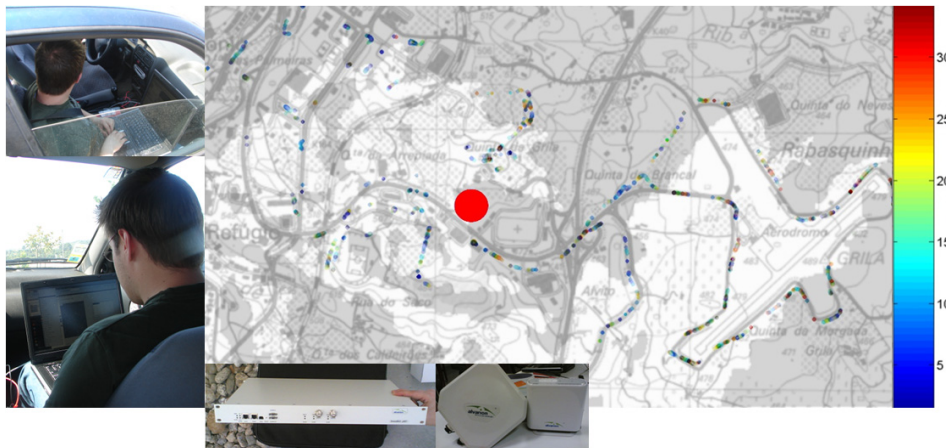




UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Covilhã | Portugal

Planeamento, Desenvolvimento e Optimização de Redes WiMAX



DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Daniel Luís Silveira Robalo

Julho 2008

Planeamento, Desenvolvimento e Optimização de Redes WiMAX

Daniel Luís Silveira Robalo

(Licenciado)

**DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES**

Trabalho orientado por:

Prof. Dr. Fernando J. Velez

Departamento de Engenharia Electromecânica

Universidade da Beira Interior

Covilhã, Portugal

Julho 2008

Julho 2008

À minha família, namorada e amigos

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais e namorada pelo apoio incondicional que sempre me deram. Aos meus pais pelo constante carinho e incalculável ajuda sem a qual não teria possibilidade de alcançar os meus objectivos. Um agradecimento muito especial à minha namorada que sempre me incentivou e motivou, pelo seu afecto, atenção e paciência, mesmo durante os momentos mais difíceis.

Gostaria de agradecer ao Prof. Fernando J. Velez que me deu a oportunidade de integrar a equipa de investigação do projecto MobileMAN, assim como, a posterior possibilidade de realizar esta tese de mestrado sob a sua orientação.

Um grande obrigado aos meus colegas da equipa WE-MOVE, do laboratório associado do Instituto de Telecomunicações do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, pelo seu companheirismo e apoio.

Agradeço também à *Advanced Resources* pela colaboração e equipamento disponibilizado para a realização dos vários trabalhos de campo sem os quais teria sido impossível completar esta tese.

Agradeço finalmente ao laboratório do STIG/UBI (Serviço Transfronteiriço de Informação Geográfica da Universidade da Beira Interior), por toda a atenção e ajuda prestada no cálculo e dimensionamento das áreas com linha de vista.

Resumo

Esta dissertação aborda o planeamento de redes de banda larga IEEE 802.16. Após se realizarem algumas considerações gerais sobre a evolução da norma, assim como as suas principais características, são apresentados os aspectos essenciais das camadas físicas e MAC (*Medium Access Control*), assim como uma análise dos parâmetros de qualidade de serviço. Revêem-se as principais topologias de redes, as tecnologias de antenas SISO e MIMO e abordar-se, brevemente, aspectos de segurança em redes WiMAX.

Realizou-se o dimensionamento de redes ponto-a-ponto a 5.4 GHz, uma entre o Hospital Sousa Martins (HSM), na Guarda, e a Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior (FCS UBI), na Covilhã, e outra entre a FCS e o Hospital Amato Lusitano (HAL), em Castelo Branco. Verificou-se a ausência de obstruções da linha de vista entre a localização das diversas estações e repetidores. Recorrendo ao modelo de *Friis* dimensiona-se os diversos feixes da ligação. A instalação final da ligação entre a FCS e o HAL com o equipamento BreezeNET B100 foi precedida de um teste de campo utilizando o equipamento BreezeNET B14.

Recorrendo aos modelos de *Friis* modificado e SUI, realiza-se o planeamento celular na zona da Covilhã a 3.5 GHz, considerando a utilização do equipamento BreezeMAX 3000. Através de um teste de cobertura, na área sub-urbana da Covilhã, uma análise exaustiva da topografia e densidade de edificações da zona de teste, conclui-se da adequação da utilização do modelo de *Friis* modificado. Verifica-se que, através do cálculo do expoente de propagação médio na área de teste, é possível disponibilizar um modelo para a optimização do processo de planeamento celular. Para as duas zonas em que se dividiu a área de teste, Este e Noroeste, obtiveram-se valores de 2.31 e 2.8, com valores para o erro quadrático médio de 0.434 e 1.043, respectivamente.

Realizou-se ainda um segundo planeamento celular a 5.4 GHz, para o equipamento BreezeACCESS VL. Apresentam-se os resultados do respectivo teste de cobertura, assim como a análise comparativa dos resultados obtidos.

Palavras-chave: WiMAX, IEEE 802.16, dimensionamento de feixes, planeamento celular, teste de cobertura, optimização do débito binário.

Abstract

This thesis addresses the planning of IEEE 802.16 broadband networks. After presenting some general considerations on the evolution of the standard, e.g., its main features, the essential aspects of the physical and MAC (Medium Access Control) layers, as well as a study of the quality of service parameters are addressed. The main network topologies, the SISO e MIMO technologies are reviewed and some brief considerations on WiMAX networks security are also addressed.

A 5.4 GHz point-to-point network was designed, to guarantee the link between the Hospital Sousa Martins (HSM), at Guarda, and the Health Sciences Faculty of the University of Beira Interior (FCS UBI), at Covilhã. Another link is between the FCS and the Hospital Amato Lusitano (HAL), at Castelo Branco. The obstruction of line-of-sight between the location of the transmitter and relay stations was verified. The link budget was computed by using the Friis model. The actual installation of the link between the FCS and HAL, in Castelo Branco, with the BreezeNET B100 equipment, was preceded by a field trial with BreezeNET B14 equipment.

By using the modified Friis and SUI models, and by considering the use of BreezeMAX 3000 equipment at 3.5 GHz, the cellular planning of the area of the city of Covilhã was performed.

Through a field trial, in the sub-urban area of Covilhã, an exhaustive analysis of the topography and density of buildings of the trial area, the adequacy of the modified Friis model was demonstrated. By computing the average propagation exponent for the field trial area, a model for the optimization of the cellular planning process was provided. For the two areas in which the trial area was split into, East and Northwest ones, the obtained values for the propagation exponent were 2.31 and 2.8, while the values for the mean square error were 0.434 and 1.043 respectively.

One second cellular planning exercise was addressed at 5.4 GHz, for the BreezeACCESS VL equipment. The results for the field trials and the comparative analysis between the experimental and theoretical results were addressed.

Key words: WiMAX, IEEE 802.16, links dimensioning, cellular planning, field trial, throughput optimization.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Objectivos e motivação	1
1.2	Estrutura da dissertação	3
2	Aspectos gerais da norma IEEE 802.16	5
2.1	Enquadramento da norma IEEE 802.16 nas redes sem fios IEEE 802	9
2.2	Sumário e conclusões	10
3	Camada física e camada MAC da norma IEEE 802.16.....	11
3.1	Aspectos gerais.....	11
3.2	Camada física	12
3.2.1	<i>Características da camada física da norma IEEE 802.16</i>	12
3.2.2	<i>OFDM</i>	18
3.2.3	<i>OFDMA</i>	21
3.2.4	<i>Sub-canalização</i>	22
3.3	Camada MAC.....	24
3.3.1	<i>Características da camada MAC da norma IEEE 802.16</i>	24
3.4	Sumário e conclusões	27
4	Qualidade de serviço em redes IEEE 802.16	29
4.1	Qualidade de serviços em redes banda Larga sem Fios	29
4.2	Arquitecturas de QoS do IETF para Internet por cabo	31
4.3	QoS na norma IEEE 802.16	32
4.3.1	<i>Fluxos de serviço</i>	35
4.3.2	<i>Classes de serviço da norma IEEE 802.16</i>	43
4.3.3	<i>Escalonamento de diferentes serviços na norma IEEE 802.16-2004</i>	46
4.3.4	<i>Estrutura da transmissão no Uplink</i>	48
4.3.5	<i>QoS, integração das normas IEEE 802.11 e IEEE 802.16</i>	52
4.4	Considerações finais sobre QoS	55
4.5	Sumário e conclusões	56
5	Topologias, antenas e segurança	57
5.1	Topologias de rede	57
5.1.1	<i>Topologia ponto-a-ponto</i>	57
5.1.2	<i>Topologia ponto-multiponto</i>	58
5.1.3	<i>Topologia mesh</i>	60
5.2	Tecnologia SISO e MIMO	62
5.3	Segurança em redes WiMAX.....	64
5.3.1	<i>Associações de segurança</i>	65
5.3.2	<i>Autorização utilizando a gestão privado de chaves</i>	65
5.3.3	<i>Troca de chaves de encriptação de tráfego</i>	67
5.3.4	<i>Criptografia</i>	67
5.4	Sumário e conclusões	68
6	Modelos de propagação	69
6.1	Fórmula de Friis Modificada	69
6.2	Modelo de propagação SUI	70
6.3	Ruído-térmico.....	73

6.3.1	<i>Cálculo da relação portadora-ruído térmico</i>	74
6.4	Desvanecimento.....	75
6.5	Relação portadora-interferência	79
6.6	Sumário e conclusões	85
7	Dimensionamento de ligações ponto-a-ponto a 5.4 GHz.....	87
7.1	Cálculo da desobstrução da zona de Fresnel	87
7.2	Dimensionamento e instalação de uma ligação PTP pré-WiMAX	90
7.3	Dimensionamento dos feixes WiMAX.....	95
7.3.1	<i>Cálculo da atenuação segundo a fórmula de Friis</i>	96
7.3.2	<i>Cálculo da potência recebida segundo a fórmula de Friis</i>	97
7.3.3	<i>Cálculo da relação portadora-ruído segundo a fórmula de Friis</i>	98
7.4	Teste com o equipamento BreezeNET B14	98
7.5	Instalação da ligação FCS – HSM com equipamento BreezeNET	100
7.5.1	<i>Optimização da ligação FCS - HAL</i>	102
7.6	Sumário e conclusões	103
8	Planeamento celular a 3.5 GHz	105
8.1	Modelo de propagação de Friis	105
8.1.1	<i>Atenuação</i>	105
8.1.2	<i>Potência recebida</i>	106
8.1.3	<i>Relação portadora-ruído</i>	107
8.2	Modelo de propagação de SUI	107
8.2.1	<i>Atenuação</i>	107
8.2.2	<i>Potência recebida</i>	108
8.2.3	<i>Relação portadora-ruído</i>	108
8.3	Relação portadora-interferência	111
8.4	Teste de cobertura.....	112
8.4.1	<i>Aplicação computacional para aquisição de dados</i>	113
8.4.2	<i>Metodologia de teste</i>	115
8.4.3	<i>Análise dos resultados obtidos</i>	116
8.5	Optimização do débito binário através do QoS no equipamento BreezeMAX 3000 da Alvarion	124
8.5.1	<i>Classe de serviço Best Effort</i>	126
8.5.2	<i>Classe de serviço Non Real Time</i>	129
8.6	Sumário e conclusões	133
9	Planeamento celular a 5.4 GHz	135
9.1	Modelo de propagação de Friis	136
9.1.1	<i>Atenuação</i>	136
9.1.2	<i>Potência recebida</i>	137
9.1.3	<i>Relação portadora-ruído</i>	137
9.2	Modelo de propagação de SUI	138
9.2.1	<i>Atenuação</i>	138
9.2.2	<i>Potência recebida</i>	139
9.2.3	<i>Relação portadora-ruído</i>	140
9.3	Teste de cobertura.....	142
9.3.1	<i>Metodologia de teste</i>	143
9.3.2	<i>Análise dos resultados obtidos</i>	145
9.4	Sumário e conclusões	150

10	Conclusões e sugestões para trabalho futuro.....	151
	Anexos.....	155
	Anexo A – Especificações do equipamento BreezeNET B.....	155
	Anexo B – Especificações do equipamento BreezeMAX.....	159
	Anexo C – Especificações do equipamento BreezeACCESS VL.....	163
	Referências	167

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Normalização global (IEEE e ETSI) para redes sem fios [ITU03].	9
Figura 3.1 - Camadas PHY e MAC da norma IEEE 802.16 [IEEE01].	11
Figura 3.2 - Perfis de rajada: associação dinâmica do tipo de modulação (extraído de [WiMA07]).	13
Figura 3.3 – Exemplo da correspondência entre a constelação de valores binários para a modulação 4-PSK.	14
Figura 3.4 - Constelação da modulação 16-QAM.	15
Figura 3.5 - Constelação da modulação 64-QAM.	15
Figura 3.6 - Portadora única e OFDM (extraído de [Wima04]).	19
Figura 3.7 - Modulação OFDM implementada por meio de um conjunto de filtros.	19
Figura 3.8 - Sinais recebidos em sistemas de banda larga de portadora única e multi-portadora (extraído de [Wima04]).	20
Figura 3.9 - Modulação OFDM na tecnologia WiMAX (extraído de [Wima04]).	21
Figura 3.10 – Descrição das frequências na tecnologia OFDMA (extraído de [Wima04]).	22
Figura 3.11 - Esquema de sub-canalização na tecnologia WiMAX.	23
Figura 3.12 - Sub-canalização em sistemas baseados em (a) OFDM e (b) OFDMA (extraído de [Wima04]).	23
Figura 4.1 - Arquitectura de QoS da norma IEEE 802.16-2004 (extraído de [Chen04]).	33
Figura 4.2 - Arquitectura da camada MAC na estação subscritora (extraído de [Yagh03]).	34
Figura 4.3 - Arquitectura da camada MAC na estação base (extraído de [Yagh03]).	35
Figura 4.4 - Mecanismo de classificação (extraído de [Chen04]).	37
Figura 4.5 - Modelo de referência de gestão da rede (extraído de [Nair04]).	40
Figura 4.6 - Estrutura da MIB wmanIfMIB [Nair04].	41
Figura 4.7 - Tabelas referentes à garantia do fluxo de serviço (extraído de ([Nair04]).	42
Figura 4.8 - Garantia do fluxo de serviço (extraído de [Nair04]).	42
Figura 4.9 - Concessão de privilégio de acesso de dados (<i>data grants</i>) num fluxo de serviço UGS.	44
Figura 4.10 - Mecanismo de QoS para aplicações multimédia (extraído de [Nair04]).	47
Figura 4.11 - Estrutura da sub-trama de DL (extraído de [Eklu02]).	48
Figura 4.12 - Estrutura da sub-trama de UL (extraído de [Eklu02]).	49
Figura 4.13 - Processo de acesso à rede (extraído de [AnGM07]).	51
Figura 5.1 - Topologia ponto-a-ponto (PTP).	58
Figura 5.2 - Topologia ponto-multiponto (PMP).	59
Figura 5.3 - Topologia <i>mesh</i> .	61
Figura 5.4 - SISO, transmissão e recepção de dados.	63
Figura 5.5 - MIMO, transmissão e recepção de dados.	63
Figura 5.6 – A PHY e a camada MAC do WiMAX e a camada de privacidade MAC.	65
Figura 6.1 - Definição de célula de cobertura omnidireccional.	79
Figura 6.2 - Grandezas envolvidas na reutilização de frequências.	79
Figura 6.3 - Interferência co-canal das seis células interferentes recebida na unidade móvel.	80
Figura 6.4 - Seis células que interferem com a célula central que utiliza a frequência 1.	81
Figura 6.5 - Factor de reutilização $k=7$.	83

Figura 6.6 - Interferência co-canal (pior caso).....	84
Figura 7.1 - Esquema representativo do elipsóide de Fresnel.....	87
Figura 7.2 - Sistema de coordenadas para definição de elipsóide de Fresnel.....	88
Figura 7.3 - Ligações ponto-a-ponto entre a Covilhã, Castelo Branco e Guarda.....	91
Figura 7.4 - Ligação entre a Serra da Gardunha e a tutoria do HAL.....	92
Figura 7.5 - Ligação entre a FCS e a Serra da Gardunha.....	92
Figura 7.6 - Ligação entre a Serra da Gardunha e Castelo Branco.....	93
Figura 7.7 - Ligação entre a Serra da Gardunha e tutoria do Hospital Amato Lusitano.....	93
Figura 7.8 - Ligação entre a FCS e o Alto da Malhoeira.....	94
Figura 7.9 - Ligação entre o Alto da Malhoeira e o Barracão.....	94
Figura 7.10 - Ligação entre Barracão e a tutoria do Hospital Sousa Martins.....	95
Figura 7.11 - Atenuação em função da distância segundo a fórmula de Friis.....	97
Figura 7.12 – Potência recebida em função da distância segundo a fórmula de <i>Friis</i> ...	97
Figura 7.13 – Relação Portadora-ruído em função da distância segundo a fórmula de <i>Friis</i>	98
Figura 7.14 – <i>SNR</i> medido vs <i>C/N</i> calculado.....	100
Figura 7.15 – Salto Gardunha – Castelo – HAL.....	101
Figura 7.16 – Instalação na estação repetidora da Serra da Gardunha.....	101
Figura 8.1 - Atenuação segundo o modelo de propagação de <i>Friis</i>	106
Figura 8.2 – Potência recebida segundo o modelo de propagação de <i>Friis</i>	106
Figura 8.3 – Relação portadora-ruído segundo o modelo de propagação de <i>Friis</i>	107
Figura 8.4 - Atenuação segundo o modelo de propagação de SUI.....	108
Figura 8.5 – Potência recebida segundo o modelo de propagação de SUI.....	108
Figura 8.6 – Relação portadora-ruído segundo o modelo de propagação de SUI.....	109
Figura 8.7 – Relação <i>C/N</i> segundo o modelo de propagação de <i>Friis</i> vs SUI.....	109
Figura 8.8 – Relação <i>C/N</i> segundo o modelo de propagação de <i>Friis</i> e valor mínimo para cada modulação.....	110
Figura 8.9 – Relação <i>C/N</i> segundo o modelo de propagação de SUI e valor mínimo para cada modulação.....	111
Figura 8.10 – Variação do <i>C/I</i> com o padrão de reutilização para os diferentes valores de γ de acordo com o modelo de propagação de <i>Friis</i>	112
Figura 8.11 – Dados recebidos através do receptor GPS.....	114
Figura 8.12 – Pré-visualização da ferramenta desenvolvida.....	114
Figura 8.13 – Ligação estação base ao backhaul.....	115
Figura 8.14 – Ligação CPE, computador e receptor GPS.....	116
Figura 8.15 – Valores do <i>SNR</i> na ligação descendente.....	116
Figura 8.16 – Níveis de modulação observado.....	117
Figura 8.17 – <i>SNR</i> medido vs <i>C/N</i> calculado.....	117
Figura 8.18 – Vista geral da área de teste (extraído de <i>Google Earth</i>).....	118
Figura 8.19 – Zona Este da área de teste (extraído de <i>Google Earth</i>).....	119
Figura 8.20 – Quadrante Noroeste área de teste (extraído de <i>Google Earth</i>).....	119
Figura 8.21 – <i>SNR</i> medido vs <i>C/N</i> calculado com γ médio da área Este.....	120
Figura 8.22 – <i>SNR</i> medido vs <i>C/N</i> calculado com γ médio, $\gamma = 2$ e $\gamma = 3$ para a área Este com correcção.....	121
Figura 8.23 – Nível de modulação observado na área Este.....	121
Figura 8.24 – <i>SNR</i> medido vs <i>C/N</i> calculado com γ médio, $\gamma = 2$ e $\gamma = 3$ para a área Noroeste.....	122
Figura 8.25 – Nível de modulação observado na área Noroeste.....	123
Figura 8.26 – <i>SNR</i> medido vs <i>C/N</i> calculado com γ de cada coordenada medida para a área Noroeste.....	123

Figura 8.27 – Variação do C/I com o padrão de reutilização para os diferentes valores de γ de acordo com o modelo de propagação de <i>Friis</i> e o γ médio para cada área considerada.....	124
Figura 8.28- Garantia de QoS do equipamento BreezeMAX 3000 utilizado nos testes.	125
Figura 8.29- Janela <i>QoS Profile</i>	126
Figura 8.30 – Janela <i>Priority Classifier</i>	127
Figura 8.31 – Janela <i>FW Rule</i>	127
Figura 8.32 – Janela <i>Service Profile</i>	128
Figura 8.33 – Janela <i>Subscriber</i>	128
Figura 8.34 – Janela <i>Service</i>	129
Figura 8.35 – Resultado obtido com a classe de serviço BE (<i>Best Effort</i>).	129
Figura 8.36- Janela <i>QoS Profile</i>	130
Figura 8.37 – Janela <i>Priority Classifier</i>	130
Figura 8.38 – Janela <i>FW Rule</i>	131
Figura 8.39 – Janela <i>Service Profile</i>	131
Figura 8.40 – Janela <i>Service</i>	132
Figura 8.41– Resultado obtido com a classe de serviço NRT (<i>Non Real Time</i>).	132
Figura 9.1 – Estação Base AUS-SA com antena sectorial de 120°.....	135
Figura 9.2 - Atenuação segundo o modelo de propagação de <i>Friis</i>	136
Figura 9.3 – Potência recebida segundo o modelo de propagação de <i>Friis</i>	137
Figura 9.4 – Relação portadora-ruído segundo o modelo de propagação de <i>Friis</i>	138
Figura 9.5 - Atenuação segundo o modelo de propagação de SUI.....	139
Figura 9.6 – Potência recebida segundo o modelo de propagação de SUI.....	139
Figura 9.7 – Relação portadora-ruído segundo o modelo de propagação de SUI.....	140
Figura 9.8 – Dimensionamento a 3.5 GHz versus 5.4 GHz segundo o modelo de <i>Friis</i>	141
Figura 9.9 – Dimensionamento a 3.5 GHz versus 5.4 GHz segundo o modelo de SUI.	141
Figura 9.10 – Local da instalação da estação base na primeira fase de teste.	142
Figura 9.11 – Local da instalação da estação base na segunda fase de teste.....	143
Figura 9.12 – Ligação estação base ao backhaul.....	144
Figura 9.13 – Ligação unidade subscritora, computador e receptor GPS.	144
Figura 9.14 – Locais, da cidade, onde foram feitas medições.....	145
Figura 9.15 – <i>Printscreen</i> registado durante o teste.	146
Figura 9.16 – <i>SNR</i> medido versus C/N calculado através do modelo de <i>Friis</i>	148
Figura 9.17 - <i>SNR</i> medido versus C/N calculado através do modelo de SUI.	148
Figura 9.18 – Níveis de modulação registadas durante a transferência da pasta com o ficheiro de 300 MB.....	149
Figura 9.19 - Níveis de modulação registadas durante a transferência da pasta com vários ficheiros.	149

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Tabela comparativa entre famílias da norma IEEE 802.16 [Wima07].	8
Tabela 2.2 - Tipos de acessos possíveis com a norma IEEE 802.16.	8
Tabela 3.1 - Canais utilizados na norma IEEE 802.16-2004 [Rodr05].	14
Tabela 3.2 - Características da camada PHY da norma IEEE 802.16-2004.	17
Tabela 3.3 - Características das interfaces ar da camada PHY da norma IEEE 802.16-2004.	18
Tabela 3.4 - Características da camada MAC da norma IEEE 802.16-2004.	26
Tabela 4.1 - Classes de serviço suportadas pela norma IEEE 802.16 [AnGM07].	46
Tabela 4.2 - Tabela comparativa entre as classes de serviço do WiMAX.	47
Tabela 4.3 - Classes de serviço por aplicações (extraído de [Wima05]).	52
Tabela 5.1 - Principais diferenças entre PKMv1 e PKMv2 [Nuay07].	66
Tabela 6.1 - Constantes do modelo IEEE 802.16 (SUI).	72
Tabela 6.2 - Classificação do modelo de propagação SUI.	72
Tabela 7.1 – Valores de k e α para as polarizações horizontais e verticais em função da frequência (recomendações P.838 da ITU-R) [Sale02].	96
Tabela 7.2 – Resultados dos testes	99
Tabela 7.3 – SNR medido vs C/N calculado.	99
Tabela 8.1 – Valor da modulação em função do valor do SNR e respectiva taxa de transferência esperada.	110
Tabela 8.2 – Expoentes de propagação do modelo de <i>Friis</i> em função do padrão de reutilização.	112
Tabela 9.1 – Dados registados durante a transferência da pasta com o ficheiro de 300 MB.	146
Tabela 9.2 - Dados registados durante a transferência da pasta com vários ficheiros de 300 MB.	147

Lista de abreviaturas

γ	Expoente de propagação
γ_{chuva}	Atenuação específica devido à chuva
$\gamma_{nevoeiro}$	Atenuação específica devido ao nevoeiro
γ_{neve}	Atenuação específica devido à neve
λ	Comprimento de onda
A	Atenuação em espaço livre
A_E	Atenuação dos guias do emissor
A_H	Área do hexágono
A_R	Atenuação dos guias do receptor
A_T	Área total
ber	Taxa de erros binários
b_{rf}	Largura de banda efectiva do ruído
c	Velocidade da luz
C/I	Relação Portadora-interferência
C/N	Relação Portadora-ruído
d	Distância
D	Distância de reutilização
d_m	Distância máxima entre antenas tendo em consideração a curvatura da Terra.
f	Frequência
F	Desvanecimento profundo
G_E	Ganho da antena de emissão
G_R	Ganho da antena de recepção
h_b	Altura da estação base em relação ao solo
h_m	Altura da antena receptora em relação ao solo
I	Potência da interferência co-canal
k	Factor de reutilização
K_B	Constante de Boltzman
L	Atenuação
m	Margem da ligação

m_s	Margem para o desvanecimento selectivo
m_u	Margem para o desvanecimento uniforme
N	Ruído aos terminais da antena
NC	Número de células
N_f	Factor de ruído no receptor
n_0	Ruído térmico
NTC	Número total de canais
p	Potência recebida
p_0	Potência recebida em condições reais de propagação (com desvanecimento)
P_c	Probabilidade da taxa de erro
P_e	Potência emitida
p_n	Potência recebida em condições ideais de propagação (sem desvanecimento)
P_r	Potência recebida
P_s	Probabilidade da taxa de erros devido ao desvanecimento selectivo
P_u	Probabilidade da taxa de erros devido ao desvanecimento uniforme
q	Factor de redução de interferência
R	Raio
s	Factor lognormal de atenuação devido à existência de árvores e estruturas
S/N_{rf}	Relação sinal ruído em radiofrequência
T	Temperatura
T_r	Temperatura do receptor
X_f	Factor de correcção para a frequência
X_h	Factor de correcção para a altura da estação base
z	Distância entre a estação base e o obstáculo

Lista de acrónimos

2G	<i>Second Generation</i>
3DES	<i>Triple Data Encryption Standard</i>
3G	<i>Third Generation</i>
4G	<i>Fourth Generation</i>
AAS	<i>Advanced Antenna Systems</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
ANACOM	Autoridade Nacional de Comunicações
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
ATMng	<i>Advanced Traffic Management</i>
AU	<i>Access Unit</i>
BE	<i>Best Effort</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BS	<i>Base Station</i>
BWA	<i>Broadband Wireless Access</i>
CAC	<i>Call Admission Control</i>
CBC	<i>Cipher Block Chaining</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CCM	<i>Counter with Cipher-block chaining Message authentication code</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CG	<i>Continuous Grant</i>
CID	<i>Connection Identifier</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CPE	<i>Customer Premise Equipment</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DES	<i>Data Encryption Standard</i>
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
DiffServ	<i>Differentiated Services</i>
DL	<i>Downlink</i>
DL-MAP	<i>Downlink Map Message</i>

DOCSIS	<i>Data Over Cable Service Interface Specification</i>
DSA	<i>Dynamic Service Addition</i>
DSCP	<i>DiffServ Code Point</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
EAP	<i>Extensible Authentication Protocol</i>
ErtPS	<i>Extended real-time Packet Service</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FCS	Faculdade de Ciências da Saúde
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FRIC	Factor de Redução de Interferência co-Canal
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
FWA	<i>Fixed Wireless Access</i>
GFR	<i>Guaranteed Frame Rate</i>
GPC	<i>Grant Per Connection</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPSS	<i>Grant Per Subscriber Station</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
HFC	<i>Hybrid Fibre Coax</i>
HIPERACCESS	<i>High Performance Radio Local Area Network</i>
HIPERMAN	<i>High Performance Radio Metropolitan Area Network</i>
HIPERPAN	<i>High Performance Radio Personal Area Network</i>
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
HUMAN	<i>High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network</i>
IDU	<i>InDoor Unit</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IntServ	<i>Integrated Services</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv4	<i>Internet Protocol Version 4</i>
IPv6	<i>Internet Protocol Version 6</i>

ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LMDS	<i>Local Multipoint Distribution System</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MBS	<i>Multicast Broadcast Service</i>
MIB	<i>Management Information Base</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MIR	<i>Maximum Information Rate</i>
MMDS	<i>Multichannel Multipoint Distribution Services</i>
MMS	<i>Multimedia Messaging Service</i>
MobileMAN	<i>Mobile IP for Broadband Wireless Metropolitan Area Networks</i>
MPEG	<i>Motion Picture Experts Group</i>
MS	<i>Mobile Station</i>
NLoS	<i>Non Line of Sight</i>
NRT	<i>Non Real Time</i>
nrtPS	<i>non-real-time Polling Service</i>
ODU	<i>Outdoor Data Unit</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PDA	<i>Pocket Data Assistant</i>
PHY	<i>PHYSical layer</i>
PKM	<i>Privacy and Key Management</i>
PKMv1	<i>Privacy and Key Management version 1</i>
PKMv2	<i>Privacy and Key Management version 2</i>
PM	<i>Poll-Me bit</i>
PMP	<i>Ponto-Multiponto</i>
PTP	<i>Ponto-a-Ponto</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>

RFC	<i>Request For Comments</i>
RSA	<i>Rivest Shamir Adleman</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RSVP	<i>Resource reSerVation Protocol</i>
RT	<i>Real Time</i>
rtPS	<i>Real-time Polling Service</i>
SA	<i>Smart Antennas</i>
SAID	<i>Security Association IDentifier</i>
SCa	<i>Single Carrier</i>
SFID	<i>Service Flow IDentifier</i>
SISO	<i>Single-Input Single-Output</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SS	<i>Subscriber Station</i>
STC	<i>Space Time Coding</i>
SUI	<i>Stanford University Interim</i>
TCO	<i>Traffic Class Octet</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TEK	<i>Traffic Encryption Key</i>
UBI	<i>Universidade da Beira Interior</i>
UGS	<i>Unsolicited Grant Service</i>
UIUC	<i>Uplink Interval Usage Code</i>
UL	<i>UpLink</i>
UL-MAP	<i>UpLink Map Message</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
VLAN	<i>Virtual Local Area Networking</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>

1 Introdução

Na presente dissertação de mestrado pretende dar-se contributos para o desenvolvimento de uma rede sem fios IEEE 802.16 para aplicação ao ensino da medicina. Na Universidade da Beira Interior existe a necessidade de desenvolver um novo sistema de comunicação de rede sem fios de banda larga com aplicação ao contexto universitário, hospitalar e urbano. O objectivo desta rede é ligar a Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior ao Hospital Amato Lusitano e ao Hospital Sousa Martins, criando assim uma ligação ponto-a-ponto de banda larga. Pretende-se também planear uma rede ponto-multiponto, para permitir a cobertura da zona urbana da Covilhã.

No contexto universitário pretende desenvolver-se um suporte eficaz do e-learning, permitindo disponibilizar Internet e Intranet da rede da universidade, a todos os hospitais de forma que os alunos, aí localizados, possam ter acesso aos mesmos recursos informáticos, acesso à Internet, e-mail, comunicação de imagem, vídeo de alta resolução, videoconferência e exames médicos a partir de qualquer unidade hospitalar.

Com o desenvolvimento desta rede permitir-se-á ligar os vários hospitais da região, assim como demonstrar que, no futuro, poder-se-á criar uma ligação entre os sistemas de emergência e segurança, como os Bombeiros, PSP, GNR e Protecção Civil, da região.

1.1 Objectivos e motivação

Esta dissertação de mestrado enquadra-se no âmbito do projecto MobileMAN (*Mobile IP for Broadband Wireless Metropolitan Area Networks*), um projecto interno do Instituto de Telecomunicações/Laboratório Associado. O projecto começou em 2005 e focou vários aspectos como a investigação e demonstração de redes sem fios de banda larga, recorrendo entre outros meios, a instalações piloto. Os principais objectivos do projecto foram:

1. Projecto e desenvolvimento de ligações IEEE 802.16 para comunicações fixas/portáteis;
2. Planeamento de uma rede celular IEEE 802.16;
3. Arquitecturas para interoperabilidade e IP Móvel entre Wi-Fi e WiMAX;

4. Segurança para redes IEEE 802.16 para mobilidade;
5. Serviços multimédia e aplicações para plataformas móveis.

O objectivo da rede ponto-a-ponto desenvolvida foi ligar os hospitais de Castelo Branco, Covilhã e Guarda, de forma a aumentar a cooperação entre estes hospitais e a Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior, permitindo várias formas de comunicação multimédia e IP (*Internet Protocol*), como por exemplo, videoconferência, voz sobre IP e comunicação de imagem e de vídeo de alta resolução, o que é bastante útil para a prática e o ensino de medicina.

Durante o projecto MobileMAN foi também planeada e desenvolvida uma rede de área metropolitana, de banda larga, sem fios na Covilhã. Esta solução suporta comunicações de banda larga e possibilita, portanto, suportar imagem e vídeo de alta definição, bastante úteis no ensino e prática da medicina. Para além disso, suporta dados com elevado ritmo de transmissão e várias formas de comunicação IP, por exemplo, voz sobre IP e videoconferência. Esta rede permitirá aos alunos, docentes e investigadores deslocarem-se, no seu dia-a-dia, mantendo-se contactáveis e com acesso permanente aos recursos da rede, uma mais valia para o modelo pedagógico implementado na licenciatura de medicina.

Esta dissertação reflecte os trabalhos desenvolvidos durante a minha integração como membro do grupo de investigação da equipa do projecto MobileMAN. Os trabalhos realizados inserem-se principalmente nos objectivos 1 e 2 do projecto.

A partir dos trabalhos desenvolvidos e apresentados nesta dissertação, foram dadas várias contribuições em conferências nacionais [RARG07], [SVCR08c], [RMAR08] e internacionais [MARG07a], [SVTC07], [MARG07b], [VCRM08b]. Os grupos de trabalho dos projectos COST (*Traffic and QoS Management in Wireless Multimedia Networks*) [MARG07c], [MARG07d], [MARG07e] e RTCM (Rede Temática de Comunicações Móveis), também receberam algumas contribuições. Foram ainda submetidos, mas à espera de aprovação, artigos em revistas, tais como: *International Journal of Telemedicine and Applications* [VCRM08a], *Teletronikk* [SVCR08a] e *WIRE (Wireless Personal Communications)* [SVCR08b].

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação será estruturada da seguinte forma:

- No Capítulo 2 abordar-se-ão aspectos gerais da norma IEEE 802.16, como alguns conceitos e evolução das famílias de sub-normas que a constituem. É ainda focado o enquadramento da norma dentro do contexto das normas IEEE 802.
- No Capítulo 3 serão focados os principais aspectos da camada física e MAC da norma IEEE 802.16.
- No Capítulo 4 serão definidos os principais parâmetros de qualidade de serviço em redes IEEE 802.16, os seus modos de funcionamento, assim como as classes de serviço existentes na norma.
- No Capítulo 5 apresentar-se-ão as diversas topologias de rede possíveis de utilizar em redes WiMAX, ponto-a-ponto, ponto-multiponto e *mesh*. As tecnologias de antenas SISO e MIMO e os diferentes aspectos de segurança em redes WiMAX serão apresentados.
- No Capítulo 6 serão definidos os modelos de propagação de *Friis* e de *SUI*. Alguns aspectos para o cálculo da relação portadora-ruído e portadora-interferência são também expostos.
- No Capítulo 7 realizar-se-á o dimensionamento de uma ligação ponto-a-ponto a 5.4 GHz. Serão ainda apresentados os resultados e as conclusões obtidos através dum teste de campo.
- No Capítulo 8 realizar-se-á o dimensionamento celular a 3.5 GHz para equipamento BreezeMAX 3000, para a cobertura da área metropolitana da cidade da Covilhã. Os resultados e análise de um teste de cobertura serão também expostos. Apresentar-se-á ainda a optimização do débito binário, em transferências FTP, através das classes de serviço WiMAX.
- No Capítulo 9 realizar-se-á outro dimensionamento celular, mas desta vez, a 5.4 GHz, para equipamento BreezeNET VL. Espor-se-ão os resultados de um teste de cobertura realizado com este equipamento e a respectiva análise dos dados obtidos.
- Finalmente, no Capítulo 10 apresentar-se-ão as conclusões finais e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 Aspectos gerais da norma IEEE 802.16

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) é o nome comercial dado à norma IEEE 802.16 para redes metropolitanas sem fios. Esta também é conhecida como IEEE WirelessMAN ou ainda “*Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*”. Formada por operadoras, fabricantes de componentes e equipamentos, a aliança WiMAX é uma organização sem fins lucrativos, criada para impedir que os problemas de incompatibilidade e interoperabilidade encontrados na norma IEEE 802.11 se repitam na norma IEEE 802.16. A referida organização tem o objectivo de ajudar a promover e certificar a compatibilidade e interoperabilidade dos equipamentos de banda larga sem fios.

Um dos objectivos da norma é disponibilizar o acesso de banda larga sem fios para novas localizações, cobrindo distâncias superiores, sem a necessidade de investimento numa infra-estrutura de custo elevado, como ocorre com redes de acesso banda larga por cabo, e sem as limitações de distância das tecnologias DSL (*Digital Subscriber Line*). Esta normalização visa também aumentar a competitividade no acesso à banda larga através do aumento da produção de componentes, diminuição do custo de produção de equipamentos e acessos à banda larga mais rápidos e baratos para os utilizadores finais. Entre as mais de duzentas e vinte empresas que fazem parte desta organização encontram-se a Intel, a Alvarion, a Analog Devices, a Ericsson, a Motorola, a Nokia, a Samsung, a Siemens, a AT&T, a British Telecom, a Deutsche Telekom, a France Telecom, a Fujitsu e a Microsoft.

As principais características da norma IEEE 802.16 são:

- Modulação – a norma IEEE 802.16 apresenta três modos de operação, todos na camada física (PHY), estes são o *single carrier*, OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) 256, ou OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) 2K. No entanto, o modo mais comumente utilizado é o OFDM 256.
- Débito Binário – através de um robusto esquema de modulação permite elevadas taxas de débito binário, um elevado alcance e uma grande eficiência espectral, que também é tolerante às reflexões do sinal. A velocidade de transmissão dos dados pode variar entre 1 Mbps e 75 Mbps, dependendo das condições de propagação. O WiMAX utiliza esquemas de modulação e codificação adaptativa

que permitem que uma estação base, BS (*Base Station*), negocie o débito binário e o alcance do sinal. Ou seja, se por qualquer razão, não for possível utilizar um esquema de modulação de ordem superior, a modulação será automaticamente reduzida para uma ordem inferior, reduzindo o débito binário, mas aumentando o raio de cobertura da célula

- Escalabilidade – de forma a acomodar o planeamento celular, a norma IEEE 802.16-2004 suporta diversas larguras de banda. Isto significa que um operador pode dividir o espectro de banda disponível, aumentando assim o número de utilizadores.
- Cobertura – a norma IEEE 802.16 também suporta tecnologias como "*smart antennas*" e *mesh*. A utilização de técnicas avançadas de múltiplo acesso, OFDMA, codificação e modulação aumentam o desempenho na ausência de linha de vista. Os ganhos superiores permitem maior penetração nos obstáculos em longas distâncias.
- Qualidade de Serviço – a norma IEEE 802.16 apresenta parâmetros de qualidade de serviço que permitem a transmissão de voz e vídeo, que requerem redes de baixa latência. O controlo do acesso ao meio, MAC (*Medium Access Control*), da norma fornece um elevado número de serviços num padrão equivalente aos serviços hoje oferecidos pelos serviços de ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) e de *Cable Modem*, tudo dentro da mesma BS.
- Segurança – características de privacidade e encriptação estão previstos na norma IEEE 802.16, permitindo transmissões seguras incluindo os procedimentos de autenticação.

A versão inicial da norma IEEE 802.16 publicada em Abril de 2002, opera nas frequências de 10 a 66 GHz e requer linha de vista, LoS (*Line of Sight*). A emenda IEEE 802.16-2004, aprovada em Junho de 2004, não requer transmissão com linha de vista, NLoS (*Non Line of Sight*) e permite a utilização de frequências mais baixas, 2 a 11 GHz, muitas das quais não são licenciadas.

A norma IEEE 802.16 tem uma cobertura máxima de 50 km, taxas de transferência médias de 75 Mbps e máxima de 268 Mbps, pode ainda suportar centenas de utilizadores. As emendas à norma IEEE 802.16, possibilitarão que uma única estação base ofereça BWA tanto para terminais fixos como móveis. Essas correções irão preencher a lacuna entre as elevadas taxas de dados das redes locais sem fios, WLAN

(*Wireless Local Area Network*), e a elevada mobilidade celular das redes de área metropolitanas, MAN (*Metropolitan Area Network*).

As sub-famílias de normas que constituem a norma IEEE 802.16 são:

- IEEE 802.16 – esta é a norma original, projectada para normalizar implementações LMDS (*Local Multipoint Distribution System*). É utilizada em frequências de 10 - 66 GHz.
- IEEE 802.16a – projectada para atender às frequências mais baixas (2 - 11 GHz). Foi especificada com o objectivo de competir com as tecnologias como xDSL e *cable modems*. Podem obter-se taxas de transmissão até 75 Mbps, um alcance máximo de 50 km e suporta ambientes NLoS.
- IEEE 802.16b – trata aspectos relativos à qualidade de serviço.
- IEEE 802.16c – especifica aspectos de interoperabilidade, protocolos e especificação de testes de conformidade.
- IEEE 802.16-2004 – actualização da norma IEEE 802.16 que consolida as revisões das normas IEEE 802.16a e IEEE 802.16c numa única norma, substituindo o IEEE 802.16-2004 ou 802.16a/REVd como a norma base. Entre as alterações pode destacar-se o suporte de antenas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), o que aumenta a fiabilidade e alcance em multi-percurso.
- IEEE 802.16e – também conhecida como IEEE 802.16-2005, adiciona especificações de mobilidade (WMANs móveis). Aspectos como largura de banda limitada (um máximo de 5 MHz), velocidade mais lenta e antenas menores possibilitam uma mobilidade veicular (até 150 km/h). É compatível com as especificações da norma IEEE 802.16. Em frequências inferiores a 3.5 GHz pode oferecer raios de cobertura compreendidos entre 2 a 5 km, em ambiente urbano.
- IEEE 802.16m – espera-se que esta norma esteja pronta em 2009, pretende-se elevar o débito binário máximo para 1Gbps e possivelmente fundi-la com a 4G. À semelhança da IEEE 802.16e, irá suportar tecnologia MIMO e manter a compatibilidade com as normas já existentes.

De forma a complementar as informações anteriormente dadas, a Tabela 2.1 apresenta as principais características e diferenças entre as mais importantes sub-famílias de normas que constituem a IEEE 802.16.

Tabela 2.1 - Tabela comparativa entre famílias da norma IEEE 802.16 [Wima07].

	IEEE 802.16	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e
Data de aprovação	Dezembro 2001	Junho de 2004	Dezembro 2005
Espectro de Frequências [GHz]	10 - 66 GHz	2 - 11 GHz	2 - 6 GHz
Condições do Canal	LoS	LoS e NLoS	LoS e NLoS
Débito binário [Mbps]	32 - 34.4 (canal de 28 MHz)	1 - 75	1 - 75
Esquema de Transmissão	Portadora única	Portadora única, 256 OFDM ou 2048 OFDM	Portadora única, 256 OFDM ou SOFDM (128, 512, 1024, 2048 sub-portadoras)
Modulação	QPSK, 16-QAM e 64-QAM	QPSK, 16-QAM e 64-QAM,	QPSK, 16-QAM e 64-QAM,
Tipo de Mobilidade	Fixa	Fixa e Mobilidade Pedestre	Mobilidade, <i>roaming</i> regional
Multiplexação	TDD e FDD	TDD e FDD	TDD e FDD
Largura de Banda [MHz]	20, 25 e 28	Escalável entre 1.5 e 20 (até 16 sub-canais lógicos.	Escalável de 1.5 e 20 (até 16 sub-canais lógicos)
Raio de cobertura celular [km]	2 - 5	5 - 10	2 - 5

A Tabela 2.2 apresenta os tipos de acesso possíveis por cada norma IEEE 802.16, assim como os dispositivos e velocidades que o permitem [Yagh03].

Tabela 2.2 - Tipos de acessos possíveis com a norma IEEE 802.16.

Tipo de acesso	Dispositivos	Localidade/ Velocidade	Handover	802.16-2004	802.16e
Fixo	CPEs <i>indoor</i> e <i>outdoor</i>	Simples/ Estacionário	Não	Sim	Sim
Pedestre	CPEs <i>indoor</i> , placas PCMCIA	Múltipla/ Estacionário	Não	Sim	Sim
Portátil	Placas PCMCIA ou mini-placas	Múltipla/ Velocidade pedestre	<i>Hard handover</i>	Não	Sim
Mobilidade simples	Placas PCMCIA ou mini-placas, PDA ou <i>smartphones</i>	Múltipla/ Baixa velocidade veicular	<i>Hard handover</i>	Não	Sim
Mobilidade total	Placas PCMCIA ou mini-placas, PDA ou <i>smartphones</i>	Múltipla/ Alta velocidade veicular	<i>Soft handover</i>	Não	Sim

2.1 Enquadramento da norma IEEE 802.16 nas redes sem fios IEEE 802

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) definiu um conjunto de normas complementares para redes sem fios, Figura 2.1. Essa normalização inclui a norma IEEE 802.15 para as redes pessoais PAN (*Personal Area Network*), também conhecida por *bluetooth*, a IEEE 802.11 para as redes locais LAN (*Local Area Network*), ou Wi-Fi, a IEEE 802.16 para as redes metropolitanas MAN, ou WiMAX, e a IEEE 802.20 para as redes geograficamente distribuídas WAN (*Wide Area Network*), como a 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Cada norma representa uma tecnologia otimizada para mercados e modelos distintos, sendo projectada para complementar as demais. Um bom exemplo, do referido anteriormente, é a proliferação de redes locais sem fios domésticas, empresariais e *hotspots* comerciais baseados na norma IEEE 802.11. Essa proliferação de WLANs, predominantemente *indoor* está a impulsionar a procura de ligações de banda larga de Internet, procura essa a que a norma IEEE 802.16 pode responder, oferecendo ligações *outdoor* por parte dos fornecedores de serviço de comunicação. Para os operadores e fornecedores de serviço, os sistemas construídos com base na norma IEEE 802.16, representam o terceiro anel da Figura 2.1, são de fácil implantação, capazes de ligar residências, empresas e universidades ao núcleo das redes de telecomunicações em todo o mundo.

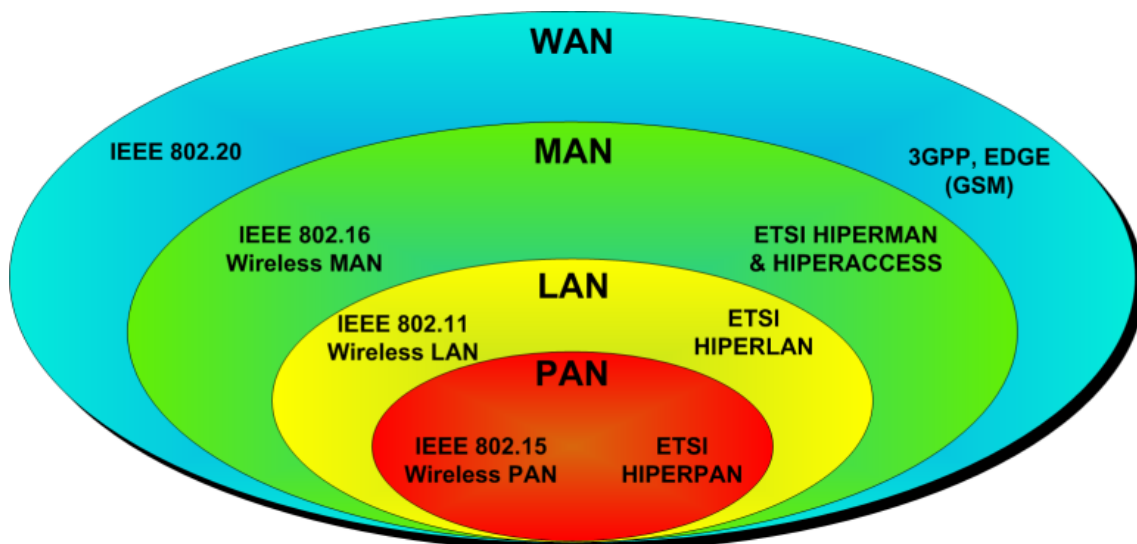


Figura 2.1 - Normalização global (IEEE e ETSI) para redes sem fios [ITU03].

2.2 Sumário e conclusões

Neste Capítulo foi apresentado um estudo inicial da norma IEEE 802.16 (WiMAX) para o acesso de banda larga sem fios. A evolução das sub-famílias que a constituem ficou também ilustrada, assim como, as suas principais características. Enquadrou-se a norma em função das suas características. Mostrou-se ainda que, a referida norma pode coexistir e complementar as restantes normas IEEE 802, de modo a oferecer uma solução integrada para o acesso às redes de comunicação.

Conclui-se então que o WiMAX representa um avanço tecnológico importante na área de redes sem fios, em virtude das promessas em termos de desempenho e cobertura, fundamentadas no conjunto de funcionalidades suportadas.

As características do WiMAX são compatíveis com a actual procura de banda larga, o que permite desenvolver sistemas de banda larga sem fios com interoperabilidade, permitindo maior flexibilidade de acesso.

A aliança WiMAX demonstra que estão a ser feitos grandes investimentos, por partes das operadoras, fabricantes de componentes e equipamentos, para que a tecnologia seja colocada no mercado com sucesso.

3 Camada física e camada MAC da norma IEEE 802.16

3.1 Aspectos gerais

A norma IEEE 802.16 define que o acesso de banda larga sem fios nas redes metropolitanas é, inicialmente, garantido numa forma de acesso fixa. Assim, o *backbone* ou espinha dorsal da BS é garantido por uma rede pública, cada BS tem a capacidade de fornecer acesso a centenas de estações subscritoras, SS (*Subscriber Station*) fixas. As BSs devem utilizar a camada MAC, como definido na norma IEEE 802.16, e atribuir largura de banda aos canais de *uplink*, UL (sentido de transmissão ascendente, da SS para a BS), e *downlink*, DL (sentido de transmissão descendente, da BS para a SS), ou aos utilizadores, de acordo com as suas necessidades, que se adequa à faixa de frequência em utilização.

Nesta Secção, apresentam-se as especificações das camadas PHY e MAC definidas no WiMAX, com base na norma IEEE 802.16 e na norma IEEE 802.16-2004 [Rama04], Figura 3.1.

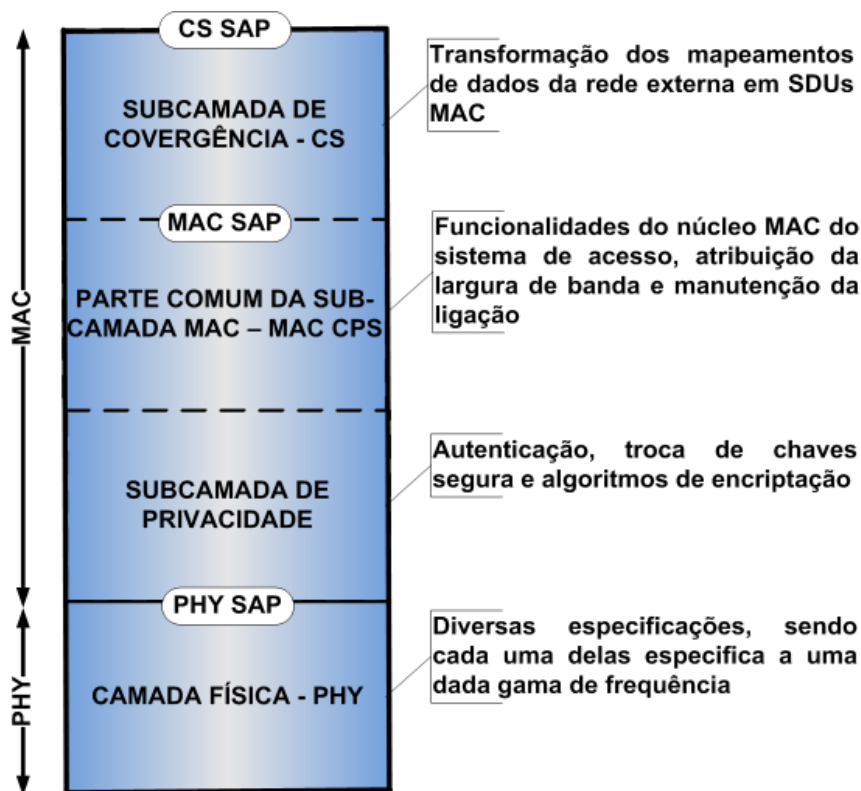


Figura 3.1 - Camadas PHY e MAC da norma IEEE 802.16 [IEEE01].

3.2 Camada física

O WiMAX foi projectado para suportar ritmos de transmissão elevados a relativamente grandes distâncias, garantindo assim um elevado nível de segurança. Para que o WiMAX seja uma realidade, na camada PHY, o grupo de investigação, IEEE 802.16, baseou-se em tecnologias como: o OFDM, o TDD (*Time Division Duplexing*), o FDD (*Frequency Division Duplexing*), o QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) e o QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

A finalidade da camada PHY é o transporte físico eléctrico ou radioeléctrico dos dados. Este transporte de dados em redes sem fios pode ser feito através do ar, infravermelhos ou laser.

Existem métodos que asseguram, de forma eficiente, esse transporte de dados. Esses métodos são caracterizados pela largura de banda medida em Mbps e espectro de frequência medido em MHz/GHz.

3.2.1 Características da camada física da norma IEEE 802.16

Na especificação da camada PHY assumiu-se a propagação em ambientes LoS, pois em bandas de frequências elevadas (10 - 66 GHz) é difícil assegurar a propagação NLoS. A partir dessa restrição de projecto, o tipo de modulação escolhida foi a SCM (*Single Carrier Modulation*) com FEC (*Forward Error Correction*), a base da especificação da interface ar, denominada “WirelessMAN-SC”. Muitos desafios de projecto ainda permanecem em aberto. Nas arquitecturas ponto-multiponto, a BS basicamente transmite um sinal TDM (*Time Division Multiplexing*), estando cada cliente associado a um *slot* temporal em série. No sentido UL, a transmissão é feita através de TDMA (*Time Division Multiple Access*). Após uma série de discussões relativas ao modo de multiplexação, seleccionou-se um projecto para tráfego em rajada, o que permitiu que a interface ar oferecesse suporte para os modos de operação TDD (o UL e o DL compartilham um canal, mas não transmitem simultaneamente) e FDD (o UL e o DL operam em canais separados, algumas vezes simultaneamente). Essa característica permite a interoperabilidade da norma IEEE 802.16 com sistemas celulares e outros sistemas sem fios. Há disponibilidade de suporte para utilizadores FDD *half-duplex*

(que é uma opção mais barata, já que a transmissão e a recepção não são simultâneas), que foi adicionada com complexidade reduzida.

Ambas as alternativas, TDD e FDD, oferecem suporte a perfis adaptativos de tráfego em rajada nos quais as opções de modulação e codificação podem ser associadas, dinamicamente, rajada a rajada (*burst by burst*) [Ekl02].

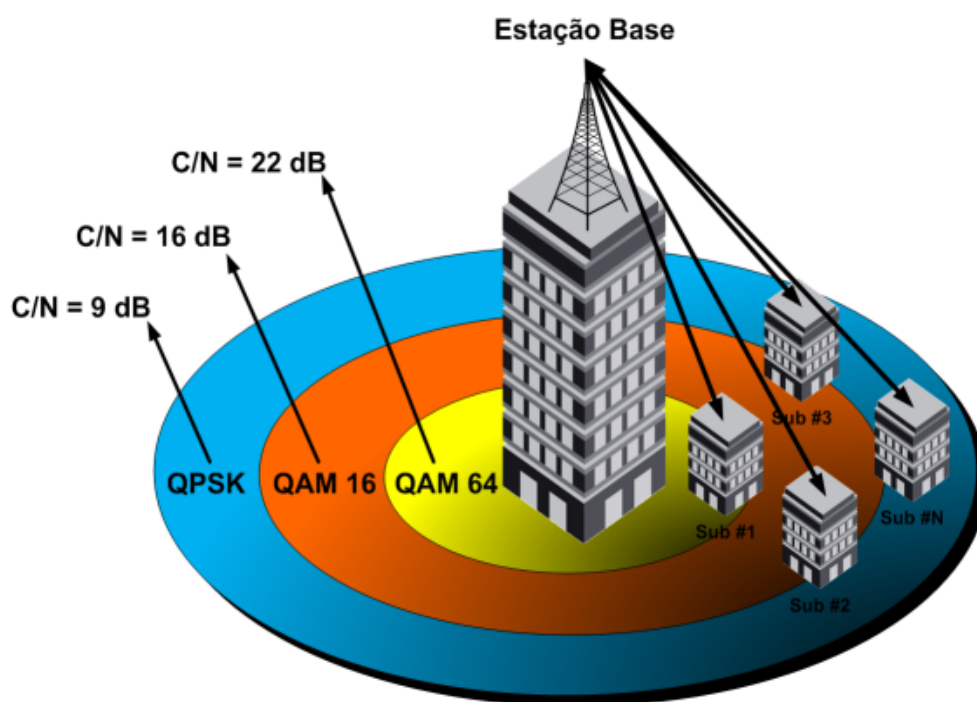


Figura 3.2 - Perfis de rajada: associação dinâmica do tipo de modulação (extraído de [WiMA07]).

Quando a potência do sinal diminui em função da distância relativamente à BS, a relação sinal-ruído, *SNR* (*Signal-to-Noise Ratio*), também diminui. Por essa razão, a norma IEEE 802.16 emprega três esquemas de modulação diferentes, dependendo da distância a que a SS se encontra em relação à BS, Figura 3.2. Para utilizadores na região próxima da BS utiliza-se a modulação 64-QAM, com 6 bits/*baud*. No caso de utilizadores situados a uma distância média utiliza-se a modulação 16-QAM, com 4 bits/*baud*. Para utilizadores distantes utiliza-se a modulação QPSK, com 2 bits/*baud*. Por exemplo, para um espectro de 25 MHz a modulação 64-QAM oferece 150 Mbps, a modulação 16-QAM oferece 100 Mbps, e a modulação QPSK oferece 50 Mbps. Ou seja, quanto mais distante se encontrar o utilizador em relação à BS, mais baixo será o ritmo de transmissão de dados.

O tipo de modulação é ajustado quase instantaneamente, de modo a adaptar-se às condições da ligação e assim, melhorar a transmissão de dados, o que permite uma

utilização eficiente da largura de banda [Carv05]. Para a norma IEEE 802.16-2004 estão definidos canais de 3.5, 7 e 10 MHz, Tabela 3.1 [Shak06].

Tabela 3.1 - Canais utilizados na norma IEEE 802.16-2004 [Rodr05].

Largura de banda do canal [MHz]	Ritmo de transmissão [Mbps]		
	QPSK	16-QAM	64-QAM
3.5	03.3	06.5	9.8
5.0	04.6	09.3	13.9
7.0	06.5	13.1	19.6
10.0	09.3	18.7	18.0
20.0	18.7	37.5	52.6

Como foi mencionado, os tipos de modulação disponíveis na norma IEEE 802.16 englobam os sistemas com modulação de fase PSK (*Phase Shift Keying*) e os sistemas com modulação de amplitude em quadratura QAM.

De entre os sistemas PSK, a camada PHY utiliza a modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), que é um tipo de modulação na qual uma portadora é enviada em quatro fases (45° , 135° , 225° e 315°), com a transição entre dois símbolos vizinhos, sendo codificada através de dois bits por símbolo. A Figura 3.3 apresenta a constelação da modulação QPSK, com quatro estados possíveis por símbolo, onde cada símbolo transmite dois bits de informação, exemplificando um possível mapeamento de estados para valores binários.

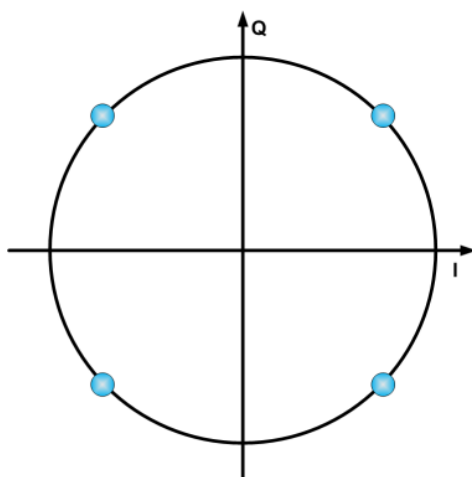


Figura 3.3 – Exemplo da correspondência entre a constelação de valores binários para a modulação 4-PSK.

A modulação QAM apresenta algumas variantes. O mecanismo definido para a modulação 16-QAM utiliza quatro valores em cada eixo, disponibilizando 16 estados possíveis e transportando quatro bits por símbolo. Quando se garante um valor de relação sinal-ruído elevado, podem-se utilizar constelações com densidades superiores, por exemplo, a modulação 64-QAM. A 64-QAM é a modulação mais utilizada nos sistemas de cabo em todo o mundo, pois oferece um desempenho elevado, havendo um equilíbrio entre a robustez e a compatibilidade com a infra-estrutura dos sistemas cablados. Nas Figuras 3.4 e 3.5 apresentam-se os diagramas das constelações das modulações 16-QAM e 64-QAM, respectivamente.

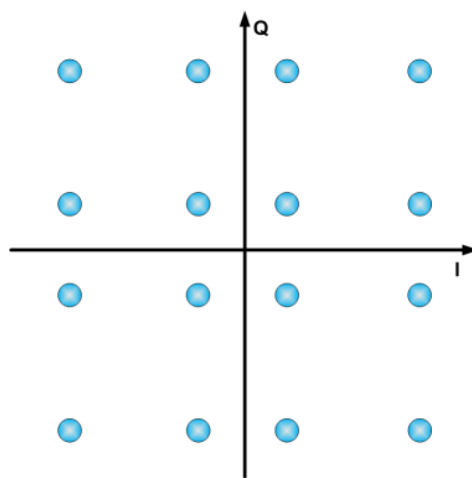


Figura 3.4 - Constelação da modulação 16-QAM.

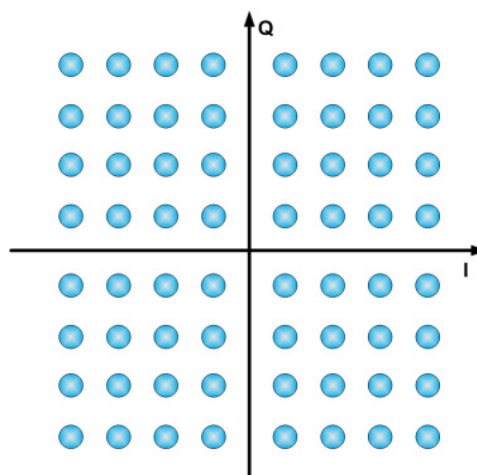


Figura 3.5 - Constelação da modulação 64-QAM.

O projecto da norma IEEE 802.16-2004 cobre as bandas de frequência licenciadas e não licenciadas. A norma oferece quatro especificações para a interface ar, definidas para garantir a interoperabilidade, que serão mencionadas a seguir [Eklu02]:

- WirelessMAN-SCa - utiliza o formato de modulação de portadora única (*Single Carrier Modulation*).
- WirelessMAN-OFDM - projectada para operação sem linha de vista, em frequências abaixo de 11 GHz, utiliza a modulação OFDM, com uma transformada de 256 sub-portadoras. Além das funcionalidades especificadas na WirelessMAN-SCa, também suporta a topologia *mesh* e sub-canalização na ligação UL, que representam importantes ferramentas para a optimização da cobertura do sistema.
- WirelessHUMAN - interface ar utilizada com bandas não licenciadas, sendo por isso denominada *High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network*. Especifica a operação nas faixas de 5 GHz e 6 GHz, utiliza DFS (*Dynamic Frequency Selection*) para detectar e evitar interferências. Nos outros aspectos é similar à interface ar WirelessMAN-OFDM.
- WirelessMAN-OFDMA - suporta operação NLoS em frequências abaixo de 11 GHz e baseia-se no esquema de múltiplo acesso, denominado OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Trata-se de uma extensão da técnica de modulação OFDM que, permitir compartilhar o canal por múltiplos utilizadores. Para além das funcionalidades especificadas na WirelessMAN-SCa, suporta sub-canalização nas ligações UL e DL.

Na norma IEEE 802.16-2004 escolheu-se o formato de sinalização OFDM, de entre concorrentes como o CDMA (*Code Division Multiple Access*), pela sua capacidade de oferecer suporte à comunicação NLoS com um elevado desempenho, mantendo, simultaneamente, um nível elevado de eficiência espectral, maximizando a utilização das frequências disponíveis. No caso do CDMA (utilizado nas normas de comunicações celular 2G, *Second Generation* e 3G, *Third Generation*), a largura de banda para RF (*Radio Frequency*) deve ser muito superior ao débito binário dos dados, de modo a manter um ganho de processamento suficiente para superar a interferência. Constata-se que esse procedimento não é prático para frequências inferiores a 11 GHz já que, por exemplo, para taxas de dados superiores a 70 Mbps seria necessário que a largura de banda para RF ultrapassasse 200 MHz, de modo que, essa exigência fosse cumprida.

O projecto da camada PHY da norma IEEE 802.16-2004 foi, fortemente, influenciado pela necessidade da comunicação NLoS. A necessidade de acesso sem linha de vista directa pode ser observada no contexto das aplicações residenciais. Nesse contexto, os

telhados das residências podem ser tão baixos que, não obtenham uma linha de vista directa com as antenas posicionadas nas estações base, possivelmente devido à obstrução provocada por árvores, torres ou ainda outros prédios. Desta forma, uma significativa propagação multi-percurso é esperada. Para garantir um desempenho robusto atendendo a diferentes canais, que endereçam frequências diversificadas (tendo em vista as variações encontradas no mercado mundial), a norma IEEE 802.16-2004 incorpora, ainda, algumas outras características, a saber: canais com largura de banda flexível, perfis de rajada adaptativos, encaminhamento e correcção de erro com concatenação *Reed-Solomon* e código convolucionais, AAS (*Advanced Antenna Systems*) opcional para garantia da capacidade, DFS (*Dynamic Frequency Selection*) que ajuda a minimizar a interferência e STC (*Space Time Coding*) para melhorar o desempenho em ambientes, onde ocorre desvanecimento do sinal, *fading*, (podendo ser causado por interferências entre duas ou mais versões do sinal transmitido que, chegam ao receptor em tempos ligeiramente diferentes), através de diversidade espacial.

A Tabela 3.2 apresenta uma associação entre as principais características da camada PHY da norma IEEE 802.16-2004 de forma resumida, assim como, os benefícios por ela introduzidos.

Tabela 3.2 - Características da camada PHY da norma IEEE 802.16-2004.

Características	Benefícios
OFDM FFT com 256 sub-portadoras	Oferece suporte ao endereçamento multi-percurso para LoS e NLoS (<i>outdoor</i>).
Modulação adaptativa e códigos para correcção de erro variável por rajada RF	Garante uma ligação RF robusta enquanto maximiza a taxa de transmissão para cada utilizador.
Multiplexação TDD e FDD	Pode ser utilizado para cobrir um vasto conjunto de regulamentações em vigor por todo o mundo.
Canais com tamanhos flexíveis	Oferece a flexibilidade para operar em diferentes bandas de frequência com requisições de canais variáveis.
Suporte de sistemas de antenas inteligentes	A crescente acessibilidade de antenas inteligentes (SA – <i>Smart Antennas</i>) permite suprimir interferências e aumentar o ganho do sistema.

A Tabela 3.3 apresenta um resumo das interfaces ar que compõem a especificação da camada PHY das normas IEEE 802.16 e IEEE 802.16-2004, definindo a sua aplicação, opções adicionais e o mecanismo de multiplexação [Ohrt05].

Tabela 3.3 - Características das interfaces ar da camada PHY da norma IEEE 802.16-2004.

Designação	Bandas de aplicação	Função	LoS/ NLoS	Opções	Multiplexação
WirelessMAN -SC	10 - 66 GHz (licenciadas)	PTP	LoS	-	TDD FDD
WirelessMAN -SCa	2 - 11 GHz (licenciadas)	PTP	NLoS	AAS, ARQ, STC	TDD FDD
WirelessMAN -OFDM	2 - 11 GHz (licenciadas)	PTM	NLoS	AAS, ARQ, <i>Mesh</i> , STC	TDD FDD
WirelessHUM AN	2 - 11 GHz (não licenciadas)	PTM	NLoS	AAS, ARQ, <i>Mesh</i> , STC	TDD
WirelessMAN -OFDMA	2 - 11 GHz (licenciadas)	PTM	NLoS	AAS, ARQ, STC	TDD FDD

3.2.2 OFDM

Neste subcapítulo é apresentada a tecnologia OFDM, assim como, a forma como as suas características a tornam num dos elementos fundamentais e apelativos de sistemas IEEE 802.16 [Ohrt05].

O OFDM não é uma técnica nova, foi patenteado pelos *Bell Labs* originalmente em 1970, sendo a tecnologia então incorporada em vários sistemas DSL, assim como, no DVB (*Digital Video Broadcast*) e na norma IEEE 802.16-2004.

Esta tecnologia é baseado numa transformada matemática denominada FFT (*Fast Fourier Transform*), que permite que vários canais sobreponham grande parte da sua energia sem perderem as suas características individuais (ortogonalidade), ou seja, sem interferirem entre si. A técnica OFDM é especialmente popular em aplicações de redes sem fios, devido à sua resistência à interferência e degradação. De facto, o OFDM permite que sistemas IEEE 802.16 operem com grandes espalhamentos temporais (*delay spread*) de sinal, típicos de ambientes NLoS onde tais sistemas são implementados. Pelo facto de o OFDM ser composto de múltiplas portadoras de banda estreita (baixa taxa de transmissão, longo período), o desvanecimento selectivo está localizado num subconjunto de portadores, fácil de equalizar. A interferência inter-simbólica é reduzida significativamente, pois a taxa completa de transmissão (portadora única) é dividida em taxas menores, com símbolos de maior duração. A Figura 3.6

apresenta uma comparação simples, entre portadora única e OFDM, que ilustra o conceito.

O esquema de modulação OFDM pode ser implementado como um conjunto de filtros, Figura 3.7.

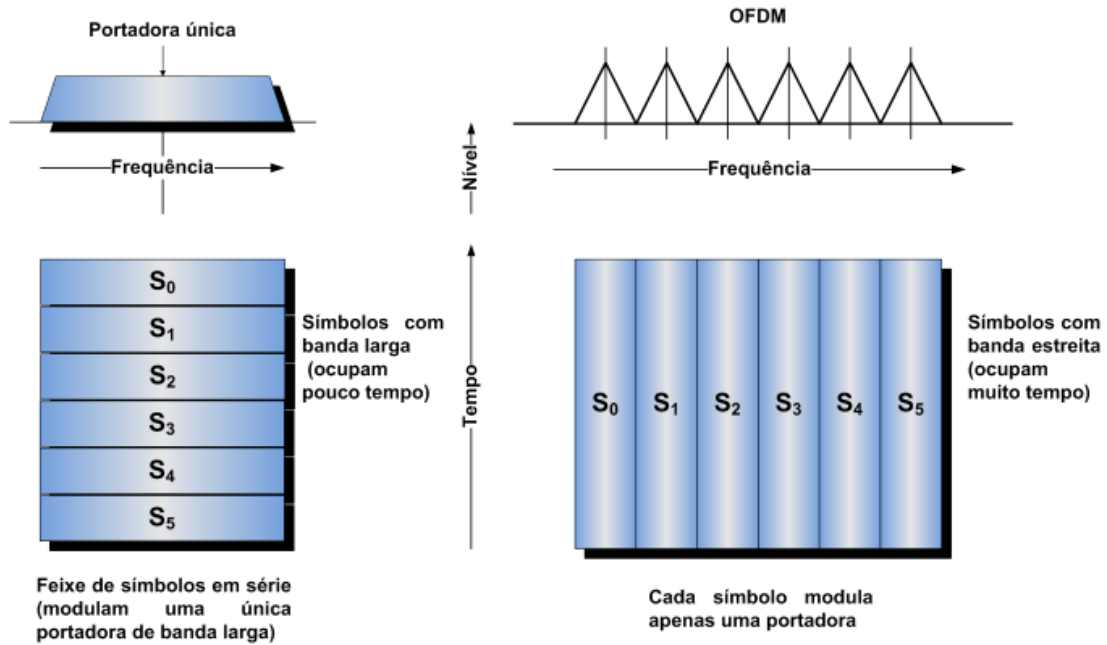


Figura 3.6 - Portadora única e OFDM (extraído de [Wima04]).

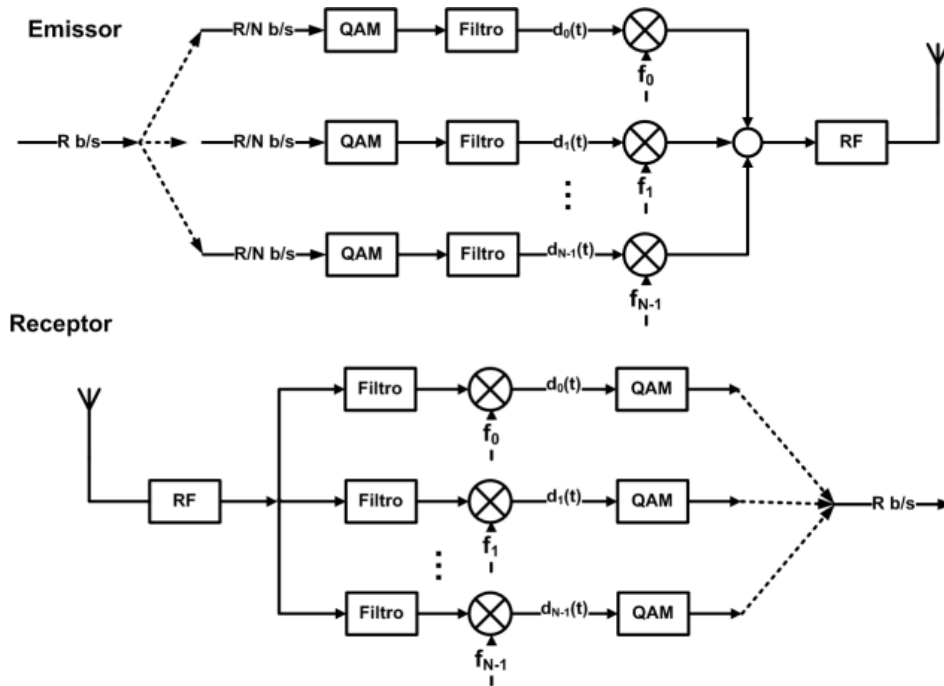


Figura 3.7 - Modulação OFDM implementada por meio de um conjunto de filtros.

Nesse caso, uma sequência de bits transmitida a uma taxa de R bits/s é multiplexada em N sub-canais, resultando na transmissão de R/N bits/s sobre cada sub-portadora. Essa estratégia tem como benefício imediato a possibilidade de utilização de equalizadores simplificados nos receptores. A Figura 3.8 (a) apresenta a distorção imposta pelo canal de rádio a um sinal transmitido por um sistema de banda larga de portadora única, que requer um equalizador de elevada complexidade para a recomposição do sinal original. No caso da Figura 3.8 (b), o canal de rádio distorce uniformemente cada sub-canal, de modo que a operação de equalização de cada sub-portadora se resume a uma simples amplificação.

Outra vantagem importante é o aumento da eficácia na utilização de técnicas de codificação e correção de erros, possibilitado pela transmissão a taxas reduzidas em cada sub-portadora.

Alternativamente, é possível implementar a modulação OFDM por meio de transformadas discretas de Fourier, viabilizando a utilização DSP (*Digital Signal Processor*) de elevado desempenho, que resulta num sistema mais estável, flexível e de custo reduzido. Com a rápida evolução dos DSPs, a modulação OFDM tem sido crescentemente adoptada nas soluções modernas de redes locais sem fios de banda larga.

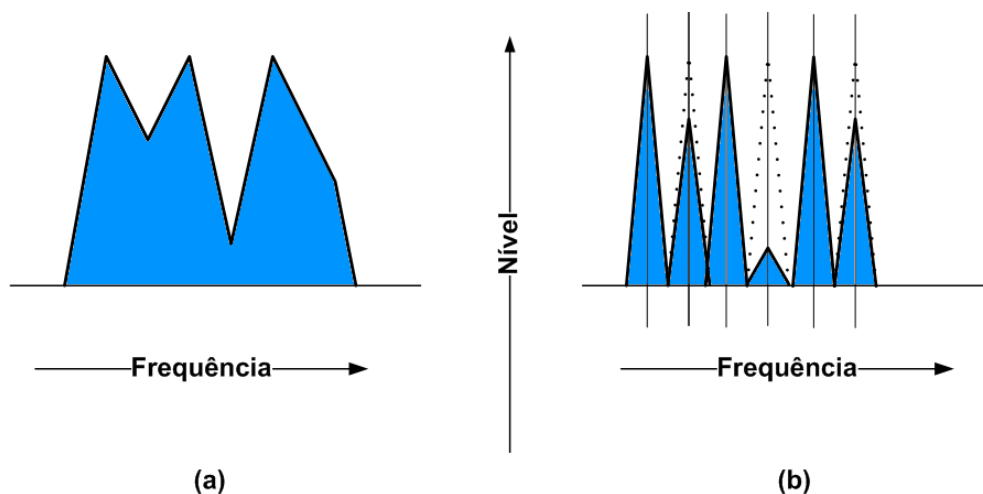


Figura 3.8 - Sinais recebidos em sistemas de banda larga de portadora única e multi-portadora (extraído de [Wima04]).

O esquema de modulação OFDM é o especificado para a tecnologia WiMAX, Figura 3.9. A informação é mapeada em símbolos de comprimento T_s , que compreendem um intervalo de guarda T_g e o símbolo efectivo, de duração, T_b , Figura 3.9 (a). O intervalo

de guarda, T_g tem a função de aumentar a robustez ao desvanecimento por multipercurso.

A porção final de cada símbolo é ciclicamente copiada sobre porção reservada ao intervalo de guarda e, origina um prefixo cíclico, CP (*Cyclic Prefix*), que contribui para manter a ortogonalidade entre as sub-portadoras, Figura 3.9 (b). Na Figura 3.9 (c), podem observar-se os tipos de sub-portadoras definidos na camada PHY OFDM da tecnologia WiMAX. As sub-portadoras piloto são utilizadas nos mecanismos de controlo da potência, ao passo que as sub-portadoras DC podem ser utilizadas como banda de guarda dentro de um canal de banda larga.

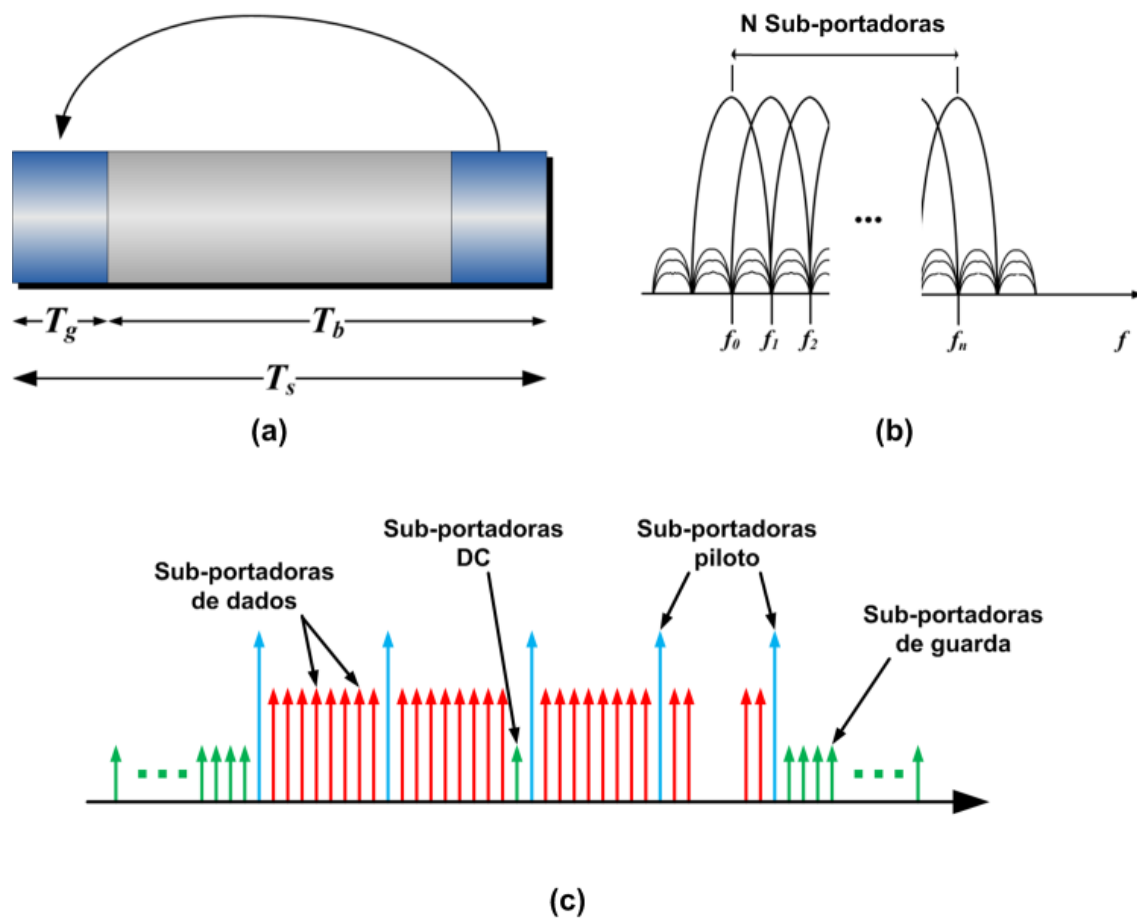


Figura 3.9 - Modulação OFDM na tecnologia WiMAX (extraído de [Wima04]).

3.2.3 OFDMA

A tecnologia OFDMA é uma melhoria da actual tecnologia OFDM para permitir acesso múltiplo. O OFDMA divide um sinal em vários sub-canais, cada um deles deve ser

atribuído a um utilizador diferente. Os diferentes sub-canais podem então ser combinados a partir de várias portadoras. Cada utilizador pode ser tratado separado e independentemente da localização, distância à BS, requisitos de potência e da interferência. Podem ser utilizadas várias modulações para cada uma das portadoras do sistema, para que este possa fornecer as melhores coberturas e débito binário [Yagh03]. As estruturas de sub-canais OFDMA possibilitam técnicas mais eficientes de transmissão, como o FDD e o TDD, criando um tipo de sinal mais imune à interferência e capaz de suportar ritmos de transmissão elevados. A tecnologia OFDMA, também possibilita o aumento do ganho de potência por canal, permitindo uma cobertura melhor, células com raio maior, a utilização de antenas e amplificadores de menor potência, reduzindo os custos. O símbolo no domínio do tempo é semelhante ao da modulação OFDM. A Figura 3.10 mostra a descrição das frequências na tecnologia OFDMA.

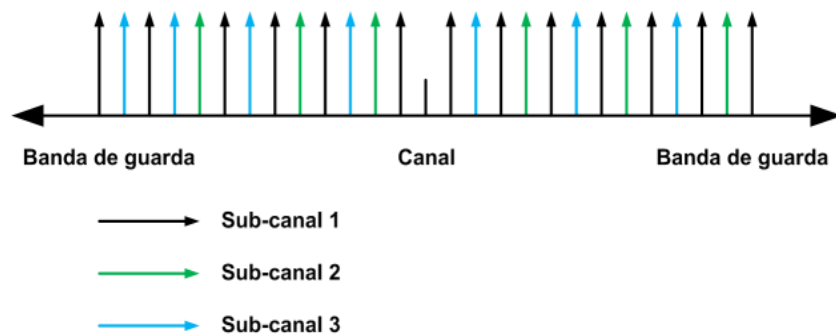


Figura 3.10 – Descrição das frequências na tecnologia OFDMA (extraído de [Wima04]).

3.2.4 Sub-canalização

Um problema bastante comum em redes sem fios baseadas em topologia ponto-multiponto é o desequilíbrio de cobertura entre as ligações DL e UL. De facto, em vários cenários práticos, as estações subscritoras sofrem restrições quanto ao consumo da potência e à potência máxima de transmissão, resultando numa tendência natural para que a cobertura seja limitada pelo UL. Para minimizar o problema do desequilíbrio de cobertura entre as ligações, a norma IEEE 802.16-2004 adopta a técnica de sub-canalização, Figura 3.11, que consiste num cenário hipotético onde a potência máxima de transmissão da SS corresponde a 25% da potência máxima da BS.

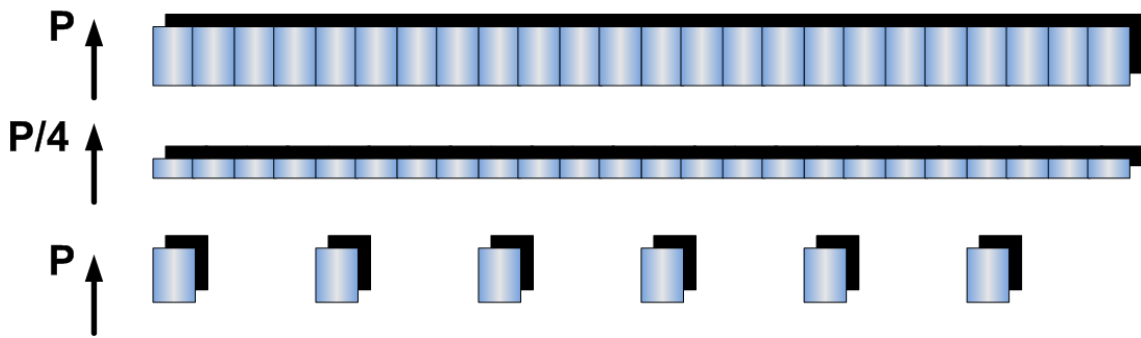


Figura 3.11 - Esquema de sub-canalização na tecnologia WiMAX.

Para compensar este desequilíbrio, é adoptada a técnica de sub-canalização, de modo que a informação seja transmitida em apenas 25% das sub-portadoras disponíveis, o que permite elevar a potência efectiva até quatro vezes o seu valor nas sub-portadoras seleccionadas. O preço a ser pago pelo aumento da cobertura por meio da sub-canalização é a redução do débito binário máximo suportado pela ligação.

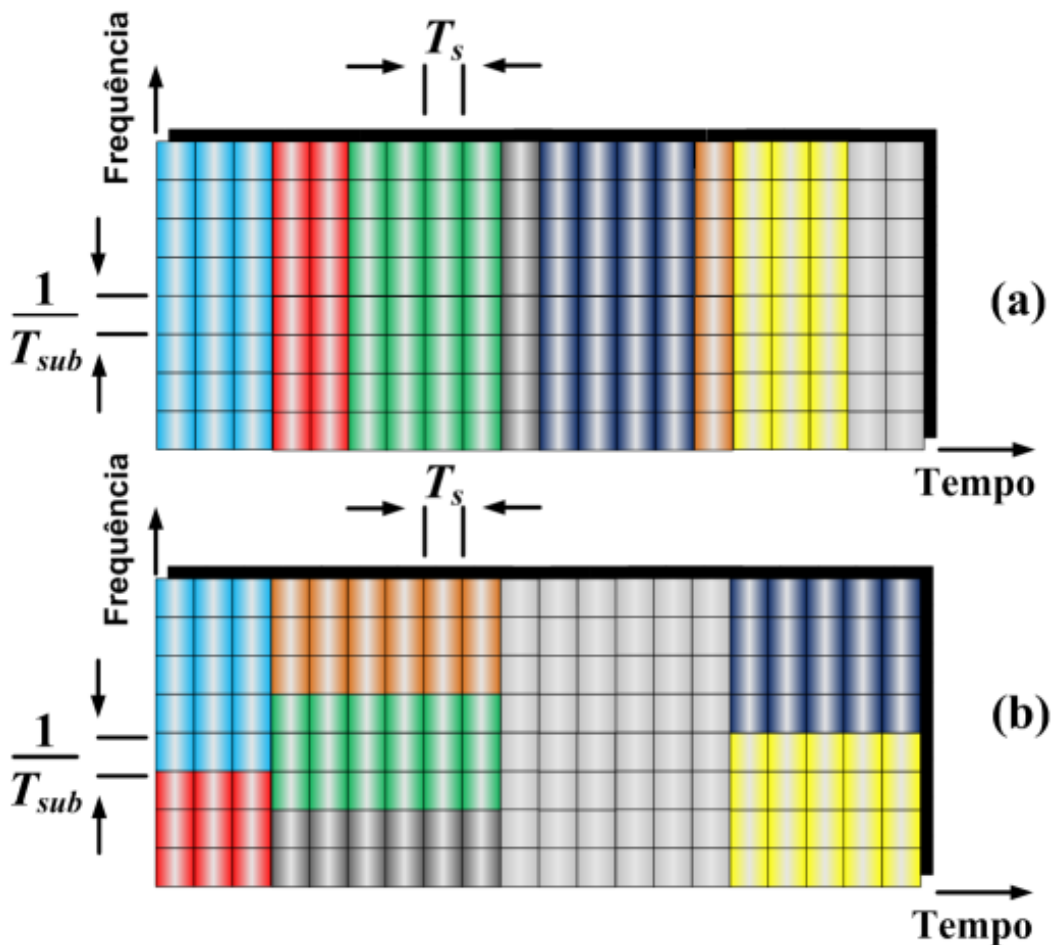


Figura 3.12 - Sub-canalização em sistemas baseados em (a) OFDM e (b) OFDMA (extraído de [Wima04]).

3.3 Camada MAC

A camada MAC (*Medium Access Control*) do WiMAX assegura várias medidas de QoS (*Quality of Service*) nunca vistas, anteriormente, noutras normas de redes sem fios. A mais valia desta camada consiste em dispor de uma largura de banda dinâmica que ultrapasse as habituais degradações do serviço, *jitter* e latência (extremo a extremo).

O protocolo MAC do WiMAX foi projectado para aplicações de acesso a banda larga sem fios ponto-multiponto. O acesso e os algoritmos de atribuição de largura de banda acomodam centenas de terminais por canal e múltiplos utilizadores finais podem repartir esses terminais. Os utilizadores finais querem cada vez mais serviços, da mais variada natureza, desde dados e voz, conectividade IP (*Internet Protocol*) e VoIP (*Voice over IP*). Para suportar estes serviços, a camada MAC acomoda tanto tráfego em rajada como contínuo. Adicionalmente, estes serviços terão parâmetros de QoS dependendo do tipo de tráfego [Ohrt05].

O protocolo MAC do WiMAX suporta uma variedade de requisitos de *backhaul* (espinha dorsal da rede) incluindo protocolos baseados em pacotes e ATMng (*Advanced Traffic Management*). A sub-camada de convergência, Figura 3.1, mapeia o tráfego específico da camada de transporte para a camada MAC; esta característica é suficientemente flexível para transportar qualquer tipo de tráfego. A sub-camada de convergência e a camada MAC, no seu conjunto, suprimem o cabeçalho, empacotam e fragmentam o tráfego para o transportar mais eficazmente do que o mecanismo original.

3.3.1 Características da camada MAC da norma IEEE 802.16

O protocolo MAC da norma IEEE 802.16 atende à necessidade de ritmos de transmissão elevados, tanto para o sentido ascendente como para o sentido descendente da ligação. Os algoritmos para atribuição de largura de banda e controlo de acesso deverão acomodar centenas de terminais por canal, que poderão ser partilhados por vários utilizadores. Os serviços solicitados pelos utilizadores são variados e incluem TDM de voz e dados, conectividade IP e VoIP, entre outros. Para oferecer suporte a essa variedade de serviços, a camada MAC IEEE 802.16 deve acomodar tráfego contínuo e de rajada. Adicionalmente, esses serviços irão associar níveis de QoS

(*Quality of Service*) de acordo com o tipo de tráfego. A camada MAC IEEE 802.16 fornece uma larga escala de tipos de serviço, análogos às categorias de serviço mais clássicas como as do ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) e até categorias mais recentes tais como o GFR (*Guaranteed Frame Rate*). Além disso, oferece suporte às várias especificações da camada PHY, personalizadas para a banda de frequência em utilização, e às regulamentações associadas à mesma [Eklu02].

O protocolo MAC IEEE 802.16 deve oferecer suporte a uma variedade de requisitos de *backhauls*, incluindo o modo de transferência assíncrono, ATM e protocolos baseados em pacotes. A sub-camada de convergência é utilizada para mapear o tráfego específico da camada de transporte para a camada MAC, que é suficientemente flexível para transmitir de forma eficiente qualquer tipo de tráfego. Através de características como a supressão de cabeçalho da porção de dados, empacotamento e fragmentação, a sub-camada de convergência e a camada MAC trabalham em conjunto para transmitir o tráfego de uma forma mais eficiente do que o mecanismo de transporte original.

Questões que dizem respeito à eficiência do mecanismo de transporte são tratados na interface entre a camada MAC e a camada PHY. Por exemplo, os tipos de modulação e codificação são especificados num perfil de rajada que pode ser ajustado adaptativamente para cada utilizador, de forma a otimizar a utilização da largura de banda garantindo a disponibilidade da ligação de dados.

O mecanismo de requisição-concessão (controlo de acesso) é projectado para ser escalável, eficiente e auto-ajustável. O sistema de acesso da norma IEEE 802.16-2004 não perde em eficiência quando são utilizadas várias ligações por terminal, com diversos níveis de QoS, e um grande número de utilizadores multiplexados estatisticamente. Ele emprega uma larga variedade de mecanismos de requisitos, equilibrando a estabilidade do acesso sem contenção com a eficiência do acesso orientado à contenção.

Enquanto as especificações referentes aos mecanismos de atribuição de largura de banda e de QoS foram amplamente discutidas, os detalhes referentes às técnicas de escalonamento e gestão de reservas não foram normalizadas, apontando aos fabricantes um factor importante que pode ser explorado e oferecido aos utilizadores como um diferencial nos seus equipamentos. A proposta mais significativa que aborda o mecanismo de escalonamento de recursos para a norma IEEE 802.16 foi definida por Hawa [Hawa03]. No seu trabalho, Hawa apresenta uma análise estocástica de mecanismos de escalonamento de recursos baseados na técnica de *Fair Queuing*,

oferecendo suporte às garantias de QoS para largura de banda e atraso para as classes de serviço definidas na norma IEEE 802.16-2004. Para além das tarefas básicas de atribuição de largura de banda e transporte de dados, a camada MAC inclui uma sub-camada de privacidade que oferece autenticação ao acesso à rede e ao estabelecimento da ligação para evitar a perda de serviços, inclui ainda troca de chaves de segurança e encriptação para assegurar a privacidade dos dados.

Para acomodar a procura da camada PHY e a diferentes requisitos dos serviços oferecidos entre as frequências de 2 - 11 GHz, o projecto IEEE 802.16-2004 actualizou a camada MAC de modo a oferecer um mecanismo de requisição de repetição automática, ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) e suporte à topologia *mesh*. Esta característica permite uma variedade de percursos entre o núcleo da rede e qualquer SS. Os sistemas *mesh* não possuem BSs no sentido convencional, como na topologia ponto-multiponto [IEEE01]).

A Tabela 3.4 apresenta uma associação entre as principais características da camada MAC do protocolo IEEE 802.16-2004 de forma resumida, assim como, os benefícios introduzidos por essas características.

Tabela 3.4 - Características da camada MAC da norma IEEE 802.16-2004.

Características	Benefícios
Escalonamento TDM/TDMA para <i>Uplink/Downlink</i>	Utilização eficiente da largura de banda
Escalável para centenas de utilizadores	Possibilita uma distribuição efectiva de custos
Orientado à ligação	Garante QoS por ligação Encaminhamento de pacotes mais rápido
QoS	Baixa latência para serviços sensíveis ao atraso (voz TDM, VoIP)
Oferece suporte às classes: UGS, rtPS, nrtPS e BE	Transporte de dados optimizado para o tráfego VBR e priorização de dados
Requisição de retransmissão automática, ARQ	Melhora o desempenho ocultando os erros induzidos pela camada RF dos protocolos das camadas superiores
Modulação adaptativa	Permite taxas de dados mais elevadas de acordo com as condições do canal
Segurança e criptografia (Triple DES)	Protege a privacidade do utilizador
Largura de banda sob procura	Atribuição de capacidade por trama
Controlo de potência automático	Garante a melhor relação portadora-ruído através de ajustes no sinal transmitido.

3.4 Sumário e conclusões

Neste Capítulo descreveram-se as camadas PHY e MAC do WiMAX, com base nas normas IEEE 802.16 (norma base) e IEEE 802.16-2004. Foram também descritas várias características e funções da camada MAC, como ARQ, o mecanismo de requisição de largura banda, controlo de QoS. O capítulo aborda ainda a tecnologia OFDM e OFDMA, sub-canalização assim como a operação sem linha de vista.

Verificou-se que a camada PHY do WiMAX permite dois modos de atribuição de banda, o TDD e o FDD, *Half-duplex* e o *Full-duplex*. A camada PHY permite esquema de modulação adaptativa a partir do nível da relação portadora-ruído percebida pelo receptor. O esquema de correcção FEC utilizado é o *Reed-Solomon*, com tamanho de bloco variável. Este esquema é combinado com um código convolucional de relógio interno (*inner block convolutional code*) para transmissão de dados críticos. O canal descendente, DL utiliza TDM e os dados são multiplexados e recebidos por todas as SSs. Cada trama é dividido em sub-trama DL e sub-trama UL. A duração das tramas é controlada pela BS.

A camada PHY minimiza os efeitos da propagação multi-percurso com a OFDM, e adequa o esquema de modulação à qualidade da ligação rádio através da modulação adaptativa.

A sub-camada MAC comum é orientada à ligação, ou seja, todos os serviços são mapeados para uma ligação. Isto fornece um mecanismo para requisição da largura de banda, associação de parâmetros de QoS, tráfego, transporte e encaminhamento de dados à sub-camada de convergência apropriada.

Apresentou-se o OFDMA como uma técnica de acesso múltiplo, baseada na sub-canalização, que prevê operações de fluxos de diversos utilizadores nos canais descendentes e ascendentes da ligação. O WiMAX adopta esta técnica de sub-canalização para minimizar o problema de desequilíbrio de cobertura entre as ligações. O WiMAX fixo baseado em OFDM-PHY apenas permite uma forma limitada de sub-canalização no UL.

4 Qualidade de serviço em redes IEEE 802.16

4.1 Qualidade de serviços em redes banda Larga sem Fios

A grande popularidade e disseminação que a Internet vem atingindo nos últimos anos tem despertado o interesse de diversos segmentos, o que tem levado a pensar-se na Internet sem fios como a rede do futuro, entretanto, ainda existe um número considerável de questões técnicas que necessitam de ser solucionadas. A Internet usa o protocolo IP, que foi originalmente desenvolvido para fornecer um mecanismo único de entrega de pacotes, baseado no serviço de melhor esforço. Esse mecanismo não se mostra eficaz para lidar com a heterogeneidade de tráfego existente que, apresenta requisitos distintos dependendo do tipo de serviço oferecido. Para solucionar esse problema deve empregar-se uma infra-estrutura comum, de modo a fornecer diferentes camadas de serviço que se adequem às necessidades dos utilizadores. Essa solução não reflecte o estado actual da Internet.

Um pré-requisito para oferecer serviço multimédia sobre redes sem fios comutadas por pacotes é a garantia de novos mecanismos que, permitam a essas redes tratar os pacotes de dados de forma diferenciada, de acordo com as suas limitações e exigências de desempenho.

Esses novos mecanismos são colectivamente incluídos num conceito mais amplo, conhecido como arquitectura de qualidade de serviço, QoS. Uma característica desejável numa arquitectura de QoS para redes sem fios é a capacidade de disponibilizar aos utilizadores sem fios as mesmas garantias de QoS, oferecidas actualmente aos utilizadores de redes por cabo. Nessa arquitectura, a Internet, que é uma rede comutada por pacote, terá as suas funcionalidades enriquecidas através de ferramentas que viabilizem o tratamento diferenciado dos pacotes.

Um bom exemplo é verificado com o tráfego de tempo real, a transmissão dos seus pacotes teriam prioridade sobre as demais classes de serviço, permitindo que eles chegassem ao seu destino dentro dos limites de atraso requisitados [Hawa03].

A garantia de qualidade de serviço, em redes de comutação de pacotes, pode ser classificada de acordo com um conjunto de parâmetros cuidadosamente seleccionado, incluindo: atraso, variação do atraso, largura de banda e taxa de erro. A manutenção da

QoS neste tipo de rede requer mecanismos sofisticados de controlo e supervisão, conhecidos como funções de gestão de QoS, para assegurar que os parâmetros de QoS solicitados possam não apenas ser obtidos, mas ter-se também a garantia da sua manutenção.

A Internet tem sido expandida para o domínio de redes sem fios, especialmente nos últimos anos. A expectativa é que num futuro próximo os utilizadores móveis sejam capazes de aceder de forma transparente às redes de comunicação a partir de qualquer lugar no mundo, a qualquer momento.

A perspectiva de um cenário totalmente móvel (ligação sem fios + dispositivo móvel + Internet sem fios) alimenta o desejo de oferecer aos utilizadores sem fios conteúdos multimédia, estendendo às redes sem fios as mesmas garantias de QoS fornecidas para as redes por cabo. O utilizador final com um terminal móvel deve ser capaz de utilizar as mesmas aplicações disponíveis para os utilizadores em terminais fixos com uma degradação mínima do serviço.

Por ser um meio de natureza inerentemente compartilhada, os ambientes sem fios exigem a adição de um nível extra de complexidade à pilha de protocolos. Quando se fala em redes sem fios, esse novo nível de complexidade é geralmente representado pelo protocolo MAC. A camada MAC sem fios é um dos principais componentes na implementação de mecanismos de garantia de QoS. Ela define como a interface ar deve ser compartilhada entre os utilizadores num canal sem fios, tendo dessa forma um impacto significativo no desempenho percebido pelo utilizador, na capacidade do sistema e na complexidade no terminal remoto.

A garantia de QoS numa infra-estrutura sem fios impõe uma série de desafios tecnológicos que não existem nas redes convencionais. Esses desafios são gerados a partir das próprias limitações do meio sem fios, tais como interferência e desvanecimento do sinal, elevadas taxas de erro, limitação da largura de banda disponível.

Recentemente, têm sido exploradas várias tecnologias com elevados ritmos de transmissão, para a cobertura de proximidade, para fornecer acesso à Internet e oferecer serviço multimédia aos utilizadores finais. Entre estas tecnologias destacam-se as redes híbridas de fibra óptica e cabo coaxial HFC (*Hybrid Fiber Coax*), as redes de acesso baseadas nas diferentes tecnologias DSL, o acesso via satélite e os sistemas de acesso banda larga sem fios, BWA (*Broadband Wireless Access*) fixos. A norma para a entrega de serviços de banda larga para as redes HFC é o protocolo DOCSIS (*Data Over Cable*

Service Interface Specifications). Foi com esse objectivo que o IEEE desenvolveu o protocolo IEEE 802.16.

4.2 Arquitecturas de QoS do IETF para Internet por cabo

Parte do esforço para oferecer suporte ao mecanismo de garantia de qualidade de serviço nas aplicações sobre a Internet, conduziu o IETF (*Internet Engineering Task Force*) ao desenvolvimento de dois modelos de QoS, o modelo de serviços integrados, *IntServ (Integrated Services)* e o modelo de serviços diferenciados, *DiffServ (Differentiated Services)*.

Os detalhes são os seguintes:

- Modelo de Serviços Integrados, *IntServ* - o *IntServ* lembra em muitos aspectos a arquitectura de QoS das redes ATM. A principal hipótese consiste em considerar que os recursos como a largura de banda ou espaço em *buffers*, devem ser reservados explicitamente para cada aplicação em tempo real de modo a disponibilizar o nível de QoS especificado. Define-se um protocolo para reserva de recursos, RSVP (*Resource reSerVation Protocol*) [BrCS94] para permitir às aplicações reservar recursos de uma forma explícita em cada *router* no instante de configuração de cada chamada sessão [Hawa03], seguindo uma abordagem distribuída e dinâmica. Existem rotinas de controlo de admissão de chamadas, CAC (*Call Admission Control*), que determinam quando uma requisição de recursos pode ou não ser atendida, com base no conhecimento total dos recursos disponíveis na rede e nos fluxos já configurados. O *IntServ* apresenta, como uma das suas principais características, a elevada granularidade na atribuição de recursos, que é realizada para fluxos individuais. Devido a essa característica o modelo apresenta uma carga de processamento e sinalização muito elevada, não oferecendo uma solução escalável, sendo indicado para utilizar em redes pequenas ou em redes virtuais privadas, VPNs (*Virtual Private Networks*).
- Modelo de Serviços Diferenciados, *DiffServ* - é definido como uma arquitectura para a implementação de diferenciação escalável de serviços na Internet. A diferenciação de serviços baseia-se num modelo simples onde o tráfego que entra num domínio da rede é classificado e condicionado nas fronteiras do domínio, sendo associado a agregadores de comportamento específicos, BA

(*Behavior Aggregates*), sendo cada BA identificado por um código único, DSCP (*DiffServ Code Point*). O *DiffServ* classifica o tráfego em diferentes classes. Os pacotes recebem uma marcação no *byte* que corresponde ao tipo de serviço do cabeçalho IP, de acordo com as classes às quais pertençam. Um padrão de 6 bits, o DSCP, é atribuído ao campo ToS (*Type of Service*) ou TCO (*Traffic Class Octet*) dos cabeçalhos dos protocolos IPv4 (*Internet Protocol version 4*) e IPv6 (*Internet Protocol version 6*), respectivamente [Figu04]. Os utilizadores solicitam um nível específico de desempenho preenchendo o campo relativo ao DSCP com um dado valor em cada pacote enviado. Dentro do núcleo da rede, os pacotes são tratados pelos agregadores de acordo com o valor do seu DSCP. Uma das principais características, que se destacam no contexto do modelo *DiffServ*, é a escalabilidade alcançada através da transferência da complexidade do sistema, que antes se concentrava na rede nuclear de suporte (modelo *Intserv*), para os *routers* da fronteira que processam um volume menor de tráfego. Esta alteração possibilita a oferta de serviços para tráfegos agregados, reduzindo significativamente a carga de processamento e sinalização do modelo, pois o tráfego já não é tratado de forma individualizada (fluxos individuais) [Hawa03].

4.3 QoS na norma IEEE 802.16

Na especificação interface ar da norma IEEE 802.16 [IEEE01] a definição de QoS está associada a conceitos como a classificação, o escalonamento em fluxos de serviço e o estabelecimento de serviço, considerando as classes de serviço da Tabela 3.4 (UGS, rtPS, nrtPS e BE), Figura 4.1.

Segundo a norma, os pedidos de QoS incluem as seguintes funções:

- Função de configuração e registo para pré-configuração da SS com base nos fluxos de serviço com QoS e parâmetros de tráfego;
- Função de sinalização para o estabelecimento dinâmico de fluxos de serviço com QoS e parâmetros de tráfego;
- Utilização de escalonamento de pacotes na camada MAC e parâmetros de tráfego de QoS para os fluxos de serviço do UL;
- Utilização de parâmetros de tráfego de QoS para os fluxos de serviço do DL;

- Agrupamento das propriedades de um fluxo de serviço em classes de serviço, de modo que as entidades das camadas superiores e as aplicações externas requisitem os fluxos de serviço de acordo com os parâmetros de QoS desejados, garantindo uma consistência global.

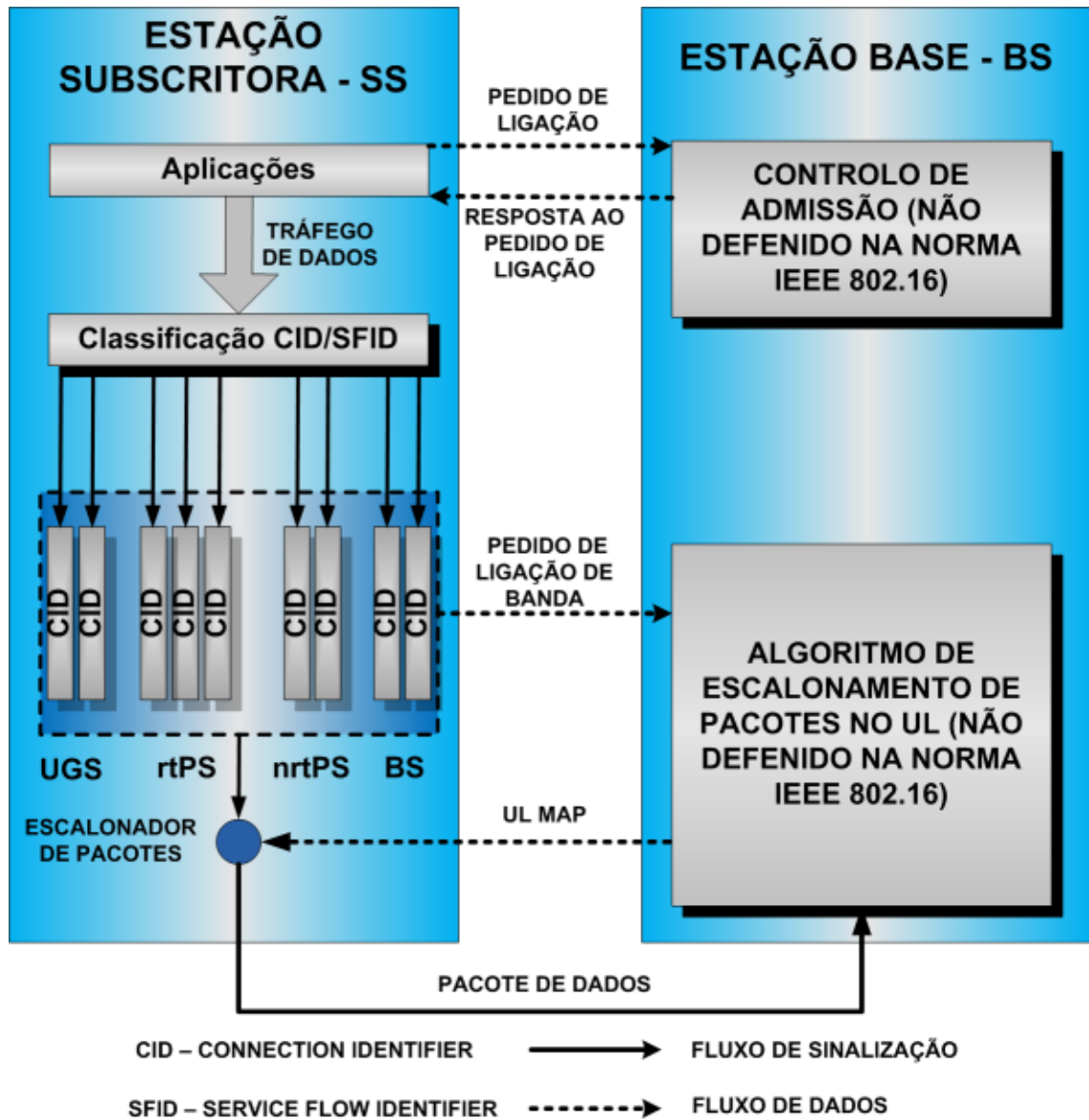


Figura 4.1 - Arquitectura de QoS da norma IEEE 802.16-2004 (extraído de [Chen04]).

O mecanismo mais importante na garantia de QoS está associado à transferência de pacotes da interface MAC, através de um fluxo de serviço identificado de forma única por um CID (*Connection Identifier*). Este fluxo de serviço é um fluxo unidireccional de pacotes ao qual está associado um nível de QoS específico. A SS e a BS garantem a qualidade de serviço de acordo com um conjunto de parâmetros de QoS definidos para o

fluxo. As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam as arquitecturas de QoS da norma IEEE 802.16-2004 para a SS, e a BS, respectivamente.

O objectivo de se definirem parâmetros de QoS é especificar a ordem de transmissão e o escalonamento dos fluxos de serviço na interface ar. Entretanto, esses parâmetros devem ser identificados e tratados por outros mecanismos na rede (externos à interface ar) de modo que se possa oferecer QoS extremo-a-extremo, bem como garantir a gestão do comportamento das SSs.

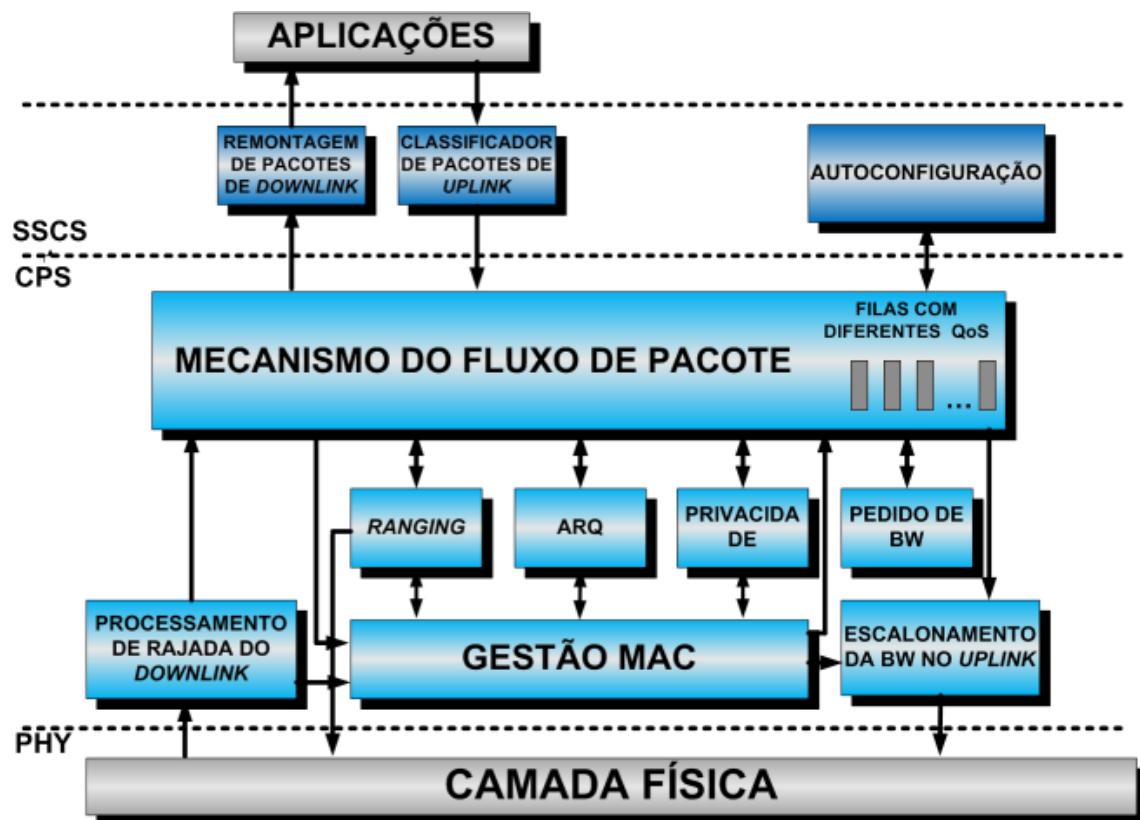


Figura 4.2 - Arquitectura da camada MAC na estação subscritora (extraído de [Yagh03]).

Os fluxos de serviço são definidos nos dois sentidos de transmissão, ascendente e descendente, e podem existir mesmo sem que tenham sido activados para a transmissão do tráfego. Os fluxos de serviço possuem um identificador de 32 bits denominado SFID (*Service Flow Identifier*); fluxos de serviço activos têm um identificador de ligação de 16 bits (CID).

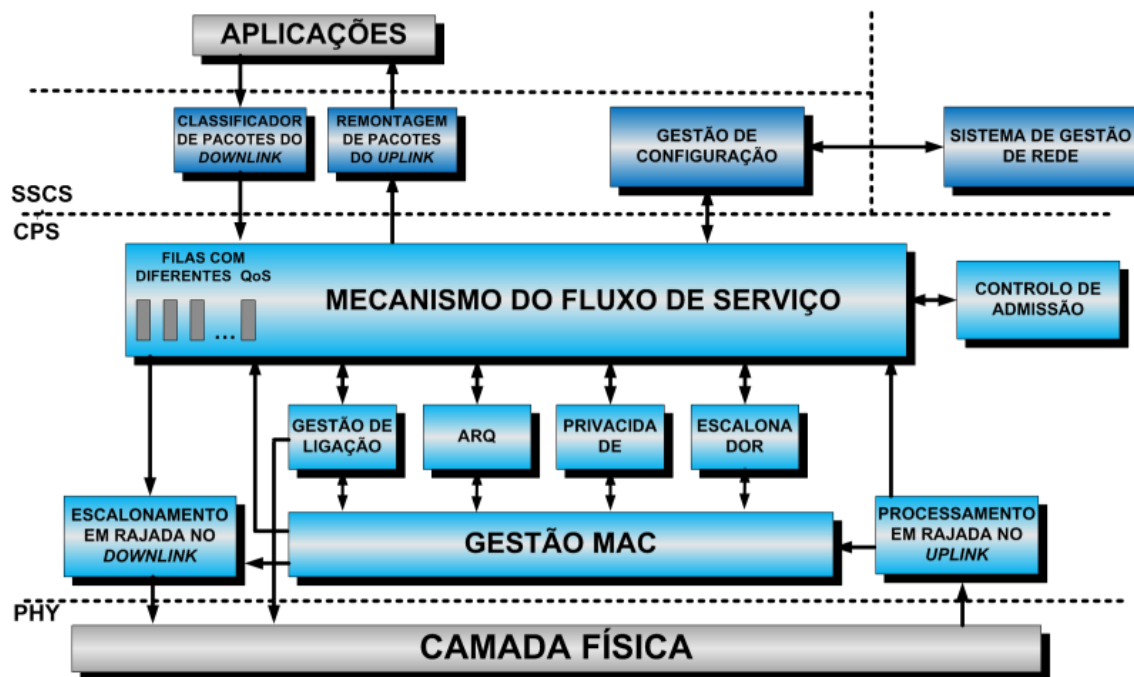


Figura 4.3 - Arquitectura da camada MAC na estação base (extraído de [Yagh03]).

4.3.1 Fluxos de serviço

O Fluxo de Serviço é um serviço de transporte da camada MAC responsável pela transmissão unidireccional dos pacotes provenientes da SS, ligação ascendente, ou da BS, ligação descendente. Um fluxo de serviço é caracterizado por um conjunto de parâmetros de QoS, tais como: a latência o atraso e as garantias de débito binário. Com o propósito de normalizar a operação entre a SS e a BS, esses parâmetros incluem detalhes de como a SS solicita *mini-slots* para UL e o comportamento esperado do escalonador de UL da BS.

Os fluxos de serviço são parcialmente caracterizados pelos seguintes atributos:

- Identificador do Fluxo de Serviço, SFID - um SFID é assinalado para todos os fluxos de serviço existentes e serve como o principal identificador na SS e na BS para certo fluxo. Um fluxo de serviço tem no mínimo um SFID e um sentido associado;
- Identificador da ligação, CID - o mapeamento para um SFID é somente realizado quando a ligação tem o(s) seu(s) fluxo(s) de serviço admitido(s);

- Provisioned QoS Parameter Set - um conjunto de parâmetros de QoS fornecido por mecanismos externos aos definidos na norma IEEE 802.16 como, por exemplo, pelo sistema de gestão da rede;
- Admitted QoS Parameter Set - define um conjunto de parâmetros de QoS para os quais a BS (e possivelmente a SS) reserva recursos. O principal recurso reservado é a largura de banda, mas outros recursos também podem ser reservados por exemplo, memória para viabilizar a activação do fluxo;
- Active QoS Parameter Set - especifica um conjunto de parâmetros de QoS que define o serviço a ser actualmente disponibilizado para o fluxo de serviço. Somente um fluxo de serviço activo pode encaminhar pacotes;
- Authorization Module - uma função lógica dentro da BS que aprova ou rejeita cada mudança nos parâmetros de QoS e classificadores associados a um fluxo de serviço. Para tal, define um “envelope” que limita os possíveis valores dos conjuntos de parâmetros *AdmittedQoSParamSet* e *ActiveQoSParamSet*.

É importante pensar em três tipos de fluxos de serviço:

- Aprovisionado - conhecido pelo fornecimento, por exemplo, do sistema de gestão da rede. Os conjuntos de parâmetros *Admitted QoS Parameter Set* e *Active QoS Parameter Set* para este tipo de fluxo são ambos nulos;
- Admitido - este tipo de fluxo de serviço possui recursos reservados pela BS para o seu conjunto de parâmetros *Admitted QoS Parameter Set*, mas esses parâmetros não estão activos (o *Active QoS Parameter Set* é nulo). Os fluxos de serviço admitidos podem ter sido provisionado ou sinalizado por algum outro mecanismo;
- Activo - este tipo de fluxo de serviço apresenta recursos comprometidos pela BS para o seu conjunto de parâmetros *Active QoS Parameter Set*. Por exemplo, a BS pode estar a enviar mapas contendo concessões não solicitadas para a transmissão de um fluxo de serviço UGS (*Unsolicited Grant Service*). O conjunto de parâmetros *Active QoS Parameter Set* deste fluxo não é nulo.

4.3.1.1 Mecanismo de classificação dos fluxos de serviço

O principal mecanismo para a garantia de QoS na norma IEEE 802.16 é o responsável pela associação dos pacotes a um fluxo de serviço, (da Tabela 3.4) ou seja, o mecanismo de classificação, Figura 4.4.

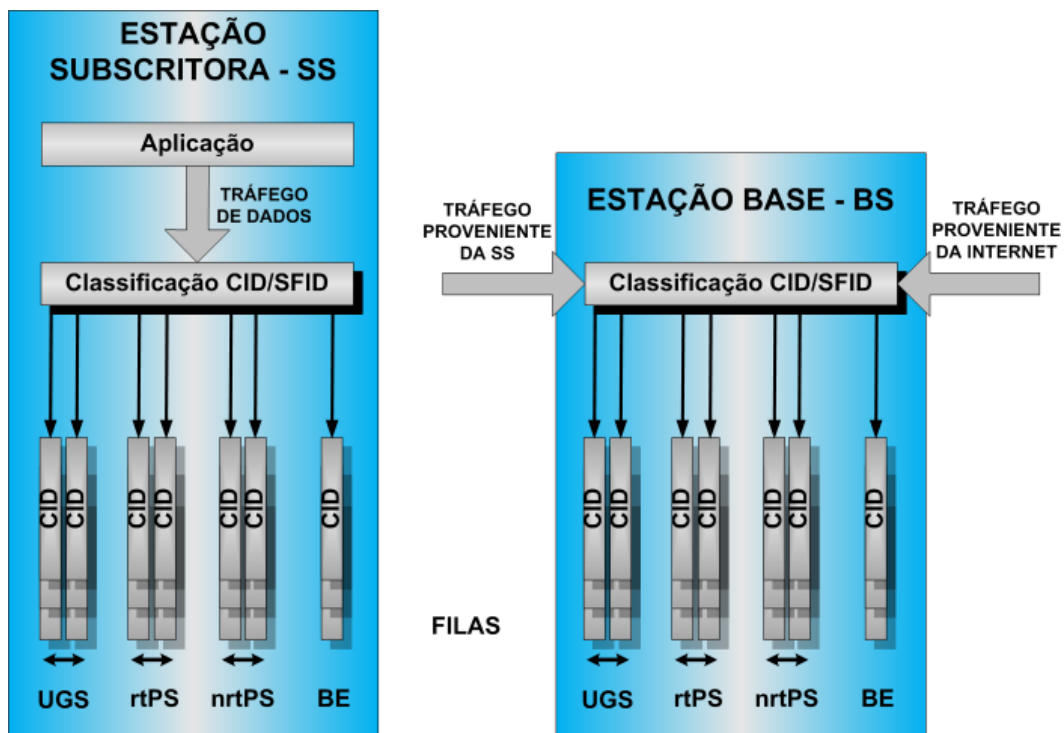


Figura 4.4 - Mecanismo de classificação (extraído de [Chen04]).

Cada aplicação deve em primeiro lugar registrar-se na rede. A rede irá associar a aplicação a um fluxo de serviço através da atribuição de um identificador único, SFID. Todos os pacotes devem ser rotulados com o SFID atribuído, de modo que a rede possa fornecer a QoS apropriada. Quando a aplicação quer enviar pacotes de dados, ela solicita o estabelecimento de uma ligação com a rede e recebe um CID. Dessa forma, os pacotes de dados da norma IEEE 802.16 incluem identificadores por fluxo e por ligação.

O conjunto de ferramentas que oferece suporte à garantia de QoS para os tráfegos ascendente e descendente incluem funções para configuração e registo dos fluxos de serviço, sinalização para estabelecimento dinâmico de QoS baseado nos fluxos de serviço e, nos parâmetros de tráfego, escalonamento e parâmetros de tráfego para fluxos

de serviço ascendente e descendente e agrupamento de propriedades do fluxo de serviço em classes de serviço para permitir o agrupamento de requisições.

Como foi visto, anteriormente, o canal de acesso da norma IEEE 802.16 emprega TDM para DL e TDMA para UL. O módulo de escalonamento de pacotes atribui largura de banda para as ligações em função do número de *slots* atribuídos por ligação pelo canal TDM.

Esse módulo também determina quando uma ligação tem permissão para transmitir dados, tornando-se activa.

O módulo de escalonamento de pacotes para o UL é mais complexo, pois as filas são distribuídas entre várias SSs.

4.3.1.2 Mecanismo de requisição e atribuição de largura de banda

A largura de banda requisitada pode ser incremental, representando a quantidade adicional da largura de banda necessária, ou agregada, representando a quantidade total da largura de banda necessária.

A requisição da largura de banda pode ser iniciada directamente pela ligação ou em resposta à recepção de uma mensagem de *polling* da BS. A BS concede ou atribui largura de banda através de um dos mecanismos, o GPSS (*Grant Per Subscriber Station*) ou o GPC (*Grant Per Connection*).

No mecanismo de atribuição da largura de banda por estação subscritora, GPSS, a estação base concede o recurso para a SS e esta pode redistribuir a largura de banda entre as suas ligações, mantendo a QoS de acordo com o nível de serviço negociado. Este mecanismo adequa-se a cenários onde existem muitas ligações por terminal, o que possibilita ajustes mais sofisticados de acordo com as necessidades de QoS das aplicações. Nesse contexto, a sobrecarga na BS é reduzida, pois a implantação de GPSS requer SSs mais “inteligentes”. A utilização de GPSS é obrigatória na especificação da camada PHY da norma IEEE 802.16 que utiliza a banda de frequência entre 10 - 66 GHz (norma base). A norma IEEE 802.16-2004 adopta apenas o mecanismo de atribuição GPSS.

No mecanismo de atribuição da largura de banda por ligação, GPC, a estação base concede o recurso para a SS por ligação. Esse mecanismo é recomendado para cenários

onde existem poucos utilizadores por SS. A sua implantação provoca uma sobrecarga de processamento na BS, mas permite que a implementação das SSs seja mais simples.

Antes que as SSs possam efectuar requisições por largura de banda, a BS deve atribuir largura de banda com o propósito específico de garantir essas requisições. Este processo é denominado de *polling*. Existem dois mecanismos de *polling* na BS:

- Unicast - cada SS é interrogada, individualmente, pela estação base para informar se deseja utilizar o meio para transmissão. Nesse caso, a BS atribui largura de banda para o envio de mensagens de requisição de largura de banda. Nesta modalidade utiliza-se o bit PM (*Poll-Me*) para requisitar um *polling*;
- Baseado em Contenção - a técnica de requisição da largura de banda baseada em contenção é utilizada quando uma quantidade insuficiente de largura de banda é disponibilizada individualmente pelo envio de mensagens da BS para muitas SSs inactivas. A atribuição é feita por *multicast* ou *broadcast* para um grupo de SSs que devem disputar por uma oportunidade de enviar suas requisições de largura de banda.

4.3.1.3 Garantia de serviços utilizando o MIB da norma IEEE 802.16

O modelo de gestão de rede de referência é constituído por um módulo de gerência, pelos nós geridos (estações subscritora e estação base) e por uma base de dados do fluxo de serviço, Figura 4.5. As SSs e as BSs recolhem e armazenam informações sobre os objectos geridos, utilizando o formato especificado na estrutura da MIB (*Management Information Base*) *wmanIfMib*, definida para a norma IEEE 802.16 [Nair04], Figura 4.6. A base de dados do fluxo de serviço contém informações sobre o fluxo e sobre a QoS a ele associada. Essas informações orientam a BS e a SS na criação das ligações de transporte, quando um serviço é oferecido ou quando uma SS entra na rede.

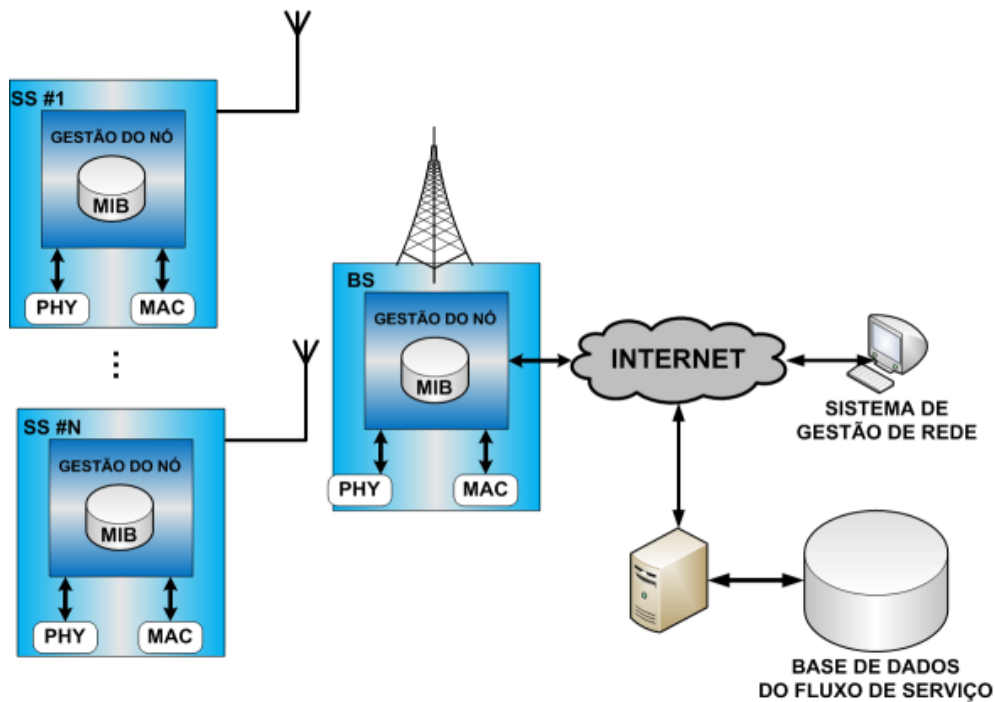


Figura 4.5 - Modelo de referência de gestão da rede (extraído de [Nair04]).

O `wmanIfMib` é composto por três grupos:

- `wmanIfBsObjects` - este grupo contém objectos geridos a ser implementado na BS;
- `wmanIfSsObjects` - este grupo contém objectos geridos a ser implementado no SS;
- `wmanIfCommonObjects` - este grupo contém objectos geridos comuns a ser implementado no BS e SS.

A MIB representada pela `wmanIfMib` contém três tabelas que são apresentadas na Figura 4.7 e que oferecem suporte à garantia do fluxo de serviço:

- `wmanIfBsProvisionedSfTable` - é a tabela que contém informações sobre o fluxo de serviço pré-estabelecido, para ser utilizado na criação de ligações quando um utilizador entra na rede;
- `wmanIfBsServiceClassTable` - é a tabela que contém os parâmetros de QoS associados aos fluxos de serviço. Os principais parâmetros incluem: prioridade do tráfego, taxa de pico, tráfego máximo de rajada, taxa mínima reservada, variação do atraso tolerada e latência máxima;

- wmanBsClassifierRuleTable - é a tabela que contém as regras para que o classificador possa mapear os pacotes da ligação ascendente e descendente para o fluxo de serviço.

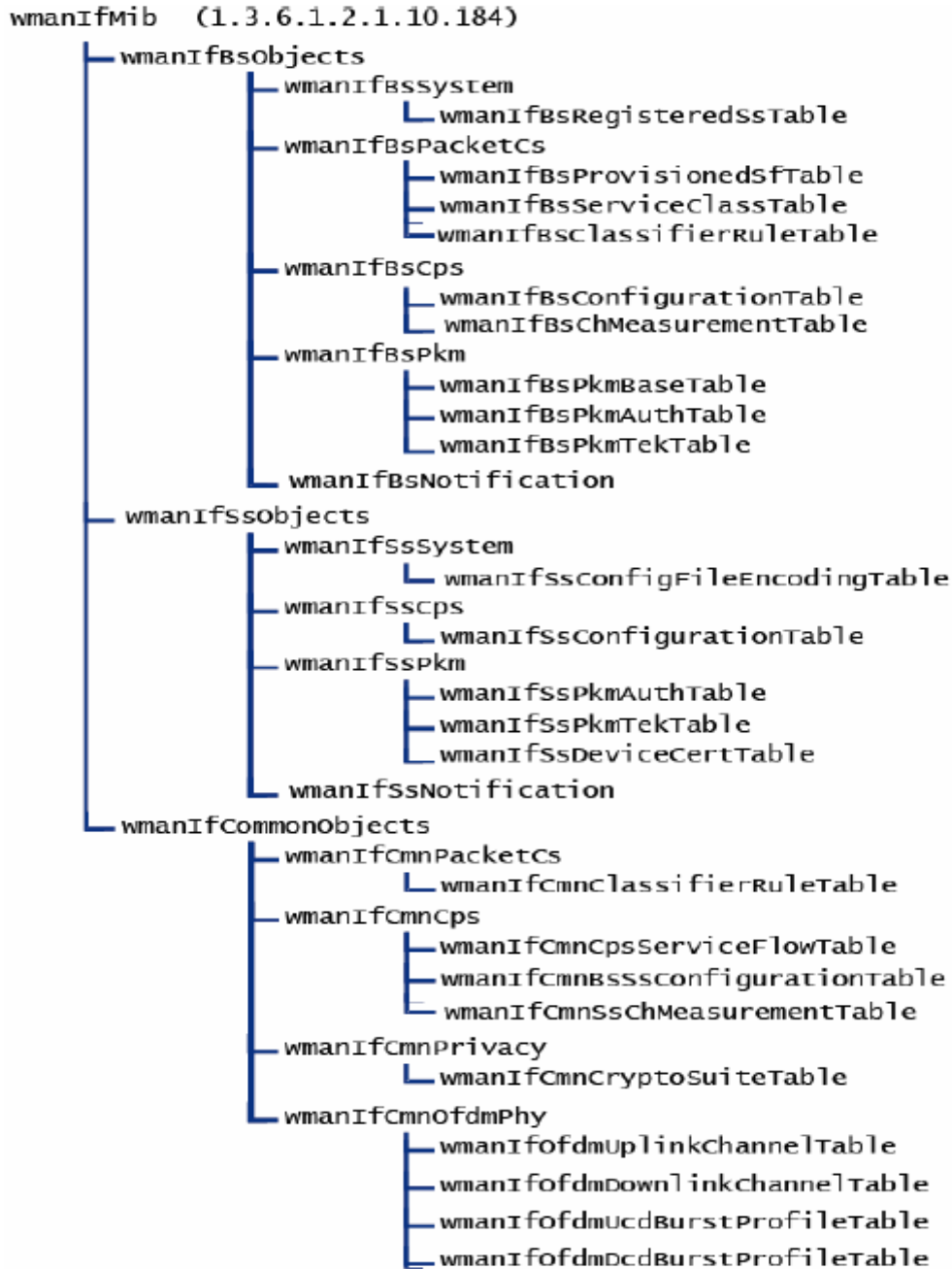


Figura 4.6 - Estrutura da MIB wmanIfMIB [Nair04].

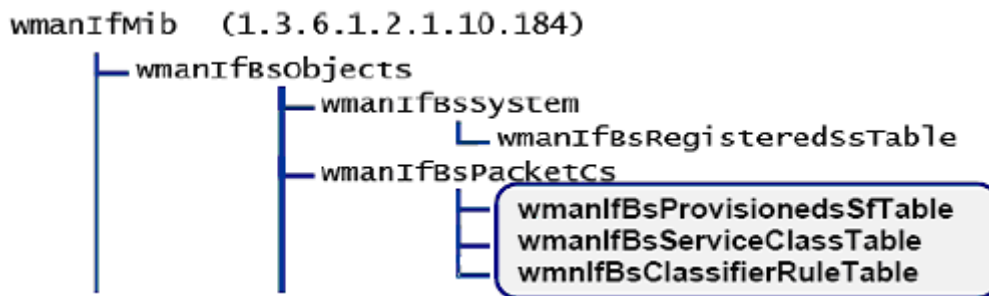


Figura 4.7 - Tabelas referentes à garantia do fluxo de serviço (extraído de [Nair04]).

A Figura 4.8 apresenta um exemplo que descreve como as informações sobre o fluxo de serviço são povoadas. As tabelas A, B e C indicam que foram pré-estabelecidas duas estações subscritoras, identificadas pelos endereços MAC 0x123ab54 e 0x45feda1.

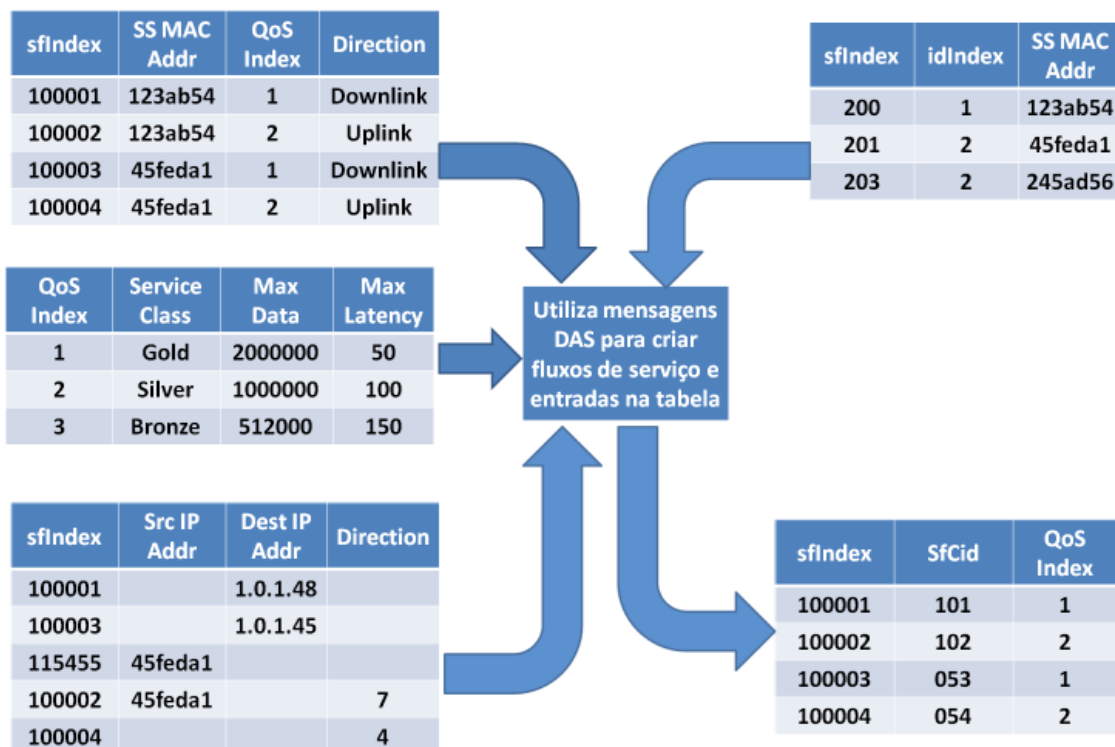


Figura 4.8 - Garantia do fluxo de serviço (extraído de [Nair04]).

Cada SS possui dois fluxos de serviço, identificados por um *sfIndex*, com os parâmetros de QoS associados (*QoSIndex*), sendo identificados através dos valores 1 e 2, respectivamente. O campo *QoSIndex* aponta para uma entrada de QoS na tabela *wmanIfBsServiceClassTable* que contém três níveis de QoS: *Gold*, *Silver* e *Bronze*. O campo *sfIndex* aponta para uma entrada na tabela *wmanBsClassifierRuleTable*,

indicando quais as regras que deverão ser utilizadas para classificar os pacotes num dado fluxo de serviço.

Quando a estação subscritora com o endereço MAC 0x123ab54 se regista junto à estação base, esta cria uma entrada em `wmanIfBsRegisteredTable`, representada pela tabela D. Com base no endereço MAC, a estação base será capaz de localizar a informação sobre o fluxo de serviço que foi pré-aprovisionado nas tabelas A, B e C. A estação base utilizará uma mensagem DSA (*Dynamic Service Addition*) para criar fluxos de serviço com `sfIndex` 100001 e 100002, com a informação do fluxo de serviço pré-aprovisionado. São criadas duas entradas em `wmanIfCmnCpsServiceFlowTable` na tabela E. Os fluxos de serviço estarão então disponíveis para o utilizador, para que ele possa enviar o seu tráfego de dados.

4.3.2 Classes de serviço da norma IEEE 802.16

Com base nos tipos de fluxo de serviços especificados na norma DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*), o WiMAX define cinco classes de serviço, que devem ser tratadas de forma diferenciada pelo mecanismo de escalonamento da camada MAC. As classes de serviço do WiMAX são: UGS (*Unsolicited Grant Service*), rtPS (*Real-Time Polling Service*), nrtPS (*Non Real-Time Polling Service*), BE (*Best Effort*) e ErtPS (*Extended real-time Polling service*). Esta última classe foi introduzida com a norma IEEE 802.16e, o WiMAX móvel.

- UGS (*Unsolicited Grant Service*) foi projectada para oferecer suporte aos fluxos de serviço de tempo real que geram pacotes de dados de tamanho fixo em intervalos periódicos, ou seja, tráfego CBR (*Constant Bit Rate*). Esta categoria de serviço pode ser representada pelo tráfego gerado por emulação T1/E1 e por aplicações de voz sobre IP sem supressão de silêncio. O serviço oferece periodicamente concessões não solicitadas para transmissão de dados. Isso elimina a sobrecarga e a latência das requisições das estações subscritoras para enviar pedidos de transmissão. No UGS, a SS está proibida de utilizar qualquer requisição de contenção e a estação base não oferece qualquer oportunidade de requisição *unicast* para a SS. Requisições de *piggyback* também são proibidas no UGS. Os parâmetros mais importantes para os fluxos de serviço UGS são: *Unsolicited Grant Size*, *Grants Per Interval*, *Nominal Grant Interval* e *Tolerated*

Grant Jitter, Figura 4.9. O escalonamento ideal para assegurar tais parâmetros é definido pelo tempo de referência t_0 , com os tempos desejados de transmissão sendo $t_i = t_0 + I * interval$, onde *interval* corresponde ao parâmetro *Nominal Grant Interval*. O tempo actual de concessão t_i deve estar no intervalo entre $t_i \leq t_i \leq t_i + jitter$, onde *jitter* corresponde ao parâmetro *Tolerated Grant Jitter*. Quando múltiplas concessões são solicitadas por intervalo todas as concessões devem estar dentro do intervalo de *jitter*;

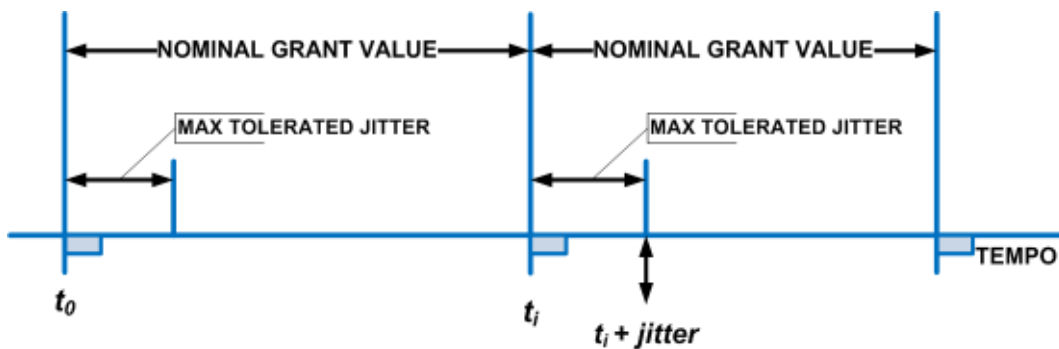


Figura 4.9 - Concessão de privilégio de acesso de dados (*data grants*) num fluxo de serviço UGS.

- rtPS (Real-Time Polling Service) é projectada para oferecer suporte aos fluxos de serviço de tempo real que geram pacotes de dados de tamanho variável em intervalos periódicos, como, por exemplo, o tráfego gerado por transmissão de vídeo no formato MPEG (*Motion Picture Experts Group*) ou voz sobre IP com supressão de silêncio. O serviço oferece periodicamente oportunidades de requisição *unicast*, as quais vão ao encontro das necessidades do fluxo de tempo real (largura de banda e atraso) e permitem que a SS especifique o tamanho da concessão desejada. A SS não tem permissão de utilizar qualquer esquema de requisição de contenção ou de *piggyback*. Os principais parâmetros para essa categoria de serviço são: *Nominal Polling Interval*, *Tolerated Poll Jitter* e *Minimum Reserved Traffic Rate*. O escalonamento ideal para assegurar tais parâmetros é muito similar ao definido para os fluxos de serviço UGS;
- nrtPS (non real-time Polling Service) foi projectada para oferecer suporte aos fluxos de serviço não tempo real que geram pacotes de tamanho variável em intervalos periódicos, como, por exemplo, o tráfego gerado por aplicações FTP (*File Transfer Protocol*), e-mail, SMS (*Short Messaging Service*), *multicast/broadcast*, MMS (*Multimedia Messaging Service*), entre outros. O

serviço oferece periodicamente oportunidades de requisição *unicast (polls)*, utilizando intervalos de tempo mais espaçados do que na categoria rtPS. Isso assegura que o fluxo receba oportunidades de requisição mesmo durante períodos em que a rede esteja congestionada. Para além disso, a SS pode utilizar oportunidades de requisição de contenção e de *piggyback*. Os principais parâmetros para essa categoria são: *Nominal Polling Interval*, *Minimum Reserved Traffic Rate* e *Traffic Priority*;

- BE (Best Effort) a SS pode utilizar oportunidades de requisição de contenção e de *piggyback* mas não pode utilizar *polls* periódicos, além disso, não é permitido o envio de concessões periódicas para a transmissão de dados pela BS. O serviço de melhor esforço é tipicamente oferecido pela Internet para o tráfego gerado por navegação na *Web*. Os principais parâmetros para essa categoria de serviço são: *Minimum Reserved Traffic Rate* e *Traffic Priority*. É importante mencionar que para as categorias nrtPS e BE, a norma especifica que a BS deve utilizar o parâmetro prioridade de tráfego para determinar a precedência na requisição do serviço e na geração da concessão para a transmissão de dados. Além disso, a BS deve oferecer preferencialmente oportunidades de requisição de contenção baseadas em prioridade;
- ertPS (extended real-time Polling Service) foi projectada para suportar aplicações em tempo real, como VoIP com supressão de silêncio, que tem uma taxa de dados variável, porém requerem taxas de dados e atraso garantidos. Esta classe de serviço está somente definida na norma IEEE 802.16e, e não na norma IEEE 802.16-2004. Esta classe foi construída sobre as eficiências de UGS e rtPS. Neste caso, podem-se utilizar uma ou outra para atribuições periódicas de UL fornecidas para uma estação móvel, MS (*Mobile Station*) para transmissão de dados ou para pedir largura de banda adicional. Esta característica permite ao ertPS acomodar serviços de dados cujo pedido de largura de banda mudam com o tempo. Note que no caso de UGS, ao contrário de ertPS na MS é permitido pedir largura de banda adicional durante a atribuição UL só para ligações relacionadas com não-UGS.

A Tabela 4.1 apresenta as classes de serviço de forma resumida, assim como os parâmetros de QoS e exemplos de aplicação.

Tabela 4.1 - Classes de serviço suportadas pela norma IEEE 802.16 [AnGM07].

Classe de Serviços	Parâmetros de QoS	Exemplos de Aplicação
UGS (<i>Unsolicited Grant Service</i>)	Taxa máxima sustentada Tolerância máxima à latência e a <i>jitter</i>	VoIP sem supressão de silêncio
rtPS (<i>Real-Time Polling Service</i>)	Taxa mínima reservada Taxa máxima sustentada Tolerância máxima à latência Prioridade de tráfego	<i>Streaming</i> áudio e vídeo, MPEG (<i>Motion Picture Experts Group</i>) <i>encoded</i>
nrtPS (<i>Non Real-Time Polling Service</i>)	Taxa mínima reservada Taxa máxima sustentada Prioridade de tráfego	FTP (<i>File Transfer Protocol</i>)
BE (<i>Best Effort</i>)	Taxa máxima sustentada Prioridade de tráfego	<i>Web browsing</i> , Transferência de dados
ErtPS (<i>Extended real-time Polling service</i>)	Taxa mínima reservada Taxa máxima sustentada Tolerância máxima à latência e a <i>jitter</i> Prioridade de tráfego	VoIP com supressão de silêncio

4.3.3 Escalonamento de diferentes serviços na norma IEEE 802.16-2004

Na sua criação, como mencionado anteriormente, associa-se cada ligação da SS para a BS uma classe de serviço. Quando os pacotes são classificados na sub-camada de convergência (camada MAC), a ligação onde o fluxo se enquadra é escolhida com base no tipo de garantias de QoS solicitadas pela aplicação. A Figura 4.10 descreve o funcionamento do mecanismo de garantia de QoS na norma IEEE 802.16-2004 para oferecer suporte aos serviços multimédia, incluindo voz (com TDM), VoIP, TFTP, HTTP e e-mail.

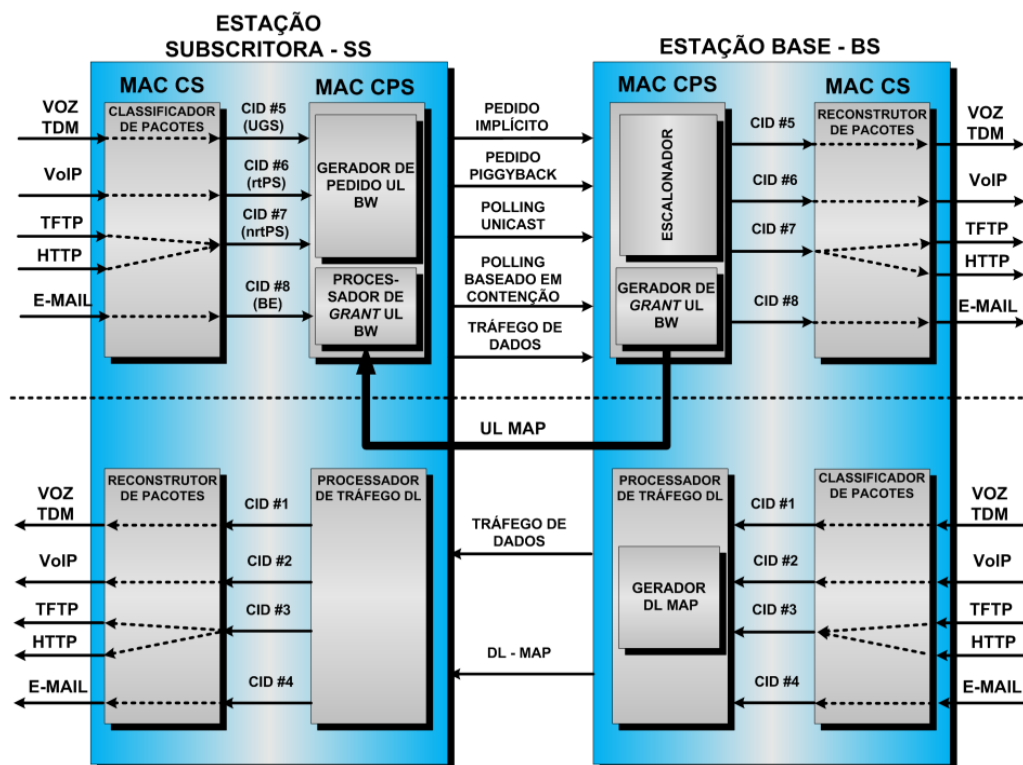


Figura 4.10 - Mecanismo de QoS para aplicações multimídia (extraído de [Nair04]).

A Tabela 4.2 apresenta as opções de *polling* e concessão (*grant*) disponíveis para as ligações de UL nas categorias de serviço da norma IEEE 802.16-2004.

Tabela 4.2 - Tabela comparativa entre as classes de serviço do WiMAX.

Classe	<i>PiggyBack</i>	<i>Bandwidth stealin</i>	<i>Polling</i>
UGS	Permitido	Permitido	O bit PM (<i>Poll-Me</i>) é utilizado para requisitar um <i>polling unicast</i> para as necessidades de largura de banda de ligações não UGS.
rtPS	Não permitido	Permitido para GPSS	O escalonamento só permite <i>polling unicast</i> .
nrtPS	Não permitido	Permitido para GPSS	O escalonamento pode restringir o fluxo de serviço para o <i>polling unicast</i> através de uma política de transmissão/requisição
BE	Não Permitido	Permitido para GPSS	Todas as formas de <i>polling</i> são permitidas.
ertPS	<i>Piggyback</i> estendido	Permitido	Todas as formas de <i>polling</i> são permitidas.

4.3.4 Estrutura da transmissão no *Uplink*

Nas transmissões de UL várias SSs compartilham o canal através da técnica TDMA (*Time Division Multiple Access*). Utiliza-se a mensagem de mapeamento de UL, UL-MAP (*UpLink Map Message*) para fornecer um canal de acesso às estações subscritoras (SSs). A mensagem UL-MAP define um canal de acesso, assim como um perfil de tráfego UIUC (*Uplink Interval Usage Code*). As mensagens de mapeamento de UL e DL, DL-MAP (*DownLink Map Message*) indicam o início do *slot* de tempo de cada rajada de dados. Estas mensagens são transmitidas na sub-trama de DL, Figura 4.11.

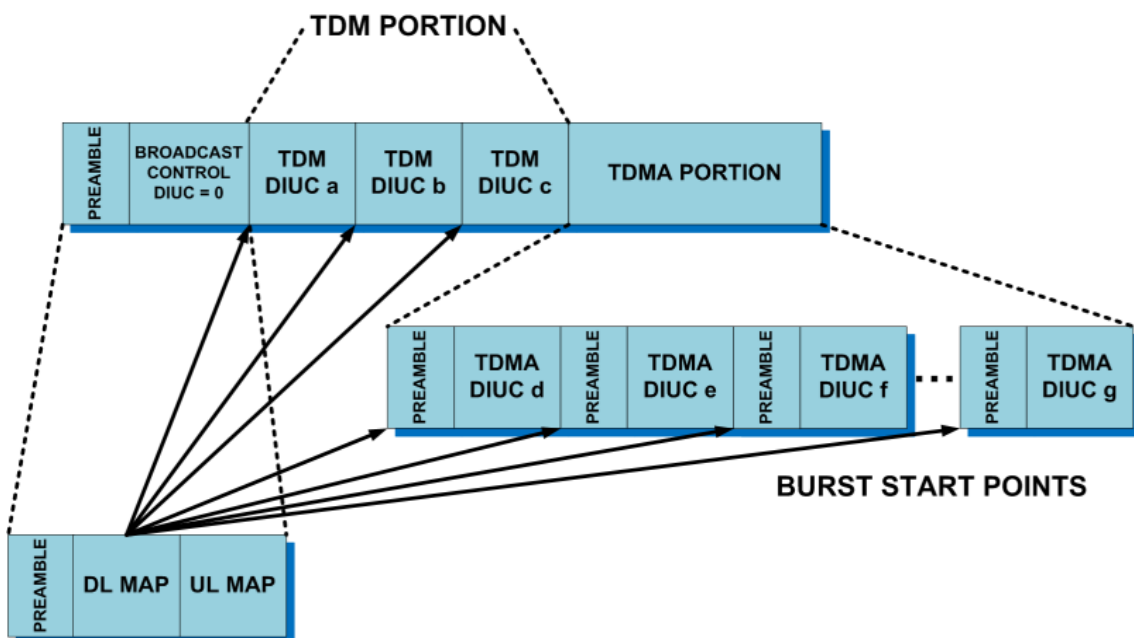


Figura 4.11 - Estrutura da sub-trama de DL (extraído de [Ekl02]).

Na Figura 4.12 apresenta-se a sub-trama de UL utilizada na norma IEEE 802.16-2004. As estações base transmitem de acordo com a atribuição da largura de banda efectuada, através da aplicação do perfil de rajada, especificado no UIUC e contido na mensagem UL-MAP. A sub-trama de UL pode conter, também, atribuições baseadas em contenção para os primeiros acessos ao sistema e requisições de largura de banda via *multicast* ou *broadcast*. As oportunidades oferecidas aos primeiros acessos ao sistema são dimensionadas de modo a permitir um tempo de guarda extra para SSs que não tenham resolvido com antecedência o tempo de transmissão necessário para evitar o atraso para

a BS. A sub-trama inclui os seguintes períodos: *Initial Maintenance*, *Request Contention Opportunities* e *Scheduled Data Grants*.

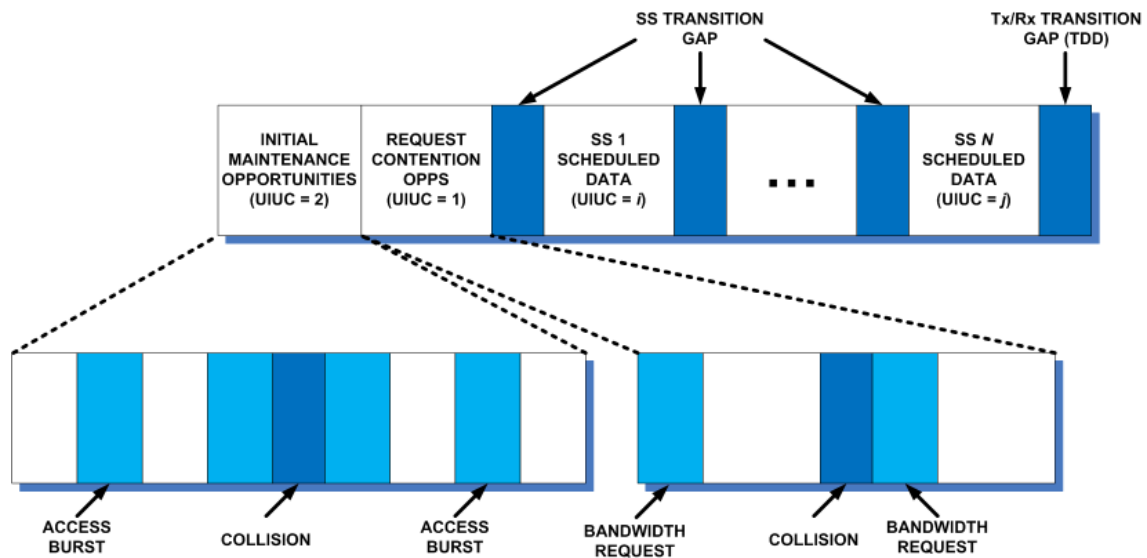


Figura 4.12 - Estrutura da sub-trama de UL (extraído de [Ekl02]).

4.3.4.1 Inicialização da BS

Uma estação subscritora que deseje ter acesso a uma rede de comunicação, deve passar por um processo de inicialização com a estação base correspondente, que é ilustrado pela máquina de estados apresentada na Figura 4.13. O processo de inicialização da estação subscritora pode ser resumido nas seguintes etapas:

- Procurar (*scan*) um canal de DL e estabelecer sincronização com a estação base - A estação subscritora pode fazer uma chamada para um canal de DL que, esteja armazenado na sua memória ou rastrear continuamente por novos possíveis canais na banda de frequência de DL, até encontrar um sinal válido. Depois de um canal ser encontrado são efectuadas a sincronização e a tentativa de adquirir um canal para parâmetros de controlo para o DL através de uma procura por mensagens DL-MAP enviadas pela estação base;
- Obter os parâmetros de transmissão - A estação subscritora procura por uma mensagem de descrição do canal de UL da estação base de modo a, recuperar os parâmetros de transmissão para um possível canal de UL;

- Ajustar parâmetros locais (*ranging*) - O processo é iniciado com a estação subscritora enviando uma mensagem de requisição de *ranging* MAC. Caso a estação subscritora não receba uma resposta ela envia novamente um pedido de *ranging* utilizando uma potência de transmissão mais elevada. Eventualmente a estação subscritora recebe uma resposta. A resposta pode indicar sucesso ou que correções na potência e no indicador de tempo (dia, hora) devem ser efectuadas pela estação subscritora. Se a resposta indica sucesso a estação subscritora está pronta para enviar dados no canal de UL, caso contrário a estação subscritora deve efectuar as correções e enviar um novo pedido de *ranging*;
- Negociar capacidades básicas - A estação subscritora envia para a estação base uma mensagem de requisição de capacidades descrevendo-as em termos dos níveis de modulação suportados, esquemas e taxas de códigos e métodos de multiplexação. A estação base aceita ou nega a admissão de uma estação subscritora com base nas suas capacidades;
- Autenticação e troca de chaves - A estação base estabelece um processo de autorização da estação subscritora para que ela possa entrar na rede, o que inclui a troca chaves de segurança entre a estação base e a estação subscritora;
- Processo de registo - A estação subscritora envia uma mensagem de requisição de registo para a estação base e a estação base envia uma resposta à solicitação de registo da estação subscritora. A troca de mensagens de registo inclui suporte a parâmetros como versão do protocolo IP, gestão de estação subscritora, parâmetros ARQ, opção de classificação, CRC (*Cyclic Redundancy Check*) e controlo de fluxo;
- Estabelecimento de conectividade IP - A estação subscritora inicializa o DHCP (*Dynamic Host Control Protocol*) para obter um endereço IP (*Internet Protocol*) e outros parâmetros os quais viabilizam o estabelecimento de conectividade IP com a estação base. A estação subscritora utiliza o protocolo TFTP (*Trivial File Transfer Protocol*) para obter os parâmetros operacionais;
- Sincronização temporal - A estação subscritora e a estação base precisam de ter a mesma informação sobre a data e a hora actuais, utilizando para esse fim o protocolo especificado pela RFC (*Request For Comments*);
- Transferência de parâmetros opcionais - A estação base envia informação adicional de configuração para a estação subscritora;

- Criações da ligação de transporte - As ligações de transporte são criadas depois que as etapas de registo e de transferência de parâmetros operacionais são finalizadas. Para os fluxos de serviços pré-estabelecidos o processo de criação da ligação é iniciado pela estação base. A estação base envia para a estação subscritora uma mensagem dinâmica de requisição para a adição de um fluxo de serviço e a estação subscritora envia uma resposta para confirmar a criação da ligação. A criação da ligação para fluxos de serviços não pré-estabelecidos é iniciada pela estação subscritora através do envio de uma mensagem de requisição de adição para fluxos de serviços dinâmicos para a estação base. A estação base responde com uma mensagem de confirmação.

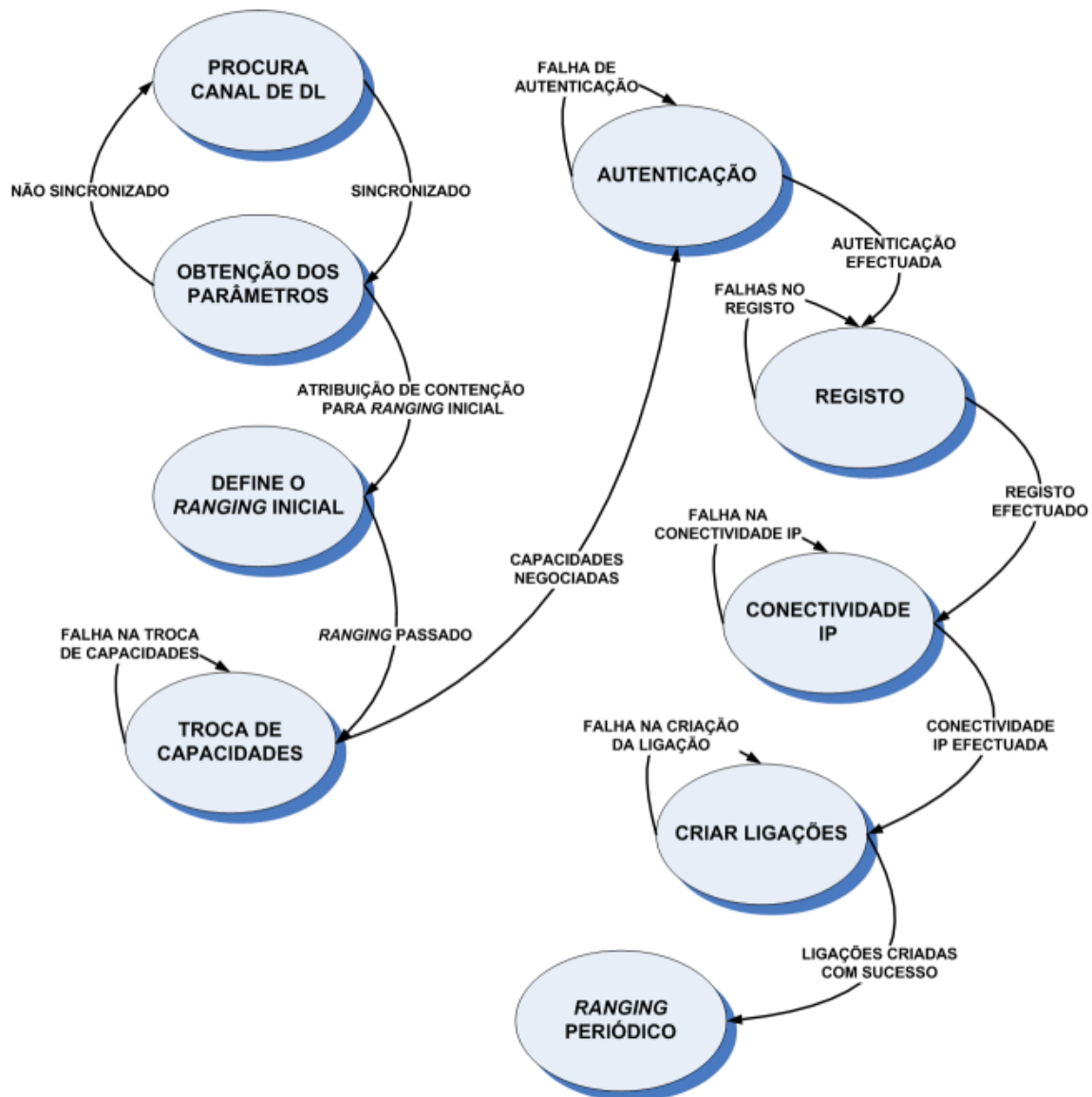


Figura 4.13 - Processo de acesso à rede (extraído de [AnGM07]).

4.3.5 QoS, integração das normas IEEE 802.11 e IEEE 802.16

Nesta Secção serão identificados os pontos relevantes para a elaboração de uma proposta de arquitectura para garantia de QoS, em redes sem fios que integrem as normas IEEE 802.16 e IEEE 802.11.

4.3.5.1 Arquitectura genérica para a garantia de QoS

A qualidade de serviço é fundamental para diversos tipos de aplicações. A definição de QoS tem um aspecto subjectivo, podendo variar de aplicação para aplicação de acordo com as características desejadas para o serviço oferecido pela rede. Porém, de alguma forma, esta subjectividade inicial deve ser traduzida em parâmetros que serão negociados entre as aplicações e a rede.

Tabela 4.3 - Classes de serviço por aplicações (extraído de [Wima05]).

Class Description	Real Time?	Application Type	Bandwith
Interactive Gaming	Yes	Interactive Gaming	50 – 85 kbps
VoIP, Video Conference	Yes	VoIP	5 – 64 kbps
		Video Phone	32 – 384 kbps
Streaming Media	Yes	Music/Speech	5 – 128 kbps
		Video Clips	20 – 384 kbps
		Movie Streaming	> 2 Mbps
Information Technology	No	Instant Messaging	< 25 byte message
		Web Browsing	> 500 kbps
		E-mail (with attachments)	> 500 kbps
Media Content Download (Store and Forward)	No	Bulk Data, Movie Download	> 1 Mbps
		Peer-to-Peer	> 500 kbps

Muitas propostas têm sido apresentadas com a finalidade de modelar os mecanismos envolvidos na garantia da qualidade de serviço. Em linhas gerais, pode definir-se uma arquitectura que garanta a QoS em ambientes genéricos contemplando-se as seguintes fases [Gome01]:

- Iniciação do sistema - o processo de iniciação do sistema está relacionado à definição da infra-estrutura que dará suporte aos serviços oferecidos e que determinará a forma de descrição do estado interno da mesma. As informações

sobre a disponibilidade de recursos do ambiente fazem parte da especificação do estado interno de um fornecedor;

- Requisições de serviços - após a iniciação do sistema, os utilizadores podem requisitar serviços a qualquer momento. Uma requisição é feita através da caracterização da carga de processamento e comunicação a ser produzida ou consumida pelos utilizadores, e da especificação da QoS desejada;
- Estabelecimento de contratos de serviço - a fase de estabelecimento de contratos é iniciado quando uma nova requisição de serviço é recebida pelo sistema. Ele então determinará se existem recursos suficientes para garantir a QoS desejada pelo utilizador e se a admissão dos seus fluxos não irá provocar uma degradação na QoS dos fluxos previamente admitidos. A admissão de um novo contrato de serviço resultará na atribuição dos recursos necessários ao atendimento do serviço, ocasionando mudanças no estado interno do sistema. Caso o sistema não possua recursos disponíveis para atender à solicitação do utilizador, o pedido será rejeitado, podendo dar início a uma nova negociação;
- Manutenção de Contratos de Serviço - quando os fluxos do utilizador são admitidos, o sistema deve garantir que a QoS negociada seja mantida durante todo o tempo que durar a comunicação. É essa garantia que define um contrato de serviço e, como em todo contrato, ambas as partes envolvidas devem colaborar, ou seja, o utilizador deve abster-se à carga caracterizada e o sistema deve manter a QoS negociada. Para que os contratos estabelecidos possam ser mantidos, é necessário efectuar medições periódicas referentes à QoS que está a ser fornecida aos utilizadores do sistema de modo que, ao se detectarem condições inadequadas para a manutenção dos fluxos admitidos, os mecanismos de sintonização (mecanismo responsável pelo redimensionamento da parcela de utilização dos recursos, a qual foi disponibilizada ao utilizador do serviço durante a negociação da QoS, na fase de estabelecimento de contratos de serviço) e mecanismo de renegociação (uma nova negociação só será efectuada se o redimensionamento realizado pelo mecanismo de sintonização não for bem sucedido) possam ser disparados. O incumprimento do contrato por uma das partes pode ocasionar desde uma mera notificação até à interrupção do serviço para aquele utilizador.

4.3.5.2 Arquitecturas de QoS propostas

A norma IEEE 802.16 reflecte o estado da arte no acesso banda larga sem fios à Internet. Ela disponibiliza actualmente as especificações das camadas MAC e PHY, não estando efectivamente em vasta utilização. Por ser uma tecnologia relativamente recente, não existe na literatura científica um número considerável de trabalhos que explorem a norma e, neste caso específico, os aspectos relativos a uma arquitectura para a garantia de QoS com base nessa norma.

O mecanismo de escalonamento definido por Hawa [Hawa03] foi o primeiro a ser proposto para a garantia de QoS na norma IEEE 802.16. Neste trabalho é apresentada uma arquitectura de escalonamento de pacotes que oferece suporte às garantias de QoS de parâmetros como largura de banda e atraso para vários tipos de tráfego, incluindo todos os que são atendidos pelas classes de serviço definidas na norma IEEE 802.16-2004. Um aspecto interessante dessa arquitectura dominante reside no facto de ela poder ser facilmente integrada nos modelos de QoS do IETF: *Intserv* e *Diffserv*. Como se pode observar, comparando essa solução com a proposta apresentada no Subcapítulo 4.3.5.1 para uma arquitectura genérica, para garantia de QoS a única etapa contemplada é a de estabelecimento de contratos de serviços através da optimização do mecanismo de escalonamento de recursos.

Uma outra proposta interessante é o *DiffMobil* [Figu04], onde se apresenta uma arquitectura para a garantia de qualidade de serviço extremo-a-extremo em redes GPRS (*General Packet Radio Services*). Apesar do trabalho não fazer nenhuma menção à norma IEEE 802.16, existem pontos de intersecção. Assim como, a norma IEEE 802.16, o GPRS é uma norma para as redes comutadas por pacotes e introduz essa tecnologia nas redes GSM (*Global System for Mobile communications*). A solução proposta na arquitectura *DiffMobil* consiste numa política e num algoritmo de controlo de admissão baseado em canais de guarda para a interface ar, optimizados pela adição dos módulos de diagnóstico e de controlo de fluxo e na utilização do *DiffServ* no núcleo IP da rede GPRS, introduzindo mecanismos de prioridade de tráfego de acordo com as categorias de serviço descritas no *DiffServ*, fazendo um mapeamento entre essas categorias com as do núcleo GPRS. Com a integração das soluções de QoS da rede nuclear, suporte da interface ar, garante-se o estabelecimento de QoS extremo-a-extremo.

4.4 Considerações finais sobre QoS

A introdução de QoS na norma IEEE 802.11e foi tímida, os mecanismos introduzidos oferecem suporte a uma única ligação e a um número limitado de parâmetros de QoS. A norma IEEE 802.11 baseia-se numa arquitectura distribuída, na qual a operação da camada MAC é distribuída entre os pontos de acesso e as estações subscritoras. Por outro lado, a norma IEEE 802.16 é baseada numa arquitectura de controlo centralizada, onde a estação base, através do seu escalonador de pacotes, tem controlo total sobre o acesso sem fios às médias pelas estações subscritoras. Ao contrário da norma IEEE 802.11, a norma IEEE 802.16 oferece suporte a múltiplas ligações e a um conjunto completo de parâmetros de QoS. Para além disso, a norma IEEE 802.16 oferece um classificador de pacotes para mapear as ligações entre os vários utilizadores e interfaces, indo desde Ethernet a ATM. Essa flexibilidade, garantida pela norma IEEE 802.16, aumenta a complexidade do desenvolvimento e implantação de serviços para as redes de acesso banda larga sem fios fixas e móveis [Nair04].

Uma arquitectura para a garantia de QoS que integre as normas IEEE 802.11 e IEEE 802.16 deve considerar as diferenças relativas às duas normas, harmonizando a simplicidade da norma IEEE 802.11 com a complexidade da norma IEEE 802.16, através de mapeamentos dos parâmetros de QoS e adaptação das funções referentes a camada MAC, a que horas estarão a ser executadas de forma centralizada (IEEE 802.16) e a que horas serão realizadas de forma distribuída (IEEE 802.11). Será necessária a definição de perfis de QoS de acordo com os parâmetros e funcionalidades da camada MAC, de modo que a QoS oferecida não seja degradada a ponto de se tornar perceptível ao utilizador.

Para que se possa definir uma arquitectura para a garantia de QoS genérica para o acesso de banda larga sem fios é necessário que se defina uma proposta que integre as arquitecturas *IntServ* e *DiffServ*. Isso irá garantir mais flexibilidade e fornecerá uma solução mais realística para o problema da garantia de QoS. A integração destas arquitecturas na norma IEEE 802.16 implicará um mapeamento entre as classes de serviço definidas na norma e aquelas definidas no *IntServ* e *DiffServ*.

Pelas experiências efectuadas no *DiffMobil*, podemos observar a importância dos módulos de diagnóstico e controlo de fluxo, operando em conjunto com o mecanismo

de controlo de admissão, para que se garanta um mecanismo justo de garantia de QoS na interface ar.

Considerando o processo da garantia de QoS como definido na arquitectura genérica [Gome01], é necessário que se avalie os módulos de negociação e sintonização à luz dos módulos de diagnóstico e controlo de fluxo como definidos no *DiffMobil* para interface ar.

4.5 Sumário e conclusões

Neste capítulo foram apresentados aspectos gerais da qualidade de serviço, em redes de banda larga sem fios. Abordaram-se também as cinco classes de serviços do WiMAX, e uma arquitectura de QoS que a IEEE 802.16 e IEEE 802.11. Pôde verificar-se que a norma permite a transmissão de dados sem fios em banda larga atendendo às necessidades crescentes de aplicações de voz, dados e vídeo, e oferecendo qualidade de serviço, QoS.

Conclui-se então que o WiMAX tem uma camada MAC muito flexível que, pode acomodar uma variedade de tipos de tráfico, inclusive voz, vídeo, e multimédia, e fornece uma forte QoS. Esta camada foi projectada para fornecer uma arquitectura flexível e poderosa que, pode suportar, eficientemente, uma variedade de exigências de QoS. O WiMAX define vários serviços de escalonamento que controlam e escalonam pacotes de dados de maneiras distintas, baseados nas necessidades de QoS dos utilizadores.

O WiMAX suporta algoritmos de escalonamento de pacotes que oferecem garantias de qualidade nas cinco classes de serviço.

5 Topologias, antenas e segurança

5.1 Topologias de rede

A topologia da rede é a relação lógica e física dos nós numa rede. É um mapa de uma rede que indica os segmentos de rede, os pontos de interligação e as comunidades de utilizadores. Em geral, o objectivo do projecto da rede é o de apresentar uma rede segura, redundante e escalável. Tal objectivo deve ser tido em conta na escolha da topologia da rede.

A norma IEEE 802.16-2004 possui como vantagem a possibilidade de comunicação de utilizador para utilizador, num ambiente sem linha de vista directa, NLoS. A norma IEEE 802.16-2004 foi projectada para suportar vários tipos de topologias de redes, e a topologia a ser utilizada no projecto deve ser decidida logo no início. As topologias suportadas pela norma são: a topologia ponto-a-ponto, a ponto-multiponto e a topologia *mesh*. Também é possível utilizar topologias híbridas que, consistem em utilizar uma ou várias topologias. Assim, é extremamente importante definir a topologia a ser utilizada num projecto na hora do desenvolvimento da rede WiMAX, pois torna-se importante conhecer as características de cada topologia a fim de se avaliar qual será a melhor solução para o projecto.

5.1.1 Topologia ponto-a-ponto

Na topologia PTP (ponto-a-ponto), Figura 5.1, utilizam-se duas antenas que garantem a ligação entre dois pontos. A topologia ponto-a-ponto atende isoladamente a um único utilizador interligado. Esta topologia é menos escalável, visto que, há pouca facilidade de adição de novos nós na rede. Existe, no entanto, uma maior largura de banda nesta solução.

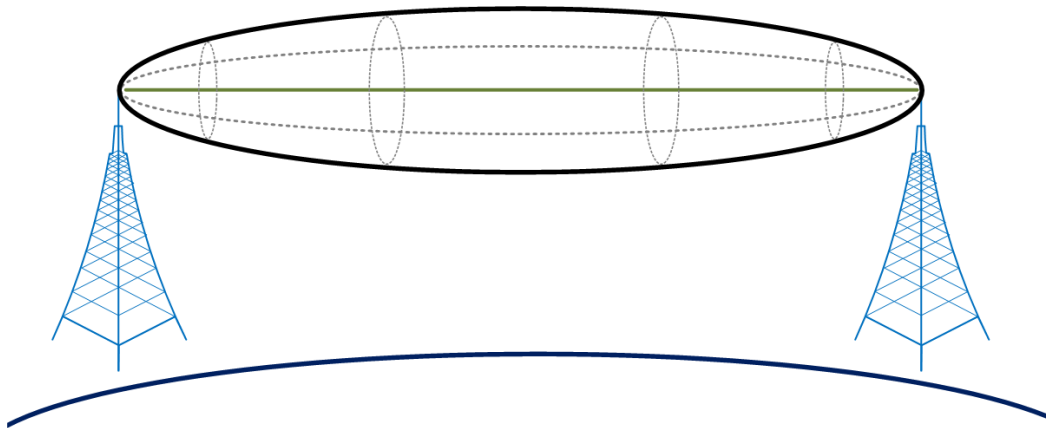


Figura 5.1 - Topologia ponto-a-ponto (PTP).

5.1.2 Topologia ponto-multiponto

Na topologia PMP (Ponto-Multiponto), Figura 5.2, a rede desenvolvida permite suportar vários utilizadores, limitando ao mínimo o número de *routers*, *switches* e outros equipamentos que são necessários para o funcionamento de uma rede convencional. Na topologia PMP servem-se vários utilizadores, simultaneamente, a partir de uma estação base, posicionada estrategicamente. Esta estação base cobre uma área aonde será oferecido o serviço aos utilizadores, reduzindo os custos e oferecendo uma maior facilidade no caso de adição de nós (utilizadores ou CPEs), mas com menor largura de banda.

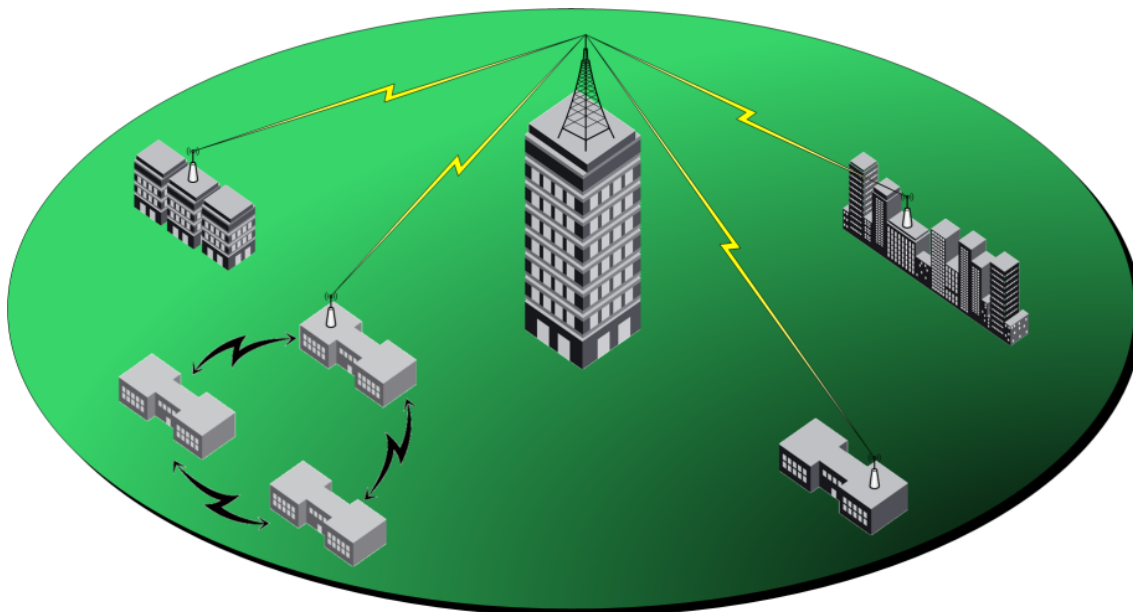


Figura 5.2 - Topologia ponto-multiponto (PMP).

Na topologia PMP são formadas células que podem utilizar antenas do tipo omnidireccional (360°) ou sectorial. O ângulo de abrangência da antena sectorial pode ser de 30°, 60°, 90° ou 120°, dependendo da área de cobertura. Estas células podem ser configuradas para trabalhar com várias antenas posicionadas sequencialmente formando sectores consecutivos e proporcionando uma grande área de cobertura do sinal.

As antenas omnidireccionais apresentam uma maior facilidade de utilização, isto porque elas não precisam de ser direccionadas uma com as outras, o que ocorre com as antenas sectoriais. Estas antenas são utilizadas tanto nas estações base emissoras como nas receptoras. O seu funcionamento não permite ligações com alcance elevado, podendo no entanto ser instalados amplificadores externos para aumentar a sua capacidade de ligação.

No DL todas as estações subscritoras que estão num determinado sector e utilizam um dado canal de frequência recebem a mesma transmissão, ou parte dela. A estação base é o único emissor a operar neste sentido e, portanto, não necessita de coordenação com outras estações excepto no caso TDD, onde o tempo é dividido em períodos para transmissão no UL e períodos para transmissão no DL.

A estação base realiza uma difusão para todas as estações subscritoras de um sector e estas estações verificam o endereço de destino nas mensagens recebidas e processam somente as mensagens destinadas a elas. As mensagens podem ser enviadas para todos

os utilizadores por difusão (*broadcast*) mas também podem ser enviadas individualmente ou para grupos de estações subscritoras (*multicast*).

No outro sentido, as estações subscritoras compartilham o UL conforme a procura. Dependendo da classe de serviço utilizada, a estação subscritora pode ter o direito de transmitir continuamente ou o seu direito para transmitir pode ser dado pela estação base após receber uma requisição do utilizador. Dentro de cada sector, os utilizadores aderem a um protocolo de transmissão que controla a contenção entre utilizadores e habilita o serviço a ser emitido adaptado aos requisitos de atraso e largura de banda de cada aplicação do utilizador.

5.1.3 Topologia *mesh*

A topologia *mesh* é muito semelhante com a topologia ponto-multiponto, mas existe uma diferença entre as duas. Essa diferença está no modo de operação entre as duas topologias.

Enquanto na tecnologia PMP o tráfego ocorre entre a estação base e os utilizadores e vice-versa, na topologia *mesh* o tráfego pode ser encaminhado através de outros utilizadores, como também pode ocorrer directamente entre utilizadores, onde cada utilizador funciona como uma estação ou nó repetidor.

Com esta capacidade de comunicação por nós cria-se uma rede com vários caminhos alternativos, evitando-se assim, os pontos de congestionamento, aprimorando ainda mais o desempenho da rede com a adição de novos utilizadores. A Figura 5.3 apresenta o funcionamento da topologia *mesh*. A topologia *mesh* oferece redundância e maior fiabilidade, mas é a topologia mais cara de se construir porque cada nó ou utilizador da rede requer um *router*.

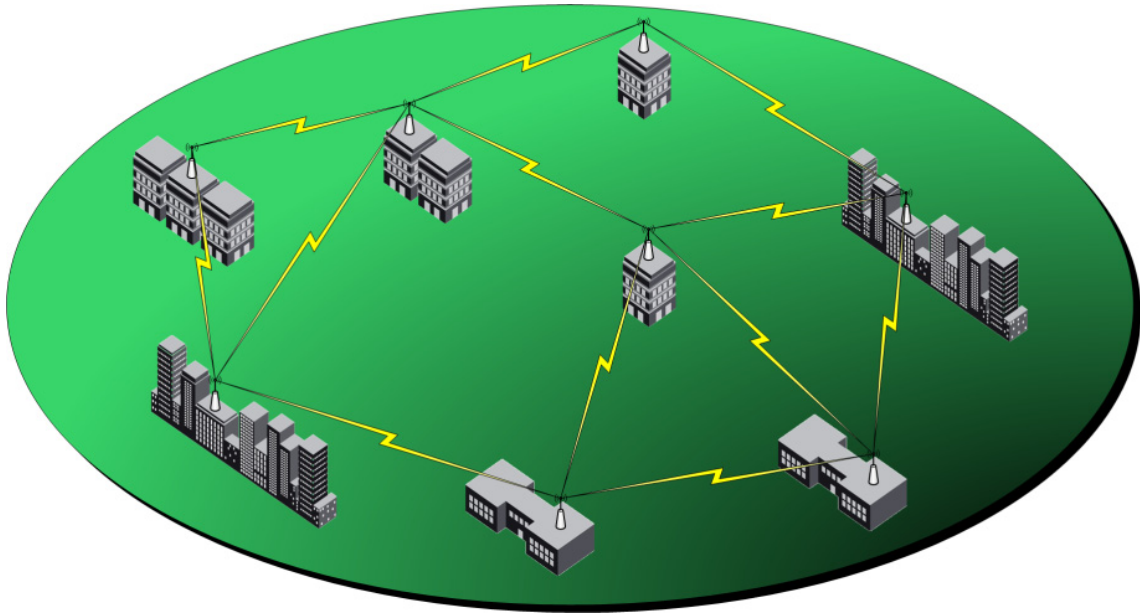


Figura 5.3 - Topologia *mesh*.

Na topologia *mesh* existem três termos importantes: os vizinhos, a vizinhança e a vizinhança estendida. As estações com quem o nó possui ligações directas recebem a denominação de “vizinhos”. Os vizinhos de um nó são aqueles distantes de um salto (uma ligação) do nó. Os vizinhos de um nó formam a “vizinhança”. A “vizinhança estendida” contém, adicionalmente, todos os vizinhos da vizinhança.

Na topologia *mesh* nem mesmo a estação base *mesh* pode transmitir sem coordenação com os outros nós. Utilizando o planeamento distribuído, todos os nós, incluindo a estação base *mesh*, coordenarão as suas transmissões com os nós até dois saltos na vizinhança (vizinhos dos vizinhos) e realizarão a difusão do seu planeamento (recursos disponíveis, solicitações e concessões) para todos os vizinhos. Opcionalmente, o planeamento pode ser estabelecido por requisições e por concessões directas, não coordenadas entre dois nós. Os nós irão certificar-se de que a transmissão resultante não causará colisões com o tráfego programado de dados e de controlo de nenhum outro nó até dois saltos na vizinhança. Não há diferença no mecanismo utilizado para determinação do planeamento no DL e no UL.

Utilizando o planeamento centralizado, os recursos são concedidos de uma maneira centralizada. Uma estação base *mesh* reunirá solicitações de recursos de todas as estações subscritoras *mesh* dentro de um certo alcance, determinará a quantidade de recursos concedidos para cada ligação na rede, tanto no DL como no UL, e comunicará às estações subscritoras *mesh* na sua área de alcance. As mensagens de concessão não

contêm o planeamento real mas cada nó deve calculá-lo utilizando o algoritmo pré-determinado com os parâmetros dados.

Os sistemas com a topologia *mesh* utilizam tipicamente antenas omnidireccionais, mas podem também utilizar antenas sectoriais. No limite da área de cobertura de uma rede *mesh*, onde somente é necessária uma ligação para um único ponto, podem utilizar-se até mesmo antenas altamente direccionais.

5.2 Tecnologia SISO e MIMO

As antenas utilizadas em redes sem fios são classificadas em direccionais e omnidireccionais. As antenas direccionais são as que focalizam o sinal numa direcção específica, enviando o sinal para uma certa zona de cobertura, num ângulo determinado, fazendo com que estas antenas tenham um grande alcance. Estas antenas são utilizadas para se alcançarem longas distâncias, tais como de edifício para edifício.

As antenas direccionais são conhecidas como:

- Sectoriais - são antenas projectadas para dividir a área de cobertura circular em sectores, com o ângulo de abrangência que podem ser de 30°, 60°, 90° ou 120°, a fim de se facilitar a atribuição e a reutilização. Geralmente, as antenas sectoriais são utilizadas em topologia PMP;
- Parabólicas - são antenas utilizadas principalmente em transmissões via satélite.

As antenas omnidireccionais enviam sinais em todas as direcções, 360°, sendo possível estabelecer comunicação independentemente do ponto em que se encontra. Em contrapartida, o alcance destas antenas é menor em relação às direccionais.

Geralmente as antenas omnidireccionais são utilizadas em redes onde a mobilidade é requerida, no caso de comunicações móveis em redes sem fios locais a norma IEEE 802.11. Os sistemas com a topologia *mesh* utilizam antenas omnidireccionais, mas também podem utilizar as antenas sectoriais.

O sistema de antenas SISO (*Single-Input Single-Output*) é utilizado quando se deseja fazer uma simples ligação entre a antena receptora e a antena emissora. Esta configuração utiliza uma antena de cada lado, podendo transmitir e receber o sinal mutuamente. As transmissões de TV e rádio utilizam esse sistema para comunicação. A Figura 5.4 apresenta uma emissão/recepção de dados utilizando uma antena de configuração SISO.

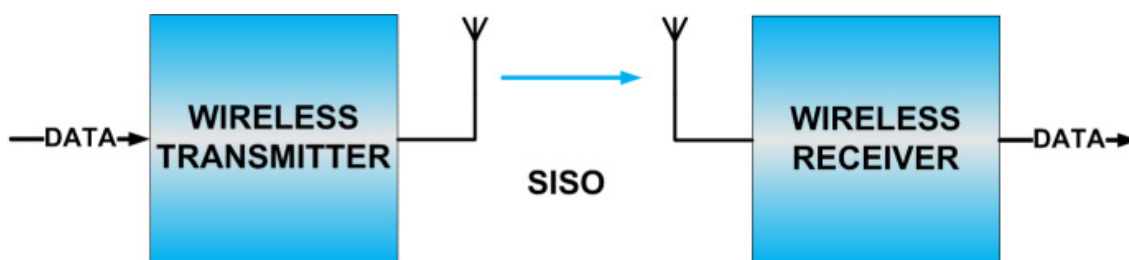


Figura 5.4 - SISO, transmissão e recepção de dados.

As antenas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) são utilizadas em larga escala nos sistemas WiMAX, Figura 5.5. Este tipo de antena caracteriza-se pelo facto de conseguir transmitir e receber sinais de diferentes antenas em ambos os lados da comunicação ou seja as antenas basicamente tem de “pensar”, e conseguir encontrar a melhor forma de transmitir ou receber o sinal. A utilização do MIMO, também, realça o débito binário aumentando o número de caminhos possíveis para o sinal. Cada antena poderá transmitir diferentes dados que poderão ser depois decodificados no receptor.

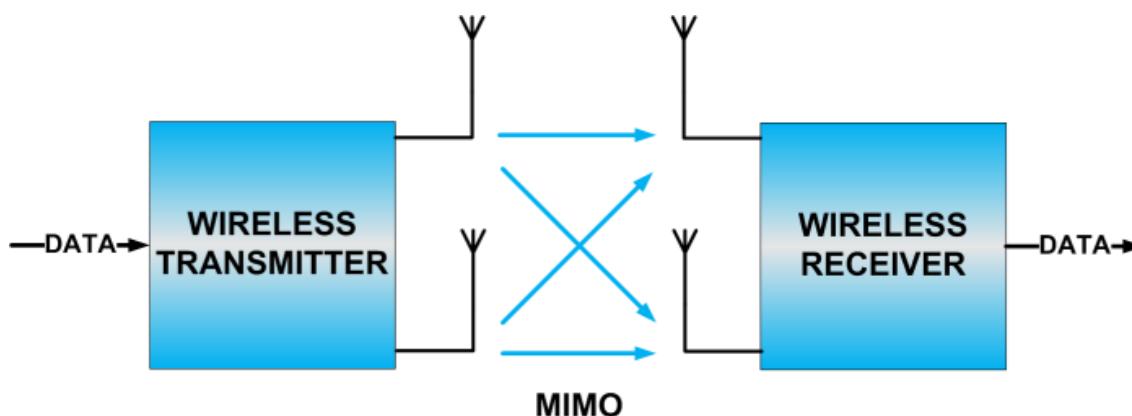


Figura 5.5 - MIMO, transmissão e recepção de dados.

Devido à necessidade de antenas que consigam trabalhar com múltiplos sinais, foi desenvolvido um tipo de antena denominada Antena Inteligente (*Smart Antenna*) ou ainda AAS (*Adaptive Antenna Systems*) que é uma tecnologia importante na norma IEEE 802.16-2004. As estações base equipadas com AAS podem criar feixes que, podem ser dirigidos focando a transmissão do sinal conseguindo um grande sinal em escala. Quando está a receber ela pode focar-se somente na direcção do receptor. Isto ajuda a eliminar interferências de outros sinais, evitando os sinais parasitas.

5.3 Segurança em redes WiMAX

Para os futuros fornecedores de acesso a redes sem fios de banda larga, uma das maiores preocupações é a segurança. Será que os protocolos sem fios dispõem da segurança adequada para impedir ataques aos serviços prestados, e assim proteger o investimento na infra-estrutura wireless? Será que a privacidade dos utilizados estará protegida de piratas informáticos? A especificação do WiMAX dispõe de importantes medidas de segurança para que, estas invasões se tornem impossíveis, podendo assim os utilizadores deixarem de temer que a sua privacidade seja invadida enquanto utilizam as redes sem fios.

O WiMAX inclui uma sub-camada de segurança que proporciona privacidade aos utilizadores que se liguem á rede sem fios. Isto é feito através da criptografia entre a BS e a SS. Para além disso, possui também uma sub-camada de segurança que proporciona aos operadores protecção contra utilizações indevidas de serviços. A BS protege contra o acesso não autorizado a este serviço de transporte de dados obrigando a criptografia dos fluxos de serviços associados pela rede. A sub-camada de privacidade utiliza um protocolo de autenticação cliente/servidor através de uma chave na qual a BS, ou seja, o servidor, controla a distribuição das chaves pelos clientes, SSs. Para além disso, adicionando uma autenticação através de um certificado digital à SS no protocolo de gestão, fortalece-se os mecanismos de privacidade básicos. A Figura 5.6 apresenta a relação da camada de privacidade MAC com a camada MAC e PHY.

A Privacidade na especificação do WiMAX é composta por dois protocolos:

- Um protocolo de encapsulamento para criptografar pacotes de dados pela rede fixa de banda larga sem fios. Este protocolo define um conjunto de *suites* (pares de dados encriptados e algoritmos de autenticação) suportado criptograficamente;
- O protocolo de gestão da chave de privacidade, PKM (Privacy Key Management), assegura a distribuição segura de dados encriptados a partir da BS para a SS. Através deste protocolo, a SS e a BS sincronizam os dados encriptados; para além disso, a BS usa o protocolo para reforçar o acesso confidencial aos serviços da rede.

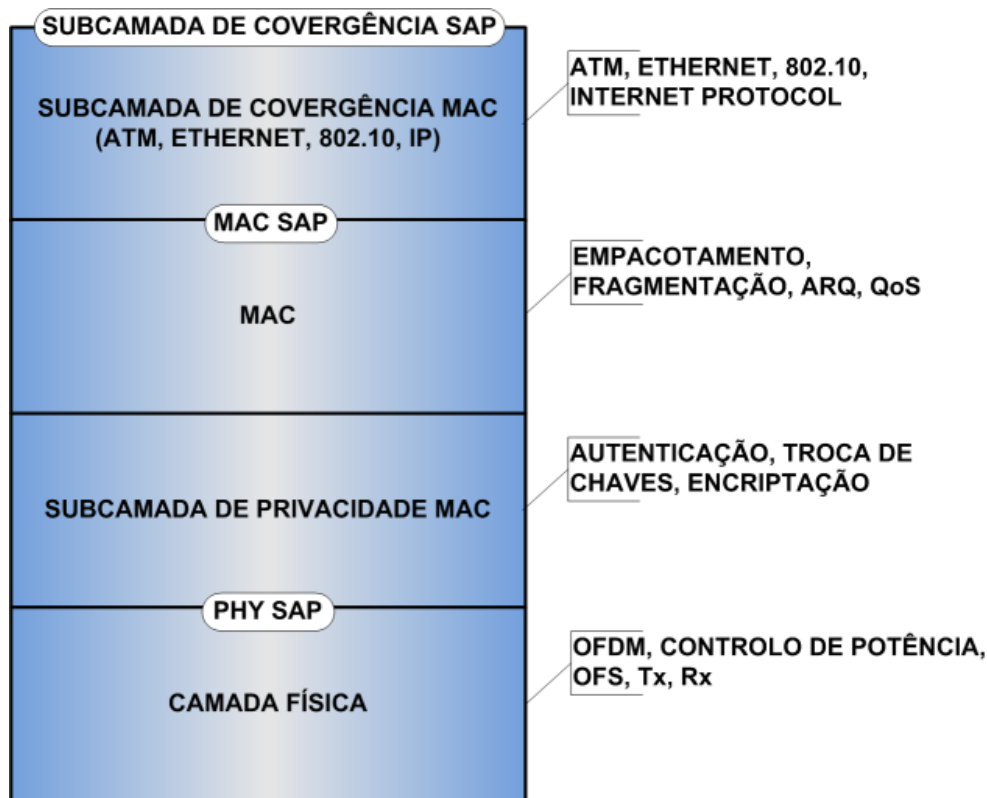


Figura 5.6 – A PHY e a camada MAC do WiMAX e a camada de privacidade MAC.

5.3.1 Associações de segurança

As associações de segurança (SAs) são informações de segurança compartilhadas entre uma BS e um ou mais utilizadores, elas mantêm o estado de segurança de uma ligação. Existem três tipos de SAs: primárias, estáticas e dinâmicas. As primárias são estabelecidas pelas SSs durante o seu processo de inicialização. As estáticas são fornecidas pela BS. Finalmente, as dinâmicas são estabelecidas e eliminadas em resposta ao início e ao término de fluxos de serviço específicos. As SAs estáticas e dinâmicas podem ser compartilhadas por múltiplas SSs, sendo que cada SA é identificada através de uma SAID (*Security Association Identifier*). As SAs incluem duas chaves de encriptação de tráfego (TEKs), a chave em operação e a chave a ser utilizada quando a actual expirar.

5.3.2 Autorização utilizando a gestão privado de chaves

O PKM (*Privacy Key Management*) depois conhecido como PKMv1 (*PKM version 1*), proporciona uma sincronização segura dos dados relativos à chave de segurança entre a

BS e os utilizadores. Ele também serve como um meio de as SSs obterem autorização para a utilização dos serviços da BS. A norma IEEE 802.16e define o PKMv2 (PKM *version 2*) com características melhoradas. A Tabela 5.1 apresenta as principais diferenças entre as duas versões do PKM [Nuay07].

Tabela 5.1 - Principais diferenças entre PKMv1 e PKMv2 [Nuay07].

Características	PKMv1	PKMv2
Autenticação	Baseado em RSA (<i>Rivest shamir Adleman</i>) autenticação de sentido único: a BS autentica a SS	Autenticação mútua. Suporta autenticação EAP (<i>Extensible Authentication Protocol</i>) ou RSA
Associação de Segurança	Uma família SA: <i>Unicast</i> : primário, dinâmico e estático	Associação de segurança de grupo, associação de segurança MBS (<i>Multicast and Broadcast Service</i>) e PKMv1
Chaves de Encriptação	3-DES, RSA e AES	PKMv1 e AES com chaves envolvidas
Encriptação de Dados	DES em modo CBC AES em modo CCM	PKMv1 e AES em modo CTR e AES no modo CBC
Outras Características		Gestão de segurança para: Tráfego por difusão (<i>broadcast</i>) Tráfego MBS Definição de um procedimento pré-autenticação no caso de <i>handover</i>

O protocolo utiliza certificados digitais X.509, o algoritmo de encriptação de chave pública RSA e outros algoritmos, para que seja efectuada a troca de chaves entre a BS e SSs. São especificados dois tipos de certificados X.509, o primeiro tipo identifica um fabricante específico de dispositivos IEEE 802.16, podendo ser assinado pelo próprio fabricante ou por terceiros, o outro tipo identifica uma SS específica, e contém a sua chave pública e o seu endereço MAC. Este certificado é geralmente emitido pelo fabricante da estação subscritora.

A autorização PKM é composta por três mensagens, sendo as duas primeiras enviadas pela estação subscritora e a última pela estação base. A primeira mensagem é utilizada para o envio do certificado do fabricante, assumindo que todos os dispositivos

fabricados por ele são fiáveis. Esta mensagem é ignorada caso a política de segurança da estação permita somente o acesso a dispositivos previamente conhecidos.

A segunda mensagem é enviada imediatamente após a primeira. Ela inclui o certificado da SS, uma descrição dos algoritmos de encriptação suportados por ela, e o identificador básico de ligação, que se tornará o SAID primário do utilizador. Caso o nó do utilizador seja autorizado, a BS responde com a terceira mensagem, que cria o SA de autorização entre as estações. Esta inclui uma chave de autorização encriptada com a chave pública da estação subscritora (presente no certificado X.509) e o seu tempo de vida. Este protocolo assume que, somente as estações em questão irão possuir a chave de autorização. Após a autorização inicial, a SS procura periodicamente uma re-autorização com a BS.

Como o utilizador é autenticado, o processo previne ataques vindos da SSs clonadas. Porém, como nenhuma certificação é fornecida pela BS, e a sua resposta é construída utilizando informações públicas, os utilizadores podem sofrer ataques vindo de BS piratas.

5.3.3 Troca de chaves de encriptação de tráfego

Após a autorização, a SS mantém uma máquina de estados TEKs (*Traffic Encryption Keys*) para cada um de seus SAIDs. Periodicamente, uma mensagem de requisição de chaves é enviada à BS, solicitando a renovação das chaves em uso. A cada momento, existem duas chaves activas, sendo que a chave mais antiga expira na metade do tempo de vida da chave mais recente. A BS responde à requisição da SS com as duas chaves TEK actuais e o seu tempo de vida. As TEKs são encriptadas através de uma chave de encriptação de chaves, derivada da chave de autorização.

5.3.4 Criptografia

A primeira norma de criptografia de dados especificada pela norma IEEE 802.16 é o DES (*Data Encryption Standard*) em modo CBC (*Cipher Block Chaining*). O modo CBC indica que, antes de um bloco de dados ser encriptado, é realizada uma operação de exclusivo (XOR) com o resultado da encriptação do bloco anterior a ele. Define-se

ainda outra norma mais segura, o AES (*Advanced Encryption Standard*) em modo CCM (*Counter with CBC-MAC*). O modo CCM combina os modos *Counter*, que gera blocos *keystream* através da encriptação de valores sucessivos dum contador, e CBC-MAC (*Cipher Block Chaining Message Authentication Code*), que utiliza o modo CBC para a criação de um código de autenticação de mensagens.

5.4 Sumário e conclusões

Neste Capítulo apresentaram-se as topologias de rede utilizadas em redes WiMAX, para se avaliar qual a topologia que mais se adapta a uma determinada implementação. Referiu-se também os tipos de antenas utilizados na tecnologia WiMAX e tecnologias SISO e MIMO.

Por último, abordaram-se os aspectos de segurança em redes WiMAX, como o PKM (*Privacy Key Management*), TEKs (*Traffic Encryption Keys*) e algoritmos de encriptação de dados.

Conclui-se que, das três topologias estudadas, a topologia PTP é menos escalável, devido a dificuldade de adição de novos nós na rede, tem uma largura de banda superior. A topologia PMP envolve custos reduzidos e tem maior facilidade de adição de novos nós na rede, mas com menor largura de banda. Por último, a topologia *mesh* oferece redundância e maior fiabilidade, mas é a solução mais cara de se construir.

O WiMAX fornece privacidade às estações cliente, através da encriptação das ligações geradas. Para além disso, a sub-camada protege as estações base contra o acesso não autorizado aos seus serviços, através de um protocolo de administração de chaves, de métodos de autenticação baseados em certificados digitais e de encriptação.

O WiMAX define vários esquemas de autenticação e poderosos algoritmos de encriptação que, permitem um nível de segurança comparável com os das redes com fios.

6 Modelos de propagação

O dimensionamento de sistemas de comunicações sem fios depende da adequada escolha do modelo de propagação. Existem três grandes categorias de modelos, os empíricos, semi-empíricos e teóricos. Os modelos empíricos são criados com base no resultado de testes de campo, realizados em determinados tipos de ambientes e determinados parâmetros, alturas de antenas, frequências, etc. Habitualmente, apresentam uma relativa rapidez de computação, no entanto, os resultados obtidos serão melhores quanto mais semelhante for a área, na qual se pretende realizar o planeamento, da região, a partir da qual foi obtido o modelo. Os modelos semi-empíricos são também gerados com base em medidas de campo, porém as suas equações guardam uma relação com modelos canónicos de propagação, obtidos teoricamente. Existem modelos semi-empíricos baseados na atenuação de espaço livre, nestes a dependência com a frequência e distância mantém-se, porém a constante aditiva é distinta, esta é obtida por uma campanha de medições em determinada faixa de parâmetros.

Os modelos teóricos são criados com base em fundamentos puramente teóricos. Muitos são utilizados no cálculo de ligações ponto-a-ponto, incluindo a atenuação de espaço livre, assim como, diversas formas de se considerar os efeitos de difracção e reflexão no terreno.

6.1 Fórmula de Friis Modificada

O modelo de propagação mais simples, válido em condições de propagação em espaço livre, é dado pela fórmula de *Friis* [Vele95]:

$$1/L = \frac{P_r}{P_e G_e G_r} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (6.1)$$

onde L é a atenuação, P_r é a potência recebida, P_e é a potência transmitida, G_e é o ganho da antena de emissão, G_r é o ganho da antena de recepção, λ é o comprimento de onda e d é a distância.

Na realidade, para além da atenuação em espaço livre, é necessário considerar outros fenómenos que vão influenciar a atenuação, tais como o efeito da curvatura da Terra, as

perdas por difracção e as perdas devido à existência de obstáculos, reflexões e refrações, entre outros.

Para modelar estes fenómenos, de uma forma realista, utilizam-se modelos que se baseiam nos modelos rigorosos de cada um dos fenómenos, modificados por parâmetros obtidos a partir de medidas de campo. Os modelos de predição fornecem o valor médio da potência do sinal a uma dada distância de uma estação base, mas nos ambientes de comunicações móveis, devido ao desvanecimento, os sinais associados não podem ser tratados através de métodos determinísticos, sendo necessário estabelecer modelos que descrevam melhor esses fenómenos.

Um modelo, correntemente, aplicado utiliza a fórmula de *Friis* para espaço livre substituindo o expoente de propagação 2 por γ [Vele95]. O valor de γ varia entre 2 e 4 em sistemas com cobertura celular. Em espaço livre considera-se $\gamma = 2$, em zonas urbanas, considera-se $\gamma = 3$, $\gamma = 3.5$ e $\gamma = 4$, de forma a distinguir os diferentes níveis de densidade da área edificada. Deste modo, a atenuação, L é dada pela equação:

$$L = 32.4 + 30\gamma + 10\log d + \gamma_{chuva} \times d + \gamma_{nevoeiro} \times d + \gamma_{neve} \times d + 20\log f \quad (6.2)$$

onde γ é o expoente de propagação, γ_{chuva} é a atenuação específica devido à chuva, $\gamma_{nevoeiro}$ é a atenuação específica devido ao nevoeiro, γ_{neve} é a atenuação específica devido à neve. As atenuações específicas são expressas em dB/km, a distância em km e a frequência, f em GHz [MaSa05]. No entanto, para feixes hertzianos e ligações PTP, considera-se sempre a fórmula de *Friis* original, ou seja, com $\gamma=2$.

6.2 Modelo de propagação SUI

O grupo de investigação do IEEE que trabalha no protocolo 802.16 desenvolve normas técnicas para os sistemas de acesso sem fios, FWA, *Fixed Wireless Access* [Rapp96]. As normas propostas para as frequências abaixo de 11 GHz contêm o modelo desenvolvido pela Universidade de *Stanford* nos EUA, chamado de modelo SUI, *Stanford University Interim*. O modelo de propagação SUI foi inicialmente definido para a análise na banda de frequência do Sistema MMDS, *Multichannel Multipoint*

Distribution Services, que abrange a banda de 2.5 a 2.7 GHz, mas actualmente também se aplica a 3.5 GHz.

O modelo de propagação SUI é dividido em três tipos de ambiente chamados de A, B e C. O tipo A é associado à máxima atenuação e é apropriado para regiões acidentadas com densidade de moderada a intensa de vegetação. O tipo C é enquadrado como uma região de atenuação de percurso mínima, onde o terreno é plano com uma densidade de vegetação leve. O tipo B é caracterizado pela composição do tipo A e C, ou seja, predominância de terreno plano com moderada a intensa densidade de vegetação ou região acidentada com densidade de vegetação leve. A equação básica da atenuação com os factores de correcção é então dada por:

$$L = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s, [dB], \text{ para } d > d_0 \quad (6.3)$$

onde d é a distância entre a antena emissora e a antena receptora em metros, d_0 é a distância mínima entre as antenas e assume o valor de 100 m e s é o factor de distribuição estatística do tipo logaritmo comum, também denominado de base 10, que é utilizado para calcular o desvanecimento devido a árvores e outros obstáculos, cujo valor é compreendido entre 8.2 e 10.6 dB. Os valores dos outros parâmetros são definidos como:

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (6.4)$$

e

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (6.5)$$

onde o parâmetro h_b é a altura da estação base acima do solo em metros e deve estar entre 10 e 80 m.

As constantes utilizadas como a , b e c são apresentadas na Tabela 6.1. O parâmetro γ que aparece na equação (6.5) é igual para o expoente de atenuação. Para um dado tipo de terreno o expoente de atenuação é determinado por h_b .

Tabela 6.1 - Constantes do modelo IEEE 802.16 (SUI).

Constante do Modelo	Tipo de Terreno		
	A	B	C
a	4.6	4.0	3.6
b	0.0075	0.0065	0.05
c	12.6	17.1	20.0

Os termos X_f e X_h são factores de correcção para frequência e altura da antena do receptor acima do solo, respectivamente. Estes factores são definidos por:

$$X_f = 6.0 \log \frac{f}{2000} \quad (6.6)$$

e

$$X_h = -10.8 \log \left(\frac{h_m}{2.0} \right), \text{ para terrenos do tipo A e B} \quad (6.7)$$

$$X_h = -20.0 - \log \left(\frac{h_m}{2.0} \right), \text{ para terrenos do tipo C} \quad (6.8)$$

onde f é a frequência em MHz e h_m é a altura da antena do receptor em metros. O modelo SUI é utilizado para efectuar a predição da atenuação em três tipos de ambientes, denominados de áreas rurais, suburbana e urbana. Ao todo, são definidos dois modelos para cada um dos três tipos de terreno dos modelos de propagação SUI, gerando os seis modelos apresentados na Tabela 6.2. Em adição à equação de atenuação mediana, os modelos SUI incluem informação de dispersão temporal, em forma de amplitude, atraso de tempo (*time delay*), efeito de *Doppler* e o factor k da distribuição de *Rice*.

Tabela 6.2 - Classificação do modelo de propagação SUI.

Modelo SUI	Tipo de Terreno	Atraso	Factor k de <i>Rice</i>	Efeito de <i>Doppler</i>
SUI-1	C	Baixo	Elevado	Baixo
SUI-2	C	Baixo	Elevado	Baixo
SUI-3	B	Baixo	Baixo	Baixo
SUI-4	B	Moderado	Baixo	Elevado
SUI-5	A	Elevado	Baixo	Baixo
SUI-6	A	Elevado	Baixo	Elevado

Os diferentes modelos são dados para diferentes situações existentes. O atraso deve-se ao facto de existir multi-percurso, que pode ser notado de forma maior ou menor dependendo do tipo de terreno. O factor k de *Rice* difere devido à existência ou ausência da LoS, no caso de existência de LoS o factor k irá assumir um valor elevado, uma vez que existe um raio directo mais forte do que os raios reflectidos. O efeito de *Doppler* pode ser baixo ou elevado dependendo da existência ou ausência de mobilidade.

Os modelos SUI foram especificamente desenvolvidos para utilização nas frequências de sistemas MMDS dos Estados Unidos, 2.5 a 2.7 GHz. Em [Ande03] é referido que o modelo deveria obter um bom desempenho na faixa de 2 a 4 GHz. A Equação (6.3) foi obtida a partir de valores medidos em regiões suburbanas. Não existem factores de correcção para áreas urbanas ou áreas rurais. Assim, não existe forma de relacionar os tipos de terreno (A, B e C) às morfologias comumente encontrados em bases de dados digitais, por isso, o método de selecção do tipo de terreno a ser considerado em determinada região do projecto não é sistemático.

As medidas para obtenção do modelo de atenuação foram realizadas em distâncias inferiores a 7 km. Porém, no planeamento multi-celular, a utilização de factores de reutilização e a interferência de sinal devem ser preditos, nestes casos, os modelos de propagação SUI não permitem tais cálculos com precisão.

Pelas suas limitações, os modelos SUI adequam-se mais para o dimensionamento do sistema e estimativa de equipamentos, ao invés do planeamento detalhado, *location-specific*. Neste caso, modelos físicos que exploram os dados de topografia e morfologia do terreno, bem como edificações, são mais apropriados.

6.3 Ruído-térmico

A qualidade de uma ligação analógica pode ser estabelecida em função da uniformidade do módulo da função de transferência, da linearidade do argumento da função de transferência e da relação sinal-ruído.

As características da função de transferência são essencialmente da responsabilidade do projectista e do fabricante, a relação sinal-ruído depende particularmente da ligação. A relação sinal-ruído térmico depende da relação sinal-ruído à entrada do desmodulador. Para as modulações angulares, a expressão relação sinal-ruído térmico em

radiofrequência é, frequentemente, substituída pela expressão equivalente relação portadora-ruído térmico, C/N [Sale02].

6.3.1 Cálculo da relação portadora-ruído térmico

O ruído predominante nos terminais das antenas dos feixes hertzianos é o ruído térmico, a sua potência, n_0 , é dada pela equação:

$$n_0 = K_B T b_{rf} \quad (6.9)$$

onde K_B é a constante de Boltzman ($K_B = 1,38 \times 10^{-23}$ [J/K]), T é a temperatura observada pela antena, em [K] e b_{rf} é a largura de banda efectiva de ruído, em Hz.

Na maioria dos sistemas, a temperatura observada pelas antenas é de aproximadamente 293 K (≈ 20 °C), assim a potência do ruído, em unidades logarítmicas é dada pela equação:

$$N_{0[dBW]} = -204 + 10 \log_{10}(b_{rf}) \quad (6.10)$$

Fazendo a conversão de [dBW] par [dBm] N_0 também pode ser dado por:

$$N_{0[dBm]} = -174 + 10 \log_{10}(b_{rf}) \quad (6.11)$$

As expressões anteriores dão-nos apenas um resultado aproximado, para se obter um resultado mais exacto é necessário integrar a temperatura vista pela antena. Quanto à temperatura, pode dizer-se que será inferior a 293 K, uma vez que apenas uma parte do diagrama de radiação observa a Terra. A aproximação feita é aceitável, pois o ruído térmico do equipamento é muito superior ao ruído registado nos terminais da antena.

Se o factor de ruído do receptor, N_f , for somado à potência de ruído, obtém-se o ruído N aos terminais da antena:

$$N = N_o + N_f \quad (6.12)$$

Se a temperatura equivalente de ruído do receptor (T_r), em [K], for conhecida, o factor de ruído para uma temperatura ambiente de 293 K será dado por:

$$N_f = 10 \log \left(1 + \frac{T_r}{293} \right) \quad (6.13)$$

A relação sinal ruído em radiofrequência, S/N_{rf} , também denominada por relação portadora-ruído, C/N , pode ser calculada depois de conhecida a potência recebida à entrada do receptor pela expressão:

$$S / N_{rf} = C / N = P_R - N \quad (6.14)$$

Substituindo o valor de P_R da formula de Friis (6.1) sob forma logarítmica em (6.13) obtém-se (6.16):

$$P_R = P_E + G_e + G_R - L \quad (6.15)$$

em que L é a atenuação que pode ser calculada consoante o modelo de propagação escolhido.

$$C / N = P_E + G_E + G_R - L - N \quad (6.16)$$

Onde P_E é a potência de emissão, G_E é o ganho da antena de emissão, G_R é o ganho da antena de recepção e L é a atenuação.

6.4 Desvanecimento

Numa ligação entre dois pontos, através de um meio com características variáveis no tempo, verifica-se que a potência do sinal recebido varia no tempo, mesmo que a potência do sinal emitido se mantenha constante. Este fenómeno é designado por desvanecimento ou *fading* [Comp06].

Em ambientes urbanos não existem, geralmente, as condições para a linha de vista entre a base e o móvel, assim a propagação faz-se por re-radiação e difracção em diversos

obstáculos, ou seja, por percursos alternativos. A fase e a amplitude dos raios que em cada instante chegam à estação móvel variam com o tempo.

A variação temporal do sinal que chega à antena receptora pode dar-se de duas formas:

- Desvanecimento lento: consiste na flutuação do valor médio do sinal devido à variação das perdas de propagação causadas pelas irregularidades da superfície onde o móvel se desloca, ou ao efeito de sombra causado pela presença de obstáculos no cenário de propagação;
- Desvanecimento rápido: acontece para pequenos deslocamentos da estação móvel, e que se deve à interferência das várias componentes multi-percurso.

O desvanecimento lento ocorre quando, à medida que o terminal se desloca, o nível médio da potência recebida sofre pequenas flutuações. O desvanecimento rápido ocorre quando em deslocamentos relativamente curtos acontecem variações instantâneas do sinal em torno do valor médio [Tele04].

Uma vez que o desvanecimento afecta significativamente o nível da potência recebida, há que prever a sua distribuição de amplitude de forma a contabilizar o seu efeito, já que a diminuição da relação portadora-ruído vai aumentar a probabilidade de erro de bit por distorção inter-simbólica. Este efeito, conhecido por desvanecimento selectivo, deve-se ao facto de o canal de transmissão deixar de ser linear. A simples diminuição da amplitude do sinal recebido é, neste contexto, designado por desvanecimento uniforme [MaSa05]. No entanto, na norma IEEE 802.16 verifica-se que a probabilidade de erro devido ao desvanecimento selectivo é nula quando existe linha de vista.

A relação portadora-ruído com desvanecimento, $C/N_{\min_c_desv}$ é dada por:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\min_c_desv} = \left(\frac{C}{N}\right)_{\min} + m_u \quad (6.17)$$

onde m_u é a margem de desvanecimento uniforme.

A ITU-R (*International Telecommunications Union - Radiocommunications*) desenvolveu um modelo empírico para a caracterização do desvanecimento uniforme: a probabilidade da potência recebida, p , ser igual ou inferior a p_0 , no mês mais desfavorável (Europa Ocidental) [Carv05]:

$$P(p \leq p_0) = k_t \frac{P_0}{P_n} \quad (6.18)$$

Onde p_n é a potência recebida em condições ideais de propagação, ou seja sem desvanecimento e p_0 é a potência recebida em condições reais de propagação, ou seja com desvanecimento, no instante t , correspondendo a uma dada taxa de erro binário, *ber*.

Introduzindo a noção de margem da ligação $m = p_n / p_0$, a expressão anterior fica da seguinte forma:

$$P(p \leq p_0) = \frac{F}{m} \Leftrightarrow m = \frac{F}{P} \quad (6.19)$$

em que F é o factor de ocorrência do desvanecimento profundo e que engloba os factores geoclimáticos, tipo de terreno, inclinação do raio directo, comprimento da ligação e frequência do sistema. Este F vai de acordo com o modelo de Morita [Sale02].

$$F = 1.4 \times 10^{-8} f d^{3.5} / P(p \leq p_0); d_{[km]}, f_{[GHz]} \quad (6.20)$$

A probabilidade P da potência recebida ser inferior a p_0 tem que cumprir as duas cláusulas ITU-R que se adaptaram para o WiMAX:

Cláusula 1 – a taxa de erros binários, *ber*, não deve exceder 10^{-6} durante mais de $0.4d/2500\%$, d [km], do tempo no pior mês, com um tempo de integração de cerca de um minuto.

$$P_1 = \frac{0.004 \times d}{2500}, \text{ com } d \geq 280 \quad (6.21)$$

Cláusula 2 – a taxa de erros binários, *ber*, não deve exceder 10^{-3} durante mais de $0.054d/2500\%$, d [km], do tempo no pior mês, com um tempo de integração de cerca de 1 segundo.

$$P_2 = \frac{0.00054 \times d}{2500}, \text{ com } d \geq 280 \quad (6.22)$$

A margem de ligação é dada por:

$$M(dB) = 10 \log(F / P) \quad (6.23)$$

Segundo a ITU-R a probabilidade da taxa de erros ser excedida, P_c , pode ser decomposta em duas parcelas, $P_c = P_u + P_s$, em que P_u é causada pelo desvanecimento uniforme e P_s deve-se à distorção do sinal provocada pelo desvanecimento selectivo.

Correspondendo-lhe uma decomposição equivalente da margem.

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_u} + \frac{1}{m_s} \quad (6.24)$$

onde:

- m_u é a margem para desvanecimento uniforme;
- m_s é a margem para desvanecimento selectivo (característico do equipamento receptor);
- m é margem da ligação (ou margem real).

Na norma IEEE 802.16, a margem selectiva, m_s , é nula [IEEE04]. Assim conclui-se que:

$$P = P_u \quad (6.25)$$

e

$$m = m_u \quad (6.26)$$

Pode-se assim afirmar que a relação portadora-ruído mínima, C/N_{min} com desvanecimento, em dB, é dado por, [MaSa05]:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\min_com_desvanecimento} = \left(\frac{C}{N}\right)_{\min} + M_u + M_{ext} \quad (6.27)$$

onde M_{ext} é uma margem adicional de segurança considerada com um valor de 3 dB.

6.5 Relação portadora-interferência

A cada estação base é atribuído um grupo de canais de rádio para serem utilizados dentro de uma pequena região geográfica chamada célula. O raio de cobertura de uma célula, R , é o alcance correspondente a uma determinada qualidade, normalmente relacionada com a necessidade de obter uma probabilidade de erro de bit abaixo de um valor limiar nos sistemas digitais, Figura 6.1.

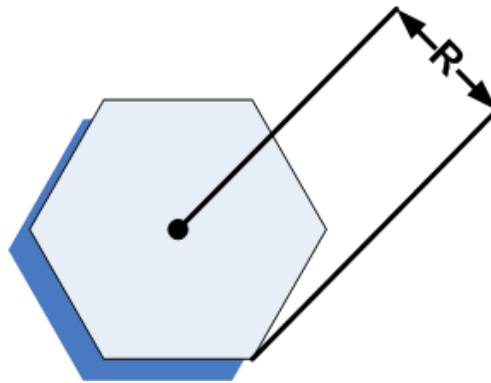


Figura 6.1 - Definição de célula de cobertura omnidireccional.

À distância mínima entre células que permite a reutilização da mesma frequência chama-se distância de reutilização. Um dado canal utilizando, por exemplo a frequência f_1 numa dada zona, para fazer uma chamada na célula C_0 (com um raio de cobertura R), poderá ser reutilizado noutra célula, por exemplo C_1 , Figura 6.2 [Vele95].

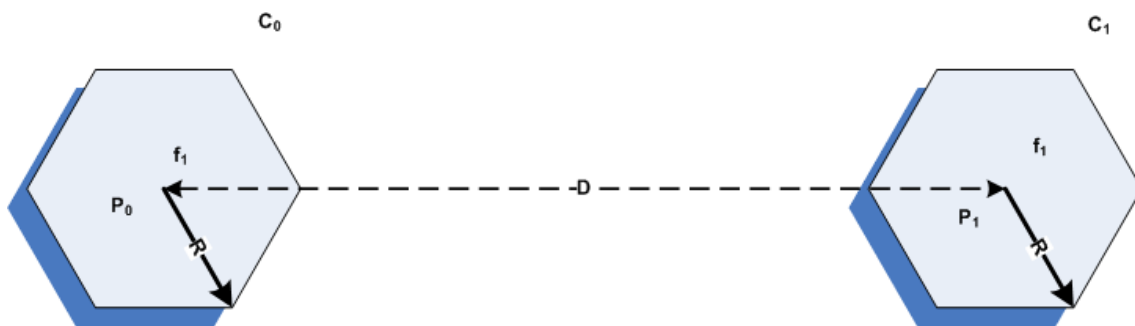


Figura 6.2 - Grandezas envolvidas na reutilização de frequências.

A relação portadora-interferência co-canal varia de acordo com o padrão de reutilização. A relação C/I é uma variável aleatória, uma vez que é afectada por fenómenos aleatórios, tais como o desvanecimento. Os valores de C/I estão directamente relacionados com a distância de reutilização.

O factor de redução de interferência co-canal (FRIC) q , é o quociente entre a distância de reutilização, D , e a distância de cobertura, R , e dá-nos uma medida da compacticidade do sistema celular.

A partir do FRIC, $q = r_{cc}$, pode-se obter o padrão de reutilização de frequências k . Dado o número total de canais no sistema, é possível relacionar a eficiência espectral geográfica com a relação portadora-interferência através do valor de k .

Quanto maior for a relação C/I maior será o factor de redução de interferência co-canal q , originando-se padrões celulares com uma malha mais larga. Quanto maior for o factor de reutilização do padrão celular, menor o número de canais por célula, o que se reflecte numa menor capacidade de suporte de tráfego.

Dado k_I células co-canal interferentes, a relação portadora-interferência na estação de base devido aos móveis será dada por:

$$C/I = \frac{C}{\sum_{k=1}^{k_I} I_k} \quad (6.28)$$

onde as interferências I_k são as interferências provenientes das estações de base interferentes, na Figura 6.3.

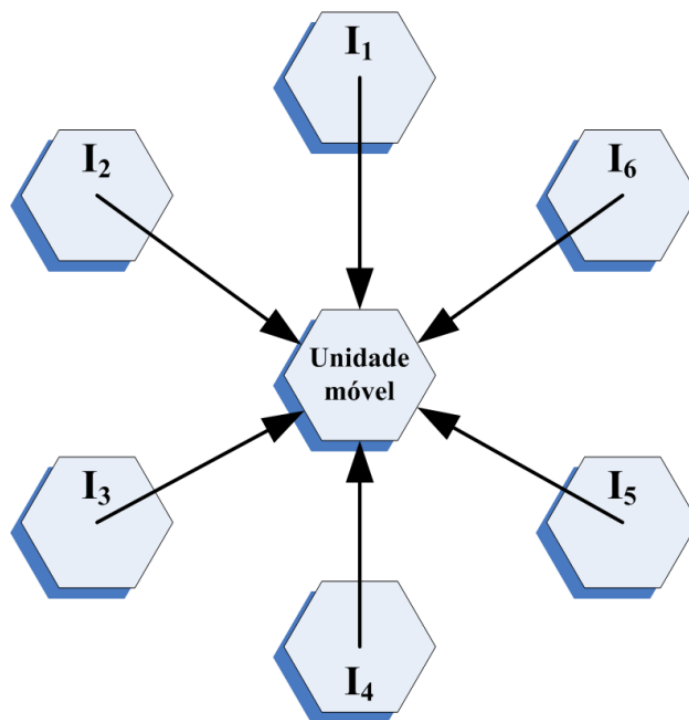


Figura 6.3 - Interferência co-canal das seis células interferentes recebida na unidade móvel.

Num sistema celular hexagonal totalmente em funcionamento, há sempre seis células co-canal a interferir no primeiro anel de interferência, ou seja, $k_I = 6$, Figura 6.4. Deverão considerar-se dois casos:

- O sinal e a interferência co-canal recebidos pela unidade móvel que se encontra na célula central;
- O sinal e a interferência co-canal recebidos pela estação de base.

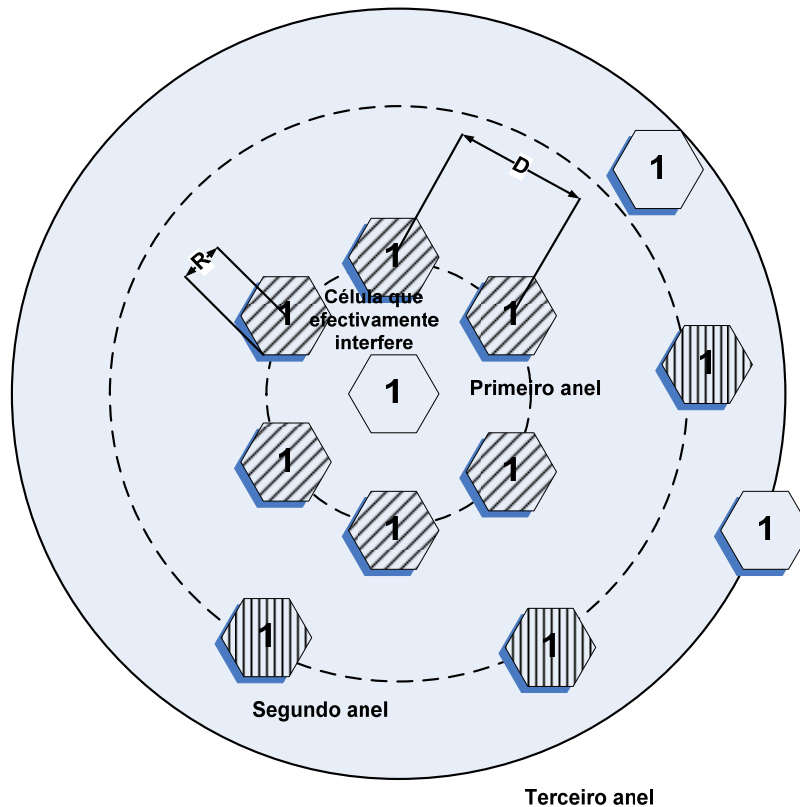


Figura 6.4 - Seis células que interferem com a célula central que utiliza a frequência 1.

Embora as geometrias sejam diferentes, as dimensões em causa são muito próximas conduzindo a situações em média equivalentes. Se as potências transmitidas pelas estações base e pelas unidades móveis forem iguais, as relações C/I nos dois casos são muito próximas.

O sistema diz-se equilibrado se as relações portadora-interferência forem iguais na unidade móvel e na estação base. Num sistema equilibrado, podemos escolher só um dos casos para analisar os requisitos do sistema, sendo os resultados de um dos casos válidos para o outro e vice-versa.

Assumindo que o ruído local é muito menor que o nível de interferência e que, portanto pode ser desprezado, assumindo um modelo de propagação onde o sinal varia com a

distância com $d^{-\gamma}$ e o desvanecimento é contabilizado por uma margem de desvanecimento, a relação C/I pode assim ser expressa por

$$C/I = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_{k=1}^{K_I} D_k^{-\gamma}} \quad (6.29)$$

onde γ caracteriza a atenuação existente no terreno em causa e D_k é a distância a que se encontra a k -ésima célula interferente.

Para as frequências utilizadas nos sistemas celulares clássicos, por exemplo 850 MHz no caso do AMPS e 900 MHz para o GSM, é habitual utilizar-se o valor $\gamma = 4$ para o coeficiente de propagação [LaCG02]. K_I é o número de células co-canal a interferir, sendo igual a 6 para o primeiro anel num sistema celular totalmente em funcionamento, Figura 6.4.

Dado $q = D/R$, na equação anterior tem-se:

$$C/I = \frac{1}{\sum_{k=1}^{K_I} (D_k/R)^{-\gamma}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{K_I} q_k^{-\gamma}} \quad (6.30)$$

onde q_k é o factor de redução de interferência co-canal da k -ésima célula que interfere com a célula central.

Assumindo que todas as distâncias D_k são iguais e também iguais a D , por simplicidade, tem-se então que $q = q_k$, Figura 6.4. Logo:

$$C/I = \frac{R^{-\gamma}}{6D^{-\gamma}} = \frac{q^\gamma}{6} \quad (6.31)$$

ou seja:

$$q = (6C/I)^{1/\gamma} \quad (6.32)$$

Para o cálculo de q , o valor de C/I baseia-se no desempenho pretendido para o sistema, enquanto que o valor de γ depende do tipo de terreno.

Dados os valores de C/I e γ , poderá portanto determinar-se o FRIC.

Para o sistema AMPS, como o valor $(C/I)_{\min} = 18$ dB inclui a margem de desvanecimento, obtém-se:

$$q = 4.41 \quad (6.33)$$

Como para um sistema celular hexagonal $q = \sqrt{3k}$, obtém-se $k = 7$. Isto significa que é necessário utilizar um factor de reutilização com $k = 7$ células para se obter uma relação portadora-interferência de 18 dB, Figura 6.5.

Como $q = D/R$, a determinação de D pode ser feita a partir da escolha de um dado raio de cobertura R , obtido a partir de critérios associados à eficiência espectral e à capacidade, obtendo-se a distância de reutilização D .

Habitualmente, será desejável utilizar um valor de q superior ao dado por (6.33), pois quanto maior for o valor do factor de reutilização, menor será a interferência co-canal.

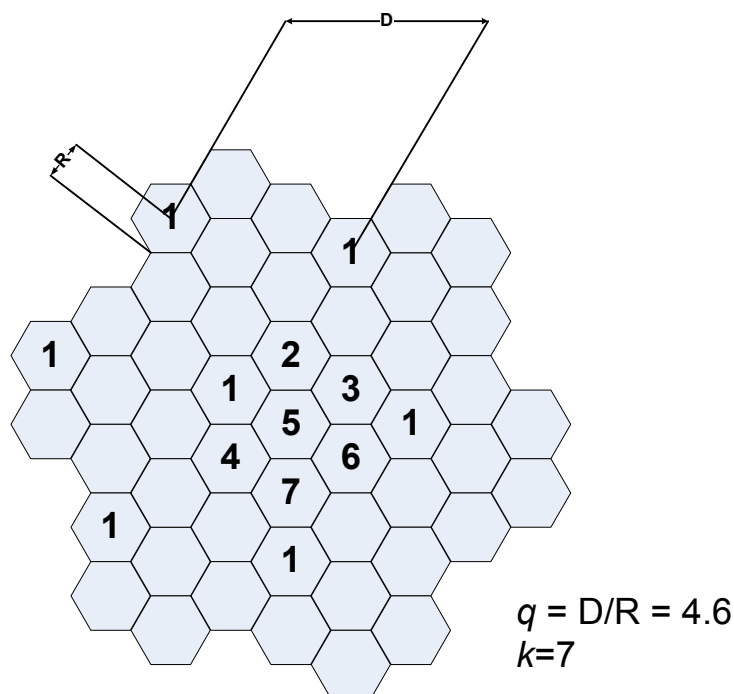


Figura 6.5 - Factor de reutilização $k=7$.

Num ambiente real, a expressão (6.30) é sempre válida, enquanto que a expressão (6.31) já não o é (em geral, as distâncias a que efectivamente se reutilizam as frequências poderão ser menores para cada célula pois, quando os móveis se deslocam numa célula, poderão aproximar-se mais do que D de uma estação base interferente). Como $q = D/R$, o FRIC $q = 4.41$ pode não ser suficientemente grande para manter uma relação portadora-interferência $C/I = 18$ dB. Isto é particularmente verdade no pior caso. O pior caso acontece quando uma unidade móvel se encontra numa posição onde recebe o sinal mais fraco da sua própria estação de base enquanto que a interferência das outras estações é consideravelmente forte. A unidade móvel está na fronteira da célula a uma distância R da estação de base, como se verifica na Figura 6.6.

As distâncias desde as estações base a cada uma das seis células do primeiro anel de interferência são as indicadas na Figura 6.6.

Considerando estas distâncias obtém-se a seguinte expressão para a relação portadora-interferência (exemplo para $\gamma = 4$):

$$C/I = \frac{R^{-4}}{2(D-R)^{-4} + 2D^{-4} + 2(D+R)^{-4}} = \frac{1}{2(q-1)^{-4} + 2q^{-4} + 2(q+1)^{-4}} \quad (6.34)$$

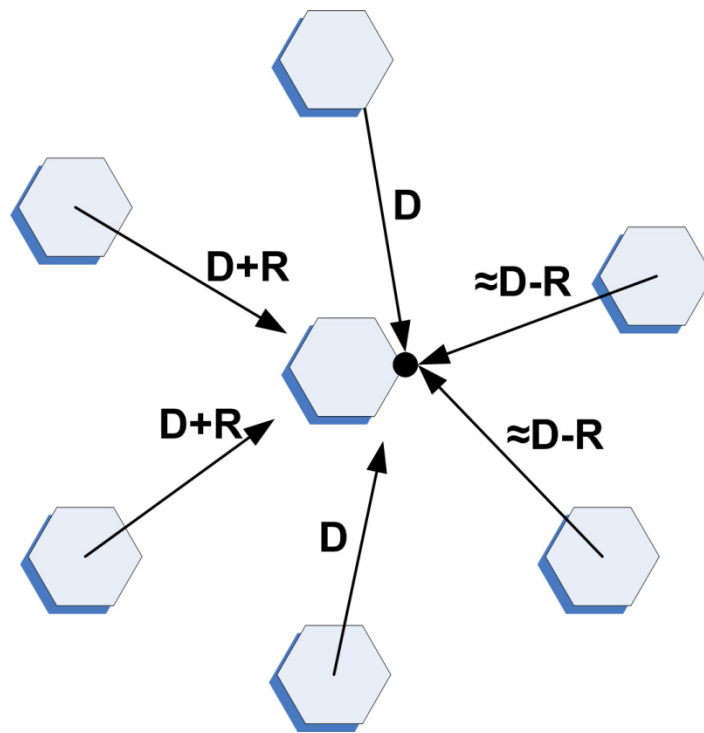


Figura 6.6 - Interferência co-canal (pior caso).

Substituindo $q = 4.6$ nesta expressão, obtém-se $C/I = 54$, ou seja, um valor $C/I = 17$ dB, inferior aos 18 dB pretendidos.

Considerando o problema recíproco da interferência numa estação de base, proveniente dos móveis, tem-se distâncias mais pequenas (interferências I_k da Figura 6.6), utilizando-se a distância $D-R$ como o pior caso para todos os elementos que interferem. Obtém-se [Vele95]:

$$C/I = \frac{R^{-4}}{6(D-R)^{-4}} = \frac{1}{6(q-1)^{-4}} = 28 = 14.47 \text{ dB} \quad (6.35)$$

No caso de interferência das estações base nos móveis, para as distâncias consideradas na Figura 6.6, devido à localização imperfeita das estações base e devido às irregularidades do terreno, a relação C/I recebida é sempre inferior a 17 dB, podendo inclusive ser inferior a 15 dB, o que poderá acontecer com facilidade numa situação de tráfego intenso. Como o sistema deve ser sempre projectado tendo em conta a relação portadora-interferência, C/I , no pior caso, o valor $q = 4.6$ não é suficiente.

Conclui-se portanto que num sistema com células omnidireccionais, $k = 9$ ou $k = 12$ deverão ser escolhas correctas, como se passa a justificar. Para este caso, os valores de q são:

$$q = D/R = \sqrt{(3k)} \Rightarrow q = \begin{cases} 5.2; k = 9 \\ 6; k = 12 \end{cases}$$

Substituindo esses valores na expressão, obtém-se:

- $C/I = 84.5$ (=) 19.25 dB, para $k = 9$;
- $C/I = 179.32$ (=) 22.54 dB, para $k = 12$.

Estes padrões de reutilização são utilizados quando o tráfego é intenso.

6.6 Sumário e conclusões

Neste Capítulo foram introduzidos e apresentados os aspectos de cobertura e planeamento celular. Abordaram-se os modelos de propagação conhecidos, o modelo de Friis modificado e o modelo SUI. Foram, também, descritos os parâmetros que

permitem calcular as atenuações para cada um dos modelos. Verificou-se, então que, para o modelo de propagação de *Friis*, devem ser consideradas as atenuações da chuva, do nevoeiro e da neve, mas focando, principalmente o tipo de ambiente de propagação. Este é igual a 2 para espaço livre e, em zonas urbanas, utiliza-se $\gamma=3$, $\gamma=3.5$ e $\gamma=4$ de modo a distinguir os vários níveis de densidade de área edificada. Para o modelo de propagação SUI verificou-se que depende do tipo de ambiente de propagação, velocidade do vento, estação do ano, densidade de tráfego, altura e largura de banda das antenas.

Finalmente, foram focados alguns aspectos do planeamento celular, de onde se destaca a reutilização de frequências.

7 Dimensionamento de ligações ponto-a-ponto a 5.4 GHz

7.1 Cálculo da desobstrução da zona de Fresnel

Para ser possível dimensionar feixes WiMAX é necessário conhecer o perfil dos terrenos e verificar se estão estabelecidas as condições para as quais a propagação entre duas antenas é considerada como sendo em espaço livre [Sale02].

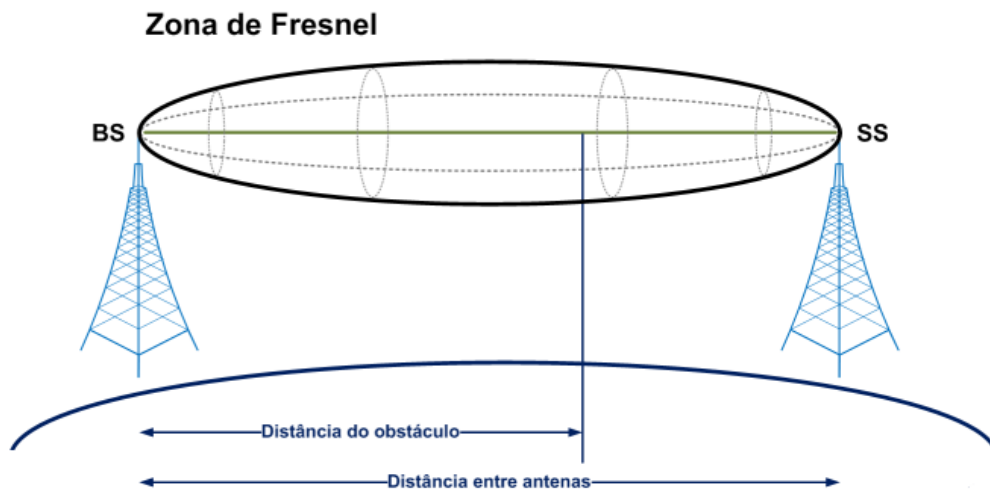


Figura 7.1 - Esquema representativo do elipsóide de Fresnel.

A qualidade da ligação poderá ser prejudicada se algum obstáculo interceptar o espaço livre delimitado pelo elipsóide. Por essa razão a existência de espaço livre deve ser verificada.

Considera-se uma ligação rádio, unidireccional, na frequência f , de comprimento de onda λ , com duas antenas pontuais, uma em E (ligada ao emissor) e outra em R (ligada ao receptor) à distancia d , de forma a que $d \gg \lambda$.

Define-se um sistema de coordenadas cilíndricas em que a origem coincide com E e cujo eixo das ordenadas \overline{OZ} passa por R .

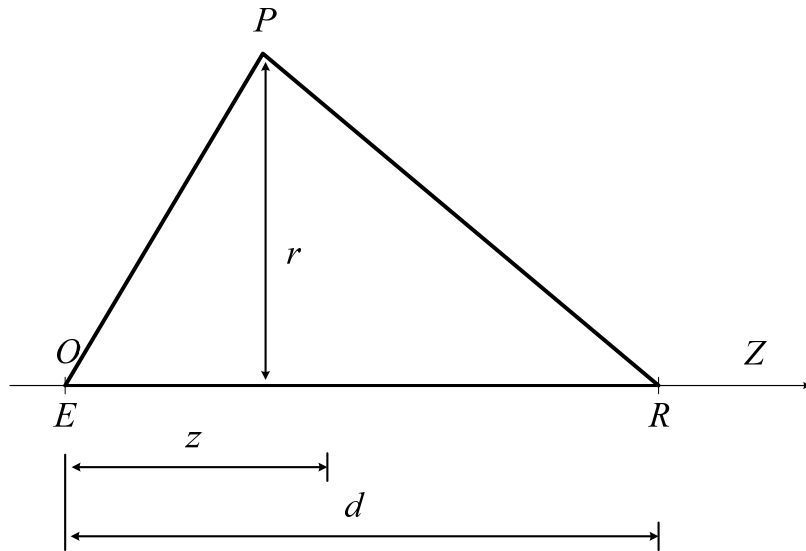


Figura 7.2 - Sistema de coordenadas para definição de elipsóide de Fresnel.

Considerando um ponto P de coordenadas r, θ, z . Por definição, o ponto P pertence ao n ésimo elipsóide de Fresnel se:

$$\overline{EP} + \overline{PR} - d = n \frac{\lambda}{2} \quad (7.1)$$

em que:

- \overline{EP} é a distância entre E e P ;
- \overline{PR} é a distância entre P e R .

Esta expressão define um elipsóide de revolução com eixo coincidente com a direcção definida pelas antenas (eixo das ordenadas) e com os focos E e R nas antenas. É possível reescrever a expressão anterior em termos de coordenadas do ponto P e da distância entre as antenas:

$$\sqrt{z^2 + r^2} + \sqrt{(d - z)^2 + r^2} - d = n \frac{\lambda}{2} \quad (7.2)$$

Admitindo que $r \ll |z|$ e que $r \ll |d - z|$, desenvolvendo em série os radicais de (7.2) e aproveitando, em cada caso, apenas os dois primeiros termos da série obtém-se a expressão que permite calcular o raio do elipsóide de Fresnel:

$$R = \pm \sqrt{n \frac{z(d-z)}{d}} \lambda \quad (7.3)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (7.4)$$

Em que:

- d – Distância, em metros, entre as antenas;
- z – Distância, em metros, entre a antena e o obstáculo;
- R – Raio da zona de Fresnel, em metros;
- λ – Comprimento de onda;
- n – enésimo elipsóide de Fresnel, neste caso considerou-se igual a 1;
- c – Velocidade da luz ($3 \cdot 10^8$ m/s);
- f – Frequência do sistema (5.4 GHz).

A modelação da Terra por uma superfície plana e reflectora perfeita só é legítima num número restrito de casos. Na generalidade, é indispensável ter em conta não só a orografia do percurso, como ainda a esfericidade da Terra. Esta última irá limitar a distância à qual, para antenas a uma altura dada, é possível conseguir a propagação em espaço livre. A distância máxima, d_m , à qual ainda se verifica a propagação em espaço livre, entre duas antenas, a alturas h_b e h_m acima da superfície da Terra de raio $r_0 = 6370$ km é dada por [Sale02]:

$$d_m = \sqrt{2 \cdot r \cdot h_b} + \sqrt{2 \cdot r \cdot h_m} \quad (7.5)$$

onde:

- h_b é a altura a que se encontra a BS, antena emissora, acima da superfície da Terra;
- h_m é a altura a que se encontra a SS, antena receptora, acima da superfície da Terra;
- r é o raio da Terra.

Para o cálculo da distância d_m deve considerar-se $r = 8500$ km. Este valor contempla o raio físico da Terra, r_0 , e a presença da atmosfera, pois na presença desta o índice de refração varia com a altitude [Sale02].

Existe um critério utilizado nos EUA que afirma que as antenas devem estar localizadas de tal forma a poderem assegurar 60% da primeira zona de Fresnel livre de qualquer obstáculo. Um elevado número de ligações projectadas de acordo com este critério levam a concluir que ele é mais do que suficiente para garantir a eficácia da ligação, sendo por vezes considerado como um critério demasiado exigente [Sale02].

7.2 Dimensionamento e instalação de uma ligação PTP pré-WiMAX

Um dos trabalhos enquadrado no âmbito do projecto MobileMAN foi o dimensionamento e instalação de ligações ponto-a-ponto, PTP, WiMAX. O objectivo deste demonstrador foi ligar a Faculdade das Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior, FCS/UBI, às tutorias do Hospital Amato Lusitano, HAL, em Castelo Branco, e do Hospital Sousa Martins, HSM, na Guarda. Esta solução é bastante vantajosa, visto que, permite várias formas de comunicação multimédia e IP, como por exemplo, vídeo-conferência, voz sobre IP, comunicação de imagem e vídeo de alta resolução com um elevado ritmo de transmissão, o que é bastante útil tanto para a prática como para o ensino da medicina.

A orografia do percurso foi a primeira tarefa para o desenvolvimento deste trabalho, para tal, foi utilizado o *Google Earth* e a informação disponibilizada pelo STIG/UBI, Serviço Transfronteiriço de Informação Geográfica da Universidade da Beira Interior. Este exercício teve por objectivo a escolha das melhores localizações para as estações e, se necessário, repetidores da ligação. Do estudo realizado conclui-se que, os melhores locais para instalação do equipamento deveriam ser os identificados na Figura 7.3.

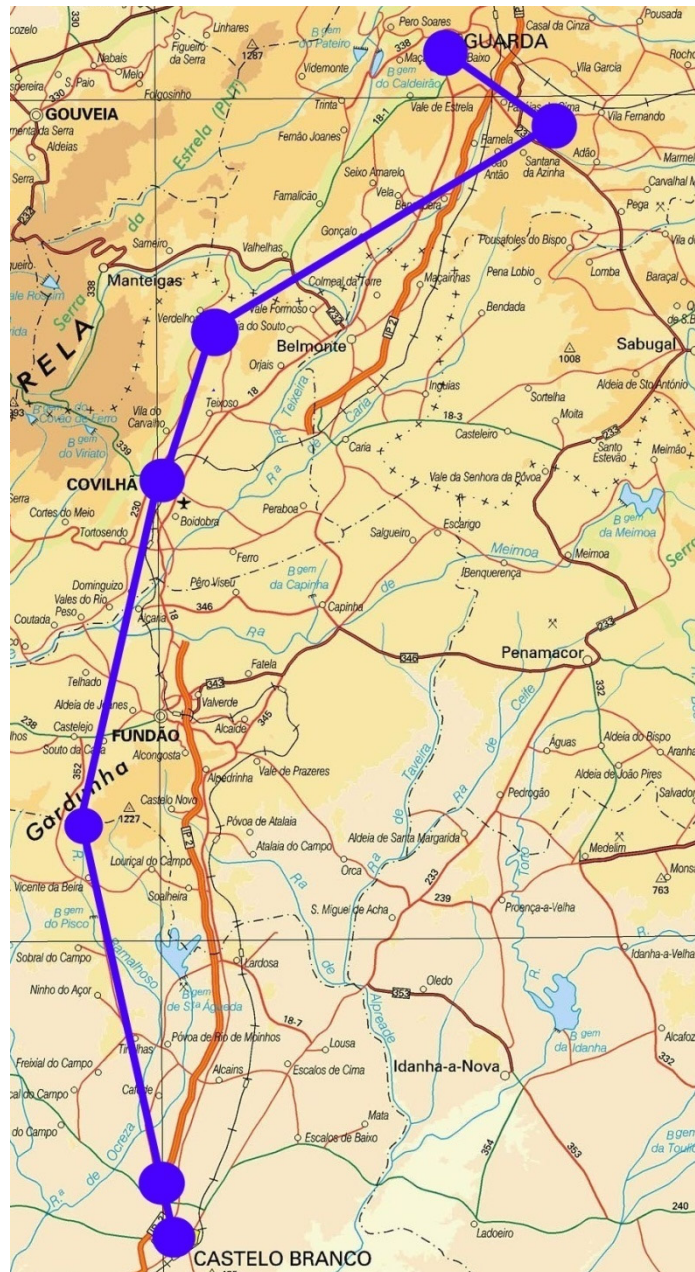


Figura 7.3 - Ligações ponto-a-ponto entre a Covilhã, Castelo Branco e Guarda.

Para a ligação da Faculdade de Ciências da Saúde à tutoria do Hospital Amato Lusitano, por se encontrarem a uma distância elevada e o perfil do terreno não o permitir, vai ser necessária a instalação de um repetidor na Serra da Gardunha e no castelo em Castelo Branco. Assim pode dizer-se que, esta ligação é constituída por três saltos, dando origem a três ligações, uma entre a Faculdade de Ciências da Saúde (Covilhã) e a Serra da Gardunha, de aproximadamente 21 km, uma segunda entre a Serra da Gardunha e o castelo em Castelo Branco, de cerca de 28 km e, por último, ente o castelo e o Hospital

Amato Lusitano, inferior a 1 km. O último salto é justificado devido ao castelo obstruir o feixe e o Hospital encontrar-se a uma altitude mais reduzida, Figura 7.4.

Ligação Serra da Gardunha - Tutoria HAL

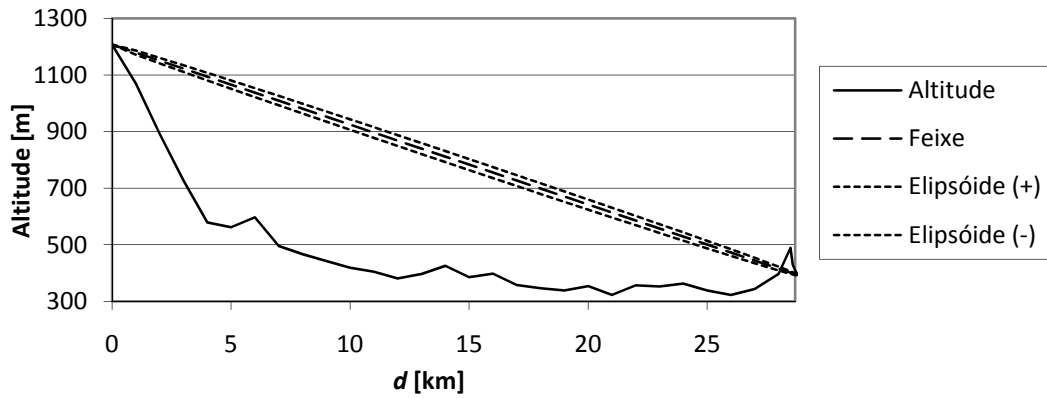


Figura 7.4 - Ligação entre a Serra da Gardunha e a tutoria do HAL.

Nas Figuras 7.5, 7.6 e 7.7 estão representados os perfis dos terrenos entre a Covilhã e a Serra da Gardunha, entre a Serra da Gardunha e Castelo Branco e entre Castelo Branco e o Hospital Amato Lusitano.

Ligação FCS - Serra da Gardunha

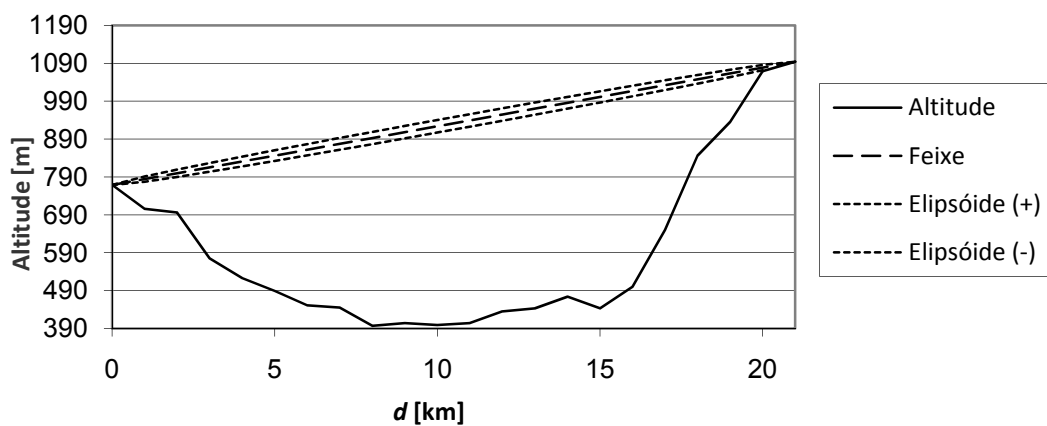


Figura 7.5 - Ligação entre a FCS e a Serra da Gardunha.

Ligação Serra da Gardunha - Castelo Branco

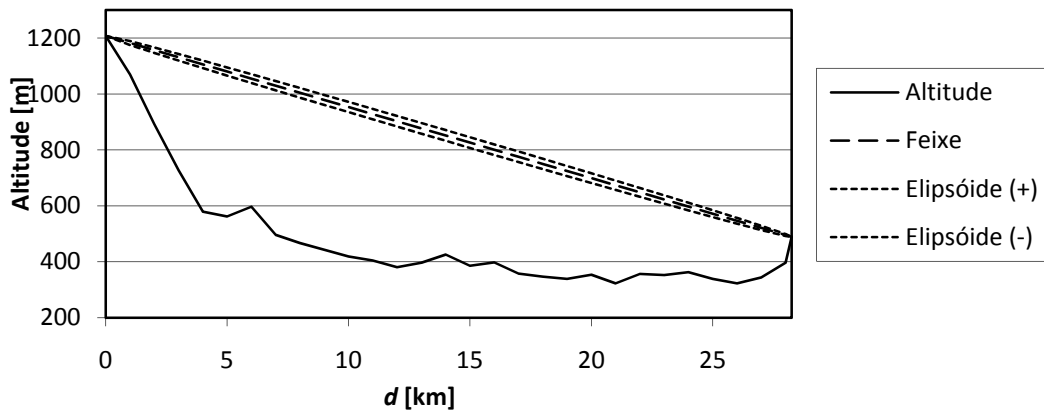


Figura 7.6 - Ligação entre a Serra da Gardunha e Castelo Branco.

Ligação Castelo Branco - Tutoria do HAL

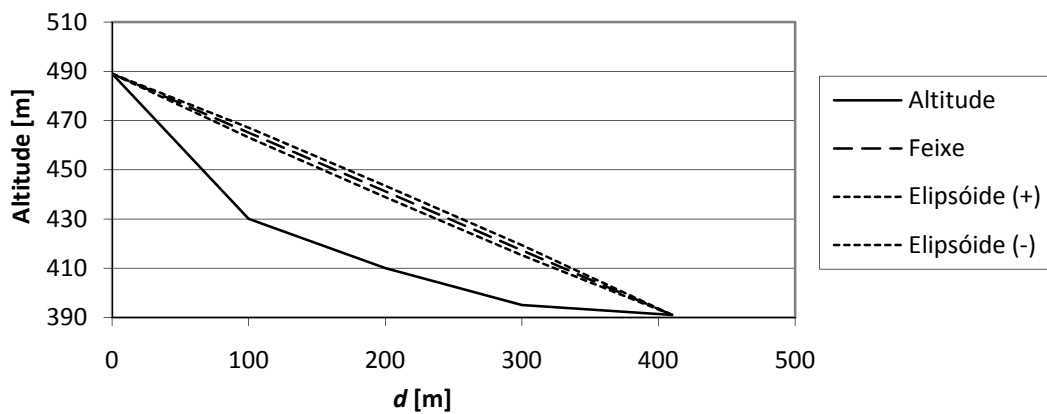


Figura 7.7 - Ligação entre a Serra da Gardunha e tutoria do Hospital Amato Lusitano.

À semelhança do caso anterior, para a ligação entre a Covilhã e o Hospital Sousa Martins, na Guarda, três saltos são necessários. Uma estação repetidora deverá estar localizada no Alto da Malhoeira e a segunda deverá estar localizada no Barracão, próximo da Guarda. A distância entre a FCS e o Alto da Malhoeira é aproximadamente de 11 km, entre o Alto da Malhoeira e Barracão é de 22 km e entre o Barracão e tutoria do Hospital Sousa Martins é de 6 km.

Nas Figuras 7.8, 7.9 e 7.10 estão representados os perfis dos terrenos entre a FCS e o Alto da Malhoeira, entre o Alto da Malhoeira e o Barracão e entre o Barracão e a tutoria do Hospital Sousa Martins.

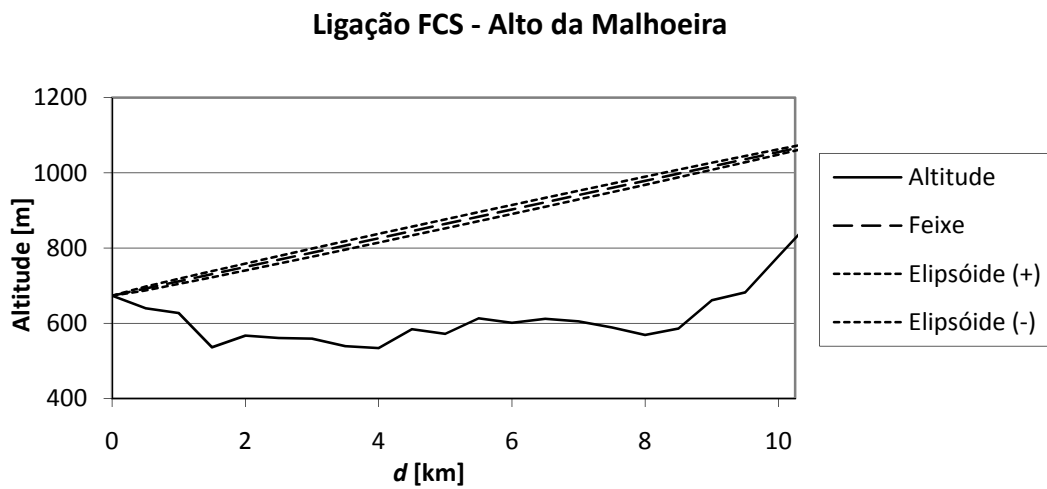


Figura 7.8 - Ligação entre a FCS e o Alto da Malhoeira.

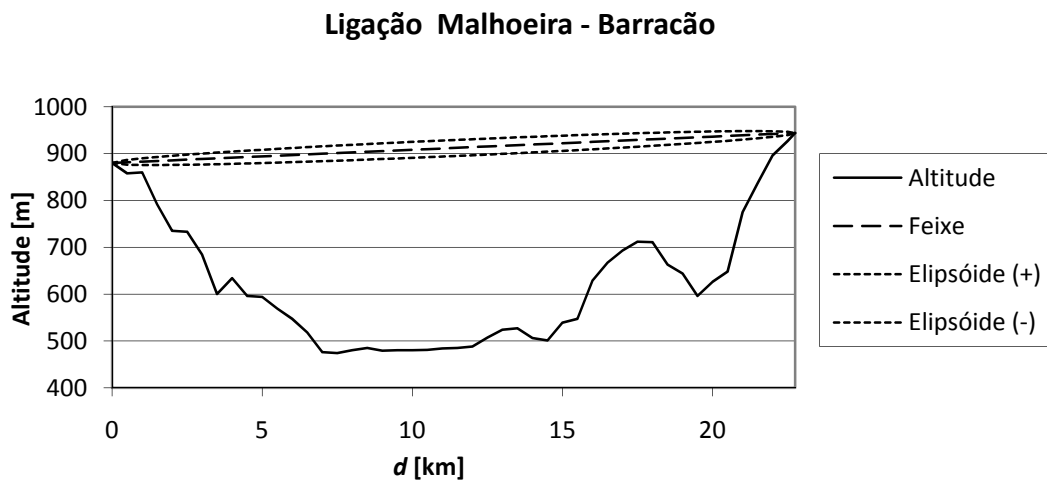


Figura 7.9 - Ligação entre o Alto da Malhoeira e o Barracão.

Ligação Barracão - Tutoria do Hospital Sousa Martins

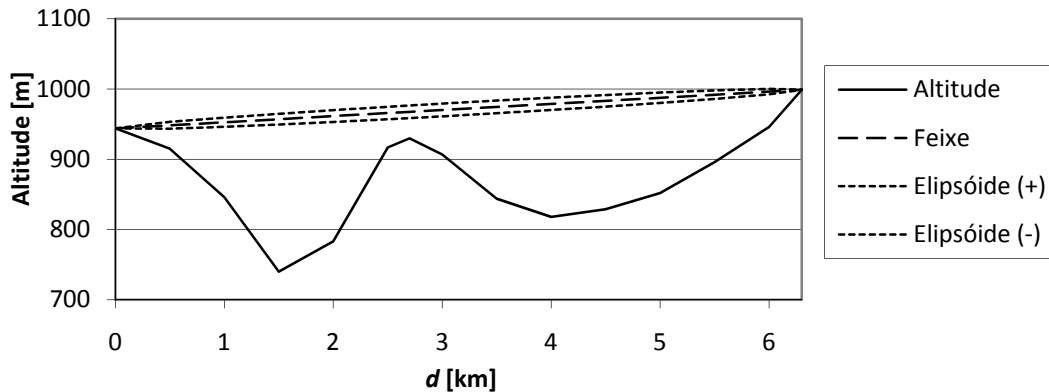


Figura 7.10 - Ligação entre Barracão e a tutoria do Hospital Sousa Martins.

Da análise dos resultados obtidos conclui-se que é possível estabelecer todas as ligações sem obstrução da zona de Fresnel.

Da aplicação da equação (7.5) verifica-se que, para a distância máxima considerada, 26 km, as antenas devem estar colocadas a uma altura mínima de 8 m para garantir que não existe qualquer obstrução no elipsóide de Fresnel provocada pela curvatura da terra e pela refração provocada pela atmosfera.

7.3 Dimensionamento dos feixes WiMAX

O dimensionamento de feixes WiMAX implica o cálculo da atenuação, da potência de recepção e da relação portadora-ruído. Uma vez que se conhecem as características do equipamento com o qual foram realizados os testes de campo, Alvarion BreezeNET B, os parâmetros a considerar, para o dimensionamento, são os apresentados pelo fornecedor [Alva06]:

- Distância: d varia entre 1 e 26 km;
- Potência máxima: $P_e = -9$ dBW;
- Ganho de emissão: $G_e = 28$ dBi;
- Ganho de recepção: $G_r = 28$ dBi;
- Comprimento de onda: $\lambda = 0.0555$ m;
- Frequência: $f = 5.4$ GHz;
- Largura de banda: $b_{rf} = 20$ MHz.

7.3.1 Cálculo da atenuação segundo a fórmula de Friis

Para o cálculo da atenuação, segundo a fórmula de Friis, vários parâmetros devem ser definidos. O valor do expoente de propagação, γ , é 2 pois considera-se que a propagação realiza-se em espaço livre. A atenuação específica da chuva, γ_{chuva} , é dada por $\gamma_{chuva} = kR_i^\alpha$, onde k e α são funções da frequência, da temperatura, da forma das gotas e da distribuição estatística das suas dimensões, R_i é a intensidade de precipitação, expressa em milímetros por hora. Uma vez que o equipamento utilizado tem polarização vertical o valor de para k e α será na realidade o k_V e α_V , assim os valores de k e α são obtidos por interpolação através da Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Valores de k e α para as polarizações horizontais e verticais em função da frequência (recomendações P.838 da ITU-R) [Sale02].

Frequência (GHz)	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312

Assim os valores obtidos são:

- $k = 0.00145$;
- $\alpha = 1.25$.

Sendo a chuva um fenómeno localizado, o seu efeito depende não só das características da chuva num determinado ponto, mas também da sua distribuição espacial. Para esse efeito a chuva pode ser classificada em 4 tipos (do Anexo I do Relatório 563-4 da CCIR). Neste caso apenas irá ser considerado o primeiro tipo, por melhor corresponder às condições da região estudada:

- Chuva estratificada: vastas regiões com baixa intensidade de precipitações contendo no seu interior zonas de precipitação mais intensa, até 25 mm/h; a precipitação é estratificada horizontalmente.

Assim, calcula-se que o valor da atenuação da chuva é igual a 0.0623dB/km. Para o cálculo da atenuação devida ao nevoeiro, $\gamma_{nevoeiro}$, considera-se, para frequências inferiores a 100 GHz, que não excede a atenuação devida à chuva fraca (1 mm/h), logo

$\gamma_{nevoeiro} = 0.01$ dB/km. Este valor pode ser desprezado por ser inferior à atenuação específica da chuva. A atenuação específica da neve, γ_{neve} , é considerada desprezável para frequências inferiores a 30 GHz.

Da aplicação de (6.2) obtiveram-se os valores apresentados na Figura 7.11.

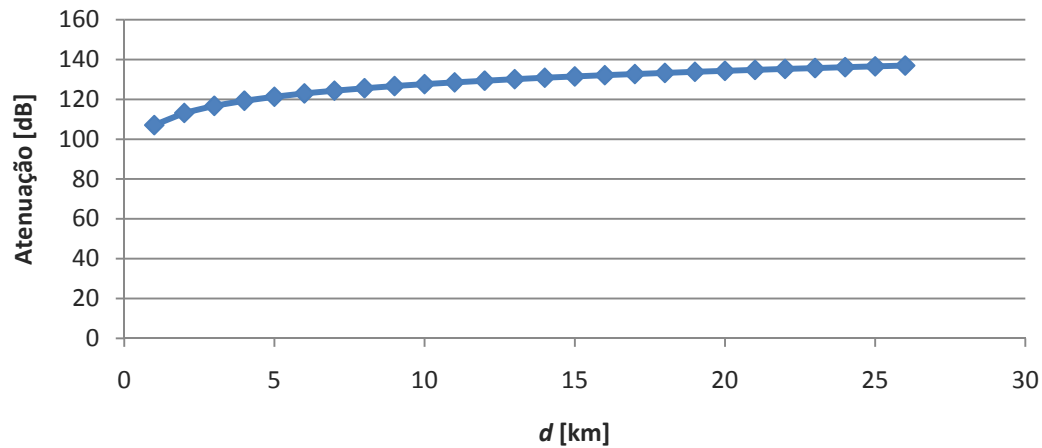


Figura 7.11 - Atenuação em função da distância segundo a fórmula de Friis

7.3.2 Cálculo da potência recebida segundo a fórmula de Friis

Da aplicação de (6.12) obtiveram-se os valores apresentados na Figura 7.12.

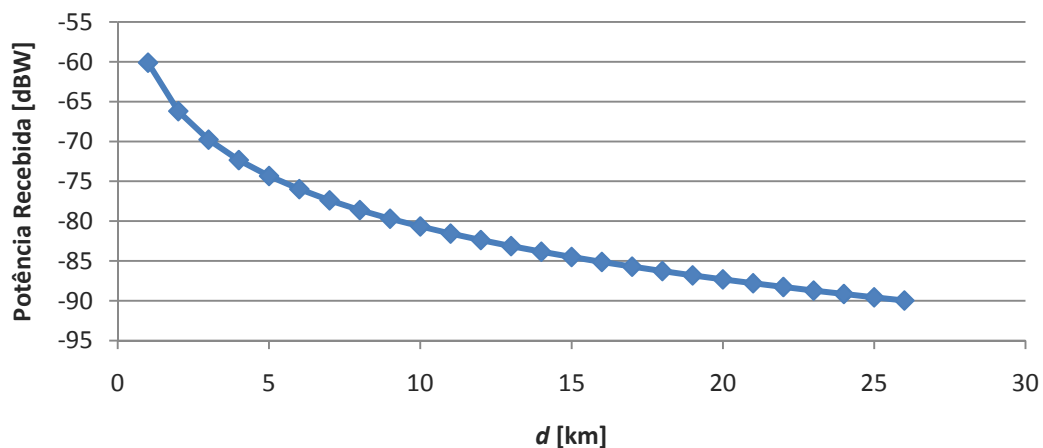


Figura 7.12 – Potência recebida em função da distância segundo a fórmula de Friis

7.3.3 Cálculo da relação portadora–ruído segundo a fórmula de Friis

Da aplicação de (6.16) obtiveram-se os valores apresentados na Figura 7.13.

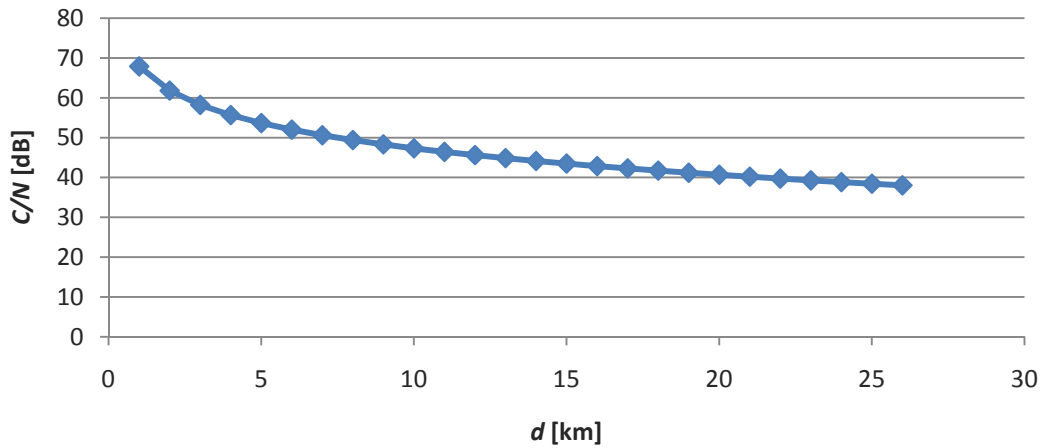


Figura 7.13 – Relação Portadora-ruído em função da distância segundo a fórmula de Friis

7.4 Teste com o equipamento BreezeNET B14

De forma a validar os cálculos, anteriormente, realizados considerou-se necessário elaborar um trabalho de campo, no qual se utilizou equipamento da Alvarion, BreezeNET B14, cujo débito binário máximo é 14 Mbps, cedido para esse efeito. As características do equipamento são as seguintes:

- Potência máxima: $P_e = -9$ dBW;
- Ganho de emissão: $G_e = 21$ dBi;
- Ganho de recepção: $G_r = 21$ dBi;
- Comprimento de onda: $\lambda = 0.0555$ m;
- Frequência: $f = 5.4$ GHz;
- Largura de banda: $b_{rf} = 20$ MHz.

Testou-se a ligação entre a FCS e a Serra da Gardunha, entre estes locais foram registadas diversas medições em cinco pontos:

- Souto Alto – 488 m de altitude, a 6 km da FCS;
- Parque de Campismo do Fundão – 550 m de altitude, a 15 km da FCS;
- Casa do Guarda (Serra da Gardunha) – 912 m de altitude, a 17 km da FCS;

- Posto de Vigia (Serra da Gardunha) – 1 130 m de altitude a 18 km da FCS;
- Estação de feixes hertzianos da Portugal Telecom (Serra da Gardunha) – 1 212 m de altitude, a 21 km da FCS.

A estação base ou unidade base, BU, *Base Unit* (nomenclatura utilizada pelo fabricante), foi instalada na FCS. A estação subscritora, ponte remota, RB, *Remote Bridge*, foi levada para os diversos locais de testes.

Num computador, ligado a BU, foi instalado um servidor FTP, *File Transfer Protocol* e foram criadas duas pastas, uma continha um ficheiro com 40MB e a outra continha 100 ficheiros de aproximadamente 350 kB. O computador utilizado como cliente, ligado à RB, teve a tarefa de transferir as duas pastas, anteriormente referidas. Foram obtidos valores para o ritmo de transmissão, relação sinal-ruído, ordem de modulação e tempo total de transmissão, apresentados na Tabela 7.2.

Distância à FCS	Tabela 7.2 – Resultados dos testes				Tempo 40MB
	Transferência [kbps]		Site Survey		
	40MB	100 Ficheiros	SNR [dB]	Modulação	
5 890 m (Souto Alto)	9 784	7 128	24	64 QAM – 3/4	46 s
14 860 m (Parque de Camp. Fundão)	9 448	7 144	15	16 QAM – 3/4	47 s
17 563 m (Casa do Guarda)	7 584	6 472	15	16 QAM – 3/4	49 s
17 922 m (Posto de Vigia)	9 407	7 120	17	16 QAM – 3/4	47 s
20 939 m (Antenas PT)	7 016	6 808	15	16 QAM – 3/4	49 s

Foi calculada a relação portadora-ruído segundo a fórmula de Friis, utilizando as características deste equipamento. Este resultado foi comparado com o obtido durante os testes, Tabela 7.3 e Figura 7.14.

Tabela 7.3 – SNR medido vs C/N calculado.			
Local testado	Distância [km]	SNR [dB]	C/N [dB]
		Medido	Calculado
Souto Alto	6	24	26,00
Parque de Campismo Fundão	15	15	17,49
Casa do Guarda	17	15	16,86
Posto de Vigia	18	17	15,71
Antenas PT	21	15	14,21

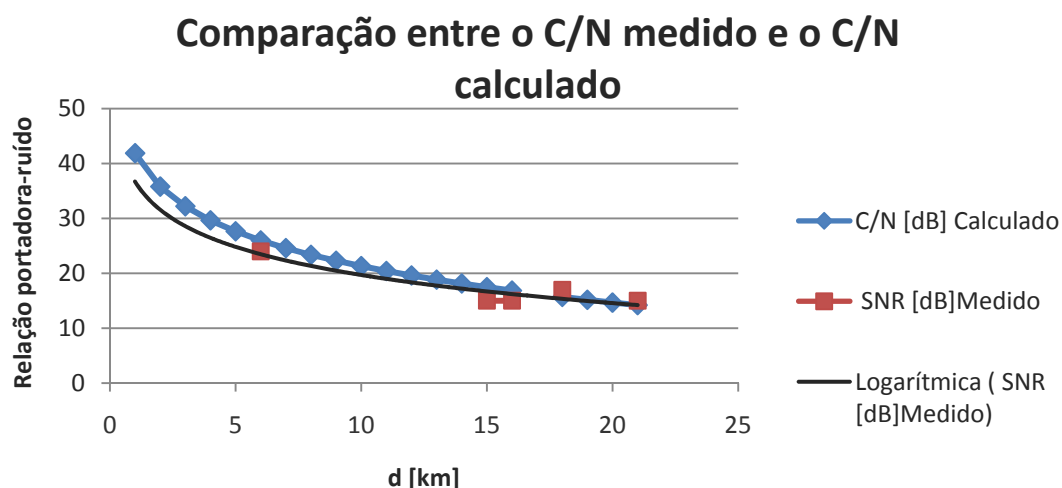


Figura 7.14 – SNR medido vs C/N calculado.

Em relação ao débito binário, para a directoria de 40 MB, o valor médio medido alcançou os 8.65 Mbps, no caso da directoria que continha os 100 ficheiros, esse valor foi de 5.65 Mbps.

7.5 Instalação da ligação FCS – HSM com equipamento BreezeNET

Os resultados obtidos durante o teste levaram a instalação da ligação entre a FCS e a tutoria do Hospital Amato Lusitano em Castelo Branco, Figura 7.15 e 7.16, o equipamento instalado é o BreezeNET B100, cujo valor máximo do débito binário, 108 Mbps, é mais elevado do que no equipamento utilizado no teste.



Figura 7.15 – Salto Gardunha – Castelo – HAL.



Figura 7.16 – Instalação na estação repetidora da Serra da Gardunha.

7.5.1 Optimização da ligação FCS - HAL

Um passo importante após a instalação de qualquer rede passa pela optimização da mesma. Recorrendo a diversos parâmetros de configuração do *software* do equipamento, o BreezeCONFIG,   possível optimizar as ligações PTP. A optimização de uma rede depende da utilização que se lhe deseja dar, como por exemplo, suporte de aplicações em tempo real, suporte de elevadas taxas de transferência, etc. Uma vez que seria impossível descrever o processo de configuração de todas, nesta secção apenas alguns parâmetros para optimização do débito binário são sugeridos:

- No menu “Air Interface Country Parameters Tab”, na opção “Select Sub Band Index”, ao seleccionar uma largura de banda de 40 MHz (se disponível), o modo “Turbo Mode” fica activo. Este permite obter um débito binário superior, podendo assim atingir o valor de 108 Mbps anunciado pelo fabricante. Em contrapartida o número de canais disponíveis passará para metade.
- No menu “Performance Parameters”, a opção “Maximum Modulation Level” permite limitar a ordem máxima de modulação, este valor deverá estar definido no máximo. O parâmetro “Minimum Interval Between Adaptive Modulation Messages”, permite adaptar, em função do *SNR*, a ordem de modulação, assim, quanto menor for esse valor menor será o tempo que o sistema necessitará para alternar a ordem de modulação, para o nível mais adequado ao valor no *SNR*, podendo dessa forma optimizar o débito binário.
- No menu “Service Parameters General Tab”, encontra-se um sub-menu denominado MIR, *Maximum Information Rate*, que define o débito binário máximo permitido. Este valor pode ser definido para a ligação ascendente e descendente e difere para cada equipamento, por exemplo, no BreezeNET B14, varia de 128 a 6912 kbps no BreezeNET B100, varia de 128 a 107.904 kbps. É recomendado que estes campos estejam definidos com o valor máximo aplicável ao equipamento, no caso de ainda não o estarem.

7.6 Sumário e conclusões

Neste Capítulo fez-se uma avaliação da desobstrução do elipsóide de Fresnel para se poder avaliar a viabilidade da ligação pretendida para o percurso em questão. No dimensionamento utilizou-se a fórmula de Friis para calcular a atenuação, L , a potência recebida, P_r , e a relação portadora-ruído, C/N . Verificando-se, como esperado, que a atenuação aumenta com a distância enquanto que a potência recebida e a relação portadora-ruído diminuem com o aumento da distância.

Na Figura 7.14 os resultados obtidos, durante o teste com equipamento BreezeNET B14, apresentam uma diferença mínima relativamente à curva teórica. Os bons resultados obtidos, durante o teste, levaram a instalação de equipamento BreezeNET B100, na ligação FCS/tutória HAL.

Foram finalmente apresentados alguns parâmetros de configuração do equipamento a fim de otimizar o débito binário da ligação.

8 Planeamento celular a 3.5 GHz

A relação portadora-ruído que, corresponde à razão entre a potência da portadora e a potência do ruído, é um indicador importante da qualidade de uma transmissão. Por essa razão, o primeiro passo do processo de dimensionamento celular consiste no cálculo dessa relação segundo a fórmula de *Friis* modificada e do modelo de SUI.

8.1 Modelo de propagação de *Friis*

8.1.1 Atenuação

Este modelo de propagação baseia-se na fórmula de *Friis* modificada, considerando um expoente de propagação, γ , variável, que pode ser diferente de $\gamma = 2$. Os expoentes de propagação variam de acordo com o tipo de ambiente de propagação, sendo $\gamma = 2$ para o espaço livre, $\gamma = 3$ para áreas urbanas sem sombras e $\gamma = 4$ para áreas urbanas com sombras.

Para o cálculo da atenuação os valores dos parâmetros são os seguintes:

- $\gamma = 2$ para o espaço livre;
- $\gamma = 3$ para áreas edificadas de densidade média;
- $\gamma = 4$ para áreas edificadas de densidade elevada;
- $\gamma_{chuva} = 0.0811$ dB/km;
- $\gamma_{nevoeiro} = 0.01$ dB/km (este valor pode ser desprezado por ser muito inferior a γ_{chuva});
- γ_{neve} é geralmente desprezável para frequências inferiores a 30 GHz;
- $f = 3.5$ GHz.

Da aplicação da expressão (6.2) obtiveram-se os resultados para a atenuação, segundo o modelo de propagação de *Friis*, para os três valores do expoente de propagação, em função do raio de cobertura da célula, Figura 8.1.

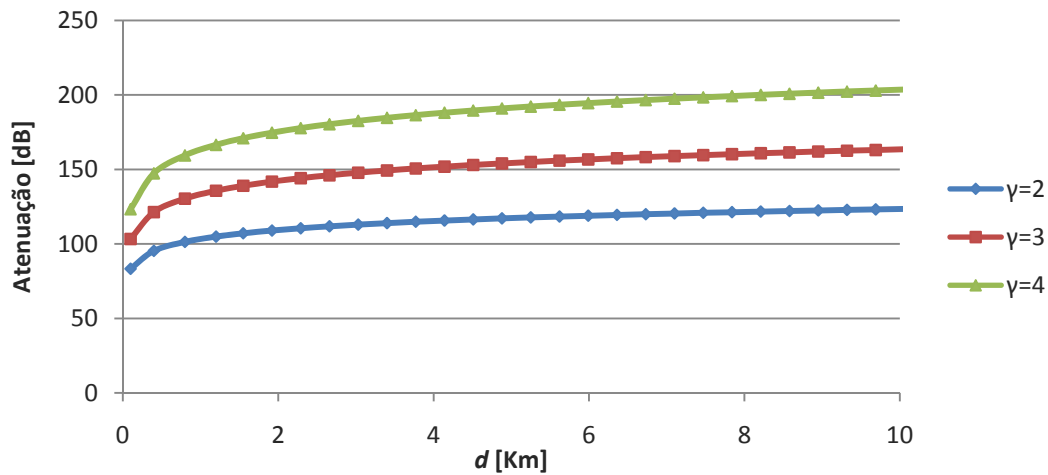


Figura 8.1 - Atenuação segundo o modelo de propagação de Friis.

8.1.2 Potência recebida

Para o cálculo da potência recebida, P_R , é utilizada a fórmula (6.15), é ainda necessário ter em consideração as especificações do equipamento a ser instalado. Neste exercício será considerado o Alvarion BreezeMAX 3000, que apenas suporta a norma IEEE 802.16-2004, que será posteriormente utilizado num teste de campo. As especificações fornecidas pelo fabricante são as seguintes:

- $P_E = -2$ dBW, potência máxima;
- $G_E = 10$ dBi, ganho de emissão;
- $G_R = 9$ dBi, ganho de recepção.

A Figura 8.2 apresenta os resultados obtidos para o cálculo da potência recebida.

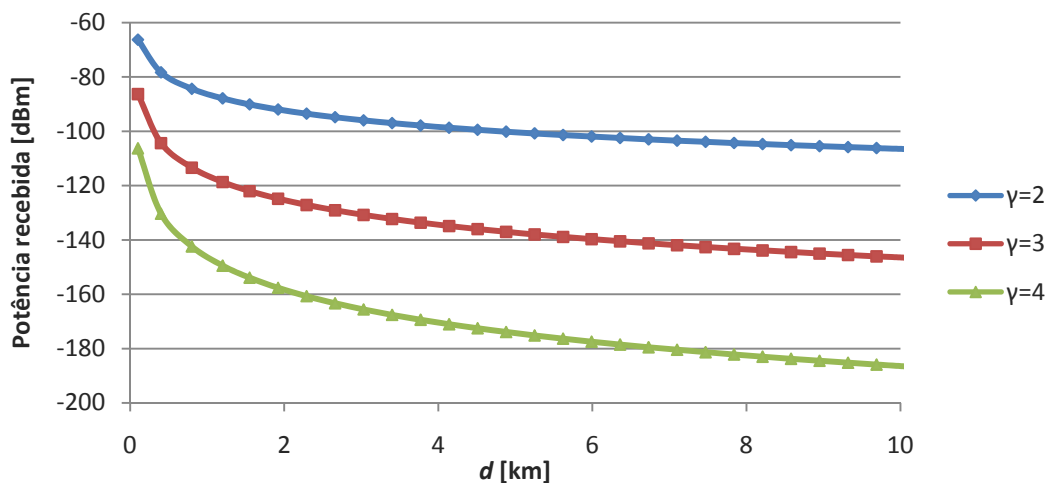


Figura 8.2 – Potência recebida segundo o modelo de propagação de Friis.

8.1.3 Relação portadora-ruído

A relação portadora-ruído, C/N , é dada por (6.16), já se conhece o valor da largura de banda que será configurada no equipamento, este é 3.5 MHz. A Figura 8.3 mostra os resultados obtidos no cálculo da relação C/N .

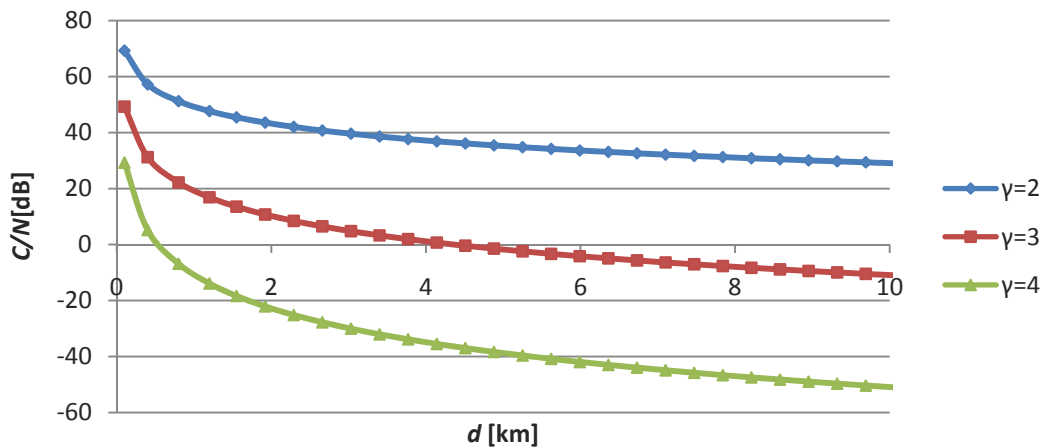


Figura 8.3 – Relação portadora-ruído segundo o modelo de propagação de *Friis*.

8.2 Modelo de propagação de SUI

Ao contrário do dimensionamento PTP, neste caso, também será utilizado o modelo de SUI para realizar o planeamento PMP, uma vez que este é considerado adequado para distâncias menores.

8.2.1 Atenuação

Neste modelo e segundo a fórmula (6.3) e respectivos factores de correcção (6.6), (6.7) e (6.8), devem ainda ser definidos os seguintes parâmetros:

- Factor de atenuação, $s = 8.8$;
- Altura da antena emissora, $h_b = 13.3^1$ m;
- Altura da antena receptora, $h_m = 2$ m.

Assim, os resultados obtidos para a atenuação são apresentados na Figura 8.4.

¹ Altura do pólo da FCS, onde foi instalado o equipamento durante a fase de testes de cobertura.

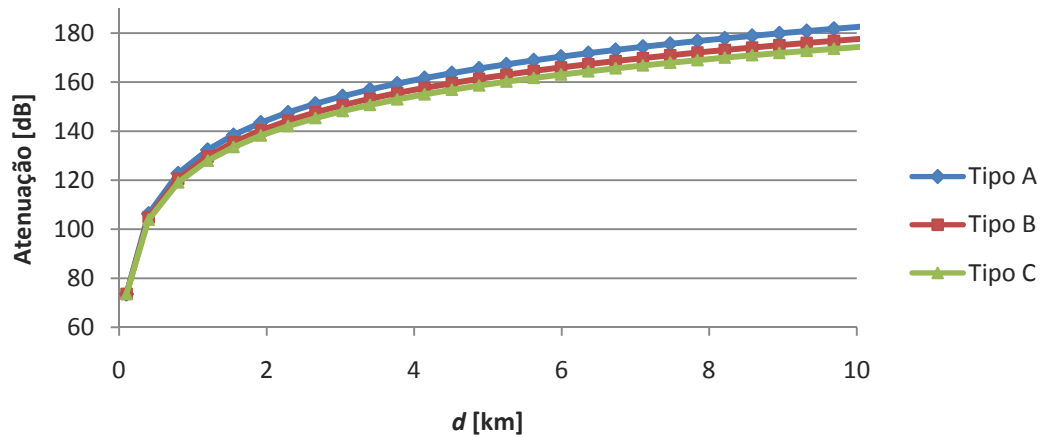


Figura 8.4 - Atenuação segundo o modelo de propagação de SUI.

8.2.2 Potência recebida

Para o cálculo da potência recebida é novamente utilizada a fórmula (6.15), as características do equipamento também são utilizadas neste cálculo. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 8.5.

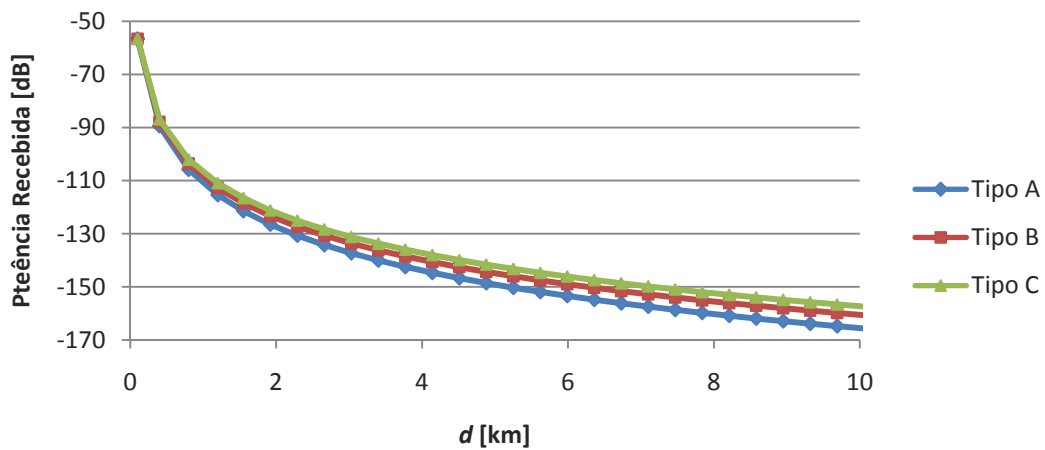


Figura 8.5 – Potência recebida segundo o modelo de propagação de SUI.

8.2.3 Relação portadora-ruído

A relação portadora-ruído é dada por (6.16), são consideradas as características do equipamento apresentadas anteriormente, e mantem-se a largura de banda, anteriormente definida. A Figura 8.6 ilustra os resultados obtidos.

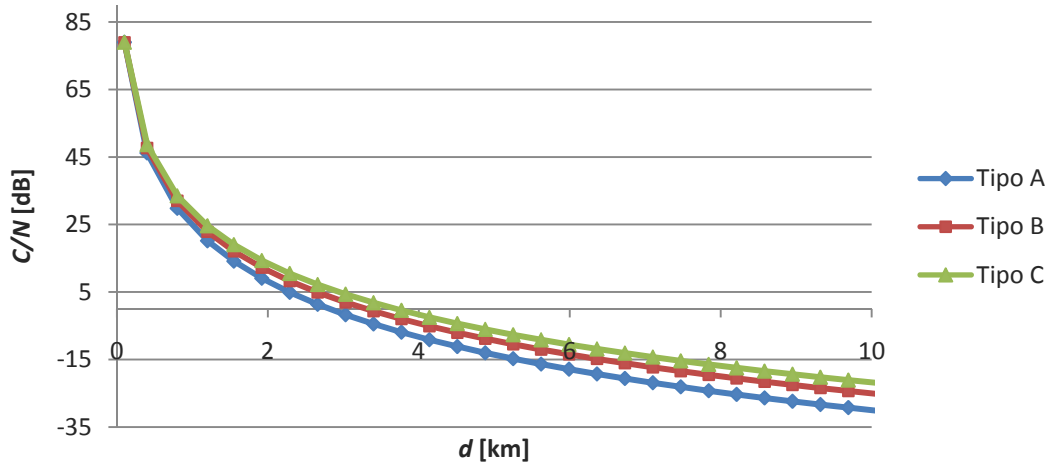


Figura 8.6 – Relação portadora-ruído segundo o modelo de propagação de SUI.

Da análise da Figura 8.7 é possível observar que o modelo de SUI é inicialmente mais otimista para um raio de cobertura inferior a 1.5 km. Após esta distância o modelo de *Friis*, para valores de γ igual a 2 e 3, apresenta valores superiores para a relação portadora-ruído

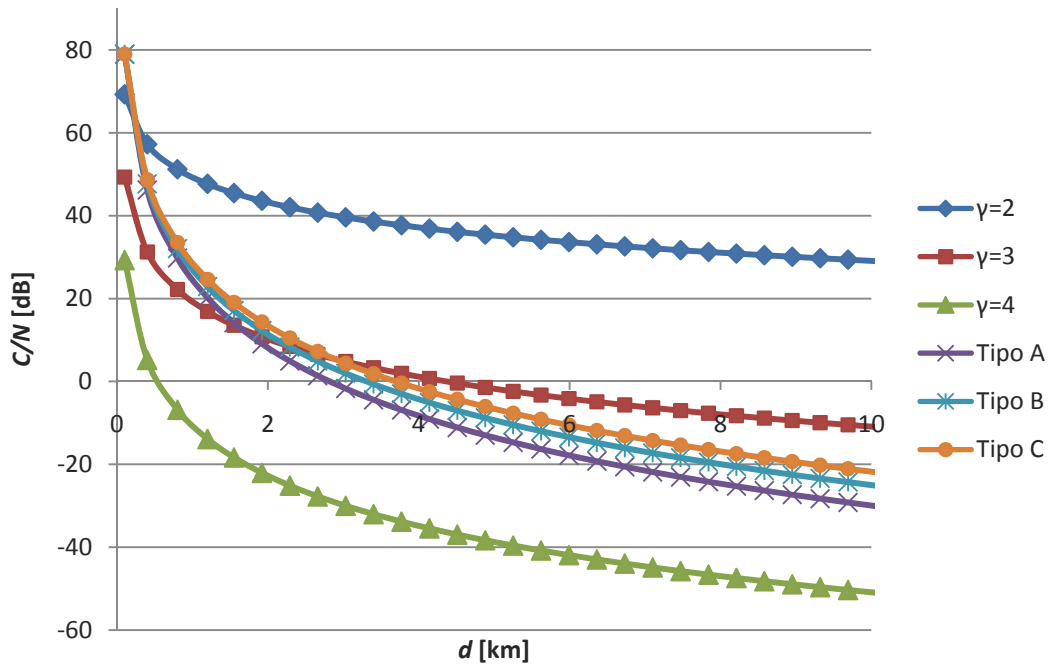


Figura 8.7 – Relação C/N segundo o modelo de propagação de *Friis* vs SUI.

Recorrendo às características fornecidas pelo fabricante, Tabela 8.1 [Alva05], é ainda possível analisar a viabilidade do planeamento celular em função da distância e do valor da relação sinal ruído, SNR , mínimo para uma dada modulação. Na Tabela 8.1 é ainda

possível verificar qual será o valor da taxa de transferência esperada em função da modulação.

Tabela 8.1 – Valor da modulação em função do valor do SNR e respectiva taxa de transferência esperada.

Modulação	SNR mínimo [dB]	Taxa de transferência [Mbps]
BPSK 1/2	3.3	1.41
BPSK 3/4	5.5	2.12
QPSK 1/2	6.5	2.82
QPSK 3/4	8.9	4.23
16-QAM 1/2	12.2	5.64
16-QAM 3/4	15	8.47
64-QAM 2/3	19.8	11.29
64-QAM 3/4	21	12.71

A Figura 8.8 apresenta a relação portadora-ruído, segundo o modelo de Friis, em função da distância, assim como, o seu valor mínimo permitindo para várias modulações.

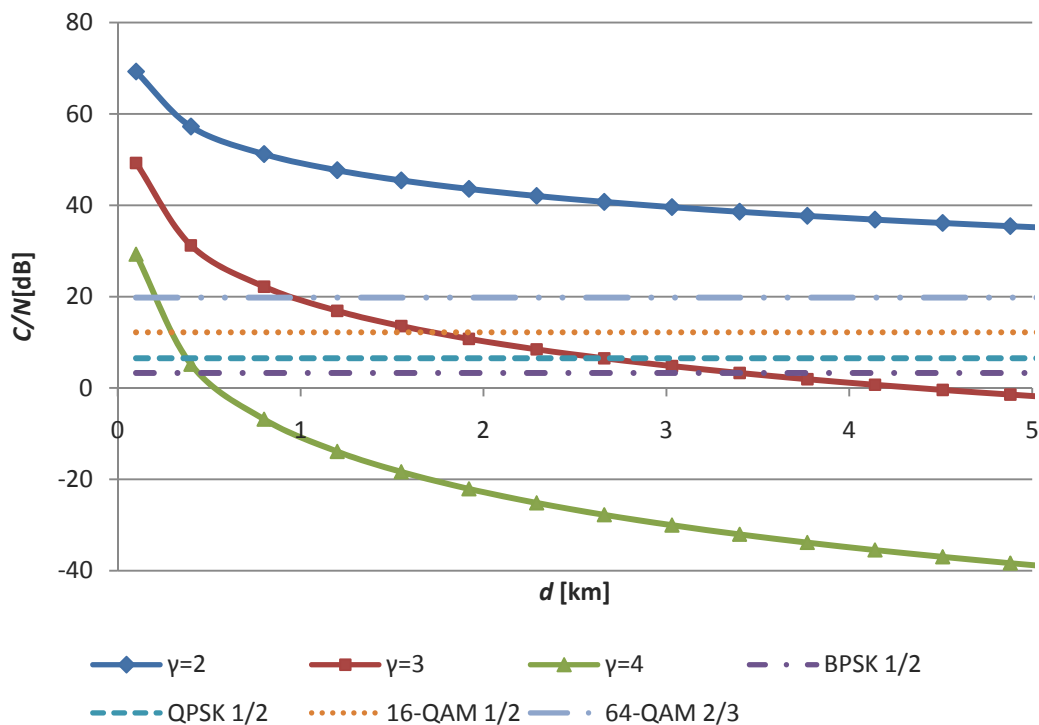


Figura 8.8 – Relação C/N segundo o modelo de propagação de Friis e valor mínimo para cada modulação.

A Figura 8.9 apresenta a relação portadora-ruído, segundo o modelo de SUI, em função da distância, assim como, o seu valor mínimo para várias modulações.

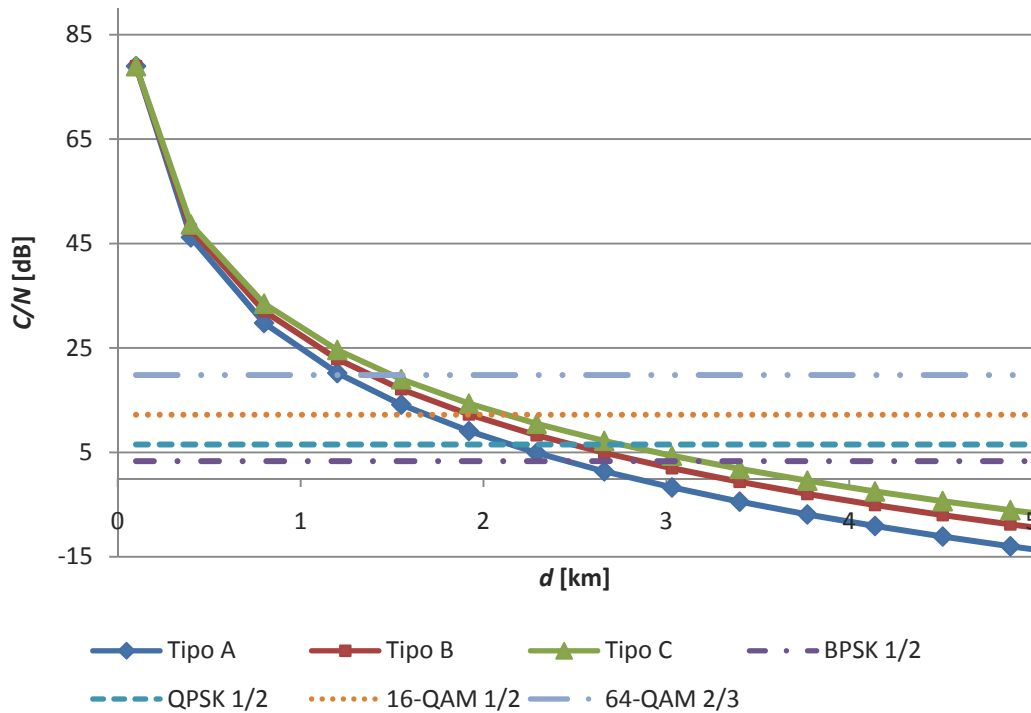


Figura 8.9 – Relação C/N segundo o modelo de propagação de SUI e valor mínimo para cada modulação.

Através da análise das Figuras 8.8 e 8.9, pode verificar-se que o modelo SUI em relação ao modelo de *Friis* modificado é mais pessimista, na medida em que apenas permite cobertura para distâncias inferiores a 1.5 km, utilizando a modulação 64-QAM 2/3. É possível observar que, para este modelo, o raio máximo de cobertura que se consegue obter é de aproximadamente 3 km para a modulação BPSK 1/2.

Para o modelo de *Friis* modificado, a questão da cobertura está completamente resolvida para $\gamma = 2$, ou seja, para os casos onde existe linha de vista. Para $\gamma = 3$ apenas pode garantir-se cobertura para distâncias inferiores a 1 km. Para $\gamma = 4$ a cobertura apenas para distâncias na ordem da dezena de metros.

8.3 Relação portadora-interferência

A relação portadora-interferência varia de acordo com o padrão de reutilização. Através de (6.34), pode calcular-se C/I para vários factores de reutilização e para os diferentes expoentes de propagação do modelo de *Friis*, Tabela 8.2. Considerando o número de células interferentes igual a 6 obtém-se a Figura 8.10.

Tabela 8.2 – Expoentes de propagação do modelo de *Friis* em função do padrão de reutilização.

k	γ		
	2	3	4
3	0.72	4.494	8.027
4	2.244	6.898	11.356
7	5.014	11.205	17.273
9	6.202	13.034	19.767

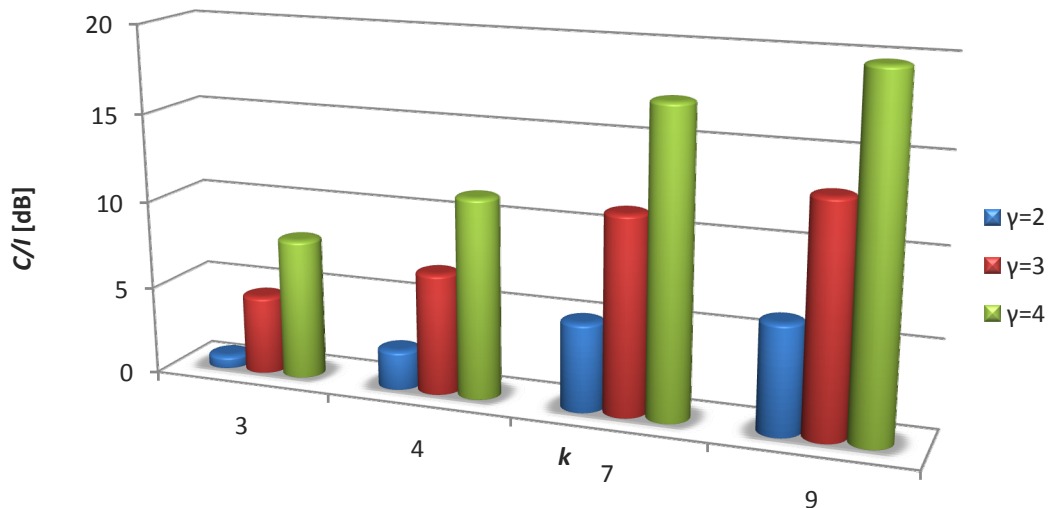


Figura 8.10 – Variação do C/I com o padrão de reutilização para os diferentes valores de γ de acordo com o modelo de propagação de *Friis*.

Da análise da Figura 10 é possível verificar-se que a relação C/I aumenta proporcionalmente com o valor de γ e do padrão de reutilização de frequências, k , ou seja, o valor da interferência diminui com o aumento do k e do γ .

8.4 Teste de cobertura

No planeamento da célula WiMAX PMP considerou-se o equipamento BreezeMAX 3000 da Alvarion, adquirido no âmbito do projecto MobileMAN. O equipamento opera em modo FDD, *Frequency Division Duplex*, na frequência de 3.5 GHz. Após a atribuição de uma licença temporária pela ANACOM, Autoridade Nacional de Comunicações, na gama de frequências 3443-3467.5/3543-3567.5 MHz, foram realizados testes com a ODU, *Outdoor Data Unit*, a operar a 3551.75 MHz, na ligação descendente, e a 3451.75 MHz, na ligação ascendente, com uma potência de emissão 28 dBm. O equipamento utilizado para a realização dos testes foi o seguinte:

- O equipamento BreezeMAX 3000 da Alvarion, constituído por uma μ BS, uma ODU e uma CPE (*Customer Premise Equipment*);
- Uma antena omnidireccional com ganho de 10 dBi;
- Dois computadores portáteis, um para operar como backhaul e servidor FTP, *File Transfer Protocol*, o segundo ligado à CPE com um cliente FTP;
- Um inversor 12V – 220V, de forma a alimentar a CPE e o computador portátil a ela ligada;
- Um GPS ,Global Positioning System;
- Cabos UTP, Unshielded Twisted Pair, cruzados;
- Um veículo para transportar a CPE.

8.4.1 Aplicação computacional para aquisição de dados

Para monitorizar a qualidade de ligação e cobertura da célula WiMAX foi desenvolvida uma ferramenta de aquisição de coordenadas GPS e qualidade de ligação da CPE. Esta aplicação computacional permite, de forma automática, monitorizar e armazenar estes valores. Esta ferramenta foi desenvolvida em Excel/Visual Basic, para facilitar a posterior manipulação dos dados adquiridos.

Em termos de estrutura e modo de funcionamento pode ser dividida em duas partes:

- A primeira parte consiste numa *ToolKit ActiveX* que é responsável pela aquisição das coordenadas GPS. Esta *Toolkit* pode ligar-se a qualquer dispositivo GPS, através da entrada RS-232, USB ou *Bluetooth* de um computador. Os dados importados vão desde a data/hora, posição, altitude, velocidade até dados como quantidade e localização espacial dos satélites. Para a utilização pretendida apenas são desejados os dados referentes a data/hora, posição e velocidade que serão automaticamente guardados, em colunas distintas, na *sheet2* denominada de “RawDataLog”, Figura 8.11.

		10-01-2007 15:48	40.268130 N	007.493268 W	482.1	0
		10-01-2007 15:48	40.268130 N	007.493268 W	482.1	0
		10-01-2007 15:48	40.268132 N	007.493267 W	482.1	0
		10-01-2007 15:48	40.268132 N	007.493267 W	482.1	0
		10-01-2007 15:48	40.268135 N	007.493268 W	482.1	0
		10-01-2007 15:48	40.268135 N	007.493267 W	482.1	0
		10-01-2007 15:48	40.268135 N	007.493267 W	482.1	0
		10-01-2007 15:48	40.268133 N	007.493267 W	482.1	0
		10-01-2007 15:48	40.268133 N	007.493267 W	482.1	0
		10-01-2007 15:48	40.268133 N	007.493268 W	482.1	0
		10-01-2007 15:48	40.268133 N	007.493265 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268133 N	007.493265 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268132 N	007.493265 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268132 N	007.493265 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268130 N	007.493267 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268130 N	007.493267 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268128 N	007.493265 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268128 N	007.493265 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268132 N	007.493265 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268132 N	007.493265 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268130 N	007.493265 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268130 N	007.493265 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268130 N	007.493267 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268127 N	007.493267 W	482.2	0
		10-01-2007 15:48	40.268127 N	007.493267 W	482.2	0

Figura 8.11 – Dados recebidos através do receptor GPS.

- A segunda parte consiste na aquisição dos dados provenientes da CPE: o *SNR* (dB) e *RSSI* (dBm) na ligação descendente e na ligação ascendente, o “Optimal Rx Rate”, “Last Rx Rate” e “Last Tx Power” (dBm). Estes valores são automaticamente guardados na Sheet1, denominada *CurrentData*, em duas colunas, a primeira é a coluna “L” onde são guardados os nomes das variáveis, na coluna “M” são guardados os respectivos valores. De forma a identificar as sucessivas entradas de dados, a cada aquisição é registado a respectiva data e hora, Figura 8.12.

Se a ligação com a CPE não puder ser estabelecida, ou se esta se perder durante a aquisição de dados, a ferramenta foi elaborada de tal forma que será apresentada uma mensagem de erro.

Figura 8.12 – Pré-visualização da ferramenta desenvolvida.

8.4.2 Metodologia de teste

Para a realização de testes foi criado todo um protocolo de forma a garantir que, em cada teste realizado, as variáveis externas, tal como tráfego interno e gama de IPs no *backhaul* (rede interna da UBI), seriam constantes. Assim, os resultados obtidos apenas poderiam variar em função do parâmetro rádio e da possível alteração na configuração do equipamento WiMAX.

Em primeiro lugar foi necessário criar um *backhaul* para o sistema instalado, este facto é essencialmente justificado por duas razões: a primeira é que desejamos isolar a nossa rede do sistema instalado e operacional da UBI, uma vez que esta é susceptível de estar condicionada pelo tráfego e pela utilização interna dos seus utilizadores; a segunda razão é justificada pelo facto de que, para a ferramenta conseguir aceder aos parâmetros rádio (*SNR*, *RSSI*) da CPE, o endereço IP do computador, ligado a CPE, deverá estar definido na gama da família 192.168.254.xxx, que já se encontra atribuída na rede da UBI. Assim por estas duas razões, foi ligado um computador portátil ao porto de dados da estação base através de um cabo UTP, Figura 8.13. Neste mesmo computador foi instalado um servidor FTP e um servidor DHCP, *Dynamic Host Configuration Protocol*, que permite a atribuição automática de endereços IP a todas as CPEs ligadas a estação base.

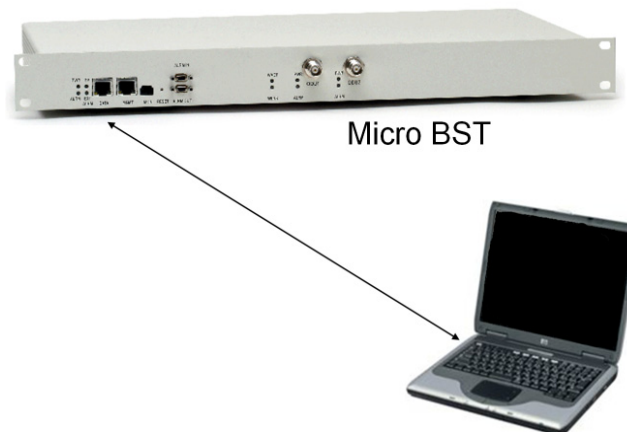


Figura 8.13 – Ligação estação base ao backhaul.

O segundo computador, a CPE e o receptor GPS foram instalados no habitáculo de um automóvel, sendo alimentados, se necessário, através de um inversor. Neste computador foi instalada a ferramenta de aquisição desenvolvida e um cliente FTP. Finalmente foi utilizada uma *pen bluetooth* de forma a ligar o computador ao receptor GPS, Figura 8.14.



Figura 8.14 – Ligação CPE, computador e receptor GPS.

Finalmente, procedeu-se à realização do teste. O automóvel percorreu as ruas circundantes às instalações da FCS. Uma vez que o equipamento WiMAX utilizado apenas suporta a norma IEEE 802.16 - 2004, tentou-se não ultrapassar a velocidade de 40 km/h, as medições realizadas acima desta velocidade foram simplesmente ignoradas durante a análise dos resultados obtidos.

8.4.3 Análise dos resultados obtidos

Durante a campanha de testes foram adquiridos dados em mais de 3500 pontos da cidade, num raio de 1.9 km. A Figura 8.15 apresenta o mapa da área de estudo assim como os valores da relação *SNR* na ligação descendente. O fundo a cinzento representa as zonas sem linha de vista a partir da μ BS. Estas zonas foram calculadas através da ferramenta ArcGIS do Departamento de Engenharia Civil da UBI. É assim possível verificar que uma quantidade considerável de medições foi registada em locais desprovidos de linha de vista.

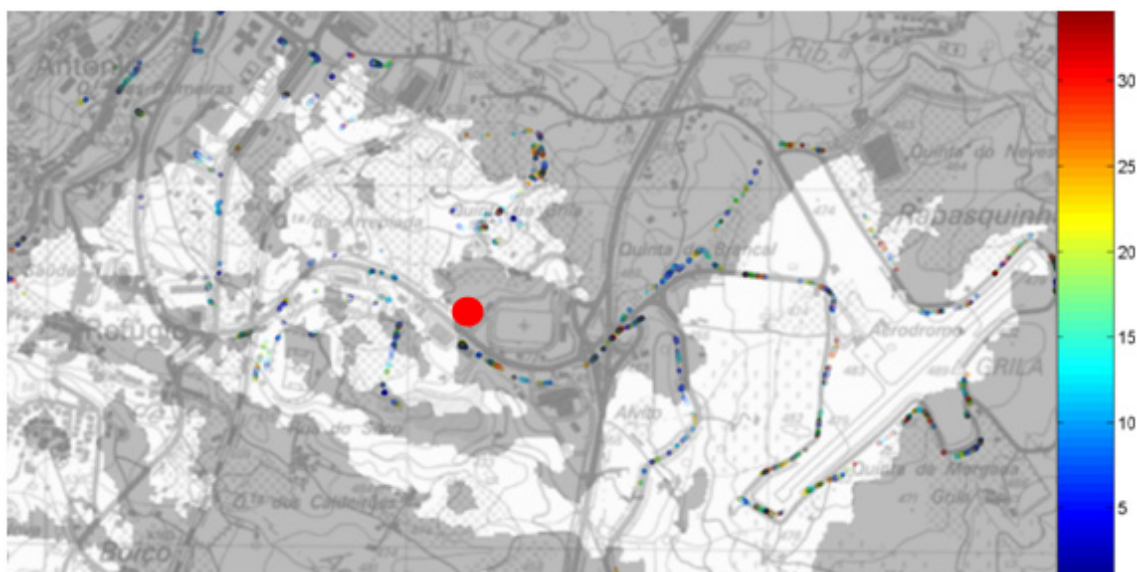


Figura 8.15 – Valores do *SNR* na ligação descendente.

Foram também registados os níveis de modulação, Figura 8.16. Foi possível verificar que em 84 % dos casos o nível utilizado foi o QAM16 3/4, a modulação BPSK 1/2 em 10% dos casos, seguida pela QAM16 2/3 em 4%. A modulação menos utilizada foi QAM64 3/4 em apenas 2% dos casos medidos.

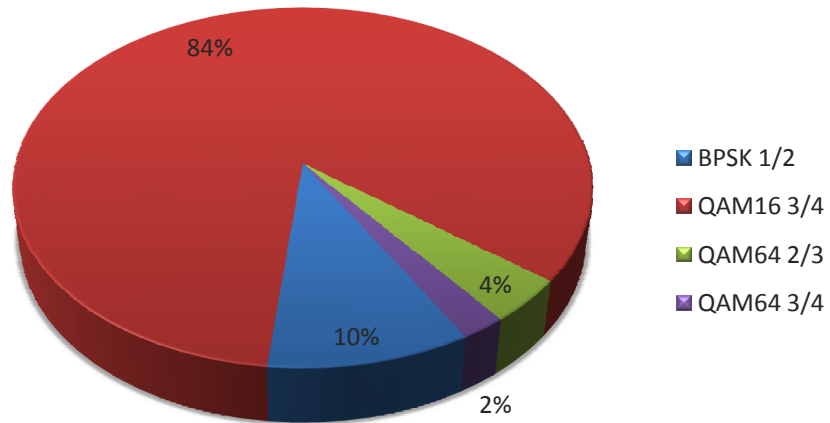


Figura 8.16 – Níveis de modulação observado.

Pode-se agora comparar os resultados obtidos durante o teste de cobertura com os calculados através do modelo de SUI e da fórmula de Friis modificada, Figura 8.17.

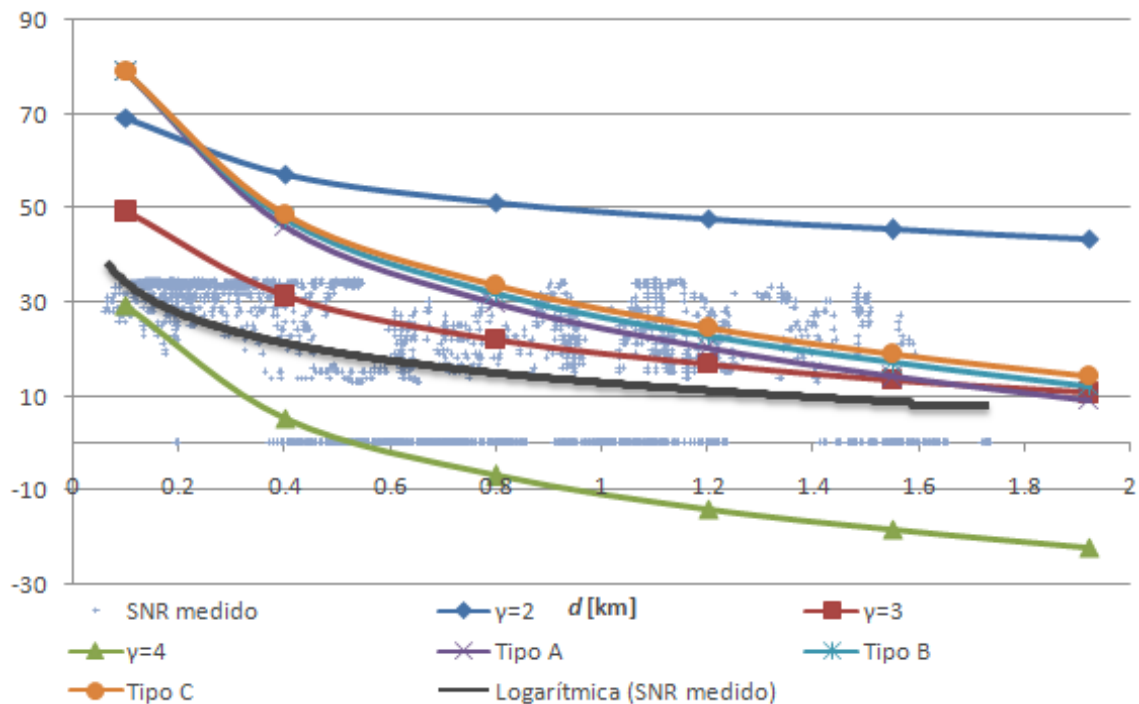


Figura 8.17 – SNR medido vs C/N calculado.

Da análise da figura anterior é possível verificar que nenhum dos modelos utilizados adere a curva de tendência dos resultados obtidos. No entanto, pode-se observar que as curvas obtidas segundo a fórmula de *Friis* modificada aproximam-se mais da evolução (declive) da curva de tendência do que as curvas obtidas através do modelo de SUI. A curva obtida com $\gamma = 3$ é a que mais se aproxima dos resultados experimentais. Por esta razão vai analisar-se, de forma mais aprofundada, os valores obtidos através da fórmula de *Friis* modificada.

Quando a orografia e a quantidade de edifícios da área de teste é estudada mais pormenorizadamente, Figura 8.18, é possível verificar que esta não se enquadra, na sua totalidade, nos tipos de terrenos para os quais são definidos os diferentes valores de γ . Na área de estudo encontram-se presentes zonas densamente edificadas, assim como zonas onde não existe qualquer tipo de edifícios.



Figura 8.18 – Vista geral da área de teste (extraído de *Google Earth*).

Por essa razão vão ser consideradas pelo menos duas áreas distintas:

- A Este da FCS, local onde se situa o aeródromo, Figura 8.19, encontra-se um terreno no qual não se encontram quase nenhuma edificações.



Figura 8.19 – Zona Este da área de teste (extraído de *Google Earth*).

- O quadrante Noroeste, Figura 8.20, pode ser considerado como uma área de elevada densidade de edificações. Nesta zona encontram-se a área residencial da ANIL, edifícios com alturas elevadas, as escolas Quinta das Palmeiras e Pêro da Covilhã, etc.



Figura 8.20 – Quadrante Noroeste área de teste (extraído de *Google Earth*).

Em primeiro lugar, irão considerar-se apenas as coordenadas geográficas e dados adquiridos na zona Este. Recorrendo à fórmula de Friis modificada, colocando o valor de γ em evidência, pode calcular-se o valor γ em cada local testado e posteriormente calcular o γ médio desta área. Através deste processo, é possível verificar que o valor de γ varia entre 1.71 e 4.26; porém, para os 1664 valores medidos nesta área o valor médio de γ é de 2.46. Utilizando este valor na fórmula de Friis modificada e traçando uma nova curva no gráfico dos dados obtidos nesta zona obtém-se a Figura 8.21.

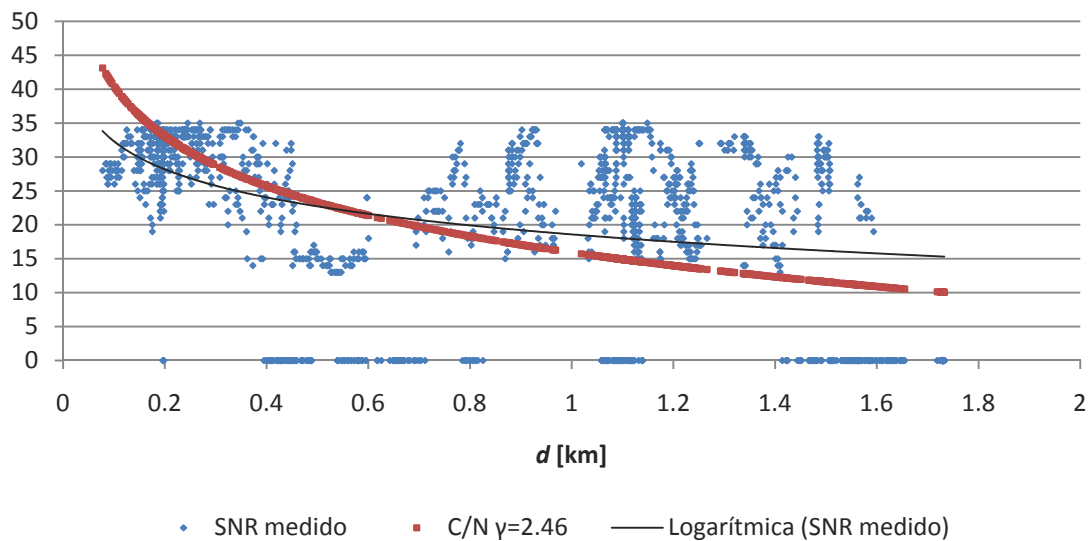


Figura 8.21 – SNR medido vs C/N calculado com γ médio da área Este.

Da análise do gráfico obtido pode verificar-se que a curva da relação C/N calculada continua a não coincidir com os valores medidos e o erro quadrático médio calculado é de 14.64. No entanto, se for analisada mais atentamente a área estudada é possível constatar a existência de duas grandes obstruções:

1. A primeira e mais próxima da FCS, o hospital, um edifício de grandes dimensões e vários pisos de altura;
2. A segunda obstrução é uma ponte, localizada imediatamente após a rotunda a Este do hospital.

Considerou-se anteriormente a zona Este como sendo um local desprovido de maiores edificações. Observando a localização e dimensão das obstruções enumeradas, estas podem considerar-se “anomalias” da área definida, ou seja, para respeitar os padrões definidos, para a área considerada, deverão excluir-se as obstruções referidas. Assim,

omitindo os dados desses locais e os medidos até eles, calcula-se que o γ médio medido é de 2.31 e obtém-se a curva da Figura 8.22.

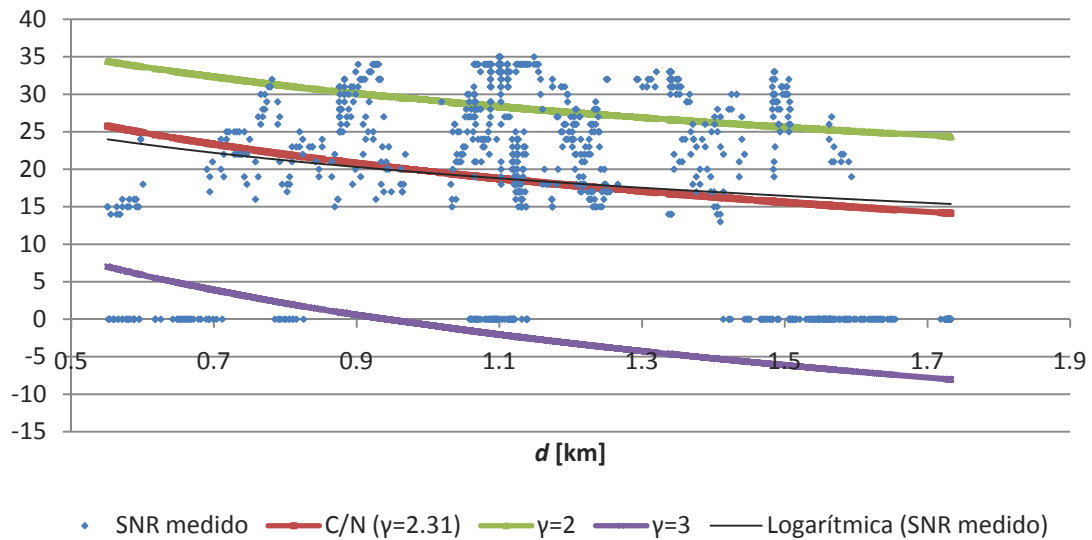


Figura 8.22 – SNR medido vs C/N calculado com γ médio, $\gamma = 2$ e $\gamma = 3$ para a área Este com correcção.

Pode assim observar-se que, com o ajuste do γ , e com a correcção na definição da área, os valores calculados através da fórmula de *Friis* modificada enquadram-se na gama de valores dos 1034 locais medidos. Verifica-se que, neste caso, a discrepância entre os dados medidos e os obtidos varia apenas entre 1 e 2 dB e o valor do erro quadrático médio é apenas 0.434. Nesta área que os 1034 locais de medição, 294, ou seja, 28 % são desprovidos de cobertura, a relação SNR varia entre 0 e 35 dB e tem o valor médio de 18.57 dB.

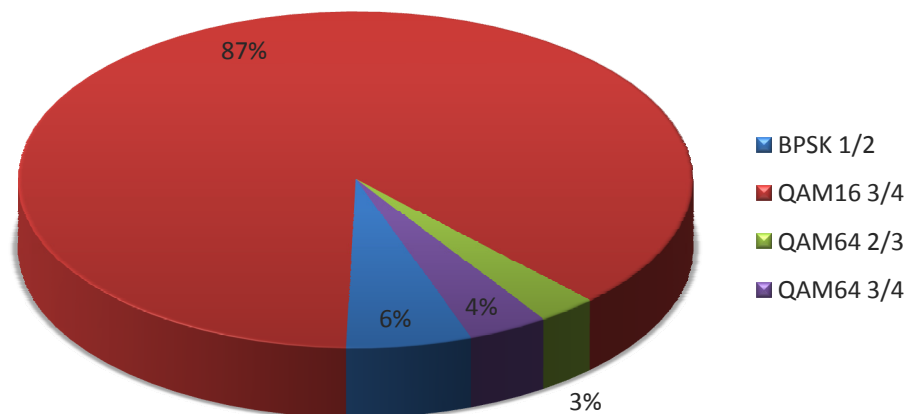


Figura 8.23 – Nível de modulação observado na área Este.

Verifica-se que em 87 % dos casos o nível utilizado foi QAM16 3/4; a modulação BPSK 1/2 foi utilizado em 6% dos casos, seguida pela QAM16 3/4 em 4%. A ordem menos utilizada foi QAM64 2/3 em 3% dos casos medidos, Figura 8.23.

Para o quadrante Noroeste pode ser realizado um exercício similar. Neste caso, o valor de γ , para os 1190 dados medidos, varia entre 1.92 e 3.33, porém, o γ médio é de 2.8. Introduzindo este último valor na fórmula de Friis modificada obtém-se a curva da Figura 8.24, verifica-se que o erro quadrático médio é de 1.043. Nesta área, verifica-se que, nos 1190 locais de medição, 696, ou seja, 58% são desprovidos de cobertura. Ainda é possível observar que, estes locais distanciam-se para lá de um raio de 478 m da FCS. Esta área corresponde à zona entre a ANIL e as escolas secundárias, Quinta das Palmeiras e Pêro da Covilhã, onde a dimensão e quantidade dos edifícios é a maior desta zona de estudo. O valor da relação *SNR* varia entre 0 e 35 dB e tem o valor médio de 9.4 dB.

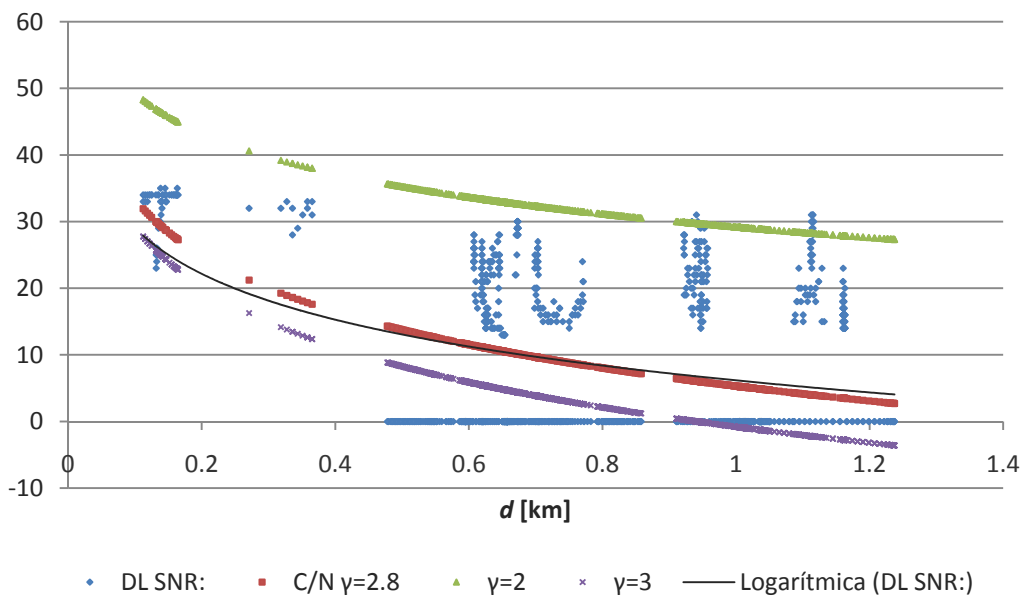


Figura 8.24 – *SNR* medido vs *C/N* calculado com γ médio, $\gamma = 2$ e $\gamma = 3$ para a área Noroeste.

Nesta área verifica-se que apenas foram registados dois tipos de modulação. Em 82 % dos casos a ordem utilizada foi QAM16 3/4 e a modulação BPSK 1/2 em 18%, Figura 8.25.

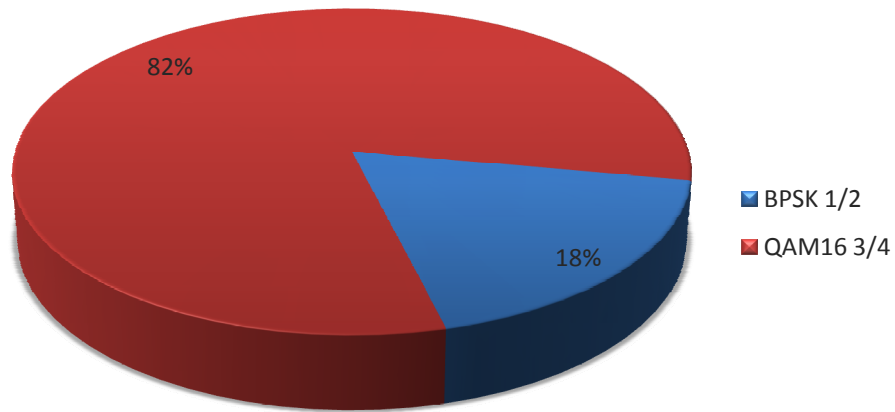


Figura 8.25 – Nível de modulação observado na área Noroeste.

Os resultados extraídos a partir das Figuras 8.22 e 8.24, obtidos durante o teste e o cálculo do valor do γ médio para cada zona de estudo, serão bastante úteis no processo de otimização do planeamento celular.

Finalmente, de forma a demonstrar que a fórmula de Friis modificada é adequada para o planeamento na área em estudo, apresenta-se o gráfico do *SNR* medido versus *C/N* calculado, mas utilizando o no cálculo do *C/N* γ calculado para cada um dos locais medidos, no lugar do γ médio da zona em estudo, Figura 8.26.

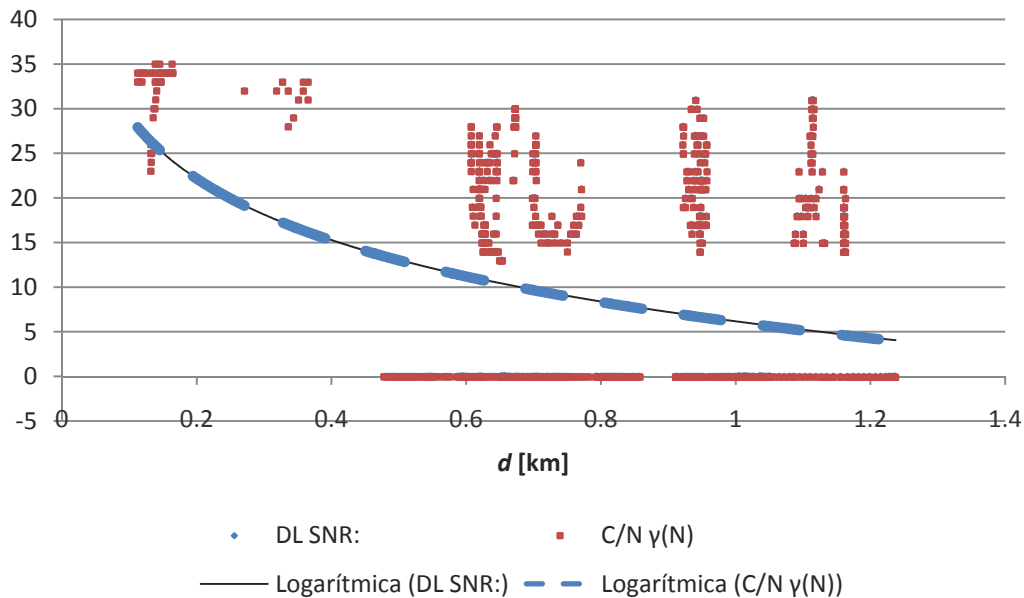


Figura 8.26 – *SNR* medido vs *C/N* calculado com γ de cada coordenada medida para a área Noroeste.

Neste gráfico é possível verificar que o C/N calculado sobrepõe-se aos valores do SNR medido durante o teste de cobertura e o valor do erro quadrático médio é de 2.32×10^{-05} . Embora, neste caso, não se tenha células interferentes, pode-se proceder a um novo dimensionamento celular e comparar o valor da relação C/I , anteriormente calculado, utilizando os valores de γ médio, para cada uma das áreas de estudo consideradas, obtém-se assim a Figura 8.27.

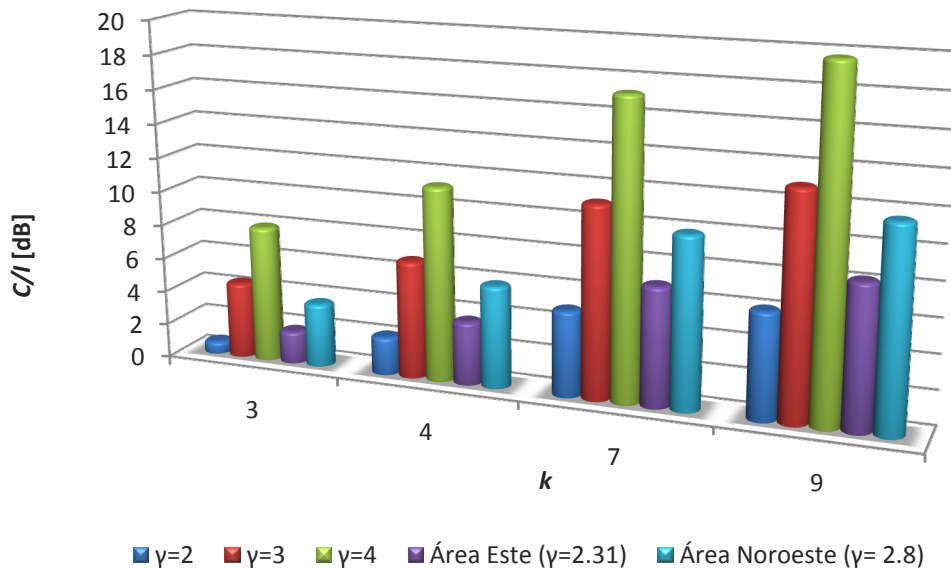


Figura 8.27 – Variação do C/I com o padrão de reutilização para os diferentes valores de γ de acordo com o modelo de propagação de Friis e o γ médio para cada área considerada.

Constata-se que, tal como esperado na análise anterior, o valor da relação C/I irá aumentar quando maior for o valor do γ , ou seja, neste caso o valor de C/I será superior na área Noroeste comparativamente com a área Este.

8.5 Optimização do débito binário através do QoS no equipamento BreezeMAX 3000 da Alvarion

O BreezeLITE, o software do equipamento WiMAX BreezeMAX 3000, permite definir, modificar e gerir as classes de serviços. Cada serviço determina certas propriedades de serviço para a aplicação de um utilizador específico, Figura 8.28.

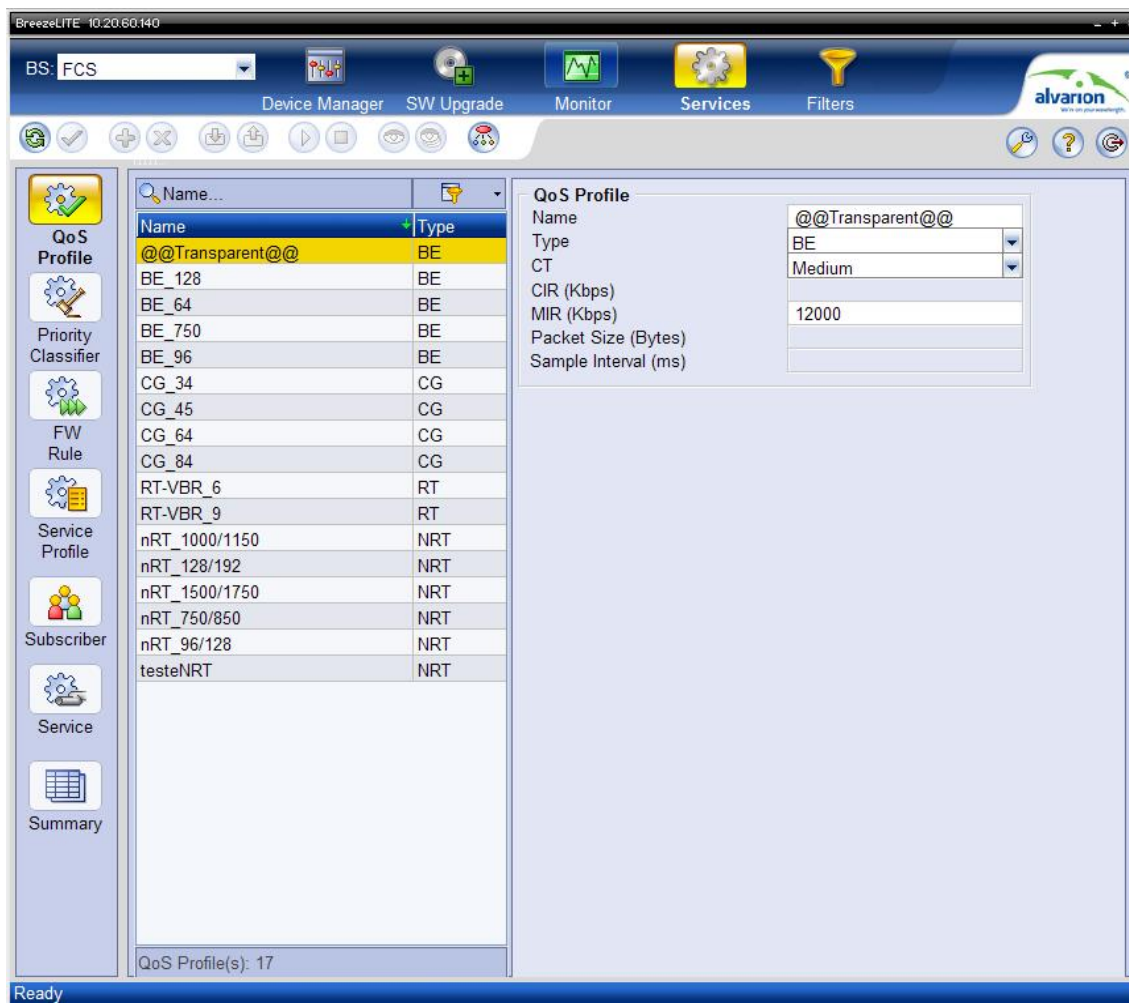


Figura 8.28- Garantia de QoS do equipamento BreezeMAX 3000 utilizado nos testes.

O equipamento BreezeMAX 3000 utilizado nos testes define as quatro classes de serviços para a QoS da norma IEEE 802.16 que são: CG (*Continuous Grant*), RT (*Real Time*), NRT (*Non Real Time*) e BE (*Best Effort*). Como as aplicações utilizadas no trabalho são basicamente o FTP e transferências de dados irão ser especialmente focadas as duas classes de serviço correspondentes, que são NRT e BE, respectivamente.

Quando os testes foram realizados a estação base estava configurada, por defeito, no valor mais baixo de MIR (*Maximum Information Rate*), que pode variar de 1 a 12000 kbps o que limitava a transferência de dados a esse valor.

Quando este facto foi detectado, os testes de campo já tinham terminado. Por isso, realizou-se, em laboratório, a optimização do débito binário para as duas classes de serviço, referidas anteriormente.

8.5.1 Classe de serviço *Best Effort*

Neste estudo foi inicialmente utilizada, a classe de serviço *Best Effort*, BE. Um *QoS Profile* existente “@@Transparent@@” foi modificado configurando o valor do MIR para o máximo permitido (12000 Kbps), que pode ser observado na Figura 8.29.

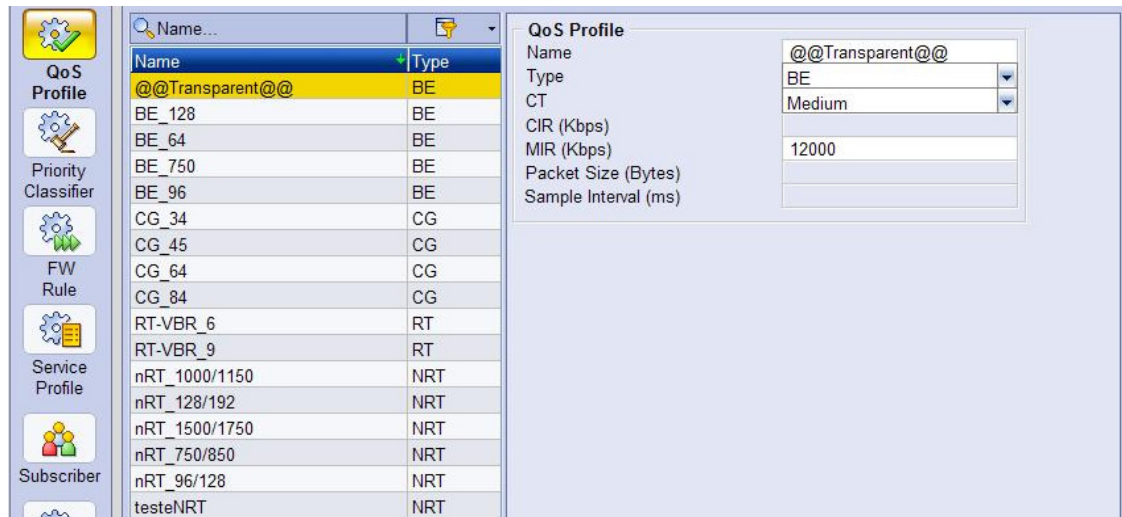


Figura 8.29- Janela *QoS Profile*.

Na janela *Priority Classifier*, Figura 8.30, foi seleccionado “BE Asymmetric”. Nos parâmetros de *uplink* e *downlink* foi seleccionado o *QoS Profile* modificado anteriormente, permitindo o débito máximo possível em ambos os casos. O *software* permite definir parâmetros de limites de prioridade onde um diferente perfil de QoS é associado a cada limite. O limite de prioridade e a determinação de perfis de QoS são definidos independentemente para a ligação ascendente e descendente, definindo-se o limite superior para cada gama de prioridade. Quando não é dada nenhuma ordem de limite ao classificador de prioridade, seleccionando o DSCP (*DiffServ Code Point*) como o tipo de prioridade, define-se 63 como o primeiro limite superior para a ligação ascendente e descendente, deixando-se todos os outros campos para os limites superiores vazios. Alternativamente, pode-se seleccionar 802.1p e definir-se 7 como limite superior para ambos os sentidos. Os limites de prioridade têm de obedecer duas regras principais: i) cada limite superior deve ser mais elevado que o seu antecessor e ii) o limite superior mais elevado disponível para o tipo de prioridade aplicado (7 para 802.2p e 63 para DSCP).

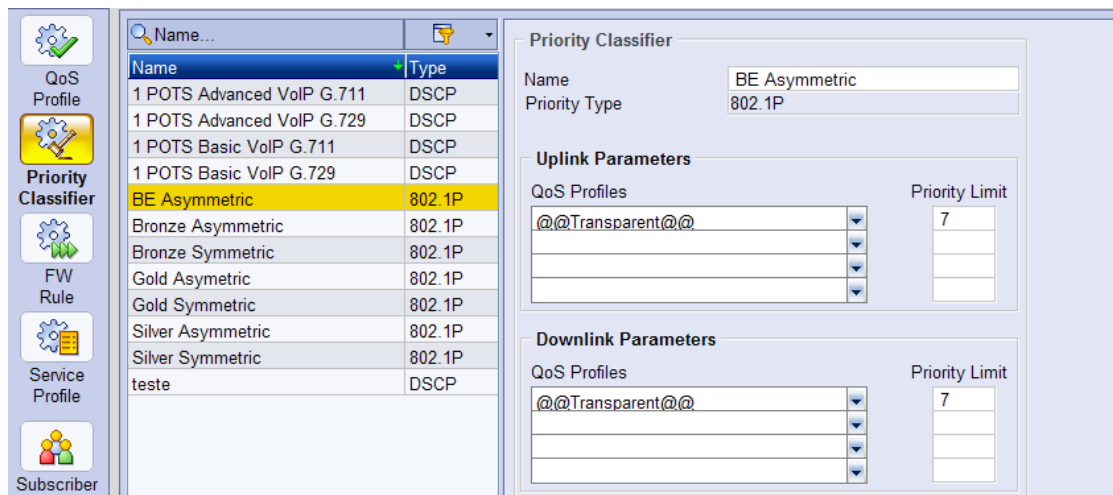


Figura 8.30 – Janela *Priority Classifier*.

Na janela *FW Rule*, Figura 8.31, foi selecionada a regra “Internet Access L2”. No parâmetro *Multicast QoS Profile* foi selecionado o *QoS Profile* “@@Transparent@@”, de forma a possibilitar o débito máximo em modo *multicast*.

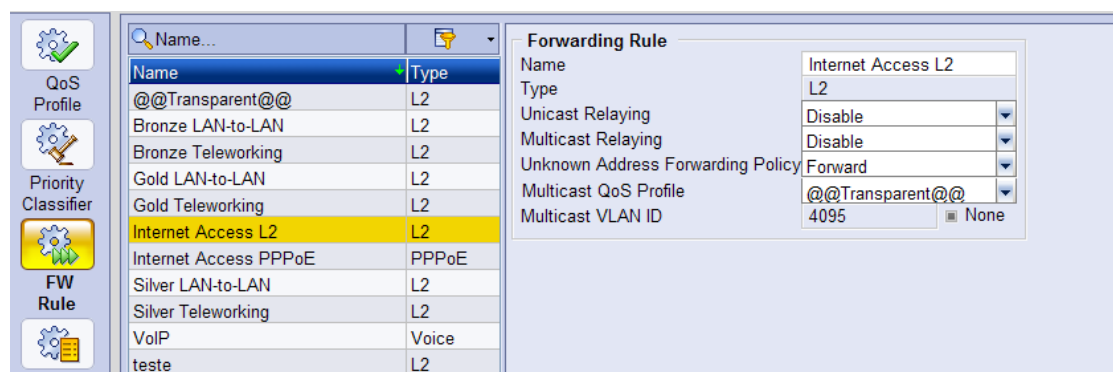


Figura 8.31 – Janela *FW Rule*.

Na janela *Service Profile*, Figura 8.32, nenhum parâmetro foi modificado.

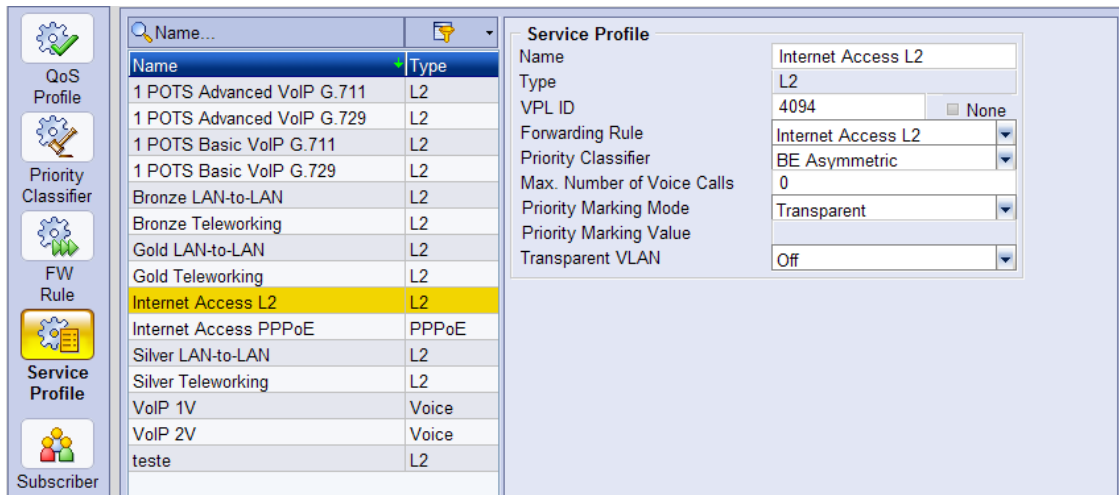


Figura 8.32 – Janela Service Profile.

Na janela *Subscriber*, Figura 8.33, foi adicionado o subscritor “UBI4”. Este nome foi introduzido em todos os campos editáveis.

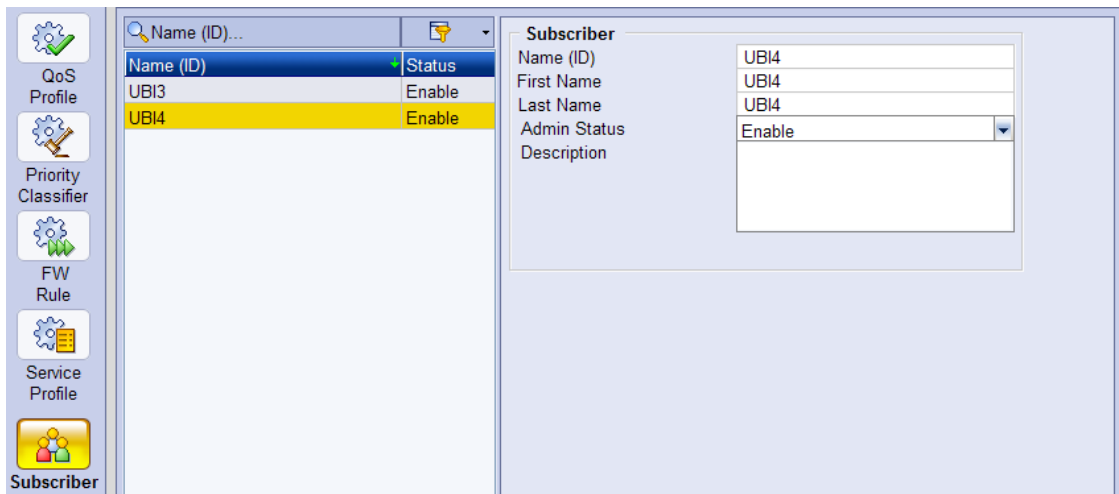


Figura 8.33 – Janela Subscriber.

Na janela *Service*, Figura 8.34, foi criado um serviço com o nome “testeUBI4” ao qual atribuí-se o *Service Profile* “Internet Access L2” e a SU (*Subscriber Unit*) “UBI4” (CPE utilizada nestes testes).

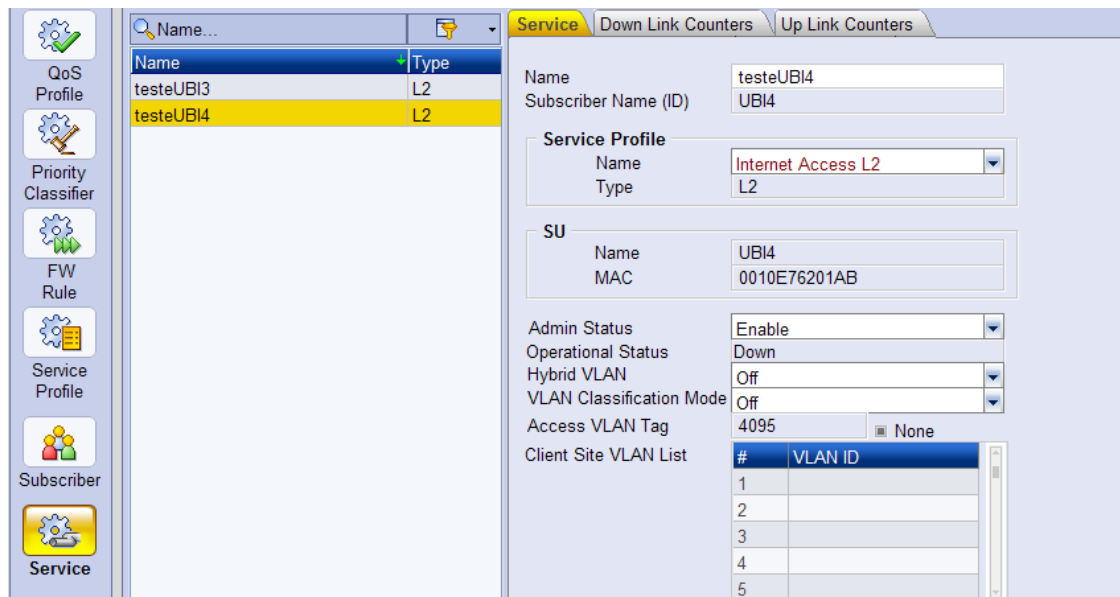


Figura 8.34 – Janela *Service*.

Após esta reconfiguração do equipamento foram realizadas, em laboratório, diversas transferências FTP. Na Figura 8.35 é apresentado um *printscreen* do resultado obtido, onde pode ser verificado que o ritmo médio de transferência é cerca de 745 KBps e a máxima atinge aproximadamente os 770 KBps.

00:03:33.5		
<input type="button" value="Stop"/> <input type="button" value="Help"/> <input type="button" value="Close"/>		
Data Transfer	Download	Upload
Total data transferred	154.95 MB	3.93 MB
Maximum transfer rate	773,5 kB/sec	19,7 kB/sec
Average transfer rate	744,9 kB/sec	18,9 kB/sec

Start and Stop automatically, monitor Internet Explorer
 Show Stopwatch window always on top

Figura 8.35 – Resultado obtido com a classe de serviço BE (*Best Effort*).

8.5.2 Classe de serviço *Non Real Time*

Para a classe de serviço NRT utiliza-se o mesmo procedimento da configuração da classe BE. Para a classe de serviço NRT foi criado a o *QoS Profile* “testeNRT” com o valor do MIR definido com o valor máximo, Figura 8.36.

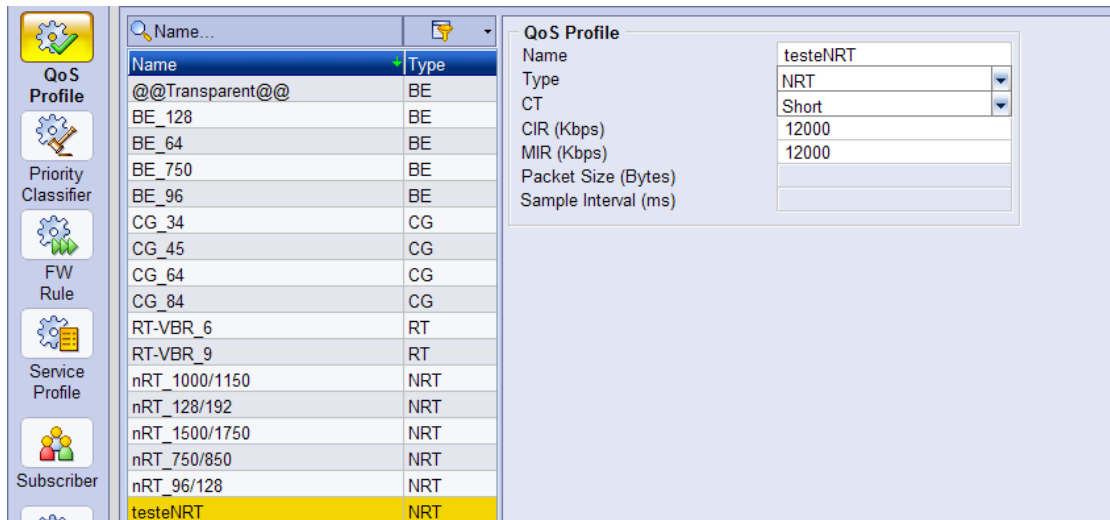


Figura 8.36- Janela *QoS Profile*.

Na janela *Priority Classifier*, Figura 8.37, foi criado “teste” e nos parâmetros de *uplink* e *downlink* foi seleccionado o *QoS Profile* criado anteriormente, permitindo assim e, mais uma vez, o débito máximo possível em ambos os casos.

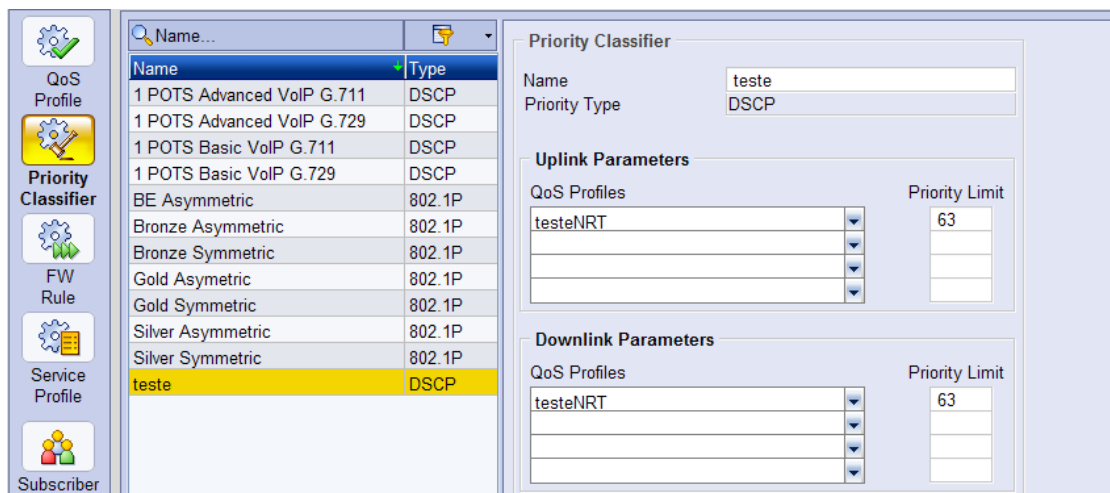


Figura 8.37 – Janela *Priority Classifier*.

Na janela *FW Rule*, Figura 8.38, foi criada a regra “teste”. No parâmetro *Multicast QoS Profile* foi seleccionado o *QoS Profile* “testeNRT”, de forma a possibilitar o débito máximo em modo *multicast*.

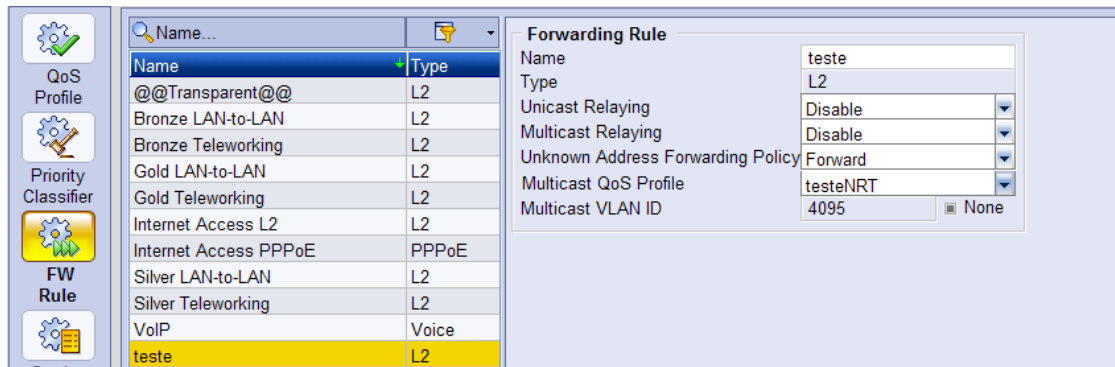


Figura 8.38 – Janela *FW Rule*.

Na janela *Service Profile*, Figura 8.39, foi criado o serviço teste, do tipo L2. Foi seleccionado a *Forwarding Rule* e *Priority Classifier* denominada por “teste”. O número máximo de chamadas foi definido com o valor 0, uma vez que neste teste não se pretendem realizar chamadas de voz.

Nota: Como apenas um *Service Profile* pode ser definido como não tendo VPL ID (ou seja, não utilizar VLANs) no *Service Profile* “Internet Access L2” o VPL ID foi modificado temporariamente, permitindo assim a atribuição automática de IPs pelo servidor de DHCP utilizado.

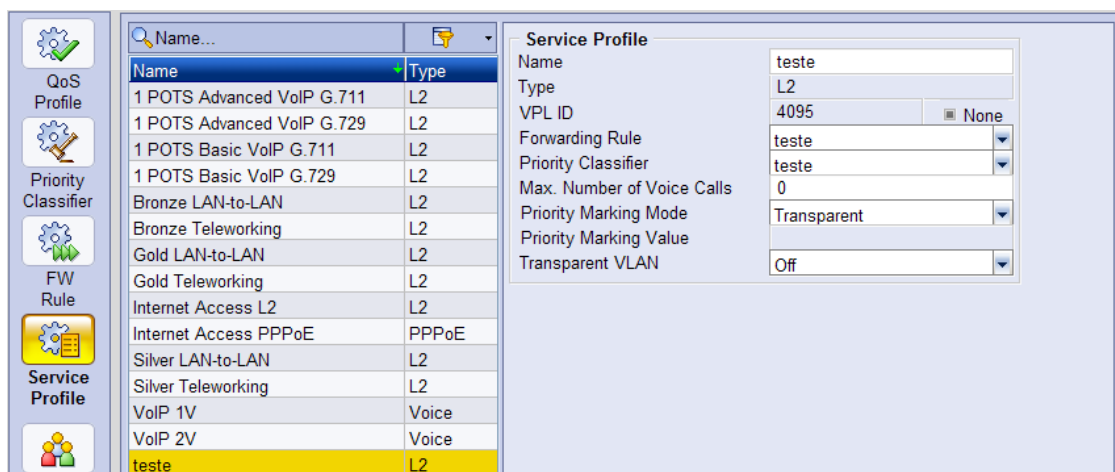


Figura 8.39 – Janela *Service Profile*.

Finalmente, na janela *Service*, Figura 8.40, no serviço com o nome “testeUBI4” ao qual foi anteriormente atribuído o *Service Profile* “Internet Access L2” e a SU “UBI4” atribuí-se agora o novo serviço “teste”

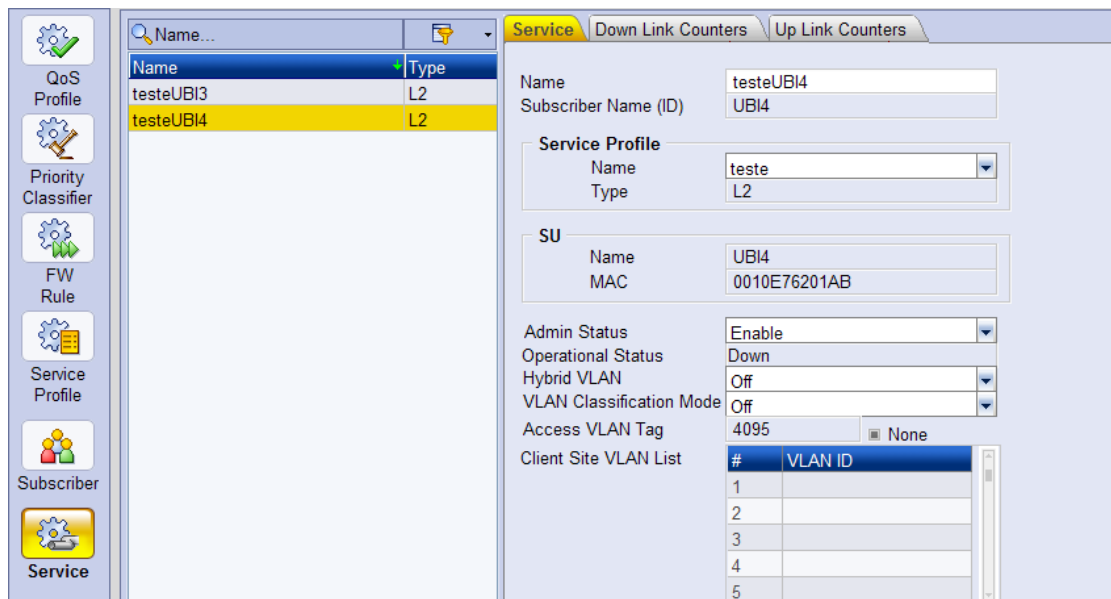


Figura 8.40 – Janela *Service*.

Após esta reconfiguração do equipamento foram realizadas, em laboratório, diversas transferências FTP. Na figura 8.41 apresenta-se um *printscreen* dos resultados obtidos, neste caso pode verificar-se que a velocidade média de transferência é cerca de 700 KBps e a máxima atinge aproximadamente os 750 KBps.

The screenshot shows a network performance monitoring window with a timer at 00:07:41.2 and buttons for Stop, Help, and Close. Below the buttons is a table with the following data:

Data Transfer	Download	Upload
Total data transferred	314,90 MB	7,99 MB
Maximum transfer rate	747,3 kB/sec	18,9 kB/sec
Average transfer rate	699,5 kB/sec	17,7 kB/sec

Below the table are two checkboxes:

- Start and Stop automatically, monitor Internet Explorer
- Show Stopwatch window always on top

Figura 8.41– Resultado obtido com a classe de serviço NRT (*Non Real Time*).

Os testes as classes de serviço apresentados foram realizados em laboratório, a uma distância de aproximadamente 30 metros da estação base, sem linha de vista devido às paredes da sala que bloqueavam o sinal. Ao comparar-se os resultados obtidos em laboratório com os resultados do teste no terreno, verifica-se que existe uma grande melhoria. Após terem sido configuradas as classes de QoS conseguiu-se melhorar o débito binário de 3200 kbps para 6000 kbps.

Verifica-se, também que a classe de serviço BE apresenta os melhores ritmos de transferência do que a classe de serviço NRT. Apesar de a classe BE ser aplicada para *Web browsing* e transferência de dados e a classe NRT ser aplicada para FTP. A explicação mais provável será ao facto do sistema não estar sobrecarregado.

8.6 Sumário e conclusões

Neste Capítulo realizou-se o dimensionamento de uma célula, a 3.5 GHz, para cobertura da área metropolitana da cidade da Covilhã, recorrendo-se ao modelo de *Friis* modificado e ao modelo de SUI, para o equipamento BreezeMAX 3000 da Alvarion. Concluiu-se que o modelo de SUI apresentou valores mais elevados, para a relação portadora-ruído, para um raio de cobertura inferior a 1.5 km. Observou-se, também, que, a partir dessa distância, o modelo de *Friis* modificado apresentou valores superiores.

Apresentaram-se os resultados obtidos durante um teste de cobertura, para o qual foi necessário criar uma aplicação computacional, de modo a obter e registar, de forma automática, os dados referentes à qualidade do sinal recebido pela CPE, assim como, as coordenadas geográficas onde estes foram adquiridos. Dos resultados obtidos averiguou-se que, nenhum dos modelos se enquadrava perfeitamente na gama de valores medidos.

A fórmula de *Friis* modificada considera três tipos de áreas, distintas pela densidade de edificações, para as quais são atribuídos diferentes valores ao expoente de propagação. Da análise da orografia do terreno constatou-se que a área de teste não possuía uma densidade homogénea de edificação, por isso, concluiu-se que a divisão desta por pelo menos dois quadrantes é necessária. Considerou-se então que, um dos quadrantes deveria ser considerado como sendo de reduzida edificação e o outro como tendo uma moderada a elevada edificação.

Neste trabalho de investigação assumiu-se ainda que, os valores dos expoentes de propagação apresentados na fórmula de *Friis* modificada, são valores padrão, definidos para casos gerais e não otimizados para locais específicos. Segundo os padrões definidos pela fórmula de *Friis* modificada podem classificar-se duas distintas áreas como sendo do mesmo tipo, ou seja, com expoentes de propagação iguais, no entanto, isso não significa que estas tenham exactamente a mesma densidade de edificações.

Após estas considerações, calculou-se o valor médio do γ para cada um dos quadrantes considerados. Verificou-se assim que, o modelo de *Friis* enquadrou-se totalmente na gama dos valores obtidos, com expoentes de propagação de 2.31 e 2.8, nas zonas Este e Noroeste da Covilhã, respectivamente, a primeira mais plana e com reduzida densidade de edifícios, enquanto que a segunda é sub-urbana, com mais edifícios e mais acidentada. As pequenas diferenças entre os valores medidos e os calculados podem ser justificadas pela atenuação provocada pelos vidros do automóvel no qual se encontrava a CPE durante os testes. Calculou-se o valor do erro quadrático médio, no quadrante Este e obteve-se 0.434, no quadrante Noroeste o valor alcançou 1.043.

Concluiu-se então que, através de um pequeno teste de cobertura pode calcular-se o valor do expoente de propagação de uma ou mais zonas, e otimizar assim o dimensionamento celular para diversas áreas.

Registou-se que em ambas as áreas, a modulação mais utilizada era a QAM16 3/4 e apresentou-se o impacto do cálculo do expoente de propagação, de cada área, para o cálculo da relação portadora–interferência.

Durante o teste de cobertura verificou-se que a configuração, por defeito, da estação base não permitia que o débito binário alcançasse os valores esperados. Realizou-se, por isso, a reconfiguração dos parâmetros das classes de serviços WiMAX disponíveis no equipamento. Alcançaram-se assim valores de ritmos de transferências FTP muito superiores.

9 Planeamento celular a 5.4 GHz

No final do projecto MobileMAN, o fornecedor de equipamento, *Advanced Resources*, cedeu temporariamente, para testes, outro equipamento PMP.

O equipamento em questão é o BreezeACCESS VL da Alvarion que opera em frequências não licenciadas, em modo TDD, utilizando a modulação OFDM com FEC (*Forward Error Correction*). Esta versão do equipamento opera na banda de frequência de 5.4 GHz. A antena fornecida com esta estação é do tipo sectorial, com uma abertura de 120°, Figura 9.1. A estação base (AUS-SA - AUS-Standalone Access) suporta até 8 estações subscritoras, do tipo SU-3 e/ou SU-6. A estação subscritora suporta todos os serviços de rede.



Figura 9.1 – Estação Base AUS-SA com antena sectorial de 120°.

Como realizado anteriormente, será agora feito o dimensionamento celular para este equipamento.

9.1 Modelo de propagação de *Friis*

9.1.1 Atenuação

Para o cálculo da atenuação os valores dos parâmetros são idênticos aos utilizados anteriormente:

- $\gamma = 2$ para o espaço livre;
- $\gamma = 3$ para áreas edificadas de densidade média;
- $\gamma = 4$ para áreas edificadas de densidade elevada;
- $\gamma_{chuva} = 0.0811$ dB/km;
- $\gamma_{nevoeiro} = 0.01$ dB/km (este valor pode ser desprezado por ser muito inferior a γ_{chuva});
- γ_{neve} é geralmente desprezável para frequências inferiores a 30 GHz;
- $f = 5.4$ GHz.

Da aplicação da expressão (6.2) obtiveram-se os resultados para a atenuação, segundo o modelo de propagação de *Friis*, para os três valores do expoente de propagação, em função do raio de cobertura da célula, Figura 9.2.

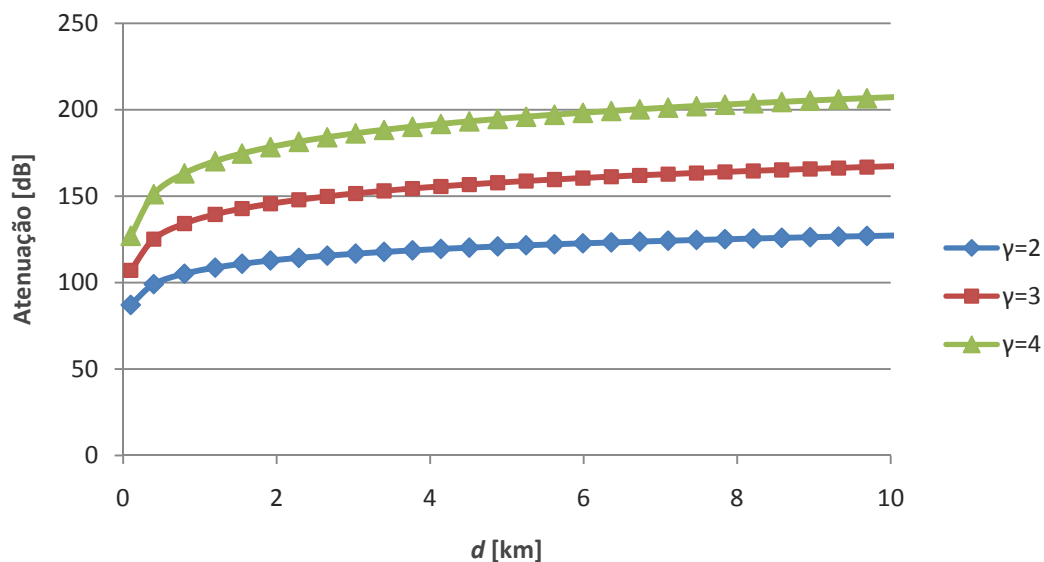


Figura 9.2 - Atenuação segundo o modelo de propagação de Friis.

9.1.2 Potência recebida

Para o cálculo da potência recebida, P_R , é utilizada a equação (6.15), é necessário ter em consideração as especificações do equipamento BreezACCES VL que, como o BreezeMAX 3000, apenas suporta a norma fixa do WiMAX, a norma IEEE 802.16 - 2004. As especificações fornecidas pelo fabricante são as seguintes:

- $P_E = -2$ dBW, potência máxima;
- $G_E = 15$ dBi, ganho de emissão;
- $G_R = 21$ dBi, ganho de recepção.

A Figura 9.3 apresenta os resultados obtidos para o cálculo da potência recebida.

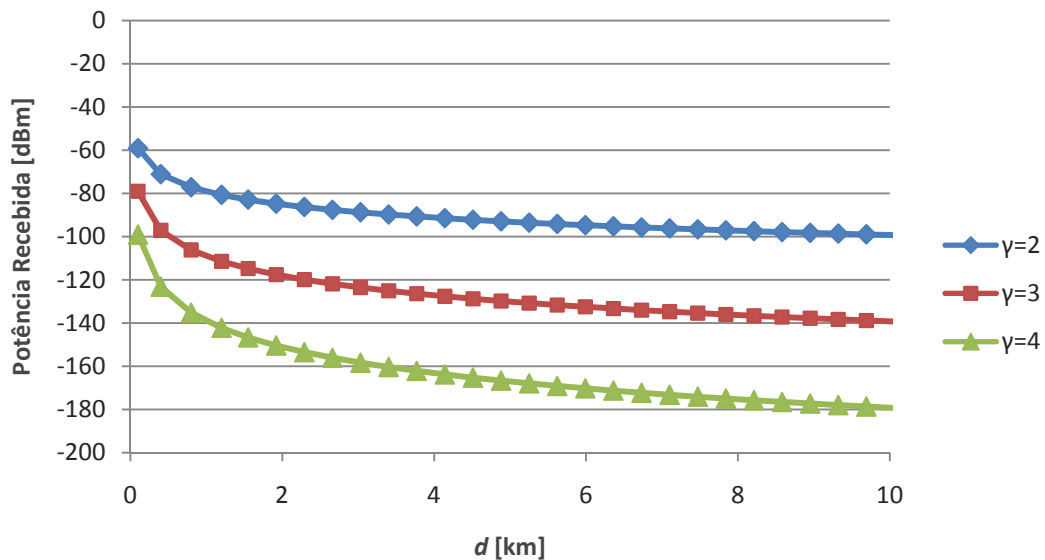


Figura 9.3 – Potência recebida segundo o modelo de propagação de Friis.

9.1.3 Relação portadora-ruído

A relação portadora-ruído, C/N , é dada por (6.16), o valor da largura de banda que foi configurada no equipamento, este é 20 MHz. A Figura 9.4 mostra os resultados obtidos no cálculo da relação C/N .

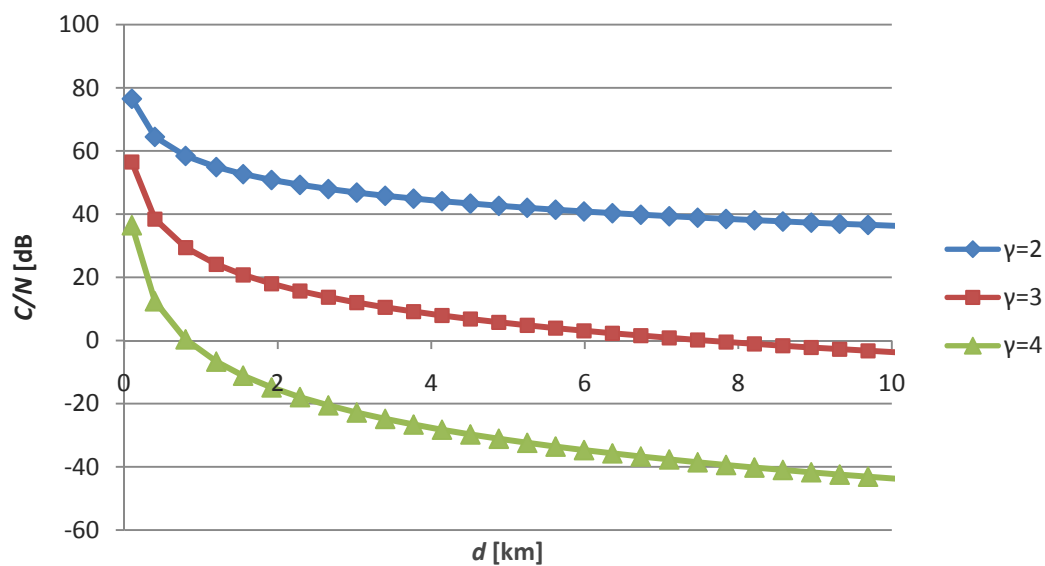


Figura 9.4 – Relação portadora-ruído segundo o modelo de propagação de Friis.

9.2 Modelo de propagação de SUI

Como anteriormente, também será utilizado o modelo de SUI por este ser considerado adequado para distâncias menores.

9.2.1 Atenuação

Neste modelo e segundo a fórmula (6.3) e respectivos factores de correcção (6.6), (6.7) e (6.8), devem ainda ser definidos os seguintes parâmetros:

- Factor de atenuação, $s = 8.8$;
- Altura da antena emissora, $h_b = 13.3^2$ m;
- Altura da antena receptora, $h_m = 2$ m.

Assim, os resultados obtidos para a atenuação são apresentados na Figura 9.5.

² Altura do pólo da FCS, onde será instalado o equipamento durante a fase de testes de cobertura.

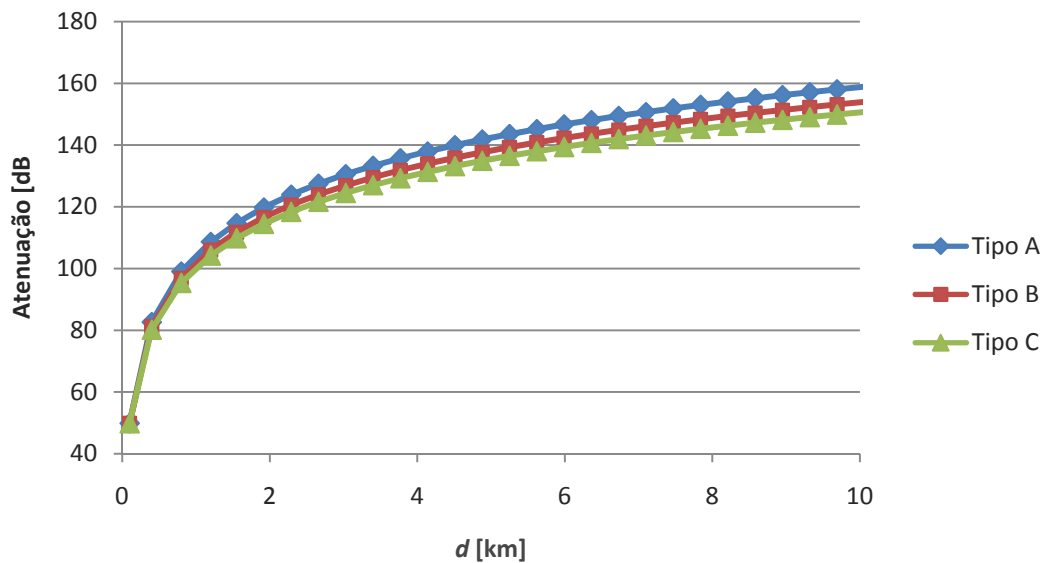


Figura 9.5 - Atenuação segundo o modelo de propagação de SUI.

9.2.2 Potência recebida

Para o cálculo da potência recebida é, novamente, utilizada a fórmula (6.15), as características do equipamento também são utilizadas neste cálculo. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 9.6.

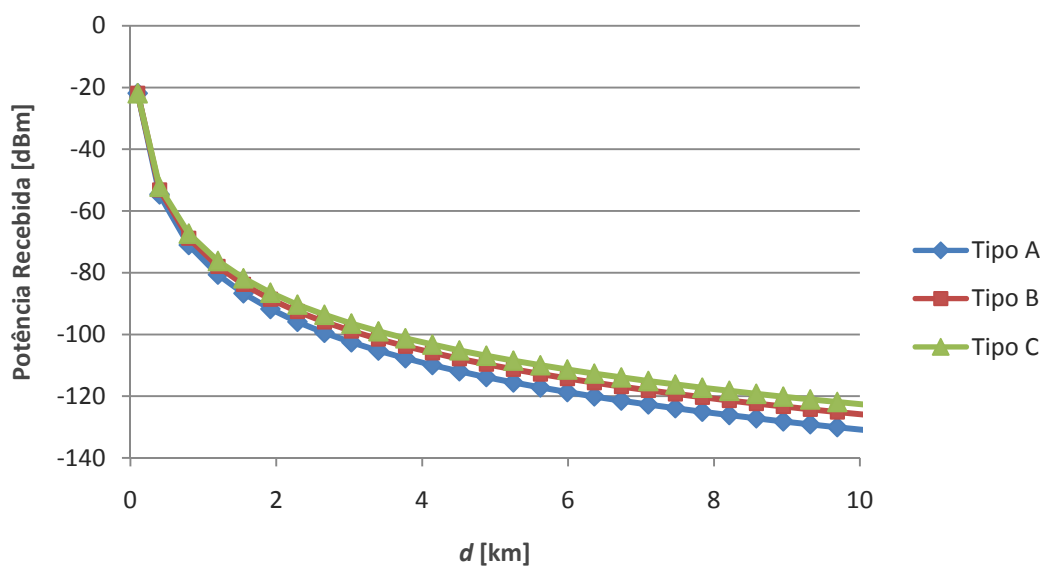


Figura 9.6 – Potência recebida segundo o modelo de propagação de SUI.

9.2.3 Relação portadora-ruído

A relação portadora-ruído é dada por (6.16), são consideradas as características do equipamento; já apresentadas, e mantem-se a largura de banda, anteriormente definida.

A Figura 9.7 ilustra os resultados obtidos.

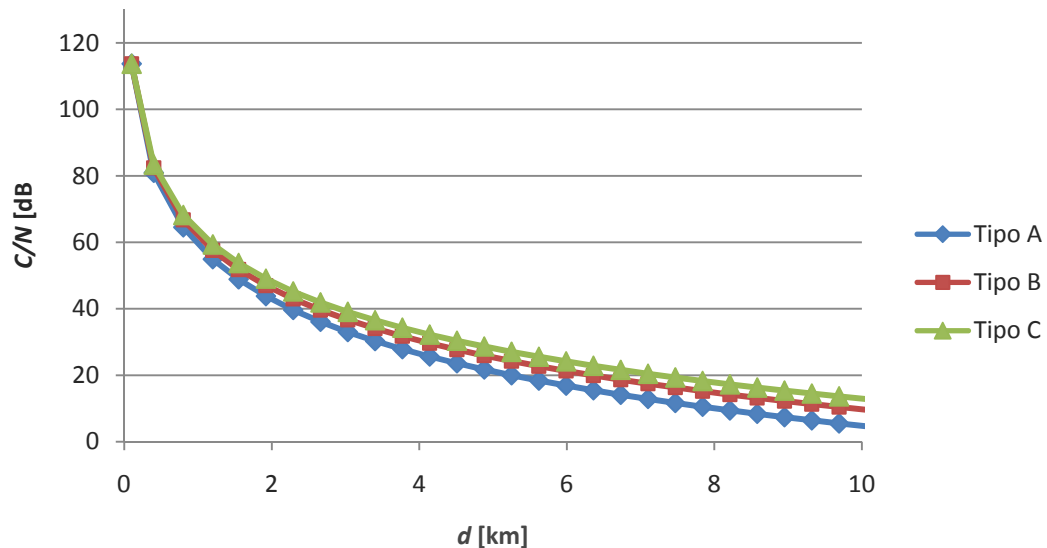


Figura 9.7 – Relação portadora-ruído segundo o modelo de propagação de SUI.

Verificou-se, anteriormente, que o modelo de SUI é inicialmente mais otimista para raios de cobertura inferiores a 1.5 km. Após esta distância o modelo de *Friis*, para valores de γ igual a 2 e 3, apresenta valores superiores para a relação portadora-ruído. Apresenta-se agora, na Figura 9.8, para o modelo de *Friis*, e Figura 9.9, para modelo de SUI, o dimensionamento a 3.5 e 5.4 GHz para uma análise comparativa.

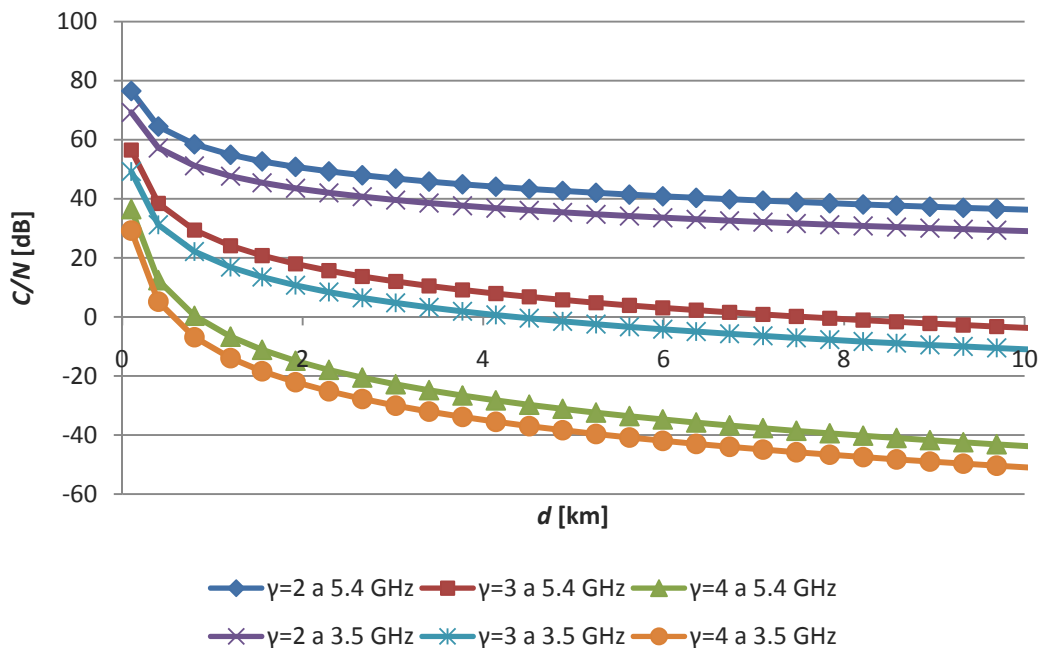


Figura 9.8 – Dimensionamento a 3.5 GHz versus 5.4 GHz segundo o modelo de Friis.

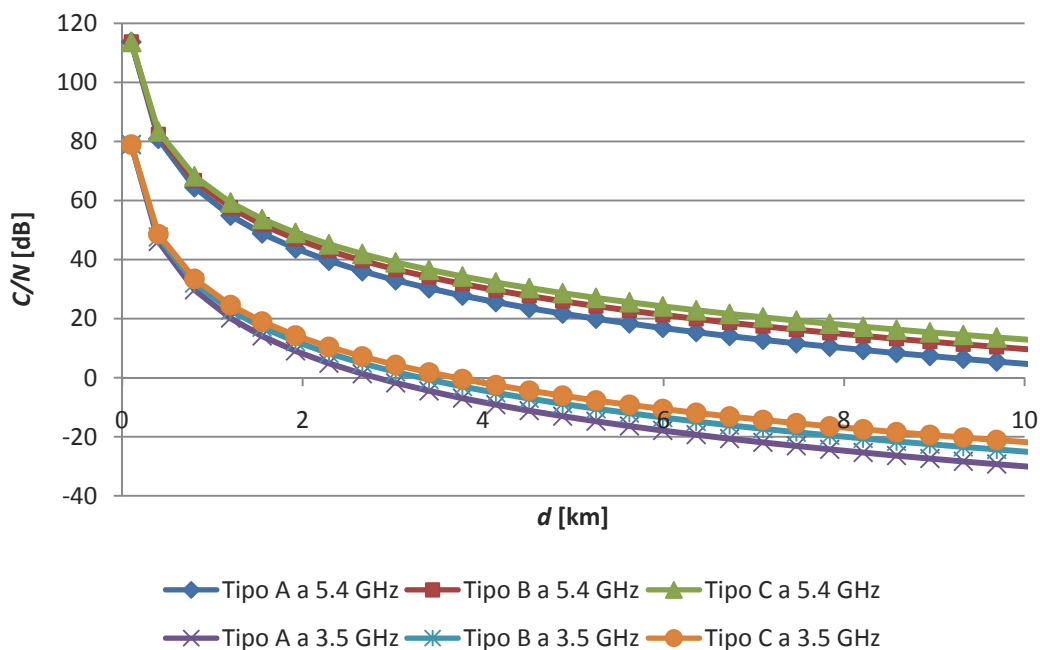


Figura 9.9 – Dimensionamento a 3.5 GHz versus 5.4 GHz segundo o modelo de SUI.

Da análise das Figuras, pode concluir-se que, para os equipamentos seleccionados, pode esperar-se valores superiores da relação C/N para o equipamento a operar a 5.4 GHz. Um factor importante, que não pode ser omitido, é o ganho das antenas do equipamento

BreezeACCESS VL ser muito superior ao ganho das antenas do equipamento BreezeMAX 3000, 15 e 21 dBi e, 10 e 9 dBi, respectivamente.

9.3 Teste de cobertura

A estação base WiMAX foi novamente instalada na FCS. O teste foi realizado em duas fases, visto que a antena utilizada na estação base ser uma sectorial de 120°. Numa primeira fase, a estação base foi colocada dentro de uma sala, de um piso superior, do lado Este do edifício, de forma a assegurar a cobertura da parte menos elevada da cidade, como por exemplo, o aeródromo, Figura 9.10. O equipamento teve de ser colocado nesse local, dado que, na parte Este do telhado da FCS, não se encontrar disponível nenhuma tomada para alimentar o equipamento.

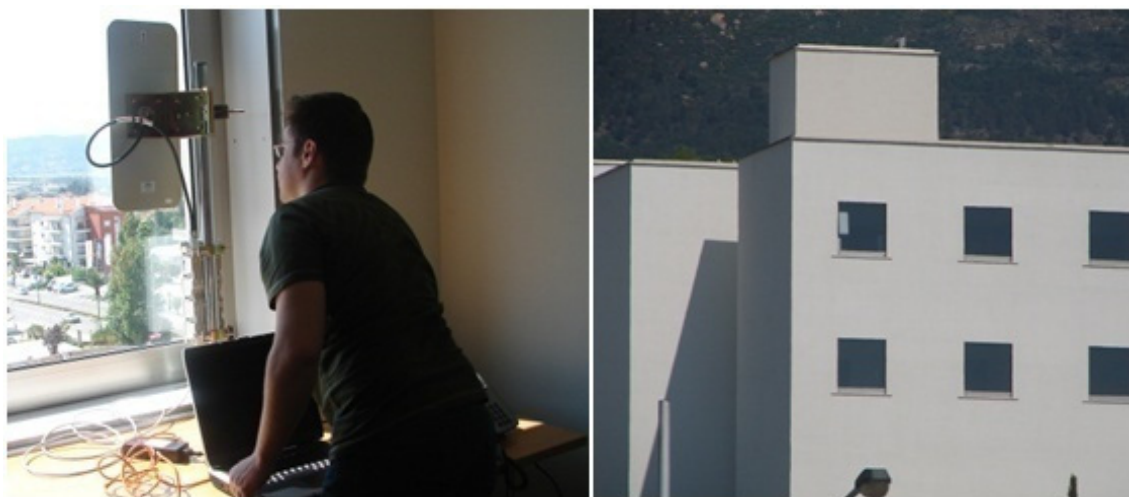


Figura 9.10 – Local da instalação da estação base na primeira fase de teste.

Na segunda fase do teste, a estação base foi instalada no telhado da FCS, na zona Oeste, mais próximo do local onde se encontram a antena e ODU do equipamento BreezeMAX 3000. Desta forma tentou-se assegurar a cobertura da zona Oeste, a parte mais elevada da cidade, Figura 9.11.



Figura 9.11 – Local da instalação da estação base na segunda fase de teste.

A ODU da estação base opera com uma potência máxima de emissão de 21 dBm. O restante equipamento foi o seguinte:

- O equipamento BreezeACCESS VL da Alvarion, este é constituído por uma estação base, uma ODU e uma unidade subscritora;
- Uma antena sectorial de 120° com ganho de 15 dBi;
- Dois computadores portáteis, um para operar como backhaul e servidor FTP, *File Transfer Protocol*, o segundo ligado à CPE com um cliente FTP;
- Um inversor 12V – 220V, de forma a alimentar a CPE e o computador portátil a ela ligada;
- Um GPS ,Global Positioning System;
- Cabos UTP, Unshielded Twisted Pair, cruzados;
- Um veículo para transportar a CPE.

9.3.1 Metodologia de teste

Como no teste a 3.5 GHz e pelas mesmas razões, foi utilizado um computador portátil como backhaul, onde foi instalado um servidor de FTP e um servidor de DHCP, este último para a atribuição automática de endereços IP à estação subscritora, Figura 9.12.



Figura 9.12 – Ligação estação base ao backhaul.

O segundo computador, a unidade subscriitora e o receptor GPS foram instalados no habitáculo de um automóvel, sendo alimentados, se necessário fosse, através de um inversor. Neste computador foi instalado um cliente FTP. Finalmente, foi utilizada uma *pen bluetooth* de forma a ligar o computador ao receptor GPS, Figura 9.13.



Figura 9.13 – Ligação unidade subscriitora, computador e receptor GPS.

A principal diferença entre este teste PTM e o último realizado, deve-se à ferramenta computacional não poder ser utilizada para adquirir os dados referentes à qualidade de sinal, recebido pela unidade subscriitora. Este facto justifica-se pela forma como é feito, de forma interna, o *site survey*, do equipamento, que não é compatível com a ferramenta

desenvolvida. Assim, apenas a parte de aquisição de coordenadas GPS, da aplicação computacional, foi utilizada, a fim de registar a localização dos lugares testados. Uma vez que não foi possível utilizar a aplicação na sua totalidade, este teste também divergiu do anterior pelas diversas medições terem sido feitas apenas após a paragem total do carro. Estas paragens permitiram registar, de forma manual, os dados adquiridos.

9.3.2 Análise dos resultados obtidos

Durante esta campanha de testes foram adquiridos dados em nove locais da cidade, num raio de 1.8 km. A Figura 9.15 apresenta o mapa da área de estudo, assim como, os locais onde foram realizadas as diversas medições. Como anteriormente, o círculo marca a localização da estação base.

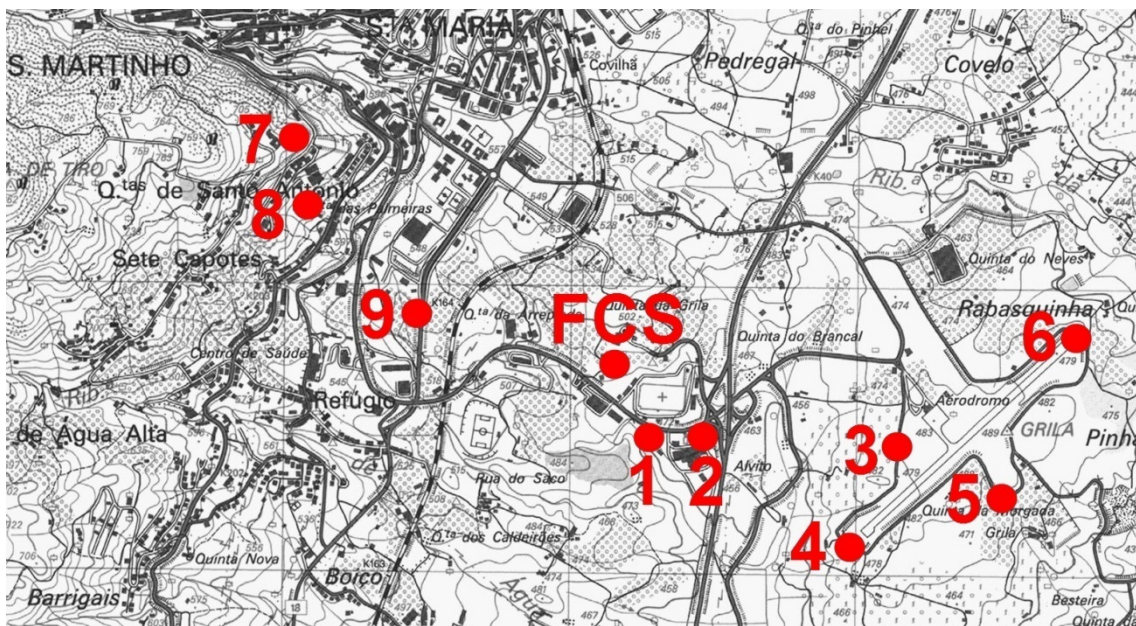


Figura 9.14 – Locais, da cidade, onde foram feitas medições.

No computador utilizado como *backhaul* de rede foram criadas duas directorias, uma contendo um ficheiro de vídeo, com o tamanho de 300 MB, e outra com diversos ficheiros do mesmo tamanho, de dimensão total de 300 MB. A estação subscritora foi levada para os nove locais de interesse da cidade, onde era feita a ligação com o servidor de FTP da estação base e a transferência sucessiva das duas pastas. A

localização era registada através da ferramenta computacional e o ritmo de transmissão era medido através de uma segunda ferramenta, disponível e de utilização gratuita na Internet. A aplicação fornecida com o equipamento BreezeACCESS VL, O BreezeCONFIG, foi utilizada para registar o nível de modulação médio, relação *SNR* média e o número de pacotes transmitidos com sucesso por nível de modulação, Figura 9.15.

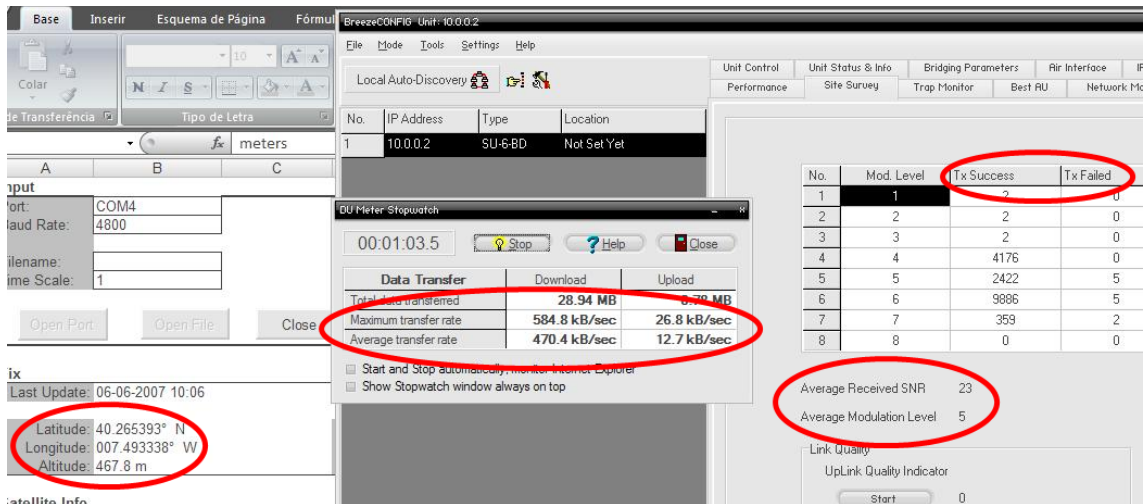


Figura 9.15 – *Printscreen* registado durante o teste.

As tabelas 9.1 e 9.2 apresentam os resultados obtidos durante as transferências de cada directoria. A distância entre a estação subscritora e a estação base foi calculada graças as coordenadas adquiridas pelo GPS. A taxa de pacotes enviados com ou sem sucesso, por nível de modulação, não são apresentados nestas tabelas. É de notar que o *printscreen* registado no local número 8, para a transferência da pasta com o único ficheiro foi, acidentalmente, apagado.

Tabela 9.1 – Dados registados durante a transferência da pasta com o ficheiro de 300 MB.

Local	Distância [km]	Transferência Max [kbps]	Transferência Média [kbps]	Modulação Média	<i>SNR</i> [dB]
1	0.26979	4678.4	3763.2	16-QAM – 1/2	23
2	0.43629	-	-	-	0
3	1.12214	4573.6	3829.6	16-QAM – 3/4	25
4	1.10857	5503.2	572	QPSK – 3/4	17
5	1.34635	4864.8	3783.2	16-QAM – 1/2	23
6	1.12440	4792.8	1792.8	BPSK – 3/4	11
7	1.30207	5115.2	3834.4	16-QAM – 1/2	26
8	1.78503	-	-	-	-
9	0.68538	4208	3832.8	64-QAM – 2/3	24

Tabela 9.2 - Dados registados durante a transferência da pasta com vários ficheiros de 300 MB.

Local	Distância [km]	Transferência Max [kbps]	Transferência Méd. [kbps]	Modulação Média	SNR [dB]
1	0.26979	4096.8	3576.8	16-QAM – 1/2	19
2	0.43629	-	-	-	0
3	1.12214	4716.0	3320.0	16-QAM – 1/2	23
4	1.10857	5260.0	1784.0	BPSK – 3/4	14
5	1.34635	4695.2	3700.0	16-QAM – 1/2	21
6	1.12440	1609.6	92.8.0	BPSK – 3/4	11
7	1.30207	4195.2	3712.8	16-QAM – 3/4	26
8	1.78503	5247.2	3672.8	16-QAM – 3/4	20
9	0.68538	4195.2	3458.4	16-QAM – 3/4	15

Durante o teste, verificou-se que no local número 2 não foi possível ligar a unidade subscritora, à estação base, o que será provavelmente causado pelo facto de, nesse local, não existir linha de vista. Uma das razões para este evento deve-se ao facto da antena sectorial, da estação base, estar localizada no interior duma sala, o que limita o alcance da antena em condições NLoS, reduzindo a capacidade de cobertura. Nos locais com linha de vista, a localização da antena no interior do edifício não se fez sentir, uma vez que foi sempre possível estabelecer a ligação com qualidade.

Verifica-se ainda que, o ritmo de transferência obtido para a pasta, com o ficheiro único, é superior ao obtido com a outra pasta. Isto justifica-se pela duração da transferência, dum ficheiro de maior dimensão, ser superior e assim a ligação tem tempo de estabilizar e alcançar um maior valor de débito. No caso dos ficheiros de menor dimensão, a duração da transferência é muito inferior, assim a ligação é descontinuada, não permitindo que esta estabilize ou alcance valores superiores de débito (por terminar antes disso).

As figuras 9.16 e 9.17 apresentam uma comparação entre os resultados registados e os esperados segundo o modelo de *Friis* e de SUI.

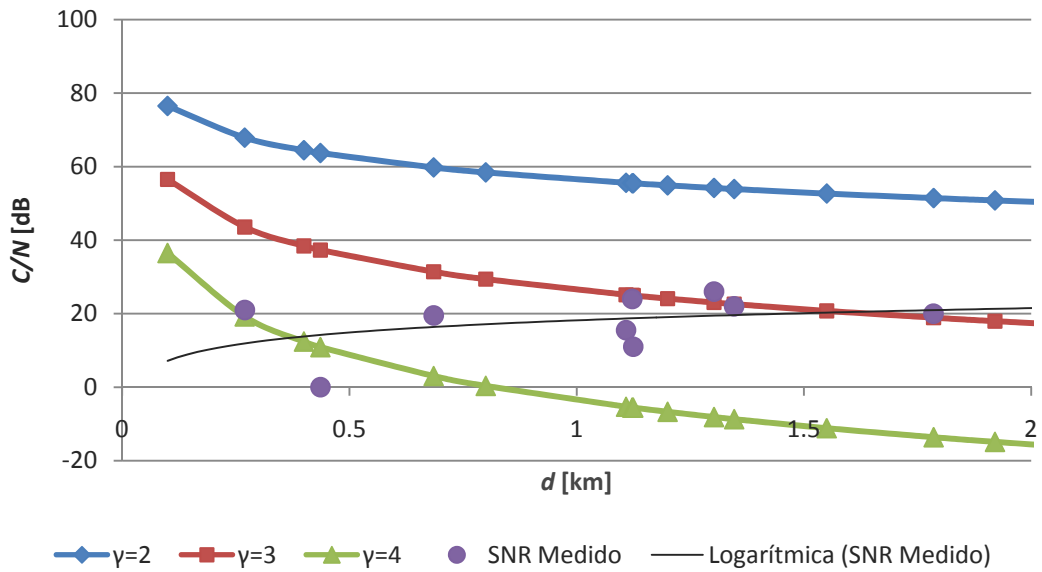


Figura 9.16 – SNR medido versus C/N calculado através do modelo de Friis.

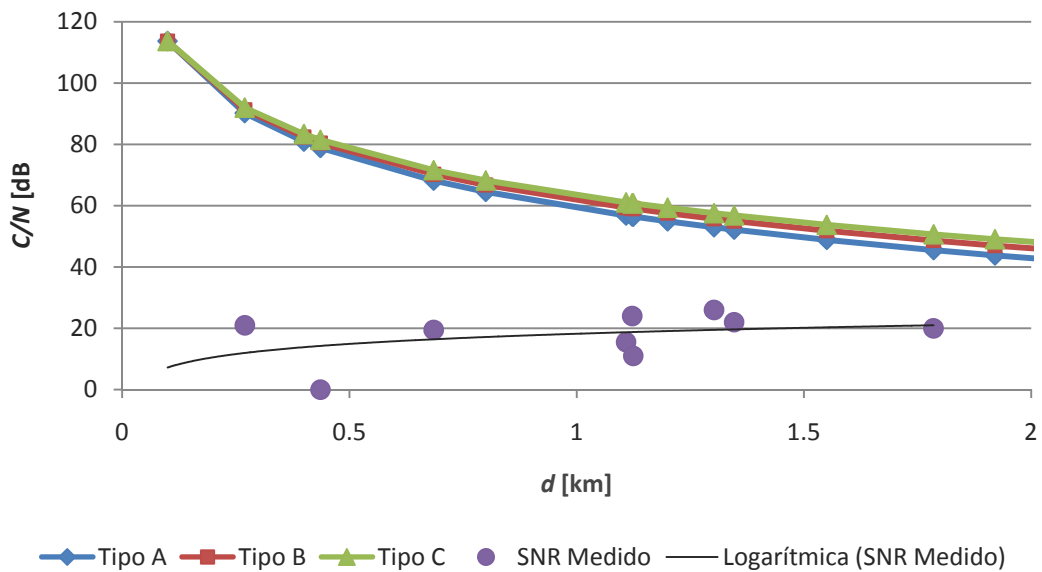


Figura 9.17 - SNR medido versus C/N calculado através do modelo de SUI.

Da análise das Figuras, a primeira conclusão à qual se pode chegar é que nenhum dos modelos se enquadra na gama de valores medidos. Este facto pode ser justificado pelo reduzido número de medições efectuadas. Por essa razão, não é possível tirar conclusões quanto à validade de um ou de outro modelo, para este teste de cobertura. No entanto, é possível verificar que os dados obtidos nas proximidades da FCS têm valores tanto ou mais baixos que os obtidos para distâncias superiores. Esta afirmação também justifica a

impossibilidade de analisar a validade dos modelos de propagação pois, em nenhum deles, o valor da relação C/N aumenta com a distância.

Finalmente, ao analisar-se mais atentamente o perfil e edificações do terreno onde foram registados os dados, verifica-se que o local mais próximo da FCS, ou seja, nos locais onde foram registados os valores mais reduzidos, o edifício do Hospital apresenta-se como uma grande obstrução do sinal. Constata-se que esta obstrução poderá justificar o reduzido valor do sinal obtido nessa área.

As ordens de modulação foram registadas para as duas pastas transferidas Figura 9.18 e 9.19, apresentam algumas diferenças significativas.

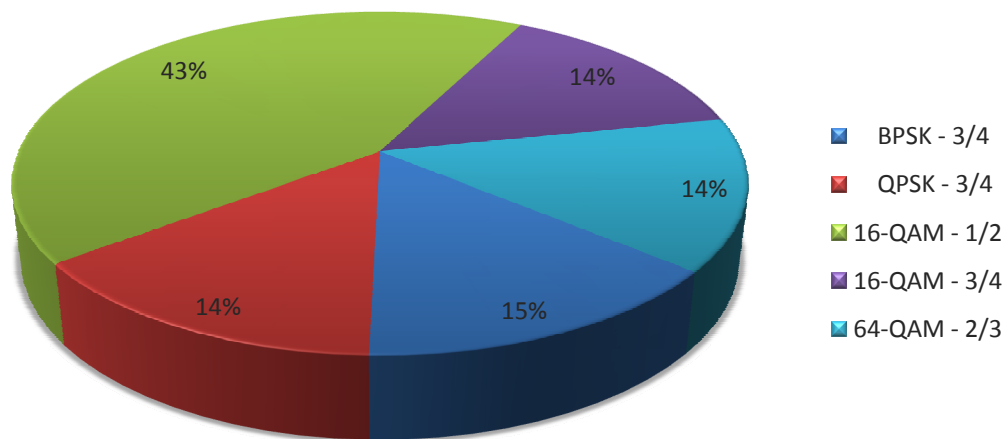


Figura 9.18 – Níveis de modulação registadas durante a transferência da pasta com o ficheiro de 300 MB.

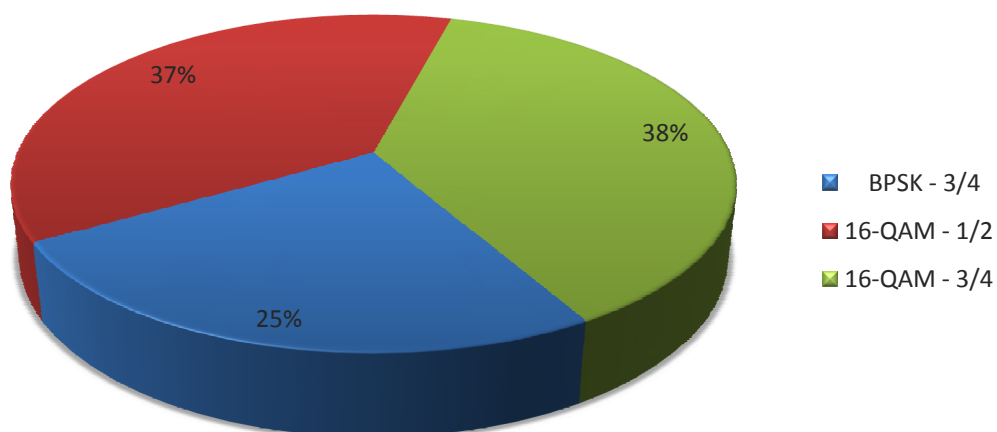


Figura 9.19 - Níveis de modulação registadas durante a transferência da pasta com vários ficheiros.

Este fenómeno pode ser explicado por uma imprecisa orientação da antena, da unidade subscritora. Uma vez que esta tem um ângulo de abertura muito reduzido e pelo facto da antena ter sido apontada sem auxílio de qualquer ferramenta, como um tripé, que garantisse que esta não se moveria, entre as duas transferências, justifica-se a diferença entre os valores da relação sinal-ruído e das ordens de modulação registadas. A razão apontada para a diferença entre o ritmo de transferência pode aqui também servir de explicação para as discrepâncias encontradas.

Finalmente, quanto à modulação, observa-se, no primeiro caso, que a ordem mais utilizada foi 16 – QAM – 1/2, em 43% da transferência, em seguida foi a BPSK – 3/4, em 15% e as ordens BPSK – 3/4, 16 – QAM – 3/4 e 64 – QAM – 1/2, em 14%. Durante a transferência da pasta contendo diversos ficheiros, observaram-se apenas três ordens de modulação, 16 – QAM – 3/4, em 38 %, 16 – QAM – 1/4, em 37 % e BPSK – 3/4, em 25%.

9.4 Sumário e conclusões

Neste Capítulo fez-se o dimensionamento celular a 5.4 GHz. Após a realização de um teste de cobertura verificou-se que os resultados obtidos eram muito inferiores aos esperados. Justificou-se esse resultado pela imperfeita orientação da antena da unidade subscritora. A existência de grandes obstruções, nos locais mais próximos da FCS, foi também indicada como uma das principais razões para o reduzido valor dos dados obtidos. O escasso valor de locais de teste e os péssimos resultados registados não permitiram realizar uma análise comparativa com o dimensionamento celular, através do modelo de SUI e de *Friis*.

10 Conclusões e sugestões para trabalho futuro

Neste trabalho apresentou-se o dimensionamento de uma rede ponto-a-ponto WiMAX e o dimensionamento de uma rede ponto-multiponto WiMAX na cidade da Covilhã, e um trabalho inicial de otimização de redes sem fios IEEE 802.16.

Procedeu-se à análise da obstrução da linha de vista para a localização das estações base e repetidores entre a FCS e as tutorias existentes nos hospitais Sousa Martins, na Guarda, e Amato Lusitano, em Castelo Branco. O dimensionamento da ligação ponto-a-ponto entre a FCS e a tutoria do Hospital Amato Lusitano, através do modelo de *Friis* modificado, permitiu esperar uma elevada qualidade da ligação e do valor do débito binário. O teste de campo possibilitou verificar esta hipótese e desempenho real da rede instalada, que tem suportado todas as exigências que lhe têm sido feitas. A discrepância entre os valores registados e os calculados, durante o teste de campo, podem ser justificados pela imperfeita orientação das antenas. Com o equipamento BreezeNET B14 foram medidos os ritmos de transferência e verificou-se que o valor máximo registado foi 9784 kbps, com o equipamento BreezeNET B100 esse valor poderá alcançar os 108 Mbps, se for utilizada uma largura de banda de 40 MHz. Realizou-se o dimensionamento de uma ligação ponto-a-ponto recorrendo-se aos modelos de *Friis* modificado e SUI, para o equipamento BreezeMAX 3000 da Alvarion. Concluiu-se que o modelo de SUI apresentou valores mais elevados, para a relação portadora-ruído, para um raio de cobertura inferior a 1.5 km. Observou-se, também, que, a partir dessa distância, o modelo de *Friis* modificado apresentou valores superiores. Apresentaram-se os resultados obtidos durante um teste de cobertura, para o qual foi necessário criar uma aplicação computacional, de modo a obter e registar, de forma automática, os dados referentes à qualidade do sinal recebido pela CPE, assim como, as coordenadas geográficas onde estes foram adquiridos. Os resultados obtidos e o planeamento celular a 3.5GHz permitiram validar o modelo de *Friis* modificado, para área metropolitana da Covilhã. No entanto, neste modelo, uma lacuna pode ser apontada, os diferentes valores do expoente de propagação não se enquadram na densidade de edificações encontradas na área de teste. Em primeiro lugar foi necessário analisar pormenorizadamente a zona de estudo e dividi-la em função da quantidade de edifícios ou obstruções que nela se encontravam. Foram assim consideradas duas áreas, uma com reduzida densidade de edificações, parte Este da zona de teste, local onde se encontra o aeródromo, a segunda onde se observaram muitas edificações, parte Oeste da área de estudo, onde se

encontram a área residencial da ANIL e edifícios com alturas elevadas. No quadrante Este calculou-se o expoente de propagação, para cada local testado, verificou-se que este valor varia entre 1.17 e 4.26, no entanto, o valor médio para os 1664 valores medidos é 2.46, mas o erro quadrático médio é 14.64, demasiado elevado. Omitindo os dados associados a locais onde existe obstrução, por exemplo, de uma ponte, determinou-se que o γ médio medido é de 2.31 e obteve-se, a partir da curva respectiva o valor do erro quadrático médio nesta área: 0.434.

No quadrante Oeste, o mesmo cálculo foi realizado e verificou-se que o expoente de propagação varia entre 1.92 e 3.33, o valor médio para os 1190 valores medidos é 2.8. Novamente, reutilizou-se este último valor de γ na equação de *Friis* modificada e verificou-se que o valor do erro quadrático foi 1.043. Nos dois quadrantes a modulação mais utilizada foi a QAM16 3/4. Conclui-se assim que, através de um teste de cobertura é possível calcular o expoente de propagação adequado para uma determinada área e, assim, otimizar o dimensionamento celular segundo o modelo de *Friis* modificado.

Foi feita uma optimização do débito binário, para transferências FTP, recorrendo aos parâmetros de configuração, das classes de serviço WiMAX, do equipamento BreezeMAX 3000. Após diversos testes, verificou-se um elevado aumento dos valores obtidos para as classes de serviço BE e NRT. Registaram-se taxas de transferências máximas de 773.5 kbps e 747.3 kbps e taxas médias de 744,9 kbps e 699.5 kbps, para as respectivas classes de serviço.

Realizou-se também o dimensionamento celular a 5.4 GHz, para o equipamento BreezeACCESS VL. Neste caso, voltaram a utilizar-se os modelos de *Friis* modificado e de SUI. Fez-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos neste dimensionamento e no anterior e concluiu-se que, o equipamento BreezeACCESS VL permitia obter valores superiores da relação portadora-ruído, porém, os ganhos das antenas é a principal razão para explicar este factor. Efectuou-se, também, um teste de cobertura, mas neste caso, devido ao modo de funcionamento do equipamento, não foi possível utilizar a ferramenta computacional desenvolvida. Por esta razão, apenas foram adquiridos dados em nove locais. Verificou-se que os resultados obtidos eram muito inferiores aos esperados. Justificou-se esse resultado pela imperfeita orientação da antena da unidade subscritora. A existência de grandes obstruções, nos locais mais próximos da FCS, foi também indicada como uma das principais razões para o reduzido valor dos dados obtidos. As ordens de modulação mais utilizadas durante este teste foram 16 - QAM 1/2, para a transferência do ficheiro de 300 MB, e 16 - QAM - 3/4,

para a transferência da pasta com diversos ficheiros de reduzida dimensão. O escasso número de locais de teste e os péssimos resultados registados não permitiram realizar uma análise comparativa com o dimensionamento celular, através do modelo de SUI e de *Friis* e os dados medidos.

Os resultados obtidos durante a investigação realizada permitiram averiguar as capacidades da norma IEEE 802.16 – 2004. Realizaram-se diversos testes de campo que permitiram verificar que o modelo de *Friis* modificado é válido para as bandas das frequências estudadas. Dado que, devido à impossibilidade de ter acesso a equipamento que suporte o WiMAX móvel, norma IEEE 802-16e, uma sugestão para futuros trabalhos será verificar se o modelo de propagação de *Friis*, assim como todas as considerações averiguadas nesta tese, continuam a ser válidas para o WiMAX móvel. O processo de optimização das ligações recorrendo às classes de serviço da norma deveria ser continuado e aprofundado. Para além de transferências FTP, aplicações como, por exemplo, VoIP e videoconferência, deveriam ser optimizadas através das suas classes de serviço. Se for disponibilizado equipamento WiMAX móvel, a classe ertPS também deveria ser estudada e utilizada para optimizar as aplicações para as quais se destina. Durante os testes de campo verificou-se que a imperfeita orientação do equipamento revelou-se prejudicial para a posterior análise dos resultados obtidos. De futuro, uma maior rigorosidade no alinhamento das antenas deverá ser assegurado. A análise do impacto e diferenças resultantes da aplicação de antenas com tecnologias SISO e MIMO serão, também, uma excelente proposta de estudo.

Anexos

Anexo A – Especificações do equipamento BreezeNET B

System Components

The BreezeNET B system includes a Base Unit (BU), typically installed at the main site, and a Remote Bridge (RB).

Each unit is comprised of a desktop or wall-mountable Universal Indoor Unit (IDU) and an outdoor unit (ODU). The IDU provides the interface to the user's equipment and is powered from the 110/220 VAC mains. The customer's data equipment is connected via a standard IEEE 802.3 Ethernet 10/100BaseT (RJ 45) interface. The indoor unit is connected to the outdoor unit via a Category 5 Ethernet cable. This cable carries Ethernet traffic between the indoor and the outdoor units, and also transfers power (54 VDC) and control from the indoor unit to the outdoor unit.

The BreezeNET B14 system is comprised of a BU-B14 Base Unit and an RB-B14 Remote Bridge, delivering a total link throughput up to 14 Mbps.

The BreezeNET B28 system is comprised of a BU-B28 Base Unit and an RB-B28 Remote Bridge, delivering a total link throughput up to 22 Mbps.

The ODU contains the processing and radio modules and are available either with an integral flat antenna or with a connection to a detached antenna (D models).

Currently available detached antennas include the following:

Table 1-2: 5 GHz Band Detached Antennas			
Antenna	Band (GHz)	Horizontal Beam Width	Gain
UNI-23-9	5.150-5.875	9°	23 dBi
UNI-28-4	5.150-5.875	4.5°	28 dBi

Specifications

Radio specifications

Table 1-3: Radio Specifications	
Item	Description
Frequency ¹	5.2 GHz Family: 5.150 – 5.350 GHz 5.3 GHz Family: 5.250 – 5.350 GHz 5.4 GHz Family: 5.470 – 5.725 GHz 5.8 GHz Family: 5.725 – 5.850 GHz
Operation Mode	Time Division Duplex (TDD)
Channel Bandwidth ¹	20, 40 (Turbo Mode) MHz
Central Frequency Resolution	10 MHz
ODU Integral Antenna	21dBi in the 5.150-5.875 GHz band. 10.5° horizontal x 10.5° vertical, vertical polarization, compliant with EN 302 085 V1.1.1 Range 1, Class TS 1, 2, 3, 4, 5
Detached 5 GHz Antennas ²	<ul style="list-style-type: none"> ■ UNI 23 9: 23dBi, 5.150-5.875 GHz, 9° horizontal x 9° vertical, vertical polarization, compliant with EN 302 085 V1.1.2 (2001-2002) ■ UNI-28-4: 28dBi, 5.150-5.875 GHz, 4.5° horizontal x 4.5° vertical, vertical polarization, compliant with EN 302 085 V1.1.2 (2001-2002).
Antenna Port (D-model ODU)	N-Type, 50 ohm
Max. Input Power (at antenna port)	-30dBm typical
Maximum Output Power ³	21 dBm.

Table 1-3: Radio Specifications			
Item	Description		
Sensitivity, typical (dBm at antenna port, PER<10%, 20 MHz bandwidth ⁴)	Modulation Level ⁵	Sensitivity	Min. SNR
	1	-89 dBm	6 dB
	2	-88 dBm	7 dB
	3	-86 dBm	9 dB
	4	-84 dBm	11 dB
	5	-81 dBm	14 dB
	6	-77 dBm	18 dB
	7	-73 dBm	22 dB
	8	-71 dBm	23 dB
Modulation	OFDM modulation, 64 FFT points; BPSK, QPSK, QAM16, QAM64		

¹ The actually available frequency channels and bandwidth are defined by the selected Sub-Band, which reflects the applicably regulatory constraints. For more details refer to [Show Country Dependent Parameters](#) on page 4-8).

² In 5.4 GHz units with a detached antenna, if the gain of the antenna (as inserted into Antenna gain field) is higher than 30dBm, then the Maximum EIRP can vary by more than +/-3dB. Since regulations in most countries limit the EIRP of units operating in the 5.4 GHz band, it is recommended to use detached antennas up to and including 28cBi.

³ The actually available maximum output power for each modulation level is defined by the selected Sub-Band, which reflects the applicably regulatory constraints. For some countries the power may also be limited by limitations on the maximum EIRP (also included in the Sub-Band parameters) and the Antenna Gain parameter. For more details refer to [Show Country Dependent Parameters](#) on page 4-8 and to [Transmit Power](#) on page 4-54. For information on specific HW and Country Code limitations, see the Country Codes document.

⁴ The sensitivity values are for a bandwidth of 20 MHz. When using a 40 MHz bandwidth ("Turbo mode"), the Sensitivity for each modulation level is higher by 3 dB.

⁵ Modulation Level indicates the radio transmission rate and the modulation scheme. Modulation Level 1 is for the lowest radio rate and modulation scheme.

Anexo B – Especificações do equipamento BreezeMAX

Specifications		
Radio & Modem		
Parameter		Value
Frequency	Base Station	Band a: UL: 3399.5-3453.5MHz; DL: 3499.5-3553.5MHz Band b: UL: 3450.0-3500.0MHz; DL: 3550.0-3600.0MHz
	CPE	UL: 3499.5-3600.0MHz DL: 3399.5-3500.0MHz
Radio Access Method		TDMA FDD
Modulation		OFDM 256 FFT with adaptive sub-carrier modulation: BPSK, QPSK, QAM 16, QAM 64.
Channel bandwidth		3.5MHz: 1.75MHz - software selectable
Base Station Multi Carrier bandwidth (via IF Mux)		14MHz
Duplexing Scheme		AU full duplex SU half duplex
Central frequency resolution		125KHz
Antenna (CPE)		17dB, 20°, Vertical & Horizontal polarization, compliant with ETSI EN 302 085 V1.1.2 TS3.
Maximum Output power (At antenna port)		AU: 28dBm (+/-1dB) SU: 20dBm (+/-1dB)
Sensitivity		-82/85 dBm for highest modulation (QAM 64) @ 3.5/1.75 Mhz
Typical values		-100/103 dBm for lowest modulation (BPSK) @ 3.5/1.75 Mhz
Data Communications		
Data		IEEE 802.3 CSMA/CD
Air Interface		IEEE 802.16a
VLAN support		IEEE 802.1Q
Traffic Classification		Layer 2 IEEE 802.1p, IP DiffServ Code Points DSCP
Networking Gateway CPE		
General Features		
WAN Connection Types		Static IP, Dynamic IP (DHCP), PPPoE and PPTP client
Routing		Static Route, Dynamic Route (RIP/2)
Firewall		NAT Firewall with SPI mode
NAT Functionality		NAT, Virtual Server, Special Application, DMZ Host
VPN		IPSec, PPTP & L2TP Pass-Through
DHCP		DHCP server for LAN and WLAN clients, DHCP client for WAN
Wireless Features (supported only with wireless networking gateway)		
Standard		IEEE 802.11b / 802.11g
Range Coverage		Indoors - approx. 35-100 meters
Security		WEP encryption - 64 Bit, 128 Bit
Voice Gateway CPE		
Interfaces		
Ethernet LAN		1 or 4 10/100 Base-TX RJ45 connectors
Telephony		1 or 2 RJ11 connectors for analog telephones
Security		
PipeLock™		Button for disconnection of the secure Ethernet LAN port
Packet Filter		Separates data, management and telephone traffic
VLAN		802.1Q+p
Authentication Per Registration		H225.0.0 RAS
Telephony and fax services		
VoIP Protocol		H.323, SIP
Internal Class 5 services		Call Waiting, 3-party call, call alteration, differentiated ringing tones
External Class 5 services		Activation of class 5 services supported by the IP-telephony system
G3 Fax		T.38
Calling number identification		FSK, DTMF
DTMF		In-band and out-band using H245 and H225 bi-directional
QoS for real-time services		
Speech Codecs		G711, G729ab
DiffServ		Level 3 (IP) mechanism for handling QoS
Electrical		
	Subscriber Unit	Base Station
Power Source	100-240 VAC, 50-60 Hz	-36 to -72 VDC
Power Consumption (max)	CPE ODU: 30W	BST PS: 200W each, up to 4 PS
	CPE IDU data: 40W	AU IDU 2 channels: 38 W
	CPE IDU data + voice: 50W	AU ODU: 38 W NPU: 70 W, PIU: 35 W, AVU: 24 W
Environmental		
	Indoor Unit	Outdoor Unit
Operating Temperature	0°C to 40°C	-40°C to 55°C
Operating Humidity	5%-95% non condensing	5%-95% non condensing, weather protected
Standard Compliance		
Type	Standard	
EMC	ETSI EN 301 489-1	
Safety	EN 60950 (CE), IEC 60 950 US/C (TUV)	
Environmental	FIS 300 019	
	part 2-1 T 1.2 & part 2-2 T 2.3 for indoor & outdoor	
	part 2-3 T 3.2 for indoor	
	part 2-4 T 4.1E for outdoor	
Radio	ETSI EN 301 021 V.1.4.1, ETSI EN 301 753 V.1.1.1	

Table 1-7: Radio Specifications

Item	Description		
Frequency	Unit/Band	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)
	AU-ODU-3.5a	3399.5-3453.5	3499.5-3553.5
	AU-ODU-3.5b	3450-3500	3550-3600
	SU-ODU-3.5	3399.5-3500	3499.5-3600
	AU-ODU-3.3e	3366-3385	3316-3335
	AU-ODU-3.3f	3381-3400	3331-3350
	SU-ODU-3.3	3366-3400	3316-3350
Operation Mode	AU, Micro Base Station	FDD, Full duplex	
	SU	FDD, Half Duplex	
Channel Bandwidth	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3.5 MHz ■ 1.75 MHz 		
Central Frequency Resolution	0.125 MHz		
Antenna Port (SU-ODU-E, AU-ODU)	N-Type, 50 ohm		
Max. Input Power (at antenna port)	AU-ODU	-60 dBm before saturation, -17 dBm before damage	
	SU-ODU	-20 dBm before saturation 0 dBm before damage	
Output Power (at antenna port)	AU-ODU	28 dBm +/-1 dB maximum. Power control range: 15dB 18-28 dBm @ +/-1 dB, 13-18 dBm @ +/-2 dB	
	SU-ODU	20 dBm +/-1 dB maximum, ATPC Dynamic range: 40 dB	

Table 1-7: Radio Specifications					
Item	Description				
Modulation	OFDM modulation, 256 FFT points; BPSK, QPSK, QAM16, QAM64				
FEC	Convolutional Coding: 1/2, 2/3, 3/4				
Bit Rate and Typical Sensitivity (PER=1%)	Channel Spacing	3.5 MHz bandwidth		1.75 MHz bandwidth	
	Modulation & Coding	Net Phy Bit Rate (Mbps)	Sensitivity (dBm)	Net Phy Bit Rate (Mbps)	Sensitivity (dBm)
	BPSK 1/2	1.41	-100	0.71	-103
	BPSK 3/4	2.12	-98	1.06	-101
	QPSK 1/2	2.82	-97	1.41	-100
	QPSK 3/4	4.23	-94	2.12	-97
	QAM16 1/2	5.64	-91	2.82	-94
	QAM16 3/4	8.47	-88	4.24	-91
	QAM64 2/3	11.29	-83.0	5.65	-86
	QAM64 3/4	12.71	-82.0	6.35	-85

Anexo C – Especificações do equipamento BreezeACCESS VL

Base Station

Each BS-AU module, together with its outdoor AU-D/E-BS-ODU radio unit and an antenna comprise an AU-D/E-BS Access Unit that serves a single sector. There are two types of Access Units, differing in the maximum number of Subscriber Units that they can serve:

- The AU-BS Access Unit can serve up to 512 Subscriber Units (124 when Data Encryption is used).
- The AUS-BS Access Unit can serve up to 8 SU-3 and/or SU-6 Subscriber Units.

The AU-D/E-BS-ODU outdoor unit contains the processing and radio modules and connects to an external antenna using a short RF cable.

E model units are supplied without an antenna.

D model units are supplied with a detached antenna, where the available antennas are listed in Table 1-2:

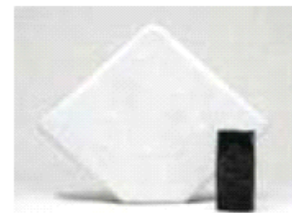


Antenna	Band (GHz)	Horizontal Beam Width	Gain (dBi)
AU-Ant-5G-16-60	5.150-5.875	60°	16
AU-Ant-5G-17-90	5.150-5.875	90°	17
AU-Ant-5G-15-120	5.150-5.875	120°	15
AU-Ant-4.9G-15-120	4.900-5.100	120°	15
AU-Ant-4.9G-9-Omni	4.900-5.100	360°	9
AU-Ant-5.8G-8-Omni	5.725-5.875	360°	8
AU-Ant 5.8G-14-120-UK (The antenna pattern complies with Ofcom's IR 2007 EIRP profiles)	5.725-5.850	120°	14

The BS-AU indoor module connects to the network through a standard IEEE 802.3 Ethernet 10/100BaseT (RJ 45) interface. The indoor module is connected to the outdoor unit via a Category 5E Ethernet cable. This cable carries Ethernet traffic between the indoor module and the outdoor unit, and also transfers power (54 VDC) and control from the indoor module to the outdoor unit.

Subscriber Unit

The Subscriber Unit (SU) installed at the customer premises enables the customer data connection to the Access Unit. The Subscriber Unit provides an efficient platform for high speed Internet and Intranet services. The use of packet switching technology provides the user with a connection to the network that is always on, enabling immediate access to services.



The Subscriber Unit comprises a desktop or wall-mountable Indoor Unit (IDU) and an outdoor unit that contains the processing and radio modules. Several ODU types are available to support a wide range of requirements, as detailed in Table 1-3:

SU Type	Antenna Description
SU-A-ODU	Vertically polarized high-gain flat antenna integrated on the front panel
SU-A-H-ODU	Horizontally polarized high-gain flat antenna integrated on the front panel
SU-E-ODU	A connection to an external antenna (not included)

For each ODU type, several models are available to support various end-users needs and applications, as detailed in Table 1-4:

SU Type	Description
SU-54-BD	A high-rate CPE that supports a full LAN
SU-6-1D	A medium rate CPE that supports a single Ethernet device (one MAC address)
SU-6-BD	A medium rate CPE that supports a full LAN
SU-3-1D	An entry level CPE that supports a single Ethernet device (one MAC address)

Radio Specifications

Table 1-5: Radio Specifications	
Item	Description
Frequency ¹	<ul style="list-style-type: none"> ■ 4.9 GHz Family: 4.900 – 5.100 GHz ■ 5.2 GHz Family: 5.150 – 5.350 GHz ■ 5.3 GHz Family: 5.250 – 5.350 GHz ■ 5.4 GHz Family: 5.470 – 5.725 GHz ■ 5.8 GHz Family: 5.725 – 5.850 GHz
Operation Mode	Time Division Duplex (TDD)
Channel Bandwidth ¹	<ul style="list-style-type: none"> ■ 20 MHz ■ 10 MHz (HW Revision C and higher)
Central Frequency Resolution	<ul style="list-style-type: none"> ■ 10 MHz for HW Revision A and B ■ 5 MHz for HW Revision C and higher
Antenna Port (AU-D-BS/SA-ODU)	N-Type, 50 ohm
Max. Input Power (at antenna port)	<ul style="list-style-type: none"> ■ HW Revision A: -48 dBm typical ■ HW Revision B and higher: -30 dBm typical
Maximum Output Power ²	21 dBm
SU-A-ODU Integral Antenna	21 dBi in the 5.150-5.875 GHz band, 20 dBi in the 4.9-5.1 GHz band. 10.5° horizontal x 10.5° vertical, vertical or horizontal polarization, compliant with EN 302 085 V1.1.1 Range 1, Class TS 1, 2, 3, 4, 5

¹ The actual available frequency channels and bandwidth are defined by the selected Sub-Band, which reflects the applicable regulatory constraints. For more details refer to section [4.2.2.4](#).

² The actual maximum available output power for each modulation level is defined by the selected Sub-Band, which reflects the applicable regulatory constraints. For some countries the power may also be limited by limitations on the maximum EIRP (also included in the Sub-Band parameters) and the Antenna Gain parameter. For more details refer to section [4.2.2.4](#) and to section [4.2.6.2.8.1](#). For information on specific HW and Country Code limitations, see the Country Codes document.

³ The sensitivity values are for a bandwidth of 20 MHz. When using a 10 MHz bandwidth, the sensitivity for each modulation level is 3 dB lower.

⁴ Modulation Level indicates the radio transmission rate and the modulation scheme. Modulation Level 1 is for the lowest radio rate and modulation scheme.

⁵ Modulation Level 8 is supported only in units with HW Revision B and above.

Referências

- [Ande03] Anderson, Harry R., *Fixed Broadband Wireless System Design*, John Wiley, San Francisco, California, USA, 2003.
- [AnGM07] G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall, USA, 2007.
- [BrCS94] R. Braden, D. Clark, S Shenker, *Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview*. RFC 1633, June 1994 (<http://www.ietf.org/rfc/rfc1633.txt>).
- [Carv05] Vítor Carvalho, *Concepção e Planeamento de Uma Rede Móvel WiMAX para Apoio à Emergência Médica na Beira Interior*, Projecto Final de Curso, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2005.
- [Chen04] Chen, Tao. *QoS Support in Packet Networks*, University of Trento, Italy, 2004 (<http://science.unitn.it/~tomasi/think/pdf/chp.ppt>).
- [Eklu02] Eklund, C., Marks, R. B., Stanwood, K. L., Wang, S., *IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access*. *IEEE C802.16.02/05*, 2002 (http://www.ieee802.org/16/docs/02/C80216-02_05.pdf).
- [Figu04] Figueiredo, F. L. P. D., *DiffMobil: Uma Arquitetura de Qualidade de Serviço Fim-a-Fim em Redes GPRS*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Ciência da Computação, Belo Horizonte, BR, 2004.
- [Hawa03] Hawa, Mohammed. *Stochastic Evaluation of Fair Scheduling with Applications to Quality-of-Service in Broadband Wireless Access Networks*, Ph.D Thesis, University of Kansas, Kansas, USA, 2003.

- [IEEE01] IEEE 802.16 Working Group, *Channels models for fixed wireless applications*, Document 802.16.3c-01/29r4, New York, New York, USA, July, 2001.
- [IEEE04] IEEE, *Draft IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, IEEE 802.16-REVd/D5, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, New York, USA, May 2004.
- [ITU03] International Telecommunications Union. *Birth of Broadband*, 2003. (<http://www.itu.int/osg/spu/publications/sales/birthofbroadband/>).
- [MARG07a] Marco Marques, João Ambrósio, Carlos Reis, David Gouveia, Daniel Robalo, Fernando J. Velez, Rui Costa, José Riscado, “Design and Implementation of IEEE 802.16 Radio Links with Relays”, in *Proc. of Conftele’ 2007 – 6th Conference on Telecommunications*, Peniche, Portugal, May 2007.
- [MARG07b] Marco Marques, João Ambrósio, Carlos Reis, David Gouveia, Daniel Robalo, Fernando J. Velez, Rui Costa, José Riscado, “Design and Planning of IEEE 802.16 Networks”, in *Proc. of PIMRC 2007 – 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Athens, Greece, Sep. 2007.
- [MARG07c] Marco Marques, João Ambrósio, Carlos Reis, David Gouveia, Daniel Robalo, Fernando J. Velez, Rui Costa, José Riscado, “Design and Planning of IEEE 802.16 Networks,” 10th Meeting of the Management Committee of COST290 – Traffic and QoS Management in Wireless Multimedia Networks, TD-07-047, Vienna, Austria, Oct. 2007.

- [MARG07d] M.Marques, J.Ambrósio, C.Reis, D.Gouveia, D. Robalo, F. J.Velez, Rui Costa, José Riscado, “Design and Implementation of IEEE 802.16 Radio Links with Relays,” 2nd Management Committee Meeting of COST2100 - Pervasive Mobile & Ambient Wireless Communications, TD-226, Lisbon, Portugal, Feb. 2007.
- [MARG07e] M. Marques, J. Ambrósio, C. Reis, D. Gouveia, D. Robalo, F. J. Velez, R. Costa, J. Riscado, “Design and Planning of IEE 802.16 Networks,” 3rd Meeting of the Management Committee of COST2100 - Pervasive Mobile & Ambient Wireless Communications, TD-326, Duisburg, Germany, Sep. 2007.
- [MaSa05] Rui Marcos; Dany Santos; *Planeamento de uma Rede sem Fios IEEE 802.16e no Concelho da Covilhã*, Projecto Final de Curso, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2005.
- [Nair04] Nair, G., Chou, J., Madejski, T., Perycz, K., Putzolu, D., Sydir, J., *IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning*. Intel Technology Journal. Volume 08, Issue 03. August 20, 2004. (http://www.intel.com/technology/itj/2004/volume08issue03/art04_ieee80216mac/vol8_art04.pdf).
- [Nuay07] Nuaymi, Loutfi, *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*, John Wiley & Sons, West Sussex, UK, 2007.
- [Ohrt05] Ohrtman, Frank, *WiMAX Handbook Building 802.16 Wireless Networks*, McGraw-Hill Communications, New York, EUA, 2005.
- [Rapp96] Rappaport, Theodore S., “*Wireless Communications: Principles and Practice*,” Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, Upper Saddle River, NJ, USA, 1996.

- [RARG07] Daniel Robalo, João Ambrósio, Carlos Reis, David Gouveia, Marco Marques, Fernando J. Velez, Rui Costa, Cláudio Comissário, José Riscado, Victor Cavaleiro, “Projecto e planeamento de redes sem fios IEEE 802.16”, *Actas da Engenharias’ 2007 – Inovação e Desenvolvimento*, Covilhã, Portugal, Nov. 2007.
- [RMAR08] Daniel Robalo, Marco Marques, João Ambrósio, Carlos Reis, David Gouveia, Fernando J. Velez, Rui Costa, Cláudio Comissário, José Riscado, Victor Cavaleiro, “Projecto e Instalação de Feixes Pré-WiMAX,” *Actas 3ª Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información*, Ourense, Espanha, Jun. 2008.
- [Rodr05] Rodrigues, Jorge, *WiMAX mirage ou realidade?*, PT Comunicações, Évora, Portugal, 2005.
- [Sale02] Salema, Carlos, *Feixes Hertzianos*, IST Press, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2002.
- [Shak06] Shakouri, M *WiMAX Enabling Personal Broadband*, WiMAX World Europe, Vienna, Àustria, May 2006.
- [SVC08a] Pedro Sebastião, F. Velez, Rui Costa, Daniel Robalo, Cláudio Comissário and Antonio Rodrigues, “Planning and Deployment of WiMAX and Wi-Fi Networks for Health Sciences Education,” submitted to *Teletronikk*, May 2008.
- [SVC08b] Pedro Sebastião, Fernando Velez, Rui Costa, Daniel Robalo, António Rodrigues, “Planning and Deployment of WiMAX Networks”, submitted to *WIRE – Wireless Personal Communications*, May 2008.

- [SVCR08c] Pedro Sebastião, Fernando J. Velez, Rui Costa, Daniel Robalo, Cláudio Comissário, António Rodrigues, “Planeamento e Desenvolvimento de Sistemas Celulares IEEE 802.16 – 2004,” *Actas 3ª Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información*, Ourense, Espanha, Jun. 2008.
- [SVTC07] Pedro Sebastião, Fernando Velez, Ricardo Tomé, Rui Costa, Daniel Robalo, António Grilo, António Rodrigues, Francisco Cercas, “User capacity based planning tool for Wi-Fi and WiMAX networks,” in *Proc. of the First WEIRD Workshop on WiMAX, Wireless and Mobility – held in conjunction with WWIC 2007 – 5th International Conference on Wired/Wireless Internet Communications*, Coimbra, Portugal, May 2007.
- [VCRM08a] Fernando J. Velez, Rui Costa, Daniel Robalo, Marco Marques, Cláudio Comissário, José Riscado, Victor Cavaleiro, Pedro Sebastião and Antonio Rodrigues, “WIMAX RADIO LINKS AND RELAYS FOR THE SUPPORT OF TELEMEDICINE AND BLENDED LEARNING,” submitted to *International Journal of Telemedicine and Applications*, May 2008.
- [VCRM08b] Fernando J. Velez, Rui Costa, Daniel Robalo, Marco Marques, Cláudio Comissário, José Riscado, Victor Cavaleiro, “Design and Installation of Pre-WiMAX Radio Links and Relays,” in *Proc. of WPMC 2008 - The 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, Lapland, Finland, Sep. 2008.
- [Vele95] F.J. Velez, *Uma Ferramenta Interactiva de Planeamento Microcelular para Comunicações Móveis em Ambiente Urbano na Banda das Ondas Milimétricas*, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 1995.
- [Wima04] WiMAX Forum, *WiMAX. IEEE 802.16 Standard and WiMAX Igniting Broadband Wireless Access*, White Paper, “WiMAX Forum™” and “WiMAX Forum CERTIFIED™”, 2004
(www.WiMAXforum.org/news/downloads/WiMAXWhitepaper.pdf).

- [Wima05] WiMAX Forum, Can WiMAX Address Your Applications?, White Paper, “WiMAX Forum™” and “WiMAX Forum CERTIFIED™”, 2005 (http://www.WiMAXforum.org/technology/downloads/Can_WiMAX_Address_Your_Applications_final.pdf).
- [Wima07] <http://www.WiMAXforum.org>, Jan. 2007.
- [Yagh03] YAGHOUBI, Hassan. *802.16 Broadband Wireless Access: the next big thing in wireless*. IDF Fall 2003 Conferences. Intel Broadband Wireless Division, Wireless Networking Group, Intel, Set, 2003.