

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Projecto de uma rede WiMAX para a FEUP**

Fernando Paulo Vieira Romão

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Telecomunicações

Orientador: Prof. Doutor Manuel Alberto Pereira Ricardo

24 de Fevereiro de 2010

© Fernando Paulo Vieira Romão, 2009

A Dissertação intitulada

“PROJECTO DE UMA REDE WIMAX PARA A FEUP”

foi aprovada em provas realizadas em 24/Fevereiro/2010

o júri



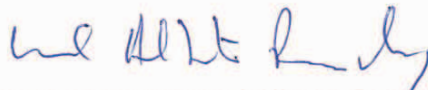
Presidente Professor Doutor Mário Jorge Moreira Leitão

Professor Associado do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Rui Luís Andrade Aguiar

Professor Associado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da  
Universidade de Aveiro



Professor Doutor Manuel Alberto Pereira Ricardo

Professor Associado do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.



AUTOR: FERNANDO PAULO VIEIRA ROMÃO

*Página em branco*

# Resumo

Este documento consiste no projecto de uma rede WiMAX para servir a comunidade da FEUP. O objectivo é criar um acesso via rádio à rede de dados da FEUP e seus recursos informáticos. O trabalho desenvolvido especifica as características deste sistema para que os utilizadores residentes num raio de 1 km da FEUP, ou utilizadores móveis que estejam nesta área, o possam usar. O planeamento rádio realizado à luz do quadro legal português do espectro radioeléctrico prevê o alcance rádio proporcionado pela *base station* WiMAX e propõe algumas alternativas. Foi também realizado um *site survey* com equipamento WiMAX e os resultados obtidos foram analisados e comparados com os valores teóricos.

O serviço de comunicação a disponibilizar será integrado na gestão do Centro de Informática do Prof. Correia de Araújo (CICA) da FEUP, e permitirá o acesso transparente aos utilizadores *eduroam* aproveitando a rede e o sistema de autenticação actualmente em uso. A rede de dados da FEUP também é avaliada e alterada de modo a permitir a integração da nova rede de rádio WiMAX e alguns serviços suportados, tais como o serviço VoIP.

*Página em branco*

# Abstract

*This document describes the project of a WiMAX network planned to serve the FEUP's community. The aim of the project is to create a wireless network which can serve as another access to the FEUP network and their computing resources. The work specifies the characteristics of the radio system for residents within a radius of 1 km from FEUP or mobile users in the area. The radio network planning carries the view of the Portuguese legal framework for the spectrum management and provides the dimensioning of WiMAX system. The measures obtained by the site survey with WiMAX equipment are analyzed and compared with theoretical values.*

*The communication service that could be created with this work will be integrated in the management of the Prof. Correia de Araújo Computer Center of FEUP, and would allow user transparent access by taking advantage of the authentication system currently in use. The FEUP network is addressed in order to enable the integration of the new radio network and some of its services, such as VoIP.*

*Página em branco*

# Agradecimentos

A realização de um projecto deste tipo é um caminho que se percorre solitário, de nós depende quase tudo, mas é também um caminho através do qual encontramos pessoas dispostas a apoiarem-nos e é a essas pessoas que pretendo deixar registado o meu modesto tributo.

Agradeço, em primeiro lugar, à Ana, à Eva e a Leonor, pelo seu apoio, pelos seus sorrisos e por contribuírem, com a sua alegria contagiante, para que os obstáculos com que me deparei fossem diminuído à medida que os encarava.

Quero também registar um agradecimento do meu irmão durante o site survey.

Ao Prof. Doutor Manuel Ricardo, Orientador da dissertação, agradeço a sua disponibilidade e orientações neste trabalho e também o saber transmitido nas salas Faculdade na Rua dos Bragas e nas salas do novo edifício.

À Direcção do IDMEC pela autorização da instalação da BS no edifício do IDEMC/INEGI e ao Prof. Doutor Francisco Freitas da direcção do IDEMC pela sua disponibilidade durante a realização do site survey.

Ao Centro de Informática Prof. Correia de Araújo pelo patrocínio, pelo apoio e pelas condições proporcionadas para a realização deste trabalho.

Finalmente, quero deixar expresso o meu muito obrigado aos meus pais que sempre me apoiaram nas várias etapas do meu percurso académico.

*Página em branco*

# Índice

<b>Resumo</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Agradecimentos</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Abreviaturas e Símbolos</b> .....	<b>xv</b>
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento do trabalho .....	2
1.2 - Objectivos do trabalho.....	3
1.3 - Metodologia .....	3
1.4 - Resultados relevantes .....	4
1.5 - Estrutura do relatório .....	4
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>5</b>
Descrição do WiMAX .....	5
2.1 - O canal de transmissão sem fios .....	5
2.2 - Camada Física .....	6
2.3 - Camada MAC .....	10
2.4 - Características avançadas.....	14
2.5 - Implementação de uma rede WiMAX .....	16
2.6 - Site survey .....	18
2.7 - Enquadramento Legal .....	19
2.8 - Conclusão .....	20
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>22</b>
Rede WiMAX para a FEUP .....	22
3.1- Requisitos .....	22
3.2- Escolha dos edifícios .....	23
3.3- Análise de equipamento .....	24
3.4- Planeamento rádio .....	26
3.5- Integração com a rede de dados da FEUP .....	36

3.6- Conclusão .....	39
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>40</b>
Avaliação do Trabalho e Análise de resultados.....	40
4.1- Análise do trabalho.....	40
4.2- Site Survey .....	42
4.3- Avaliação da Metodologia .....	47
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>49</b>
Conclusão .....	49
<b>Referências .....</b>	<b>50</b>

## Lista de figuras

Figura 2.1 - Símbolo OFDM com adição do prefixo cíclico [6]. .....	7
Figura 2.2 - Tipo de portadoras do OFDM onde são modulados os símbolos OFDM [6]. .....	7
Figura 2.3 - Estrutura da trama OFDMA em TDD [8]. .....	9
Figura 2.4 - Esquema do processo de codificação dos dados no canal de transmissão [9]. ....	10
Figura 2.5 - Camadas protocolares do standard IEEE 802.16 [2]. .....	11
Figura 3.1 - Integração da BS na rede da FEUP .....	38
Figura 4.1 - Mapa do campus da FEUP com sectores de 60°. .....	43
Figura 4.2 - Base Station WiMAX instalada na cobertura do edifício do IDMEC/INEGI .....	44
Figura 4.3 - Valores da potência recebida e locais de medida no Google Earth. ....	46

## Lista de tabelas

Tabela 2.1- Descrição das classes de serviço definidas pelo IEEE802.16 .....	13
Tabela 3.1 - Resumo das características dos edifícios candidatos.....	23
Tabela 3.2 - Principais especificações da BS MicroMAXe do fabricante Airspan e da BS BreezeMAX Extreme 5000 do fabricante Alvarion. ....	25
Tabela 3.3 - Classificação dos serviços a disponibilizar e respectivo tráfego.....	27
Tabela 3.4 - Tabela com a sensibilidade e a modulação respectiva dos equipamentos. ....	30
Tabela 3.5 - Link budget do Downlink para uma frequência de 3600 MHz. ....	30
Tabela 3.6 - Link budget para o UL com uma frequência de 3600 MHz.....	31
Tabela 3.7 - Débitos esperados para em função da modulação e da distância. Parametrização da ligação física do WiMAX. ....	32
Tabela 3.8 - <i>Link budget</i> do <i>downlink</i> para uma frequência de 5600 MHz. ....	33
Tabela 3.9 - <i>Link budget</i> para o UL com uma frequência de 5600 MHz.....	33
Tabela 3.10 - Débitos esperados para em função da modulação e da distância. Parametrização da ligação física do WiMAX. ....	34
Tabela 3.11 - <i>Link budget</i> do <i>downlink</i> para uma frequência de 5600 MHz.....	35
Tabela 3.12 - Link budget para o UL com uma frequência de 5600 MHz .....	35
Tabela 4.1 - Valores medidos durante a realização do site survey. ....	45
Tabela 4.2 - Valores da potência recebida teórica e real. ....	46

# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

ARN	Autoridade Reguladora Nacional
BPSK	Binary phase-shift keying
BS	Base Station
BWA	Broadband wireless access
CEPT	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i>
CICA	Centro de Informática Prof. Correia de Araújo
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
EAP	<i>Extensible Authentication Protocol</i>
ECC	<i>Electronic Communications Committee</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
ICP-ANACOM	Autoridade Nacional de comunicações
IDMEC	Instituto de Engenharia Mecânica
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO	<i>Multiple In Multiple Out</i>
MRC	<i>Maximum Radio Combining</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
QAM	<i>Quadrature amplitude modulation</i>
QNAF	Quadro Nacional de Atribuição de Frequências
QPSK	<i>Quadrature phase-shift keying</i>
RADIUS	<i>Remote Authentication Dial In User Service</i>
RF	Rádio Frequência

SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i>
SS	<i>Subscriber Station</i>
STC	<i>Space Time Encoder</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
xDSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
WF	Wimax Forum

# Capítulo 1

## Introdução

O desenvolvimento acentuado da Internet nas últimas 2 décadas motivou a evolução das tecnologias de acesso de banda larga. Deste os primeiros modems de 2400 baud até ao acesso por fibra óptica a 100 Mbit/s, passando pelo ainda maioritário acesso o xDSL. Actualmente, 79% do acesso à banda larga fixa na Europa é xDSL e, apesar do acesso por fibra óptica ter aumentado 26% face ao ano de 2007, apenas menos de 2,5% dos acessos usam esta tecnologia alternativa. A banda larga fixa teve uma penetração na Europa de 22,9 acessos por 100 habitantes, confirmando a situação de crescimento dos últimos anos [1].

Simultaneamente ao crescimento da Internet nas últimas duas décadas, o serviço de comunicação móvel também teve um crescimento acentuado e, no último ano, a penetração na Europa foi de 119 por 100 habitantes. Se associarmos o crescimento dos serviços de Internet e serviço telefónico móvel, encontra-se a motivação para o desenvolvimento de tecnologias de acesso de banda larga móvel, pois a procura destes serviços móveis tem aumentado significativamente. Em 2008, a penetração da banda larga móvel foi de 13 acessos por 100 habitantes, verificando-se que 51% do total das receitas dos operadores é da responsabilidade dos serviços móveis, tendo a banda larga móvel facturado 4 mil milhões de Euros em 2008, valor superior ao registado nos EUA.

Os milhões facturados motivam o investimento e desenvolvimento da tecnologia para o acesso à banda larga sem fios via rádio (BWA). Em 1999, o IEEE, organismo responsável pela normalização de uma série de protocolos e tecnologias, criou um grupo de trabalho para a área da banda larga sem fios e, em 2001, aprovou o primeiro standard. Em 2004 foi aprovado o standard IEEE 802.16-2004 que reviu e consolidou as primeiras versões IEEE 802.16-2001, IEEE 802.16a-2003 e IEEE 802.16c-2002 [2]. Em 2001 foi também criado o WiMAX Forum (WF), uma organização industrial sem fins lucrativos instituída para promover e certificar a interoperabilidade e compatibilidade entre os produtos IEEE 802.16. O WF tem actualmente mais de 500 membros e registou o nome WiMAX, acrónimo de *Worldwide Interoperability for*

*Microwave Access*, sendo o nome pelo qual é designada a tecnologia baseada no IEEE 802.16. Em todo o mundo existem 475 sistemas WiMAX conhecidos pelo WiMAX Forum [3].

Os dados estatísticos referenciados em [1] revelam também um aumento na procura de serviços com mobilidade, sustentado pela oferta de equipamentos (telefones móveis, PDAs e portáteis) que permitem a interface com a Internet. A baixa de preço dos portáteis nos últimos anos e a integração de placas WIFI ou modems 3G promovem a oferta de acessos à Internet não só por parte dos operadores, como também por estabelecimentos comerciais, cafés, restaurantes e também pelas instituições de ensino. Estas últimas, modernizadas para cativar estudantes com oferta dos melhores serviços para educação, têm vindo a instalar hotspots WIFI nas suas instituições e a promover a utilização do serviço.

A FEUP, através do Centro de Informática Prof. Correia de Araújo (CICA), foi uma das instituições piloto, a nível nacional, a instalar um hotspot Wi-Fi em 2002, contando actualmente com 179 pontos de acesso sem fios, com uma cobertura plena nas áreas comuns [4]. O uso intenso do serviço WIFI na FEUP aponta para uma grande aptidão dos utilizadores da FEUP para novos serviços na área das TIC. O CICA, promotor na comunidade do uso das TIC e da inovação dos seus serviços, pretendeu avaliar a tecnologia WiMAX como suporte a mais um serviço de acesso à rede de dados e respectivos serviços, apoiando este trabalho de implementação de uma rede WiMAX na FEUP.

## **1.1 - Enquadramento do trabalho**

O CICA é considerado um serviço de informática de grande dimensão [5] e tem como principais áreas de actuação a manutenção da rede de dados e dos serviços informáticos da FEUP. A rede de dados tem cerca de 6000 pontos de acesso e 300 switches interligados numa rede Ethernet Gigabit de 18 routers L2/L3. A rede sem fios conta, como já se referiu, com 179 pontos de acesso WIFI e, em 2008, autenticaram-se acima de 6000 utilizadores da FEUP e mais de 1000 utilizadores externos. Os serviços oferecidos são vários, nomeadamente o serviço de impressão, o apoio ao utilizador, as salas de informática, os serviços de acesso remoto (ex. VPN), o sistema de informação (SIGARRA), o serviço VoIP, o GridFEUP (4 clusters de elevado desempenho).

O CICA tem por missão “disponibilizar e assegurar a operacionalidade de recursos e serviços de informática para toda a comunidade da FEUP, promovendo a sua utilização e inovação”. O CICA procura constantemente inovar os seus serviços de modo a melhorar continuamente o serviço que presta e, nesse sentido, interessou-se pela possibilidade de ter um serviço que permitisse aos utilizadores aceder à rede de dados e seus serviços através de uma ligação WiMAX. O presente trabalho vai de encontro a este interesse, pretendendo ao longo do seu desenvolvimento analisar a viabilidade deste serviço. O trabalho destina-se a propor uma implementação que dote a comunidade da FEUP de um serviço inovador.

## 1.2 - Objectivos do trabalho

Este trabalho pretende descrever a realização de um projecto para implementação de uma rede sem fios WiMAX que permita à comunidade da FEUP ligar-se à rede de dados. O seu objectivo final é avaliar a viabilidade de execução de um projecto que proporcione mais um serviço inovador à comunidade.

A aquisição de know-how nesta área é também um dos propósitos do estudo. A avaliar a recente tecnologia com poucas e recentes implementações, saber das suas necessidades legais e logísticas. O custo de uma solução é outro factor importante a ter em conta para análise dos benefícios e justificar o investimento.

O projecto deverá abranger um raio de um 1 km envolvente à FEUP onde se espera que habitem docentes, alunos e funcionários. Os utilizadores deverão usar as credenciais e sistemas de autenticação actuais, de modo a evitar a instalação de mais sistemas que impliquem maior complexidade, assim como dificuldades e custos de gestão e manutenção acrescidos. A solução deverá permitir diferenciação dos serviços oferecidos e dos utilizadores para implementar políticas de QoS para a satisfação dos utentes. A segurança no acesso não poderá ficar descurada, pois disso depende também a segurança da rede da FEUP.

## 1.3 - Metodologia

Na primeira fase estudou-se a tecnologia WiMAX recorrendo ao standard, aos documentos do WiMAX Forum e a documentos apresentados por fabricantes de equipamento.

Para avaliar o sucesso da solução foi necessário perceber se existia um mercado para o serviço. Para o efeito averiguou-se o número de alunos, funcionários e docentes da FEUP residentes dentro da área de cobertura do serviço. Numa fase posterior será necessário identificar os interessados em subscrever o serviço.

O espectro rádio eléctrico está sujeito a regulamentação e não pode ser usado contrariando a lei publicada. Por isso, foi essencial estudar o quadro legal para apresentar uma solução que cumpra a legislação em vigor. Para obter a melhor cobertura rádio foi necessário encontrar o melhor local para a instalação da antena que assegurasse, não só, a melhor propagação do sinal, mas também os aspectos logísticos associados à instalação e manutenção da BS. A escolha do local pode ser avaliada não só pelas condições físicas dos locais, como pelas condições de propagação de sinal a partir desse ponto. O planeamento rádio poderá ser feito usando software de planeamento rádio cujo resultado poderá ser comprovado por um site survey. A pesquisa dos equipamentos no mercado teve em consideração as diferenças técnicas e custos associados, assim como a garantia e a fiabilidade

do fabricante e representantes. Por fim, foi necessário especificar a integração da BS com a rede da FEUP, as soluções para a segurança e a inclusão de alguns serviços das FEUP.

Depois do projecto pronto deverá proceder-se à análise da solução proposta, dos seus benefícios e custos. Após a implementação da solução deverá verificar-se se os objectivos traçados foram atingidos, nomeadamente certificar-se de que as zonas de cobertura não têm problemas, que os débitos propostos são alcançados, que a qualidade do serviço é satisfatória e garantir que os mecanismos de segurança estão activos e a funcionar. Este é o método que se pensa ser adequado para a realização deste projecto e que se procurou, dentro das limitações existentes, executar.

## **1.4 - Resultados relevantes**

Uma BS localizada na FEUP com uma potência PIRE de 56 dBm e uma frequência de 3600 MHz é suficiente para fornecer um serviço de acesso à rede da FEUP num raio de 1 km com um débito mínimo de download de 5 Mbit/s.

Para a utilização da faixa de frequências não licenciadas dos 5400 MHz aos 5725 MHz, a implementação poderá estar comprometida devido às restrições de potência impostas pelo regulador.

## **1.5 - Estrutura do relatório**

Este capítulo pretende orientar o leitor no contexto deste trabalho dando-lhe uma visão dos seus objectivos e enquadramento bem como metodologia seguida para a sua realização. A estrutura do relatório segue a metodologia usada no desenvolvimento do trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se tecnologia WiMAX estudada segundo as normas do IEEE e WF e fundamentada nos documentos destas duas organizações. Neste capítulo, a questão legal também é estudada com base em informação disponibilizada pela ICP-ANACOM.

O terceiro capítulo descreve o trabalho realizado. Começa por apresentar os requisitos da solução pretendida, fundamentando a escolha do local para a instalação da BS, seguindo-se uma análise aos equipamentos WiMAX disponíveis no mercado. Termina com o planeamento rádio da rede WiMAX e com a integração com a rede da FEUP.

No quarto capítulo faz-se uma avaliação da metodologia e analisam-se os resultados do trabalho efectuado, assim como os resultados do site survey realizado.

O último capítulo apresenta as conclusões do trabalho.

## Capítulo 2

### Descrição do WiMAX

Neste capítulo é descrito o standard 802.16 para o leitor entender as particularidades que suportam os benefícios do WiMAX. A abordagem inicia-se pelo nível físico e o nível de dados e posteriormente são descritas as características avançadas que aumentam o potencial da tecnologia. A criação de uma rede WiMAX é também abordada. Por fim, apresenta-se o quadro legal actual sobre as comunicações electrónicas de banda larga via rádio.

#### 2.1 - O canal de transmissão sem fios

Ao contrário de um cabo de cobre ou de uma fibra óptica, o meio de transmissão para as comunicações sem fios é um canal difícil de modelizar pelas variações no espaço e no tempo que nele ocorrem e que não são controláveis. Variações devido às características do ar (humidade, chuva, etc.), às interferências no meio, por fontes conhecidas ou não, e devido a obstáculos à propagação do sinal. Estas características do meio provocam variações na potência e na fase do sinal recebido em relação ao emitido, prejudicando a recepção e o processamento do sinal.

A transmissão neste meio é afectada por 3 factores significativos, a saber: *Pathloss*, *Shadowing* e *Fading*. Quando falamos em *Pathloss* referimo-nos à perda de potência do sinal desde o local de emissão até ao local de recepção. Este factor depende não só da distância, como também do ambiente de propagação do sinal. Existem vários modelos empíricos e analíticos que caracterizam a propagação do sinal em diversos ambientes, eg. rurais, citadinos e outros. Estes modelos são utilizados no planeamento rádio das redes celulares ou ligações ponto a ponto ou ponto multiponto.

O *Shadowing*, como o próprio nome indica, é ocasionado pela presença de obstáculos no caminho de transmissão do sinal entre o emissor e o receptor, provocando, não só, a

atenuação forte do sinal como difracção, como também alterações de fase. A presença de árvores, paredes ou edifícios são bons exemplos das causas deste efeito.

O *Fading* deve-se à recepção de várias versões do mesmo sinal que chegam praticamente ao mesmo tempo, mas alterados devido aos diferentes caminhos que percorrem no meio. As alterações manifestam-se em amplitude e em fase. Os sinais quando combinados podem ter características construtivas ou destrutivas.

Se a estas características adicionarmos o facto de o meio ser um acesso concorrido consegue-se compreender o porquê do desenvolvimento de técnicas de processamento de sinal, de transmissão e radiação para mitigar estes problemas.

## 2.2 - Camada Física

O grupo de trabalho 802.16 do IEEE aprovou em 2004 o standard IEEE Std 802.16-2004 que reviu e consolidou as primeiras versões do IEEE Std 802.16-2001, IEEE Std 802.16a-2003 e IEEE Std 802.16c-2002 [IEEE 802.16-2004]. O standard especifica o nível físico e o nível MAC para várias bandas de frequências dos 10-66GHz e para bandas inferiores a 11 GHz. Mais tarde, em 2005, foi aprovada uma adenda a este standard com a especificação para estações móveis a velocidades veiculares e foi designada de IEEE802.16e-2005.

Para o nível físico foram especificadas 3 interfaces: WirelessMAN-SC, WirelessMAN-OFDMA e WirelessMAN-OFDM. A WirelessMAN-SC que pode ser aplicada em qualquer banda, sendo obrigatória no caso de bandas acima dos 10GHz; a WirelessMAN-OFDMA e WirelessMAN-OFDM podem ser utilizadas em frequências inferiores a 10 GHz, em bandas licenciadas ou não. Foram ainda definidas mais especificações para o nível MAC, para a modulação, codificação, QoS e largura de canal, de modo a servir uma ampla variedade de aplicações.

### 2.1.1 - OFDMA

O nível físico é baseado no esquema de transmissão *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) que proporciona débitos elevados em ambientes de multi-caminhos do sinal de rádio e sem linha de vista. O OFDM usa várias portadoras de modo a dividir o stream de dados, com um determinado débito, por vários streams de dados de débitos mais baixos e modula-os nas múltiplas portadoras. Esta técnica implica o aumento da duração simbólica e minimiza a interferência inter-simbólica (ISI), fornecendo maior resistência às adversidades da transmissão rádio como o *multipath*, *path loss* e *shadowing*. Além disto, a adição de um prefixo cíclico no início do *payload* dos dados modelados, que é uma porção dos últimos dados do bloco (Figura 1), pode eliminar a presença da ISI, desde que a duração do prefixo seja maior que o atraso do espalhamento do canal.

Entende-se por tempo de guarda ( $T_g$ ) o tempo que ocupa o prefixo cíclico e, o rácio entre o  $T_g$  e o tempo de duração dos dados ( $T_u$ ),  $T_g/T_u$ , varia em função das condições de transmissão: se as condições do canal são más (presença de *multipath* e *shadowing*) então o  $T_g$  deverá ser maior e respectivamente os dados copiados para o prefixo cíclico também. Isto diminui o débito útil mas aumenta a redundância dos dados. Se o canal for bom então o rácio  $T_g/T_d$  poderá ser menor.

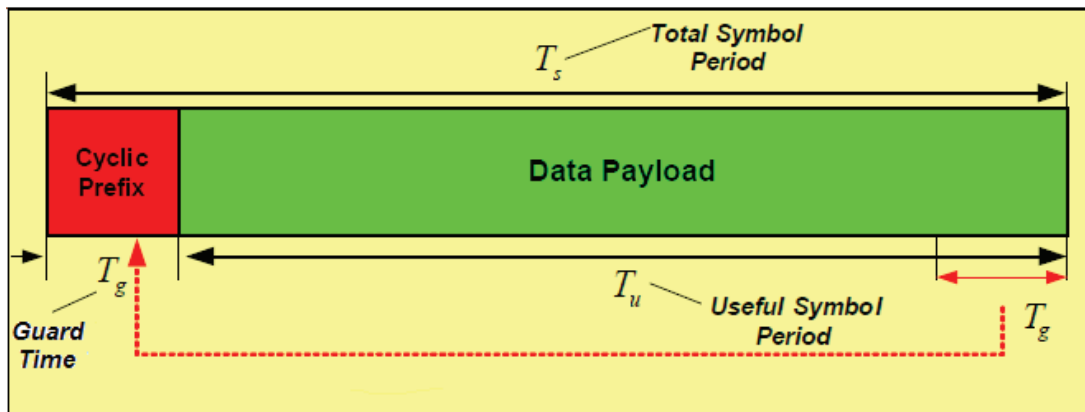


Figura 2.1 - Símbolo OFDM com adição do prefixo cíclico [6].

No domínio das frequências nem todas as sub-portadoras são usadas. Dos quatro tipos existentes apenas uma é utilizada para a transmissão dos dados; as restantes são usadas para sincronização (sub-portadoras piloto), outras para guarda de banda (sub-portadoras nulas) e, por fim, a sub-portadora que coincide com a portadora central e que é nula para simplificar as operações de conversão analógico para digital e digital para analógico. A Transformada Inversa de Fourier (IFFT) permite a implementação da modulação OFDM sem grande complexidade e com um número de sub-portadores elevado, de 2048.

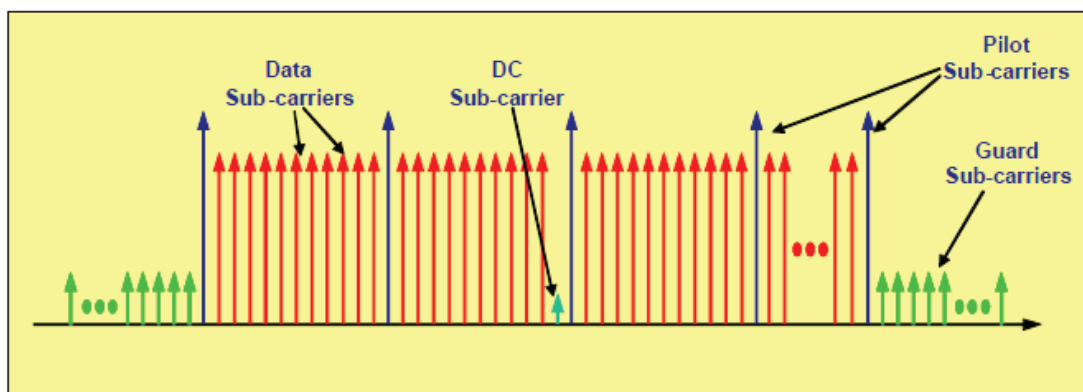


Figura 2.2 - Tipo de portadoras do OFDM onde são modulados os símbolos OFDM [6].

Os recursos no domínio temporal e das frequências são organizados com o intuito de criar sub-canais que são usados para multiplexar os dados de vários utilizadores permitindo, desta forma, acesso múltiplo. Este esquema é conhecido por OFDMA e possibilita o múltiplo acesso no downlink e uplink. O acesso múltiplo à trama OFDM otimiza o recurso rádio em topologias ponto-multiponto e móvel.

O IEEE802.16e-2005 especifica outra particularidade do OFDMA que lhe confere uma escalabilidade, levando alguns autores, e até o WiMAX Forum, a referenciá-la como OFDMA escalável (SOFDMA). De um modo genérico, podemos dizer que a escalabilidade do nível físico é conferida pela possibilidade de variar a estrutura de sub-canais, com a variação da FTT mantendo o espaçamento entre as sub-portadoras fixo.

A Tabela 2.1 mostra a gama de escalabilidade proposta pelo 802.16 com os respectivos parâmetros. Para uma taxa de amostragem variável entre  $n=8/7$  e para uma banda de canal múltipla de 1.75 MHz e uma taxa de  $n=28/25$  para um canal com banda múltipla de 1.25, 1.5 ou 2.75 MHz.

Tabela 2.1 - Parâmetros da escalabilidade do OFDMA [7].

Parameters	Values							
System bandwidth (MHz) <sup>1</sup>	1.25	5	10	20	3.5	7	8.75	
Sampling factor	28/25				8/7			
Sampling frequency ( $F_s$ , MHz)	1.4	5.6	11.2	22.4	4	8	10	
Sample time ( $1/F_s$ , nsec)	714.3	178.6	89.3	44.6	250	125	100	
FFT size ( $N_{FFT}$ )	128	512	1024	2048	512	1024	1024	
Subcarrier frequency spacing ( $\Delta f$ , kHz)	10.9375				7.8125		9.765625	
Useful symbol time ( $T_b=1/\Delta f$ , $\mu s$ )	91.4				128		102.4	
Guard time ( $T_g = T_b/8$ , $\mu s$ ) <sup>2</sup>	11.4				16		12.8	
OFDMA symbol time ( $T_s=T_b+T_g$ , $\mu s$ )	102.8				144		115.2	
Notes:								
1) The Mobile WiMAX™ system profile does not include 1.25MHz and 20MHz.								
2) Other possible cyclic prefix ratios are 1/4, 1/16, 1/32, however, 1/8 is the only mandatory value in the Mobile WiMAX system profile.								

## 2.1.2 - Estrutura da trama

A estrutura da trama 802.16 apresentada é do tipo TDD. Embora o 802.16 especifique a operação em TDD ou FDD Full ou half-duplex, a certificação dos perfis iniciais do WiMAX móvel pelo WF apenas inclui o TDD.

A Figura 2.3 ilustra a estrutura de uma trama OFDMA para uma implementação em TDD. Cada trama é constituída por duas sub-tramas, uma para o *downlink* e outra para o *uplink*, separadas no tempo. Para evitar colisões na transmissão *downlink* e *uplink*, existe uma separação das sub-tramas por um período designado de *Transmit/Receive* e *Receive/Transmit Transition Gaps* (TTG e RTG, respectivamente).

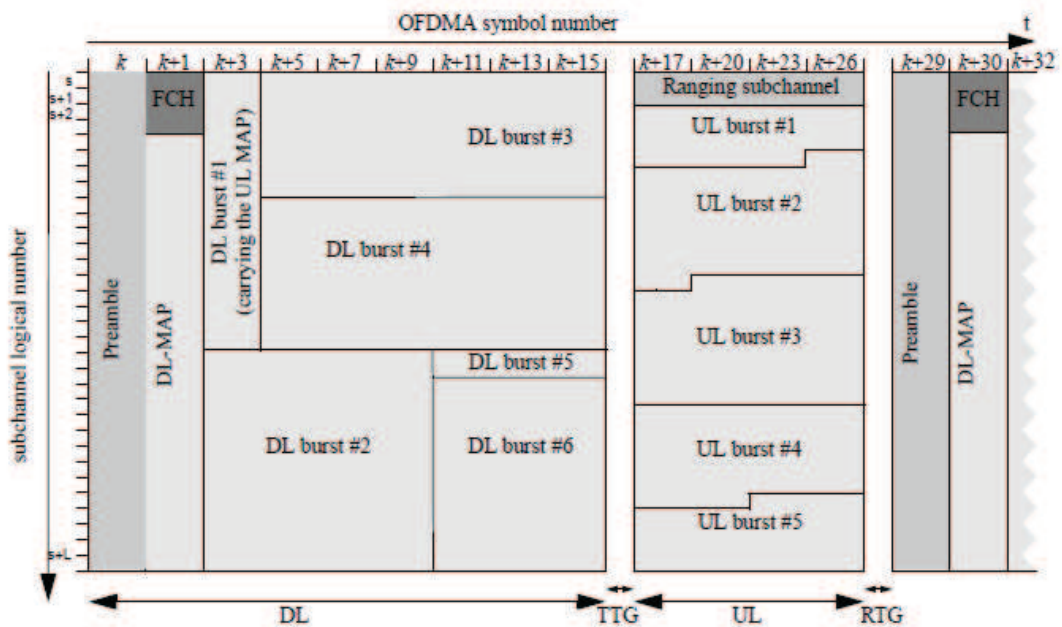


Figura 2.3 - Estrutura da trama OFDMA em TDD [8].

Cada trama contém informação de controlo como o preâmbulo usado para a sincronização da trama e o cabeçalho de controlo da trama (*Frame Control Header-FCH*) com a informação de configuração da trama (esquema de codificação, sub-canais usados, comprimento do tamanho mensagem MAP). O DL-MAP e UL-MAP indicam a alocação de sub-canais a cada utilizador, além de fornecerem informação para o controlo do DL e UL. O campo *Ranging subchannel* é utilizado pelas estações móveis para o sincronismo, ajustes de potência e pedidos de largura de banda.

### 2.1.3 - Codificação do canal

Os sistemas OFDM servem-se de modulações e codificações adaptativas de forma a poderem adaptar-se às variações do meio de transmissão. Deste modo, quando as condições do canal de transmissão são boas utilizam-se constelações elevadas (ex.64-QAM) com codificação de correcção de erros baixas para atingir-se débitos elevados. Quando pelo contrário as condições são fracas, empregam-se modulações baixas (BPSK, QPSK) e codificações de correcção de erros mais robustas. Os códigos especificados de suporte obrigatório pelo WF e IEEE 802.16-2005 são o *Convolutional Code* e o *Convolutional Turbo Code*; opcionalmente também estão referidos o *Block Turbo Code* (CTC) e o *Low Density Parity Check Code* (LDPC).

As modulações especificadas como obrigatórias são QPSK, 16-QAM e 64-QAM no *downlink* e, no *uplink*, são discriminadas as mesmas com excepção da 64-QAM, que é opcional.

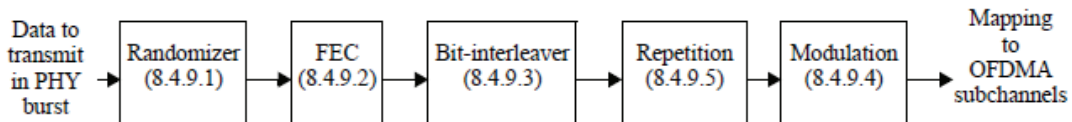


Figura 2.4 - Esquema do processo de codificação dos dados no canal de transmissão [9].

### 2.3 - Camada MAC

O objectivo do nível MAC do WiMAX é fornecer uma interface das camadas superiores para o nível físico. Este nível foi definido pelo IEEE com 3 sub-níveis: o nível de convergência (*convergence sublayer-CS*), o nível da parte comum do MAC (*MAC Common Part Sublayer-MAC CPS*), o nível de segurança (*Security Sublayer-CS*). A Figura 2.5 ilustra as camadas protocolares do IEEE802.16.

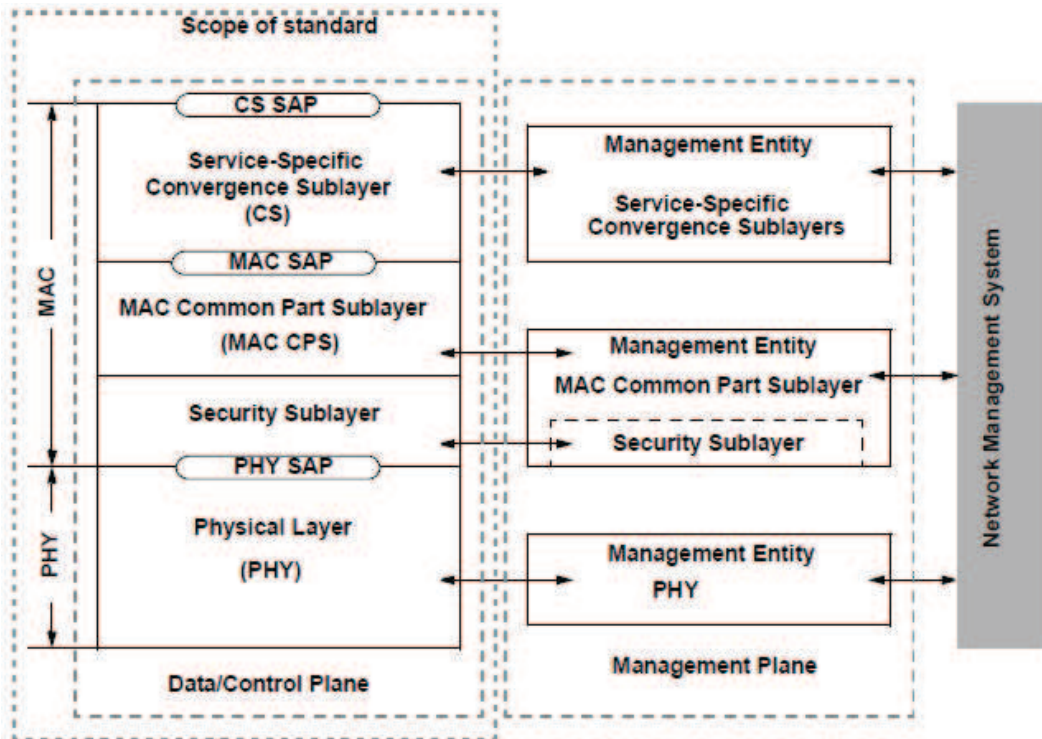


Figura 2.5 - Camadas protocolares do standard IEEE 802.16 [2].

O sub-nível superior CS faz o tratamento da informação do nível superior MAC SDU <sup>1</sup> para o MAC PDU do sub-nível inferior a CPS. O IEEE definiu dois tipos de convergência para o ATM e para os pacotes; este último que engloba o IP e o Ethernet. O WF apenas criou o perfil para o IP e Ethernet pela predominância destes protocolos. Para aumentar a eficiência, a CS pode suprimir os cabeçalhos dos MAC SDUs reduzindo assim os *overheads* existentes nos MAC PDU.

O sub-nível MAC CPS implementa o acesso, a alocação de LB, o estabelecimento e a manutenção das ligações, a implementação da QoS, bem como o escalonamento dos dados para o meio físico. Existem algumas técnicas para aumentar a eficiência, tais como a utilização do mesmo PDU MAC para colocar vários MAC SDUs de modo a diminuir o *overhead* e a criação de bursts ao nível físico com vários PDUs MAC. A Figura 2.6 ilustra um pacote genérico do nível MAC. O *payload* e o CRC podem ser opcionais porque algumas mensagens de gestão e controlo apenas necessitam do cabeçalho como o pedido de largura de banda.

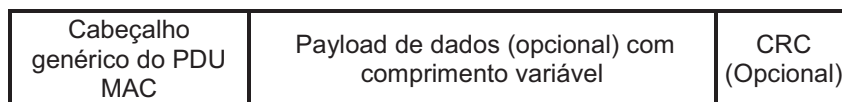


Figura 2.6 - Pacote genérico do nível MAC.

<sup>1</sup> MAC SDU - Os pacotes do nível superior ao nível MAC são designados por MAC Service Data Unit

O último sub-nível fornece a autenticação, encriptação e a troca segura de chaves. Neste nível as ligações entre a BS e a SS são encriptadas garantido a confidencialidade dos dados. Além disso, fornece ainda protecções contra o acesso não autorizado ao serviço e o furto do serviço. O WiMAX possui um protocolo do tipo cliente-servidor para gestão de chaves de autenticação em que a BS controla a distribuição das chaves ou material de segurança associado à SS. O protocolo de gestão de chaves é securizado pela autenticação da SS baseada em certificados digitais. Se, durante a negociação, a SS indicar que não suporta os mecanismos de segurança do IEEE802.16, a autenticação e a troca de chaves não são realizadas.

### 2.3.1 - Qualidade de Serviço

O suporte para QoS faz parte da implementação definida no nível MAC. Embora a qualidade de serviço seja difícil de realizar no meio sem fios devido às imprevisibilidades do meio, o WiMAX tem suporte para qualidade de serviço com mecanismos de escalonamento e de largura de banda adaptativa.

A qualidade de serviço definida pelo IEEE usa uma arquitectura MAC orientada para a ligação que lhe confere robustez controlada pela BS no *uplink* e *downlink*. A BS e SS estabelecem uma ligação inicial entre os dois níveis MAC de cada estação identificados por um CID (*connection identifier*), pelo qual trocam mensagens de controlo.

No WiMAX existe o conceito de fluxo de serviço definido por um fluxo de pacotes unidireccional, com um conjunto de parâmetros de QoS e identificado por um identificador de fluxo de serviço (SFID). Os parâmetros de qualidade de serviço podem ser de débito sustentável máximo, débito de pico máximo, débito mínimo aceitável, tipo de escalonamento, tipo de ARQ, atraso máximo, jitter tolerado e outros. O acondicionamento do fluxo pode ser realizado por uma ferramenta de gestão ou criado dinamicamente usando os mecanismos de sinalização do standard. A BS é responsável por mapear os SFID com o respectivo CID. Também existe a possibilidade de mapear os DiffServ code point e ter a QoS baseada em IP ponto a ponto.

O IEEE802.16 e o WF definem 5 classes de serviço que se descrevem na Tabela 2.1 e os respectivos parâmetros que caracterizam o fluxo de serviço geridos pelo escalonador. Adicionaram-se algumas aplicações associadas para demonstrar a variedade de aplicações que o WiMAX pode suportar.

**Tabela 2.1- Descrição das classes de serviço definidas pelo IEEE802.16**

<b>QoS Category</b>	<b>Applications</b>	<b>QoS Specifications</b>
<b>UGS</b> Unsolicited Grant Service	VoIP	Maximum Sustained Rate Maximum Latency Jitter Tolerance
<b>rtPS</b> Real Time Polling Service	Streaming Audio or Video	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Maximum Latency Tolerance Traffic Priority
<b>ErtPS</b> Extended Real-Time Polling Service	Voice with Activity Detection (VoIP)	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Maximum Latency Tolerance Jitter Tolerance Traffic Priority
<b>nrtPS</b> Non-Real-Time Polling Service	File Transfer Protocol (FTP)	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Traffic Priority
<b>BE</b> Best-Effort Service	Data Transfer, Web Browsing, etc.	Maximum Sustained Rate Traffic Priority

### 2.3.2 - O escalonador

O serviço de escalonamento MAC é um serviço de enorme relevo porque sobre ele assenta a eficácia do serviço de banda larga do WiMAX. Este serviço tem à sua responsabilidade a atribuição de recursos em função dos requisitos pedidos pelas BS, dos fluxos de QoS definidos, das condições do canal de transmissão e da carga do sistema. O serviço de escalonamento aplica-se ao UL e ao DL e ajusta a modelação e a codificação conforme as necessidades.

Outra característica é a atribuição dinâmica dos sub-canais definidos nas mensagens MAP da trama física. O escalonador pode variar esta atribuição de canais trama a trama em função das condições do canal e do tráfego.

### 2.3.3 - Segurança

Ao contrário do WiFi, o WiMAX foi especificado com a segurança em mente. O standard inclui métodos para assegurar a privacidade dos dados dos utilizadores e para evitar o acesso não autorizado. A segurança é tratada pelo sub-nível do nível MAC designado por security layer que encripta os dados com algoritmos seguros como o AES (*Advanced Encryption Standard*) e 3DES (*Triple Data Encryption Standard*), com preferência pelo AES por ser o algoritmo considerado mais eficiente e seguro.

A autenticação das SS é baseada no protocolo EAP onde poderão ser aplicados vários tipos de esquemas de autenticação como *username* e *password*, certificados digitais ou *smart cards* oferecendo flexibilidade às soluções WiMAX. Os equipamentos WiMAX possuem um certificado digital com chave pública e um MAC address que permite autenticar o equipamento. A troca periódica das chaves de encriptação e restante informação de segurança é realizada segundo o protocolo PKMv2 entre a SS e a BS. O protocolo é do tipo Cliente/Servidor sendo a BS o servidor. Na versão do standard IEEE802.16-2004 apenas era especificado a v1 do protocolo sendo actualizada para a versão 2 na adição ao standard IEEE802.16e-2005. O PKM usa certificados digitais e algoritmos de encriptação baseados em chave pública para fazer a transferência segura de chaves entre a BS e a SS. O IEEE802.16e-2005 refere o suporte de uma pré-autenticação entre uma estação móvel e uma BS de destino de roaming, para acelerar o processo de *handover* e de um modo seguro.

## 2.4 - Características avançadas

O WiMAX suporta algumas características técnicas que aumentam a fiabilidade do nível físico e amplificam a capacidade e débito do link. As mais-valias são alcançadas com recurso ao H-ARQ, reutilização de frequências e a técnicas de múltiplas antenas.

### 2.4.1 - Múltiplas antenas

O uso de técnicas de processamento de sinal com múltiplas antenas quer na estação base como no terminal cliente permite recuperar o sinal de transmissão sujeito ao *fading* e ao *multipath*. A utilização de múltiplas antenas não é exclusivo do WiMAX, o WiFi também a usa e possibilita um incremento no débito e no alcance do seu link . A tecnologia poderá aumentar alguns DB o ganho do link, melhorar o débito e o alcance de uma célula.

O termo MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) é convencionado como referência à tecnologia de múltiplas antenas. Existem dois tipos de MIMO designadas de *open loop* MIMO e *closed loop* MIMO e distinguem-se pela utilização de informação sobre o meio de transmissão. O *closed loop* MIMO recolhe informação sobre a transmissão para otimizar a comunicação com o terminal e o *open loop* MIMO não o faz.

#### i. *Closed Loop* MIMO

Os sistemas WiMAX usam dois modos de *closed loop* MIMO para aumentar a capacidade e a cobertura do sistema que são: o *Statical Eigen Beamforming* (EBF) de onde surge o nome *beamforming*, e o *Maximum Radio Transmission* (MRT).

Esta tecnologia de múltipla antena obtém informação sobre o canal de transmissão para um terminal através da resposta dada pelo terminal no *uplink*. Com base na interpretação dos dados obtidos e do processamento de sinal, a BS calcula o peso a atribuir a cada transmissão variando a fase e a amplitude dos sinais de modo a realçar o sinal e minimizar a interferência. Com este processamento o padrão de radiação é alterado para aumentar a sensibilidade na direcção dos sinais desejados e minimizá-la na direcção dos sinais preteridos.

Embora o princípio das técnicas MRC e EBF seja semelhante, os seus algoritmos de implementação oferecem vantagens em diferentes aplicações. O MRT requer que as condições do meio de transmissão e as medidas efectuadas sejam o mais preciso possível e, por isso, é recomendável para comunicações com terminais fixos. Para terminais móveis o atraso da leitura das condições e a implementação do feixe radiação é determinante para o ganho do sistema, sendo que o EBF é o mais robusto nestas situações.

#### ii. *Open loop* MIMO

As técnicas de *open loop* são obrigatórias para se obter a certificação do Wave 2 do WF. O MIMO Matrix A e MIMO Matrix B são os nomes usados para classificar dois tipos de *open loop* que variam nos algoritmos usados e tem benefícios em situações diferentes.

O MIMO Matrix A transmite o fluxo de dados pelas várias antenas e em cada antena os dados são codificados (*Space Time Block Codes* - STBC) de modo que cada sinal transmitido seja ortogonal. Isto diminui interferência entre os fluxos e permite que o terminal distinga melhor os múltiplos sinais. O terminal poderá também usar técnicas de *Maximal Ratio Combining* que combinam os sinais recebidos para melhorar a recepção e tratamento dos sinais. Este método de *open loop* MIMO é usado com o objectivo de aumentar o alcance da célula.

O MIMO Matrix B também transmite vários fluxos de dados nas várias antenas, mas ao contrário do Matrix A os dados são multiplexados pelas várias antenas (*Spatial Multiplexing*).

O terminal ao receber os vários dados pelos vários caminhos ou não realiza a desmultiplexagem dos vários fluxos. Este método aumenta a capacidade do canal de transmissão.

O sistema WiMAX poderá implementar as duas técnicas e dinamicamente alternar entre os dois métodos. O Matrix A tem mais benefício na periferia da célula onde o sinal é fraco e o SNR é baixo. Aí a transmissão de fluxos simultâneos aumenta a probabilidade do terminal receber um que não seja suficientemente afectado pelas adversidades do canal de transmissão.

Em situação em que o sinal é bom e o SNR é elevado e o limite poderá ser a largura de banda do sistema e não a potência do sinal, a multiplexagem espacial do MIMO Matrix B poderá ser mais vantajosa. O ideal será a BS ter capacidade adaptativa e seleccionar o melhor método dinamicamente.

Existe ainda um outro método usado no *uplink* dos terminais WiMAX que permite aumentar a eficiência espectral e a capacidade do *uplink* de comunicação. Este método é designado por *Collaborative Uplink MIMO* e permite que dois dispositivos utilizem a mesma alocação de frequência para comunicar com as duas antenas (ou mais) da BS podendo duplicar a capacidade do sistema.

Os equipamentos não necessitam de ter múltiplas antenas para beneficiar do MIMO Matrix A ou do *Beamforming* mas os desempenhos serão melhores se existirem múltiplas antenas. O MIMO Matrix B necessita que o terminal e a BS funcionem com mesmo número de antenas.

## 2.5 - Implementação de uma rede WiMAX

Na implementação de uma rede celular o planeamento rádio é parte integrante de um todo onde a avaliação dos recursos financeiros, materiais, logísticos e técnicos pretendem construir, com aproximações sucessivas, um negócio com uma visão integrada dos custos, do retorno de investimentos, do modelo de mercado e dos aspectos técnicos.

Desde modo, os objectivos de uma rede celular deverão estar definidos e ser bem claros desde o início do desenvolvimento e planeamento do sistema. Objectivos como a definição da área de serviço, o número de clientes esperado, a distribuição dos clientes, o espectro disponível, a taxa de crescimento, a taxa de utilização, o acordo de interligação de Internet, plano de numeração, políticas de *routing* para o acesso entre redes e *roaming*.

A satisfação dos objectivos pretendidos exige a formulação (desenho) cuidada de critérios como as classes de serviços, link-budgets, os níveis para os limites de cobertura das diferentes classes de serviços, o modelo de propagação mais adequado para o espectro disponível e uma estratégia de alocação de canais. Deste modo, determinam-se os níveis de

qualidade de serviço que os utilizadores poderão aguardar para uma comunicação de dados e voz.

Uma ferramenta de dimensionamento e planeamento de rede WiMAX auxiliará na obtenção de um resultado óptimo, relacionando as questões técnicas (o número de base stations), com as pretensões económicas, financeiras, de negócio e as possibilidades regulamentares.

Um mapa digital com informação detalhada do declive e dos edifícios permitirá ao software desenhar o planeamento celular, para auxiliar o plano de negócio, o orçamento e o ROI. Os resultados obtidos pela ferramenta também serão usados pelas equipas técnicas para o planeamento da topologia de rede, o dimensionamento dos links de backhaul e para o lançamento inicial da rede.

O uso de uma ferramenta facilita a produção de conjuntos de valores gerados por vários inputs, que são os múltiplos parâmetros do IEEE 802.16-2005 que poderão ser opcionais e ter vários valores. Parâmetros como o tipo de *handover*, o esquema de reutilização de frequências, os diferentes ganhos da diversidade de múltiplas antenas e os valores de SNR (usados no cálculo da sensibilidade dos equipamentos) assumidos no modelo de desenvolvimento.

Os principais dados para o software de dimensionamento da rede são um mapa digital com informação da elevação do terreno, dos edifícios ou obstáculos na área, os parâmetros dos equipamentos BS e SS (altura, potências, ganhos, perdas, parâmetros do OFDMA, diagramas de radiação), o espectro alocado e o modelo de propagação.

Os resultados do software permitirão ao nível financeiro e económico orçar a implementação do sistema, avaliar os serviços a oferecer, definir as áreas a servir, estipular tarifários, desenhar modelo de negócio, etc. Ao nível técnico, o uso do software resultará em optimizações do sistema como as antenas óptimas, configurações do sistema mais adequadas, optimização do número de base stations e respectiva localização, conhecimento da capacidade do sistema e limites das células, noção do tipo de *handover* mais adequado, quantificação dos links necessários para alimentar o sistema, configuração dos parâmetros mais adequados no *uplink* e *downlink* e conhecimento das margens de interferências com células vizinhas. O impacto do tipo de antenas e das técnicas de optimização também fazem parte da análise efectuada por uma ferramenta deste tipo.

As ferramentas que realizam este trabalho estão em constante evolução. Actualmente existem vários softwares tais como o ICS Telecom nG da ATDI, o ASSET da AIRCOM, NIR-PLAN da HEXAGON, WinProp da AWE Communications, o CelPlanner da CelPlan Technologies e o SignalPro da EDX.

Os softwares de simulação baseiam-se na teoria da propagação de sinal e realizam os seus cálculos recorrendo a modelos de propagação conhecidos como o Ray Tracing ou a modelos empíricos como o modelo Hata, Okuruma, Walfisch-Ikegami ou COST231. Embora os cálculos

sejam muito complexos existem aproximações e algoritmos para optimização dos cálculos. Esta é uma área de constante investigação na procura de modelos mais exactos, como ilustram os documentos [10], [11] e [12].

A localização da BS passa também por analisar o comportamento rádio com a BS nos diferentes locais. O comportamento de propagação do sinal pode variar no mesmo ponto de destino em função da localização da fonte emissora por causa dos diferentes percursos que o sinal poderá ter e das diferentes acções que pode sofrer em cada percurso. Por isso, a escolha dos edifícios candidatos também é feita implicitamente com o conhecimento de propagação do sinal (ex. está implícito na escolha de um edifício alto que minimize os obstáculos ao sinal). Cada local é avaliado mediante o comportamento da propagação do sinal nas redondezas e pode efectivar-se utilizando software de simulação ou realizando um site survey. O uso de uma ferramenta de simulação é mais barato, ou seja, tem menos implicações logísticas no entanto terá sempre um resultado espectacular aproximado da realidade. A realização de um site survey terá um resultado mais real se as condições do site survey forem iguais as condições em produção.

## 2.6 - Site survey

O planeamento rádio de uma rede sem fios resultará com relativa precisão no desfecho real principalmente devido às actuais bases de dados com informação rigorosas do terreno, dos obstáculos (edifícios e arvores), das frequências usadas e das características dos equipamentos. Apesar da disponibilidade de toda esta informação há sempre a probabilidade de existirem diferenças em relação ao planeamento devido a factores desconhecidos. Para minimizar os erros dispendiosos que ocorrem devido a factores desconhecidos, antes de uma implementação no terreno deverá recolher-se informação através da realização de um site survey. O site survey também permitirá validar algumas decisões como exemplo, a localização de uma BS em zonas de difícil propagação do sinal RF, o nível de sinal em zonas com obstáculos ao sinal (árvores, edifícios) e verificar o comportamento de aplicações (ex. IPTV, VoIP) em determinados cenários, assim como os limites reais da célula. A realização de um site survey poderá variar de uma simples deslocação para visualizar os edifícios candidatos a albergar uma BS, a uma complexa deslocação com equipamento rádio para realização de leituras durante várias horas do dia e com testes das aplicações reais.

O site survey não é uma ferramenta de uso apenas no início de implementação de uma rede sem fios, mas durante todo o tempo de actividade desta para detectar problemas que surgem como o aparecimento de fontes de interferências ou obstáculos à propagação do sinal.

## 2.7 - Enquadramento Legal

O Projecto foi avaliado num âmbito legal já que o espectro radioelétrico está regulamentado e sujeito à legislação em vigor. A faixa de frequência a usar terá de respeitar a lei actual e deverá ser escolhida antes do planeamento de rádio porque esses resultados variam com a frequência utilizada.

A lei nº 5/2004 de 10 de Fevereiro intitulada de Lei das Comunicações Electrónicas (LCE) define o regime jurídico das redes e serviços de comunicações, bem como dos recursos e serviços conexos. A LCE também designa o ICP-ANACOM como a Autoridade Reguladora Nacional e define as suas competências.

O estatuto do ICP-ANACOM está descrito no decreto-lei nº 309/2001, de 7 de Dezembro, assim como as suas competências no âmbito do espectro nacional. De acordo com o diploma acima referido, as atribuições do ICP-ANACOM, neste âmbito, são a gestão do espectro, a planificação, a atribuição e a fiscalização (LCE artº 15 e artº6 dos estatutos). O ICP-ANACOM também deverá harmonizar as frequências segundo um quadro regulamentar europeu, no âmbito da Decisão nº676/2002/CE. A publicação anual do Quadro Nacional de Atribuição de Frequências (QNAF) também faz parte das suas obrigações, este instrumento é de grande utilidade pela informação que tem sobre o espectro. O QNAF contém as faixas de frequências acessíveis ao público e as que estão reservadas, assim como as atribuições feitas a empresas ou outras entidades.

Em 2006 o ICP-ANACOM decide fazer uma consulta pública sobre o Acesso BWA motivado pelo debate em volta da tecnologia BWA em organizações internacionais e pelas solicitações para ensaios técnicos com sistemas WiMAX de alguns players nacionais. A CEPT mandatada pela CE também já havia reconhecido, nessa altura, a importância das comunicações de banda larga e identificou 2 faixas prioritárias para aplicações BWA, a faixa dos 3400 MHz a 3800 Hz e a faixa dos 5800 MHz [13]. Estas faixas de frequências foram mais tarde enquadradas tecnicamente e regulamentarmente na decisão da CE nº 2008/411/EC e na recomendação ECC/REC/(06)04 da ECC/CEPT. No seguimento desta consulta pública, como esperava o mercado, e na sequência dos mandatos da CE ao CEPT nesta área, o ICP-ANACOM disponibilizou o desenvolvimento de aplicações BWA nas faixas dos 3400-3800 MHz, sobre um princípio de neutralidade tecnológica que dá a liberdade ao operador de escolher a tecnologia e no modo de utilização flexível (fixo, nomádico e móvel). Acrescentou também a possibilidade de utilização da faixa de frequências 5725-5875 MHz para aplicações BWA, mas apenas numa utilização fixa e nomádica [14].

Do relatório desta consulta pública o ICP-ANACOM deliberou realizar nova consulta pública sobre o *“Projecto de decisão sobre a limitação do número de direitos (...) nas faixas de frequências 3400-3800 MHz e definição do respectivo procedimento de atribuição”*. A razão

desta consulta deveu-se há pretensão do regulador para limitar o acesso aos direitos de utilização do espectro para o BWA, que se comprovou em 24/1/2008, com a deliberação final de limitar o número de direitos a atribuir para a utilização da faixa 3400-3800MHz, a 4 direitos por zona geográfica e de atribuir direitos de utilização por leilão.

Em 26 de Maio de 2009 o ICP-ANACOM publicou o Regulamento do Leilão para a Atribuição de Direitos de Utilização de Frequências para o Acesso de Banda Larga Via Rádio de forma a dar início ao procedimento de atribuição, por leilão, dos direitos de frequência em causa. Entretanto, a versão do QNAF 2008 V1 já fazia referência às faixas 3400-3800 MHz para o BWA e à faixa dos 5725-5875 MHz para o FBWA. A primeira fase do leilão iniciou-se no final de 2009, tendo sido três empresas candidatas. Esta primeira fase prolongou-se durante o início de 2010 para atribuição das licenças.

Apesar da realização do leilão a evolução do quadro referente ao BWA não deverá ficar por aqui. Uma das razões é o facto de não haver definição sobre a faixa dos 5.8 GHz que ainda aguarda a conclusão dos estudos da CEPT. Outra razão prende-se com o facto de o ICP-ANACOM ter lançado uma consulta pública sobre a utilização da faixa de frequências 2500-2690 MHz (conhecida por faixa dos 2,6 GHz). Esta consulta pretendeu perscrutar o mercado sobre a disponibilização desta faixa, a sua conjugação com outras (ex. 3600 GHz ou 900 MHz), os serviços e tecnologia, o seu âmbito de utilização, direitos de utilização, acesso ao espectro e calendário. Outros organismos, por seu turno, discutem também a utilização desta faixa para aplicações BWA como o WiMAX Forum e a CE.

As faixas isentas de licenciamento 2400 - 2483,5 MHz, 5150-5350 MHz e 5470-5725 MHz também poderão ser usadas, mas estão sujeitas a limites de potência de emissão de 100 mW, 200 mW e 1 W respectivamente [15].

Relativamente à gestão do espectro nacional as mudanças deverão continuar devido às definições necessárias para algumas faixas como a dos 2,6 GHz, de UHF e VHF que deixarão de ser utilizadas pela televisão analógica em 2012. Nesta última perspectiva-se o uso da faixa 790-862 MHz para comunicações de banda larga.

## **2.8 - Conclusão**

O WiMAX é fruto de uma evolução dos standards que melhoram significativamente o meio físico e o nível de dados. O OFDMA é a tecnologia que permite a robustez e os débitos a baixas potências de recepção, não sendo surpresa a sua escolha por parte do 3GPP para o desenvolvimento do LTE. Os desenvolvimentos de técnicas de processamento de sinal e de técnicas adaptativas de antenas aumentam a capacidades dos sistemas WiMAX. O WiMAX Forum, mandatado pela indústria e outros associados, realiza as especificações para a

compatibilidade e interoperabilidade dos equipamentos dos diferentes fabricantes, promovendo o uso da tecnologia e participando activamente junto dos reguladores nacionais e internacionais.

As implementações WiMAX mundiais são crescentes e os operadores emergentes concorrem com os tradicionais usando a nova tecnologia. Novos modelos de negócios surgem e a concorrência promete beneficiar os clientes. Os reguladores nacionais também se preparam para a salutar disputa tecnológica libertam espectro sem restrições tecnológicas. O uso desta tecnologia para redes privadas em implementações ponto a ponto será de grande proveito, mas os cenários de mobilidade privados serão difíceis de concretizar devidos às restrições de potências e ao espectro de baixa frequência impostas pelos reguladores.

## Capítulo 3

# Rede WiMAX para a FEUP

Este capítulo apresenta o trabalho realizado com o objectivo de avaliar a viabilidade de implementação de uma WiMAX no campus da FEUP. São identificadas as razões para a escolha de um determinado edifício, assim como as características de diversos equipamentos WiMAX. A necessidade de antever o resultado da instalação de uma BS com determinadas características conduziu ao planeamento rádio realizado de forma a estimar a capacidade e os limites da rede. O objectivo da implementação da rede WiMAX é, como já se disse, proporcionar mais um acesso à rede de dados da FEUP. Por isso, é essencial integrar esta rede WiMAX na rede da FEUP, de modo que para o utilizador seja transparente e para o gestor de rede seja segura, fiável e eficiente.

### 3.1- Requisitos

No final da instalação desta rede os utilizadores da FEUP residentes num raio de 1 km deverão conseguir aceder à rede interna da FEUP usando um modem WiMAX. Os utilizadores móveis deverão também conseguir a mesma conectividade. A autenticação deverá estar integrada no sistema de identidades da FEUP para evitar um login diferente. O débito deverá ser satisfatório para acesso aos recursos fornecidos pelas FEUP. A introdução deste serviço deverá ter o mínimo impacto na actual rede da FEUP e a segurança deverá ser máxima.

### 3.2- Escolha dos edifícios

A escolha de uma localização para a instalação de uma BS tem de ser bastante criteriosa devido às variáveis em questão. Para a melhor escolha, o local deverá proporcionar a melhor propagação do sinal para a região a cobrir, minimizar a interferência com outras antenas, otimizar a capacidade do sistema e também oferecer, em termos logísticos, a opção mais indicada, para facilitar a instalação física da antena, as operações de manutenção e a segurança do equipamento.

Procurou-se identificar as características de um edifício candidato para alojar uma BS WiMAX e para fundamentar a selecção de um edifício num raio de 1 km da FEUP, características essas que se encontram resumidas na Tabela 3.1. As especificidades consideradas são: a altura do edifício, os acessos e as infra-estruturas. A importância da altura do edifício prende-se com a propagação do sinal, para permitir que o sinal rádio alcance a área a cobrir com o mínimo de obstáculos. Os acessos são importantes para o transporte do material e equipamento necessário. As boas infra-estruturas beneficiarão a instalação do equipamento e as condutas ou cablagem estruturada existente para realização de ligações. O local deve ter energia eléctrica para alimentação dos equipamentos e também deve estar acessível 24 horas por dia para eventual manutenção e situações de emergência. A segurança do equipamento contra vandalismo, roubo e adversidades atmosféricas também foram tidas em consideração.

**Tabela 3.1 - Resumo das características dos edifícios candidatos.**

	Edifício da Biblioteca	Edifício do INEGI/IDMEC	Edifício do HJS/FMUD
Altura	35	28	45
Acesso	Bom	Bom	Médio
Infra-estrutura	Bom	Bom	Bom
Alimentação eléctrica	Sim	Sim	Sim
Segurança	Sim	Sim	Sim

Com base nas características acima registadas foram identificados 3 edifícios candidatos, a saber: o edifício do IDMEC/INEGI, o edifício da biblioteca da FEUP e o edifício do Hospital de São João (HSJ). O edifício IDMEC/INEGI tem uma altura de 36 metros e um acesso fácil à sua cobertura pela escada de serviço. Na cobertura existem esteiras técnicas com cablagem

UTP encaminhadas para o piso inferior onde existe o datacenter do IDMEC, com fibra óptica que termina na sala técnica do CICA. O acesso à cobertura é condicionado, garantindo a segurança do equipamento e o edifício tem protecção contra descargas eléctricas atmosféricas, onde poderão ligar-se as protecções das antenas.

O edifício da biblioteca da FEUP conta com 28 metros de altura e tem uma cota mais baixa em relação ao do IDMEC/INEGI. As restantes características são idênticas às do edifício anteriormente referenciado, incluindo o acesso à rede de dados da FEUP que está disponível no piso inferior à cobertura.

No que respeita ao edifício do HSJ não foi possível caracterizá-lo por falta de dados<sup>2</sup> no entanto, não se podia deixar de referi-lo pela sua altura e proximidade com a FEUP. Apesar de não ter dados estima-se que o edifício tenha uma altura de cerca de 45 metros e que as condições de acesso e segurança sejam similares às dos restantes edifícios candidatos.

Após a análise das condições dos três edifícios identificados optou-se pela escolha do edifício IDMEC/INEGI, já que em relação ao edifício da biblioteca da FEUP é mais alto e fica numa cota superior. Em relação ao edifício do HSJ/FMUP o edifício o IDMEC/INEGI encontra-se no campus da FEUP o que facilita as autorizações para instalação do equipamento e autorizações para o acesso. Como o CICA gere a rede de dados do IDMEC (infra-estrutura activa e passiva) a administração da solução WiMAX, desde a rede de dados da FEUP até à SS via link rádio seria muito mais simples e transparente.

### **3.3-Análise de equipamento**

O resultado da pesquisa de equipamentos para uma solução de banda larga sem fios é abrangente. Existem actualmente vários fabricantes de equipamentos WiMAX e certificados pelo WF. A selecção de equipamentos baseou-se nas características apresentadas que serviam a necessidade do projecto e pelas mais-valias que introduziam.

A certificação do WF para as bandas não licenciadas não é contemplada pelo programa de certificação do WF apesar da tecnologia 802.16e estar disponível nestas bandas. Por isso a certificação do WF dos produtos na banda licenciada foi apenas considerada para avaliar a credibilidade do fabricante.

As características consideradas mais importantes na pesquisa foram o suporte para a banda não licenciada dos 5 GHz, o funcionamento com canalizações de 5 e 10 MHz, o tamanho mínimo da FTT de 1024 e capaz de funcionar com MIMO.

---

<sup>2</sup> Em 9 de Junho de 2009 foi enviado um email à Direcção da Faculdade de Medicina da UP, que partilha o mesmo edifício do HSJ, a solicitar os dados necessários mas, apesar das insistências não houve resposta até data de entrega da presente monografia.

No que respeita à pesquisa de equipamentos seleccionaram-se 4 fabricantes, a saber: a Airspan Networks [16], a Redline Communications [17], a Alvarion [18] e a SOMA Networks [19], sendo que a fonte de informação foram os respectivos sítios da Internet.

A SOMA Networks não fornece informação com detalhada sobre os seus produtos WiMAX e, por isso, não se optou por nenhum dos seus equipamentos.

A Redline Communications não apresenta um produto WiMAX para a banda dos 5 GHz, embora disponibilize produtos de banda larga na mesma faixa. Na banda licenciada apresenta produtos certificados e soluções ponto a ponto e ponto multiponto para operadores.

No que respeita ao fornecedor tecnológico da Nortel para infra-estruturas sem fios de banda larga, a Airspan, esta exhibe no seu site 3 categorias de base stations WiMAX. A BS de nome *MicroMAX* é oferecida para ambientes de baixa densidade de utilizadores para soluções ponto a ponto e ponto multiponto. A BS *MicroMAX* suporta a banda não licenciada dos 5 GHz e o standard IEEE802.16e-2005. Esta BS pode funcionar com uma FFT de 2048 permitindo o melhor tratamento do sinal que é sujeito ao multipath e ao fading. As canalizações de 5MHz e 10 MHz permitem débitos mais elevados, assim como o MIMO que também aumenta a área de cobertura. A segurança dos dados transmitidos também esta assegurada pela encriptação AES. A Tabela 3.2 descreve as principais características desta BS.

A Alvarion possui actualmente várias implementações pelo mundo e apresenta no seu site um portfólio de soluções e equipamento baseados em tecnologia sem fios de banda larga. Um desses produtos é destinado a soluções WiMAX nas bandas não licenciadas e chama-se base station *BreezeMAX Extreme 5000*. Esta BS oferece na banda dos 5GHz o standard IEEE 802.16e-2005, assim como o MIMO, uma FFT de tamanho 1024 e canalizações de 5MHz e 10 MHz. A segurança dos dados é garantida por uma encriptação dos dados com o AES e suporta autenticação EAP-TTLS. A Tabela 3.2 descreve as principais características desta BS.

Tabela 3.2 - Principais especificações da BS *MicroMAX* do fabricante Airspan e da BS *BreezeMAX Extreme 5000* do fabricante Alvarion.

	MicroMAX da AirSpan	BreezeMAX Extreme 5000 da Alvarion
Frequências	700 MHz 2.3 - 2.5 GHz 3.3 - 3.8 GHz 4.9 GHz 5.4 - 5.8 GHz	4.9 - 5.35 GHz 5.47-5.95 GHz
Canalizações	5MHz 10 MHz 2x10MHz	5MHz 10 MHz

20MHz		
Tamanho da FFT	512	512
	1024	1024
	2048	
Max. EIRP	56dBm	35.5dBm
Tipo de Diversidade	2x2	2x2
	MIMO A	MIMO A
	MIMO B	
STC (Space Time Encoder)	Sim	Sim
Modulações	QPSK $\frac{1}{2}$	QPSK $\frac{1}{2}$
	QPSK $\frac{3}{4}$	QPSK $\frac{3}{4}$
	QAM16 $\frac{1}{2}$	QAM16 $\frac{1}{2}$
	QAM16 $\frac{3}{4}$	QAM16 $\frac{3}{4}$
	QAM64 $\frac{3}{4}$	QAM64 $\frac{1}{2}$
		QAM64 $\frac{3}{4}$
		QAM64 $\frac{5}{6}$
Encriptação	AES	AES
Autenticação	RADIUS, EAP	EAP-TLS, EAP-
	TTLS	SIM,PKM, PKMv2

Estes dois equipamentos destinados a implantações de baixa densidade possuem antenas integradas, embora se possam instalar antenas externas.

A cotação para a BS da Airspan com 3 sectores de 120° foi de €37637,37 + IVA.

### 3.4- Planeamento rádio

O projecto propõe apenas uma célula WiMAX, simplificando o planeamento rádio, por não ser necessário planear a reutilização de frequências ou problemas de interferências inter-células. A única BS permitirá o acesso a utilizadores da FEUP que residam na área de cobertura e a utilizadores móveis ou nomádicos. O sistema terá de fornecer qualidade aos serviços disponibilizados como VoIP, Internet, aplicações remotas, correio electrónico e áreas de partilha de dados.

Para estes serviços a banda utilizada está descrita na Tabela 3.3 assim como o tipo de fluxo de serviço associado pelo WF.

Tabela 3.3 - Classificação dos serviços a disponibilizar e respectivo tráfego.

Serviços	Largura de banda	Classificação do WF	Características
VoIP	80 kbit/s	UGS	Jitter máximo 100ms Latência máxima 200ms
Email	1 Mbit/s	nrtPS	Mínimo 512 kbit/s Máximo 2 Mbit/s
Aplicações remotas	1 Mbit/s	nrtPS	Mínimo 512 kbit/s Máximo 2 Mbit/s
Web	2 Mbit/s	BE	Mínimo 512 kbit/s Máximo 2 Mbit/s

Os serviços supra apresentados são os mais utilizados na FEUP e nas ligações por VPN e que deverão também ser o tipo de tráfego mais habitual esperado no serviço WiMAX.

Neste projecto assume-se que um utilizador apenas usará um destes serviços de cada vez e, por isso, para garantir um serviço mínimo de qualidade deverá assegurar-se um débito de 2 Mbit/s a cada utilizador.

O campus da FEUP fica inserido numa área não residencial onde existe um hospital, diversas escolas de ensino superior e espaços abertos (auto-estrada e áreas verdes). No entanto, a Norte, Este e a Sul existem áreas residenciais onde habitam elementos da comunidade da FEUP. Não é uma área densamente povoada, embora aí circulem milhares de pessoas durante o dia. Os edifícios são baixos em relação aos edifícios candidatos sendo apenas de destacar o edifício do Hospital de São João/Faculdade de Medicina da Universidade do Porto (HSJ/FMUP), o edifício da biblioteca da FEUP e o edifício do IDMEC/INEGI. A elevação do terreno na área é quase nula, embora exista um ligeiro declive crescente nas orientações a noroeste e oeste e decrescente nas direcções opostas e que não foram considerados relevantes no projecto.

Os utilizadores estão distribuídos pelas áreas residenciais perto do campus da FEUP, mas também no interior do campus e nas restantes faculdades. No interior do campus da FEUP não é expectável o uso frequente do serviço WiMAX por existir um serviço WIFI com uma boa cobertura. Fora do campus e em zonas envolventes como o parque de estacionamento e zonas verdes do campus universitário da Asprela será de esperar um uso assíduo. As zonas residenciais mais próximas ficam a pouco mais de 300 metros dos limites do campus da FEUP e algumas a mais de 500 metros, a nascente as zonas residenciais distam mais de 1 km.

Considera-se que os utilizadores deste projecto estão distribuídos uniformemente ao redor do campus assumindo que os estacionamento e as áreas verdes dos edifícios envolventes possam ser locais onde se encontram de potenciais utilizadores.

Como a antena abrange zonas residenciais espera-se que o padrão de tráfego seja o característico para estas zonas, ou seja, elevado tráfego e contenção à noite em comparação com o período diurno. Considera-se um tráfego tipicamente residencial porque se espera que a óptima cobertura WIFI na FEUP cative os utilizadores em detrimento do serviço WiMAX.

Com base na Tabela 3.3, o sistema WiMAX deverá disponibilizar o mínimo 2 Mbit/s a cada utilizador. As zonas residenciais limítrofes da cobertura, a cerca de 1 km, também deverão garantir este débito.

O cálculo do *link budget* estima a quantidade de sinal de rádio no seu percurso, de modo a prognosticar o débito dentro dos limites e na periferia da célula. O *link budget* é realizado contabilizando as perdas e ganhos através do meio, bem como os parâmetros assumidos do sistema WiMAX, desde a transmissão até à recepção. Para maior precisão nos resultados deverão utilizar-se parâmetros iguais ou semelhantes aos do cenário que se pretende usar. Os parâmetros dos equipamentos são obtidos a partir das especificações fornecidas pelos fabricantes.

A potência recebida é o resultado do somatório dos ganhos e perdas na cadeia de transmissão do sinal, a equação

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_m - P_l - P_m + G_d + G_{rx} \quad (3.1)$$

reflete o cálculo desta potência. O valor de  $P_{tx}$  e o  $G_{tx}$  são, respectivamente a potência emitida e o ganho da antena de transmissão. Estes dois últimos valores referem-se à potência isotrópica radiada equivalente (PIRE), um valor de referência pelos reguladores e pelos fabricantes nas especificações. O valor  $P_l$  diz respeito às perdas no percurso do sinal da antena de transmissão até à antena de recepção e varia em função da distância do percurso do sinal. O ganho  $G_d$  é resultado das técnicas de diversidade e de antenas adaptativas. O valor  $P_m$  é a margem atribuída em virtude da variação que pode haver devido a condições atmosféricas ou outras. Os valores usados no cálculo, à excepção do valor das perdas no caminho, são especificados pelo fabricante. Para o cálculo das perdas do meio usou-se a formula 3.2 sugerida pelo WF em [7] e que é baseada no modelo urbano de propagação modificado pelo COST 231 do Hata. A fórmula

$$P_l [dB] = (44,9 - 6,55 \text{Log}_{10}(h_b)) \text{Log}_{10}\left(\frac{d}{1000}\right) + 45,5 \quad (3.2) \\ + (35,56 - 1,1h_s) \text{Log}_{10}(f_c) - 13,82 \text{Log}_{10}(h_b) + 0,7 + C$$

mostra que as perdas no percurso dependem da distância  $d$ , da frequência de transmissão  $f_c$ , da altura da *base station*  $h_b$ , da altura da *subscriber station*  $h_s$ , da constante  $C$ . Esta constante toma o valor de 3 dB para cenários urbanos e 0 para cenários suburbanos. Nesta avaliação convencionou-se que o campus da FEUP por não estar inserido num quarteirão de um centro urbano seria um cenário suburbano.

Com os valores especificados pelo fabricante e com a substituição das perdas no percurso na equação 3.1 pela fórmula 3.2 consegue-se a potência recebida em função da distância. Adicionando a esta informação que o sinal recebido para ser desmodulado pela SS têm de ter uma potência recebida maior que a sensibilidade,  $P_{rx} > S$ , então obtemos uma equação que em função da sensibilidade calcula-se a distância. A equação

$$d = 10^{\frac{P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} + G_d - P_m - S - 45,5 - (35,56 - 1,1h_m) \log_{10}(f_c) + 13,82 \log_{10}(h_b) - 0,7 - C}{44,9 - 6,55 \log_{10}(h_b)}} + 3 \quad (3.3)$$

permitirá saber os limites de cobertura da célula, ou seja, a distância para o valor mínimo da sensibilidade.

Com a Equação 3.3 e Tabela 3.4 também se poderá estimar o débito de uma SS a determinada distância. Para cálculo do débito é necessário especificar os dados físicos do WiMAX como o período da trama, a largura de banda da canalização, o tamanho da FFT e o número de símbolos OFDM usados para os dados. O débito é calculado com a expressão

$$\text{Débito} = \text{Tramas por segundo} \times \text{símbolos OFDM por trama} \times \text{subportadores de dados} \times \text{bits de informação} \times \text{taxa de codificação} \quad (3.4)$$

e varia com o número de sub-portadoras de dados. Como este valor é diferente para o *download* e *upload* os resultados serão diferentes.

Com recurso às fórmulas apresentadas nas equações 3.3 e 3.4 calculou-se a distância máxima de cobertura e o débito, considerando os valores limites oferecidos nas especificações dos fabricantes. Os cálculos foram realizados para três cenários diferentes em que as variáveis são a frequência e a potência de emissão. A razão destes 3 cenários deve-se a questões de regulamentação do espectro e das suas limitações que poderão condicionar o projecto. Com os vários cenários pretende-se avaliar as implicações que poderá ter no serviço aos utilizadores. Os primeiros dois cenários não têm quaisquer restrições e poderá avaliar-se o impacto com duas frequências diferentes nos 3600 MHz e 5600 MHz. Considerou-se sempre que os equipamentos tinham as sensibilidades obtidas nas especificações dos equipamentos da AirSpan e que se encontram reproduzidas na Tabela 3.4 .

Tabela 3.4 - Tabela com a sensibilidade e a modulação respectiva dos equipamentos.

Modulação / FEC	BS	SS
64QAM $\frac{3}{4}$	-78	-81
64QAM $\frac{2}{3}$	-80	-84
16QAM $\frac{3}{4}$	-84	-88
16QAM $\frac{1}{2}$	-87	-91
QPSK $\frac{3}{4}$	-91	-95
QPSK $\frac{1}{2}$	-93	-98

Os parâmetros rádio foram considerados sempre iguais para os três cenários, a saber: uma canalização de 10 MHz, uma FFT de 1024, um período de trama de 5 ms e um tempo de guarda de 1/8 da duração do símbolo OFDM.

i. Cenário 1

Para este cenário considerou-se a frequência de 3600 MHz e a potência máxima especificada de 36dBm e uma PIRE máxima de 56 dBm (com a antena integrada) da BS da MicroMAXe da Airspan. Considerou-se ainda que a BS tem um ganho relativo à diversidade (MIMO ou *beamforming*) de 2 dB no *uplink* e *downlink*. Considerou-se também que a SS tinha uma PIRE de 22dBm e um ganho relativo à diversidade de 2 dB no *uplink* e *downlink*.

O resultado do cálculo do *link budget* com estes dados está descrito na Tabela 3.5 onde se pode ver a distância máxima a que SS pode estar da BS, para a SS poder desmodular o sinal a uma modulação QPSK (modulação mínima obrigatória para a compatibilidade Wave 2 do WiMAX Forum).

Tabela 3.5 - Link budget do Downlink para uma frequência de 3600 MHz.

Ganhos e perdas	
PIRE	56 dBm
$G_{rx}$	0 dB
$G_d$	2 dB
$P_m$	0 dBm
$S_{mínima}$	-98 dBm
C	0 dBm
$h_b$	35 m
$h_m$	2 m
$f_c$	3600 MHz

Distância máxima	2235,9 m
MAPL	156 dBm

A Tabela 3.6 mostra o *link budget* do *uplink* onde se vê a distância máxima da SS para a BS receber a modulação QPSK da SS.

Tabela 3.6 - Link budget para o UL com uma frequência de 3600 MHz

Ganhos e perdas	
PIRE	22 dBm
$G_{rx}$	20 dB
$G_d$	2 dB
$P_m$	0 dBm
$S_{mínima}$	-95 dBm
C	0 dBm
$h_b$	35 m
$h_m$	2 m
$f_c$	3600 MHz
Distância máxima	725,7 m
MAPL	139 dBm

A Tabela 3.7 ilustra os débitos esperados para as respectivas modulações e ainda a distância máxima da antena para obtê-lo. A distância para obtenção desta modulação é no sentido do *downlink*. A Tabela 3.7 também ilustra os parâmetros da interface física do WiMAX considerados para o cálculo e em rodapé estão as fórmulas usadas.

Tabela 3.7 - Débitos esperados para em função da modulação e da distância.  
Parametrização da ligação física do WiMAX.

Parâmetros	Downlink	Uplink
Canalização (MHz)	10	
Amostragem 28/25	1,12	
Frequência de amostragem <sup>3</sup> (MHz)	11,2	
Tamanho da trama (ms)	5	
Tamanho da FFT	1024	
Sub-portadoras de dados no DL	720	560
Espaçamento entre sub-portadoras <sup>4</sup> (kHz)	10,9375	
Período de um símbolo <sup>5</sup> (ms)	0,091428571	
Tempo de guarda <sup>6</sup> (1/8, ms)	0,011428571	
Período de símbolo OFDMA <sup>7</sup> (ms)	0,102857143	
Símbolos OFDM por trama	48	
Símbolos OFDM de dados	35	12

Modulação	Code rate	DL, Mbit/s	UL, Mbit/s	Sensibilidade da SS (dBm)	Distância à BS
QPSK	1/2	5,04	1,344	-98	2235
2 bits de informação por símbolo	3/4	7,56	2,016	-95	1933
16-QAM	1/2	10,08	2,688	-91	1406
4 bits de informação por símbolo	3/4	15,12	4,032	-84	885
64-QAM	1/2	15,12	4,032		
6 bits de informação por símbolo	3/4	22,68	6,048	-81	726
	5/6	25,2	6,72		

O débito mínimo de download será de 5.04 Mbit/s a uma distância de 2235 metros.

<sup>3</sup>  $F_s$  = Canalização x factor de amostragem

<sup>4</sup>  $\Delta f$  =  $F_s$  / tamanho da FFT

<sup>5</sup>  $T_b$  =  $1 / \Delta f$

<sup>6</sup>  $T_g$  =  $T_b \times 1/8$

<sup>7</sup>  $T_s$  =  $T_b + T_g$

ii. Cenário 2

Para este cenário considerou-se a frequência de 5600 MHz e com a PIRE da BS de 56 dBm. Também se considerou o mesmo ganho relativo à diversidade (MIMO ou *beamforming*) de 2 dB no *uplink* e *downlink*. Para a PIRE da SS considerou-se 17dBm um ganho relativo à diversidade de 2 dB nos dois sentidos.

O resultado do cálculo do *link budget* com estes dados é o constante na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - *Link budget* do *downlink* para uma frequência de 5600 MHz.

Ganhos e perdas	
PIRE	56 dBm
$G_{rx}$	0 dB
$G_d$	2 dB
$P_m$	0 dBm
$S_{mínima}$	-98 dBm
C	0 dBm
$h_b$	35 m
$h_m$	2 m
$f_c$	5600 MHz
Distância máxima	1465,5 m
MAPL	156 dBm

A Tabela 3.9 mostra o *link budget* do *uplink* onde se vê a distância máxima da SS para a BS receber a modulação QPSK da SS.

Tabela 3.9 - *Link budget* para o UL com uma frequência de 5600 MHz

Ganhos e perdas	
PIRE	17 dBm
$G_{rx}$	20 dB
$G_d$	2 dB
$P_m$	0 dBm
$S_{mínima}$	-95 dBm
C	0 dBm
$h_b$	35 m

$h_m$	2 m
$f_c$	5600 MHz
Distância máxima	341,6 m
MAPL	134 dBm

A Tabela 3.10 ilustra os débitos esperados para as respectivas modulações e ainda a distância máxima da antena para esses débitos. A distância para obtenção desta modulação é no sentido do *downlink*.

Tabela 3.10 - Débitos esperados para em função da modulação e da distância.  
Parametrização da ligação física do WiMAX.

Parâmetros	Downlink	Uplink
Canalização (MHz)	10	
Amostragem 28/25	1,12	
Frequência de amostragem (Fs, MHz)	11,2	
Tamanho da trama (msec)	5	
Tamanho da FFT	1024	
Sub-portadoras de dados no DL	720	560
Espaçamento entre sub-portadoras (kHz)	10,9375	
Período de um símbolo (ms)	0,091428571	
Tempo de guarda 1/8	0,011428571	
Período de um símbolo OFDMA (Ts=Tb+Tg, ms)	0,102857143	
Símbolos OFDM por trama	48	
Símbolos OFDM de dados	35	12

Modulação	Code rate	DL, Mbit/s	UL, Mbit/s	Sensibilidade da SS (dBm)	Distância à BS
QPSK	1/2	5,04	1,344	-98	1465
2 bits de informação por símbolo	3/4	7,56	2,016	-95	1201
16-QAM	1/2	10,08	2,688	-91	922
4 bits de informação por símbolo	3/4	15,12	4,032	-84	580
	1/2	15,12	4,032		
64-QAM	3/4	22,68	6,048	-81	475
6 bits de informação por símbolo	5/6	25,2	6,72		

O débito mínimo de download será de 5.04 Mbit/s a uma distância de 1465 metros.

iii. Cenário 3

Para este cenário considerou-se também a frequência de 5600 MHz mas com os limites legais de potência definidos no QNAF [15]. No QNAF a faixa 5470-5725 MHz tem como valor máximo da densidade de potência para a PIRE média a limitação de 50mW/MHz. Como a canalização escolhida é de 10 MHz a potência máxima será 10 vezes 50mW/MHz ou seja 500mW (27dBm). Considerou-se o mesmo ganho relativo à diversidade (MIMO ou *beamforming*) de 2 dB no *uplink* e *downlink*. Para a PIRE da SS considerou-se 17dBm um ganho relativo à diversidade de 2 dB nos dois sentidos.

O resultado do cálculo do *link budget* com estes dados está na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - *Link budget* do *downlink* para uma frequência de 5600 MHz.

Ganhos e perdas	
PIRE	27 dBm
$G_{rx}$	0 dB
$G_d$	2 dB
$P_m$	0 dBm
$S_{mínima}$	-98 dBm
C	0 dBm
$h_b$	35 m
$h_m$	2 m
$f_c$	5600 MHz
Distância máxima	215 m
MAPL	127 dBm

A Tabela 3.12 mostra o *link budget* do *uplink* onde se vê a distância máxima da SS para a BS receber a modulação QPSK da SS.

Tabela 3.12 - *Link budget* para o UL com uma frequência de 5600 MHz

Ganhos e perdas	
PIRE	17 dBm
$G_{rx}$	20 dB
$G_d$	2 dB
$P_m$	0 dBm

$S_{mínima}$	-95 dBm
C	0 dBm
$h_b$	35 m
$h_m$	2 m
$f_c$	5600 MHz
Distância máxima	341,6 m
MAPL	134 dBm

Como se observa os limites de cobertura são muito baixos comparados com os anteriores resultados. Sem alterar os limites legais apenas consegue-se melhorias aumentando os ganhos das antenas de recepção, mas isto implicaria o aumento da dimensão das antenas e prejudica a mobilidade do equipamento.

### 3.5-Integração com a rede de dados da FEUP

A inserção da BS na rede da FEUP será realizada de modo a não obrigar a alterações no core da rede e na sua topologia. Actualmente, a rede da FEUP encontra-se bem delimitada, é escalável e o incremento de mais redes é sustentável.

A localização da antena no edifício do IDMEC/INEGI é uma vantagem ao nível das infra-estruturas, pois, como já se referiu, existem fibras que ligam o datacenter deste edifício ao datacenter do CICA. O facto do datacenter do IDMEC/INEGI estar localizado no último andar, a existência de caminhos e esteiras até à cobertura são outras mais-valias presentes que a seu tempo serão aproveitadas. A distância pelos caminhos de cabos entre a posição da antena e o datacenter corresponde a menos de 90 metros, o que permite que a ligação à BS termine dentro do datacenter. O cabo que fará esta ligação será do tipo S/UTP de forma a evitar as interferências aquando da passagem junto aos cabos de alimentação dos grupos AVAC colocados na cobertura. O cabo terá um revestimento próprio para exterior de modo a aumentar a durabilidade e resistência à exposição aos elementos atmosféricos.

A BS é alimentada electricamente através de um cabo UTP standard que liga a uma interface proprietária de um switch da Airspan. O switch da Airspan tem 4 portas Ethernet, para se ligar a uma rede de dados, e uma interface proprietária para ligar à BS onde passam os dados e a energia eléctrica. Esta interface proprietária é semelhante ao POE, mas não é standard e pode usar-se um cabo UTP de categoria 5e com o máximo de 100 metros. Para se

fazer a ligação de dados da BS liga-se uma das 4 portas Ethernet do switch da Airspan ao switch Nortel 5530 que está instalado no datacenter do IDEMEC. A interligação com a FEUP faz-se com uma das fibras multimodo disponíveis e que será ligada a um outro switch do Centro de Informática.

A BS será servida por 3 VLAN que transportam 3 redes de finalidades diferentes. Uma delas será a rede de gestão que permite aceder a todos os equipamentos para configuração, manutenção e monitorização. O acesso a esta rede é restrito e protegido por firewall, é uma rede prioritizada e out-of-band em grande parte da rede. Através desta VLAN de gestão será realizada a manutenção e monitorização da BS e será também onde se efectuaram as trocas de pacotes RADIUS entre a BS e o servidor de RADIUS para autenticação dos utilizadores e equipamentos. A segunda VLAN será a do serviço de VoIP que poderá terminar na SS ou no telefone VoIP do utilizador. Esta VLAN, tal como a VLAN de gestão, é marcada com prioridade elevada (IEEE 802.1p) e assim terá prioridade a nível 2. Os switches de acesso, de distribuição e os de core processam os 3 bits do cabeçalho Ethernet de modo a garantirem que o tráfego VoIP seja prioritizado. Os routers de distribuição são de nível 2 e 3 e processam a informação de QoS de nível dados e de rede, e traduzem os tipos de serviço definidos no nível 2 nos 8 bits do cabeçalho IP designados de DSCP que especificam as classes de serviço.

A última VLAN é a de dados, onde circulam os restantes serviços. Esta VLAN terminará num router que atribuirá por DHCP o endereço IP aos utilizadores. Após a autenticação, os equipamentos têm acesso à VLAN e pedem um endereço IP, que será atribuído e registado no router juntamente com o MAC address. A gateway desta VLAN é um router que suportará o serviço de DHCP Secured e que evitará o MAC ou IP spoofing. Este método de DHCP associa o IP ao MAC address numa *access list* e não permite que o tráfego sai desta rede sem que esta associação seja válida. Se algum utilizador tentar alterar o seu IP não conseguirá passar a gateway porque a associação IP/ MAC não se encontra registada. O contrário também se passa, embora de um modo diferente; assim que o utilizador alterar o seu MAC, o EAP do NAS (BS) obrigará à re-autenticação. Os logs de atribuição de IP são registados para futura consulta, em caso de necessidade.

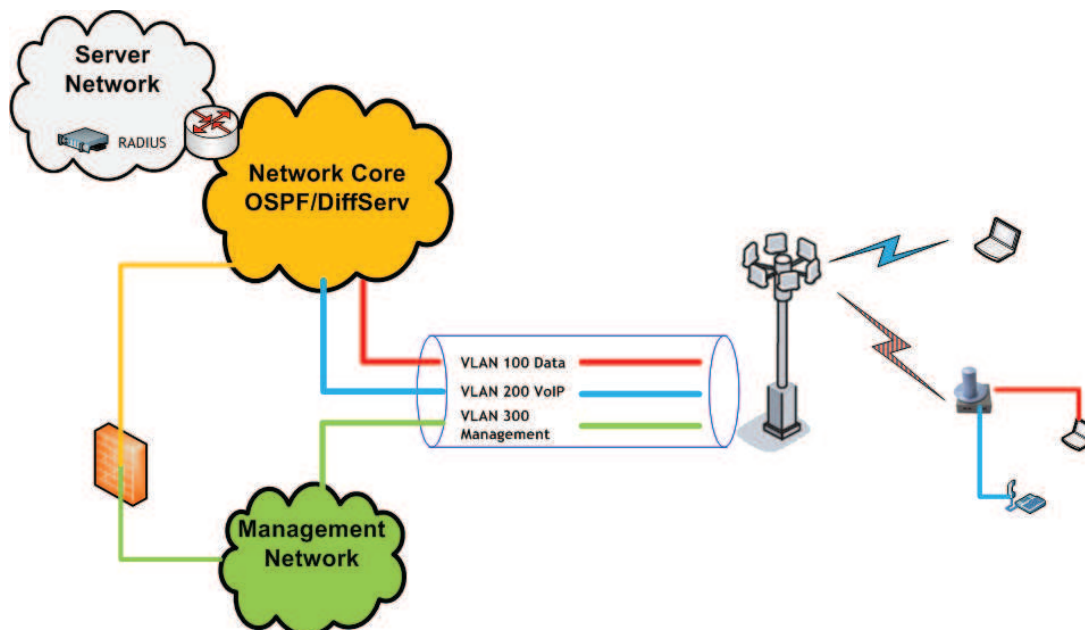


Figura 3.1 - Integração da BS na rede da FEUP

A BS será inserida no sistema de monitorização que gerará um alerta caso a BS deixe de ser alcançada. Além deste alerta, serão recolhidos dados com informação das SSs associadas e do tráfego gerado por cada SS, que serão guardados numa base de dados do RRD tool com o intuito de gerar gráficos informativos. Para a realização duma gestão preventiva e activa poderão ser monitorizados limites para geração de alertas, provocando a intervenção preventiva para antecipar eventuais problemas. Os limites que poderão ser monitorizados são a percentagem de utilização do processador da BS, o tráfego de broadcast, o tráfego multicast, o tráfego, erros e número de clientes associados. A contabilização do tempo de serviço também é importante para se poder observar o cumprimento do SLA acordado nos objectivos anuais.

O servidor de RADIUS da FEUP suporta a autenticação WiMAX. O software designa-se Radiator e é produzido pela empresa australiana Open System Consultant. Usado pelos sistemas WIFI, dial-Up e VPN, permitirá usufruir do know-how já existente neste software. O conhecido software FreeRadius também tem suporte para WiMAX e poderia ser uma alternativa ao Radiator.

A autenticação poderá ser feita a dois níveis: ao nível do equipamento, e ao nível do username do utilizador. No entanto, apesar de não se esperar um uso massificado deste serviço, não se pretende efectuar a autenticação do equipamento para permitir o uso de qualquer SS WiMAX sem realização de qualquer registo. Os métodos de autenticação do utilizador serão o EAP-TTLS e o EAP-PEAP que são suportados pela SS, pela BS e pelo servidor de RADIUS. Estes métodos são vantajosos porque já são suportados pelos sistemas operativos para a autenticação no WIFI.

Após a autenticação, o servidor de RADIUS envia à BS a autorização de acesso e também alguns parâmetros que caracterizam a qualidade da ligação do utilizador. Os parâmetros estão armazenados no servidor de RADIUS num determinado perfil de utilização. Alguns destes parâmetros são o tipo de escalamento, o débito máximo sustentado, o débito mínimo sustentado, o pico de débito máximo, o jitter, a máxima latência e a prioridade entre outros definidos em [20] e em [21].

O servidor de RADIUS fará o accounting que ficará armazenado numa base de dados MySQL facilitando a consulta para efeitos estatísticos e de segurança. A informação armazenada será referente a cada sessão de autenticação e conterá o username do utilizador, tráfego de uplink e downlink, o ID da sessão, o tempo de sessão, bem como o IP usado.

### **3.6-Conclusão**

No término deste capítulo pode concluir-se que as primeiras decisões para a implementação de uma rede WiMAX são de grande importância. Decidir o melhor local para a instalação da antena BS, escolher os melhores modelos de propagação de sinal rádio, que mais se assemelham à realidade, as bandas de frequências a usar e os tipos de equipamentos. Estas opções, acompanhadas de uma ferramenta de planeamento, otimizarão o projecto de uma rede WiMAX.

Nesta implementação, se não se optar por uma banda na faixa dos 3600 MHz e se se optar pela banda não licenciada dos 5600 MHz haverá limitações no alcance da rede pois existem limitações do regulador nas potências de emissão.

A utilização desta rede será transparente para o utilizador porque ligará directamente à rede interna da FEUP. A utilização desta rede não necessitará de qualquer tipo de registo ou pedido de utilização sendo apenas necessário ter o modem WiMAX.

## Capítulo 4

# Avaliação do Trabalho e Análise de resultados

O objectivo deste trabalho é, como se tem vindo a referir, a especificação e implementação de uma rede WiMAX na FEUP. Neste capítulo serão feitas algumas considerações à metodologia usada, assim como, ao desenvolvimento efectuado no capítulo anterior.

### 4.1- Análise do trabalho

O facto do campus da FEUP não estar num meio tipicamente urbano, com edifícios altos em todos os quarteirões, facilitou a escolha do edifício que albergará a BS. Os três edifícios altos existentes e o facto de haverem espaços livres abertos ajudaram este cenário. Alguns efeitos de propagação típicos de áreas densamente povoadas, como o efeito de canyon que guia as ondas entre os edifícios, não poderão ser considerados.

Os equipamentos seleccionados foram de fabricantes que constam no mapa de instalações no site do WiMAX Forum. A Alvarion é o fornecedor da solução móvel de banda larga implementada pela ClearWire em Sevilha e brevemente noutras cidades do sul de Espanha. A AirSpain fornecia os equipamentos à Nortel Networks para as soluções de banda larga sem fios e conta com algumas implementações espalhadas pelo mundo. Optou-se por equipamentos de pequena dimensão vocacionados para pequenas células. Os equipamentos de classe superior,

destinados a operadores, são mais caros e com capacidades que não se enquadram nestes objectivos.

O planeamento rádio foi realizado com suporte num modelo de propagação descrito WF. Os vários cálculos efectuados ilustram a variação que o alcance de uma rede WiMAX poderá ter nas frequências. As frequências mais baixas são as melhores para a propagação do sinal, como era de esperar, por isso, a discussão lançada pelo regulador sobre o dividendo digital para faixa dos UHF e VHF e o interesse dos operadores nestas bandas.

A análise do *link budget* para as várias frequências mostra as vantagens da banda dos 3600 MHz em relação às dos 5600 MHz. As vantagens começam na reserva dos canais para os detentores dos direitos de utilização que garantem protecção nos canais além de poder-se usar potências mais elevadas. No cálculo efectuado para esta faixa com uma potência de emissão de 4W (36dBm) e uma antena de 20dBi pode criar uma célula com um raio de 2200 metros. O que ultrapassava os objectivos de 1000 metros.

No cálculo do link budget do uplink considera-se uma SS USB por ser a que apresenta a menor potência de emissão. Mas poderiam ser consideradas situações melhores com SS de maiores dimensões usadas em interiores com antenas de ganho de 6 a 9 dBi e potências de emissão que podem chegar ao 27dBm. Obviamente que teriam de se considerar também os cálculos de penetração nos edifícios e que podem ter perdas entre 10 e 20 dB.

Uma banda nesta faixa dos 3600 MHz seria o ideal; no entanto, uma reunião que se realizou com a ANACOM em 8 de Agosto de 2009, resultou na confirmação da impossibilidade de usar a faixa. A proximidade do leilão das frequências para o BWA afastavam a hipótese de um canal temporário e a atribuição dos direitos nesta faixa acentuava esta recusa. No entanto, ficou a esperança de uma possibilidade no caso de um insucesso na procura das licenças por parte de operadores ou outros interessados. Afastada a hipótese, a ANACOM remeteu-nos para as bandas não licenciadas do QNAF as faixas dos 2,4 e 5 GHz.

Os cálculos para a frequência dos 5600 MHz demonstraram um alcance mais baixo para a mesma potência mas ainda assim, a Tabela 3.8 mostra que se consegue um alcance superior a 1000 metros. Apesar de ser tecnicamente uma possibilidade, ela está fora da lei. O QNAF permite que as estações emisoras nesta banda tenham um máximo de potência de 50mW/MHz por cada 1 MHz ou uma PIRE média superior a 1W, e quer dizer uma potência de 500mW (27 dBm), para a canalização de 10 MHz. Com esta potência o alcance é praticamente insignificante comparado com os resultados anteriores.

Se considerarmos esta banda com os limites do regulador e SS com antenas de ganho superior então já se conseguem distâncias mais interessantes, mas implicaria que os utilizadores domésticos tenham SS com antenas exteriores.

As limitações desta banda pelo regulador vão de encontro ao cenário actual de inexistência de redes de banda larga móvel, o que faz algum sentido, afinal as redes móveis estão destinadas a ser exploradas pelos operadores. No entanto, a utilização para aplicações fixas é um panorama habitual nas ligações ponto a ponto ou ponto multiponto de empresas e entidades públicas, para transmissão de dados de canais de voz (acessos primários). A dificuldade encontrada na procura de equipamentos SS com interface USB para ligação ao computador, na banda dos 5 GHz foi grande, e os equipamentos são praticamente inexistentes sendo a maioria projectados para as bandas dos 2500 MHz e dos 3600 MHz.

## 4.2- Site Survey

A possibilidade de realizar um site survey permitiu analisar a propagação do sinal no meio, verificar os limites de uma célula e os débitos oferecidos pela tecnologia. Para isso desenhou-se um cenário que permitiu atingir estes objectivos.

O cenário desenhado para a realização do site survey foi uma base station ligada a uma rede com um portátil onde estava a correr um iperf para fazer testes de tráfego. A SS era instalada num carro e ligaria a um portátil onde seriam realizados os testes de conectividade e de carga com a ligação ao servidor da BS. Os débitos, modulações e potências de sinal recebidos eram registados.

Para preparar o site survey começou-se por realizar atempadamente o pedido à direcção do IDMEC que amavelmente atendeu o pedido. A tarefa seguinte foi a apreciação do local de instalação da antena. A cobertura do edifício do IDMEC/INEGI, onde se identificou o melhor modo de fixar a antena e alimentada electricamente. A fixação da antena deveria minimizar os danos da estrutura do edifício, tendo por isso, optado por instalá-la num mastro de 3 metros, suportado por uma base de guarda-sol. Este modo de fixação também tornava fácil o movimento da antena na cobertura para a aproximar dos limites da coberta e facilitava a sua orientação.

Com recurso ao Google Maps obtiveram-se os mapas da zona do campus e onde se marcaram a área onde realizaria o *site survey*. Como a antena tinha uma orientação de 60° assinalou-se no mapa a área de cobertura, produzindo os mapas da figura onde poderia consultar a orientação da antena e registar os pontos onde se realizavam as leituras.



Figura 4.1 - Mapa do campus da FEUP com sectores de 60°.

A alimentação eléctrica da SS realizou-se com a instalação no carro de um conversor DC-AC ligado ao isqueiro.

A BS foi configurada para permitir a associação da SS e para a colocar numa VLAN por defeito para os portáteis de teste poderem comunicar. Para otimizar a realização das medidas desenvolveu-se uma *script* em *perl* que corria no portátil ligado à SS e que registava as medidas no ficheiro. O registo continha as coordenadas GPS, o estado da SS, a canalização, a relação sinal ruído (SNR), a potência do sinal recebido (RSSI), a modulação no *downlink*, a canalização do *uplink*, a potência de transmissão do *uplink* e a modulação do *uplink*. A *script* também iniciava um teste de tráfego chamando o programa *iperf* e procedia ao registo do resultado no ficheiro, como se pode ver na seguinte caixa de texto.

```
N41Â°10"882 w8Â°35"679,NETWORK ENTRY: DL_SYNC, N/A,-214748364.8 dB,-5.0 dB, 0.0 dBm, 64QAM 3/4, N/A, 0.0 dBm, BPSK 1/2
N41Â°10"882 w8Â°35"679,NETWORK ENTRY: DL_SYNC, N/A,-214748364.8 dB,-5.0 dB, 0.0 dBm, 64QAM 3/4, N/A, 0.0 dBm, BPSK 1/2
N41Â°10"882 w8Â°35"679,NETWORK ENTRY: DL_SYNC, N/A,-214748364.8 dB,-5.0 dB,-53.0 dBm, 64QAM 3/4, N/A, 0.0 dBm, BPSK 1/2
N41Â°10"882 w8Â°35"679, OPERATIONAL, 10 MHz, 25.5 dB, 24.6 dB, -73.8 dBm, 64QAM 3/4, 10 MHz, 2.6 dBm, BPSK 1/2
N41Â°10"882 w8Â°35"679, OPERATIONAL, 10 MHz, 26.2 dB, 24.6 dB, -73.4 dBm, 64QAM 3/4, 10 MHz, 3.8 dBm, BPSK 1/2
N41Â°10"882 w8Â°35"679, OPERATIONAL, 10 MHz, 25.3 dB, 24.6 dB, -73.3 dBm, 64QAM 3/4, 10 MHz, 3.8 dBm, BPSK 1/2
N41Â°10"882 w8Â°35"679, OPERATIONAL, 10 MHz, 24.6 dB, 24.6 dB, -73.6 dBm, 64QAM 3/4, 10 MHz, 3.8 dBm, BPSK 1/2
N41Â°10"882 w8Â°35"679, OPERATIONAL, 10 MHz, 25.9 dB, 23.8 dB, -73.9 dBm, 64QAM 3/4, 10 MHz, 3.8 dBm, BPSK 1/2
N41Â°10"882 w8Â°35"679, OPERATIONAL, 10 MHz, 25.5 dB, 23.8 dB, -74.2 dBm, 64QAM 2/3, 10 MHz, 3.8 dBm, 64QAM 3/4
N41Â°10"882 w8Â°35"679, OPERATIONAL, 10 MHz, 24.8 dB, 23.8 dB, -74.5 dBm, 64QAM 2/3, 10 MHz, 3.8 dBm, 64QAM 3/4
N41Â°10"882 w8Â°35"679, OPERATIONAL, 10 MHz, 25.4 dB, 23.8 dB, -74.4 dBm, 64QAM 2/3, 10 MHz, 3.8 dBm, 64QAM 3/4
N41Â°10"882 w8Â°35"679, OPERATIONAL, 10 MHz, 24.7 dB, 23.8 dB, -74.6 dBm, 64QAM 2/3, 10 MHz, 3.8 dBm, 64QAM 3/4
N41Â°10"882 w8Â°35"679, OPERATIONAL, 10 MHz, 24.2 dB, 23.8 dB, -74.6 dBm, 64QAM 2/3, 10 MHz, 3.8 dBm, 64QAM 3/4
```

A Figura 4.2 ilustra a instalação da antena no edifício, salienta-se a inclinação na vertical de aproximadamente  $8^\circ$  de modo a dirigir o máximo de radiação para a proximidade do edifício.



Figura 4.2 - Base Station WiMAX instalada na cobertura do edifício do IDMEC/INEGI

A obtenção das medidas foi realizada com a orientação da antena para norte. Com o recurso ao mapa da Figura 4.1 assinalaram-se no mapa, os locais das medidas e restringiram-se as leituras à área de cobertura para uma antena de  $60^\circ$ . Nas leituras fora da área de cobertura notou-se o decréscimo da potência como se anotou na leitura M6 na Tabela 4.1.

No carro percorreram-se vários locais dentro da área de cobertura para efectuar as medidas. Para se proceder às medidas era necessário parar o carro, orientar a antena e esperar que a SS se associasse à BS. Este processo poderia demorar alguns minutos e tinha o inconveniente da incerteza da melhor orientação da antena, esta foi uma das dificuldades do *site survey* como se refere mais adiante. Assim que a antena sincronizava eram registadas as medidas com a script desenvolvida.

Os resultados das medidas registados foram inseridos na Tabela 4.1 e foi criado o mapa da

Figura 4.3 no Google Earth.

Tabela 4.1 - Valores medidos durante a realização do site survey.

Nome	Distância (m)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Modulação DL	Débito no download (Mbit/s)	Modulação UL	Tx Pw (dBm)	Comentários
M1	220	-73,3	26,2	64QAM 3/4	16,2	64QAM 3/4	n.d.	
M2	160	-70,5	27,0	64QAM 3/4	n.d.	64QAM 3/4	n.d.	
M3	220	-76,1	23,0	16QAM 3/4	n.d.	BPSK 1/2	6,1	
M4	220	-74,2	25,5	64QAM 3/4	n.d.	64QAM 3/4	3,8	
M5	170	-73,3	24,6	64QAM 2/3	n.d.	64QAM 3/4	4,0	
M6	250	-89,5	7,8	BPSK 1/2	n.d.	BPSK 1/2	20,0	Este ponto devia estar fora do alcance dos 60° da antena
M7	560	-85,9	12,6	QPSK 1/2	8,86	64QAM 3/4	15,0	
M8	890	-92,9	3,0	BPSK 1/2	7,40	BPSK 1/2	20,0	
M9	1050	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		n.d.	Não tinha linha de vista
M10	860	-84,8	14,2	QPSK 3/4	n.d.	64QAM 3/4	17,3	
M11	630	-92,4	3,8	BPSK 1/2	9,42	BPSK 1/2	20,0	
M12	620	-85,5	14,2	QPSK 3/4	16,4	64QAM 3/4	15,0	
M13	600	-89,6	8,6	BPSK 1/2	0,981	64QAM 2/3	20,0	Árvores no link
M14	340	-86,2	11,8	QPSK 1/2	5,29	16QAM 3/4	16,3	Linha de vista por entre as árvores, mas muito estreito. Possivelmente abertura suficiente para não ser prejudicado pelo efeito de Fresnel.



Figura 4.3 - Valores da potência recebida e locais de medida no Google Earth.

A SS não tinha a antena mais indicada para a realização do site survey por ser uma antena direccional e que tinha de se orientar em direcção à BS para esta se associar. Como se pretendia avaliar o WiMAX móvel o ideal era realizar o site survey com uma BS 802.16e, com MIMO e Beamforming e uma SS com uma antena omnidireccional que pudesse ser colocada no carro para realização das medições em cenários móveis e estáticos.

Com base na Equação 3.1 calculou-se a potência recebida para as distâncias em que foram realizadas as medidas durante o site survey. Os valores obtidos foram colocados na Tabela 4.2 juntamente com os valores das medidas realizadas, de modo, a que possam ser comparadas. Além das considerações acima mencionadas, e das poucas medidas realizadas, alguns valores teóricos são aproximados dos valores reais. O que poderá indiciar que o modelo de propagação aproxima-se do cenário do site survey.

Tabela 4.2 - Valores da potência recebida teórica e real.

Distância à BS (m)	Perdas no percurso (dBm)	Potência recebida (dBm)	Nome da leitura	Valor reais obtidos no <i>site survey</i>
160	122,5	<b>-69,5</b>	M2	<b>-70,5</b>
170	123,5	<b>-70,5</b>	M1	<b>-73,3</b>
220	127,4	<b>-74,4</b>	M4	<b>-74,2</b>
250	129,3	<b>-76,3</b>	M6	<b>-89,5</b>

560	141,5	<b>-88,5</b>	M7	<b>-85,9</b>
890	148,5	<b>-95,5</b>	M8	<b>-92,9</b>
860	147,9	<b>-94,9</b>	M10	<b>-84,8</b>
630	143,2	<b>-90,2</b>	M11	<b>-92,4</b>
620	143,0	<b>-90,0</b>	M12	<b>-85,5</b>
600	142,5	<b>-89,5</b>	M13	<b>-89,6</b>
340	133,9	<b>-80,9</b>	M14	<b>-86,2</b>

### 4.3- Avaliação da Metodologia

A metodologia seguida no trabalho procurou que a pesquisa e o trabalho efectuado estivessem ligados e que fossem indispensáveis para a tarefa seguinte, por isso, iniciou-se esta tese pela consulta dos standards do IEEE e especificações do WF e que permitiram aprofundar os conhecimentos sobre a tecnologia WiMAX. A leitura de alguns livros assim como de documentos de alguns fabricantes elucidaram temas menos claros nos documentos do IEEE e WF. A aquisição dos conhecimentos teóricos mostrou-se fundamental na realização do planeamento rádio, nas decisões adoptadas no projecto e na interpretação de resultados. O conhecimento do estado da arte da tecnologia e os projectos WiMAX realizados pelo mundo criaram uma sensibilidade e amadurecimento para suportar as decisões na implementação de um projecto de banda larga sem fios. A primeira parte desta monografia é o resultado deste trabalho de pesquisa e investigação sobre a tecnologia, mas não só. A questão legal sobre o espectro rádio eléctrico foi também alvo de pesquisa, cujo resultado foi determinante e influenciou o trabalho devido às limitações regulamentares existentes.

O desenvolvimento do trabalho, suportado pelo estudo prévio, foi realizado de modo progressivo e encadeado nas necessidades. Assim, o resultado da escolha do edifício e a pesquisa do equipamento foi utilizado no planeamento rádio e na estimativa da capacidade da célula WiMAX. A informação sobre o enquadramento legal levou a considerações de implementação devido aos limites impostos.

A trabalho para cálculo do link budget permitiu a realização de várias tabelas que avaliaram a capacidade e alcance de uma célula WiMAX que pode viabilizar uma solução.

A integração com a rede da FEUP é uma implementação particular em vários pontos semelhante à integração da WiFi. O meio de acesso, a autenticação e mecanismos de segurança, os acessos aos recursos são paralelismos que se podem fazer com esta rede.

A parte experimental deste trabalho seria implementação ou um site survey que avaliariam eficazmente o trabalho efectuado. No entanto, as limitações impostas pelas condições dos equipamentos, com se realizou o site survey restringiu a prova do trabalho.

## Capítulo 5

### Conclusão

O trabalho desenvolvido nesta monografia focou-se no planeamento de uma implementação de uma rede WiMAX no campus da FEUP. Com uma só BS mostrou-se como se poderia criar um serviço de acesso à rede da FEUP aos utilizadores residentes ou móveis num raio de 1km.

O desenvolvimento do trabalho identificou os edifícios mais indicados para instalar a BS concluindo-se pelo edifício do IDMEC/INEGI que, além da sua altura, possui excelentes condições técnicas e um óptimo acesso. O planeamento executado previu o alcance e a capacidade do sistema para várias possibilidades de implementação, variando de acordo com a faixa de frequência e as limitações impostas pelo regulador.

A rede da FEUP facilmente integrará esta BS e este serviço, usando para o efeito, os equipamentos existentes e aproveitando o serviço de autenticação RADIUS já usado. Esta integração será transparente para os utilizadores, não sendo necessárias configurações adicionais aos seus portáteis.

As comunicações sem fios continuarão a ser uma área de investigação e a aproximação da ratificação do novo standard 802.16m, que se prevê para este ano, motivará mais estudos e análises. Este trabalho poderá evoluir para um software de planeamento de rede WiMAX. Um software que aceite mapas com dados do terreno, dos edifícios, dados demográficos, que preveja vários modelos de propagação.

Com a aquisição de uma BS WiMAX poderão realizar-se medidas de sinal em vários cenários e comparar-se os resultados com modelos existentes e, eventualmente, propor um novo modelo empírico de propagação.

O serviço criado também poderá ser estudado para servir a comunidade eduroam na área de cobertura e, em caso de sucesso, expandido a outros locais.

## Referências

- [1] *Situação das Comunicações 2008*. ICP-ANACOM. <http://www.anacom.pt>.
- [2] *IEEE Std 802.16-2004*.
- [3] *WiMAX Forum® Industry Research Report Review, Maio de 2009*.
- [4] *Relatório de Actividades do CICA de 2008*.
- [5] *Diário da República nº 205 de 05/09/1997*.
- [6] *Mobile WiMAX - Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*. WiMAX Forum.
- [7] *WiMAX™ System Evaluation Methodology. Versão 2.1*. WiMAX Forum.
- [8] *IEEE Std 802.16e-2005*.
- [9] *Standard IEEE 802.16e-2005*.
- [10] M. Barbiroli, C. Carciofi, G. Falciasecca, M. Frullone, P. Grazioso, A. Varini "New Statistical Approach for Urban Environment Propagation Modeling", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 51, No.5, pp. 1234-1241, Sept. 2002.
- [11] A. Rial, H. Krauss, J. Hauck, M. Buchholz, F. Agelet, "Empirical Propagation Model for WiMAX at 3.5 GHz in an Urban Environment", *Microw. and Optical Technol. Letters*, vol. 50, No.2, Feb. 2008, pp 482-487.
- [12] R. Wahl, O. Stähler, G. Wölfle, "Propagation Model and Network Simulator for Stationary and Nomadic WiMAX Networks", *IEEE*, 2007.
- [13] *Decisão do ECC nº ECC/DEC/(07)02*.
- [14] *Relatório da consulta pública sobre a introdução BWA*. ICP-ANACOM.
- [15] *Quadro Nacional de Atribuição de Frequências. Edição 2008 V1*. ICP-ANACOM.
- [16] *Airspan Networks Inc*. <http://www.airspan.com/>.
- [17] *Redline Communications*. <http://www.redlinecommunications.com/>.
- [18] *Alvarion Ltd*. <http://www.alvarion.com/>.
- [19] *SOMA Networks, Inc*. <http://www.somanetworks.com/>.
- [20] *Installation and Reference manual for Radiator version 4.5.1, Open System Consultants Pty. Ltd*.

[21] *WiMAX Forum Network Architecture - Stage 3 - Detailed Protocols and Procedures - Release 1, Version 1.2.*