição. Essas três conexões, entre a SS e a BS, refletem a existência de 3 níveis de QoS para gerenciamento de tráfego. Para cada fluxo de serviço é definido um SFID. SFID é um identificador de fluxo de serviços que define os parâmetros de QoS associados a cada conexão. Cada fluxo de serviço tem ao menos um SFID e uma direção associada. Cada SFID é identificado com 32 bits [07]. Nesse contexto, a primeira conexão, denominada conexão básica, é utilizada pela BS MAC e SS MAC para trocar mensagens urgentes e pequenas [07]. Essas mensagens são de alta prioridade e não toleram atrasos, pois é neste momento que são medidos a potência e o alcance do sinal, com a finalidade de produzir um perfil do enlace a ser estabelecido. Vale salientar que a comunicação é iniciada com baixa potência e é melhorada gradativamente, se houver necessidade. Assim, a SS envia suas características para a BS, que por sua vez estabelece a conexão e define as características do sinal de acordo com o nível de serviço da estação e do tipo de serviço que irá trafegar. Ajustado o sincronismo por meio das informações trocadas, a BS estabelece a conexão com a SS [32].

A segunda conexão, denominada primária, também serve para o envio de mensagens entre a SS e a BS. Essa conexão é realizada durante a inicialização da SS e empregada para transportar mensagens de gerência da MAC tolerantes a atrasos. Como exemplo, podemos citar a mensagem enviada pela SS para a BS, ao término de um *download* [07].

Existe ainda a conexão secundária, a qual é opcionalmente gerada, para a troca de mensagens com tolerância de atraso, como DHCP e SNMP, e pode ser estabelecida durante a inicialização da SS. Na realidade, quando estabelecida uma conexão, a SS recebe da BS um

UL-MAP (*uplink MAP*), que traz as características do sinal e do ambiente, determinando a modulação que a SS deve utilizar e em que porção do tempo e da frequência os dados serão recebidos e enviados. A BS também recebe da SS um DL-MAP (*downlink MAP*), que também contém as informações e detalhes das características do ambiente gerenciado pela BS.

Periodicamente, a BS monitora a qualidade do enlace estabelecido por meio do RLC (*Radio Link Control*). Esse mecanismo verifica a necessidade de realizar alguma modificação nas configurações do enlace já estabelecidas em função do tráfego e das características ambientais de propagação. Dessa forma, a SS também pode requisitar um perfil mais robusto para sua comunicação [17]. No entanto, é a BS que irá determinar a possibilidade de tal modificação, sendo que tal monitoramento da BS, por meio do RLC, e a possibilidade de pedido da SS têm como principal finalidade garantir a qualidade do fluxo de dados.

2.4.2.2.1 Formato do PDU

Para blocos de tamanho variável, o pacote MAC_PDU será formado por pacotes MAC_SDU de tamanhos variáveis. Para existir a identificação dos pacotes é anexado, a cada MAC_SDU, um cabeçalho de *packing* – PHS (*Packing Header Subheader*), que contempla a informação de início e fim do respectivo pacote [36].

2.4.2.3 Subcamada de Segurança

A Subcamada de Segurança é responsável pela criptografia e autenticação das conexões, protegendo-as contra acessos não autorizados e inseguros. Esta se utiliza de protocolos e algoritmos voltados para o gerenciamento de chaves, necessários para a autenticação na rede e segurança do tráfego. Vale salientar que o IEEE 802.16 recomenda

diretivas de segurança, característica esta não contemplada em outros padrões de redes wireless [53].

2.4.2.4 QoS – Qualidade de Serviço

O padrão IEEE 802.16 vem ao encontro de uma necessidade cada vez mais crescente em prover acesso à banda larga sem fio para longas distâncias, sobretudo em regiões onde a infraestrutura é precária, como por exemplo, zonas rurais ou áreas suburbanas onde os custos para a implantação de redes cabeadas são onerosos. Ademais, por meio da especificação das cinco classes de serviços básicas (UGS, rtPS, nrtPS, ertPS e BE), o padrão é capaz de fornecer suporte a uma ampla variedade de aplicações e ainda prover qualidade de serviço (QoS) aos usuários.

Tendo em vista que os principais mecanismos para a provisão de QoS no padrão IEEE 802.16 estão associados às políticas de escalonamento de pacotes e CAC, e os mesmos não definidos pelo padrão, a provisão de QoS consiste em mecanismos para escalonamento *uplink* e *downlink* e políticas de CAC e policiamento [39].

2.4.2.4.1 Classe UGS

A classe de serviço UGS (*Unsolicited Grant Service*) é destinada a aplicações de tempo real que geram pacotes de dados de tamanho fixo em períodos regulares, como ocorrem na emulação de circuitos E1/T1 e voz sobre o protocolo IP (VoIP) sem supressão de silêncio. O escalonador na BS aloca *grants* periódicos para as SSs transmitirem os dados a fim de atender o requisito de taxa constante e, por esse motivo, as conexões UGS nunca requisitam largura de banda. A quantidade de largura de banda alocada para as conexões UGS é calculada de acordo com a taxa de tráfego mínima reservada definida pelo fluxo de serviço de cada conexão [52].

2.4.2.4.2 Classe rtPS

A classe de serviço rtPS (*Real Time Polling Service*) é destinada a aplicações tempo real que geram pacotes de dados de tamanho variável em períodos regulares, como ocorre na transmissão de vídeo *streaming* com codificação MPEG (*Moving Pictures Experts Group*).

Diferente do que ocorre com as conexões UGS, as conexões rtPS devem informar à BS suas necessidades de largura de banda. Desse modo, a BS deve periodicamente alocar largura de banda para as conexões rtPS solicitarem banda de acordo com seus requisitos. Isso corresponde ao mecanismo de *polling* para requisição de largura de banda. O padrão IEEE 802.16 especifica três variantes de mecanismos de *polling*: *unicast polling*, *multicast polling* e *broadcast polling*. No entanto, somente a *unicast polling* pode ser usada para conexões rtPS [09].

2.4.2.4.3 Classe ertPS

A classe de serviço rtPS-estendida é um novo serviço de escalonamento inserido pelo padrão IEEE 802.16e-2005 [14] para suportar fluxos de serviço de tempo real que geram pacotes de dados de tamanho variável em períodos fixos, tais como aplicações de voz sobre o protocolo IP (VoIP) com supressão de silêncio. Da mesma forma que na classe UGS, a BS provê *grants* para a transmissão dos dados sem a necessidade de mecanismos explícitos para requisição de banda, o qual economiza largura de banda do canal e diminui a latência. Todavia, diferentemente das alocações UGS, nas quais os pacotes são de tamanhos fixos, as alocações ertPS são dinâmicas como no rtPS. Por default tem-se o tamanho das alocações correspondente ao valor corrente da taxa de tráfego máxima sustentável de cada conexão. A SS pode, no entanto, alterar o tamanho da alocação dinamicamente [09].

2.4.2.4.4 Classe nrtPS

A classe de serviço nrtPS (*Non Real-Time Polling Service*) é destinada a aplicações tolerantes a atrasos que necessitam de largura de banda mínima como, por exemplo, transferência de arquivos por FTP (*File Transfer Protocol*). O mecanismo de *polling* também pode ser aplicado para conexões nrtPS, mas diferente da classe rtPS, as conexões nrtPS não empregam necessariamente o *unicast polling*, ou seja, podem ser empregados também *multicast polling* e *broadcast polling*, e o *polling* deve ser regular, porém não necessariamente periódico. Além de solicitar banda em cada intervalo pré-definido de *polling unicast*, nessa classe a BS permite também que as SSs solicitem banda por *piggyback* e/ou mecanismos de contenção ou disputa [26].

2.4.2.4.5 Classe BE

A classe de melhor esforço BE (*Best Effort*) é destinada a aplicações que não possuem requisitos de atraso limitado e não requerem largura de banda garantida. Nessa classe, é realizada solicitação de largura de banda somente por *piggyback* e/ou mecanismos de contenção. Exemplos de aplicações nessa classe incluem tráfego Web e correio eletrônico [26].

2.4.2.5 Escalonamento de Pacotes

Escalonamento de pacotes refere-se ao processo de decisão usado para escolher quais pacotes, armazenados nos *buffers* de transmissão, devem ser servidos ou descartados. Inclui, ainda, a tarefa de resolver o processo de disputa por largura de banda e determinar a alocação de banda de maneira justa entre os usuários [27].

2.4.2.6 CAC - Controle de Admissão de Conexões

Associado aos mecanismos de escalonamento de pacotes, o CAC é outro mecanismo de grande importância para a garantia de QoS no padrão IEEE 802.16. Ele consiste em um

procedimento que visa decidir se uma nova solicitação de conexão deve ou não ser aceita pela rede, levando-se em conta os recursos já alocados para as conexões existentes e os requisitos de QoS para a nova conexão.

Destaca-se que tal decisão não pode ser tomada aleatoriamente, porque o CAC deve ser o mais eficiente possível. Caso a política do controle aceite um número excessivo de conexões, por exemplo, o sistema não terá como garantir a QoS das conexões existentes. Contudo, caso a política admita um número muito pequeno de conexões, pode ocorrer um desperdício dos recursos da rede [35].

Nos últimos anos, mecanismos para CAC tem sido amplamente estudados em redes cabeadas como uma ferramenta essencial para controle de congestionamento e provisão de QoS. No entanto, o problema do CAC em redes sem fio apresenta maior complexidade, em virtude das particularidades existentes no meio físico que incluem interferência de acesso múltiplo, requisições de *handoffs/handover* (quando uma SS móvel muda para outra área de cobertura) e limitação de largura de banda [27].

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo, identificaram-se as principais características da rede de acesso banda larga sem fio no padrão IEEE 802.16. De inicio foi apresentado todo o histórico da evolução do padrão IEEE 802.16, desde o surgimento da primeira versão em 2001 até os dias atuais. Foram mostradas as arquiteturas PMP e mesh, além do modo como ocorre toda a comunicação entre as SSs e a BS. Em seguida aborda-se o modelo de referência, realizando uma especificação detalhada das camadas MAC e Física. As três subcamadas da camada MAC foram descritas em termos das funcionalidades de cada uma, incluindo a interoperabilidade da rede WiMAX com outras redes de natureza diferentes, como por exemplo, a rede de comutação de pacotes, e os aspectos que dizem respeito à segurança. Por

fim, foram apresentadas as principais especificações para a QoS existentes no padrão IEEE 802.16.

Capítulo 3

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O PLANEJAMENTO DE REDES WIMAX

3.1 Introdução

O planejamento de redes WiMAX é um processo contínuo e dinâmico que consiste de um conjunto de ações intencionais, integradas, coordenadas e orientadas para tornar realidade um objetivo, de forma a possibilitar a tomada de decisões antecipadamente. Essas ações devem ser identificadas de modo a permitir que elas sejam executadas de forma adequada.

O planejamento visa obter a maior cobertura de atuação com a menor quantidade de equipamentos, provendo a capacidade de rede necessária para atender a demanda de tráfego dos usuários no PBH.

Para atingir esses objetivos, existem vários estágios a serem realizados, tais como:

- **Definição do cénario de implantação:** O passo inicial de um planejamento de uma rede WiMAX, é a escolha do local para implantação, que deve ser observado e analisado com bastante critério.
- **Definição das áreas de implantação e perfil de usuários:** As áreas de implantação são definidas como: urbana, suburbana e rural, onde cada uma apresenta características próprias. Os perfis de usuários são classificados como: profissional, casual e final. Eles definem as aplicações de rede, onde é levantada pelo projetista a respectiva largura de banda necessária para atendimento da demanda requerida.
- **Dimensionamento da interface de rádio WiMAX:** No planejamento da interface de rádio WiMAX, o objetivo é chegar a uma estimativa do número de BSs para cobrir

uma área especificada. No dimensionamento incluem-se os elementos SS, BS, ASN-GW (*Access Service Network-Gateway*) e CSN (*Connectivity Service Network*) [20].

- **Escolha de frequência de operação:** Um dos aspectos importantes na implantação de uma rede é a escolha de frequência de operação, pois há várias bandas de frequências de operação que podem ser usadas. Cada uma tem características específicas, cujo impacto no desempenho do sistema é significativo [18].
- **Escolha da configuração de antena:** A tecnologia WiMAX oferece várias opções de antenas que melhoram não só o desempenho do sistema, mas também aumentam a área da cobertura e a vazão do canal. O WiMAX móvel suporta soluções de múltiplas antenas de entrada e saída (MIMO) e oferece vantagens como aumento de confiabilidade do sistema, taxas de dados e área de cobertura.
- **Escolha do método de duplexação:** O padrão IEEE 802.16 especifica dois métodos de duplexação, o primeiro é a duplexação por divisão de tempo (*TDD*) e o segundo é duplexação por divisão em frequência (*FDD*).
- **Definição do *backhaul*:** A definição, o planejamento e o dimensionamento do *backhaul* é um estágio importante na estruturação de rede, pois visa atender toda a demanda de transporte de dados, vídeo e voz entre a BS e o ISP local.
- **Definir os mecanismos de QoS (Qualidade de serviço):** Definir os mecanismos de QoS às aplicações de redes.
- **Definir os elementos DHCP e *firewall*:** Definir o DHCP que é um protocolo de serviço TCP/IP que oferece configuração dinâmica de terminais, com concessão de endereços IP de host, máscara de sub-rede, default gateway, número IP de um ou mais servidores DNS. O *firewall* que é um dispositivo de uma rede de computadores e tem por objetivo aplicar uma política de segurança a um determinado ponto da rede. O *firewall* pode ser do tipo filtros de pacotes, *proxy* de aplicações, etc. Os *firewalls* são

geralmente associados a redes TCP/IP, que controla o tráfego de dados entre o computador e a Internet, ou seja, permite somente a transmissão e a recepção de dados autorizados.

Após abordagem dos estágios é possível iniciar-se o planejamento e o dimensionamento de uma rede sem fio banda larga.

Desta forma, este capítulo tem por objetivo descrever as considerações gerais sobre o planejamento de redes WiMAX, e está estruturado da seguinte forma: além desta Seção, na Seção 3.2, apresenta-se as características das áreas urbana, suburbana e rural. Na Seção 3.3, o *link budget* ou orçamento de enlace é usado para determinar a área de cobertura de uma BS e consiste na soma das perdas e ganhos de intensidade de sinal à medida que este se propaga pelo meio físico de transmissão entre o transmissor e receptor. Na Seção 3.4, realizam-se os cálculos do Raio Teórico, tais como: perda no espaço livre, correção de frequência de operação, correção de altura da antena receptora. Na Seção 3.5, realiza-se o cálculo do raio em função da modulação e SNR. Finalizando, na Seção 3.6 apresentam-se as considerações finais.

A seguir apresenta-se as características das áreas de implantação urbana, suburbana e rural.

3.2 Características das Áreas Urbana, Suburbana e Rural

A Tabela 1 a seguir apresenta as características importantes na definição das regiões demográficas, como urbana, suburbana e rural.

Tabela 1 - Características das regiões demográficas (adaptado de [62]).

Área	Características
Urbana	<ul style="list-style-type: none"> • Alta densidade de potenciais usuários de rede WiMAX; • Baixa penetração de mercado, devido à existência de fortes concorrentes; • Presença de vários escritórios e edifícios residenciais; • Presença de operadoras de telecomunicações utilizando o espectro licenciado; • Forte mercado impulsionado pela disponibilidade de tecnologia de acesso.
Suburbana	<ul style="list-style-type: none"> • Densidade moderada de potenciais usuários de rede WiMAX; • Acesso às tecnologias DSL e a <i>cable modem</i>; • Alta possibilidade de penetração de mercado por novas operadoras; • Presença de parques empresariais e shoppings; • Concentração considerável de usuários de computadores; • Possibilidade de implantar células de grande tamanho.
Rural	<ul style="list-style-type: none"> • Agrupamento de pequenos produtores rurais; • Alguns pequenos empresários; • Edificações residenciais e escola da comunidade; • Alta demanda por acesso à Internet e serviços de comunicação; • Baixos níveis de intensidade de tráfego.

A seguir apresenta-se a análise de *Link Budget*, com objetivo de determinar a área de cobertura de uma BS.

3.3 Análise de *link budget*

O orçamento de enlace ou *link budget* é usado para determinar a área de cobertura de uma BS e consiste na soma das perdas e ganhos de intensidade de sinal à medida que este se propaga pelo meio físico de transmissão entre o transmissor e receptor. O *link budget* permite determinar a potência de transmissão requerida, que é capaz de superar as perdas do meio de transmissão para que o receptor tenha potência de sinal recebido satisfatória. Como resultado do *link budget*, a potência de recepção deve ser suficientemente maior do que a potência de ruído para que a taxa de erro de bits (BER) alvo possa ser conseguida. O *link budget* é influenciado por fatores, tais como [64]:

- A sensibilidade do receptor, o nível de potência transmitida, os quais não variam significativamente entre diferentes faixas de freqüência;
- Aqueles que não estão diretamente relacionados com o sistema, mas variam em função das frequências de operação, tais como [64]:
 - *Path Loss*: É a perda de propagação que o sinal de rádiofrequência sofre do transmissor até o receptor. Quanto menor a frequência de operação, menor será a perda e quanto maior a frequência, maior a perda. Na presença de obstáculos, o sinal de radiofrequência pode não ser capaz de ultrapassá-los e requer operação em linha de visada para funcionamento eficiente [48].
 - Ambiente Físico: O espaço físico entre as antenas de transmissão e recepção tem um efeito significativo sobre as perdas introduzidas numa dada frequência de operação, bem como as edificações, estruturas de concreto e de metal [17].

- *Shadow Margin*: A topografia e as edificações tem um impacto significativo na variação dos níveis de potência do sinal recebido.

As características do ambiente urbano, suburbano e rural no qual a rede será instalada, influenciam no resultado do *link budget*, devido às múltiplas reflexões que o sinal propagado irá sofrer.

Os cálculos são realizados para *downlink* e *uplink*, devido à distinção dos parâmetros em cada sentido de transmissão, através da equação (01) conforme abaixo [65], [75]:

$$L = Pt + Gt - Lt - SNR_{requerida} - Sr + Gr - Lr + Gdv - M \quad (01)$$

Onde:

L = Máxima Perda de *Downlink / Uplink*;

Pt = Potência de Transmissão [dBm];

Gt = Ganho da Antena Transmissora [dBi];

Lt = Perdas na Transmissão [dB];

$SNR_{requerida}$ = Relação Sinal Ruído Requerida [dB];

Sr = Sensibilidade Requerida na Recepção [dB];

Gr = Ganho da Antena Receptora [dBi];

Lr = Perdas na Recepção [dB];

Gdv = Ganho de Diversidade [dBi];

M = Margem de Desvanecimento [dB].

A máxima perda encontrada no cálculo do *downlink* e *uplink* será adotada na determinação do raio da célula.

3.3.1 *Link budget – Downlink*

Na Tabela 2 encontram-se os parâmetros necessários e os valores adotados para o cálculo do *link budget* de *downlink*.

Tabela 2 - Valores dos parâmetros para o *link budget* de *downlink* (adaptado de [65], [75]).

Potência de Transmissão	43 dBm
Ganho da Antena Transmissora	18 dBi
Perdas na Transmissão	3 dB
SNR	0 dB
Ganho da Antena Receptora	0 dB
Perdas na Recepção	0 dB
Ganho de Diversidade	0 dB
Margem de Desvanecimento	4 dB
Sensibilidade do receptor	-95,2 dBm

Utilizando a equação (01) e os valores adotados no *link budget* de *downlink* na Tabela 2, calcula-se o valor de L_{DL} (máxima perda de *downlink*) em dB.

$$L_{DL} = 43 \text{ dBm} + 18 \text{ dBi} - 3 \text{ dB} - 0 - (-95,2 \text{ dBm}) + 0 - 0 + 0 - 4 \quad (02)$$

$$\mathbf{L_{DL} = 149,2 \text{ dB}} \quad (03)$$

3.3.2 *Link budget – Uplink*

Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros necessários e os valores adotados para o cálculo do *link budget* de *uplink*.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros para o *link budget* de *uplink* (adaptado de [65], [75]).

Potência de Transmissão	27 dBm
Ganho da Antena Transmissora	6 dBi
Perdas na Transmissão	0 dB
SNR	0 dB
Sensibilidade Requerida Recepção	-110,2 dBm
Ganho da Antena Receptora	18 dBi
Perdas na Recepção	10 dB
Ganho de Diversidade	0 dB
Margem de Desvanecimento	4 dB

Utilizando a equação (01) e os valores adotados no *link budget* de *uplink*, calcula-se o valor de L_{UL} (Máxima perda de *uplink*) em dB:

$$L_{UL} = 27 \text{ dBm} + 6 \text{ dBi} - 0 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - (-110,2 \text{ dBm}) + 18 - 10 + 0 - 4 \quad (04)$$

$$L_{UL} = 147,2 \text{ dB} \quad (05)$$

Analisando os dois resultados finais obtidos (03) e (05), concluímos que a máxima perda de propagação permitida ocorre no *link budget* de *uplink* (05), no qual este valor deverá ser referência para o cálculo do raio teórico da célula.

3.4 Cálculo do Raio Teórico

O planejamento de uma rede banda larga sem fio rural requer uma metodologia de projeto semelhante à utilizada em sistemas celulares, baseada na necessidade de se estimar o raio de cobertura de uma célula através das características do transmissor, do percurso e do receptor. Para esta situação, a predição da área de cobertura é feita através de modelos matemáticos que descrevem a atenuação do sinal (perda de percurso) para uma determinada distância de separação entre o transmissor e receptor. O modelo de propagação teórico é baseado em equações teóricas.

Adota-se o modelo de propagação SUI (*Stanford University Interin*) para determinar a cobertura de rede [75].

O modelo SUI define 3 tipos de terrenos (T1, T2 e T3). O tipo T1 é associado à máxima perda de percurso, sendo apropriada para regiões acidentadas com vegetação de densidade moderada a intensa [21]. O T2 é de certa forma com vegetação de densidade moderada. Já o T3 é apropriado para uma densidade leve de vegetação.

Neste trabalho adota-se o tipo T3, devido à densidade leve da vegetação na região pesquisada. Assim, considerando a equação (06) das perdas de percurso (L) apresentada em [34], tem-se:

$$L = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s \quad (06)$$

Onde d é a distância máxima de atuação em metros, $d > d_0$ visto que $d_0 = 100$ m que representa a distância de referência, A é a perda no espaço livre em dB na distância d_0 . O termo X_f é a correção da frequência, X_h é a correção da altura da antena receptora, s corresponde ao desvanecimento dado pelo tipo de terreno e γ é o expoente de perda do caminho em função da altura da BS. O termo λ na equação (07) representa o comprimento de onda associado à frequência de operação do sistema (adaptado de [75]). Os parâmetros restantes são dados pelas seguintes equações:

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (07)$$

$$X_f = 6 \log\left(\frac{f}{2}\right) \quad (08)$$

em que f representa a frequência de operação em GHz.

$$X_h = -10,8 \log\left(\frac{h}{2}\right), \text{ para terrenos T1 e T2} \quad (09)$$

$$X_h = -20 \log\left(\frac{h}{2}\right), \text{ para terreno T3} \quad (10)$$

$$\gamma = a - b * h_b + \frac{c}{h_b} \quad (11)$$

em que h_b representa a altura da antena na BS em metros, e h representa a altura da antena na SS em metros. Os valores de a , b e c encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros dos terrenos [07].

Parâmetro	Terreno T1	Terreno T2	Terreno T3
a	4,6	4,0	3,6
b (1/m)	0,0075	0,0065	0,005
c (m)	12,6	17,1	20

Neste trabalho adota-se a seguinte configuração:

$$f = 2,4 \text{ GHz};$$

$$h = 3 \text{ m};$$

$$h_b = 45 \text{ m};$$

$$s = 4 \text{ dB}.$$

O valor de $s = 4 \text{ dB}$, foi atribuído de acordo com a referência [65], visto que também foi atribuido para o valor teórico do *downlink* e *uplink*, conforme Tabelas 2 e 3.

Considerando a equação (01) realiza-se abaixo os cálculos de cada parâmetro da referida equação, que são essenciais para o levantamento das perdas de percurso (L).

3.4.1 Cálculo da perda no espaço livre

O cálculo da perda no espaço livre é realizado através da equação (07).

$$A = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 100}{\lambda}\right) \quad (12)$$

$$A = 80,04 \text{ dB} \quad (13)$$

3.4.2 Cálculo da correção de frequência de operação

O cálculo da correção de frequência de operação é realizado através da equação (08).

$$X_f = 6 \log\left(\frac{2,4}{2}\right) \quad (14)$$

$$X_f = 0,47 \text{ dB} \quad (15)$$

3.4.3 Cálculo da correção de altura da antena receptora

O cálculo da correção de altura da antena receptora é realizado por meio da equação (10).

$$X_h = -20 \log\left(\frac{h}{2}\right) \quad (16)$$

$$X_h = -3,52 \text{ dB} \quad (17)$$

3.4.4 Cálculo da perda do caminho em função da altura da antena transmissora

O cálculo da perda do caminho em função da altura da antena transmissora é realizado através da equação (11) e de parâmetros obtidos da Tabela 4. O terreno definido é o tipo T3.

$$\gamma = 3,6 - 0,005 \cdot 45 + \frac{20}{45} \quad (18)$$

$$\gamma = 3,81 \text{ dB} \quad (19)$$

Substituindo valores na equação (06), tem-se:

$$L = 80,04 + (10 \cdot 3,81) \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,47 - 3,52 + 4 \quad (20)$$

Com os valores de (L) calculados nas Seções 3.3.1 (*link budget* de *downlink*) e 3.3.2 (*link budget* de *Uplink*), conforme os resultados demonstrados na Tabela 5 realiza-se o balanceamento do canal utilizando a equação (20) e a maior perda de percurso (L) permitida, 147,20 dB, para a determinação do raio máximo das células.

Tabela 5 - Valores calculados no *link budget*.

<i>Link Budget</i>	Perda de Percurso (L)
<i>Downlink</i>	149,2 dB
<i>Uplink</i>	147,20 dB

Substituindo o resultado da máxima perda de percurso (L) permitida na equação (20), obtém-se o raio (máxima distância de atuação) de uma célula (R):

$$147,20 = 80,04 + (10 \cdot 3,81) \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,47 - 3,52 + 4 \quad (21)$$

$$d = R \cong 5,41 \text{ Km} \quad (22)$$

3.4.5 Cálculo do máximo throughput teórico

O *throughput* da camada física de uma BS pode ser calculado levando-se em consideração o tempo do símbolo, a modulação a ser utilizada na interface aérea (QPSK, 16 QAM e 64 QAM) e o número de subportadoras disponíveis, que está diretamente relacionada à banda adotada no sistema, conforme equação (23) [74].

$$\text{Throughput} = [1/(\text{Tempo de Símbolo})] \times (\text{Nº de Bits}) \times (\text{Nº de Subportadoras}) \quad (23)$$

O tempo de transmissão de um símbolo é de 71,367 µs. Calcula-se o *throughput* na camada física para as bandas de 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz. Desta forma, a quantidade de subportadoras capazes de transportar dados é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Largura de banda e subportadoras WiMAX (adaptado de [65]).

Largura de Banda	Subportadoras
5 MHz	300
10 MHz	600
15 MHz	900
20 MHz	1200

Cada modulação adotada no sistema é capaz de transportar uma quantidade de bits por símbolo, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Capacidade de bits por símbolo das modulações utilizadas (adaptado de [65]).

Modulação	Bits por símbolo
QPSK	2
16 QAM	4
64 QAM	6

Utilizando as informações das Tabelas 6 e 7, e fazendo-se uso da equação (23), é possível determinar o *throughput* para cada modulação e a largura de banda disponível, conforme abaixo.

- 5 MHz e 64 QAM

$$\text{Throughput} = (1/0.000071367) \times 6 \times 300$$

$$\text{Throughput} = 25,2 \text{ Mbps}$$

- 10 MHz e 64 QAM

$$\text{Throughput} = (1/0.000071367) \times 6 \times 600$$

$$\text{Throughput} = 50,4 \text{ Mbps}$$

- 15 MHz e 64 QAM

$$\text{Throughput} = (1/0.000071367) \times 6 \times 900$$

$$\text{Throughput} = 75,7 \text{ Mbps}$$

- 20 MHz e 64 QAM

$$\text{Throughput} = (1/0.000071367) \times 6 \times 1200$$

$$\text{Throughput} = 100,9 \text{ Mbps}$$

Na Tabela 8, encontram-se os valores do *throughput* calculados, fazendo-se uso da equação (23) para a banda de 5 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

Tabela 8 - *Throughput* para a largura de banda de 5 MHz.

Largura de Banda e Modulação	<i>Throughput</i> (Mbps)
5 MHz - QPSK	8,4
5 MHz – 16 QAM	16,8
5 MHz – 64 QAM	25,2

Na Tabela 9, encontram-se os valores do *throughput* calculados, fazendo-se uso da equação (23) para a banda de 10 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

Tabela 9 - *Throughput* para a largura de banda de 10 MHz.

Largura de Banda e Modulação	<i>Throughput</i> (Mbps)
10 MHz - QPSK	16,8
10 MHz – 16 QAM	33,6
10 MHz – 64 QAM	50,4

Na Tabela 10, encontram-se os valores do *throughput* calculados, fazendo-se uso da equação (23) para a banda de 15 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

Tabela 10 - *Throughput* para a largura de banda de 15 MHz.

Largura de Banda e Modulação	<i>Throughput</i> (Mbps)
15 MHz - QPSK	25,2
15 MHz – 16 QAM	50,4
15 MHz – 64 QAM	75,7

Na Tabela 11, encontram-se os valores do *throughput* calculados, fazendo-se uso da equação (23) para a banda de 20 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

Tabela 11 - *Throughput* para a largura de banda de 20 MHz.

Largura de Banda e Modulação	<i>Throughput</i> (Mbps)
20 MHz - QPSK	33,6
20 MHz – 16 QAM	67,3
20 MHz – 64 QAM	100,9

Na Figura 15, encontram-se os valores do máximo *throughput* teórico entre 5 MHz a 20 MHz.

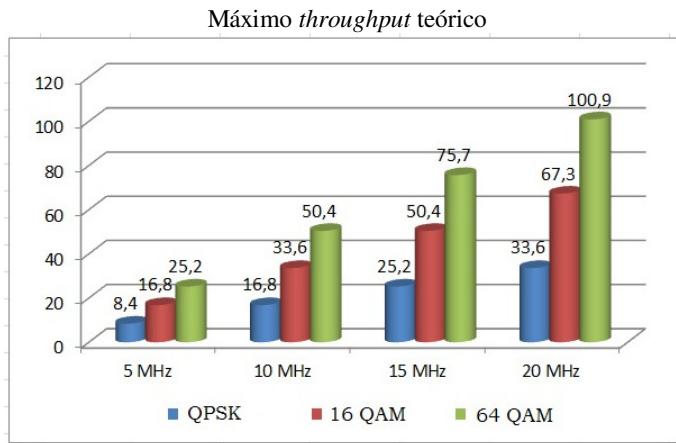


Figura 15 - *Throughput* na camada física do WiMAX

3.4.6 Cálculo da máxima eficiência espectral

A eficiência espectral para cada modulação pode ser calculada através da equação (24), e os resultados são apresentados na Figura 16.

$$\text{Eficiência Espectral} = \text{Throughput} / \text{Largura de banda} \quad (24)$$

Onde:

Eficiência Espectral [bits/seg./hertz];

Throughput [Mbps];

Largura de banda [MHz].

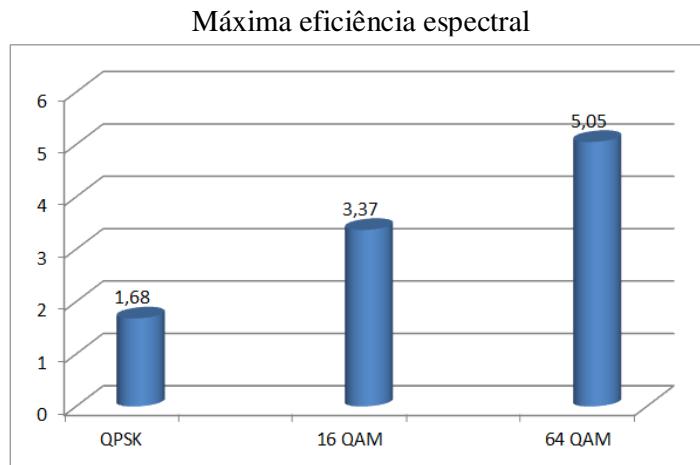


Figura 16 - Eficiência espectral do WiMAX

3.4.7 Cálculo da capacidade do canal e da relação sinal/ruído

O modelo de modulação adotado em rede de comunicações móveis tem influência na área de serviço de um sistema. Cada modelo tem um requisito mínimo de relação entre os níveis de sinal, ruído e interferência (SINR). Em uma célula, esta relação varia de um ponto para o outro, podendo fazer com que algumas áreas o requisito mínimo não seja atendido para os tipos de modulação disponíveis. Vale a pena destacar que o ruído tratado é o AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), um ruído branco adicionado ao sinal, assim utiliza-se o termo SNR (relação sinal/ruído) em vez de usar SINR.

As larguras de banda dos canais utilizados influem diretamente na capacidade de um sistema, conforme o teorema de *Shannon-Hartley*, que afirma que a capacidade máxima, em bits por segundo, de um canal sujeito ao ruído pode ser calculada pela equação (25) [75]:

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (25)$$

Onde:

C = Capacidade do canal [bps];

BW = Largura de banda do canal utilizado [Hz];

SNR = Relação sinal/ruído [dB].

Anteriormente calcularam-se as capacidades dos canais na camada física para largura de banda que variaram de 5 MHz até 20 MHz, para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM, no entanto, não levou-se em consideração as taxas de códigos. Nesta seção determina-se a capacidade dos canais e também o SNR requerido para cada modulação utilizada.

A Tabela 12 mostra as taxas de códigos que serão consideradas para o cálculo da capacidade do canal.

Tabela 12 - Taxa de código de modulação.

Modulação	Taxa de códigos
QPSK	1/2
QPSK	3/4
16 QAM	1/2
16 QAM	3/4
64 QAM	1/2
64 QAM	2/3
64 QAM	3/4
64 QAM	5/6

A taxa de código indica a proporção dos bits de cada modulação que é transmitida como informação em cada símbolo. Como exemplo, para a modulação 64 QAM, que é capaz de transmitir 6 bits por símbolo, quando uma taxa de códigos de 5/6 é utilizada, apenas 5 bits serão transmitidos como informação. Levando-se em consideração os valores das taxas de códigos de cada modulação que compõem a Tabela 12, e fazendo uso da equação (26), os valores de *throughput* calculados na Seção 3.4.6 podem ser determinados novamente.

$$\text{Throughput} = [1/(\text{Tempo de Símbolo})] \times (\text{Nº de Bits}) \times (\text{Taxa de código}) \times (\text{Nº de Subportadoras}) \quad (26)$$

Na Tabela 13 constam os valores do *throughput* calculados, fazendo-se uso da equação (26) para a banda de 5 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM e as respectivas taxas de códigos.

Tabela 13 – Taxa de códigos, *throughput* para a largura de banda de 5 MHz.

Modulação	Taxa de códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	4,20
QPSK	3/4	6,31
16 QAM	1/2	8,41
16 QAM	3/4	12,61
64 QAM	1/2	12,61
64 QAM	2/3	16,81
64 QAM	3/4	18,92
64 QAM	5/6	21,02

Na Tabela 14, constam os valores do *throughput* calculados, fazendo-se uso da equação (26) para a banda de 10 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM e as respectivas taxas de códigos.

Tabela 14 - Taxa de códigos, *throughput* para a largura de banda de 10 MHz.

Modulação	Taxa de códigos	<i>Throughput</i> (Mbps)
QPSK	1/2	8,41
QPSK	3/4	12,61
16 QAM	1/2	16,81
16 QAM	3/4	25,22
64 QAM	1/2	25,22
64 QAM	2/3	33,63
64 QAM	3/4	37,83
64 QAM	5/6	42,04

Na Tabela 15, constam os valores do *throughput* calculados, fazendo-se uso da equação (26) para a banda de 15 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM e as respectivas taxas de códigos.

Tabela 15 - Taxa de códigos, *throughput* para a largura de banda de 15 MHz.

Modulação	Taxa de códigos	<i>Throughput</i> (Mbps)
QPSK	1/2	12,61
QPSK	3/4	18,92
16 QAM	1/2	25,22
16 QAM	3/4	37,83
64 QAM	1/2	37,83
64 QAM	2/3	50,44
64 QAM	3/4	56,75
64 QAM	5/6	63,05

Na Tabela 16, constam os valores do *throughput* calculados, fazendo-se uso da equação (26) para a banda de 20 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM e as respectivas taxas de códigos.

Tabela 16 - Taxa de códigos, *throughput* para a largura de banda de 20 MHz.

Modulação	Taxa de códigos	<i>Throughput</i> (Mbps)
QPSK	1/2	16,81
QPSK	3/4	25,22
16 QAM	1/2	33,63
16 QAM	3/4	50,44
64 QAM	1/2	50,44
64 QAM	2/3	67,26
64 QAM	3/4	75,67
64 QAM	5/6	84,07

Através da equação (26), e assumindo que o *throughput* calculado nas Tabelas 13, 14, 15 e 16 representa a capacidade máxima do canal para cada largura de faixa do canal, podemos encontrar o SNR requerido para cada modulação e taxa de código.

O cálculo da SNR é feita através da equação (27), onde foi considerada a largura de banda de 20 MHz e o *throughput* de 84,07 Mbps [75].

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (27)$$

$$84,07 \text{ Mbps} = 20 \text{ MHz} \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (28)$$

$$SNR = 17,38$$

$$10 \log 17,38 = 12,40 \text{ dB} \quad (29)$$

A Tabela 17 traz a informação da SNR requerida para cada modulação e a taxa de código.

Tabela 17 - SNR requerida para modulações e taxa de códigos.

Modulação	Taxa de códigos	SNR (dB)
QPSK	1/2	- 1,02
QPSK	3/4	1,43
16 QAM	1/2	3,42
16 QAM	3/4	6,75
64 QAM	1/2	6,75
64 QAM	2/3	9,67
64 QAM	3/4	11,05
64 QAM	5/6	12,40

3.5 Cálculo do Raio em Função da Modulação e SNR

Na Seção 3.4 calculou-se o raio máximo teórico da célula sem atribuir valor para a SNR requerida no sistema. O valor encontrado é importante, pois possibilita determinar a quantidade de BSs necessárias para cobrir determinada área. Nesta Seção aborda-se novamente a Seção 3.4 levando-se em consideração os valores de SNR requeridos para cada taxa de modulação, e para cada MCS (*Modulation and Coding Scheme*) a fim de determinar os raios máximos de modulação e respectivo *throughput*. Com o uso de ferramentas de predição consegue-se determinar a área de atuação de cada modulação. O principal indicador relacionado à capacidade de transferência de dados é a distribuição do SNR ao longo da célula. Nas Seções anteriores vimos que a máxima perda permitida no sistema, ocorre no *uplink*, sendo assim, serão realizados cálculos somente para o *Link Budget de Uplink*, substituindo os valores de SNR requeridos para cada MCS.

A Tabela 18 apresenta-se o *throughput* requerido para as respectivas modulações e taxas de códigos.

Tabela 18 – *Throughput* requerido para as respectivas modulações e taxas de códigos.

Modulação	Taxa de códigos	<i>Throughput</i> (Mbps)
QPSK	1/2	16,81
QPSK	3/4	25,22
16 QAM	1/2	33,63
16 QAM	3/4	50,44
64 QAM	1/2	50,44
64 QAM	2/3	67,26
64 QAM	3/4	75,67
64 QAM	5/6	84,07

A Tabela 19 traz as mesmas informações da Tabela 3, com a diferença que o SNR adotado não será nulo e receberá valores variáveis de acordo com cada MCS representado na Tabela 18.

Tabela 19 - Valores dos parâmetros para o *link budget* de *uplink* (adaptado de [65]).

Potência de Transmissão	27 dBm
Ganho da Antena Transmissora	6 dBi
Perdas na Transmissão	0 dB
SNR	Variável
Sensibilidade Requerida Recepção	-110,2 dBm
Ganho da Antena Receptora	18 dBi
Perdas na Recepção	10 dB
Ganho de Diversidade	0 dB
Margem de Desvanecimento	4 dB

De acordo com as Tabelas 18 e 19 e a equação (30), determinam-se os valores de (L) para cada MCS.

Como exemplo, calcula-se para a modulação 64 QAM e taxa de código 5/6, a qual requer uma SNR de 12,40 dB (Tabela 17).

$$L = Pt + Gt - Lt - SNR_{requerida} - Sr + Gr - Lr + Gdv - M \quad (30)$$

$$L_{UL} = 27 \text{ dBm} + 6 \text{ dB} - 0 - 12,40 \text{ dB} - (-110,2 \text{ dBm}) + 18 \text{ dB} - 10 \text{ dB} + 0 - 4 \text{ dB} \quad (31)$$

$$L_{UL} = 134,80 \text{ dB} \quad (32)$$

Substituindo o resultado da equação (32) em (33), chega-se ao máximo raio de atuação da modulação 64 QAM - 5/6, equação (34).

$$L = 80,04 + (10,3,81) \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,47 - 3,52 + 4 \quad (33)$$

$$134,80 = 80,04 + (10,3,81) \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,47 - 3,52 + 4 \quad (34)$$

$$R = d \cong 2.570 \text{ m} \quad (35)$$

Na Tabela 20 constam-se os valores dos raios calculados para as demais modulações e as respectivas taxas de códigos, da mesma forma como foi demonstrado no exemplo acima.

Tabela 20 - Raio de atuação das modulações e as taxas de códigos (MCS).

Modulação	Taxa de códigos	SNR (dB)	Raio (m)
QPSK	1/2	-1,02	5.754
QPSK	3/4	1,43	5.011
16 QAM	1/2	3,42	4.365
16 QAM	3/4	6,75	3.630
64 QAM	1/2	6,75	3.630
64 QAM	2/3	9,67	3.019
64 QAM	3/4	11,05	2.818
64 QAM	5/6	12,40	2.570

As Figuras 17, 18, 19 e 20 mostram a variação do *throughput* conforme a distância para as larguras de banda de 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz.

Observa-se que quando a distância entre o transmissor e receptor se torna maior, os níveis de relação sinal ruído (SNR) ficam menores, devido ao acréscimo das perdas de

propagação, portanto, níveis de modulação que requerem valores de SNR maiores não poderão ser empregados, fazendo com que as modulações robustas sejam adotadas.

Nota-se pelos gráficos, que a distância máxima das modulações não se altera, mesmo com os valores variados da largura de banda, isso acontece em função da sensibilidade requerida na recepção da BS ser igual para as quatro larguras de banda utilizadas para realização dos cálculos, sendo de -110,2 dBm [65].

A Figura 17 mostra a variação do *throughput* (Mbps) conforme a distância (m) para a largura de banda de 05 MHz.

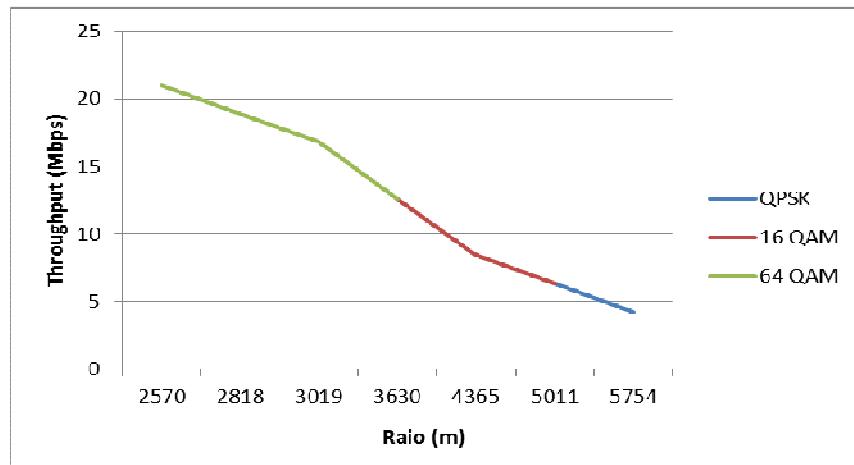


Figura 17 - *Throughput* x distância (BW = 05 MHz)

A Figura 18 mostra a variação do *throughput* (Mbps) conforme a distância (m) para a largura de banda de 10 MHz.

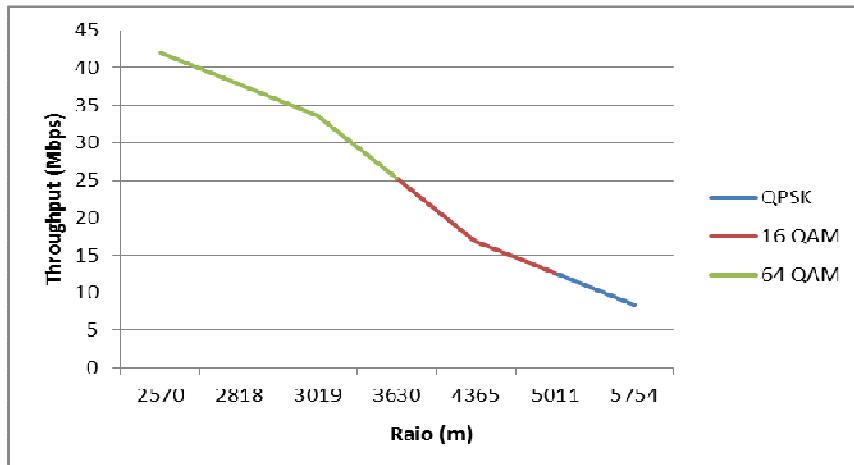


Figura 18 – *Throughput* x distância (BW = 10 MHz)

A Figura 19 mostra a variação do *throughput* (Mbps) conforme a distância (m) para a largura de banda de 15 MHz.

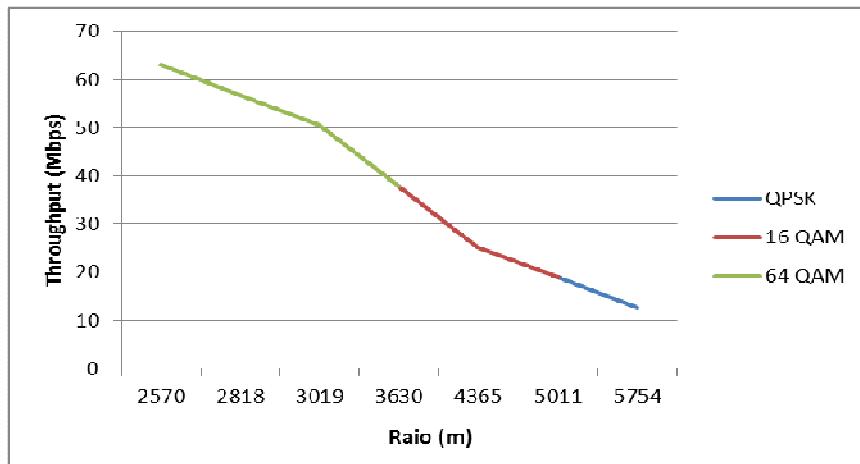


Figura 19 - *Throughput* x distância (BW = 15 MHz).

A Figura 20 mostra a variação do *throughput* (Mbps) conforme a distância (m) para a largura de banda de 20 MHz.

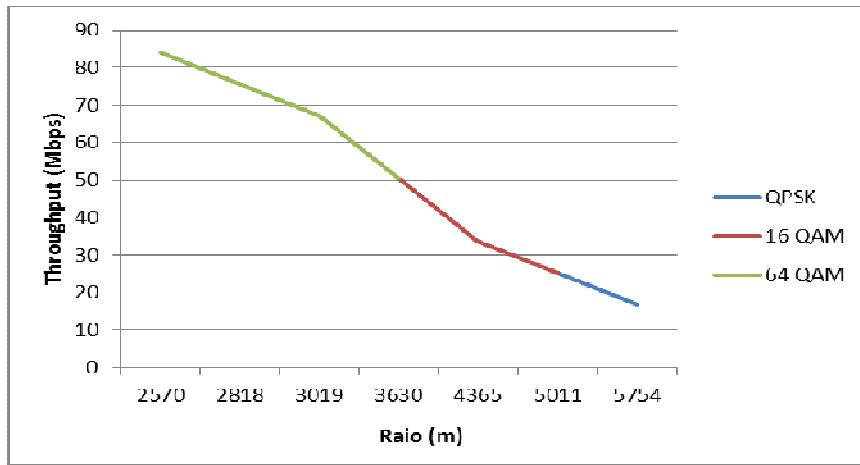


Figura 20 - *Throughput* x distância (BW = 20 MHz)

3.6 Considerações finais

Neste capítulo, abordou-se o planejamento de redes WiMAX. Inicialmente foram apresentados os estágios a serem realizados para iniciar o planejamento e o dimensionamento de redes. Na Seção 3.2 foram descritas as características importantes na definição das regiões

demográficas, como urbana, suburbana e rural. Na Seção 3.3 abordou-se sobre análise de *link budget* onde o principal objetivo foi determinar a área de cobertura de uma BS. Na Seção 3.4 foram apresentados os cálculos efetuados relativos ao raio teórico. Por fim foram efetuados os cálculos do raio em função da modulação e SNR.

O capítulo seguinte apresenta um estudo de caso, onde é apresentado o projeto da rede, os valores estimativos médios de cobertura, os requisitos de capacidade de uma BS, e a largura de banda necessária no PBH para atender a demanda dos usuários de acordo com as aplicações definidas.

Capítulo 4

ESTUDO DE CASO: PROPOSTA DE UMA REDE DE ACESSO BANDA LARGA SEM FIO RURAL PADRÃO IEEE 802.16

4.1 Introdução

Nos últimos anos tem-se percebido que o tráfego de dados nas redes sem fio tem crescido acima das expectativas. Analistas, nas suas previsões de mercado, antecipam que os volumes de dados irão crescer a um ritmo acelerado com base em amplos serviços de banda larga. A comunicação sem fio tem despertado grandes interesses e desafios, principalmente em atender a necessidade de mobilidade, nas áreas urbanas, suburbana e rurais. Muitas soluções foram empregadas ao longo do tempo. O padrão IEEE 802.16 é uma tecnologia de redes sem fio, apresentando implantação rápida e custo baixo, o que facilita a sua utilização nas áreas rurais, principalmente naquelas desprovidas de infraestrutura, onde os custos para implantação de uma rede cabeada são altos.

Por esta razão, este trabalho apresenta um estudo de caso para proposta de rede de acesso banda larga sem fio rural padrão IEEE 802.16, onde realiza-se o processo de planejamento e dimensionamento de cobertura e capacidade de rede, a partir das demandas de usuários. Para aplicação desta proposta definiu-se uma comunidade rural modelo localizada no município de Uberaba-MG.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: além desta Seção, na Seção 4.2 aborda-se a definição do cenário de implantação. Na Seção 4.3 aborda-se a definição de aplicações e largura de banda no PBH. Na Seção seguinte 4.4 descreve-se a escolha de frequência de operação. Posteriormente, na Seção 4.5, abordam-se os cálculos da quantidade

de estações necessárias para cobertura. Na Seção 4.6 descreve-se sobre os cálculos da quantidade de estações necessárias para capacidade. Na Seção 4.7 aborda-se sobre o *Backhaul*. Na Seção 4.8 aborda-se o projeto de rede e, finalizando, na Seção 4.9 são apresentadas as considerações finais.

4.2 Definição do Cenário de Implantação

A comunidade rural selecionada para o estudo de caso e modelo de implantação está localizada no município de Uberaba-MG, a 12 km do perímetro urbano, conforme mostra a Figura 21. Esta comunidade rural é constituída por uma área aproximada de 78,54 Km², possui 86 propriedades de pequenos produtores rurais, com uma população de 550 habitantes.

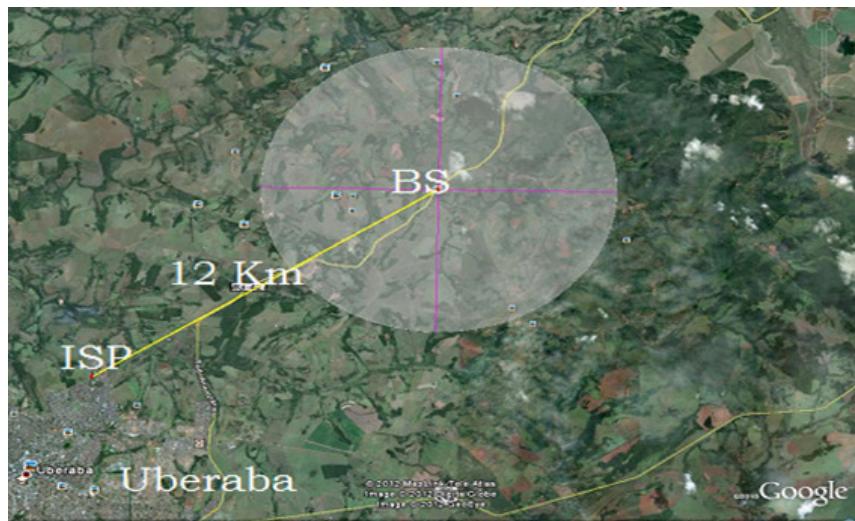


Figura 21 - Localização da comunidade rural modelo

No levantamento topográfico realizado nesta comunidade constatou-se, além de sua topografia plana, localização na Latitude 19° 39'29.91"S e a Longitude 47° 49'14.95"O, bem como altitude máxima de 836 metros. Além disso, esta comunidade não possui qualquer tipo de recurso de comunicação de voz ou dados. Por estes motivos, esta comunidade será considerada modelo, uma vez que é bastante representativa de grande parte das comunidades rurais em outras regiões do Brasil.

4.3 Definições de aplicações e largura de banda no PBH

As aplicações definidas pelos usuários apresentam requisitos específicos de largura de banda mínima e atraso limitado. A Tabela 21 mostra as aplicações típicas e a largura de banda requerida [79].

Tabela 21 – Aplicação e largura de banda WiMAX [34] [63]

Aplicação	Tipo de aplicação	Largura de banda requerida
Jogos eletrônicos	Jogos eletrônicos	50 – 85 kbps
VoIP e Videoconferência	VoIP	4 – 80 kbps
	Videoconferência	32 – 385 kbps
Fluxo de áudio e vídeo em tempo real	Música	5 – 128 kbps
	Video clipes	20 – 384 kbps
	Filmes	>2 Mbps
Aplicação comum de Internet	Mensagem instantânea	>250 kbps
	Navegação na Web	>500 kbps
	E-mail	>500 kbps
Fluxo de áudio e vídeo armazenados	<i>Download</i> de conteúdo (filme, música, etc)	>1 Mbps
	<i>Peer-to-peer</i>	>500 kbps
IPTV	Televisão por Internet	>2 Mbps

De acordo com os dados abaixo a largura de banda total requerida no PBH é de 9,42 Mbps, portanto essa é a demanda da BS para atender as aplicações definidas pelos usuários [62].

- Número de usuários = 550 usuários;
- Largura de banda por $\text{Km}^2 = 0,12 \text{ Mbps} / \text{Km}^2$;
- Área a ser coberta em $\text{Km}^2 = 78,54 \text{ Km}^2$;
- Valor da largura de banda necessária = 9,42 Mbps.

4.4 Escolha de frequência de operação

A escolha da frequência de operação é um dos principais fatores para implantação de uma rede de acesso sem fio, pois há várias bandas de frequências que podem ser usadas. Cada uma tem características cujo impacto no desempenho do sistema é significativo. No processo de certificação pelo WiMAX Fórum, estão definidas as bandas de 2,3 GHz, 2,5 GHz, 3,5 GHz e 5,7 GHz como sendo as mais usadas para implementação de WiMAX [47].

Nesta proposta de rede acesso banda larga rural adotou-se:

- Frequência de operação: 2,4 GHz;
- Largura de banda do canal: 10 MHz.

A frequência de operação acima foi selecionada por ser do tipo não licenciada, não tendo custo com a aquisição.

4.5 Dimensionamento para cobertura

O objetivo do dimensionamento para cobertura é estimar a área de cobertura de uma BS. Conhecendo-se o alcance de cada BS, é possível estimar o número de células necessárias para cobrir uma dada região [56].

Na Seção 3.3, calculou-se a máxima perda de propagação permitida ao longo do caminho (L). A Seção 3.4 foi utilizada para determinar o raio máximo de cobertura de uma célula, que conforme equação (22), é de aproximadamente 5,41 Km.

Para determinar a área de cobertura de cada BS, usa-se a equação (36) [75]:

$$a = \frac{3\sqrt{3}(R)^2}{2} \quad (36)$$

$$a = \frac{3\sqrt{3}(5,41)^2}{2} \quad (37)$$

$$a = 76,04 \text{ Km}^2 \quad (38)$$

A área a ser atendida é aproximadamente $78,54 \text{ Km}^2$, e a área de cobertura de uma célula é de $76,04 \text{ Km}^2$, com a equação (39) encontramos a quantidade de BSs necessárias para prover a cobertura da área desejada.

$$\text{quantidade de BS} = \frac{\text{área de cobertura}}{\text{área da célula}} \quad (39)$$

$$\text{quantidade de BS} = \frac{78,54 \text{ Km}^2}{76,04 \text{ Km}^2} \quad (40)$$

$$\text{quantidade de BS} = 02 \quad (41)$$

Portanto se faz necessária 02 BSs para prover serviço para toda a área dimensionada no projeto para a comunidade rural modelo.

4.6 Dimensionamento para capacidade

Para dimensionar a quantidade de BSs necessárias por capacidade, um fator importante que deve ser observado é o *throughput* médio que se espera oferecer na rede. Uma maneira ideal de estimar o *throughput* é o mapeamento da distribuição da relação sinal/ruído ao longo da célula (SNR), que varia de acordo com os MCS utilizados pelos usuários da rede [76].

Na Seção 3.4 foi definido que para a cobertura o limite é o *uplink*, onde o *Link Budget de uplink* indicou a máxima perda e a limitação de capacidade é dada pelo *downlink*.

Para uma SNR igual ou superior a 1,43 dB, deve-se observar a área de atuação das células limitadas ao raio de 5.011 metros, conforme mostra a Tabela 20. Na equação (36) calcula-se área de uma BS por capacidade, levando-se em conta a modulação QPSK $\frac{3}{4}$ com largura de banda de 10 MHz.

$$a = \frac{3\sqrt{3}(R)^2}{2} \quad (36)$$

$$a = \frac{3\sqrt{3}(5,01)^2}{2} \quad (42)$$

$$a = 65,21 \text{ Km}^2 \quad (43)$$

Nota-se que a área a ser coberta possui aproximadamente 78,54 Km². A área de cobertura de uma célula é de 65,21 Km². Com a equação (39) é possível encontrar a quantidade de BSs necessárias para prover a capacidade necessária na área especificada, informando que o resultado final da equação deverá ser arredondado.

$$\text{quantidade de BS} = \frac{\text{área de cobertura}}{\text{área da célula}} \quad (39)$$

$$\text{quantidade de BS} = \frac{78,54 \text{ Km}^2}{65,21 \text{ Km}^2} \quad (40)$$

$$\text{quantidade de BS} \approx 02 \quad (41)$$

Com o valor encontrado assegura-se que com 02 BSs é possível garantir a SNR de 1,43 dB usando a modulação QPSK 3/4, desta forma, os usuários poderão desfrutar de *throughputs* que variam de acordo com a largura de banda utilizada pela rede, de acordo com a Tabela (22).

Tabela 22 - *Throughput* dimensionado para o limite com SNR de 1,43 dB.

Largura de Banda	<i>Throughput</i> (Mbps)
5 MHz	6,31
10 MHz	12,61
15 MHz	18,92
20 MHz	25,22

4.7 O Backhaul

O *backhaul* é uma infraestrutura de conexão dos pontos de concentração da rede de acesso com o núcleo de alta capacidade de transmissão da rede (onde, normalmente, também

estão localizados os pontos de interconexão com outras redes), também conhecido como *backbone*.

O *backhaul* é utilizado para transportar dados, vídeo e voz do ISP à BS, sendo de fundamental importância o seu desempenho para a rede. As implementações bem sucedidas de WiMAX são baseadas no custo otimizado do projeto de *backhaul*. Os principais tipos de *backhaul* existentes são: o rádio digital ponto a ponto, a fibra óptica e as linhas privativas [54].

Atualmente temos duas tecnologias que são usadas para *backhaul* do tráfego de uma BS. Alguns operadores muitas vezes escolhem ligações *backhaul* por microondas. Isto requer equipamento na BS e no outro extremo da ligação, mas libera o operador das taxas mensais para um operador de rede fixa para locação de uma ligação com fios. Por esta razão, *backhaul* microondas tornou-se muito popular com os operadores alternativos [77].

Na América do Norte e Japão a tecnologia TDM é referida como T1² e usada para as ligações de retorno, com 24 intervalos de tempo de 64 kbits.

No resto do mundo, o E1³ com ligações com 30 intervalos de tempo de 64 kbits são utilizados, sendo que a largura de banda de um T1 é 1,5 Mbits, enquanto que a capacidade de um E1 é 2 Mbits.

As ligações T1 e E1 são utilizadas para transmitir 25 ou 30 chamadas telefônicas individuais ao longo da mesma linha [77].

A Figura 22 mostra o sistema WiMAX funcionando como um *backhaul* ponto a ponto interligado a um *backbone* Internet provendo ao usuário final um acesso banda larga sem fio.

T1² - é um método de transmissão digital para multiplexar canais de voz ou de dados em um par de fios. É o método padrão de interconexão de centrais telefônicas, nos Estados Unidos e Japão. Usando uma técnica chamada Multiplexação por Divisão do Tempo (TDM), o T1 distribui voz e/ou dados de LAN em subcanais DS0. O benefício primário do T1, é a largura de banda - 1,544 Mbps - disponível em 24 subcanais DS0, facilmente alocados, de 64 Kbps [19].

E1³ - é um padrão de linha telefônica digital europeu criado pela ITU-TS e o nome determinado pela Conferência Europeia Postal de Telecomunicação (CEPT), sendo o padrão usado no Brasil e na Europa. O E1 possui uma taxa transferência de 2 Mbps e pode ser dividido em 32 canais de 64 Kbps cada, contudo, 30 canais dos 32 canais existentes transportam informações úteis, pois a velocidade efetiva da transmissão (*throughput*) da portadora E1, é de $30 \times 64 = 1920$ Kbits [19].

Dessa forma, o WiMAX pode alcançar grandes distâncias, chegando até onde as redes cabeadas não chegam. A BS transmite o sinal aos usuários que, por sua vez, utilizam um equipamento especializado para a recepção do sinal, a SS, que pode ficar, por exemplo, no telhado de uma residência. O sinal é então encaminhado através do padrão *Ethernet* por cabo diretamente a um único computador, ou um *Access Point* 802.11 - *Wi-Fi* ou uma Rede Local *Ethernet* [57].

No caso do acesso móvel, o receptor WiMAX pode ser um “WiMAX modem” instalado no *laptop*. Isso proporcionará então, que o usuário se move por toda a área de cobertura, o que representa grandes distâncias, na ordem de quilômetros, sendo esta uma das grandes vantagens do WiMAX sobre a tecnologia *Wi-Fi*, pois neste último a mobilidade limita-se a poucos metros [70].

Depois de determinar a quantidade de BSs requeridas para o projeto, existe a necessidade de prover uma solução de rede de transporte. No dimensionamento de uma rede de acesso rural deve-se encontrar uma solução de transmissão entre um ISP local e a(s) BS(s). A solução para transmissão pode ser baseada na multiplexação por divisão de tempo síncrona (TDM) ou no modo de transferência assíncrona (ATM) [54].

A crescente demanda por aplicações de uso intensivo de banda larga também vai exigir transporte TCP/IP e *Ethernet* no *backhaul*. *Metro Ethernet* é também uma solução de transporte que pode ser usada com *backhaul*. Para uma tecnologia de banda larga móvel, como WiMAX, *Metro Ethernet* pode ser uma solução de transporte adequada.

As etapas envolvidas no dimensionamento da rede de transporte são [47]:

- Cálculo da capacidade de transporte da rede: Inclui a capacidade de transmissão necessária para a(s) BS(s). A capacidade da rede de transporte necessária depende da configuração de rádio, o que novamente é baseada na estimativa do número de usuários e os serviços que eles usam;

- Planejamento da topologia da rede de transporte: O planejamento é baseado nas opções usuais de topologia existentes, ou seja, ponto a ponto, ponto a multiponto, ou malha;
- Planejamento da proteção da rede de transporte: É realizada com o objetivo de assegurar que a informação seja transferida de forma confiável. Para isso usa-se redundância de enlace e equipamentos, o que significa que se um elemento falha, então, outro elemento redundante assume a função do elemento que falhou.

Para a comunidade rural modelo, o *backhaul* adotado é sem fio e ponto a ponto, os custos de implantação inviabilizam a instalação de fibra óptica, bem como qualquer outro tipo de cabeamento. O *backhaul* sem fio proporcionará uma economia substancial em termos de aquisição de materiais, mão de obra e tempo de instalação [38].

4.8 Dimensionamento do ASN-GW

Para dimensionar o ASN *gateway*, os requisitos de densidade de dados por um período de dez anos e o tráfego VoIP gerado são usados. O tráfego VoIP gerado resulta de usuários ligados ao passo que no caso de tráfego de dados, utilizam-se os valores levantados para a comunidade rural modelo. Para este estudo, assume-se que existe um *gateway* ASN localizado na comunidade rural modelo. A Tabela 23 apresenta os parâmetros que são utilizados para o dimensionamento do nó ASN *gateway* da comunidade rural modelo.

Considera-se que codecs G.729 sejam usados pela aplicação VoIP, gerando quadros a cada 20 ms, os quais serão formados pelos seguintes componentes [66]:

Quadro VoIP = cabeçalho de quadro *Ethernet* (42 bytes) + cabeçalho IPv4 (20 bytes) + cabeçalho UDP (8 bytes) + cabeçalho RTP (12 bytes) + tamanho da carga útil de voz (20 bytes) = 102 bytes.

Tabela 23 - Parâmetros para o dimensionamento do ASN-GW (adaptado de [66])

Parâmetro	Valor	Descrição
Usuários ligados	440 Usuários	Refere-se a 80% do total de usuários.
Vazão máxima para todos os usuários.	10,42 Mbps	PBH
Taxa de bits de uma chamada VoIP (para codec G.729).	40 kbps	Taxa máxima de bits de uma chamada VoIP incluindo “overheads”, MAC/RTP/UDP/IP sem compressão.
Número esperado de chamadas VoIP.	25 chamadas	
Capacidade média por célula.	31 Mbps	Capacidade média requerida por célula (<i>downlink + uplink</i>).

Calcula-se, a seguir, o número de chamadas VoIP esperadas usando a fórmula Erlang C, em função dos dados de tráfego e da probabilidade de atraso. Uma tabela para a fórmula Erlang C [71] é utilizada levando-se em conta as métricas usadas no dimensionamento de redes de voz e dados, tais como a rede WiMAX. As métricas consideradas incluem a perda de pacotes e a probabilidade de atraso [61].

Supondo um valor normal de tráfego por usuário igual a 0,03 Erl durante o intervalo de observação [67], 440 usuários vão criar um tráfego de $440 \times 0,03 \text{ Erl} \approx 14 \text{ Erl}$. Portanto, para um tráfego de 14 Erl e supondo uma probabilidade de atraso de 0,1%, o número resultante de chamadas simultâneas de voz de acordo com a fórmula Erlang C, é aproximadamente igual a 25. Para fins de dimensionamento, o número de chamadas simultâneas de voz é igual ao número de canais de tráfego.

O nó ASN-GW é dimensionado com base nos seguintes passos:

- Primeiramente, a carga oferecida gerada por todos os usuários é calculada. Para a comunidade rural modelo, isso se traduz na seguinte carga oferecida para os tráfegos de VoIP e dados:

Carga de tráfego oferecido VoIP = 25 chamadas x 40 kbps (taxa de bits de uma chamada VoIP, codec G.729) = 1,00 Mbps.

Carga de tráfego oferecida de dados = 9,42 Mbps, o qual resulta da exigência da densidade de dados;

- A carga oferecida é então distribuída para todas as interfaces ASN-GW.

O tráfego oferecido é distribuído com base na distribuição de usuários, como na Tabela 23. Assumindo-se que a percentagem de usuários de uma interface é proporcional ao tráfego oferecido à interface, então a proporção de carga de tráfego por interface é a seguinte:

- Interface R6: Para o tráfego VoIP, 50% da carga de tráfego oferecido para VoIP = 0,50 Mbps é distribuída para a interface, enquanto que para o tráfego de dados de 4,71 Mbps é distribuído para a interface R6;
- Interface R3: Para o tráfego VoIP, 50% da carga de tráfego oferecido para VoIP = 0,50 Mbps é distribuído para a interface, enquanto que para o tráfego de dados de 4,71 Mbps é distribuído para a interface R3;
- A Figura 22 mostra a arquitetura de rede WiMAX.

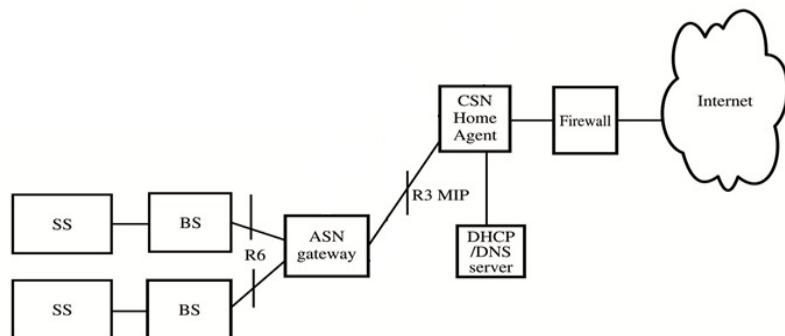


Figura 22 - Arquitetura de rede WiMAX (adaptado de [61])

Na comunidade rural modelo o número de BSs dimensionadas é de 02 unidades.

4.9 Projeto de Rede

Ao iniciar um projeto de rede WiMAX, deve-se desenvolver uma programação, para isso deve-se coordenar uma equipe para assegurar que a instalação seja concluída no prazo certo e discutir o andamento do projeto.

É um processo pelo qual uma rede é dimensionada. Trata-se de um processo que inclui várias etapas, que em termos práticos, determinam-se quantas BSs e SSs são necessárias para a implantação da rede, quais equipamentos a serem usados e como serão instalados e configurados.

A Figura 23 ilustra de um modo genérico, as várias etapas que compõem o processo de planejamento de uma rede.

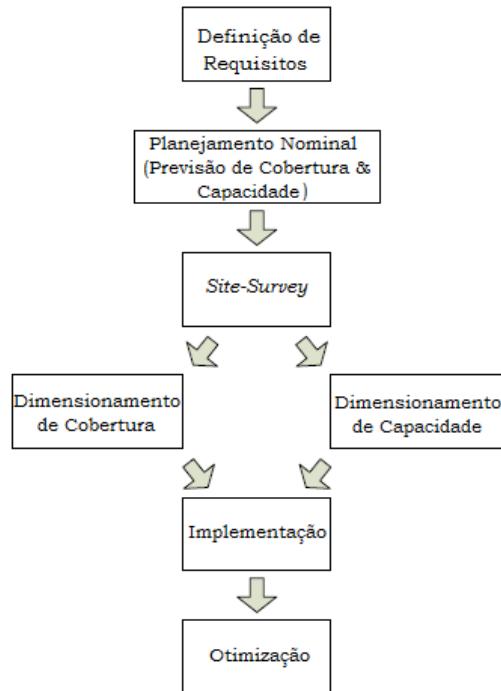


Figura 23 - Processo de planejamento [72]

O processo inicia-se com a definição dos requisitos de projeto, onde é feita uma análise de diversos indicadores, como de tráfego, cobertura e capacidade atual da rede, distribuição de tráfego e tipo de tráfego.

A seguir aborda-se a etapa de planejamento nominal na qual é efetuada uma previsão de cobertura e capacidade, onde é calculado o *link budget*.

O passo seguinte é o *Site-Survey*, nesta etapa permite ter uma melhor percepção da cobertura existente no local, que consiste em conhecer o local onde a BS poderá ser instalada, e efetuar todas as medidas, distâncias, ou seja, estar de posse de todas as informações.

Na etapa do dimensionamento de cobertura concentra-se principalmente no cálculo do *Link-Budget*, onde é calculado o *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL), ou seja, as perdas máximas de potência que podem existir entre as antenas emissoras e as receptoras.

A seguir a etapa do dimensionamento de capacidade nos dá uma estimativa dos recursos necessários para disponibilizar tráfego em uma célula, com um determinado nível de QoS. A capacidade de uma célula está limitada por inúmeros fatores que incluem nível de interferência, algoritmos de escalonamento de tráfego e esquemas de modulação e codificação usados.

A etapa de implementação é onde todas as atividades planejadas são colocadas em ação. Antes da implementação de um projeto, os implementadores devem identificar suas forças e fraquezas (internas), oportunidades e ameaças (externas). Força de vontade e oportunidades são pontos positivos que devem ser explorados para implementar eficientemente um projeto. Fraquezas e ameaças são obstáculos que podem dificultar a implementação do projeto. Os implementadores devem, então, garantir que meios de se superar tais obstáculos.

A última etapa, a otimização é feita depois que todo o projeto foi planejado e implementado. É a hora de testar toda a estratégia construída, ou seja, extrair o melhor rendimento possível da rede, com objetivo de simplificar para funcionar de forma eficiente.

A topologia da rede adotada nesta comunidade rural modelo é a ponto-multiponto, apresentada na Figura 24 [55].

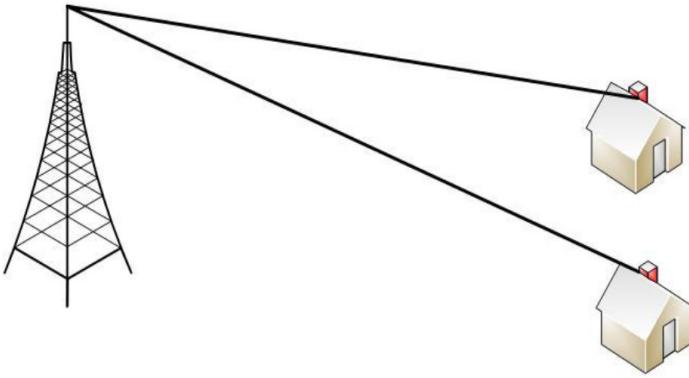


Figura 24 - Topologia adotada na comunidade rural modelo (adaptado de [67])

4.10 A ferramenta TEA | WiMAX

TEA | WiMAX é uma ferramenta capaz de realizar análises técnico-econômicas completas de forma integrada para oferecer um caso de negócio confiável para WiMAX de forma rápida, precisa e confiável.

Desenvolvido pela empresa WiTech, esta ferramenta é fundamental para a criação de uma base sólida de um projeto, onde o plano de negócios é definido, requer um conjunto de análises de mercado, previsão de receita, modelagem custo técnico bem calibrado, e um cálculo de ganhos e perdas durante o período de iniciativa com a avaliação final dos indicadores. Ela permite uma configuração rápida e simplificada com diversas variáveis de entradas e diferentes suposições em tempo real. Permite análise de parâmetros tais como: Análise mercado, análise técnica, análise econômica e financeira e análise dos cenários.

Ao final das análises, um relatório final abrangente é automaticamente compilado e publicado em formatos editáveis e PDF. O relatório contém um resumo completo (com tabelas, diagramas e gráficos) de parâmetros de entrada e premissas, os resultados da análise de mercado, o resultado da modelagem técnica, e as demonstrações econômicas e financeiras por até dez anos.

TEA | WiMAX está em conformidade com o padrão IEEE 802.16d/e e os perfis técnicos fixos e móveis do Fórum WiMAX. Perfis personalizados podem ser adicionados de forma independente pelo usuário.

Os cálculos realizados ao longo deste trabalho foram efetuados de forma não automatizada. No entanto, para comparar e demonstrar os cálculos obtidos, adotou-se a ferramenta TEA/WiMAX [78], sendo *freeware*, que simplifica e automatiza o processo de planejamento e dimensionamento. As Figuras 26, 27, 28 e 29 demonstram os resultados obtidos com a ferramenta.

A Figura 25 mostra a logomarca da empresa TEA/WiMAX [78].



Figura 25 – Logomarca da empresa TEA/WiMAX [78].

A Figura 26 mostra os dados definidos da área dimensionada da comunidade rural modelo, sendo iguais os dados calculados sem a ferramenta.



Figura 26 – Área da comunidade rural modelo definida e dimensionada.

A Figura 27 mostra o resultado do cálculo do *link budget – uplink*, sendo iguais aos dados calculados sem a ferramenta.

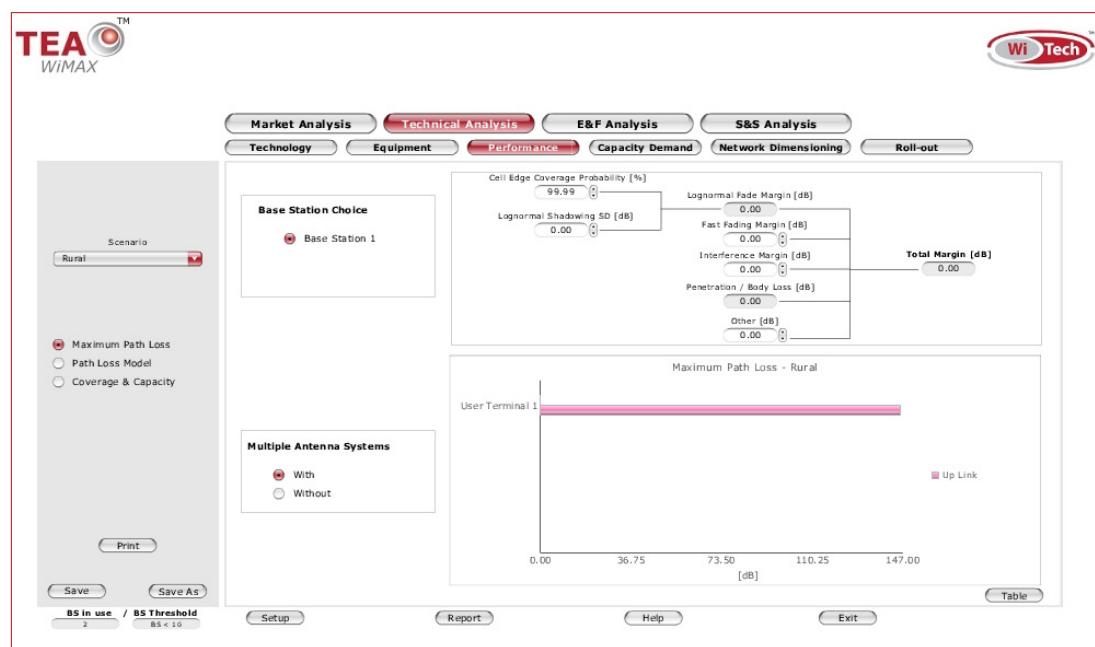


Figura 27 - Resultado do cálculo do *link budget – Uplink*.

A Figura 28 mostra os valores do *throughput* calculados, para a banda de 10 MHz com as modulações BPSK, QPSK, 16 QAM e 64 QAM, sendo iguais os cálculos obtidos sem a ferramenta.

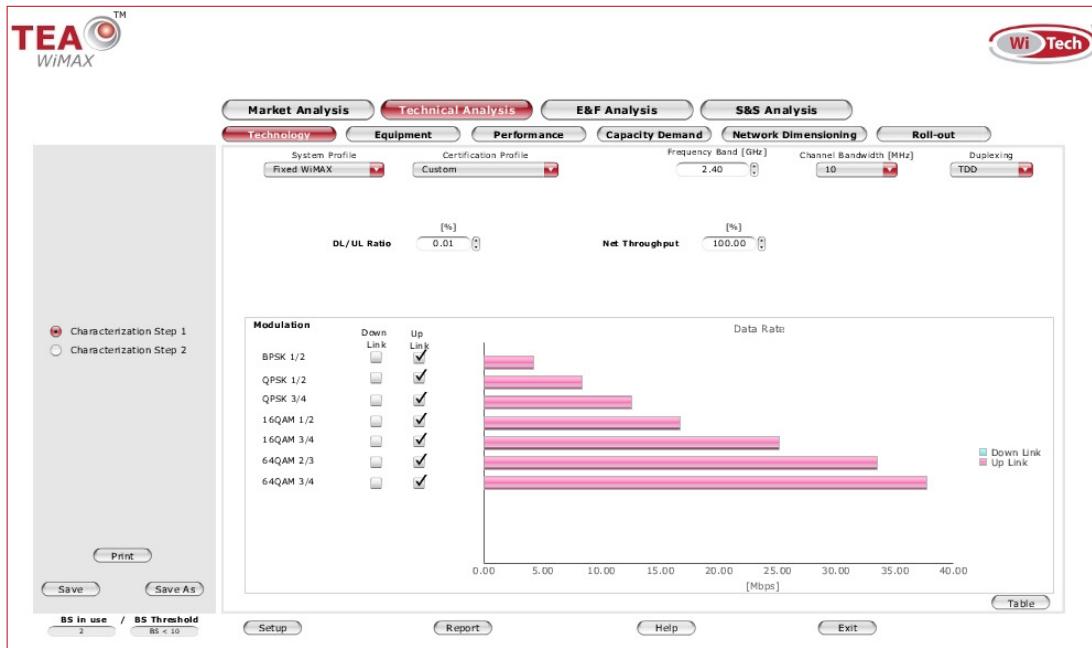


Figura 28 - *Throughput* (Mbps) para a largura de banda de 10 MHz.

A Figura 29 mostra o número de BSs dimensionada para atender a comunidade rural modelo, sendo iguais os números de BSs calculadas sem a ferramenta.



Figura 29 - Quantidade de BS dimensionada para atender a comunidade rural modelo.

4.11 Considerações finais

Após a definição do cenário de implantação, aplicações, largura de banda e a esolha de frequência de operação, o levantamento de demanda permitiu determinar a necessidade de 86 SSs e 02 BSs na rede de acesso sem fio da comunidade rural modelo.

Em função das SSs, a demanda de largura de banda levantada para atendimento às aplicações dos usuários é de 10,42 Mbps no PBH.

A demanda de largura de banda das aplicações de interesse na comunidade rural modelo foi determinada e permite atender aos requisitos de QoS das aplicações de tempo real.

Para comparar os resultados obtidos no trabalho, adotou-se a ferramenta TEA | WiMAX, que automatizou o processo de planejamento e dimensionamento da rede de acesso sem fio da comunidade rural modelo.

Capítulo 5

CONCLUSÕES GERAIS

O padrão IEEE 802.16 foi criado com a intenção de cobrir regiões metropolitanas e prover acesso banda larga sem fio em regiões desprovidas de infraestrutura, como as zonas rurais, por exemplo, prometendo taxas de transferência de dados que podem chegar a 1 Gbps para usuários fixos e a 100 Mbps para usuários móveis.

Trata-se de uma tecnologia que tem uma particularidade bastante importante, pois suporta QoS. A existência de classes de serviço permite que haja diferenciação no tratamento de cada tipo de tráfego que circula na rede. Assim, é possível prover melhor serviço ao tráfego que seja considerado prioritário, como por exemplo, conversações em tempo real, além da oferta do acesso à Internet a locais até agora inacessíveis como as zonas rurais, por exemplo, onde o WiMAX é uma solução muito atrativa para fornecer serviços de voz, dados e vídeo.

Em razão disso, o objetivo principal deste trabalho foi apresentar uma proposta de uma rede de acesso banda larga sem fio rural padrão IEEE 802.16.

Para cumprir esse objetivo, foi apresentado no Capítulo 2 a especificação e características gerais do padrão IEEE 802.16. Foram descritas as arquiteturas PMP e mesh bem como o modelo de referência nas camadas MAC e física, finalizando com a abordagem sobre QoS no padrão IEEE 802.16.

Em seguida no Capítulo 3, apresentou-se na Seção 3.1, as considerações gerais sobre o planejamento de redes WiMAX. Na Seção 3.2 abordou-se a introdução ao planejamento de redes WiMAX, e, na Seção 3.3, as características das áreas urbana, suburbana e rural. Na sequência, na Seção 3.4 abordou-se a análise de *link budget* e, na Seção 3.4, as considerações finais deste capítulo.

No Capítulo 4 foi apresentado na Seção 4.2 o cenário de implantação. Na Seção 4.3, abordou-se as definições de aplicações e largura de banda no PBH. Na Seção 4.4 abordou-se a escolha de frequência de operação. Na Seção 4.5 apresentou-se o dimensionamento da BS para cobertura. Na Seção 4.6 abordou-se o dimensionamento de BS para capacidade. Na Seção 4.7 abordou-se o *backhaul*. Na Seção 4.8 abordou-se o dimensionamento do ASN-GW. Na Seção 4.9 abordou-se o projeto de rede. Na Seção 4.10 abordou-se a ferramenta (*software*) TEA/WiMAX que foi usada para automatizar o processo e certificar de que os dados calculados manualmente do dimensionamento estão corretos. E, finalizando, na Seção 4.11 com as considerações finais.

Concluindo, o *Site-Survey* permitiu a coleta de dados e informações necessárias para o dimensionamento de cobertura e de capacidade, resultando na determinação de 02 BSs necessárias para cobrir uma área de 78,54 Km² e o levantamento de demanda permitiu determinar 86 SSs. Em função das SSs apontadas, levantou-se a demanda por largura de banda para atendimento às aplicações dos usuários no PBH.

Em função das SSs levantadas, a demanda por largura de banda para atendimento às aplicações dos usuários é de 10,42 Mbps no PBH.

A demanda de largura de banda das aplicações de interesse na comunidade rural modelo foi determinada e permite atender aos requisitos de QoS das aplicações de tempo real.

Para comparar os resultados obtidos no trabalho, adotou-se a ferramenta (*software*) TEA/WiMAX, que automatiza o processo de planejamento e dimensionamento.

Uma sugestão de trabalho futuro é a implementação do projeto para uma comunidade rural modelo, visto que não foi possível, devido ao custo elevado do projeto. O projeto é viável conforme foi constatado ao longo desta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] Ruralmax2010, "Apenas 2% do meio rural têm acesso à Internet". Congresso Brasileiro de Telecomunicações Rurais - São Paulo - SP2010, , disponível em: http://www.ruralmax2010.com.br/imprensa_5.html, acesso em: 23/04/2012.
- [02] W. Gerok; S. F. Rusche; P. Unger, "*Hybrid Broadband Access with IEEE 802.16e - An economic approach for rural areas*". 2009 IEEE Mobile WiMAX Symposium, Institute of Communications Technology, pp. 01-05, 2009.
- [03] IEEE Std 802.16-2004, "*IEEE Standard for local and metropolitan area networks, Part 16": Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, October 2004*.
- [04] WiMAX Forum Proprietary, "*WiMAX Forum Network Architecture - Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points*". WiMAX Forum, pp. 01-247, 2010.
- [05] Comite Gester da Internet no Brasil, "Pesquisa sobre o uso das tecnologias da informação e da comunicação no Brasil", disponível em <http://www.cetic.br/tic/2008/index.htm>, acesso em: 25/04/2012.
- [06] F. L. Figueiredo and L. C. P. Pereira, "Tecnologia WiMAX: uma visão geral", CPqD Tecnologia 2008, Campinas - SP. pp. 01-26, 2008.
- [07] R. Prasad, and F. J. Velez, "*WiMAX Networks: Techno-Economic Vision and challenges*", ed. Nova York: Springer 2010, 1^a edição, pp. 01-488, 2010.
- [08] 802.16-2002 "*IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*", IEEE Computer Society, April 2002.
- [09] J. F. Borin, "Mecanismos para a provisão de qualidade de serviço em redes 802.16" Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado, Instituto de computação, pp. 01-91, 2010.
- [10] R. B. Dutra, "Avaliação do desempenho da Modulação OFDM em canais HF para rádios cognitivos", Universidade Federal do Rio de Janeiro, dissertação de Mestrado, pp. 01-68, 2010.
- [11] N. D. Freitas, "Uma análise de antenas direcionais e múltiplos caminhos em redes Ad-Hoc sem fio", Universidade Federal do Rio de Janeiro, dissertação de Mestrado, pp. 01-94, 2008.
- [12] Z. P. Rogério, "Modelagem de Canal sem fio para planejamento de redes celulares de quarta geração em Brasília", Universidade de Brasília, dissertação de Mestrado, pp. 01-95, 2011.
- [13] M. P. Viegas, "Planeamento e dimensionamento de redes WiMAX", Universidade de Aveiro, dissertação de Mestrado, pp. 01-205, 2008.

- [14] D. C. Carilho, "Redes Híbridas de acesso fixo sem fios: Análise Tecno-Económica", Universidade de Aveiro, dissertação de Mestrado, pp. 01-155, 2010.
- [15] C. Andrew, "Tipos de antenas WiMAX", disponível em http://www.andrew.com/isol/unlicenced_chart.aspx, acesso em: 20 de maio de 2.012.
- [16] Inatel – Instituto Nacional de Telecomunicações, “Guia técnico Inatel – Guia das cidades Digitais”, Módulo 2 – Tecnologia WiMAX, disponível em <http://www.inatel.br.>, acesso em: 01/06/2012.
- [17] TSM Antenas, “Tutorial de Rádio Enlace”, disponível em: <http://www.tsm.com.br/visual/arquivos/TutorialRadioEnlace.pdf>, acesso em: 27/03/2012.
- [18] WiMAX Forum *Proprietary*, "Mobile WiMAX Part. II: A Comparative Analysys", Maio, 2006a, disponível em http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Mobile_Wimax_Part2_Comparative_Analysis.pdf , acesso em: 25/04/2012.
- [19] H. Sizun, "Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications (Signals and Communication Technology)", Springer, pp. 01-436, December 2010.
- [20] P. Sebastião; F. J. Velez; R. Costa; D. Robalo; C. Comissário; A. Rodrigues, “Planeamento e Desenvolvimento de Sistemas Celulares IEEE 802.16 – 2004”, Instituto de Telecomunicações, Covilhã, Portugal, 2004.
- [21] D. Santos; R. P. Marcos; V. Carvalho; R. Costa; F. J. Velez; J. Riscado; J. Romão; V. Cavaleiro, “Planeamento de uma rede Metropolitana sem Fios 802.16e de Banda Larga”, Instituto de Telecomunicações, Covilhã, Portugal, 2009.
- [22] Caminhos para inclusão digital, disponível em: <http://caminhooinclusaodigital.wikidot.com>, acesso em 13/04/2012.
- [23] I. R. Gomes, "Modelo de propagação indoor Multi-Andar em 2.4 GHz com expectativa de parâmetros de QoS em chamadas VoIP", Universidade Federal do Pará, dissertação de Mestrado, pp. 01-64, 2010.
- [24] G. A. Alencar; R. B. F. Costa, "Aplicações de Imagens de Sensoriamento Remoto no Estudo de Propagação em Redes de Comunicações sem fio", CEFET/RJ, pp. 2600-2606, 2011.
- [25] I. C. S. Júnior, "WiMAX e a Educação", Revista Network Technologies, Faculdades Network, Vol. 2, No 1, pp. 01-06, , 2008.
- [26] A. N. Oliveira; P. R. Guardieiro, "Análise do Escalonamento *Uplink* em Redes WiMAX Considerando a Camada Física OFDM", dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, pp. 01-08, 2011.
- [27] C. Claudio; L. Luciano; M. Enzo, "Quality of Service Support in IEEE 802.16 Networks", University of Pisa and Nokia Research Center, IEEE Network, pp. 50-55, 2006.

- [28] R. Bollapragada, "Approach for Planning Broadband Wireless Networks". *Airo News, Torino*, v. IX, nº 1, pp. 09-14, Spring 2004.
- [29] H. K. Craig; S. Hurley, "Propagation Studies for Enhanced Broadband Wireless", disponível em: <http://hawk.iszf.irk.ru/URSI2002/GAabstracts/papers/p0492.pdf>, acessado em 04/06/2012.
- [30] R. Olexa, "Implementing 802.11, 802.16 and 802.20 Wireless Networks – Planning, Troubleshooting and Operations", 1^a ed. *Burlington: Elsevier, Inc.*, pp. 01-232, 2005.
- [31] R. H. Anderson, "Fixed Broadband Wireless System Design", 1^a ed. *West sussex: John Wiley & Sons Ltda.*, pp. 01-510, 2003.
- [32] G. Iacovani; D. Parisi; M. Isopi; "Cell Capacity of LMDS Systems in Typical Traffic Scenarios", *IEEE Communications Magazine*, New York, v. 43, nº 4, pp. 122-129, abr. 2005.
- [33] E. Lee, "WiMAX Forum – Working Group Status Update. Itu Regional seminar on Broadband wireless access (BWA) for rural and remote areas for the asia", *Pacific Region, 2005, Shenzhen*. Anais eletronicos. Disponível em: <http://www.itu.int/ITU-D/imt-2000/documents/Shenzhen2005/ShenzhenFinalProgram.html>, acessado em 08/06/2012.
- [34] B. M. R. S. Rés, "Soluções Tecnológicas e Impacto da Mobilidade numa Rede WiMAX", Dissertação Mestrado, Universidade de Aveiro: Portugal, pp. 01-103, 2008.
- [35] M. P. V. Araújo, "Planeamento e Dimensionamento de redes WiMAX", dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, pp. 01-205, 2008.
- [36] A. S. Tanenbaum, and D. Wetherall, "Redes de Computadores", *Pearson Education do Brasil*, ed. I. série. Vol. 2011, Brasil, pp. 01-583, 2011.
- [37] S. M. R. Sá, "Algoritimo para desenvolver uma ferramenta de planejamento para o sistema de comunicações móveis LTE", Instituto Universitário de Lisboa, pp. 01-138, 2010.
- [38] E. Prado; F. Lima. "Dimensionamento de Redes WiMAX", disponível em: www.teleco.com.br, acesso em: 14/04/2012.
- [39] E. R. Dosciatti; W.G. Junior; A. Foronda, "An efficient Approach of Scheduling with Call Admission Control to Fixed WiMAX Networks". *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 10 N. 1, pp. 01-09, Jan.2012.
- [40] C. B. Both; R. Kunst; J. Rochol, "Acesso de Banda Larga sem fio (WBA) e Redes Metropolitanas sem fio (WLAN) baseados no padrão IEEE 802.16", WiMAX, capítulo 1, pp. 01-30, 2010.
- [41] C. A. Rodrigues, "Escalonamento de tráfego em redes WiMAX no modo PMP",

- Universidade de Brasília-DF, dissertação de Mestrado, pp. 01-109, 2009.
- [42] Comitê Gestor da Internet no Brasil, "Pesquisa sobre o uso das tecnologias da informação e da comunicação no Brasil", disponível em <http://www.cetic.br/tic/2008/index.htm>, acesso em: 25/04/2012.
 - [43] C. Hoymann, "Analysis and Performance Evaluation of the OFDM-Based Metropolitan Area Network IEEE 802.16", *Elsevier Computer Networks*, Vol. 49, 2005.
 - [44] E. C. Rosa, "Proposta de um esquema para a provisão de QoS no padrão IEEE 802.16", dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia-MG, pp. 01–114, 2011.
 - [45] F. A. L. A. Moura, "Estimativa do número de Estações rádio Base para implantação do WiMAX no Distrito Federal", dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, pp. 01-82, 2009.
 - [46] F. Ohrtmam, "WiMAX Handbook, Building 802.16 Wireless Networks", *McGraw-Hill Communications*, pp. 01-261, 2005.
 - [47] Y. Zhang, "WiMAX Network Planning and optimization", series editor, *Simula Research Laboratory*, Norway, pp.01-429, 2008.
 - [48] E. M. Miyoshi; C. A. Sanches, "Projetos de Sistemas de Rádio", Editora Erica, Edição 4^a, São Paulo-SP, pp. 01-536, 2002.
 - [49] F. Felice, "Análise do desempenho de enlaces ponto-a-ponto utilizando a faixa de frequência não licenciada de 2,4 GHz em tecnologia Spread Spectrum", Curitiba, dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, pp. 01-149, 2005.
 - [50] D. Robalo; M. Marques; J. Ambrósio; C. Reis; D. Gouveia; F. V. Velez; R. Costa; C. Comissário; J. Riscado; V. Cavaleiro, "Projecto e planeamento de redes sem fios IEEE 802.16", 2009.
 - [51] I. Marijasevic; D. Zagar, "Business planning by implementation of the broadband Internet access to the rural areas", *MIPRO 2011, May 23-27, Opatija, Croatia, University of Osijek*, 2011.
 - [52] Y. Su; I. Caballero, "Deployment of Broadband Wireless Access for E-health in Chinese Rural Areas", *Institute of Scientific and Technical Information, Escuela Superior de Informática – UCLM, 2010 Second International Conference on Communication Systems, Networks and Applications*, pp. 01-04, 2010.
 - [53] M. Marques; J. Ambrósio; C. Reis; D. Gouveia; J. Riscado; D. Robalo; F. J. Velez; R. Costa, "Design and Planning of IEEE 802.16 Networks", *The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Instituto de Telecomunicações, DEM, UBI, Covilhã, Portugal*, 2009.
 - [54] B. Lin; Pin-Han Ho, "Dimensioning and Location Planning of Broadband Wireless

- Networks under Multi-Level Cooperative Relaying", Members IEEE, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, Nº 11, November 2009.*
- [55] M. M. Garcia; J. I. Alonso, "Planning and Sizing Tool for WiMAX Networks", *Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, Spain*, IEEE, 2007.
 - [56] G. C. Manna; B. Jharia, "Mobile WiMAX Coverage Evaluation for Rural Areas of India", *Dept, of Electronics and Communication Eng, Government Engineering College, Jabalpur, M. P. India*, 2011.
 - [57] N. L. Ratnayake, "Modelling the broadband wireless channel in rural Australia", *Queensland University of Technology Brisbane, Australia*, IEEE 2010.
 - [58] K. L. Chee; A. Anggraini; T. Kaiser; T. Kurner, "Outdoor-to-Indoor Propagation Loss Measurements for Broadband Wireless Access in Rural Areas", *Institut fur Nachrichtentechnik, Technische Universitat Braunschweig, Braunschweig, Germany, Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2008.
 - [59] A. Markhasin; V. Drozdova, "QoS-Oriented Multifunctional Wireless MAC for Remote, Rural, and Difficult for Access Areas", *Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, Novosibirsk, Russia, IEEE Region 8 Sibircon 2008*.
 - [60] A. A. Oliveira; S. C. Lucena; C. A. V. Campos; A. A. A. Rocha, "Avaliando a Eficácia das Técnicas de Estimativa de Capacidade de Caminho em Redes com Enlaces WiMAX", *Universidade Federal Fluminense, XVI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços*, 2008.
 - [61] M. W. Barongo, "Dimensioning Mobile WiMAX in the Access and Core Network: A Casy Study", Finland, *dissertação de Mestrado, Faculty of Electronics, Communications and Automation*, pp. 01-81, 2008.
 - [62] WiMAX Forum Proprietary, "A Comparative Analysis of Mobile WiMAXtm Deployment Alternatives in the Access Network" *WiMAX Forum 2007*, pp. 01-47, 2007.
 - [63] WiMAX Forum Proprietary, "Can WiMAX Address Your Applications?" *Prepared by Westech Communications Inc. on behalf of the WiMAX Forum, October 24*, pp. 01-24, 2005.
 - [64] S. S. Nuza; A. Z. Mazrekaj, "Link budget analysis in the network designed mobile WiMAX technology in the territory of the urban area of the city of Gjakova" *IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 9, Issue 5, No 2, September 2012*.
 - [65] J. G. Andrews; A. Ghosh; R. Muhamed, "Fundamentals of WiMAX", *Understanding Broadband Wireless Networking*, USA, Series Editor, pp. 01-478, 2007.
 - [66] Cisco Whitepaper; "Voice Over IP – Per Call Bandwidth Consumption", disponível

em:http://www.cisco.com/en/US/tech/tk652/tk698/technologies_tech_note09186a0080094ae2.shtml; acesso em: 15/07/2012.

- [67] A. R. Mishra; “*Advanced cellular network planning and optimisation 2G/2.5G/3G evolution to 4G*”, Nokia Networks, TechBooks, New Delhi, India, pp. 01-544, 2007.
- [68] R. Petry; C. H. R. Oliveira; J. A. Martins, “Análise técnica e de custos de implantação de rede WiMAX para provisão de serviços de telefonia”, CPqD Tecnologia, v.2, pp. 39-50, Campinas, jul/dez. 2006.
- [69] TEA WiMAX, “*TEATM Family of Business Case Analysis Tool*”, Release 2.2.2, User Guide, Revision 1.3, 12 January 2010.
- [70] M. Hunukumbre; B. Upase; S. Vadgama; “*Radio network dimensioning and planning for WiMAX networks*”, disponível em: <http://www.fujitsu.com/downloads/MAG/vol43-4/paper09.pdf>., acesso em: 15/09/2012.
- [71] Tabela de Erlang C, *Erlang C Traffic Table up to Ten Million Trunks*, disponível em: <http://www.stuffsoftware.com/trafficerlangtable.html>, acesso em 09/11/2012.
- [72] M. A. L. Carvalho, “Planeamento e optimização em redes celulares móveis autogeridas assentes em LTE” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Dissertação de Mestrado, pp. 01-200, Novembro/2011.
- [73] WiMAX Forum Proprietary, “*WiMAX Deployment Considerations for Fixed Wireless Access in the 2.5 GHz and 3.5 GHz Licensed Bands*”, pp. 01-21, ” WiMAX Forum 2005.
- [74] S. Martin, “*Beyond 3G – Bringing NetworkS, Terminals and the Web Together – LTE, WiMAX, IMS, 4G Devices and the Mobile Web 2.0*”; John Wiley & Sons; 2009.
- [75] D. Santos, “Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes de Acesso em Banda Larga com Tecnologia LTE”, Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, Dissertação de Mestrado, pp. 01-91, 2010.
- [76] M. Masihpour; J. I Agbinya; “*Part II - Planning of WiMAX and LTE Networks*”, University of Technology, Sydney Australia, disponível em http://www.academia.edu/1060708/Planning_of_WiMAX_and_LTE_Networks, acesso em 04/02/2013.
- [77] M. Sauter, “*Beyond 3G - Bringing Networks, terminals and the Web Together*” John Wiley & Sons, Ltd. Nortel, Germany, pp. 01-362, Publication 2009.
- [78] TEA/WiMAX, WITECH, disponível em: <http://www.4gbusinesscase.com>, acesso em 22/10/2012.
- [79] A. R. S. Leite; P. R. Guardieiro; "Planejamento e dimensionamento de uma rede de acesso banda larga sem fio rural padrão IEEE 802.16", X Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, CEEL, Uberlândia, pp. 01-06, 2012.