

***Aos meus Pais, Irmãs, Namorada,  
Família, Amigos e Colegas***



**Trabalho orientado por:**

Prof. Dr. Fernando J. Velez  
Departamento de Engenharia Electromecânica  
Universidade da Beira Interior  
Covilhã, Portugal



# **Agradecimentos**

Com a conclusão deste trabalho, termino mais uma etapa da minha vida que é o Mestrado em Engenharia Electrotécnica na Universidade da Beira Interior.

Um agradecimento muito especial ao meu orientador Prof. Dr. Fernando J. Velez por toda a colaboração, pelo empenho, conhecimento, rigor científico e metodológico na realização desta tese. Quero agradecer também aos Engenheiros Daniel Robalo, Luís Borges, João Ferro, Rui Paulo e ao Mestre Orlando Cabral pela ajuda e colaboração bem como a toda a equipa do MobileMAN do Instituto de Telecomunicações laboratório da Covilhã.

Agradeço ao laboratório do STIG/UBI (Serviço Transfronteiriço de Informação Geográfica da Universidade da Beira Interior), no nome do Eng. José Riscado, por toda a atenção e ajuda prestada.

Para finalizar, não posso deixar de agradecer à minha família, em especial aos meus pais, à minha namorada, às minhas irmãs e a todos os meus colegas e amigos que me incentivaram e apoiaram ao longo desta etapa.



## Resumo

Esta dissertação apresenta o planeamento e optimização de uma rede sem fios IEEE 802.16-2004 no concelho e cidade da Covilhã. Os sistemas BWA (*Broadband Wireless Access*) surgiram como uma solução para o acesso à banda larga sem fios. Estes sistemas foram desenvolvidos para transmitir dados e serviços multimédia com diferentes requisitos de qualidade de serviço ao nível de redes cabladas.

Começa-se por realizar uma descrição geral do WiMAX, baseado nas normas IEEE 802.16-2004 e IEEE 802.16e, mostrando-se que apesar das diferenças as duas tecnologias não são oponentes, mas sim complementares de modo a fornecerem uma solução integrada para o acesso às redes de comunicação.

Em seguida abordaram-se os conceitos fundamentais para o planeamento celular, nomeadamente propagação, cobertura, reutilização e capacidade de sistema. Elaboraram-se bases de dados topográficos e de vector para o concelho e da cidade da Covilhã, no software WallMan do WinProp a partir de dados extraídos do ArcView, utilizando a base de dados do cenário e as características das antenas da BS (*Base Station*).

Realizou-se também uma abordagem analítica detalhada para a escolha adequada do padrão de reutilização com o objectivo de optimizar a cobertura, minimizar a interferência e aumentar a capacidade global do sistema. Verifica-se que o sistema apresenta resultados mais favoráveis para o padrão de reutilização com a utilização de antenas sectoriais em vez de antenas omnidireccionais, melhorando-se significativamente a capacidade de sistema, por exemplo, com um raio de cobertura máximo de 1.2 km, consegue-se passar de uma modulação 16-QAM  $\frac{1}{2}$ , que corresponde ao ritmo de transmissão de 4.23 Mbps, sem sectorização para a modulação 16-QAM  $\frac{3}{4}$  (5.64 Mbps), com sectorização. No UL sem a opção de sub-canalização alcançamos uma modulação de ordem inferior num raio até 2 km. No entanto, com a sub-canalização melhora-se o desempenho em termos de cobertura, alcançando-se aproximadamente 6 km de raio e passando-se de 2.82 Mbps para 4.23 Mbps.

A redução do padrão de reutilização corresponde de forma directa a um aumento de capacidade e não à melhoria de cobertura, embora de forma indirecta também permita melhorar a capacidade do sistema, dado que se utiliza a modulação e codificação adaptativa. Em conclusão, no concelho da Covilhã verifica-se que, com um padrão de reutilização igual a 7, é possível elaborar-se uma rede com desempenho adequado com dezoito estações base tri-sectoriais.

*Palavras chave:* WiMAX, planeamento celular, cobertura, padrão de reutilização, SNIR



## ***Abstract***

The purpose of this thesis is to present the optimization and network planning of a wireless IEEE 802.16-2004 network in the district and city of Covilhã. BWA (Broadband Wireless Access) systems appeared as a solution for broadband access through wireless network. These systems were developed to transmit data and multimedia services with different quality of service (QoS) requirements at the level of cabled network.

One starts by performing a general description of WiMAX based on the IEEE 802.16-2004 and IEEE 802.16e standards, showing that in spite of the differences the two technologies are not opponent but complementary in providing an integrated solution for BWA networks.

Then, the fundamental concepts of cellular planning, propagation, coverage, and reuse are addressed. Topographical and urban (vector data) databases were built for the district and city of Covilhã, in the WallMan of WinProp software, with data extracted from ArcView.

An analytical approach for the appropriate choice of the reuse pattern was also addressed with the objective of optimizing the coverage and minimizing the interference, and to increase the global system capacity.

Better results are achieved with the use of sector antennas instead of omnidirectional ones. The use of sectorization considerably improves system capacity, for instance, for a cell radius of 1.2 km, without sectorization, the results change from 16-QAM  $\frac{1}{2}$ , which corresponds to a maximum data rate of 4.23 Mbps, for the 16-QAM  $\frac{3}{4}$  modulation (5.64 Mbps). In UL without the option of sub-canalization, a lower order MCS (modulation and coding scheme) is achieved for a cell radius of 2 km, while with the use of sub-channelization better coverage is achieved, with a cell radius of approximately 6 km while improving from 2.82 to 4.23 Mbps.

The decrease of the reuse pattern directly corresponds to an increase of system capacity and not to the improvement of system capacity, although, in an indirect way, it also allows for the improvement of system capacity through the use of adaptive MCS. In a final analysis of the planning results in the district of Covilhã, one verifies that, with a reuse pattern equal to 7, it is possible to perform an appropriate network planning with eighteen tri-sectorial base stations.

*Keywords:* WiMAX, cellular planning, coverage, reuse pattern, SNIR



# Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
<i>Abstract</i> .....	ix
Índice.....	xi
Lista de Figuras.....	xvii
Lista de Tabelas.....	xxv
Lista de Abreviaturas.....	xxvii
Lista de Acrónimos.....	xxix
<b>Capítulo 1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objectivos e Motivação.....	2
1.2 Contribuições.....	2
1.3 Estrutura da Tese.....	3
<b>Capítulo 2 Norma IEEE 802.16-2004.....</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução.....	6
2.2 Características Técnicas da Norma IEEE 802.16-2004.....	7
2.3 Camada Física e MAC.....	8
2.3.1 WirelessMAN SCA.....	11
2.3.2 OFDM.....	11
2.3.3 OFDMA.....	12
2.4 Qualidade de Serviço na Norma IEEE 802.16-2004.....	13
2.5 Comparação entre WiFi e WiMAX.....	15
2.6 Sumário e Conclusões.....	17
<b>Capítulo 3 WiMAX Móvel.....</b>	<b>19</b>
3.1 Introdução.....	20
3.2 Camada Física da Norma IEEE 802.16.....	21
3.2.1 SOFDMA.....	21
3.2.2 Estrutura da Trama TDD.....	21
3.2.3 Características Avançadas da Camada PHY.....	23
3.2.4 Sub-Canalização.....	24
3.2.5 Ritmos de Transmissão na Camada PHY.....	26

3.3	Classes de Serviços da norma IEEE 802.16e.....	27
3.4	Gestão da Mobilidade na norma IEEE 802.16e.....	28
3.5	Vantagens Chaves do WiMAX Móvel.....	28
3.6	Aplicações da norma IEEE 802.16e.....	29
3.7	WiMAX Fixo versus WiMAX Móvel.....	29
3.8	Determinação dos requisitos de Cobertura.....	30
3.9	Determinação dos requisitos da Capacidade.....	31
3.10	Estações Base WiMAX Móvel.....	32
3.10.1	Configurações das Antenas.....	32
3.10.2	Estação Base com SIMO (1x2).....	33
3.10.3	Estação Base com MIMO (1x2).....	33
3.10.4	Estação Base com <i>Beamforming</i> Adaptativa.....	35
3.10.5	Estação Base com <i>Beamforming</i> Adaptativa e MIMO.....	37
3.11	Sumário e Conclusões.....	37
<b>Capítulo 4</b>	<b>Feixes WiMAX.....</b>	<b>39</b>
4.1	Introdução.....	40
4.2	Dimensionamento de Feixes WiMAX.....	41
4.2.1	Modelos.....	41
4.2.2	Resultados.....	45
4.3	Trabalho de Campo.....	46
4.3.1	Cenários.....	46
4.3.2	Resultados.....	48
4.3.3	Análise de Resultados.....	50
4.4	Sumário e Conclusões.....	50
<b>Capítulo 5</b>	<b>Conceitos Fundamentais no Planeamento Celular e Propagação.....</b>	<b>53</b>
5.1	Introdução.....	54
5.2	Conceito de Reutilização de Frequências.....	54
5.3	Interferência e Capacidade do Sistema.....	56
5.3.1	Interferência Co-canal.....	56
5.3.2	Interferência de Canal Adjacente.....	58
5.4	Relação Portadora-Interferência.....	59
5.5	Técnicas para Melhorar a Cobertura e a Capacidade do Sistema.....	63
5.5.1	Divisão de Células.....	63

5.5.2 Sectorização.....	64
5.6 Conceito de Reutilização de Frequências no WiMax Móvel.....	67
5.7 Reutilização de Frequência Fraccionária .....	69
5.8 Aspectos de Propagação.....	70
5.8.1 Modelos de Propagação.....	70
5.8.2 Fórmula de Friis Modificada.....	72
5.8.3 Modelo de Propagação SUI.....	73
5.9 Relação Portadora-Ruído Térmico.....	74
5.10 Sumário e Conclusões.....	76
<b>Capítulo 6 Aplicação da Ferramenta de Planeamento WinProp.....</b>	<b>77</b>
6.1 Introdução.....	78
6.2 Padrões de Antenas.....	78
6.3 Antenas Propostas.....	79
6.4 Bases de Dados.....	83
6.4.1 Conversão de Bases de Dados.....	84
6.4.1.1 Bases de Dados Topográficos.....	84
6.4.1.2 Bases de Dados Urbano.....	86
6.4.1.3 Planeamento de Rede Combinado.....	86
6.5 Modelos de Propagação no WinProp.....	88
6.5.1 Modelos Rurais.....	90
6.5.1.1 Modelo de Hata-Okumura.....	91
6.5.1.2 Método da Equação Parabólica.....	93
6.5.2 Modelos Urbanos.....	93
6.5.2.1 Modelo do COST 231-Walfisch-Ikegami.....	94
6.5.2.2 Fundamentos de Modelos de Raio Ópticos.....	98
6.6 Modelo <i>Dominant Path</i> .....	99
6.7 Sumário e Conclusões.....	102
<b>Capítulo 7 Planeamento e Optimização de uma Rede Sem Fios</b>	
<b>IEEE 802.16-2004.....</b>	<b>103</b>
7.1 O Concelho da Covilhã.....	104
7.2 Cálculo do Número de Células.....	105
7.3 Cálculo do Número de Canais.....	106
7.4 Cálculo de Cobertura e do Padrão de Reutilização.....	109

7.4.1 Cálculo do Padrão de Reutilização com Sub-canalização no UL.	114
7.4.2 Cálculo do Padrão de Reutilização com Sectorização.....	116
7.4.3 Cálculo do K com Sectorização e Sub-canalização.....	117
7.5 Minimização de Interferências.....	118
7.5.1 Cálculo da SNIR.....	119
7.5.2 Cálculo da SNIR com Sub-canalização no UL.....	121
7.5.3 Cálculo da SNIR com Sectorização.....	122
7.5.4 Cálculo da SNIR com Sectorização e Sub-canalização.....	124
7.5.5 Ritmo de Transmissão e Cobertura .....	125
7.6 Modelos de Propagação.....	130
7.6.1 Cálculo da Atenuação.....	130
7.6.2 Cálculo da Potência Recebida.....	131
7.6.3 Cálculo da Relação Portadora-Ruído.....	132
7.7 Análise dos Resultados.....	133
7.8 Cálculo da Relação Portadora-Interferência .....	134
7.9 Cálculo da Relação Portadora-Interferência com Sectorização.....	135
7.10 Optimização das Estações Base Recorrendo a Ferramenta GIS.....	137
7.11 Optimização da LoS.....	138
7.12 Cidade da Covilhã.....	143
7.13 Optimização da Localização das Estações Base.....	143
7.14 Sumário e Conclusões.....	146
<b>Capítulo 8 Simulação e Resultados Obtidos.....</b>	<b>148</b>
8.1 Cenário.....	149
8.2 Resultados de Propagação no Concelho da Covilhã.....	151
8.3 Análise da Rede no Concelho da Covilhã.....	154
8.4 Resultados Obtidos na Cidade da Covilhã.....	172
8.5 Resultados de Propagação na Cidade da Covilhã.....	172
8.5.1 Estação Base 1 – Residência Mista da UBI.....	173
8.5.2 Estação Base 2 – Aeródromo da Covilhã.....	176
8.5.3 Estação Base 3 – Rotunda do Covelo.....	180
8.6 Análise da Rede na Cidade da Covilhã.....	183
8.7 Tempos de Cálculos.....	200
8.8 Sumário e Conclusões .....	201

<b>Capítulo 9 Conclusões e Sugestões para Trabalho Futuro</b> .....	<b>203</b>
9.1 Conclusões.....	204
9.2 Sugestões de Trabalho Futuro.....	205
<b>Anexos</b> .....	<b>207</b>
ANEXO A: Características da Antena Sectorial WiMAX 3500 MHz 120°.....	207
ANEXO B: Características da Antena Omnidireccional GP 3500-XX.....	209
ANEXO C: Especificações de Rádio do Equipamento BreezeMAX 3000 da Alvarion..	211
ANEXO D: Cartas com os Locais LoS, no Concelho da Covilhã.....	213
<b>Referências</b> .....	<b>219</b>

## **Lista de Figuras**

<b>Figura 2.1</b> - Arquitectura básica do sistema BWA.....	7
<b>Figura 2.2</b> - Estrutura simplificada da trama TDD .....	9
<b>Figura 2.3</b> - Estrutura da trama MAC no esquema TDD.....	10
<b>Figura 2.4</b> - Estrutura de atribuição da norma IEEE 802.16-2004.....	10
<b>Figura 2.5</b> - Estrutura do símbolo OFDM no tempo.....	12
<b>Figura 2.6</b> - Descrição das frequências no OFDM .....	12
<b>Figura 2.7</b> - Descrição das frequências na tecnologia OFDMA [Wima04].....	13
<b>Figura 2.7</b> - Arquitectura de QoS da norma IEEE 802.16-2004.....	15
<b>Figura 3.1</b> - Estrutura da trama TDD para a norma IEEE 802.16e, extraído de [Wima06a].....	22
<b>Figura 3.2</b> - Sub-canalização em sistemas baseados em (a) OFDM e (b) OFDMA.....	25
<b>Figura 3.3</b> - Opções das estações base e móvel com configurações SIMO/MIMO.....	34
<b>Figura 4.1</b> - Ligação entre a FCS e a Serra da Gardunha.....	41
<b>Figura 4.2</b> - Ligação entre a Serra da Gardunha e Castelo Branco.....	41
<b>Figura 4.3</b> - Ligação entre a Serra da Gardunha e Castelo Branco.....	42
<b>Figura 4.4</b> - Ligação entre a Serra da Gardunha e tutoria HAL.....	42
<b>Figura 4.5</b> - Relação entre $C/N_{\min\_c\_desv}$ e $C/N$ para a modulação QPSK.....	44
<b>Figura 4.6</b> - Relação entre $C/N_{\min\_c\_desv}$ e $C/N$ para a modulação 16-QAM.....	45
<b>Figura 4.7</b> - Relação entre $C/N_{\min\_c\_desv}$ e $C/N$ para a modulação 64-QAM.....	45
<b>Figura 4.8</b> - Topologia da rede PTP utilizada no trabalho de campo.....	46
<b>Figura 4.9</b> - Comparação entre o $C/N$ teórico e $C/N$ prático.....	49
<b>Figura 4.10</b> - Equipamento BreezeNet B na estação repetidora (Serra da Gardunha).....	50
<b>Figura 5.1</b> - Conceito de reutilização de frequências.....	54
<b>Figura 5.2</b> - Grandezas envolvidas na reutilização de frequências.....	56
<b>Figura 5.3</b> - Factor de redução de interferência co-canal para padrões de reutilização com $k$ células ( $k = 1, 3, 4, 7$ e $12$ ).....	57
<b>Figura 5.4</b> - Interferência co-canal (pior caso), extraído de [Yaco02].....	62
<b>Figura 5.5</b> - Conceito de divisão de células.....	64
<b>Figura 5.6</b> - Técnica de sectorização para (a) sectores de $120^\circ$ e (b) sectores de $60^\circ$ .....	65
<b>Figura 5.7</b> - Determinação da relação $C/I$ com sectorização, no pior caso ( $k = 7$ ) com sectores de $120^\circ$ , extraído de [Yaco02].....	66

<b>Figura 5.8</b> - Padrão de reutilização de frequência igual a 1 com 3 sectores por estação base [Wima06b].....	67
<b>Figura 5.9</b> - Padrão de reutilização de frequências igual a 3 com 3 sectores por estação base [Wima06b].....	68
<b>Figura 5.10</b> - Exemplo de frequências operacionais para cada zona geográfica num esquema de reutilização de frequência fraccionária.....	70
<b>Figura 6.1</b> - Diagramas de radiação 3D da antena sectorial WiMAX 3500 MHz 120° ....	80
<b>Figura 6.2</b> - Diagramas de radiação vertical e horizontal da antena sectorial WiMAX 3500 MHz 120° .....	80
<b>Figura 6.3</b> – Diagrama de radiação vertical tirada do <i>datasheet</i> da antena omnidireccional GP3500-xx em formato *.bmp .....	81
<b>Figura 6.4</b> - Janela do AMan depois de importarmos o bitmap.....	81
<b>Figura 6.5</b> - Bitmap do diagrama de radiação da antena omnidireccional depois de ampliado e centrado.....	82
<b>Figura 6.6</b> - Diagrama de radiação vertical da antena omnidireccional GP3500-xx.....	82
<b>Figura 6.7</b> - Base de dados topográfica do concelho da Covilhã em 2D.....	84
<b>Figura 6.8</b> - Base de dados topográfica do concelho da Covilhã em 3D.....	85
<b>Figura 6.9</b> - Base de dados topográfica da cidade da Covilhã e arredores.....	85
<b>Figura 6.10</b> - Base de dados de edifícios urbanos (dados de vector) da cidade da Covilhã.....	86
<b>Figura 6.11</b> - CNP rural - urbano da cidade da Covilhã.....	87
<b>Figura 6.12</b> - Típico cenário para uma predição de terreno, extraído de [Winp07].....	90
<b>Figura 6.13</b> - Definição da altura efectiva da antena de emissão.....	91
<b>Figura 6.14</b> - Cenário de propagação num ambiente urbano típico, extraído de [Winp07].....	94
<b>Figura 6.15</b> - Típica situação de propagação em áreas urbanas e definição dos parâmetros utilizados no modelo COST-Walfisch-Ikegami.....	95
<b>Figura 6.16</b> - Estrutura da árvore construída através de algoritmo, extraído de [WaSW07].....	100
<b>Figura 6.17</b> - Função para as perdas de interacção.....	101
<b>Figura 7.1</b> - Área em estudo: concelho da Covilhã.....	104
<b>Figura 7.2</b> - Número de células necessárias para cobrir o concelho da Covilhã em	

função do raio de cobertura.....	106
<b>Figura 7.3</b> - Interferência co-canal no UL (pior caso).....	109
<b>Figura 7.4</b> - Relação interferência-ruído em função do raio de cobertura sem sub- Canalização.....	112
<b>Figura 7.5</b> - Variação do factor de reutilização co-canal com o raio de cobertura da célula para vários níveis de modulação/codificação no DL .....	113
<b>Figura 7.7</b> - Variação do padrão de reutilização com o raio de cobertura da célula para vários níveis de modulação/codificação no DL .....	114
<b>Figura 7.7</b> - Variação do padrão de reutilização com o raio da célula para vários níveis de modulação com sectorização.....	113
<b>Figura 7.8</b> - Variação do padrão de reutilização com o raio de cobertura da célula para vários níveis de modulação/codificação com sub-canalização no UL.....	115
<b>Figura 7.9</b> - Relação interferência-ruído em função do raio de cobertura com sub- Canalização.....	115
<b>Figura 7.10</b> - Variação do padrão de reutilização com o raio de cobertura da célula para vários tipos de modulação/codificação com sectorização no DL .....	117
<b>Figura 7.11</b> - Variação do padrão de reutilização com o raio de cobertura da célula para vários níveis de modulação/codificação com sectorização e sub- canalização no UL.....	118
<b>Figura 7.12</b> - Variação de SNIR com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula no DL .....	119
<b>Figura 7.13</b> - Variação de SNIR com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula no UL.....	119
<b>Figura 7.14</b> - Variação do ritmo de transmissão com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula no DL.....	120
<b>Figura 7.15</b> - Variação do ritmo de transmissão com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula no UL.....	120
<b>Figura 7.16</b> - Variação de SNIR com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula com sub-canalização no UL.....	121
<b>Figura 7.17</b> - Variação do ritmo de transmissão com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula com sub-canalização no UL.....	122
<b>Figura 7.18</b> - Variação de SNIR com o factor de reutilização para vários raios de	

cobertura da célula com sectorização de 120° .....	123
<b>Figura 7.19</b> - Variação do ritmo de transmissão com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula com sectorização de 120°.....	123
<b>Figura 7.20</b> - Variação da SNIR com o factor de reutilização para vários raios de cobertura da célula com sectorização de 120° e sub-canalização .....	124
<b>Figura 7.21</b> - Variação do ritmo de transmissão com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula s com sectorização de 120° e sub-canalização .....	124
<b>Figura 7.22</b> - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 2 km no DL .....	125
<b>Figura 7.23</b> - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 2 km no UL sem sub-canalização .....	126
<b>Figura 7.24</b> - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 3 km no DL.....	126
<b>Figura 7.25</b> - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 3 km no UL sem sub-canalização.....	126
<b>Figura 7.26</b> - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 2 km no UL com a sub-canalização.....	127
<b>Figura 7.27</b> - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 3 km no UL com a sub-canalização .....	127
<b>Figura 7.28</b> - Atenuação, segundo o modelo Friis em função do raio de cobertura da célula, segundo a fórmula de Friis .....	130
<b>Figura 7.29</b> - Atenuação em função do raio de cobertura da célula, segundo o modelo COST 231 Hata.....	131
<b>Figura 7.30</b> - Potência de recebida em função do raio de cobertura da célula, segundo a fórmula de Friis.....	132
<b>Figura 7.31</b> - Potência recebida em função do raio de cobertura da célula, segundo o modelo COST 231 Hata.....	132
<b>Figura 7.32</b> - Relação portadora-ruído, $C/N$ , em função do raio de cobertura da célula, segundo a fórmula de Friis.....	133
<b>Figura 7.33</b> - Relação portadora-ruído, $C/N$ , em função do raio de cobertura da célula, segundo o modelo COST 231 Hata .....	133
<b>Figura 7.34</b> - Valores de $C/I$ em função de $\gamma$ e do padrão de reutilização.....	135

<b>Figura 7.35</b> - Valores de $C/I$ em função de $\gamma$ e do padrão de reutilização com sectores de $120^\circ$ .....	136
<b>Figura 7.36</b> - Valores de $C/I$ em função de $\gamma$ e do padrão de reutilização com sectores de $60^\circ$ .....	136
<b>Figura 7.37</b> - Modelo digital de terreno do concelho da Covilhã.....	139
<b>Figura 7.38</b> - Modelo digital de terreno do concelho da Covilhã com a representação das dezoito estações base.....	141
<b>Figura 7.39</b> - O concelho da Covilhã com as zonas de LoS representadas a verde e as zonas de NLoS representadas a vermelho [MaSa05].....	142
<b>Figura 7.40</b> - Disposição das estações base para proposta de um esquema de ligação sem fios para com o <i>backhaul</i> .....	142
<b>Figura 7.41</b> - Área urbana da Covilhã, extraído da carta militar nº 235 do IGeoE, escala 1/25000.....	143
<b>Figura 7.42</b> - Modelo digital do terreno (TIN) [Cava01].....	144
<b>Figura 7.43</b> - Área urbana da Covilhã com estações base colocadas em locais estratégicos extraído da carta militar nº235 do IGeoE, escala 1/25000.....	145
<b>Figura 7.44</b> - Zona urbana da Covilhã com as zonas de NLoS com as 3 BSs, representadas a vermelho [MaSa05].....	145
<b>Figura 8.1</b> - Concelho da Covilhã com as dezoito estações base.....	149
<b>Figura 8.2</b> - Locais com e sem linha de vista da BS 15.....	151
<b>Figura 8.3</b> - Predição da intensidade de campo na BS 15.....	152
<b>Figura 8.4</b> - Predição da atenuação na BS 15.....	152
<b>Figura 8.5</b> - Predição da potência na BS 15.....	153
<b>Figura 8.6</b> - Variação da potência com a distância na BS15.....	153
<b>Figura 8.7</b> - Predição da potência recebida máxima no DL.....	155
<b>Figura 8.8</b> - Potência recebida máxima em função da distância.....	155
<b>Figura 8.9</b> - Análise de cobertura.....	156
<b>Figura 8.10</b> - Predição de ritmos de transmissão máximos alcançáveis.....	157
<b>Figura 8.11</b> - Variação do ritmo de transmissão máxima com a distância.....	158
<b>Figura 8.12</b> - Probabilidade de ritmo de transmissão máxima alcançável.....	158
<b>Figura 8.13</b> - Probabilidade cumulativa do ritmo de transmissão máxima alcançável.....	158
<b>Figura 8.14</b> – Cartas com as células “melhor servidor ( <i>best server</i> ).....	160
<b>Figura 8.15</b> – Cartas com o número de portadoras recebidos na SS no DL.....	162

<b>Figura 8.16</b> - Variação de número de portadoras em função dos MCS.....	164
<b>Figura 8.17</b> - Cartas com o número de canais recebidos na SS no DL.....	165
<b>Figura 8.18</b> – Variação de número de canais recebidos em função do MCS.....	166
<b>Figura 8.19</b> - Cartas com predição do SNIR no DL.....	167
<b>Figura 8.20</b> - Variação da SNIR em função da distância.....	168
<b>Figura 8.21</b> - Cartas com probabilidade de recepção no DL.....	169
<b>Figura 8. 22</b> - Cartas com a potência de $T_x$ necessária a BS para alcançar a SS.....	170
<b>Figura 8.23</b> - Base de dados topográfica da área urbana da Covilhã com as três BSs de três sectores.....	172
<b>Figura 8.24</b> - Residência Universitária mista da UBI e a vista do sector 1 da BS 1.....	173
<b>Figura 8.25</b> - Locais com e sem linha da BS 1.....	174
<b>Figura 8.26</b> - Predição da intensidade de campo na BS 1.....	174
<b>Figura 8.27</b> - Predição da atenuação na BS 1.....	175
<b>Figura 8.28</b> - Predição da potência na BS 1.....	175
<b>Figura 8.29</b> - Variação da potência com a distância na BS1.....	176
<b>Figura 8.30</b> - Aeródromo da Covilhã e a vista de um dos sectores da BS 2.....	177
<b>Figura 8.31</b> - Locais com e sem linha da BS2.....	177
<b>Figura 8.32</b> - Predição da intensidade de campo na BS 2.....	178
<b>Figura 8.33</b> - Predição da atenuação na BS 2.....	178
<b>Figura 8.34</b> - Predição da potência na BS 2.....	179
<b>Figura 8.35</b> - Potência em função da distância na BS 2.....	180
<b>Figura 8.36</b> - Rotunda do Covelo e a vista de um dos sectores da BS 3.....	180
<b>Figura 8.37</b> - Locais com e sem linha da BS 3.....	181
<b>Figura 8.38</b> - Predição da intensidade de campo na BS 3.....	181
<b>Figura 8.39</b> - Predição da atenuação na BS 3.....	182
<b>Figura 8.40</b> - Predição da potência na BS 3.....	182
<b>Figura 8.41</b> - Potência em função da distância na BS 3.....	183
<b>Figura 8.42</b> - Predição da potência recebida máxima no DL.....	184
<b>Figura 8.43</b> - Cobertura na cidade da Covilhã com as três BSs.....	184
<b>Figura 8.44</b> - Predição de ritmos de transmissão máximos alcançáveis.....	185
<b>Figura 8.45</b> - Ritmo de transmissão máxima em função da distância medida na BS 1....	186
<b>Figura 8.46</b> - Ritmo de transmissão máxima em função da distância medida na BS 2....	186
<b>Figura 8.47</b> - Ritmo de transmissão máxima em função da distância medida na BS 3....	186

<b>Figura 8.48</b> - Probabilidade de ritmo de transmissão máxima alcançável.....	187
<b>Figura 8.49</b> - Probabilidade cumulativa do ritmo de transmissão máxima alcançável.....	187
<b>Figura 8.50</b> – Cartas com as células “melhor servidor”(best server).....	188
<b>Figura 8.51</b> - Cartas com o número de portadoras recebidos na SS no DL.....	190
<b>Figura 8.52</b> - Número de portadoras em função do MCS.....	192
<b>Figura 8.53</b> - Cartas com o número de canais recebidos na SS no DL.....	193
<b>Figura 8.54</b> - Número de canais recebidos em função do MCS.....	194
<b>Figura 8.55</b> – Cartas com a predição do SNIR no DL.....	195
<b>Figura 8.56</b> - SNIR em função da distância.....	196
<b>Figura 8.57</b> - Cartas com a probabilidade de recepção (SS alcançar a BS).....	197
<b>Figura 8.58</b> - Potência de $T_x$ necessária a BS para alcançar a SS	198
<b>Figura D.1</b> - Locais com linha de vista da estação base 1.....	213
<b>Figura D.2</b> - Locais com linha de vista da estação base 2.....	213
<b>Figura D.3</b> - Locais com linha de vista da estação base 3.....	213
<b>Figura D.4</b> - Locais com linha de vista da estação base 4.....	214
<b>Figura D.5</b> - Locais com linha de vista da estação base 5.....	214
<b>Figura D.6</b> - Locais com linha de vista da estação base 6.....	214
<b>Figura D.7</b> - Locais com linha de vista da estação base 7.....	215
<b>Figura D.8</b> - Locais com linha de vista da estação base 8.....	215
<b>Figura D.9</b> - Locais com linha de vista da estação base 9.....	215
<b>Figura D.10</b> - Locais com linha de vista da estação base 10.....	216
<b>Figura D.11</b> - Locais com linha de vista da estação base 11.....	216
<b>Figura D.12</b> - Locais com linha de vista da estação base 12.....	216
<b>Figura D.13</b> - Locais com linha de vista da estação base 13.....	217
<b>Figura D.14</b> - Locais com linha de vista da estação base 14.....	217
<b>Figura D.15</b> - Locais com linha de vista da estação base 15.....	217
<b>Figura D.16</b> - Locais com linha de vista da estação base 16.....	218
<b>Figura D.17</b> - Locais com linha de vista da estação base 17.....	218
<b>Figura D.18</b> - Locais com linha de vista da estação base 18.....	218

## **Lista de Tabelas**

<b>Tabela 2.1</b> - Comparação entre as normas IEEE 802.11 e IEEE 802.16 [Wima04].....	16
<b>Tabela 3.1</b> - Parâmetros de SOFDMA [Wima06a].....	21
<b>Tabela 3.2</b> - Modulações/codificações suportados na norma IEEE 802.16e [Wima06a].	24
<b>Tabela 3.3</b> - Ritmos de Tx da camada PHY para várias larguras de banda do canal.....	26
<b>Tabela 3.4</b> - Classes de serviço suportadas no WiMAX Móvel [JeAR07].....	27
<b>Tabela 3.5</b> - Classes de Aplicações do IEEE 802.16e.....	29
<b>Tabela 3.6</b> - WiMAX fixo versus WiMAX móvel.....	30
<b>Tabela 3.7</b> - Passos para calcular os requisitos da densidade de dados [Wima06b].....	32
<b>Tabela 3.8</b> - Opções das antenas avançadas [Wima06b].....	33
<b>Tabela 3.9</b> - <i>Beamforming</i> adaptativa versus SIMO (1x2) a 2500 MHz [Wima06b].....	36
<b>Tabela 4.1</b> - $C/N_{min}$ em função da modulação e do ber [Sale03].....	44
<b>Tabela 4.2</b> - Especificações de rádio do equipamento BreezeNET B [Alva06].....	47
<b>Tabela 4.3</b> - Resultados obtidos nos testes.....	49
<b>Tabela 5.1</b> - Valores de $q$ , para as várias configurações celulares.....	58
<b>Tabela 5.2</b> - Constantes do modelo IEEE 802.16 (SUI).....	74
<b>Tabela 6.1</b> - Resumo dos tipos de ambiente, bases de dados e os respectivos modelos de propagação [Winp07].....	83
<b>Tabela 6.2</b> - Definição de diferentes tipos de células.....	89
<b>Tabela 7.1</b> - Frequências disponíveis na banda dos 3.5 GHz do equipamento da Alvarion.....	107
<b>Tabela 7.2</b> - Correspondência entre SNR e a modulação do equipamento.....	108
<b>Tabela 7.3</b> - Valores da assíptota vertical sem sub-canalização.....	112
<b>Tabela 7.4</b> - Valores da assíptota vertical com sub-canalização.....	116
<b>Tabela 7.5</b> - Ritmo de transmissão e esquemas de modulação/codificação vs raio de cobertura da célula de 2 e 3 km sem sub-canalização.....	128
<b>Tabela 7.6</b> - Ritmo de transmissão e esquemas de modulação/codificação vs raio de cobertura da célula de 2 e 3 km com sub-canalização.....	128
<b>Tabela 7.7</b> - Percentagem de utilização de MCS para o raio de cobertura das células de 2 km.....	129
<b>Tabela 7.8</b> - Percentagem de utilização de MCS para o raio raio de cobertura da célula de 3 km.....	129

<b>Tabela 7.9</b> - Ritmos de transmissão médio para raios de cobertura da célula de 2 e 3 Km.....	129
<b>Tabela 7.10</b> - Localização e Características das BSs para o concelho da Covilhã	140
<b>Tabela 7.11</b> - Local e características das BSs para a área urbana da Covilhã	146
<b>Tabela 8.1</b> - Parâmetros utilizados na simulação.....	150
<b>Tabela 8.2</b> - Esquemas de modulação e codificação com o SNR mínimo e os respectivos ritmos de transmissão [Alva05].....	154
<b>Tabela 8.3</b> - Tempos de cálculos para o concelho da Covilhã.....	200

## **Lista de Abreviaturas**

$\gamma$	Expoente de propagação
$\gamma_{chuva}$	Atenuação específica devido à chuva
$\gamma_{nevoeiro}$	Atenuação específica devido ao nevoeiro
$\gamma_{neve}$	Atenuação específica devido à neve
$\lambda$	Comprimento de onda
$A$	Atenuação em espaço livre
$a(h_m)$	Factor de correcção da MS
$A_H$	Área do hexágono
$b_{rf}$	Largura de banda efectiva do ruído
$c$	Velocidade da luz
$c$	Número de locais da estação base no <i>cluster</i>
$C_F$	Factor de correcção
$C/I$	Relação Portadora-interferência
$C/N$	Relação Portadora-ruído
$C/N+I$	Relação Portadora-ruído mais Interferência
$d$	Distância
$D$	Distância de reutilização
$D$	Distancia entre células co-canais
$d_0$	Distância mínima entre as antenas
$D_k$	Distância da <i>k-ésima</i> interferência
$f$	Frequência
$LB$	Largura de banda
$G_E$	Ganho da antena de emissão
$I_k$	Potência recebida a uma distância
$h_b$	Altura da estação base em relação ao solo
$h_m$	Altura da antena receptora em relação ao solo
$I$	Potência da interferência co-canal
$n$	Número de canais requeridos de frequência única
$n_0$	Ruído térmico
$N$	Ruído aos terminais da antena

$N_f$	Factor de ruído no receptor
$N_o$	Ruído térmico em unidades logarítmicas
$p$	Potência recebida
$P_o$	Potência recebida num ponto de referência
$P_e$	Potência emitida
$P_r$	Potência recebida
$R$	Raio das células
$R_b$	Ritmo de Transmissão
$R_{cc}$	Factor de reutilização co-canal
$R_x$	Recepção
$s$	Número de sectores por local de estação base
$s$	Factor de distribuição estatística do tipo lognormal
$T$	Temperatura
$T_b$	Comprimento útil do símbolo
$T_g$	Tempo de guarda
$T_s$	Comprimento total do símbolo
$T_{sub}$	Tempo da sub-portadora
$T_x$	Transmissão
$X_f$	Factor de correcção para a frequência
$X_h$	Factor de correcção para a altura da estação base
$Z$	Número de anéis interferentes

## Lista de Acrónimos

<b>3G</b>	<i>Third Generation</i>
<b>AAS</b>	<i>Advanced Antenna Systems</i>
<b>ACK</b>	<i>ACKnowledge or ACKnowledgement</i>
<b>ADSL</b>	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
<b>AES</b>	<i>Advanced Encryption Standard</i>
<b>AMan</b>	<i>Antenna Manager</i>
<b>AMC</b>	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
<b>ANACOM</b>	<i>Autoridade Nacional de COMunicações</i>
<b>ATM</b>	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
<b>BE</b>	<i>Best Effort</i>
<b>BF</b>	<i>BeamForming</i>
<b>BPSK</b>	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
<b>BS</b>	<i>Base Station</i>
<b>BTC</b>	<i>Block Turbo Code</i>
<b>BW</b>	<i>BandWidth</i>
<b>BWA</b>	<i>Broadband Wireless Access</i>
<b>CBC</b>	<i>Cipher Block Chaining</i>
<b>CBR</b>	<i>Constant Bit Rate</i>
<b>CC</b>	<i>Convolutional Coding</i>
<b>CCM</b>	<i>Counter with Cipher-block chaining Message authentication code</i>
<b>CDMA</b>	<i>Code Division Multiple Access</i>
<b>CID</b>	<i>Connection IDentifier</i>
<b>CNP</b>	<i>Combined Network Planning</i>
<b>CPE</b>	<i>Customer Premise Equipment</i>
<b>CQICH</b>	<i>Channel Quality Information CHannel</i>
<b>CRC</b>	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
<b>CTC</b>	<i>Convolutional Turbo Code</i>
<b>DL</b>	<i>DownLink</i>
<b>DoA</b>	<i>Direction of Arrival</i>
<b>DOCSIS</b>	<i>Data Over Cable Service Interface Specification</i>

<b>DP</b>	<i>Dominant Path</i>
<b>DSL</b>	<i>Digital Subscriber Line</i>
<b>EAP</b>	<i>Extensible Authentication Protocol</i>
<b>EIRP</b>	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
<b>ErtPS</b>	<i>Extended real-time Packet Service</i>
<b>FBSS</b>	<i>Fast Base Station Switching</i>
<b>FCH</b>	<i>Frame Control Header</i>
<b>FCS</b>	Faculdade de Ciências da Saúde
<b>FDD</b>	<i>Frequency Division Dyuplex</i>
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<b>FTP</b>	<i>File Transfer Protocol</i>
<b>FWA</b>	<i>Fixed Wireless Access</i>
<b>GPC</b>	<i>Grant Per Connection</i>
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Services</i>
<b>GPSS</b>	<i>Grant Per Subscriber Station</i>
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile communications</i>
<b>GUI</b>	<i>Graphical User Interface</i>
<b>HARQ</b>	<i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i>
<b>HHO</b>	<i>Hard Handover</i>
<b>HPC</b>	Hospital Pêro da Covilhã
<b>HTTP</b>	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i>
<b>LAN</b>	<i>Local Area Network</i>
<b>LDPC</b>	<i>Low Density Parity Ckeck codes</i>
<b>LMDS</b>	<i>Local Multipoint Distribution System</i>
<b>LoS</b>	<i>Line of Sight</i>
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i>
<b>MAN</b>	<i>Metropolitan Area Network</i>
<b>MAP</b>	<i>Media Access Protocol</i>
<b>MCS</b>	<i>Modulation and Coding Schemes</i>
<b>MDHO</b>	<i>Macro Diversity HandOver</i>
<b>MIMO</b>	<i>Multiple Input Multiple Output</i>

<b>MMDS</b>	<i>Multichannel Multipoint Distribution Services</i>
<b>MobileMAN</b>	<i>Mobile IP for Broadband Wireless Metropolitan Area Networks</i>
<b>MPEG</b>	<i>Motion Picture Experts Group</i>
<b>MRC</b>	<i>Maximal Ratio Combining</i>
<b>MS</b>	<i>Mobile Station</i>
<b>NLoS</b>	<i>Non Line of Sight</i>
<b>NRT</b>	<i>Non Real Time</i>
<b>nrtPS</b>	<i>non-real-time Polling Service</i>
<b>ODU</b>	<i>Outdoor Data Unit</i>
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
<b>OLoS</b>	<i>Obstrucyed LoS</i>
<b>PDU</b>	<i>Protocol Data Unit</i>
<b>PHY</b>	<i>PHYSical layer</i>
<b>PMP</b>	<i>Ponto-Multiponto</i>
<b>PTP</b>	<i>Ponto-a-Ponto</i>
<b>PUSC</b>	<i>Partial Usage of SubChannels</i>
<b>QAM</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i>
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
<b>RT</b>	<i>Real Time</i>
<b>RTG</b>	<i>Receive/transmit Transition Gap</i>
<b>rtPS</b>	<i>Real-time Polling Service</i>
<b>SCa</b>	<i>Single Carrier</i>
<b>SIM</b>	<i>Subscriber Identity Module</i>
<b>SIMO</b>	<i>Single-Input Multiple-Output</i>
<b>SISO</b>	<i>Single-Input Single-Output</i>
<b>SM</b>	<i>Spatial Multiplexing</i>
<b>SNR</b>	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
<b>SNIR</b>	<i>Signal to Noise plus Interference Ratio</i>
<b>SOFDMA</b>	<i>Scalable OFDMA</i>
<b>SS</b>	<i>Subscriber Station</i>
<b>STC</b>	<i>Space Time Coding</i>

<b>SUI</b>	<i>Stanford University Interim</i>
<b>TDD</b>	<i>Time Division Duplex</i>
<b>TDM</b>	<i>Time Division Multiplexing</i>
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i>
<b>UBI</b>	Universidade da Beira Interior
<b>UGS</b>	<i>Unsolicited Grant Service</i>
<b>UL</b>	<i>UpLink</i>
<b>UL-MAP</b>	<i>UpLink Map Message</i>
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telephone System</i>
<b>USIM</b>	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
<b>UTD</b>	<i>Uniform Theory of Diffraction</i>
<b>UTP</b>	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
<b>VoIP</b>	<i>Voice over IP</i>
<b>WCDMA</b>	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
<b>WiFi</b>	<i>Wireless Fidelity</i>
<b>WiMAX</b>	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
<b>WLAN</b>	<i>Wireless Local Area Network</i>
<b>WMAN</b>	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>