



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ELECTRÓNICA E
TELECOMUNICAÇÕES E DE COMPUTADORES**

ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES

Avaliação dos Sistemas WiMAX e GSM-R para ambientes ferroviários

Nuno Manuel dos Santos Franco

(Licenciado)

**DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM ENGENHARIA DE ELECTRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES**

Orientador: Prof. Nuno António Fraga Juliano Cota
Co-Orientador: Prof. António João Nunes Serrador

Júri:

Presidente: Prof. Mário Pereira Véstias
Vogal: Prof. Pedro Renato Tavares de Pinho

Dezembro de 2010

Resumo

Com este trabalho pretende-se estudar o desempenho das tecnologias GSM-R e WiMAX em ambientes ferroviários. Este tipo de estudo tem uma importância elevada devido grande interesse na reestruturação dos sistemas de comunicações vocacionados para aplicações ferroviárias. Estes sistemas são cada vez mais complexos, apresentando níveis mais elevados de exigência, como a segurança, suporte de sinalização, tráfego ferroviário e interoperabilidade entre sistemas de diferentes países. Com tudo isto é necessário explorar e conhecer o comportamento de diversas tecnologias para este tipo de aplicações.

Neste trabalho foi efectuado um primeiro estudo abrangendo a tecnologia WiMAX (Norma IEEE 802.16d) em ambientes interiores de edifícios, de forma a estudar o seu comportamento com e sem linha de vista e em proximidade e afastamento da estação base. Este estudo foi conclusivo quanto há não adequação desta tecnologia em ambientes ferroviários, visto ter sido observado que em situações de ausência de linha de vista a degradação da qualidade do sinal não conseguiria suportar os níveis de exigência necessários para a aplicação do mesmo em ambientes ferroviários.

Analizou-se em segundo lugar a tecnologia GSM-R, onde se efectuou um estudo de campo em ambientes reais. Para o estudo desta tecnologia foram utilizados ambientes diversificados de forma a obter um estudo mais aprofundado do seu comportamento. Como objectivo têm-se a criação de melhores métodos de planeamento, mais vocacionados para as características específicas dos ambientes ferroviários e exigências das aplicações dos sistemas de comunicações ferroviários. Através deste estudo foi possível obter conclusões relativamente à variação da potência do sinal para as diversas condições e ambientes de propagação a que o sistema GSM-R foi sujeito, tendo sido possível também caracterizar o tipo de ambientes característicos das linhas ferroviárias. Foi possível também concluir que este tipo de sistemas consegue responder aos níveis de exigência e aplicações dos sistemas de comunicação ferroviários, trazendo uma melhoria relativamente aos existentes actualmente a nível nacional.

Palavras Chave:

Planeamento, GSM-R, Comunicações ferroviárias, WiMAX.

Abstract

The purpose of this MSc is to study the performance of GSM-R and Wimax technologies in railway environment. This kind of study has a great importance due to the large interest in the restructuring of the communications systems oriented to railway applications. These systems are getting more and more complex, showing higher levels of demand, like security, signaling support, railway traffic and interoperability between systems from different countries. Thus, it becomes necessary to explore and to understand the behavior of the different technologies for this kind of applications.

In this MSc a study about WiMAX technology (IEEE 802.16d) was realized in an indoor environment, in order to study its behavior with and without line of sight and in proximity and distance regarding the base station. This study was not conclusive concerning the appropriateness of this technology in railway environments, as it has been observed that in situations without line of sight, the degradation of signal quality couldn't support the levels of demand needed for its application in railway environments.

In second place, the GSM-R technology was analyzed, in where a study conducted in real environments was made. For this study there were used various environments in order to obtain a more profound study of this technologies' behavior. One of the purposes is the development of better planning methods, oriented to the specific characteristics of the railway environments and demands of the applications of the railway's communications systems. Through this study it was possible to draw conclusions regarding the variations of the signal strength for various conditions and propagation environments that the GSM-R was subjected, making it possible to characterize as well the kind of environments typical of the railway lines. It was also possible to conclude that this kind of systems can respond to the levels of demand and to the railway's communications systems, bringing an added value to currently ones existing at national level.

Key Words

Planning, GSM-R, Rail Environments, WiMAX.

Agradecimentos

Um agradecimento especial aos meus pais pelo afecto, apoio moral e paciência.

Aos professores Nuno Cota e António Serrador pela orientação, apoio e empenho sem os quais a realização deste trabalho seria impossível.

A minha namorada Mavi Pacheco pelo carinho, amor e atenção.

Ao meu amigo Ricardo Correia pelo seu apoio incondicional.

A todos os meus colegas do ISEL que me apoiaram ao longo destes anos.

A todos meus restantes amigos pelas críticas construtivas e sugestões dadas ao longo do tempo de execução da tese.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xvii
Lista de Acrónimos.....	xix
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objectivos	3
1.4 Estrutura do relatório	4
Capítulo 2 - Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários	5
2.1 Introdução	5
2.2 Equipamento	5
2.2.1 Sistema de comunicações	5
2.3 Sistema de medidas.....	8
2.3.1 Arquitectura do sistema	8
2.4 Cenários	9
2.5 Resultados.....	10
2.5.1 Análise da propagação.....	10
2.5.2 Análise dos ritmos de transmissão	12
2.6 Modelação estatística do sinal	14
2.6.1 Análise de Resultados.....	15
2.6.2 Distribuição do sinal.....	16
2.6.3 Validação entre cenários.....	16
2.6.4 Conclusões.....	18

Capítulo 3 - Análise do desempenho da tecnologia GSM-R	19
3.1 Introdução	19
3.2 Especificação GSM-R.....	19
3.2.1 Arquitectura do sistema	20
3.2.2 Banda de frequências.....	21
3.2.3 Cobertura GSM-R	22
3.3 Equipamento	23
3.3.1 Emissor	23
3.3.2 Receptor.....	24
3.4 Cenários de teste	25
3.4.1 Linha de Cascais	25
3.4.2 Linha de Sintra	26
3.4.3 Linha do Oeste.....	27
Capítulo 4 - Análise dos Resultados	29
4.1 Introdução	29
4.2 Estudo do ambiente de propagação	29
4.2.1 Classificação dos locais de teste.....	30
4.3 Estudo do decaimento do campo	31
4.3.1 Linha de Cascais	31
4.3.2 Linha de Sintra	36
4.3.3 Linha do Oeste.....	38
Capítulo 5 - Conclusões Finais	45
5.1 Trabalho efectuado	45
5.2 Resultados	46
5.3 Trabalho futuro	48
Referências	51
Anexo A - Ferramenta de software para recolha de medidas do sistema WiMAX.....	53

Anexo B – Cenários de Medidas	55
B.1 - Edifício C.....	55
B.2 - Edifício L.....	56
Anexo C – Desempenho da tecnologia WiMAX	59
C.1 - Edifício C.....	59
C.2 - Edifício L.....	60
Anexo D – Classificação do tipo de ambiente de propagação	63
Anexo E – Estudo do decaimento de campo electromagnético.....	67
E.1 Linha de Cascais	67
Alcântara-Mar.....	67
Algés.....	68
Caxias	69
Paço Arcos.....	70
Carcavelos	72
PK 17	74
S. João.....	75
Estoril	76
E.2 Linha de Sintra	78
Cruz de Pedra (PK 4.4).....	78
Benfica.....	79
Amadora	80
Barcarena	81
Mira Sintra.....	83
Mercês	84
Sintra.....	85
E.3 Linha do Oeste	85
Meleças.....	85

Sabugo	86
Pedra Furada	88
Mafra	89
Alcainça	90
Malveira.....	91
Jerumelo	93
Sapataria	94
Pêro Negro	95
Zimbreira	96
Feliteira.....	97
Dois Portos	99
Runa.....	100
Torres Vedras	101

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Arquitectura do sistema de comunicações (obtido de [1]).	6
Figura 2.2 - Fotografia do sistema de aquisição de medidas.	9
Figura 2.3 - Cenários de medidas.	9
Figura 2.4 - Comportamento do sinal no edifício C.	11
Figura 2.5 - Comportamento do sinal no Edifício L	12
Figura 2.6 – Ritmos de transmissão no piso 3.	13
Figura 2.7 – Ritmos de transmissão do piso 1.	14
Figura 2.8 - Variação do sinal ao longo do tempo.	15
Figura 2.9 – Comparação entre as distribuições de probabilidade.	16
Figura 2.10 – Comparação entre as distribuições densidade de probabilidade LOS e NLOS.	17
Figura 2.11 – Comparação das funções densidade de probabilidade na entre diferentes pisos.	17
Figura 3.1 - Arquitectura do sistema GSM-R (obtido de [7]).	20
Figura 3.2 - Probabilidade de cobertura em GSM-R [9].	22
Figura 3.3 – Funcionamento do LDA em GSM-R.	23
Figura 3.4 – Diagrama de radiação da antena ((a)Plano Vertical (b)Plano Horizontal).	23
Figura 3.5 - Linha de Cascais.	26
Figura 3.6 - Linha de Sintra.	27
Figura 3.7 – Linha do Oeste.	28
Figura 4.1 – Localização de teste da estação de Alcântara (Lado A).	31
Figura 4.2 – Localização de teste da Estação de Alcântara (Lado B).	32
Figura 4.3 – Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 24 metros (Lado A).	33
Figura 4.4 - Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 24 metros (Lado B).	33
Figura 4.5 - Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 16 metros (Lado A).	34
Figura 4.6 - Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 16 metros (Lado B).	34
Figura 4.7 - Factores de decaimento do campo (Linha Cascais).	36

Figura 4.8 – Localização de teste da estação de Barcarena (Lado A).	36
Figura 4.9 – Localização de teste da estação de Barcarena (Lado B).	37
Figura 4.10 - Factores de decaimento do campo (Linha de Sintra).	38
Figura 4.11 – Localização de teste da estação de Alcainça (Lado A).	39
Figura 4.12 – Localização de teste da estação de Alcainça (Lado B).	39
Figura 4.13 – Localização de teste da estação da Malveira (Lado A).	40
Figura 4.14 – Localização de teste da estação da Malveira (Lado B).	41
Figura 4.15 - Factores de decaimento do campo (Linha do Oeste).	43
Figura A. 1 - Aplicação utilizada nas medições.	53
Figura B.1 - Planta do piso 3.	55
Figura B.2 - Planta do piso 4.	56
Figura B.3 – Planta do piso 0	56
Figura B.4 – Planta do piso 1.	57
Figura C.1 - Ritmos de transmissão no piso 4.	59
Figura C.2 - Ritmos de transmissão no piso 3.	60
Figura C.3- Ritmos de transmissão no piso 0.	61
Figura C.4 - Ritmos de transmissão no piso 1.	62
Figura E.1 – Localização de teste da estação de Alcântara (Lado A).	67
Figura E.2 – Localização de teste da Estação de Alcântara (Lado B).	67
Figura E.3 – Localização de teste na estação de Algés (Lado A).	68
Figura E.4 – Localização de teste na estação de Algés (Lado B).	69
Figura E.5 – Localização de teste da Estação de Caxias (Lado A).	69
Figura E.6 – Localização de teste da Estação de Caxias (Lado B).	70
Figura E.7 – Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 24 metros (Lado A).	71
Figura E.8 – Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 24 metros (Lado B).	71
Figura E.9 – Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 16 metros (Lado A).	72
Figura E.10 - Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 16 metros (Lado B).	72
Figura E.11 - Localização de teste da estação de Carcavelos (Lado A).	73
Figura E.12 – Localização de teste da estação de Carcavelos (Lado B).	74
Figura E.13 - Localização de teste da estação do PK17 (Lado A).	74

Figura E.14 - Localização de teste da estação do PK17 (Lado B).	75
Figura E.15 – Localização de teste da estação de S. João (Lado A).	76
Figura E.16 – Localização de teste da estação de S. João (Lado B).	76
Figura E.17 – Localização da estação de teste do Estoril (Lado A).	77
Figura E.18 – Localização de teste da estação do Estoril (Lado B).	77
Figura E.19 – Localização de teste da estação da Cruz de Pedra (Lado A)	78
Figura E.20 – Localização de teste da estação da Cruz de Pedra (Lado B).	79
Figura E.21 – Localização de teste da estação de Benfica (Lado A).	79
Figura E.22 – Localização de teste da estação de Benfica (Lado B).	80
Figura E.23 – Localização de teste da estação da Amadora (Lado A)	80
Figura E.24 – Localização de teste da estação da Amadora (Lado B).	81
Figura E.25 – Localização de teste da estação de Barcarena (Lado A)	82
Figura E.26 – Localização de teste da estação de Barcarena (Lado B).	82
Figura E.27 – Localização de teste da estação de Mira-Sintra (Lado A).	83
Figura E.28 – Localização de teste da estação de Mira-Sintra (Lado B).	83
Figura E.29 – Localização de teste da estação das Mercês (Lado A).	84
Figura E.30 – Localização de teste da estação das Mercês (Lado B).	84
Figura E.31 – Localização de teste da estação de Sintra.	85
Figura E.32 – Localização de teste da estação de Meleças.	86
Figura E.33 – Localização de teste da estação do Sabugo (Lado A)	87
Figura E.34 – Localização de teste da estação do Sabugo (Lado B).	87
Figura E.35 – Localização de teste da estação de Pedra Furada (Lado A)	88
Figura E.36 – Localização de teste da estação de Pedra Furada (Lado B).	88
Figura E.37 – Localização de teste da estação de Mafra (Lado A).	90
Figura E.38 – Localização de teste da estação de Mafra (Lado B).	90
Figura E.39 – Localização de teste da estação de Alcainça (Lado A)	90
Figura E.40 – Localização de teste da estação de Alcainça (Lado B).	91
Figura E.41 – Localização de teste da estação da Malveira (Lado A).	92
Figura E.42 – Localização de teste da estação da Malveira (Lado B).	92
Figura E.43 – Localização de teste da estação do Jerumelo (Lado A).	93
Figura E.44 – Localização de teste da estação do Jerumelo (Lado B).	93
Figura E.45 – Localização de teste da estação da Sapataria (Lado A).	94
Figura E.46 – Localização de teste da estação da Sapataria (Lado B).	95
Figura E.47 – Localização de teste da estação de Pêro Negro (Lado A).	95

Figura E.48 – Localização de teste da estação de Pêro Negro (Lado B).....	96
Figura E.49 – Localização de teste da estação da Zimbreira (Lado A).....	97
Figura E.50 – Localização de teste da estação da Zimbreira (Lado B).	97
Figura E.51 – Localização de teste da estação da Feliteira (Lado A).	98
Figura E.52 – Localização de teste da estação da Feliteira (Lado B).....	98
Figura E.53 – Localização de teste da estação de Dois Portos (Lado A).	99
Figura E.54 – Localização de teste da estação de Dois Portos (Lado B).	99
Figura E.55 – Localização de teste da estação da Runa (Lado A).	100
Figura E.56 – Localização de teste da estação da Runa (Lado B).....	101
Figura E.57 – Localização de teste da estação de Torres Vedras.....	101

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Características dos Equipamentos (obtido de [2]).....	6
Tabela 2.2 - Modulações e codificações utilizadas (obtido de [1]).	7
Tabela 3.1 - Bandas de frequência GSM (adaptado de [9])	21
Tabela 3.2 – Níveis mínimos de cobertura (adaptado de [9]).	22
Tabela 3.3 - Características da antena emissora.	24
Tabela 4.1 - Ambientes de propagação.	30
Tabela 4.2 – Factores de decaimento do campo (Linha Cascais).....	35
Tabela 4.3 – Factores de decaimento do campo (Linha de Sintra).....	38
Tabela 4.4 – Factores de decaimento do campo (Linha do Oeste).....	42
Tabela D.1 – Classificação do tipo de ambiente	63

Lista de Acrónimos

Alcai.	<i>Alcaíça</i>
Alcân.	<i>Alcântara</i>
Amad.	<i>Amadora</i>
AuC	<i>Authentication Center</i>
Barca	<i>Barcarena</i>
Benfi.	<i>Benfica</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift keying</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BSS	<i>Base Station Sub-System</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
C.Ped.	<i>Cruz de Pedra</i>
Carca.	<i>Carcavelos</i>
Caxi.	<i>Caxias</i>
D.Port.	<i>Dois Portos</i>
EIR	<i>Equipment Identity Register</i>
Estor.	<i>Estoril</i>
ETCS	<i>European Train Control System</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
Felit.	<i>Feliteira</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GSM-R	<i>Global System for Mobile Communication - Railway</i>

HLR	<i>Home Location Register</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISEL	<i>Instituto Politécnico de Lisboa</i>
Jerum.	<i>Jerumelo</i>
LDA	<i>Location Dependent Addressing</i>
LOS	<i>Line-Of-Sight</i>
M.Sin.	<i>Mira Sintra</i>
Malv.	<i>Malveira</i>
Meleç.	<i>Meleças</i>
Merc.	<i>Mercês</i>
MS	<i>Mobile Station</i>
NLOS	<i>Non-Line-Of-Sight</i>
NSS	<i>Network Sub-System</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OMC	<i>Operation and Maintenance Center</i>
P.Arc. (16m)	<i>Paço Arcos (torre de 16 metros)</i>
P.Arc. (24m)	<i>Paço Arcos (torre de 24 metros)</i>
P.Fur.	<i>Pedra Furada</i>
P.Neg.	<i>Pêro Negro</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>

QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
Sabug.	<i>Sabugo</i>
Sapat.	<i>Sapataria</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
Sint.	<i>Sintra</i>
T.Ved.	<i>Torres Vedras</i>
TRX	<i>Transceiver</i>
VLR	<i>Visitor Location Register</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
Zimbr.	<i>Zimbreira</i>

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Introdução

Actualmente existe um grande interesse na reestruturação dos sistemas de comunicações para aplicações vocacionadas para a ferrovia. Este facto deve-se à necessidade dos sistemas ferroviários cada vez terem maior nível de complexidade e exigência, no que se refere a segurança, sinalização e articulação das várias linhas, tanto a nível nacional como internacional. Este último requer também a existência de interoperabilidade entre sistema de comunicações de países diferentes. Assim sendo é necessário estudar tecnologias e soluções para este tipo de requisitos, sendo necessário conhecer o comportamento das tecnologias já existentes e de novas tecnologias, de forma a encontrar a mais adequada para a sua implementação em aplicações ferroviárias.

Neste trabalho será desenvolvido o estudo para duas tecnologias distintas, WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) IEEE802.16d e GSM-R (*Global System for Mobile Communication – Railway*), utilizando medidas de campo de forma a ser possível a obtenção de conclusões relativas ao desempenho de ambas as tecnologias em ambientes ferroviário.

O motivo da escolha da tecnologia WiMAX IEEE802.16d para o estudo apresentado deve-se a esta ser uma tecnologia recente e que se considera promissora e ainda em desenvolvimento, em que o estudo do seu comportamento é reduzido em ambientes com condições críticas de propagação, como é o caso dos ambientes *indoor*. Neste tipo de ambientes existe uma elevada atenuação devido a obstáculos, paredes que limitam a existência de linha de vista, podendo assim existir dificuldades de transmissão. Estas dificuldades são justificadas pela banda de frequência e espectro disponível (entre os 2GHz e os 66 GHz) para utilização destes tipos de sistemas. O estudo destes fenómenos possibilita a obtenção de conclusões e consecutiva extrapolação das mesmas relativamente à aplicação deste gama de frequências em ambientes ferroviários, onde existem em determinadas zonas obstrução de linha de vista e condições de propagação consideradas críticas.

Capítulo 1 - Introdução

Quanto à escolha do sistema GSM-R, este é uma extensão do sistema GSM (*Global System for Mobile Communication*), orientado para aplicações ferroviárias, de forma a satisfazer as necessidades especiais em termos de funcionalidades deste tipo de aplicações, com base numa tecnologia de acesso rádio que deu provas de robustez e segurança em termos de comunicações móveis. A utilização desta tecnologia é de elevado interesse devido ao facto do sistema GSM ser uma tecnologia com elevado período de maturação, ao qual inúmeros países da Europa já o têm implementado na sua vertente de aplicações ferroviárias. Assim sendo é de grande interesse a sua implementação na rede ferroviária nacional, pois permitirá ter garantias de fiabilidade e interoperabilidade com os restantes países da Europa, quando observado ao nível de rede de transportes internacional.

1.2 Motivação

O estudo de novas tecnologias para sistemas de comunicações vocacionados para aplicações ferroviárias actualmente tem um grande interesse devido a reestruturação deste tipo de sistemas, sendo impulsionado muito mais pela actual conjuntura nacional na qual se decide a construção de linha para comboio de alta velocidade (TGV).

Neste estudo estamos na presença de duas tecnologias distintas, o WiMAX, nova tecnologia em desenvolvimento e o GSM-R, GSM versão com vertente para aplicações ferroviárias, mas cuja sua arquitectura e desempenho já tem provas dadas a nível de fiabilidade e maturação.

A tecnologia WiMAX utiliza uma banda de frequência mais abrangente, entre 2 GHz e 66 GHz em bandas licenciadas e não licenciadas. Tendo este sistema como vantagem a disponibilidade de espectro. Como desvantagem este sistema tem a gama de frequência usada, levantando problemas de propagação devido a praticamente todo o tipo de obstrução ao percurso de propagação do sinal. Este problema requer então um estudo cuidadoso no que diz respeito à sua aplicação em ambientes característicos da ferrovia.

Relativamente a tecnologia GSM-R, pretende-se estudar o seu comportamento em ambientes distintos e característicos da rede ferroviária na zona de Lisboa, abrangendo três ambientes de características distintas, Linha de Cascais, Linha de Sintra e Linha do Oeste (até Torres-Vedras). Pretende-se assim observar a variação do sinal a nível rádio e fazer a caracterização dos tipos de ambientes característicos dos percursos ferroviários,

nomeadamente à orografia e comportamento do sinal. É necessário também ter em atenção que os requisitos deste tipo de sistemas é diferente dos comerciais, tendo uma maior exigência a nível de cobertura e qualidade da ligação, visto todo o tipo de comunicações e controlo das linhas ser feito através deste sistema (alarmes, sinalização e também comunicações de voz internas). Devido a tudo isto, os métodos e requisitos de planeamento de uma rede deste tipo tem critérios e regras diferentes que têm que ser ajustadas através de um melhor conhecimento suportados através de estudos e medidas recolhidas no terreno.

1.3 Objectivos

Os objectivos deste trabalho, como já referido, são o estudo e avaliação da tecnologia WiMAX e GSM-R. Para a concretização destes objectivos irão ser focados aspectos relativos a dois grandes pontos, análise e caracterização do WiMAX a nível do seu comportamento no interior e exterior de edifícios e estudo da tecnologia GSM-R para ambientes ferroviários para três linhas distintas, linha de Sintra, linha de Cascais e linha do Oeste (até Torres Vedras).

Para a análise do comportamento da tecnologia WiMAX ao nível do sinal rádio, no interior e exterior de edifícios foram feitas campanhas de medidas de forma a contemplar vários cenários de teste. Para o estudo *indoor*, foram consideradas localizações distintas dos edifícios e das localização dentro dos mesmos, isto é, foram escolhidos edifícios que permitissem abordar diferentes condições de propagação do sinal, tal como a localização dentro dos mesmos edifícios. Considerou-se como parâmetros de estudo a influência da proximidade do terminal com a estação base, tal como a existência ou inexistência de linha de vista com a mesma. Pretende-se assim estudar as perdas e comportamento estatístico do sinal para este tipo de condições e ambientes. Este estudo permitirá recolher conclusões relativas à aplicação desta tecnologia em ambientes ferroviários, uma vez que este tipo de ambientes é caracterizado por localizações onde a propagação do sinal electromagnético é dificultada pela ausência de linha de vista, devido a obstáculos no percurso de propagação (túneis, edifícios, vegetação, etc.)

No que se refere ao estudo da tecnologia GSM-R irão ser utilizadas medidas de campo recolhidas em três localizações distintas, abrangendo três tipos de cenários de propagação

distintos. Desta forma será possível caracterizar e determinar vários tipos de ambientes, utilizando critérios específicos. Os parâmetros estudados são decaimento de campo electromagnético, densidade urbanística, existência ou inexistência de obstrução à propagação do sinal. Este estudo pretende possibilitar a recolha de conclusões relevantes de forma a permitir a utilização deste tipo de conhecimento para futuras aplicações, ao nível das ferramentas de planeamento como do desenvolvimento de novos processos de planeamento e optimização, mais adequados a ambientes ferroviários.

1.4 Estrutura do relatório

No capítulo 2 é realizada a apresentação do estudo sobre a tecnologia WiMAX. Neste é apresentado a descrição do equipamento utilizado, sistemas de medidas, cenários de teste e finalmente os resultados e conclusões. Sendo que as conclusões retiradas abrangem três temas distintos: propagação do sinal rádio, ritmos de transmissão conseguidos e modulação estatística do sinal.

O capítulo 3 consiste numa descrição da especificação GSM-R onde é apresentado os aspectos mais relevantes desta norma e arquitectura deste tipo de sistemas. Sendo também abordado as principais diferenças que distinguem os sistemas GSM e GSM-R. Neste capítulo são também descritos os aspectos relacionados com a campanha de medidas realizadas nas três linhas ferroviárias. Por fim são apresentadas as características dos equipamentos utilizados nos testes e a descrição detalhada dos cenários de testes, tal como as características que os distinguem.

No capítulo 4 é feita a análise dos resultados obtidos nos testes realizados às linhas de Cascais, Sintra e Oeste. Esta mesma análise está dividida em duas partes, estudo do ambiente de propagação e estudo do decaimento de campo. No estudo do ambiente de propagação é feita uma caracterização e avaliação dos ambientes para cada um dos locais de testes. Já o estudo do decaimento de campo visa apresentar os casos mais relevantes, sendo descritas as causas que levam o sinal a descer de determinada forma.

As conclusões finais são apresentadas no capítulo 5 desta tese, sendo também descrito o trabalho realizado e apresentadas propostas para trabalho futuro.

Capítulo 2 - Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

2.1 Introdução

Nesta tese iniciou-se um estudo relativamente à adequação da aplicação da tecnologia WiMAX aos ambientes ferroviários, visto esta ser uma tecnologia recente considerada promissora e em desenvolvimento. Este mesmo estudo foi impulsionado por esta tecnologia ser uma das opções a ser considerada inicialmente pela REFER na implementação dos seus sistemas de comunicação.

Neste capítulo será apresentado o estudo relativo ao comportamento da tecnologia WiMAX para diversos ambientes de propagação, com recurso a dados empíricos, recolhidos através de equipamentos comerciais da norma IEEE802.16d. Os cenários estudados pretenderam estudar a influência do ambiente na propagação do sinal, designadamente as situações com e sem linha de vista entre a estação base e o terminal a diferentes distâncias. O objectivo é observar-se o comportamento do sinal em termos de ritmos de transmissão, potência recebida e características estatísticas das amostras. Através deste estudo deseja-se concluir uma adequação ou não adequação destes sistemas a quando da sua utilização em ambientes ferroviários.

Neste capítulo começa-se por se fazer uma descrição do equipamento de medidas utilizado, sendo apresentado a arquitectura do sistema, tal como as características detalhadas da estação base, terminais e software de recolha de medidas. De seguida são apresentados os cenários de teste escolhidos. Por fim são apresentados os resultados da análise das medidas recolhidas, sendo apresentadas as respectivas conclusões para cada uma das análises realizadas.

2.2 Equipamento

2.2.1 Sistema de comunicações

O equipamento utilizado encontra-se disponível no ISEL, sendo constituído por uma estação base *MacroMAX SDR* da Airspan e equipamentos terminais *EasyST* do mesmo fabricante. Ambos os equipamentos estão equipados com antenas omnidireccionais de

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

forma a permitir uma independência entre as medidas recolhidas e a direcção de propagação. A Figura 2.1 ilustra a arquitectura do sistema de comunicações.

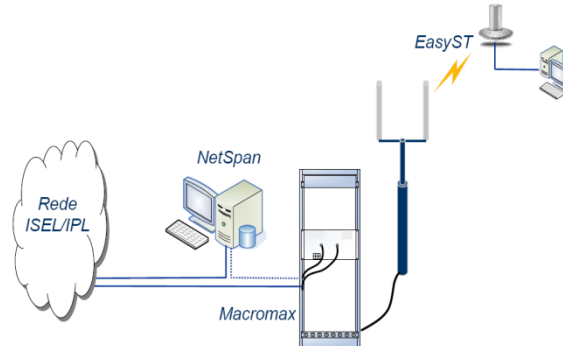


Figura 2.1 - Arquitectura do sistema de comunicações (obtido de [1]).

As características gerais do sistema de comunicações estão apresentadas na Tabela 2.1 [2], sendo a gestão do sistema de comunicações realizado pelo sistema *NetSpan* que se encontra integrado na rede local que suporta o sistema de comunicações.

Tabela 2.1 - Características dos Equipamentos (obtido de [2]).

	Estação Base	Terminal
Modelo	Airspan MacroMAX SDR	Airspan EasyST
Tipo de antena	Omnidireccionais	Omnidireccional
Ganho da antena [dBi]	7	8
Portadora (uplink/downlink) [MHz]	3443/3543	
Largura de Banda de Canal [MHz]	3.5	
Potência máxima de emissão [dBm]	38	24

2.2.1.1 Estação Base

A estação base utilizada, em [3], da *AirSpan*, faz parte dos modelos AS-MAX dedicados à utilização da tecnologia WiMAX. Esta estação base está ligada a uma antena externa omnidireccional através de um cabo RF e está preparada para funcionar com os terminais *Airspan EasyST*, *Airspan ProST*, tal como outros compatíveis com a norma IEEE 802.16d, sejam estes omnidireccionais, direccionais, com polarização vertical ou horizontal.

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

Tabela 2.2 - Modulações e codificações utilizadas (obtido de [1]).

Modulação/FEC	Ritmo [Mbit/s]		Largura de banda ocupada [MHz]	Eficiência espectral por canal RF [b/s/Hz]
	<i>Download</i>	<i>Upload</i>		
64QAM $\frac{3}{4}$	13.1	13.1	3.5	3.7
64QAM $\frac{1}{2}$	11.5	11.5		3.3
16QAM $\frac{3}{4}$	8.7	8.7		2.5
16QAM $\frac{1}{2}$	5.8	5.8		1.7
QPSK $\frac{3}{4}$	4.4	4.4		1.3
QPSK $\frac{1}{2}$	2.9	2.9		0.8
BPSK $\frac{1}{2}$	1.4	1.4		0.4

Esta estação base suporta a norma IEEE 802.16d, estando vocacionada para aplicações fixas ou nómadas, cumprindo as especificações da norma referida. O modo de comunicação utilizado é FDD (*Frequency Division Duplex*) e suporta OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*). Desta forma é possível otimizar o desempenho da ligação através da selecção da melhor modulação possível para as condições instantâneas do canal, ou seja, é feita uma monitorização, controlo e ajuste da forma de comunicação em função das condições do canal rádio. Através da qualidade da ligação, que é verificada através da SNR instantânea do canal, é seleccionada a modelação que permite melhores níveis de qualidade de serviço, maximizando o nível de cobertura à custa do ritmo de transmissão. Relativamente à forma de transmissão, é feita a introdução de informação redundante, de forma a tornar esta informação mais imune a ruído e interferência durante a transmissão. Este tipo de transmissão é possível tanto em *download* como em *upload* [3]. Os tipos de modulações e codificações suportados pelo sistema são apresentados na Tabela 2.2. Podendo observar-se que o ritmo máximo possível é de 13,1Mbit/s a que corresponde a máxima eficiência espectral por canal RF de 3.7 b/s/Hz, sendo este valor apenas atingido em condições ideais.

2.2.1.2 Terminal CPE

O equipamento terminal utilizado na recolha de medidas foi o *Airspan EasyST* [1], equipamento que está optimizado para trabalhar com a tecnologia WiMAX (norma IEEE 802.16d), nomeadamente com estações base da família AS-MAX. O *EasyST*

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

utiliza o protocolo IP para ligar equipamentos a uma rede WiMAX, permitindo uma fácil instalação e utilização desta tecnologia sem recurso a meios técnicos. Este facto deve-se a este tipo de equipamentos ter sido projectado para utilizações domésticas, permitindo que os utilizadores tenham acesso à internet de alta velocidade e elevada largura de banda, tal como disponível através de ligações locais da alta velocidade (LAN) [1]. A velocidade suportada atinge os 13.1 Mbit/s sobre uma largura de banda de 3.5 MHz em *upload* e *download*.

O *EasyST* é destinado a ambientes sem linha de vista com a estação base, utiliza modulação M-QAM, QPSK e BPSK, modulando/desmodulando os sinais emitidos e recebidos, respectivamente. A utilização de modulação adaptativa permite otimizar a qualidade do sinal e também a cobertura em distâncias mais longas [1]. Este equipamento dispõe de uma antena que permite a recepção de sinal com um diagrama quase omnidireccional, sendo assim mais independente à direcção em que se orienta o equipamento.

2.3 Sistema de medidas

Através de uma parceria ISEL/BRISA, tornou-se possível a implementação de um sistema de comunicações completo, através da instalação de um laboratório com equipamento profissional no interior do campus do ISEL. Este equipamento será descrito de forma mais detalhada nos pontos seguintes.

2.3.1 Arquitectura do sistema

Na Figura 2.2 está apresentada uma fotografia onde se pode observar o sistema de aquisição de medidas de campo, no interior de edifícios. A arquitectura do sistema utilizado consiste numa estação base *Airspan Macromax*, um terminal CPE *Airspan EasyST* e uma ferramenta de software instalada num computador portátil, cuja sua descrição mais detalhada encontra-se no anexo A.

Como se pode observar, pela Figura 2.2, é utilizado um computador portátil, ligado ao terminal CPE *Airspan EasyST*, estando ambos sobre um carrinho metálico para que as medidas estejam sempre à mesma altura do solo.

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários



Figura 2.2 - Fotografia do sistema de aquisição de medidas.

2.4 Cenários

O cenário escolhido para a recolha de medidas em ambientes interiores envolve o edifício C e L do campus do ISEL, de forma a abranger diferentes condições e ambientes de execução dos testes realizados. Na Figura 2.3 pode-se observar todo o campus do ISEL, a estação base encontra-se no topo do edifício A (ponto vermelho da figura), podendo também observar-se a localização dos edifícios C e L.

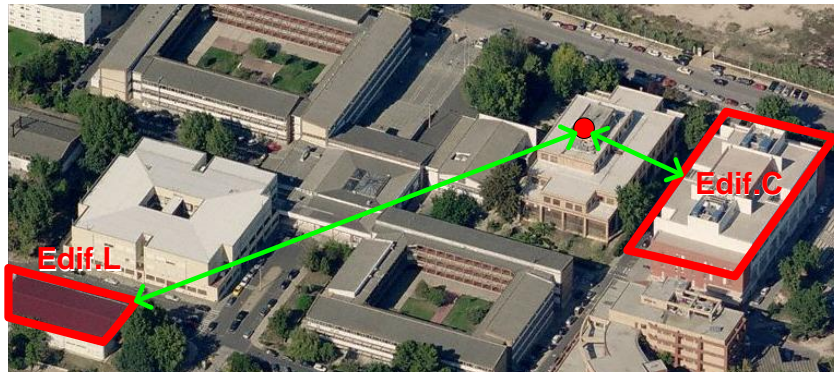


Figura 2.3 - Cenários de medidas.

O edifício C, apresenta vários pisos de características distintas entre eles. É um edifício de construção recente e com acabamentos robustos, localizado a cerca de 40 metros da localização da antena da estação base. Neste edifício espera-se uma elevada qualidade das amostras de sinal recolhidas, devido às condições de proximidade da estação base.

O edifício L, localizado a 250 metros da estação base, não permite linha de vista com a mesma devido ao declive do terreno. O edifício em causa encontrava-se vazio e sem utilização, facilitando o livre movimento para os testes efectuados.

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

A descrição mais detalhada de ambos os edifícios referidos anteriormente encontra-se disponível no anexo B desta tese. É através destes dois edifícios, constituído por estruturas diferentes e características de ambientes diferentes, que será possível recolher conclusões relativamente à utilização desta tecnologia em ambientes adversos. Para a realização das medidas, foi utilizado um padrão pré-definido com base numa grelha regular de 2 metros, aplicada nos pisos de ambos os edifícios. De referir ainda que, uma vez que se pretende caracterizar sinal em ambientes interiores, o facto dos edifícios analisados estarem em distância diferentes, não irá perturbar o objectivo, já que na análise a efectuar apenas se irá considerar a variação do sinal relativamente ao valor mais elevado medido localmente

2.5 Resultados

Para obtenção das amostras foram consideradas 30 amostras de sinal de tráfego FTP de cada parâmetro já referido no anexo B, utilizando três modos de transmissão, *download*, *upload* e ambos em simultâneo, totalizando 90 amostras por ponto. Através destes parâmetros foi possível obter conclusões relativas ao desempenho do sistema para as diversas situações de teste. As amostras de sinal foram classificadas em dois grupos, amostras com linha de vista e amostras sem linha de vista, dependendo da sua localização. Através dos cenários de teste já descritos, foi também possível a recolha de amostras no exterior de alguns pisos para uma análise da penetração do sinal nos mesmos.

2.5.1 Análise da propagação

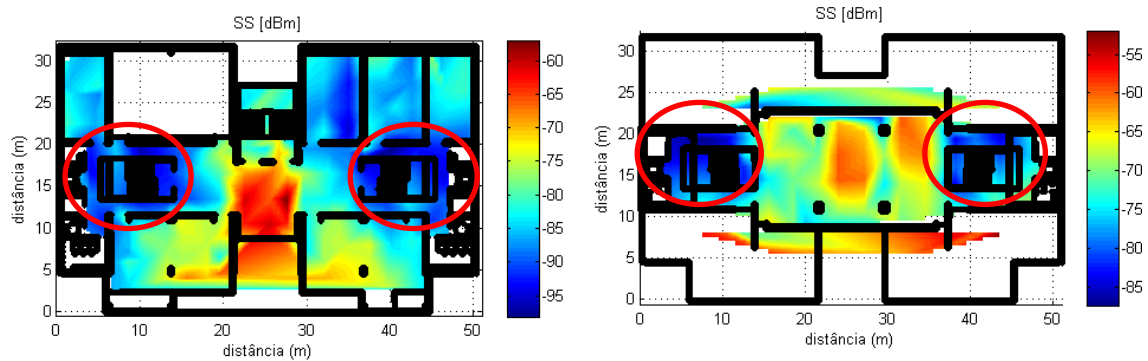
Na análise da propagação de sinal em ambientes interiores foram considerados os valores médios medidos em cada ponto, tendo-se obtido um mapa de cobertura para toda a área considerada através de interpolação linear dos pontos de medida.

2.5.1.1 Edifício C

No edifício C, os valores obtidos permitem confirmar o comportamento expectável neste tipo de ambiente. Na Figura 2.4 é possível observar a variação do nível de sinal (SS – *Signal Strength*) dos pisos 3 e 4. Através da Figura 2.4 a) pode-se observar o efeito provocado pelas paredes, pilares e janelas na propagação do sinal, isto é, a degradação da potência do sinal ao longo do percurso devido aos obstáculos atravessados pelo sinal. Importante também referir que devido a esta mesma obstrução à

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

propagação do sinal é possível observar zonas em que a ligação é colocada em risco (zonas marcadas com círculo vermelho, quadrante superior esquerdo e direito do piso). Já no que diz respeito as zonas com janelas, como seria de esperar estas facilitam a penetração do sinal no interior do piso, como se pode observar na zona central do piso.



a) Piso 3.

b) Piso 4.

Figura 2.4 - Comportamento do sinal no edifício C.

Para o piso 4, na Figura 2.4 b), cenário com características mais amplas, é possível observar a penetração do sinal do exterior para o interior do mesmo. Podendo concluir-se que a atenuação provocada pelas paredes de betão é de aproximadamente 2 a 3 dB. Tal como na figura anterior, pode-se observar a degradação do sinal com o aparecimento de pilares, causando um efeito de sombra no sinal. Podendo mais uma vez observar-se perdas de ligação nas zonas mais protegidas de paredes (marcadas com círculo vermelho). De notar ainda que a zona central deste piso é beneficiada, devido às características de linha de vista com a estação base e pelo facto das mesmas se encontrarem rodeadas de janelas de vidro. Tal como seria de esperar este piso é onde se obtêm os melhores resultados, devido a sua localização mais próxima da estação base.

2.5.1.2 Edifício L

Na Figura 2.5 estão ilustrados os mapas de cobertura do piso 0 e 1 obtidos. Pode-se observar que os resultados conseguidos são melhores para o piso com elevação superior, piso 1, devendo-se este facto a melhores condições de propagação do sinal devido à maior elevação.

Para o piso 0, na Figura 2.5 a) pode observar-se que o sinal obtido é melhor no quadrante esquerdo do piso, localizações mais próximas da estação base. Podendo-se observar igualmente uma degradação do sinal com o aparecimento de paredes ao longo do percurso de propagação. De salientar ainda um fenómeno no quadrante superior

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

(zona central), uma sala onde devido às características de localização há uma zona onde não é possível obter cobertura (marcado com um círculo vermelho), isto porque nestas localizações devido a inexistência de janelas na direcção da estação base a cobertura é feita através da porta.

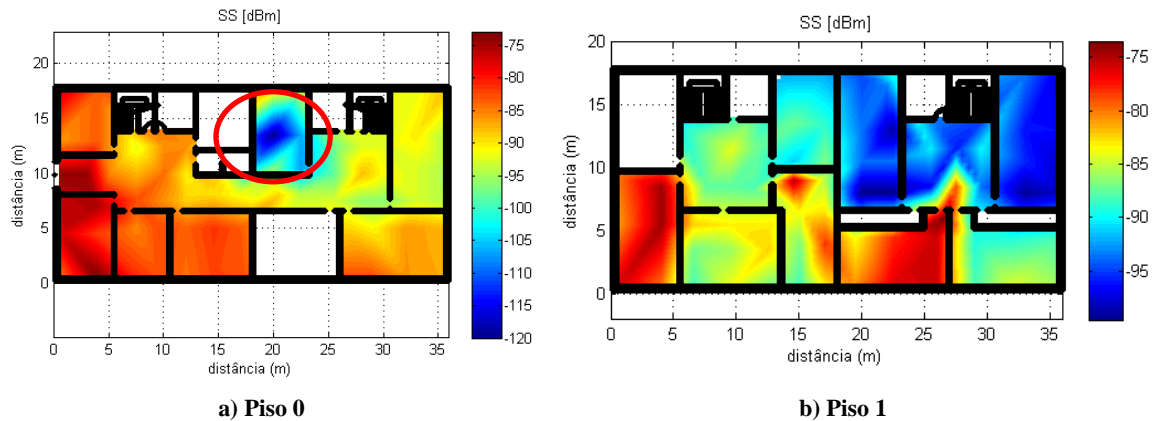


Figura 2.5 - Comportamento do sinal no Edifício L

A Figura 2.5 b) apresenta a variação de sinal no piso 1, onde os valores mais elevados são obtidos no quadrante inferior esquerdo, pois é o sector mais próximo da estação base, tal como acontece no piso inferior. De notar a forte diminuição de SS no quadrante superior direito, devido à não existência de corredores, o que provoca uma maior atenuação. Outro fenómeno a observar é a clara alteração do comportamento do sinal na presença de portas ou outro tipo de aberturas, o que permite obter níveis de potência aceitáveis em zonas interiores.

2.5.2 Análise dos ritmos de transmissão

Nesta secção pretende-se estudar o comportamento do sistema tendo como base os ritmos de transmissão conseguidos para os diversos cenários, tendo como objectivo concluir a fiabilidade ou inexistência da mesma para ambientes com e sem linha de vista, pretendendo-se também avaliar qual a importância deste facto.

2.5.2.1 Edifício C

No Edifício C espera-se uma boa resposta do sistema em termos de ritmos, devido ao facto desta localização se encontrar junto à estação base, havendo em alguns pontos de teste condições de propagação benéfica ao funcionamento do sistema.

Na Figura 2.6 pode-se observar a variação dos ritmos de transmissão no piso 3, observando-se que em transmissão bidireccional os ritmos são semelhantes. Pode-se

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

também observar que existe uma variação mais brusca nos locais onde existem mais paredes e no quadrante superior do piso. A existência de valores mais elevados ao centro deve-se à proximidade de uma porta que dá acesso à varanda exterior, que facilita a penetração do sinal no piso, e possibilita a existência de linha de vista com a estação base, melhorando os resultados obtidos nestas localizações.

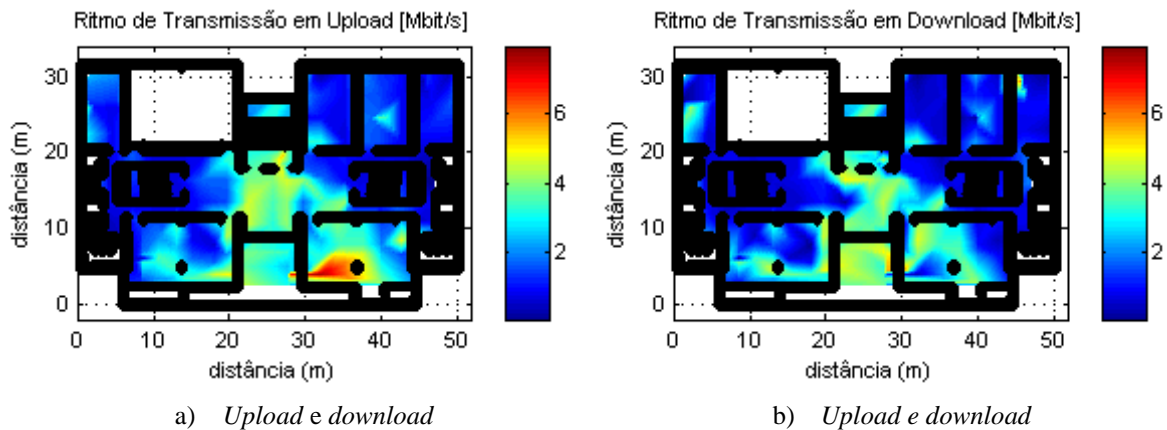


Figura 2.6 – Ritmos de transmissão no piso 3.

Confirma-se assim conclusões já obtidas na análise da propagação, o desempenho do sistema tem variações significativa devido às características do ambiente, isto é, os factores linha de vista e inexistência de obstáculos têm uma elevada influência no desempenho do sistema.

2.5.2.2 Edifício L

Para o edifício L, pretende-se observar qual o comportamento do sistema relativamente a condições mais adversas de propagação, visto neste edifício nenhuma das localizações de teste obtidas tem linha de vista com a estação base.

Na Figura 2.7 observa-se os ritmos de transmissão obtidos neste piso, existindo uma degradação do mesmo em algumas salas, sendo este mais baixo que o esperado. Para este edifício, verificou-se uma redução significativa dos ritmos de transmissão e em certas zonas, nomeadamente no quadrante superior direito, a ligação por vezes perdeu-se. Pode também observar-se que em algumas salas e corredores os débitos são muitos baixos (inferiores a 1Mbit/s) e em casos mais críticos a ligação fica mesmo comprometida. De forma conclusiva, pode-se afirmar que o desempenho do sistema nestas condições é insatisfatório, visto verificar-se que a cerca de 250 metros da estação base a ligação pode ser comprometida, adicionalmente verificou-se que os débitos

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

conseguidos são muito baixos, devido à inexistência de linha de vista e existência de obstrução à propagação do sinal.

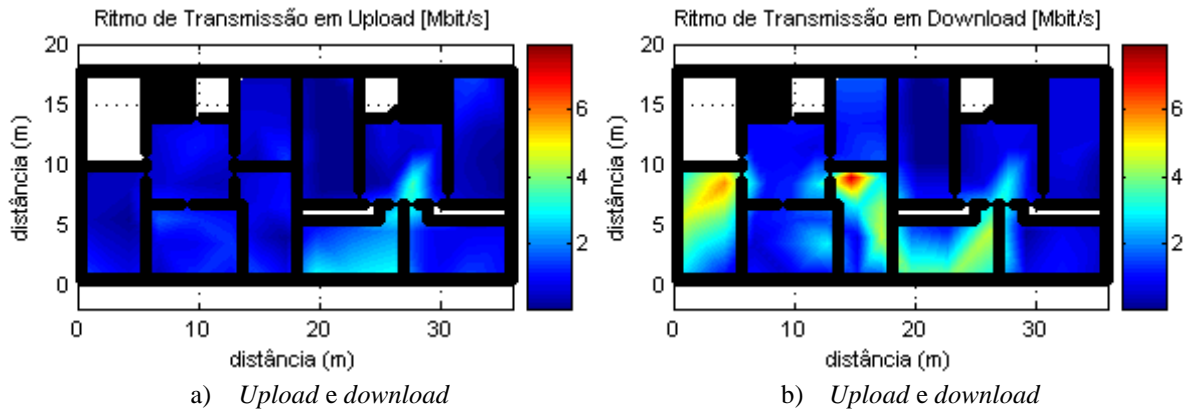


Figura 2.7 – Ritmos de transmissão do piso 1.

2.6 Modelação estatística do sinal

Nesta secção pretende-se estudar o comportamento estatístico do sinal em situações distintas de propagação, nomeadamente cenários com e sem linha de vista com a estação base (LOS e NLOS, respectivamente).

Para o estudo do comportamento estatístico das amostras, foram consideradas três distribuições, Normal, *Rice* e *T-location-scale*. Esta última distribuição é normalmente utilizada para representar dados cuja distribuição é assimétrica e contém uma cauda normalmente superior à distribuição Normal. A dimensão da cauda está directamente relacionada com o parâmetro ν da função densidade de probabilidade (1):

$$p(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sigma\sqrt{\nu\pi}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left[\frac{\nu + \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}{\nu} \right]^{-\left(\frac{\nu+1}{2}\right)} \quad (1)$$

Cujos parâmetros μ e σ representam a média e o desvio padrão, respectivamente, e Γ representa a função Gama.

Outros dos factos considerados foi que para inferir sobre a distribuição de probabilidade da variável aleatória subjacente aos dados obtidos é necessário dividir os dados obtidos em classes de igual amplitude. Em cada situação em análise, dado o número de amostras obtidas n , e o respectivo desvio padrão, poderemos calcular a amplitude de cada classe h_n [4]:

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

$$h_n \sim \frac{3.5 \sigma}{n^{1/3}} \quad (2)$$

Desta forma é possível calcular o número de classes a considerar em cada histograma, uma vez conhecido o valor máximo e mínimo da variação do sinal.

O estudo efectuado considera também uma normalização da variação do sinal devido à necessidade de comparação entre medidas retiradas em pontos com diferentes localizações. Esta normalização é efectuada em relação à mediana do sinal, isto é, é calculada a mediana para cada localização de teste e é feita a normalização de todas as amostras recolhidas em relação ao valor de mediana desse ponto.

2.6.1 Análise de Resultados

Na Figura 2.8 é apresentado um exemplo de variação da intensidade de sinal rádio recebido no equipamento de medidas, relativamente ao seu valor médio, em dois pontos distintos. Em ambos os casos não existe movimento do receptor, pelo que o comportamento registado apenas se deve à existência de desvanecimento.

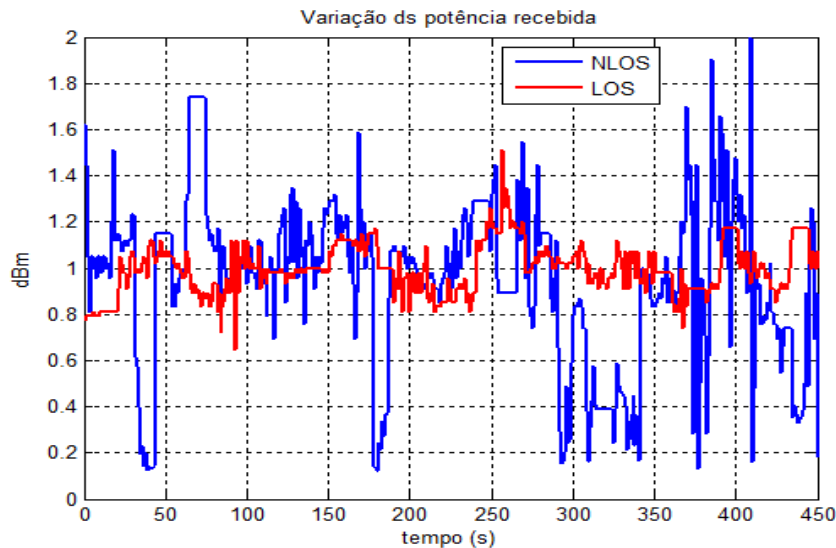


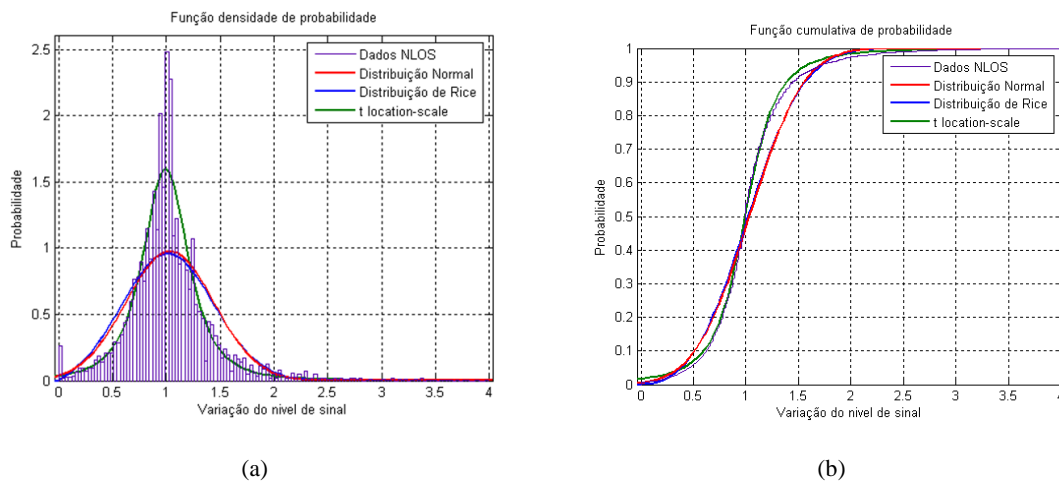
Figura 2.8 - Variação do sinal ao longo do tempo.

Nos exemplos apresentados é possível observar a diferença entre a situação LOS e NLOS. Verifica-se que a variação do sinal, e as respectivas fendas, são muito superiores na situação NLOS, como seria de esperar.

2.6.2 Distribuição do sinal

Na Figura 2.9 (a) poderemos observar a comparação das funções densidade de probabilidade consideradas e o histograma da variação do nível de sinal relativamente à sua mediana. Os casos considerados representam para cada distribuição a melhor escolha em termos de parametrização, dado o objectivo de adequação aos dados em análise. Na Figura 2.9 (b) poderemos observar a comparação entre as respectivas funções distribuição de probabilidade, nas situações descritas anteriormente.

Como se pode observar pelas figuras apresentadas, a função *T-location-scale* é a que melhor se adequa aos dados, na situação de NLOS, sendo por isso esta a distribuição utilizada para modelar a variação de sinal em ambientes interiores. Na situação em análise os parâmetros desta distribuição que melhor se ajustam são $\mu=1,0$; $\sigma=0,224$ e $\nu=2,39$.



(a) (b)
Figura 2.9 – Comparação entre as distribuições de probabilidade.

2.6.3 Validação entre cenários

A análise à função distribuição de probabilidade efectuada no ponto anterior teve em conta a totalidade de amostras recolhidas, na situação NLOS, pois seria esta a de maior variação.

Na Figura 2.10 é apresentado a distribuição de probabilidade dos desvios em relação à mediana, considerando a situação LOS e NLOS. Através da distribuição das amostras pode-se observar que há uma maior variância da distribuição de valores NLOS, quando comparado com a situação LOS, o que já havia sido referido anteriormente.

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

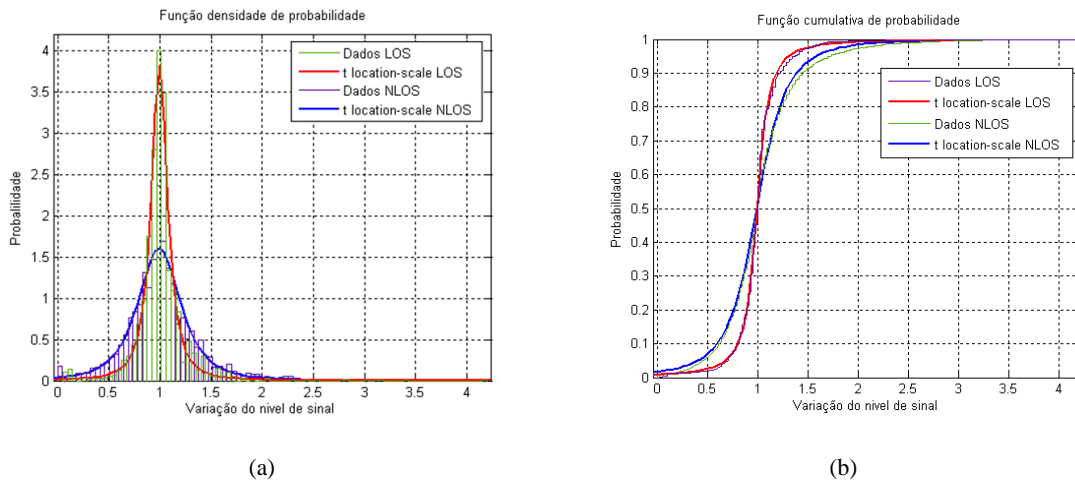


Figura 2.10 – Comparação entre as distribuições densidade de probabilidade LOS e NLOS.

Neste caso verifica-se que a adequação aos dados LOS da função escolhida é ainda superior, mas com parametrização diferente: são $\mu=1,0$, $\sigma=0,089$ e $\nu=1,59$.

Quando efectuada uma comparação entre valores recolhidos em diferentes locais, nomeadamente entre diferentes pisos e edifícios, sempre na situação NLOS, verifica-se uma concordância geral entre as distribuições de probabilidade. Na Figura 2.11 poderá observar-se as variações de comportamento do sinal, considerando os dois pisos do edifício L, numa situação NLOS. Pode-se verificar que não há uma variação significativa da potência recebida em relação à mediana de cada ponto. Podendo afirmar-se que o sinal tem um comportamento muito aproximado em condições muito parecidas, isto é, pontos com algum afastamento da estação base e sem linha de vista. Neste caso também se verifica que a função distribuição *T-location-scale* é a que melhor modela esta variação, com parâmetros $\mu=1,0$; $\sigma=0,45$ e $\nu=2,39$.

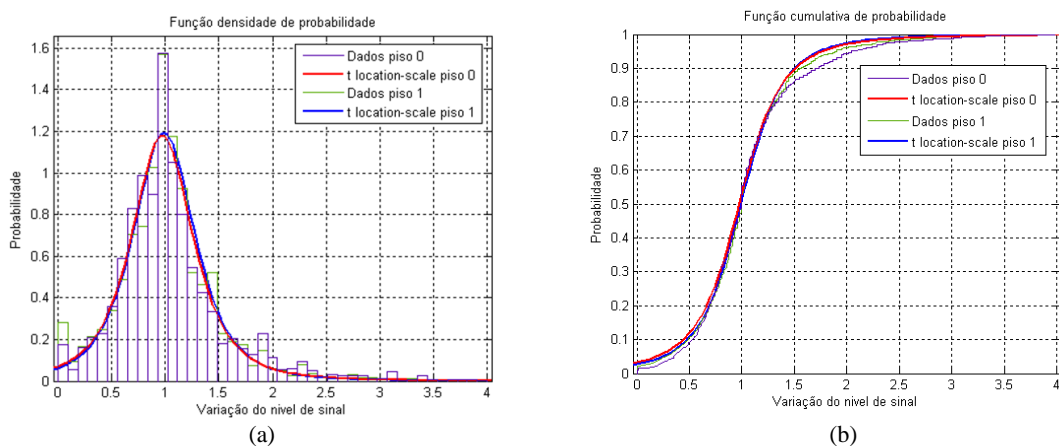


Figura 2.11 – Comparação das funções densidade de probabilidade na entre diferentes pisos.

Capítulo 2 – Adequação da tecnologia WiMAX a ambientes ferroviários

2.6.4 Conclusões

Após a análise e estudo das amostras de sinal recolhidas pode-se concluir que o desempenho da tecnologia WiMAX está muito dependente da existência de linha de vista, assim pode-se concluir a não adequação desta tecnologia a ambientes ferroviários. Nestes ambientes há características muito distintas de propagação em que não é possível estar-se limitado pela existência de linha de vista. Além disso estes sistemas requerem também uma elevada fiabilidade e exigência de cobertura, fenómeno que foi verificado não ser possível oferecer utilizando a tecnologia WiMAX. Este problema é causado pela elevada atenuações causada devido a obstáculos, pois a gama de frequências disponíveis para a utilização desta tecnologia é elevada (entre os 2GHz e os 66 GHz) e faz com que qualquer obstáculo por muito pequeno que seja tem uma enorme influência no desempenho deste tipo de sistemas.

Capítulo 3 - Análise do desempenho da tecnologia GSM-R

3.1 Introdução

Este capítulo foi destinado à descrição dos aspectos relevantes do trabalho desenvolvido para a análise do desempenho da tecnologia GSM-R. Começa por uma pequena descrição do que é a tecnologia GSM-R, seguida da apresentação da arquitectura do sistema e de alguns aspectos relevantes do GSM-R, tal como banda de frequência e requisitos de cobertura específicos desta tecnologia. Seguidamente são apresentadas as características mais relevantes relativas às campanhas de medidas, sendo apresentados de forma detalhada os equipamentos utilizados, isto é, emissor (incluindo as características da antena emissora) e receptor. Por fim é apresentada a descrição da recolha de medidas, onde se inclui os cenários de teste, representação de todas as localizações de teste e descrição detalhada das principais características de cada ambiente testado.

3.2 Especificação GSM-R

O sistema GSM-R é um sistema harmonizado em toda a Europa, segundo as Directivas Europeias no que diz respeito à interoperabilidade das redes ferroviárias e das Especificações Técnicas de Interoperabilidade (ETI's). Este sistema, e a sua utilização, são tendencialmente obrigatórios em toda a rede ferroviária, sendo as suas funcionalidades e soluções técnicas pensada para satisfazer os requisitos específicos das redes ferroviárias (normas EIRENE), sendo geridas pela *European Railway Agency* (ERA), organismos dependente da União Europeia. A normalização EIRENE, foi inicialmente desenvolvida pela *Union Internationale des Chemins de Fer* (UIC) [5] e caracteriza-se principalmente por razões ligadas à segurança e fiabilidade do transporte ferroviário, requerendo este maior exigência em termos de qualidade de serviço comparativamente ao sistema GSM público.

O sistema GSM-R tem vindo a ser adoptado pela maioria dos operadores de infra-estruturas ferroviárias para suporte das comunicações profissionais de voz e dados, existindo actualmente um substancial investimento na migração das redes analógicas de comunicações móveis desses operadores para GSM-R.

Capítulo 3 – Análise do desempenho da tecnologia GSM-R

Dada a maturidade actual dos sistemas GSM, as metodologias de planeamento e optimização de rede rádio estão actualmente perfeitamente definidas e documentadas, sendo seguidas pela totalidade de operadores de redes públicas de comunicações celulares móveis. Estas diferenças residem não apenas nos requisitos em termos de qualidade de serviço, mas também na arquitectura, como zonas de transição celular (LDA - *Location Dependent Addressing*) definidas por constrangimentos da operação ferroviária, níveis de cobertura rádio e capacidade de rede, entre outras.

Assim sendo, a metodologia convencional de planeamento de rede rádio GSM utilizada pelos operadores públicos poderá não conduzir aos melhores resultados na situação de aplicação ferroviária. Estas diferenças foram a principal motivação para a realização deste estudo.

3.2.1 Arquitectura do sistema

A arquitectura do sistema GSM-R é semelhante à dos sistemas GSM públicos. Esta está projectada para a minimizar custo e complexidade das estações base em caso de alteração topológica, como é o caso de adição de novas estações base na rede ou sectorização de células. Esta rede permite uma centralização da gestão e manutenção, bem como a ligação da mesma a outras redes. Pela Figura 3.1 pode-se observar uma ilustração da arquitectura de rede, de acordo com a norma [6], incluindo os principais elementos de rede.

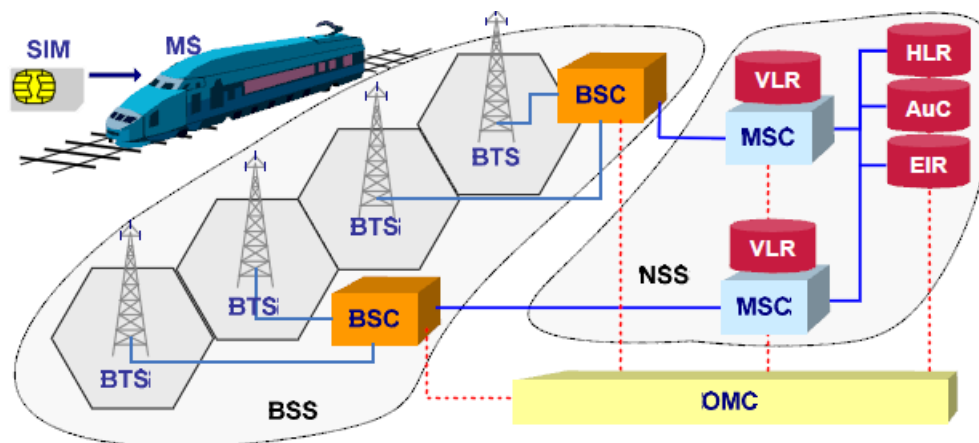


Figura 3.1 - Arquitectura do sistema GSM-R (obtido de [7]).

O equipamento terminal, denominado de MS (*Mobile Station*), encontra-se no extremo da estrutura e é responsável pela ligação à rede de acesso rádio através da interface

Capítulo 3 – Análise do desempenho da tecnologia GSM-R

rádio. Este equipamento inclui um cartão inteligente com informação específica do assinante que é chamado SIM (*Subscriber Identity Module*).

Quanto à rede do operador é dividida em dois sub-sistemas independentes, o BSS (*Base Station Sub-System*) e o NSS (*Network Sub-System*). O BSS engloba todas as funcionalidades relativas à transmissão. Neste sub-sistema estão abrangidas os BSCs (*Base Station Controllers*), que fazem o controlo de uma ou mais BTSs (*Base Transceiver Stations*), estas por sua vez podem conter um número de TRXs (*Transceivers*). O sub-sistema NSS, tem a responsabilidade do controlo de chamadas. Este sub-sistema engloba os MSCs (*Mobile services Switching Centre*), que está ligado a um VLR (*Visitor Location Register*). Os VLR basicamente são equipamentos com bases de dados que contêm a informação temporária dos assinantes que se encontram ligados na área de serviço abrangida pelos MSC. A nível mais elevado, existem um conjunto de bases de dados que permitem a gestão dos perfis dos assinantes ligados à rede designados de HLR (*Home Location Register*), existindo por sua vez uma base de dados responsável pela gestão do mecanismo de segurança e dos equipamentos terminais, denominas de AuC (*Authentication Center*) e EIR (*Equipment Identity Register*), respectivamente. Estes dois sub-sistemas estão interligados através da interface A de GSM, interface com canais 64kbps.

No sistema GSM-R existe também um equipamento que é o OMC (*Operation and Maintenance Center*) que é responsável pela monitorização de toda a rede, incluindo configuração de rede, monitorização de desempenho, gestão de assinantes, entre outras funcionalidades.

3.2.2 Banda de frequências

Relativamente à banda de frequências disponível para os sistemas GSM-R, este contém um total de 19 portadoras de 200kHz, localizada abaixo da banda de extensão GSM, como se pode observar pela Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Bandas de frequência GSM (adaptado de [9])

Banda GSM [MHz]	Uplink	Downlink
Primary	890 – 915	935 – 960
Extended	880 – 915	925 – 960
Railways	876 – 915	921 – 960

3.2.3 Cobertura GSM-R

Um dos aspectos mais importantes que distingue o GSM do GSM-R é a projecto da rede rádio e a definição dos níveis mínimos de cobertura. A especificação GSM-R define níveis mínimos de cobertura dependendo da velocidade e do tipo de informação transmitida. Estes valores estão apresentados na Tabela 3.2 e são definidos considerando a situação de rádio de cabine, em que antena se encontra a 4 m de altura e se considera uma antena isotrópica [9].

Tabela 3.2 – Níveis mínimos de cobertura (adaptado de [9]).

Tipo	Valor mínimo	Utilização	Velocidade
Obrig.	-98 dBm	Voz e dados não críticos	--
Obrig.	-95 dBm	ETCS níveis 2/3	≤ 220 km/h
Recom.	-92 dBm	ETCS níveis 2/3	≥ 280 km/h

Os valores mínimos de cobertura deverão verificar-se para uma probabilidade de cobertura de 95%, considerando segmentos de 100 m de linha férrea, tal como apresentado na Figura 3.2. Este facto traduz uma diferença significativa no que refere aos sistemas GSM, em que a probabilidade de cobertura refere-se à média da cobertura em toda a região coberta. Assim, os requisitos de cobertura para os sistemas GSM-R têm um nível de exigência muito superior ao do GSM.

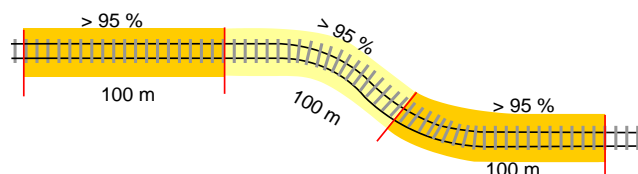


Figura 3.2 - Probabilidade de cobertura em GSM-R [9].

Outros dos factores importantes no dimensionamento de cobertura rádio, prende-se com uma das funcionalidades específicas do GSM-R denominada por LDA. Esta funcionalidade consiste na atribuição um endereço lógico a uma determinada função (tipicamente um controlador) dependendo da localização do utilizador. Isso significará que a estrutura de comando de circulação da linha poderá impor que ao nível celular os limites de células sejam coerentes com a estrutura de identificadores definidos como se apresenta na Figura 3.3 [9].

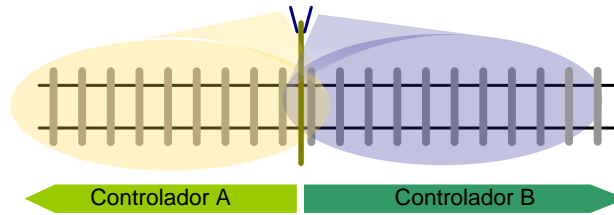


Figura 3.3 – Funcionamento do LDA em GSM-R.

Este facto terá implicações no planeamento de cobertura rádio, pois será necessária a alteração de controlador de forma precisa em determinadas zonas da linha. Este aspecto consistirá em forçar o *handover* na área de comutação de endereço, implicando normalmente a colocação de uma estação bi-sectorizada na zona de comutação pretendida de forma a assegurar uma maior precisão de *handover* no local. Esta mesma funcionalidade terá que ser realizada através de parâmetros específicos do GSM.

3.3 Equipamento

Nesta secção será descrito o equipamento utilizado durante a campanha de medidas nas linhas de Sintra, Cascais e Oeste (até Torres-Vedras)

3.3.1 Emissor

O emissor de teste, consiste num gerador de funções que produz uma sinusóide à frequência de teste, sendo que as frequências utilizadas foram: 923.6 MHz, 923.8125 MHz e 924 MHz. Este emissor encontra-se ligado a uma antena omnidireccional cujo diagrama de radiação está apresentado na Figura 3.4.

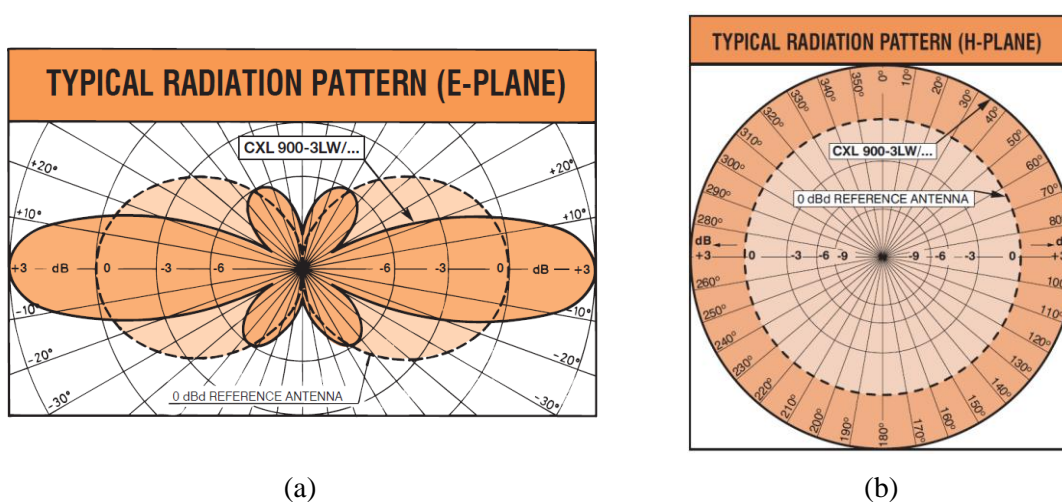


Figura 3.4 – Diagrama de radiação da antena ((a)Plano Vertical (b)Plano Horizontal).

Nos testes realizados a antena foi colocada em torres de teste com alturas variáveis entre os 16 e 24 metros de altura, de acordo com cada cenário de teste planeado. Sendo as

Capítulo 3 – Análise do desempenho da tecnologia GSM-R

torres colocada em localizações também definidas anteriormente aos testes, abrangendo as condicionantes de instalação para cada uma das localizações de teste previstas.

Através da Tabela 3.3 pode-se observar de forma mais detalhada as características da antena emissora utilizada na realização dos testes.

Tabela 3.3 - Características da antena emissora.

Modelo	CXL 900-3LW
Banda de Funcionamento [MHz]	824 a 960
Tipo	Omnidireccional
Largura de Banda [MHz]	70 - 80
Potência máxima [W]	100
Ganho [dBi]	5

3.3.2 Receptor

O receptor utilizado para a recolha de medidas foi o equipamento R&S TSMU, que está capacitado para recolha de medidas de campo para diversas tecnologias e banda de frequências. Este equipamento permite a análise das mensagens de rede das tecnologias WCDMA (bandas I a IX), GSM (toda a banda GSM) e CDMA2000 1x (banda SR1 classes 0 a 16).

Relativamente à recolha de medidas de potência, este equipamento permite flexibilidade e é adequado para *drive-tests* para as diferentes tecnologias já referidas. Permite medição de potência RF, para uma frequência específica, uma banda de frequências ou mesmo uma lista aleatória de frequências, entre os 80MHz e os 3GHz.

O equipamento R&S TSMU é uma plataforma hardware de medidas de potência de sinal que combinado com o *software* R&S®ROMES3NG e opcionalmente com um sistema GPS permite a recolha de medidas rádio de forma simples e precisa. O software referido corre sobre o sistema operativo WINDOWS. De forma sucinta as características de recolha de medidas para o GSM, são apresentadas em [8]:

- Multi-tecnologia e multi-banda;
- Largura de banda do utilizador, configurável entre os 80MHz e os 3GHz;
- Optimizado para medições rápidas e precisas (20 canais GSM com ciclos de 1.6ms)

- Medidas em modo frequência única, lista de frequências e banda de frequências.
- Medidas em função do tempo e da distância;
- Geração de dados de acordo com o critério *Lee*;
- Monitorização automática e manual (teste de reporte móvel, RF para ser definido)

3.4 Cenários de teste

Os cenários de testes escolhidos visam ser possível obter conclusões relativamente ao desempenho da tecnologia GSM-R para três linhas férreas com características distintas. Os cenários escolhidos foram, a linha de Cascais, linha de Sintra e linha do Oeste, cujas características de cada uma estão descritas nos sub-pontos abaixo dedicado à caracterização de cada cenário já referido.

3.4.1 Linha de Cascais

A linha de Cascais, está localizada entre Cais-Sodré e Cascais, contém 17 estações ao longo do seu percurso de aproximadamente 25 km, como se pode observar pela Figura 3.5. É caracterizada por estar envolvida por um ambiente considerado urbano, pois atravessa uma das zonas com maior densidade populacional da zona metropolitana de Lisboa. Os edifícios que se encontram a rodear a linha em algumas localizações estão menos de cinco metros do limite da linha. Outros dos factores importante referir relativamente a esta linha é a proximidade do rio Tejo, que tem uma influência considerada positiva na propagação das ondas electromagnéticas.

No que refere às características geográficas esta linha não apresenta grande variação do declive do terreno, logo espera-se que a propagação do sinal seja apenas perturbada pela existência e proximidade dos edifícios ao longo do percurso da linha. Nos testes efectuados foram escolhidas nove localizações para a colocação de estações de teste. Estas localizações foram escolhidas com base em informação disponibilizada pela REFER TELECOM relativa ao sistema de comunicações analógico já existente na linha. Através desta informação foram detectados os pontos mais críticos, tendo sido escolhidas as localizações consideradas mais importante para a recolha de amostras de sinal.

As localizações escolhidas sempre que possível coincidiram com as estações de comboio por motivos logísticos, sendo também sempre que possível utilizadas as torres do sistema de comunicações analógico já existentes. Relativamente às alturas das torres

Capítulo 3 – Análise do desempenho da tecnologia GSM-R

utilizadas nos testes foram usadas torres de 16 metros, tendo sido também recolhidas algumas medidas com torres à altura de 24 metros, com o intuito de avaliar o efeito da variação da altura no comportamento do sinal. Para a apresentação dos resultados foi denominado Lado A, a direcção Cascais – Cais do Sodré, tendo sido denominado por lado B a direcção Cais do Sodré – Cascais.

Na recolha de amostras de sinal, foi utilizado o percurso normal de circulação da linha, tendo sido montado no cimo de uma da carruagem uma antena receptora que foi ligada ao equipamento de recolha de medidas, que se encontrava na cabine do maquinista.

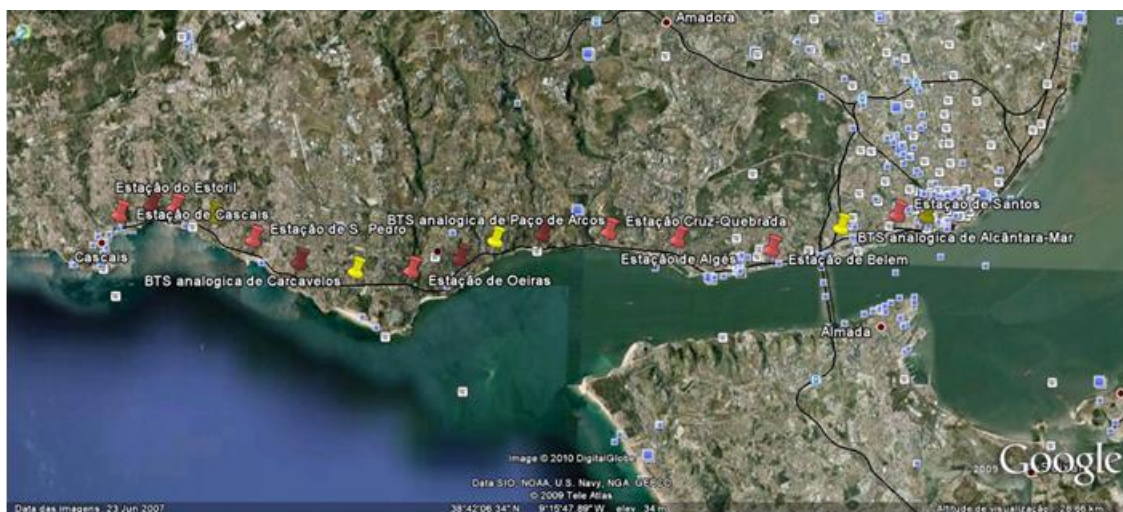


Figura 3.5 - Linha de Cascais.

3.4.2 Linha de Sintra

Esta linha é caracterizada por ter um ambiente de propagação urbano. A linha de Sintra está localizada numa zona de intensa existência de edifícios, sendo uma das linhas da área metropolitana de Lisboa com maior fluxo de passageiros. Esta linha encontra-se localizada entre o Rossio e Sintra, no entanto os teste efectuados para apenas incluem o troço entre Campolide e Sintra, visto a propagação em túneis não ter interesse no estudo apresentado. O percurso considerado totaliza assim uma distância de aproximadamente 25 km, incluindo 14 estações.

Para a colocação dos emissores de teste apenas foram consideradas sete localizações, escolhidas considerando os pontos mais relevantes, de forma a conseguir uma cobertura total da linha. A recolha de medidas nesta linha, foi feita utilizando o percurso normal de circulação dos comboios, tendo sido o receptor montado no cimo de uma das carruagens e ligado ao equipamento de medidas que se encontrava no interior da carruagem, na cabine do maquinista, tal como aconteceu para a linha de Cascais. Na

Capítulo 3 – Análise do desempenho da tecnologia GSM-R

Figura 3.6 pode-se observar as localizações onde foram colocados os emissores de teste, tendo sido utilizadas torres de 24 metros em cada uma das localizações de teste. Neste cenário de medidas considerou-se a direcção Sintra – Campolide como Lado A, sendo a direcção Campolide - Sintra o lado B.

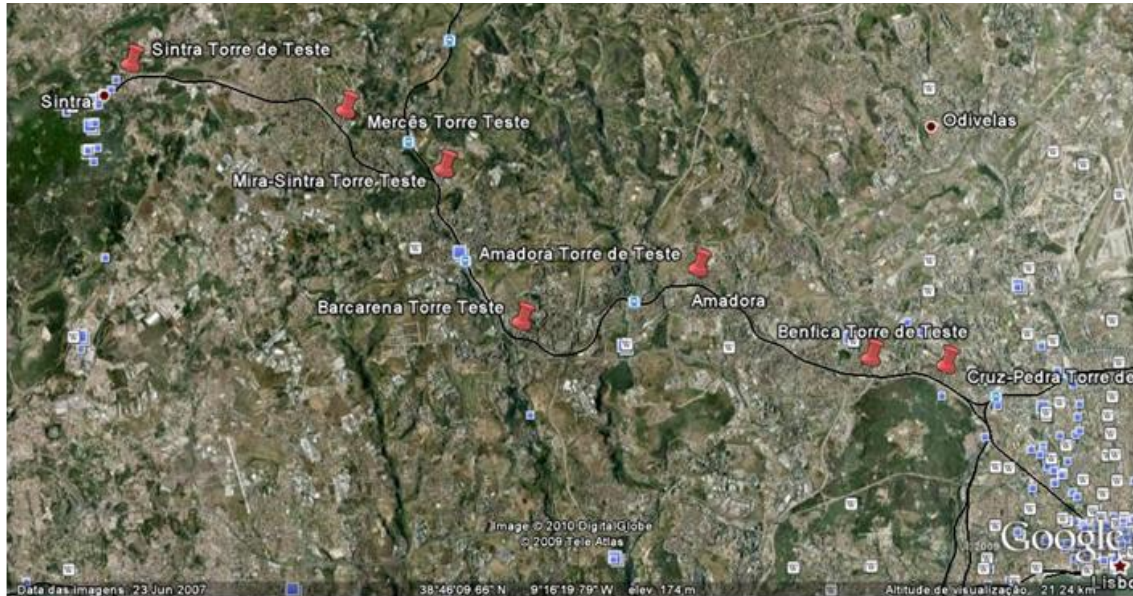


Figura 3.6 - Linha de Sintra.

3.4.3 Linha do Oeste

A linha do Oeste consiste na linha que liga Meleças à Figueira da Foz, no entanto para a realização dos testes apenas foi considerado o troço Meleças - Torres Vedras, por motivos logísticos e de maior interesse para a REFER TELECOM. Esta opção deveu-se à necessidade de efectuar um estudo mais aprofundado deste troço de linha, visto ainda não existir nenhum sistema de comunicações implementado na mesma, nem existir nenhum estudo relativo ao comportamento deste tipo de sistemas para este cenário. O terreno envolvente à linha pode ser considerado rural, visto a densidade de edifícios que rodeiam a linha ser muito reduzida. Esta linha atravessa apenas pequenas localidades e quintas, tendo apenas maior número de edifícios na zona da estação da Malveira. Outra das características desta linha é a variação de altitude do terreno ao longo dos 40 km de linha, com 14 estações/apeadeiros. Podendo ser considerada um ambiente rural e montanhoso.

Para a realização dos testes foi utilizada uma carruagem, normalmente utilizada para manutenção e transporte dos funcionários, onde foi montada uma antena receptora no seu exterior. Efectuou-se o percurso pretendido ininterruptamente, isto é, não foram realizadas paragens em nenhuma das estações/apeadeiros ao longo de cada um dos

Capítulo 3 – Análise do desempenho da tecnologia GSM-R

testes. Para a análise das medidas recolhidas nos diversos locais, foram divididas as direcções de propagação em dois lados, Lado A que denomina a direcção Torres Vedras - Meleças, Lado B denomina a direcção Meleças - Torres Vedras.

Na Figura 3.7 estão representadas as localizações das estações emissores utilizadas ao longo de toda a extensão do troço considerado, tendo sido utilizadas nestas torres entre os 16 e 18 metros de altura.

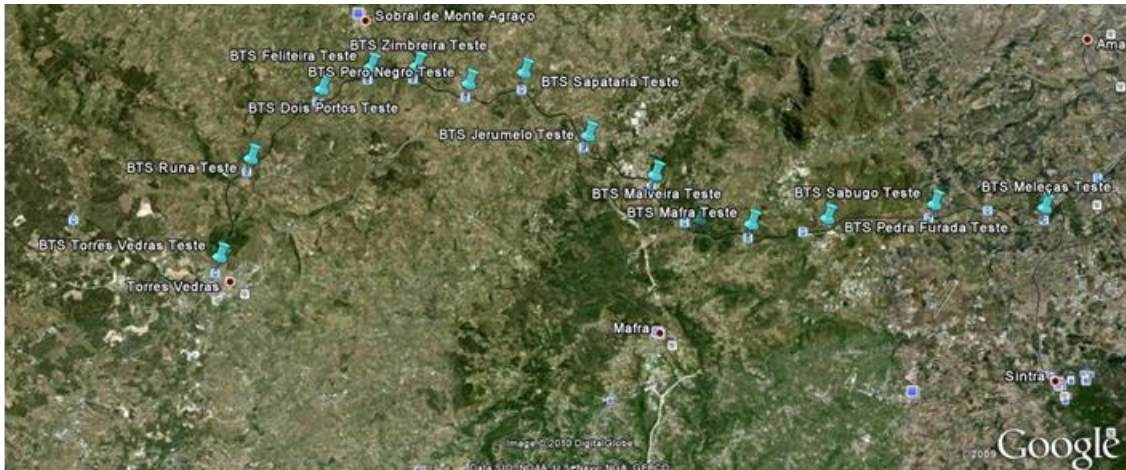


Figura 3.7 – Linha do Oeste.

Capítulo 4 - Análise dos Resultados

4.1 Introdução

O estudo do decaimento do campo em diversos cenários de teste tem uma elevada importância na caracterização do comportamento do sinal electromagnético para diversos ambientes de propagação. Visto não existirem actualmente muitos estudos relativos a este tema para a tecnologia GSM-R, considera-se que o estudo apresentado neste capítulo é de extrema importância para conhecimento e desenvolvimento das futuras aplicações deste sistema. Esta importância é acrescida ainda pelo facto dos ambientes de ferroviários terem características muito específicas no que diz respeito à propagação, visto este tipo de propagação ser feita de forma radial à estação base.

Neste capítulo serão apresentados os resultados da recolha de medidas efectuadas nas três linhas de comboio (Linha de Cascais, Linha de Sintra e Linha do Oeste) escolhidas para o estudo da propagação em ambientes ferroviários. Estes três cenários de teste foram escolhidos devido à diversidade de ambientes existente em cada um deles e com vista à aquisição conclusões de natureza científicas quanto a este tipo de ambientes. Mais adiante será caracterizado cada uma das linhas relativamente ao seu tipo de ambiente de propagação e será pormenorizado o porquê da sua escolha. Para cada uma das linhas estudadas serão apresentados os resultados considerados mais relevantes e conclusões possíveis apurar. Todos os restantes resultados e análise, dos mesmos, serão apresentados e analisados no anexo E desta tese.

Para a análise do comportamento do sinal no que diz respeito ao factor de decaimento do campo dos diversos cenários, foram consideradas todas as amostras de sinal até ao limite mínimo de -120 dBm. A escolha deste valor deveu-se a este estar contido dentro dos valores de sensibilidade do equipamento de teste (-130 dBm), e permitir que os níveis de interferência encontrados nas linhas, não tivessem influência significativa nas conclusões obtidas.

4.2 Estudo do ambiente de propagação

Para a classificação do ambiente de propagação foi usado o factor de decaimento, tendo sido definidas três classes distintas com os nomes: muito denso, denso e pouco denso, como se pode observar na Tabela 4.1. A escolha dos limites foi realizada através da

observação dos decaimentos do campo obtidos nas amostras recolhidas através da campanha de medidas.

4.2.1 Classificação dos locais de teste

Para a caracterização dos cenários de teste foram definidos três tipos de ambientes de propagação (Muito denso, Denso e Pouco denso) tendo como base o valor do decaimento de campo electromagnético (n). Na Tabela 4.1 pode observar-se os ambientes de propagação definidos e a sua correspondência em termos de decaimento de campo.

Tabela 4.1 - Ambientes de propagação.

Ambiente de propagação	Intervalo
Muito denso	$n \geq 3.9$
Denso	$3 \leq n < 3.9$
Pouco denso	$n < 3$

4.2.1.1 Ambiente muito denso

Tipicamente este tipo de ambiente é caracterizado pela obstrução total da linha de vista com a estação de teste. Normalmente as condições verificadas prenderam-se com obstrução devido a edifícios (caso das linhas de Cascais e Sintra) ou obstrução devido ao relevo do terreno, zonas montanhosas (caso de linha do Oeste).

4.2.1.2 Ambiente denso

Este tipo de ambiente é caracterizado por obstrução parcial da linha de vista, normalmente apenas o primeiros elipsóide de *fresnel* ou obstrução total da linha de vista devido a vegetação. Verificou-se também que em determinadas zonas de elevada densidade urbanística, mas em que o sinal era beneficiado pelo efeito reflectivo da água, tinha um comportamento que permitia o enquadramento neste tipo de ambiente.

4.2.1.3 Ambiente pouco denso

Os ambientes classificados como do tipo pouco denso são caracterizados pela presença da linha de vista entre o emissor e o receptor. Nestes cenários verificou-se que as condições de propagação eram facilitadas. Normalmente este ambiente aplica-se em

situações de áreas abertas com existência de curvas na linha ou mesmo zonas em que a linha tem um percurso rectilíneo.

Através da definição anterior dos diversos tipos de ambiente foi caracterizado cada um dos cenários de teste para as diversas linhas. Esta mesma caracterização encontra-se no anexo D (Tabela D.1), onde se pode observar que o ambiente onde há uma queda da potência do sinal de forma mais rápida é na localização PK17 para o lado B, com o valor de factor de decaimento do campo de 4.5. Já a localização onde o factor de decaimento do campo é menor, com o valor de 2.5, é o lado A da estação de Malveira, para distâncias inferiores a 400 metros.

4.3 Estudo do decaimento do campo

4.3.1 Linha de Cascais

4.3.1.1 Alcântara-Mar

Para o teste efectuado em Alcântara-Mar foi utilizada a torre já existente para o sistema analógico, com altura de 18 metros. Observando a Figura 4.1(a) pode-se concluir que através desta estação é possível cobrir a estação do Cais-Sodré, que se encontra a 2.5 km desta localiza o (Figura 4.1 (b)). De referir ainda que   possível observar uma pequena influência da reflexão do sinal na água na zona próxima da esta o do Cais-Sodré, concretamente nas amostras a partir de 2 km da esta o de teste. Por fim pode-se concluir que utilizando um factor de decaimento do campo de 3.8   possível caracterizar o comportamento das amostras recolhidas relativamente ao lado A.

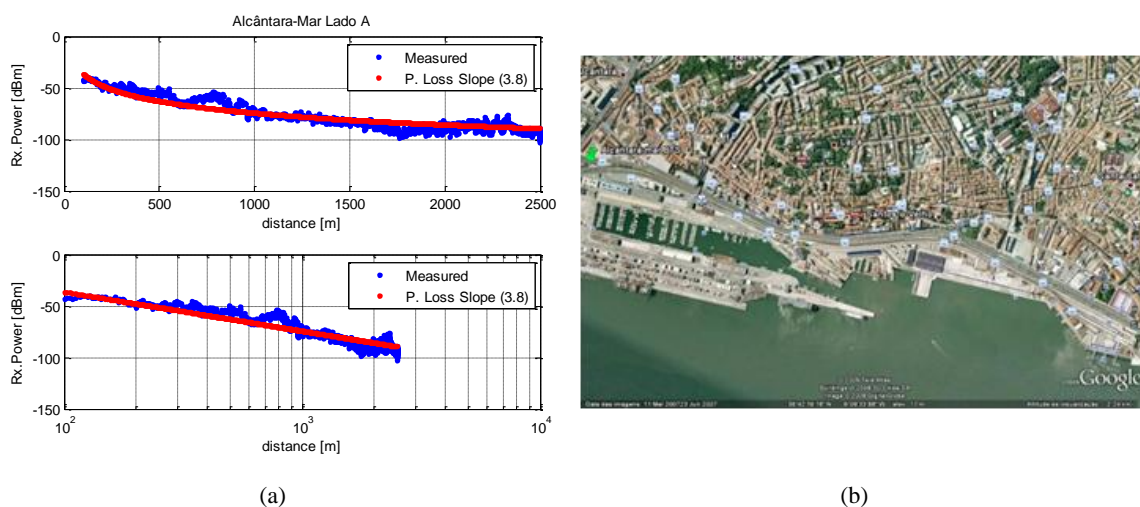


Figura 4.1 – Localiza o de teste da esta o de Alcântara (Lado A).

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

Relativamente ao lado B, o decaimento do campo das amostras obtidas é 3.5. Através da Figura 4.2 (a), pode-se também observar que devido a influência do rio (pela Figura 4.2 (b)) é possível conseguir um elevado nível de cobertura, permitindo obter amostras válidas até aos 12 km da estação base.

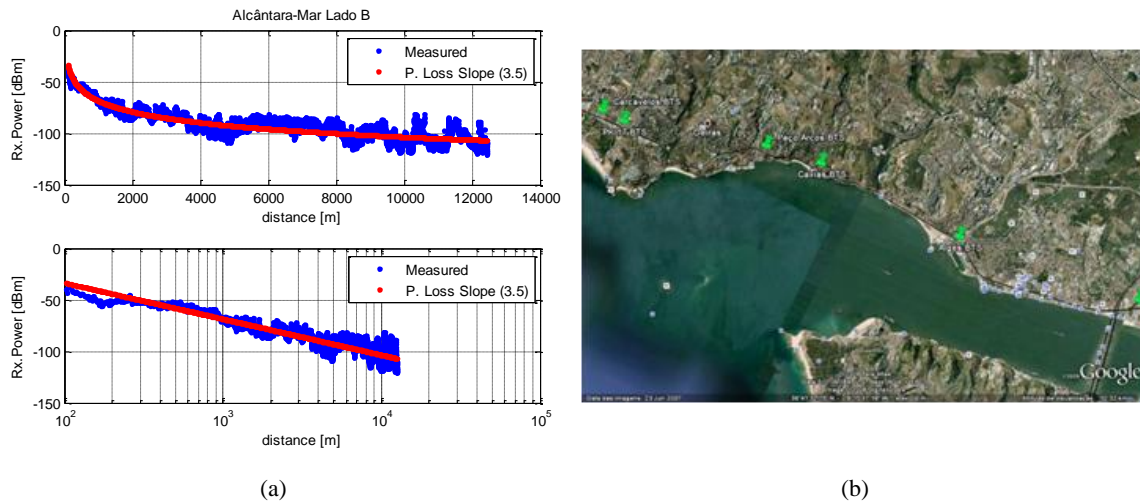


Figura 4.2 – Localização de teste da Estação de Alcântara (Lado B).

4.3.1.2 Paço Arcos

Na situação de teste com um emissor em Paço Arcos, foram efectuadas medidas com duas alturas de mastro, a 16 metros e a 24 metros, de forma a obter conclusões relativas ao comportamento do sinal para as diferentes alturas.

Na Figura 4.3 (a) (lado A da estação) pode-se observar que até à distância de 1 km da estação de teste se verifica um decaimento do campo de 4.1, devido a proximidade dos edifícios relativamente a linha. Após este ponto há uma subida da potência do sinal justificada pelo facto da propagação do sinal ser feita com influência da água do rio, como se pode confirmar pela Figura 4.3 (b). Este facto permite que a propagação do sinal neste local seja facilitada.

Considerando todas as amostras até ao valor de potência de -120 dBm podemos observar que o decaimento do campo passa a ser de 3.3, podendo concluir-se que o ambiente de propagação presente nesta zona, pode ser caracterizado como denso. De referir ainda que o facto de terem sido conseguidas amostras válidas até aproximadamente 12 km da estação de teste, deve-se este fenómeno a reflexão do sinal na água do rio, já referido.

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

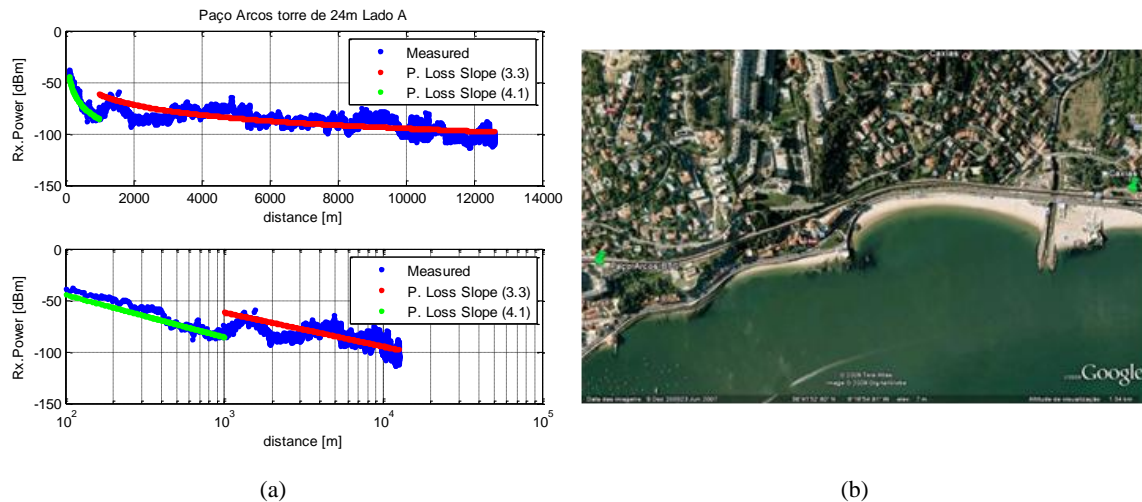


Figura 4.3 – Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 24 metros (Lado A).

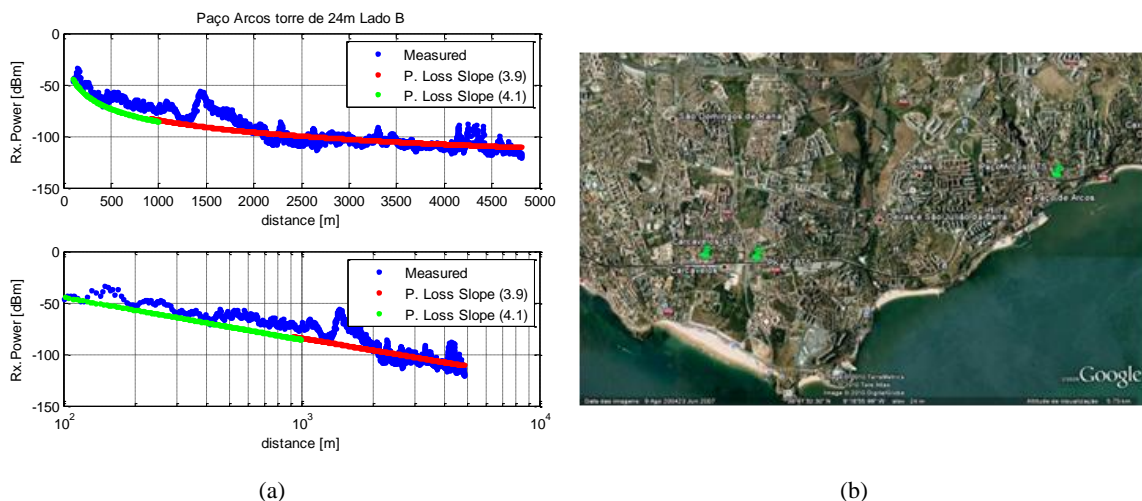


Figura 4.4 - Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 24 metros (Lado B).

Pela Figura 4.4 pode-se observar ao quilómetro 1.5 uma recuperação do sinal. Neste caso não se verificou influência da água, mas sim recuperação do sinal devida ao aparecimento da linha de vista com a estação base. No que refere ao decaimento do campo pode ser definido pelo valor 3.9 para os primeiros mil metros da estação base e 4.1 para as restantes distancias consideradas válidas.

Observando a Figura 4.5 e Figura 4.6 pode-se observar o mesmo comportamento e conclusões obtidos na Figura 4.3 e Figura 4.4 respectivamente, podendo concluir-se que há uma subida do decaimento do campo, e uma redução da área de cobertura com a diminuição altura do mastro, como seria de esperar. Para o lado A a subida do decaimento do campo para as amostras de distancia inferior a mil metros é de 0.2, sendo para as restantes amostras de 0.1. No que refere ao lado B da estação de teste, pode-se observar uma subida do decaimento do campo de 0.1.

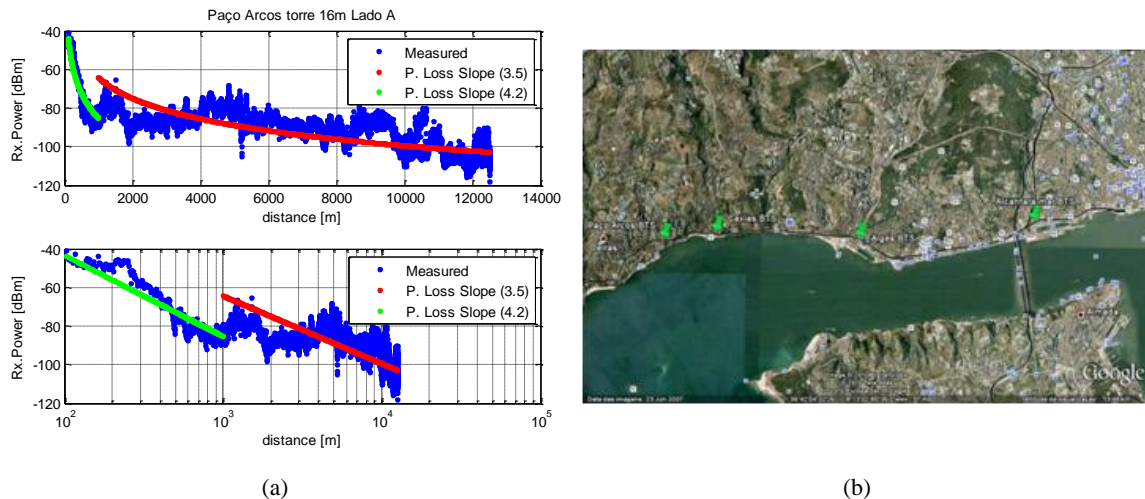


Figura 4.5 - Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 16 metros (Lado A).

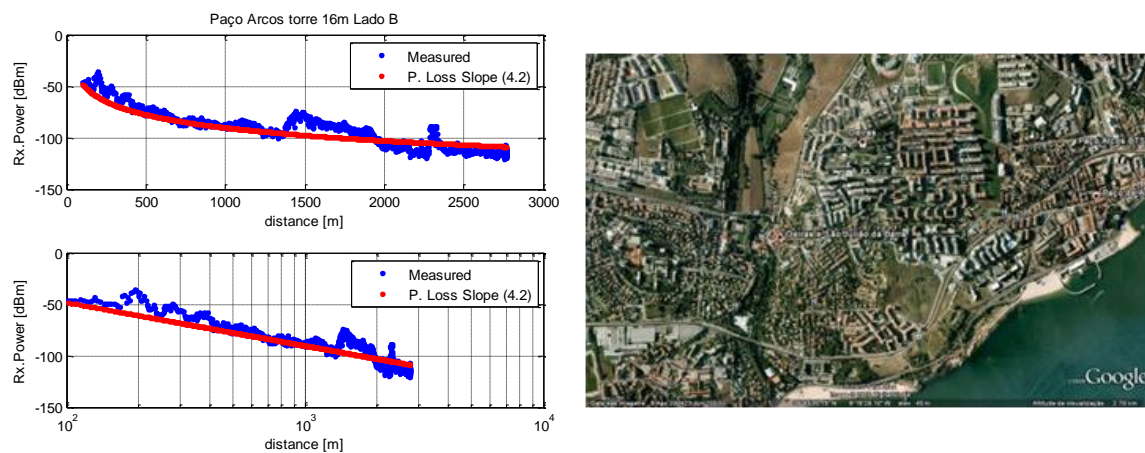


Figura 4.6 - Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 16 metros (Lado B).

Observando a Figura 4.5 e Figura 4.6 pode-se observar o mesmo comportamento e conclusões obtidos na Figura 4.3 e Figura 4.4 respectivamente, podendo concluir-se que há uma subida do decaimento do campo, e uma redução da área de cobertura com a diminuição altura do mastro, como seria de esperar. Para o lado A a subida do decaimento do campo para as amostras de distancia inferior a mil metros é de 0.2, sendo para as restantes amostras de 0.1. No que refere ao lado B da estação de teste, pode-se observar uma subida do decaimento do campo de 0.1.

4.3.1.3 Decaimento do campo para cada uma das estações de teste

De forma a ser possível comparar e analisar o tipo de ambiente em cada um dos testes realizados foi criada a Tabela 4.2 onde se pode efectuar o comparativo entre os diversos factores de decaimento do campo para cada uma das situações de teste.

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

Tabela 4.2 – Factores de decaimento do campo (Linha Cascais)

Localização	Lado A	Lado B
Alcân.	3.8	3.5
Algés	3.7	3.2
Caxi. (dist.<1000m)	4.1	3.7
Caxi. (dist > 1000m)	3.4	
P.Arc. (16 m) (dist <1000m)	4.2	4.2
P.Arc. (16 m) (dist > 1000m)	3.5	
P. Arc. (24 m) (dist <2000m)	4.1	4.1
P. Arc. (24 m) (dist >2000m)	3.3	3.9
PK 17 (dist <1500m)	4.1	4.3
PK 17 (dist >1500m)		4.5
Carca. (dist <1000m)	3.6	3.5
Carca. (dist >1000m)		4.1
S. João	4	3.6
Estor. (dist <500m)	4.1	3.5
Estor. (dist >500m)		3.1

Analisando os diversos factores de decaimento do campo, para as diversas localizações de teste, pode-se observar que os valores de factor de decaimento do campo variam entre os 3.3 e 4.5, este facto indica que o ambiente envolvente da linha varia entre o denso e o muito denso.

Pode-se observar que a localização onde potência do sinal cai mais ligeiramente é Paço Arcos com torre de 24 metros, lado A. Este facto é justificado pela propagação do sinal ser favorecida pelas reflexões no rio ao longo do percurso neste local. No que refere ao cenário onde se verificou uma queda mais rápida da potência do sinal, este é o PK 17 da linha, com o valor de 4.5, onde a estação emissora está rodeada de edifícios que provocam uma maior atenuação do sinal e consequente queda do mesmo.

Relativamente a variação do comportamento do sinal utilizando as duas alturas distintas, teste realizado em Paço Arcos, verificou-se uma diminuição do factor de decaimento do campo, como seria espectável. Apesar disto, não foi possível concluir uma melhoria significativa no que diz respeito à cobertura do sinal, apesar da torre de 24 metros permitir uma menor influência dos edifícios. Sendo assim a passagem de 16 para 24 metros não bastou para que fosse possível recolher conclusões significativas quanto à variação do factor de decaimento do campo.

Na Figura 4.7 pode observar-se o gráfico com a variação dos valores de decaimento de campo para cada um dos testes realizados na linha de Cascais, podendo confirmar-se

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

que este cenário varia entre denso e muito denso, devendo-se este facto à proximidade de prédios relativamente ao limite da linha de comboio.

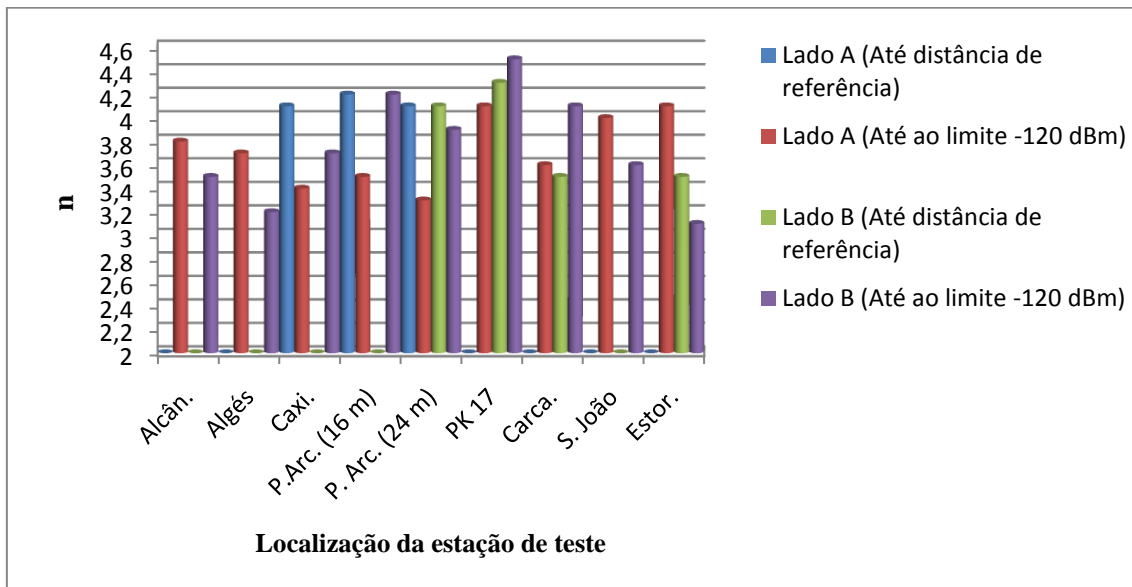


Figura 4.7 - Factores de decaimento do campo (Linha Cascais).

4.3.2 Linha de Sintra

4.3.2.1 Barcarena

O emissor colocado em Barcarena encontrava-se a 20.2 metros do nível da linha, tendo sido colocado numa localização onde a estação de teste se encontrava “escondida” atrás de uma curva, relativamente ao lado A. Esta circunstância causa a mudança do comportamento do sinal, criando um ponto de alteração do decaimento do campo, como se pode observar pela Figura 4.8 (a). Assim até à distância de 1 km da estação de teste, local onde se encontra o início da curva, existe linha de vista com a estação emissora (quando considerada a direcção Sintra – Rossio), deixando de existir após a curva.

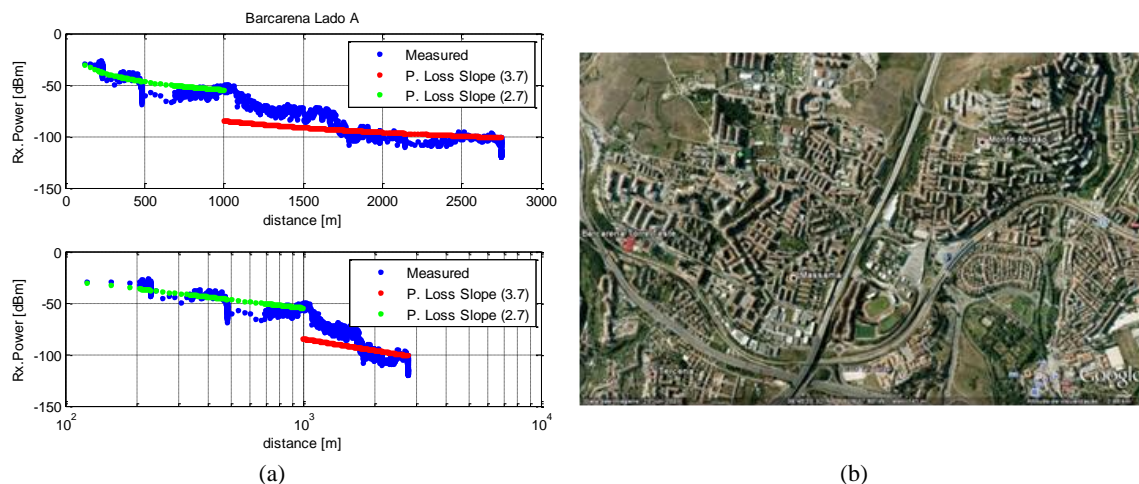


Figura 4.8 – Localização de teste da estação de Barcarena (Lado A).

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

Este efeito de mudança de características do ambiente faz com que o valor de decaimento do campo electromagnético seja 2.7 nos primeiros mil metros e para a restante cobertura considerada, seja caracterizado através do valor 3.7. Esta variação confirma o esperado, pois a potência do sinal cai de forma mais rápida devido à existência de obstáculos e consequente inexistência de linha de vista com a estação de teste.

No que diz respeito ao lado B, verificou-se que devido à linha ter um percurso que se aproxima de uma recta, não se verificam alterações significativas do factor de decaimento do campo ao longo das amostras consideradas, sendo o valor deste factor de 4. Este valor de decaimento de campo, que caracteriza este ambiente como sendo do tipo muito denso, deve-se ao facto da estação de teste se encontrar numa zona de elevação mais reduzida relativamente ao resto da linha, isto é, considerando o sentido lado B a linha encontra-se a subir. Verifica-se também que a linha de comboio nesta zona se encontra “escavada” relativamente ao terreno envolvente, dificultando a penetração do sinal nesta zona, causando obstrução à propagação do sinal.

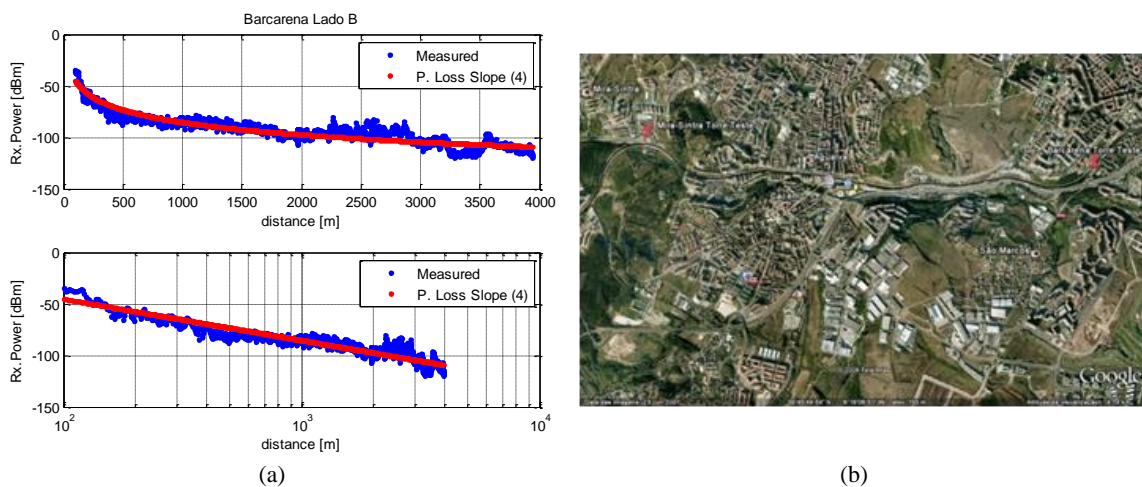


Figura 4.9 – Localização de teste da estação de Barcarena (Lado B).

4.3.2.2 Decaimento do campo para cada uma das estações de teste

Na Tabela 4.3 pode-se observar com mais detalhe cada um dos valores de decaimento de campo de cada localização de teste, para cada um dos lados definidos. Assim é possível concluir que tal como na linha de Cascais, a linha de Sintra pode ser caracterizada com dois tipos de ambiente de propagação. Neste caso pode-se afirmar no entanto que o ambiente dominante será denso, mas que existem algumas zonas onde se verifica um comportamento do sinal que caracteriza a zona com um ambiente muito

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

denso. Nesta linha o decaimento do campo varia entre os 2.7 (Barcarena, lado A) e os 4 (Barcarena, Lado B), sendo esta diferença de valores já estudada no ponto 4.3.2.1.

Tabela 4.3 – Factores de decaimento do campo (Linha de Sintra)

Localização	Lado A	Lado B
C. Ped.	3.7	3.9
Benfi. (dist. < 600m)	3.4	3.5
Benfi. (dist. > 600m)	3.8	
Amad.	3.7	3.5
Barca.(dist. <1000m)	2.7	4
Barca.(dist. >1000m)	3.7	
M. Sin.(dist. < 800m)	3.1	3.3
M. Sin.(dist. > 800m)	3.7	3.9
Merc.	3.7	3.6
Sint.	3.9	-

Na Figura 4.10 pode-se observar a variação do decaimento de campo para cada uma das situações de teste realizadas na linha de Sintra, podendo observar-se que o ambiente de propagação é tendencialmente denso. Esta linha é caracterizada por maior afastamento dos prédios relativamente a linha e menor densidade urbanística, comparativamente a linha de Cascais, podendo este facto justificar o decaimento do sinal electromagnético de tomar valores mais reduzido.

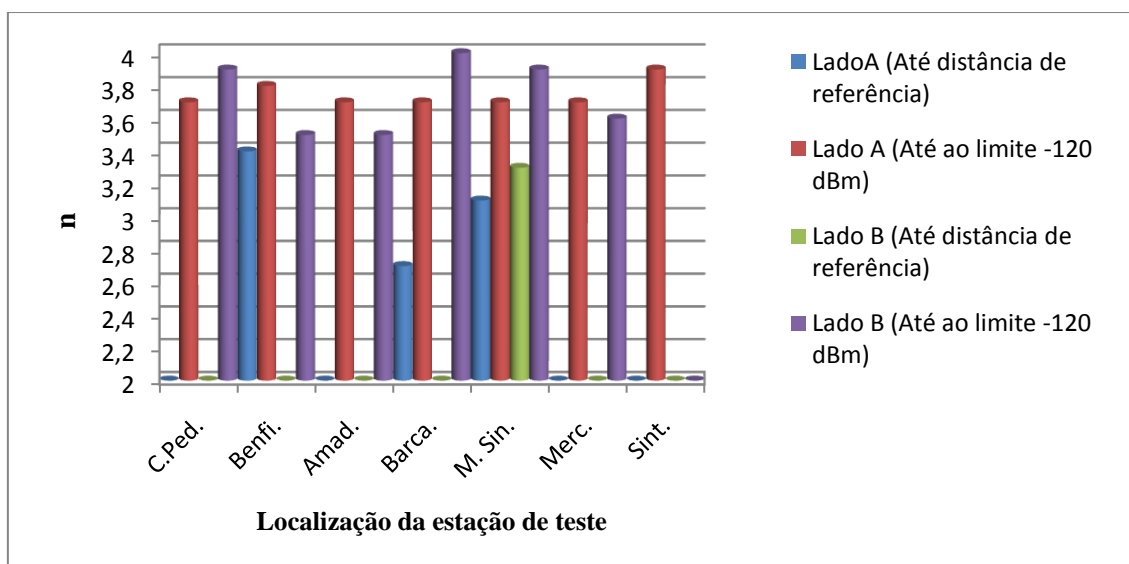


Figura 4.10 - Factores de decaimento do campo (Linha de Sintra).

4.3.3 Linha do Oeste

4.3.3.1 Alcainça

Este apeadeiro encontra-se à altitude de 200 metros, tendo no local de teste sido colocada uma torre de 19.5 metros relativamente à linha do comboio.

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

Pode-se observar pela Figura 4.11 (a), o efeito da passagem de linha de vista para a ausência da mesma, devido a uma curva a 600 metros da estação emissora. Assim pode-se observar uma alteração do factor de decaimento do campo de 2.9, até à distância de 600 metros da estação emissora, para 3.6, para as restantes distâncias consideradas.

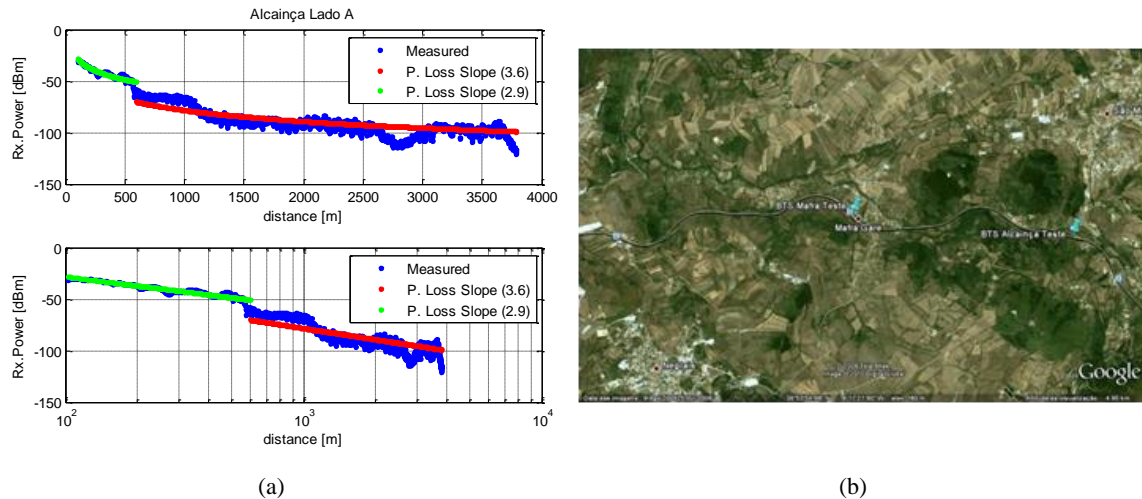


Figura 4.11 – Localização de teste da estação de Alcaíça (Lado A).

O lado B da estação, na Figura 4.12 (b), permite observar um fenómeno que se considera relevante. Existe nesta zona uma área de curvas e contra-curvas, causando um efeito de aparecimento e desaparecimento da linha de vista ao longo do percurso. Este é possível observar mais concretamente na Figura 4.12 (a) entre a distância 1.2 km e 1.7 km, onde existe uma subida da potência do sinal, correspondente a uma passagem de não linha de vista para aparecimento da mesma, ao longo de aproximadamente 500 metros.

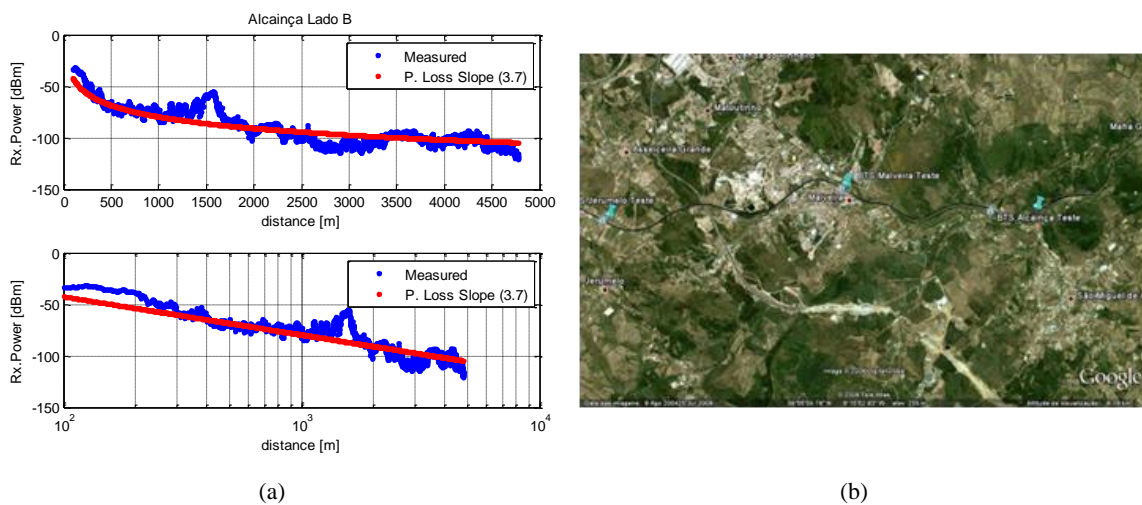


Figura 4.12 – Localização de teste da estação de Alcaíça (Lado B).

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

No que refere ao decaimento do campo para este cenário, este é possível ser caracterizado pelo valor de 3.7. Relativamente às características gerais deste troço pode-se ainda salientar que este é caracterizado por zonas abertas com subida gradual do terreno e características ondulatórias de elevação, encontrando-se a linha “escavada” relativamente ao terreno envolvente. Desta forma justifica-se o facto deste troço ter um comportamento caracterizado como ambiente do tipo denso.

4.3.3.2 Malveira

A estação da Malveira encontra-se numa zona de maior intensidade urbanística e à altitude de 227 metros relativamente a linha de água, tendo sido colocado o emissor a 16 metros relativamente ao nível da linha.

Pela análise das amostras (na Figura 4.13 (a)) pode observar-se um ponto de mudança do comportamento do sinal, que é justificada pela existência de uma curva a 400 metros da estação emissora (ver na Figura 4.13 (b)). Este facto reflecte-se na mudança do valor do decaimento de campo de 2.5 (para amostras de sinal inferiores a 400 metros da estação emissora) para 3.6 (para as restantes distâncias consideradas).

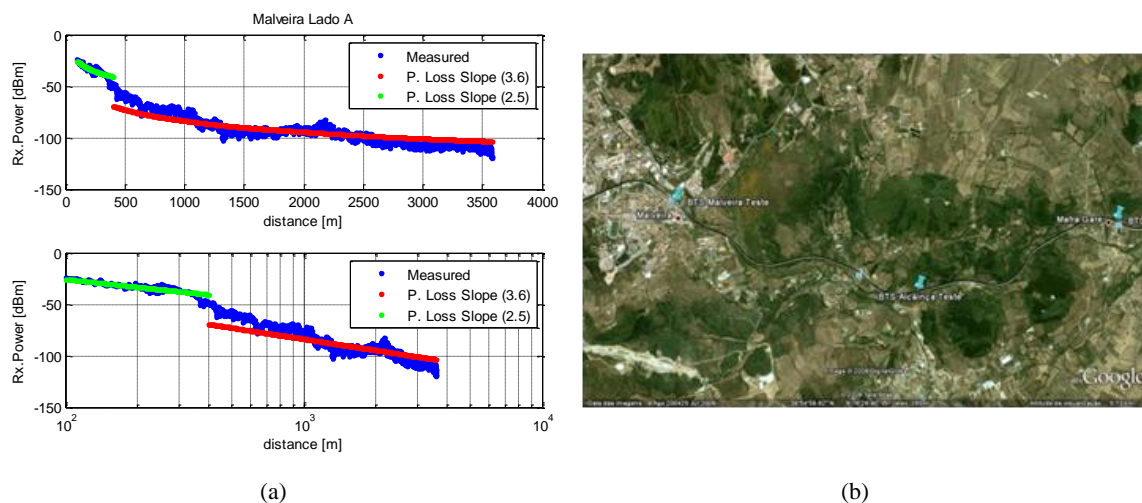


Figura 4.13 – Localização de teste da estação da Malveira (Lado A).

Para o cenário da Malveira lado B, Figura 4.14, pode-se observar que o decaimento do campo é sempre o mesmo para todas as amostras, tendo-se conseguido uma aproximação matemática das amostras obtidas, considerando um factor de decaimento de 3.9. Pode-se também concluir que o comportamento do sinal é bastante estável ao longo do percurso, este facto deve-se à subida gradual da linha de comboio relativamente à localização da estação de teste, que se encontra numa zona em que a altitude é menos elevada em relação ao resto do terreno. Devido a este facto à medida que o comboio vai avançando neste troço há uma obstrução gradual da linha de vista

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

com a estação emissora, causando a diminuição da altura efectiva da torre de teste, que se reflecte numa degradação da potência do sinal recebido. Esta zona encontra-se também rodeada de edifícios, verificando-se também alguma ondulação de elevação do terreno em determinadas regiões. Por todos os motivos referidos o tipo o ambiente envolvente desta zona tem um comportamento classificado como muito denso.

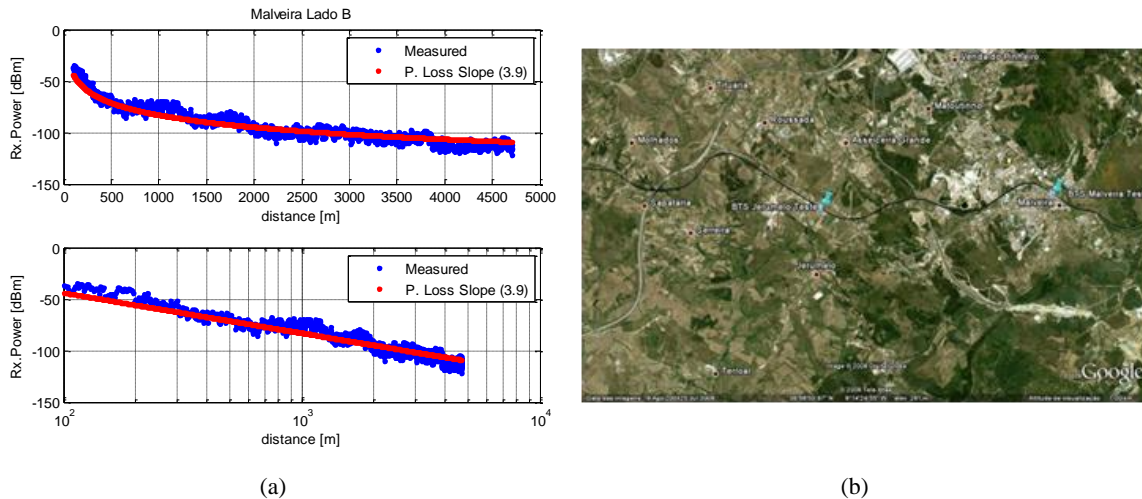


Figura 4.14 – Localização de teste da estação da Malveira (Lado B).

4.3.3.3 Decaimento do campo para cada uma das estações de teste

De forma a realizar uma análise mais aprofundada relativa aos vários testes realizados na linha do Oeste foi criada a Tabela 4.4, onde podem ser observados todos os valores de factor de decaimento do campo para as diversas situações testadas. Através da tabela referida, podendo verificar-se que o cenário em que o factor de decaimento do campo é menor é na estação de Malveira ($n=2.5$), lado A, para distâncias inferiores a 400 metros. Este facto deve-se a esta estação se encontrar numa zona que favorece a propagação do sinal devido a uma recta que possibilita a linha de vista com o receptor. Este fenómeno também se verifica nos testes realizados no apeadeiro de Zimbreira (lado A, para distâncias inferiores a 800 metros), Sabugo (lado A, para distâncias inferiores a 800 metros e lado B para distâncias inferiores a 3000 metros) e Jerumelo (Lado B, para distâncias inferiores a 1400 metros) onde igualmente existem rectas onde é facilitada a propagação do sinal rádio e o ambiente é classificado como pouco denso. Caso contrário acontece na zona envolvente ao apeadeiro da Sapataria, lado A, onde a potência do sinal tem o decaimento mais elevado de toda a linha. Este apeadeiro encontra-se numa zona em que a elevação é reduzida relativamente ao resto do troço considerado e o terreno tem uma subida com curvas que provocam uma rápida obstrução linha de vista, causando uma degradação rápida da potência do sinal recebido. O ambiente envolvente

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

a este apeadeiro é caracterizado por um valor de decaimento de campo 4, e classificado como ambiente muito denso.

Tabela 4.4 – Factores de decaimento do campo (Linha do Oeste).

Localizações	Lado A	Lado B
Meleç.	-	3.5
Sabug.(dist.<700m)	2.7	2.9
Sabug.(dist.<3000m)	3.2	
Sabug.(dist.>3000m)		3.5
P. Fur.(dist.<700m)	3.1	2.9
P. Fur.(dist.<1000m)		3.6
P. Fur.(dist.>1000m)	3.5	
Mafra.(dist.<400m)	3	3.2
Mafra.(dist.<700m)	3.8	
Mafra.(dist.>700m)		3.7
Alcai. (dist.<600m)	2.9	3.7
Alcai. (dist.>600m)	3.6	
Malv.(dist.<400m)	2.5	3.9
Malv.(dist.>400m)	3.6	
Jerum.(dist.<1000m)	3.1	2.8
Jerum.(dist.<1400m)	3.7	
Jerum.(dist.>1400m)		3.8
Sapat.(dist.<800m)	3.1	3.1
Sapat.(dist.>800m)	4	3.4
P.Neg.	3.2	3.4
Zimbr.(dist.<800m)	2.6	3.3
Zimbr.(dist.>800m)	3.4	3.7
Felit.(dist.<900m)	2.7	3.1
Felit.(dist.>900m)	3.6	3.8
D. Por.(dist.<1200)	2.9	3.1
D. Por.(dist.<2000)	3.5	3.6
D. Por.(dist.>2000)		
Runa(dist.<700m)	3.2	3
Runa(dist.<1000m)		3.8
Runa(dist.>1000m)	3.7	
T.Ved.	3.8	-

Verificou-se também que para este cenário podem ser encontrados os três tipos de ambientes definidos, muito denso, denso e pouco denso (ver Figura 4.15). Este facto deve-se não à existência de edifícios na proximidade da linha, mas sim às características muito diferenciadas do terreno. Este cenário é claramente um cenário com reduzida densidade urbanística, mas com variação de altitude e variação do declive do terreno, facto que causa variação significativa no decaimento do campo. É também importante referir que esta linha em algumas zonas se encontra rodeada de rocha, pois a mesma foi “escavada” para que fosse possível a construção da linha de comboio. Sendo assim, para este cenário existem zonas em que a propagação é facilitada pela altitude do terreno,

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

que permite a colocação do emissor num ponto mais elevado possibilitando uma área de cobertura elevada, tal como existem zonas onde devido a curvas, descida e/ou túneis a propagação do sinal é dificultada.

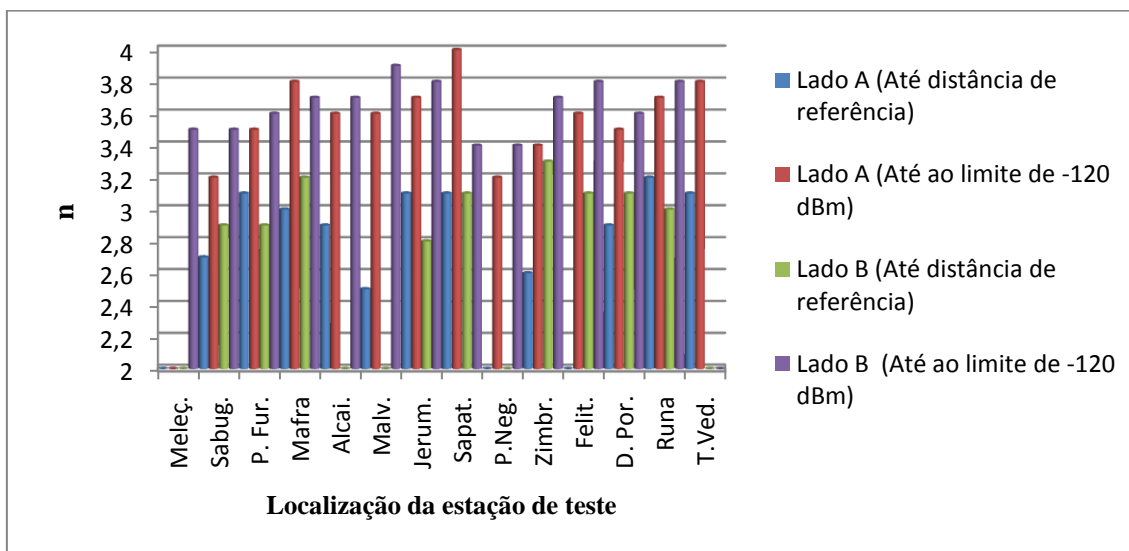


Figura 4.15 - Factores de decaimento do campo (Linha do Oeste)

Capítulo 5 - Conclusões Finais

5.1 Trabalho efectuado

Esta tese foi desenvolvida com o objectivo de estudar o comportamento rádio de duas tecnologias relativamente aos ambientes ferroviários. Desta forma foram realizadas campanhas de medidas para ambas as tecnologias, visando o estudo e recolha de conclusões relativamente a cada uma das tecnologias estudadas.

Relativamente ao WiMAX foram recolhidas cerca de 36 mil amostras de informação de nível de potência do sinal rádio e ritmos de transmissão. Estas amostras estão divididas por 4 pisos em 2 edifícios, tendo sido consideradas condições de transmissão distintas entre si, de forma a possibilitar a análise do comportamento deste tipo de sistemas relativamente a condições adversas. Desta forma este projecto permitiu dar a conhecer mais informações sobre o WiMAX e como se comporta, possibilitando a existência de um maior nível de conhecimento para futuras melhorias da tecnologia. A recolha de medidas no que refere a ambientes ferroviários não foi possível devido a limitações logísticas, pois o ISEL nem a REFER TELECOM dispõem de equipamento adequado para a realização destes mesmos testes.

Para a análise e estudo estatístico das amostras recolhidas foi utilizado o recurso à ferramenta *Matlab*, de forma a ser possível interpolar os valores e possibilitando a realização de mapas de cobertura do sinal recebido para cada local de teste, tal como o estudo da distribuição estatística do sinal.

Quanto ao sistema GSM-R pretendeu-se estudar o seu comportamento em ambientes específicos de propagação, de forma a obter um maior conhecimento desta tecnologia em condições de transmissão diversificadas. Para isto foram determinados 29 locais de teste distribuídos por três linhas ferroviárias, tendo sido realizadas no total 20 viagens de comboio entre os extremos das linhas. Estas viagens foram distribuídas pelas linhas de Cascais, Sintra e Oeste (até Torres-Vedras). Para os casos de linha de Cascais e Sintra foram utilizados os circuitos normais de circulação das mesmas. No caso da linha do Oeste foi utilizada uma carruagem específica que percorreu a linha ininterruptamente entre os dois extremos, num circuito de circulação definido especialmente para o efeito.

Capítulo 5 - Conclusões Finais

Após a recolha das medidas foi realizado um estudo com recurso, mais uma vez, a ferramenta *Matlab* onde foi possível estudar detalhadamente o comportamento do sinal ao nível do decaimento do campo electromagnético. Através deste conhecimento foram caracterizados os testes ao nível do ambiente de propagação e foram definidos alguns critérios para a caracterização de ambientes de propagação [9].

5.2 Resultados

Relativamente ao estudo do sistema WiMAX algumas conclusões já foram retiradas no Capítulo 2.

No estudo realizado no cenário do edifício C foi possível observar a variação da potência recebida ao longo dos pisos 3 e 4 do mesmo. Pode-se concluir que o factor de perda de potência por penetração do edifício é de 3 dB, tendo sido esta minimizada pela existência de várias janelas de vidro. Relativamente ao comportamento do sinal no interior do edifício, verificou-se que as localizações com linha de vista com a estação base eram beneficiadas e foi possível um bom nível de cobertura. Já em casos de obstrução da linha de vista com a estação base, verificou-se uma degradação acentuada (aproximadamente 5 dB por parede de betão). Tendo sido observado que zonas mais protegidas por paredes, em que a cobertura seria feita por reflexão de sinal apresentaram desempenhos de cobertura reduzidos, que se reflectiu em reduzidas condições e desempenho de transmissão de informação, com ritmos de transmissão inferiores a 2 Mbit/s.

Relativamente ao edifício L, verificou-se que o maior afastamento da estação base, com ausência de linha de vista com a mesma confirma a existência de problemas de cobertura para este tipo de cenários. Para este edifício verificou-se uma perda de cobertura devido as condições de propagação, reflectindo-se esse mesmo problema no desempenho em termos de ritmo de transmissão (muito raramente superior a 2 Mbit/s).

O estudo relativo à comparação entre amostras com e sem linha de vista com a estação base demonstrou que através do comportamento das amostras é possível prever através da função distribuição *T-location-scale*, sendo que o comportamento do sinal varia apenas através do desvio padrão e do parâmetro ν , que permite estender a cauda da função densidade de probabilidade da distribuição normal

Capítulo 5 - Conclusões Finais

O estudo permitiu concluir que esta tecnologia não é adequada nem preenche as características exigidas para comunicações em aplicações ferroviárias. Este facto deve-se ao nível de cobertura conseguido por este tipo de sistemas demonstrar uma grande dependência do factor linha de vista, caso que fragiliza e elimina a possibilidade de utilização neste tipo de aplicações.

O estudo realizado para o sistema GSM-R demonstrou algumas características interessantes. Visto o comportamento do sinal demonstrar alguma robustez, níveis de cobertura aceitáveis e ser uma opção bastante viável. Algumas conclusões foram já descritas no capítulo 4 de forma detalhada para cada um dos cenários estudados.

O estudo realizado abrangeu a variação do decaimento de campo nos três cenários de características distintas, tendo sido consideradas as amostras de potência até -120 dBm. Foi possível efectuar uma caracterização dos ambientes de propagação através do decaimento de campo, tendo sido definidos três tipos de ambientes (muito denso, denso e pouco denso). Através desta definição foi possível caracterizar cada um dos cenários de teste quanto ao tipo de ambiente, verificando-se que o factor linha de vista com a estação base é um factor que beneficia muito o sistema em termos de cobertura, mas que outros factores como a proximidade da água, elevação do terreno e traçado da linha podem trazer benefícios à propagação.

Foi possível concluir em todos os casos observados, que para o planeamento é de extrema importância considerar a topologia do terreno e o traçado da linha, sendo estes factores de extrema relevância na estimação da cobertura. Verificou-se também que considerando a existência de propagação do sinal de forma guiada (existência do factor ruas radiais), é possível observar que o alcance da cobertura é beneficiado. Por fim conclui-se também que a correcta decisão da localização das zonas de transição (LDA) tem um impacto valioso no planeamento de estações base.

Relativamente a cada um dos casos estudados, pode-se concluir que o cenário linha de Cascais varia entre o ambiente caracterizado como muito denso e denso, devendo-se este facto à proximidade dos edifícios à linha. Este facto provoca uma variação significativa do sinal devido a obstrução. Por outro lado, verificou-se que a proximidade com o rio tem um efeito benéfico e que apesar do problema de proximidade dos edifícios, é possível aumentar o alcance e cobertura do sistema utilizando este factor.

Capítulo 5 - Conclusões Finais

No que diz respeito ao cenário linha de Sintra, verificou-se que é tendencialmente um ambiente considerando denso. Isto deve-se ao maior afastamento dos edifícios relativamente a linha e declive do terreno não variar de forma acentuada.

Já no que refere ao caso linha do Oeste, verificou-se uma grande variação do decaimento do campo, pois esta linha encontra-se sobre um terreno que tem uma grande variação de relevo. Verificou-se que é possível obter bons níveis de cobertura em locais altos, mas que devido à variação brusca da altitude do terreno o sinal tem uma diminuição repentina, voltando por vezes a recuperar devido à recuperação da elevação. Neste caso considera-se que é necessário um planeamento e estudo mais cuidado em termos de implementação do sistema.

Como conclusão final pode-se dizer que o sistema GSM-R é o mais adequado a preencher os critérios de exigência e cobertura necessários para as comunicações e aplicações ligadas as redes ferroviárias, mesmo considerando ambientes muito diversificados.

5.3 Trabalho futuro

Relativamente à tecnologia WiMAX considera-se interessante a realização de testes utilizando a norma “E” da mesma tecnologia, de forma conhecer o seu comportamento para o mesmo tipo de condições testadas e realizar comparativos de desempenho tanto a nível do ritmo de transmissão como de cobertura.

Seria interessante também através dos dados recolhidos, o estudo de um novo modelo de propagação teórico para este tipo de ambientes (*indoor*) que permitisse uma aproximação o mais real possível da prática e do comportamento da tecnologia com base em alguns parâmetros genéricos. Como objectivo final, ser desenvolvida uma ferramenta de *software* que simulasse o comportamento do sinal para ambientes interiores.

No que diz respeito a tecnologia GSM-R, para trabalho futuro considera-se interessante recolha de mais medidas em mais linhas de forma a abranger maior diversidade de ambientes. Desta forma seria possível apurar e estudar melhor alguns efeitos e características deste tipo de ambientes para um maior conhecimento de factores característicos deste tipo de ambientes e comportamentos do sinal electromagnético.

Capítulo 5 - Conclusões Finais

Assim sendo seria possível uma melhor definição de novas regras de planeamento, mais adaptadas às características de propagação dos ambientes ferroviários.

Seria também de grande interesse a utilização do conhecimento adquirido e das conclusões recolhidas neste trabalho para a implementação de uma ferramenta de software específica para planeamento GSM-R abrangendo as características específicas dos ambientes ferroviários, exigências, características e especificidades do sistema.

Referências

- [1] Carapau, Nuno e Franco, Nuno, “*Estudo do desempenho da tecnologia WiMAX em interiores de edifícios*”, Relatório de Projecto, ISEL, Lisboa, 2007.
- [2] Airspan, *EasyST 3.5 Hardware Installation Guide*, Airspan, Cambridge House, Oxford Road.
- [3] AS-MAX, *MacroMax System OverView User’s Guide*, Airspan, Cambridge House, Oxford Road, UK.
- [4] Mendes, Maria, *Notas de Métodos Estatísticos do Mestrado Integrado em Engenharia Civil*, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2007.
- [5] UIC Project EIRENE. (2006) System Requirements Specification. [Online]. <http://www.uic.asso.fr>
- [6] ETSI, ETS 300 553 Digital cellular telecommunications system (Phase 2); layer 1. General requirements.
- [7] Cota, Nuno e Serrador, António, “*Metodologia para Planeamento Rádio em GSM-R*”, Lisboa, 2009
- [8] ROHDE&SCHWARZ, R&S®TSMU/TSMU-H Radio Network Analyzer, version 4, Outubro 2007
- [9] Cota, Nuno; Serrador, António; Franco, Nuno e Neves, José, “*Planeamento Rádio em GSM-R: Metodologia e Caracterização do Sinal*”, URSI, Lisboa, 2009

Anexo A - Ferramenta de software para recolha de medidas do sistema WiMAX

Para efectuar a aquisição de medidas de amostras de sinal da tecnologia WiMAX foi utilizada uma ferramenta de software desenvolvida no ISEL que permite a visualização e gravação em ficheiro da informação estatística recolhida do equipamento terminal. Esta ferramenta utiliza como base para os testes o protocolo FTP, a partir do qual envia e recebe ficheiros de informação, recolhendo informação entre o utilizador e a estação base, possibilitando a caracterização do desempenho do sistema. A interface gráfica da ferramenta está apresentada na Figura A. 1.

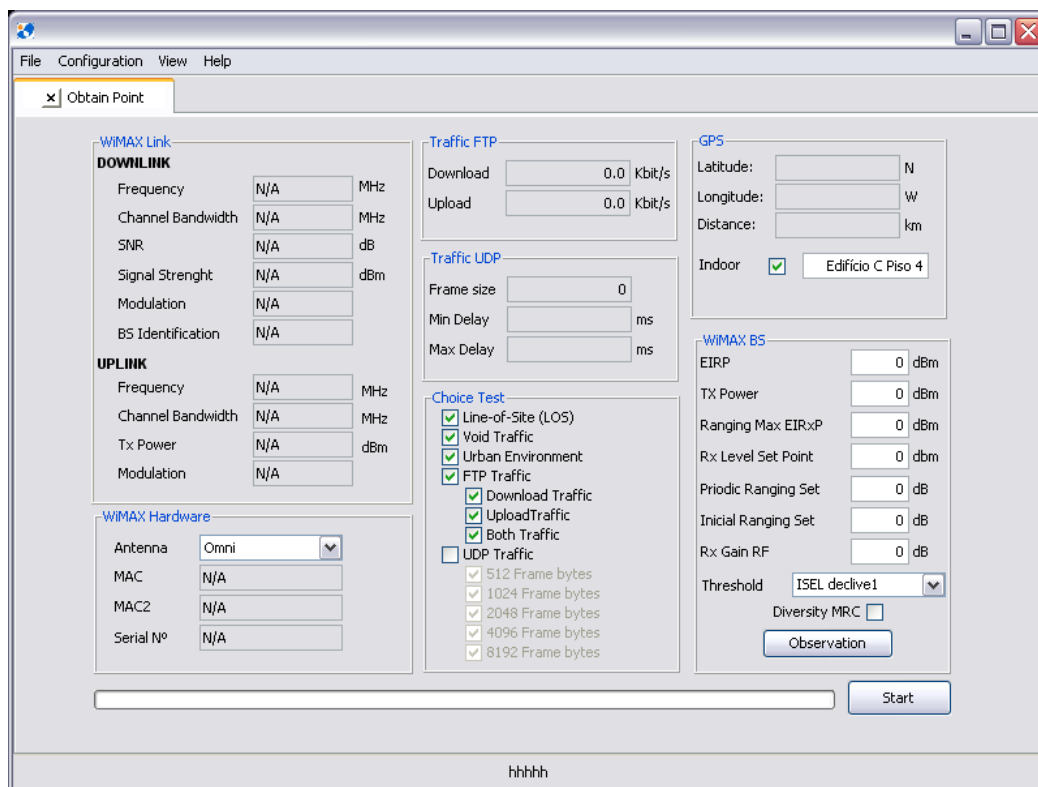


Figura A. 1 - Aplicação utilizada nas medições.

A informação recolhida em cada ponto amostrado é constituída pelos seguintes parâmetros:

- SNR (Relação sinal-ruído)
- *Signal Strength* (Potência do sinal recebida)
- *Download Modulation* (Modulação em *download*)
- *Tx Power* (Potência de emissão)
- *Upload Modulation* (Modulação em *upload*)

- *Traffic Download* (Ritmo de transmissão em *download*)
- *Traffic Upload* (Ritmo de transmissão em *upload*)

Anexo B – Cenários de Medidas

B.1 - Edifício C

Este edifício é composto por seis pisos de dimensão $50 \times 32 \text{ m}^2$, sendo dois deles abaixo do solo. Os pisos 0 a 3 são constituídos por corredores, salas de aula e gabinetes. Contendo os mesmos, janelas de vidro duplo e estores metálicos. O piso 4 é uma sala de exposições, piso amplo, sem salas, reduzido número de paredes ou qualquer tipo de obstáculos, sendo este rodeado de janelas igualmente de vidro duplo e estores metálicos. Neste piso em vários pontos existe linha de vista com a estação base, tal como acontece no piso 3 em algumas salas e corredores da zona Oeste do edifício. Nos restantes em nenhuma situação existe linha de vista.

Na Figura B.1 e Figura B.2 é possível observar as plantas do terceiro e quarto piso, respectivamente. Nestas pode-se também observar as localizações onde se realizou a recolha de amostras de sinal (pontos a vermelho e a azul).

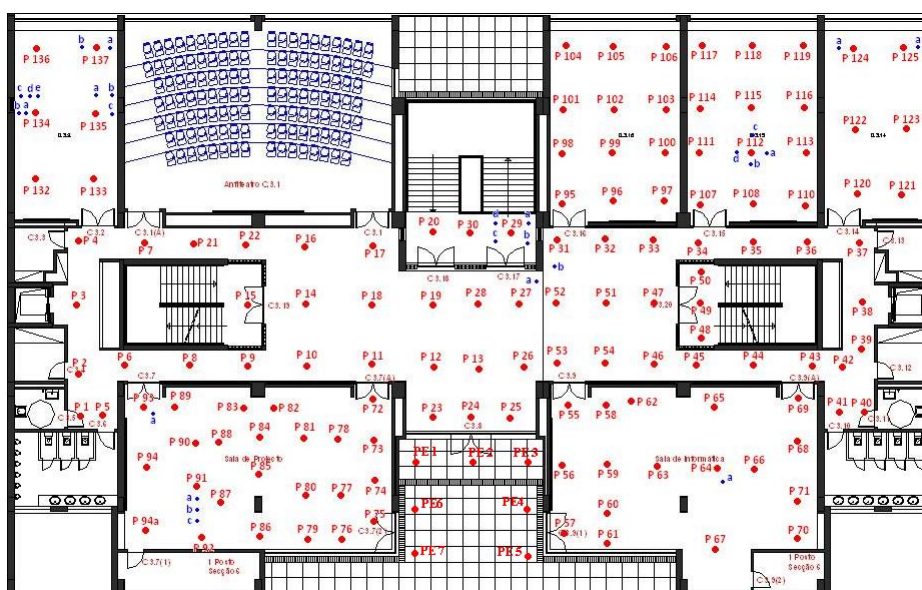


Figura B.1 - Planta do piso 3.

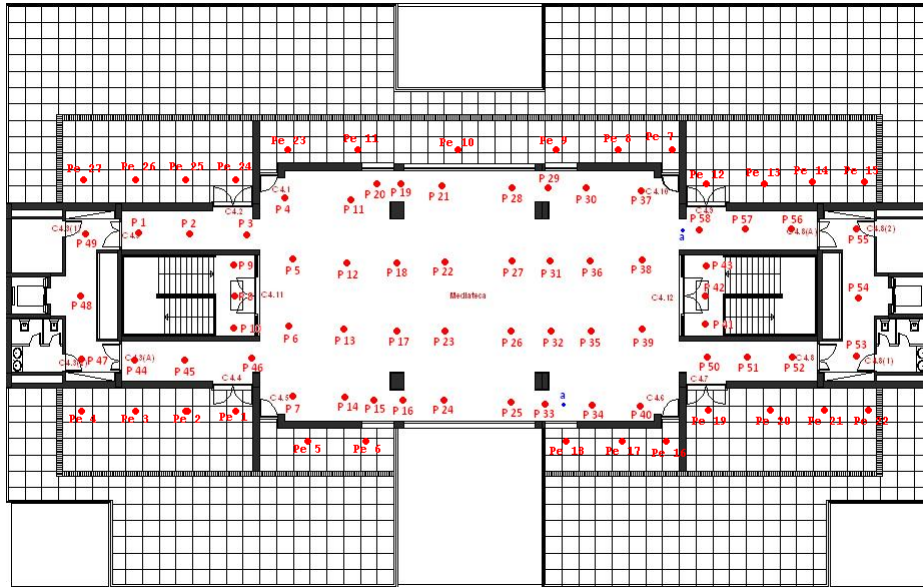


Figura B.2 - Planta do piso 4.

B.2 - Edifício L

Este edifício é composto por dois pisos de dimensão $35,8 \times 7,6 \text{ m}^2$. Sendo estes constituídos por corredores, salas de aula e salas de arrumos. Todas as janelas do edifício são de alumínio, vidro simples e estores de plástico. Na Figura B.3 e Figura B.4 pode-se observar a planta do piso 0 e piso 1, respectivamente. Os pontos assinalados a vermelho correspondem às localizações onde foram recolhidas amostras de sinal.

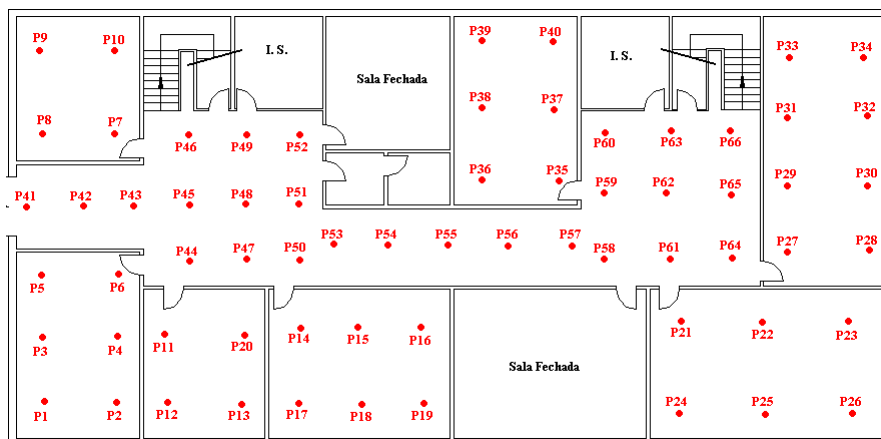


Figura B.3 – Planta do piso 0

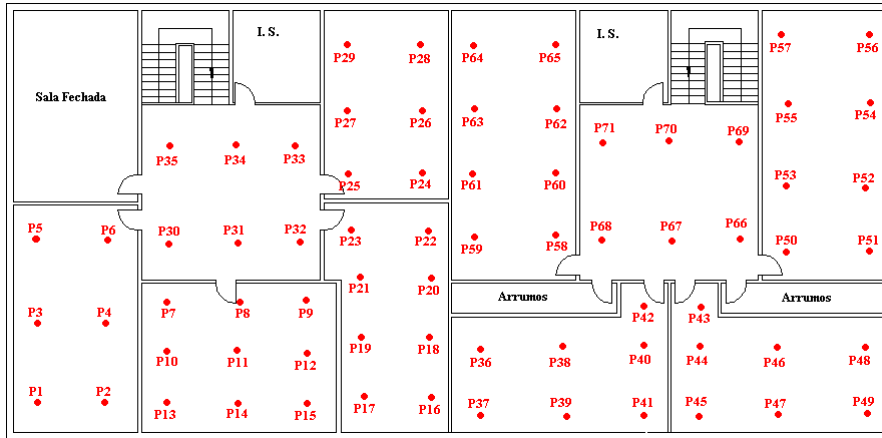


Figura B.4 – Planta do piso 1.

Anexo C – Desempenho da tecnologia WiMAX

C.1 - Edifício C

Na Figura C.1 pode-se observar a variação dos débitos obtidos no piso 4. Em a) tem-se o ritmo de transmissão só em *upload*, em b) só *download*, em c) e d) os mesmos mas em teste simultâneo.

Pode-se observar que os valores obtidos em todo o piso, em cada um dos casos são aproximadamente constantes, podendo verificar-se unicamente no caso da transmissão só em *upload* uma maior variação.

Quando a transmissão é feita apenas em *upload*, verifica-se um ritmo de transferência acima dos 6 Mbits/s, existindo uma diminuição significativa nos quadrantes superiores, esquerdo e direito, junto das paredes, devido a estas localizações estarem rodeadas de paredes onde a propagação do sinal é dificultada. No quadrante inferior pode-se observar uma redução do débito devido a existir pilares, ocultando assim a linha de vista com a estação base.

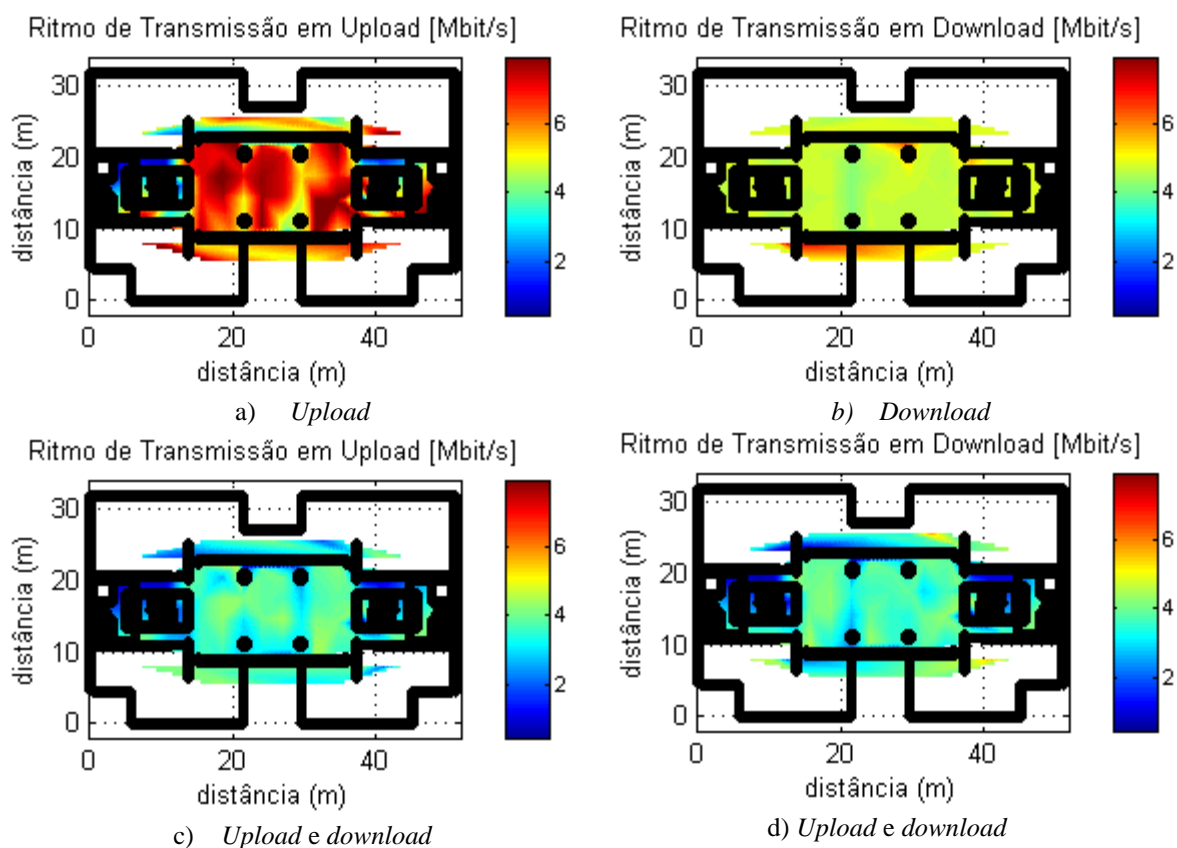


Figura C.1 - Ritmos de transmissão no piso 4.

Em relação à transmissão em simultâneo, como seria de esperar existe uma redução no ritmo de transmissão. Os ritmos variam entre os 3 e 5 Mbit/s em ambos os casos. Mais uma vez pode-se observar que as zonas em que a propagação do sinal é dificultada pela existência de paredes, há uma diminuição dos ritmos de transmissão. Este facto permite concluir há uma degradação significativa da qualidade da ligação causado pelos obstáculos, causando uma diminuição da cobertura deste tipo de sistemas, mesmo em zonas próximas da estação base.

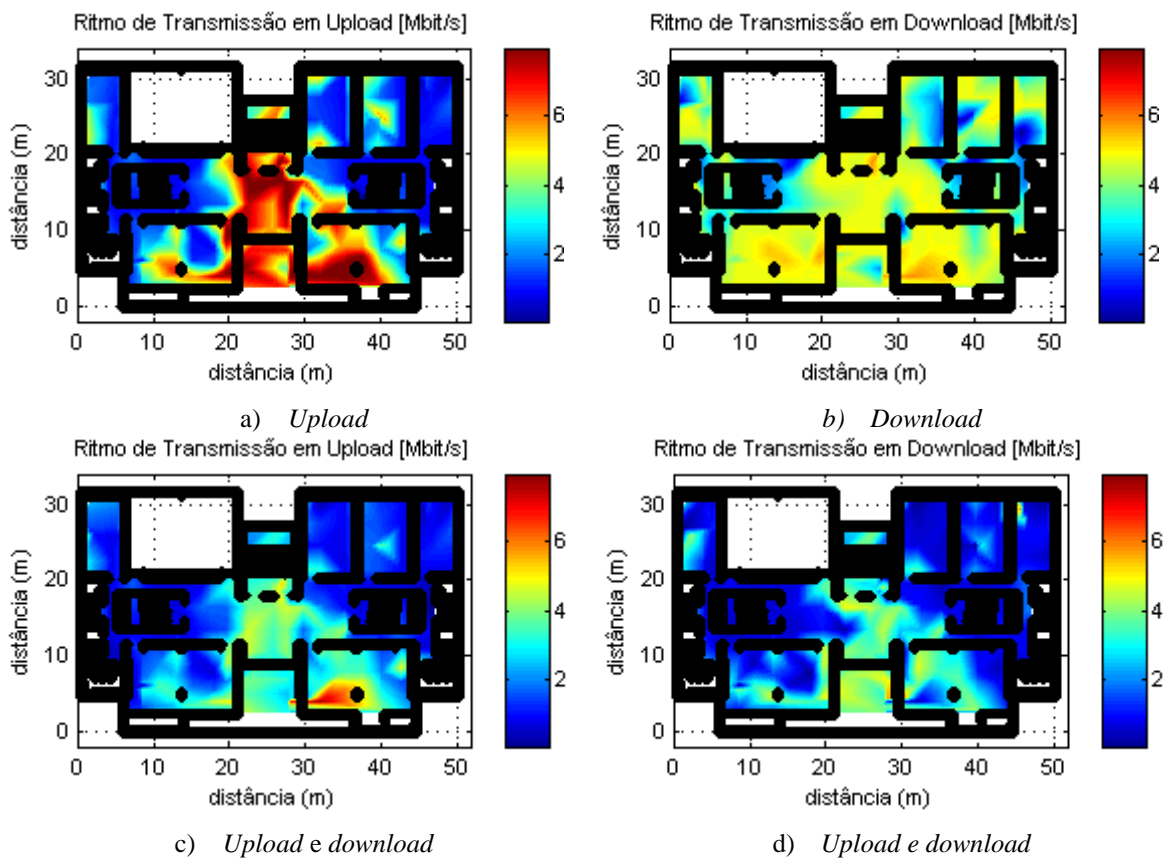


Figura C.2 - Ritmos de transmissão no piso 3.

C.2 - Edifício L

Observando a Figura C.3 pode-se constatar que para os casos de transmissão dedicada é possível maior ritmo de transmissão no caso do *download*, conseguindo-se débitos mais elevados no quadrante esquerdo, devido à maior proximidade da estação base. Neste piso observa-se uma maior degradação do sinal, visto em alguns pontos mais próximos das janelas, no quadrante inferior esquerdo, se conseguir obter valores de ritmo de transmissão elevados, mas nos restantes locais os ritmos decrescem de uma forma crítica colocando em muitos casos em risco a própria ligação. Pode-se observar também que a degradação do sinal é menos acentuada no caso de transmissão dedicada para

download, neste caso pode-se mesmo observar melhorias significativas em alguns pontos onde o mesmo não seria esperado. Em relação à transmissão em simultâneo, é de referir que os débitos conseguidos são baixos, rondando abaixo de 1Mbit/s e em escassos pontos 2 a 3 Mbit/s.

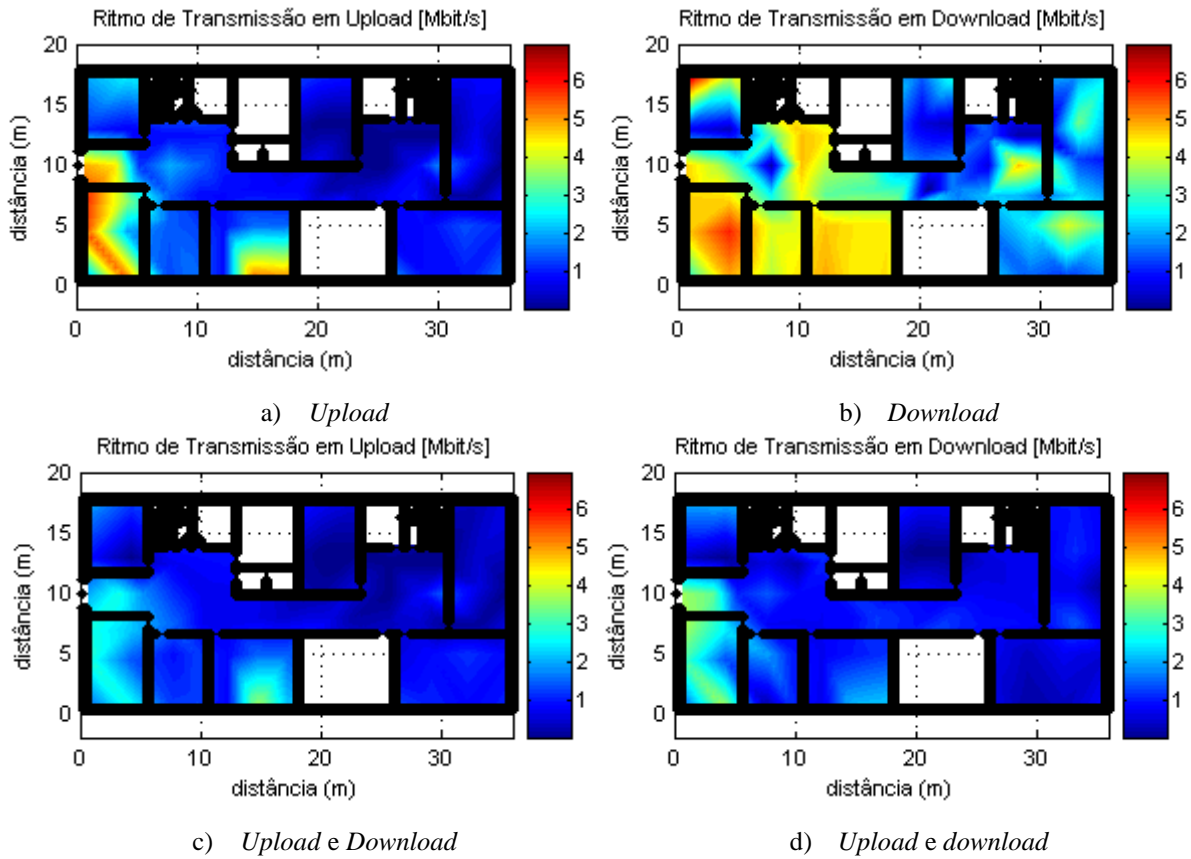


Figura C.3- Ritmos de transmissão no piso 0.

Relativamente à Figura C.4 pode-se observar que igualmente como acontece para o piso 0 o ritmo de transmissão em *downlink* é superior ao *uplink*. Verificando-se que na zona inferior do edifício é possível obter ritmos de transmissão mais elevados, comparativamente a zona superior, este facto deve-se a esta zona se encontrar mais próxima da estação base e ser através das janelas, que se encontram na zona inferior, que é efectuada a penetração do sinal neste piso. Verifica-se uma degradação do ritmo de transmissão à medida que vão aparecendo os obstáculos a propagação do sinal, podendo esse fenómeno ser observado claramente através da Figura C.4 a), onde se observa nitidamente a penetração do sinal através da janela que se encontra no sector inferior direito do edifício. Por fim mais um pormenor a salientar, como seria de esperar, neste piso verifica-se um melhor desempenho do sistema comparativamente ao piso inferior, devendo-se este facto à maior elevação desta localização.

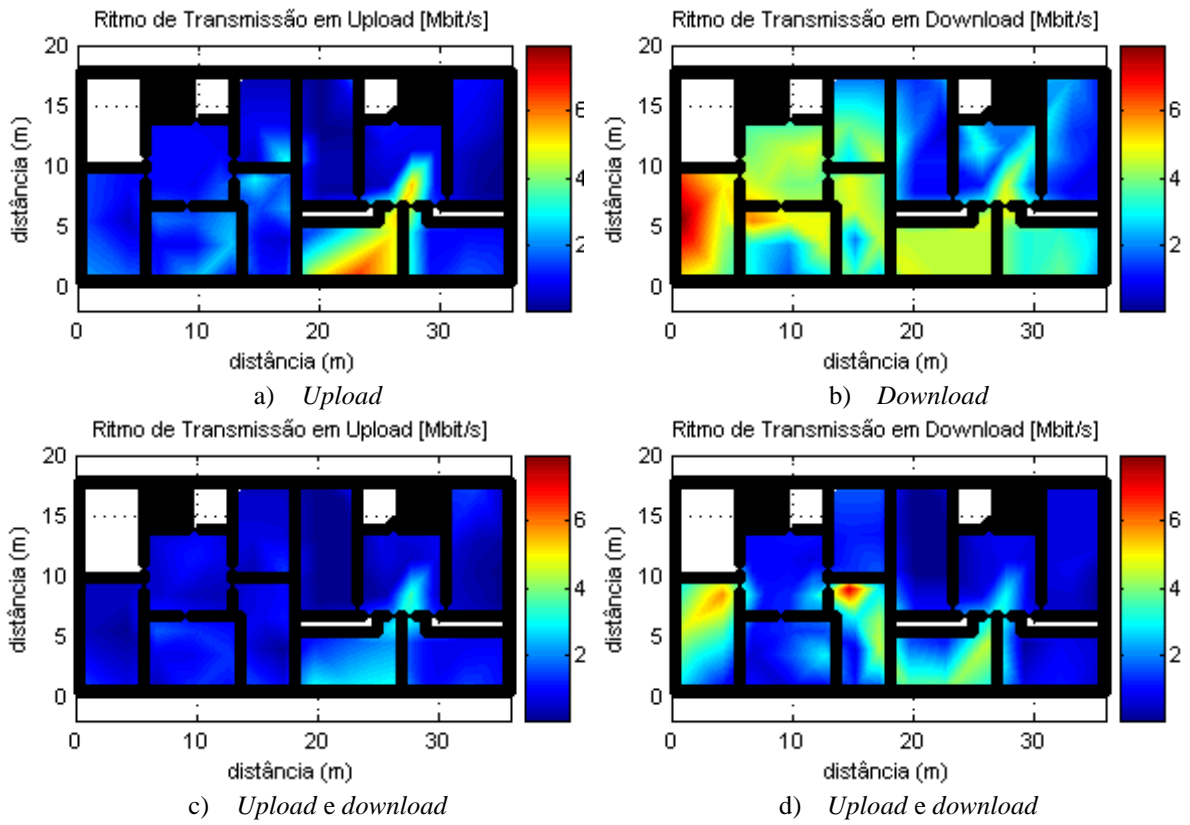


Figura C.4 - Ritmos de transmissão no piso 1.

Anexo D – Classificação do tipo de ambiente de propagação

Tabela D.1 – Classificação do tipo de ambiente

BTS	Lado considerado	<i>n</i>	linha	Tipo de ambiente	
PK 17 (distâncias > 1500m)	B	4,5	Cascais	Muito Denso	
PK 17 (distâncias <1500m)	B	4,3			
Paço Arcos (16 m)	B	4,2			
Paço Arcos (16 m) (distancias <1000m)	A	4,2			
PK 17	A	4,1			
Carcavelos (distancias > 1000m)	B	4,1			
Estoril	A	4,1			
Caxias (distancias <1000m)	A	4,1			
Paço Arcos (24 m) (distancias <1000m)	A	4,1			
Paço Arcos (24 m) (distancias <2000m)	B	4,1			
S. João	A	4,0			
Barcarena	B	4,0			
Sapataria	A	4,0			Oeste
Paço Arcos (24 m) (distancias > 1000m)	B	3,9			Cascais
Cruz de Pedra	B	3,9	Sintra		
Mira Sintra	B	3,9			
Sintra	-	3,9			
Malveira	B	3,9	Oeste		
Alcântara	A	3,8	Cascais	Denso	
Benfica	A	3,8	Sintra		
Mafra	A	3,8	Oeste		
Jerumelo (distâncias > 1400m)	B	3,8			
Feliteira	B	3,8			
Runa	B	3,8			
Torres Vedras	A	3,8			
Algés	A	3,7	Cascais		
Caxias	B	3,7			
Cruz de Pedra	A	3,7	Oeste		
Amadora	A	3,7	Sintra		

Barcarena (distâncias > 1000m)	A	3,7		Denso
Mira Sintra	A	3,7		
Mercês	A	3,7		
Mafra	B	3,7	Oeste	
Alcainça	B	3,7		
Jerumelo (distâncias > 1000m)	A	3,7		
Zimbreira	B	3,7		
Runa (distâncias > 1000m)	A	3,7		
Carcavelos	A	3,6	Cascais	
S. João	B	3,6		
Mercês	B	3,6	Sintra	
Pedra Furada	B	3,6	Oeste	
Alcainça	A	3,6		
Malveira (distâncias > 400m)	A	3,6		
Feliteira	A	3,6		
Dois Portos (distâncias > 2000m)	B	3,6		
Alcântara	B	3,5	Cascais	
Paço Arcos (16 m) (distâncias > 1000m)	A	3,5		
Benfica	B	3,5	Sintra	
Amadora	B	3,5		
Meleçês	-	3,5	Oeste	
Sabugo (distâncias > 3000m)	B	3,5		
Pedra Furada (distâncias > 1000m)	A	3,5		
Dois Portos (distâncias > 1200m)	A	3,5		
Carcavelos (distâncias < 1000m)	B	3,5		
Caxias (distâncias > 1000m)	A	3,4	Cascais	
Sapataria	B	3,4	Oeste	
Pêro Negro	B	3,4		
Zimbreira	A	3,4		
Paço Arcos (24 m) (distâncias > 1000m)	A	3,3	Cascais	
Algés	B	3,2	Oeste	
Sabugo	A	3,2		
Pêro Negro	A	3,2		
Runa (distâncias < 1000m)	A	3,2		
Estoril	B	3,1	Cascais	

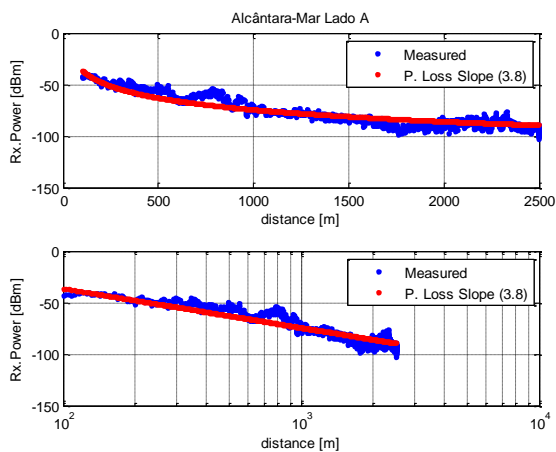
Mira Sintra	A	3,1	Sintra	Denso	
Pedra Furada (distâncias <1000m)	A	3,1	Oeste		
Jerumelo (distâncias <1000m)	A	3,1			
Dois Portos (distâncias <2000m)	B	3,1			
Sabugo (distâncias <3000m)	B	2,9			
Dois Portos (distâncias <1200m)	A	2,9			
Jerumelo (distâncias <1400m)	B	2,8	Sintra	Pouco Denso	
Barcarena (distâncias <1000m)	A	2,7			
Malveira (distâncias <400m)	A	2,5			Oeste

Anexo E – Estudo do decaimento de campo electromagnético

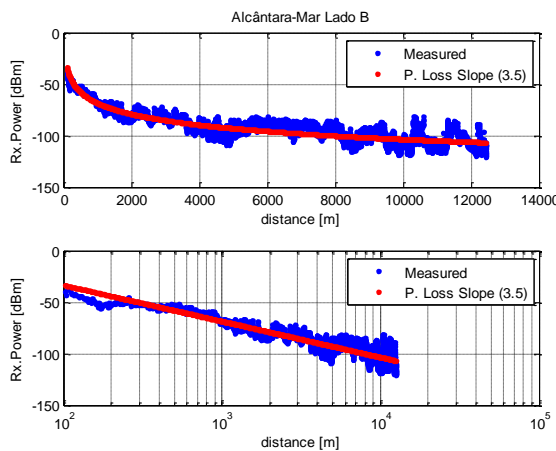
E.1 Linha de Cascais

Alcântara-Mar

Para o teste efectuado em Alcântara-Mar foi utilizada a torre já existente para o sistema analógico, com altura de 18 metros. Observando a Figura E.1 (a) pode-se concluir que através desta estação é possível cobrir a estação do Cais-Sodré, que se encontra a 2.5 km desta localização (Figura E.1 (b)). De referir ainda que é possível observar uma pequena influência da reflexão do sinal na água na zona próxima da estação do Cais-Sodré, concretamente nas amostras a partir de 2 km da estação de teste. Por fim pode-se concluir que utilizando um factor de decaimento do campo de 3.8 é possível caracterizar o comportamento das amostras recolhidas relativamente ao lado A.



(a) (b)
Figura E.1 – Localização de teste da estação de Alcântara (Lado A).



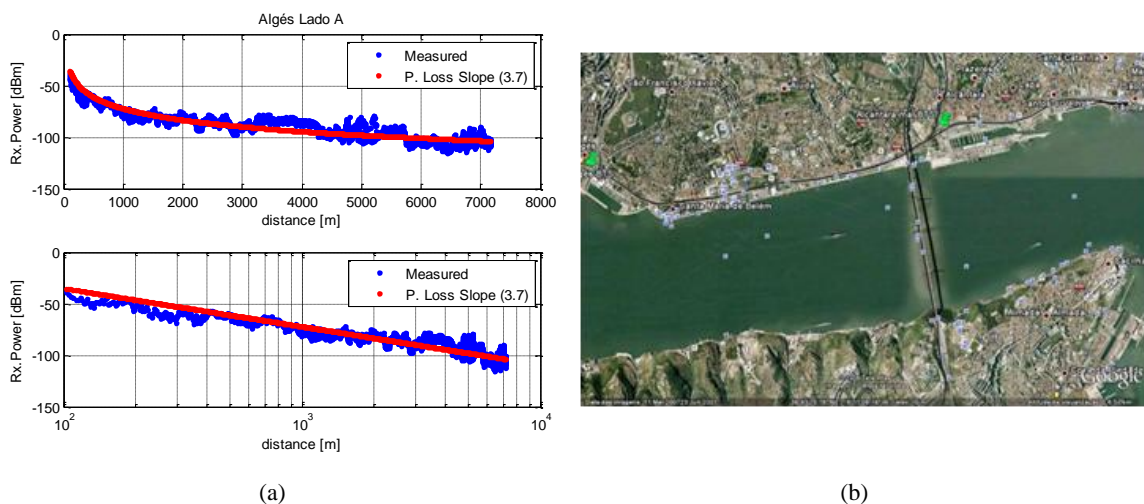
(a) (b)
Figura E.2 – Localização de testa da Estação de Alcântara (Lado B).

Relativamente ao lado B, o decaimento do campo electromagnético é de 3.5. Através da Figura E.2 (a), pode-se também observar que devido à influência do rio (pela Figura E.2 (b)) na propagação do sinal é possível um elevado nível de cobertura através desta estação de teste, permitindo obter amostras válidas até aos 12 km da estação base.

Algés

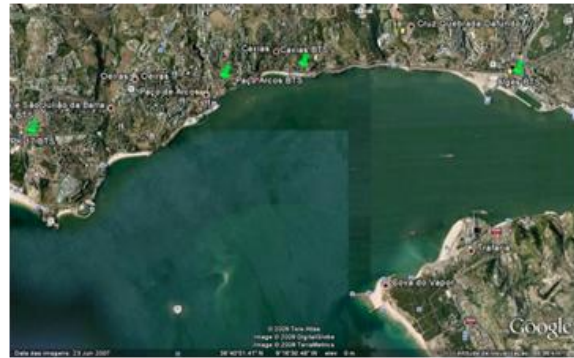
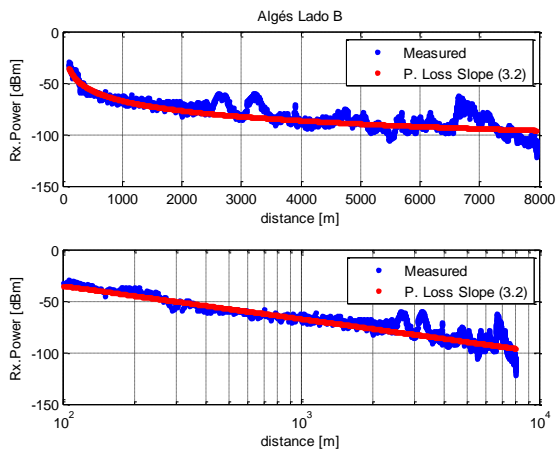
Para este teste foi utilizado um mastro que permitiu que o emissor fosse colocado a 16 metros do nível do solo, localizado na estação de comboio de Algés.

No cenário de Algés, representado na Figura E.3 e Figura E.4 podemos observar que é possível uma adaptação quase perfeita das amostras, utilizando um factor de decaimento do campo de 3.7 e 3.2, respectivamente para o lado A (na Figura E.3) e B (na Figura E.4). Relativamente ao tipo de ambiente envolvente deste cenário é classificado como denso para ambos os lados. Este facto observa-se de forma mais acentuada ao observar o lado A, visto a linha de vista com a estação de teste ser obstruída pelos edifícios, que nesta zona se encontram a entre os 20 a 60 metros do limite da linha de comboio.



(a) (b)
Figura E.3 – Localização de teste na estação de Algés (Lado A).

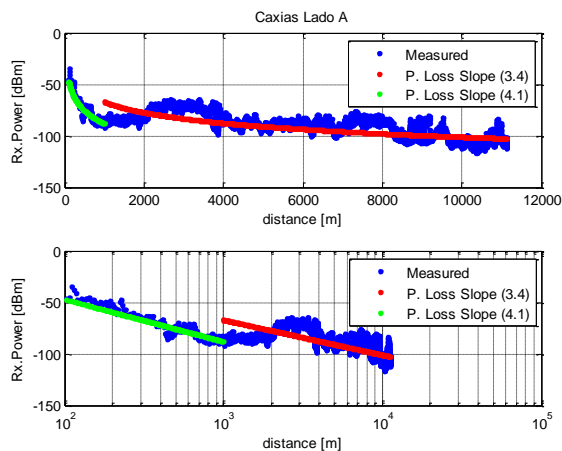
Relativamente ao lado B, na Figura E.4 (a), pode-se observar um fenómeno relevante, entre o quilómetro dois e três e aproximadamente no quilómetro sete existe uma pequenas melhorias da potência do sinal, este facto deve-se à propagação do sinal nestas zonas beneficiar do efeito reflectivo da água do rio.



(a) (b)
Figura E.4 – Localização de teste na estação de Algés (Lado B).

Caxias

Para esta localização a torre utilizada tinha uma altura de 16 metros, tendo sido colocada dentro do espaço da estação de comboio. Neste cenário foi considerado relevante a apresentação das amostras referentes ao lado A, pois apenas este apresenta algumas características relevantes para o estudo.



(a) (b)
Figura E.5 – Localização de teste da Estação de Caxias (Lado A).

É possível observar através da Figura E.5 (a) uma mudança de meio à distância de 1 km do emissor. Este fenómeno acontece devido à influência do rio (como se pode observar pela Figura E.5 (b)), que se encontra muito próximo da linha, fazendo com que o sinal a partir desta zona recupere. Este fenómeno acontece devido ao efeito reflectivo da água, passando assim a existir uma recuperação da potência do sinal devido à reflexão do sinal. Este facto permitiu alargar as amostras válidas até a distância de 11 km da estação de teste. No que diz respeito ao factor de decaimento do campo, verificou-se que considerando apenas as amostras até ao primeiro quilómetro, o seu valor é 4.1, e é

justificado pelo facto de nesta zona existir uma curva seguida de uma contra-curva em simultâneo com a proximidade de edifícios a cerca de 20 a 30 metros da linha do comboio, encontrando-se a estação de teste numa zona de elevação reduzida. A recuperação do decaimento de campo a partir desta distância é justificada pelo efeito reflectivo da água a cerca de 1500 metros da estação emissora, possibilitando uma degradação mais lenta do sinal para um factor de decaimento do campo de 3.4. Assim sendo o ambiente envolvente deste cenário varia entre muito denso (primeiros 1000 metros da estação emissora) e o denso (distâncias restantes consideradas).

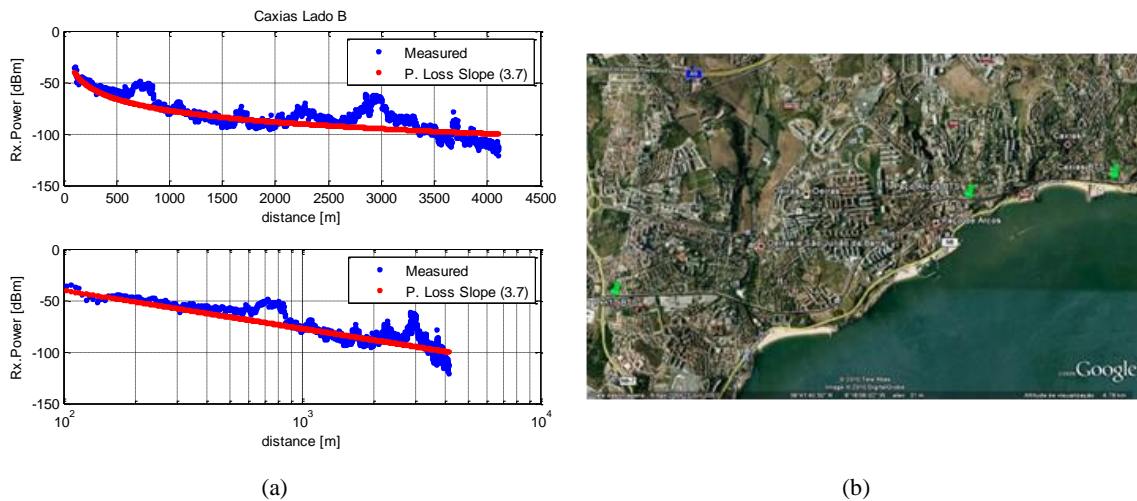


Figura E.6 – Localização de teste da Estação de Caxias (Lado B).

Observando a Figura E.6, pode-se presenciar a variação da potência recebida, podendo observar-se três zonas onde há uma recuperação do sinal recebido (700 metros, 2.2 km e 2.9 km) zonas coincidentes com atravessamento de água no percurso de propagação. Relativamente ao decaimento do campo electromagnético pode-se observar que toma o valor 3.7, sendo o ambiente classificado como denso. A principal fonte de obstrução nesta zona é a vegetação e a proximidade dos edifícios na zona que se encontram a uma distância de aproximadamente 20 metros.

Paço Arcos

Na situação de teste com um emissor em Paço Arcos, foram efectuadas medidas com duas alturas de mastro, a 16 metros e a 24 metros, de forma a obter conclusões relativas ao comportamento do sinal para as diferentes alturas.

Na Figura E.7 (a) (lado A da estação) pode-se observar que até à distância de 1 km da estação de teste se verifica um decaimento do campo de 4.1. Após este ponto há uma subida da potência do sinal devido à propagação do sinal ser feita com a influência da

água do rio, como se pode confirmar pela Figura E.7 (b), facilitando propagação do sinal nesta zona.

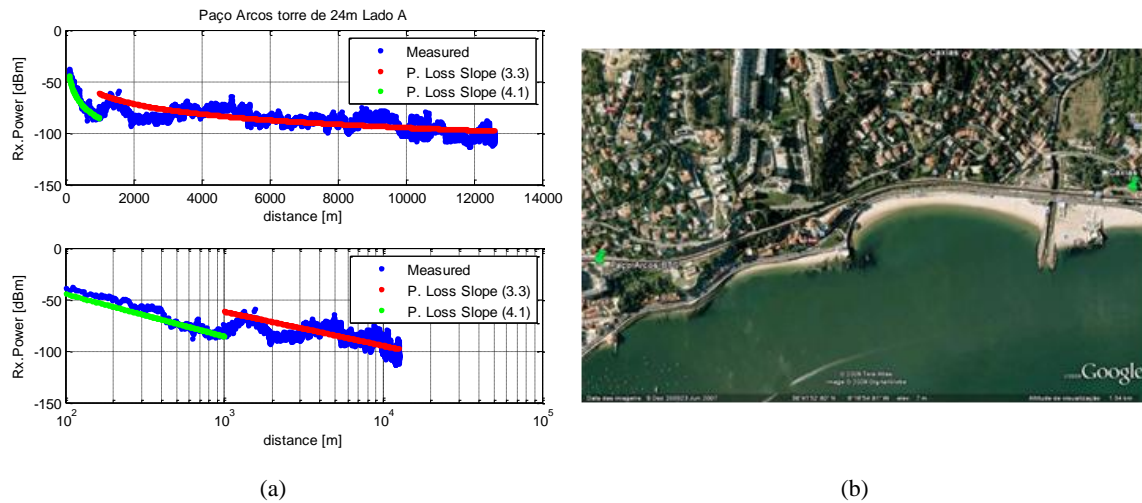


Figura E.7 – Localização de teste da estac o de Paço Arcos, utilizando um mastro de 24 metros (Lado A).

Considerando todas as amostras até ao valor de potência de -120 dBm podemos observar que o decaimento do campo passa a ser de 3.3, podendo concluir-se que o ambiente de propagação presente nesta zona, pode ser caracterizado como denso. De referir ainda que o facto de terem sido conseguidas amostras válidas até aproximadamente 12 km da estac o de teste, deve-se este fenomeno a reflexão do sinal na água do rio, já referido.

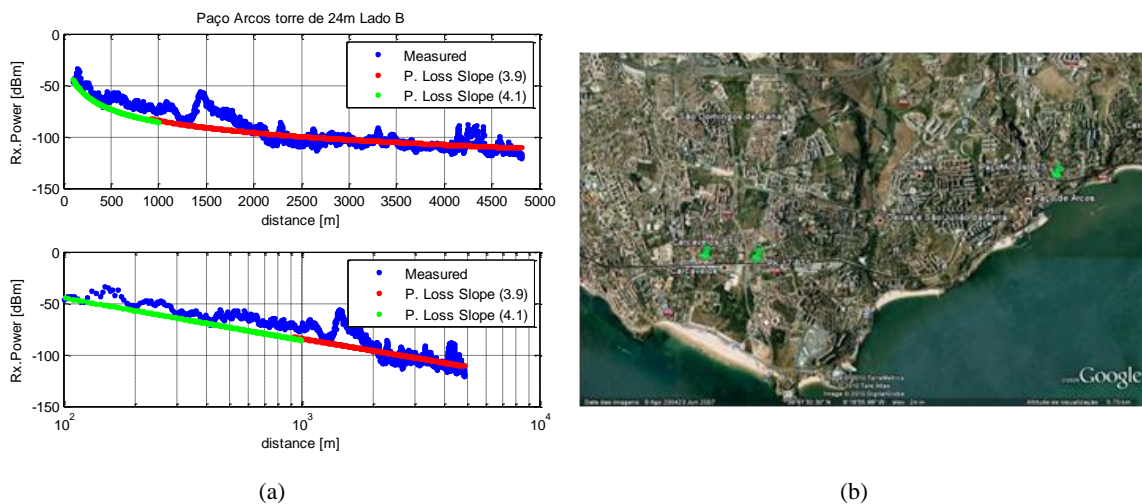


Figura E.8 – Localização de teste da estac o de Paço Arcos, utilizando um mastro de 24 metros (Lado B).

Pela Figura E.8 pode-se observar ao quilometro 1.5 uma recuperação do sinal. Devido ao facto de não haver atravessamento do sinal pela água, considera-se que esta recuperação do sinal  provocada pelo aparecimento de linha de vista com a estac o base. No que refere ao decaimento do campo pode ser definido pelo valor 3.9 para os

primeiros mil metros da estação base e 4.1 para as restantes distancias consideradas válidas.

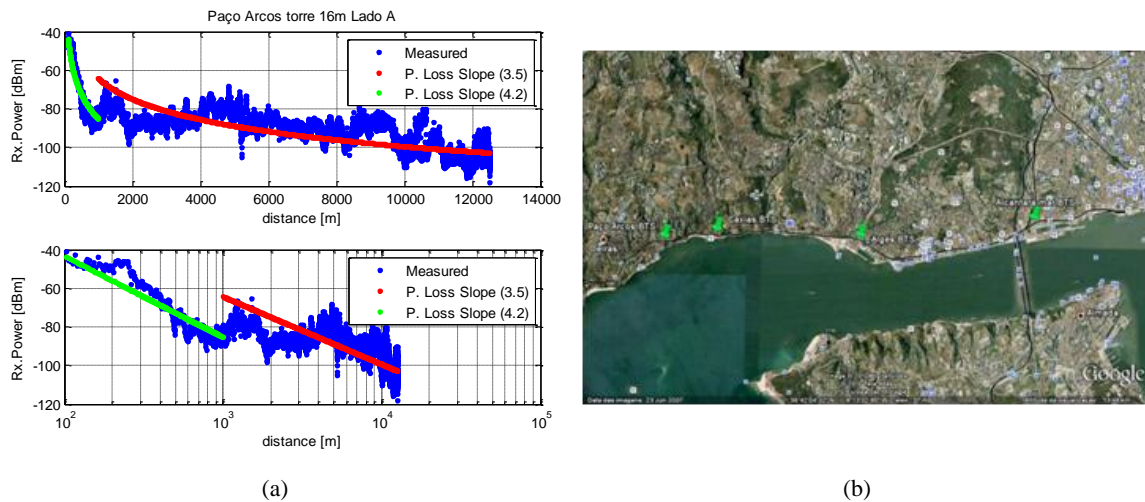


Figura E.9 – Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 16 metros (Lado A).

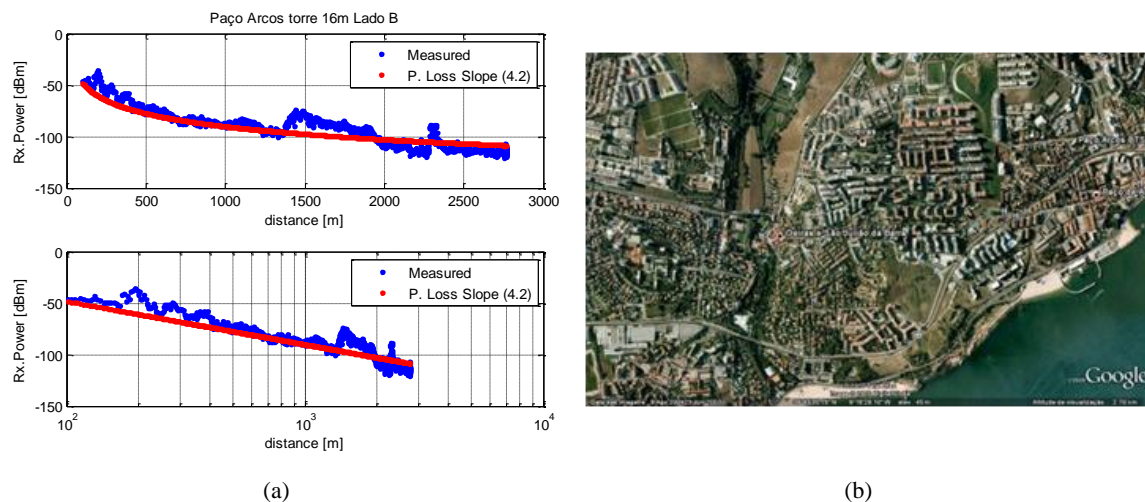


Figura E.10 - Localização de teste da estação de Paço Arcos, utilizando um mastro de 16 metros (Lado B).

Observando a Figura E.9 e Figura E.10 pode-se observar o mesmo comportamento e conclusões obtidos na Figura E.7 e Figura E.8 respectivamente, podendo concluir-se que há uma subida do decaimento do campo, e uma redução da área de cobertura com a diminuição altura do mastro, como seria de esperar. Para o lado A a subida do decaimento do campo para as amostras de distancia inferior a mil metros é de 0.2, sendo para as restantes amostras de 0.1. No que refere ao lado B da estação de teste, pode-se observar uma subida do decaimento do campo de 0.1.

Carcavelos

No teste realizado na estação de Carcavelos, foi colocado o emissor à altura de 24 metros utilizando uma torre localizada no interior da estação de comboio.

Na Figura E.11, pode observar-se o lado A desta localização de teste, em que o decaimento do campo é de 3.6, onde se pode verificar que há um elevado alcance do sinal, facto que se deve a este local se encontrar numa zona mais elevada do terreno e a proximidade da água ter um efeito benéfico na propagação do sinal. O ambiente neste local é classificado como denso, apesar de se verificar uma grande proximidade dos edifícios relativamente ao limite da linha (20 metros do limite da linha). Podendo afirmar-se neste caso que a degradação provocada pela proximidade dos edifícios é compensada pelo efeito reflectivo da água do rio.

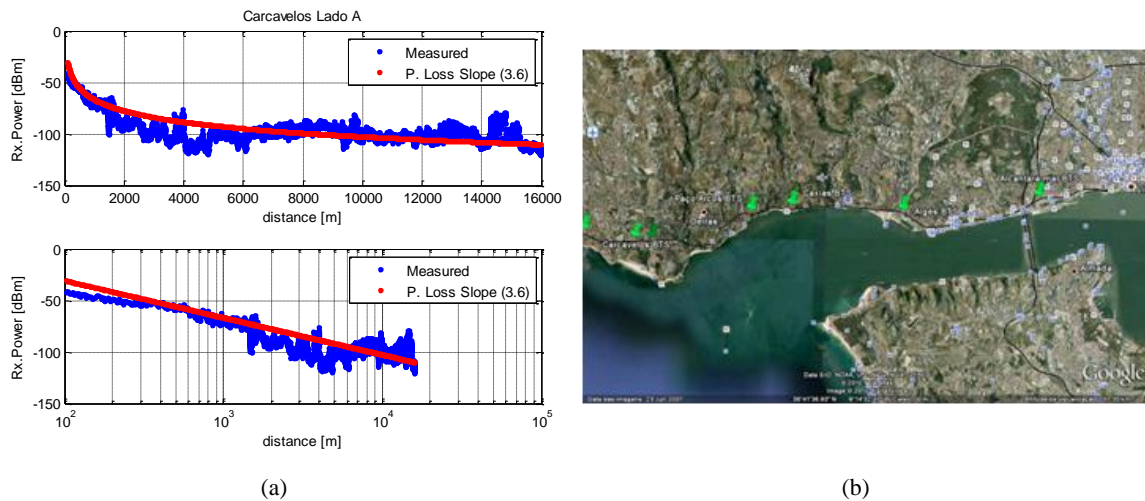
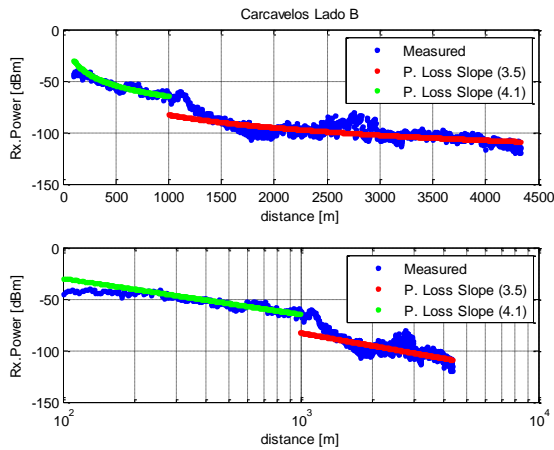


Figura E.11 - Localização de teste da estação de Carcavelos (Lado A).

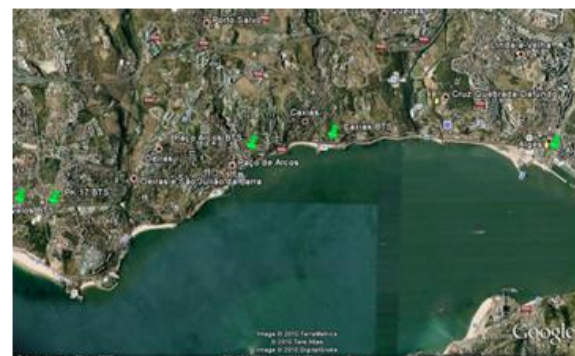
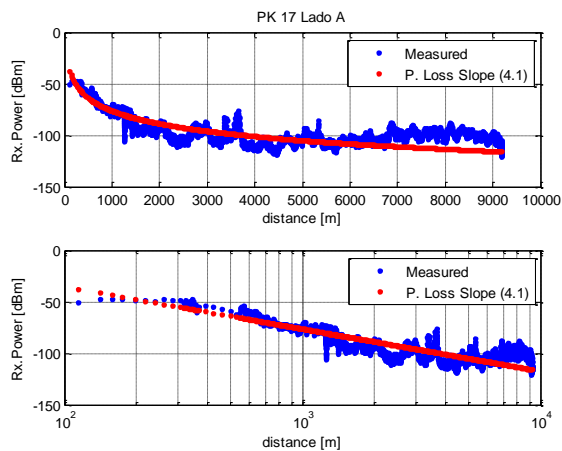
Relativamente ao lado B (Figura E.12), deste cenário de teste é possível observar um ponto de mudança do comportamento do sinal à distância de 1 km da estação emissora, este ponto de mudança deve-se a existência de uma curva a esta distância, como se pode observar pela Figura E.12 (b). Observando de forma detalhada a cartografia do terreno pode-se observar a existência de uma recta de 1km seguida de uma curva que provoca uma perda da linha de vista com a estação de teste, passando a existir obstrução devido à proximidade dos edifícios da linha, que neste troço se encontram a cerca de 20 metros do limite da linha. Assim sendo até ao primeiro quilometro o factor decaimento do campo mais aproximado é de 3.5, passando para o valor de 4.1 para distâncias superiores a 1 km. Esta mudança de factor de decaimento, reflecte-se numa passagem de ambiente denso para muito denso.



(a) (b)
Figura E.12 – Localização de teste da estação de Carcavelos (Lado B).

PK 17

A localização PK17, foi definida pela REFER TELECOM como uma localização importante para teste, visto esta zona ser onde o LDA será colocado, de forma a dividir a linha de Cascais em duas zonas de domínio independente. Nesta localização foi utilizada uma torre de teste de 16 metros. Através da Figura E.13, pode-se observar que é possível definir um decaimento do campo de 4.1 para o lado A, havendo alguns picos de nível de potência em determinados pontos do percurso, nomeadamente a 3.5 km e 5.2 km da estação. Na localização que dista 3.5 km da estação o pico deve-se a uma zona onde existirá linha de vista com a estação de teste durante poucos metros. No que diz respeito à localização a 5.2 km da estação, este pico deve-se a uma zona com influência do efeito reflectivo da água. Relativamente ao tipo de ambiente, este é classificado como muito denso.



(a) (b)
Figura E.13 - Localização de teste da estação do PK17 (Lado A).

No que refere ao lado B da estação, Figura E.14, pode-se observar dois decaimentos do campo diferentes, um para os primeiros 1500 metros da estação, em que n é 4.5 e para as restantes amostras, em que n é 4.3, verificando-se esta variação devido à existência de uma curva à distância referida. Estando esta zona rodeada de algumas casa a existência deste curva vai provocar obstrução na propagação do sinal, causando assim uma pequena subida do decaimento de campo. Devido à proximidade existente dos edifícios nesta zona verifica-se que o ambiente é do tipo muito denso.

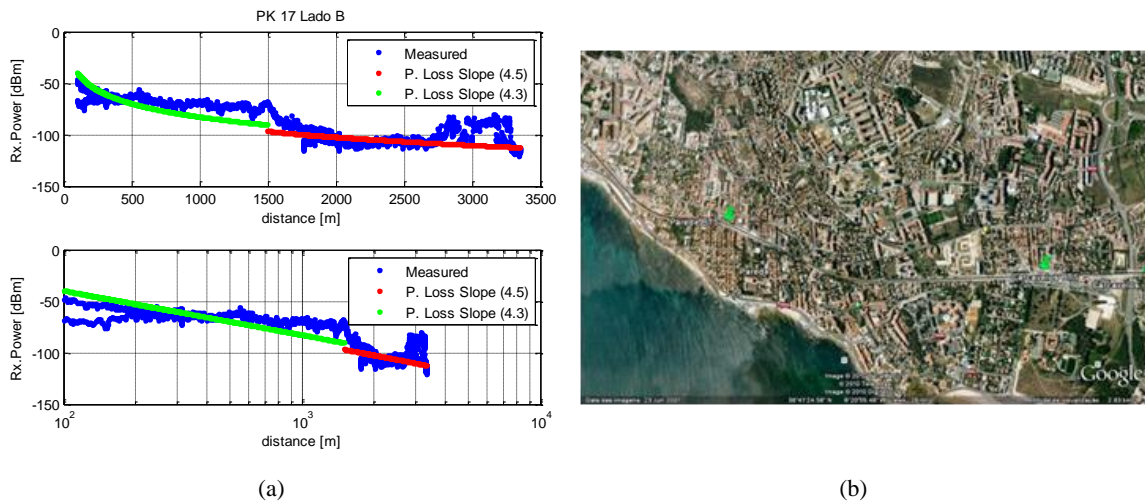


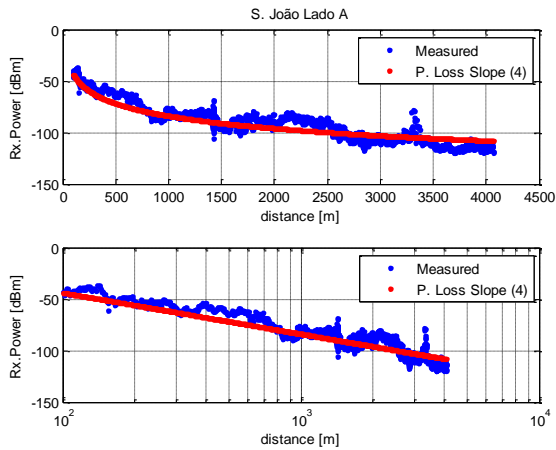
Figura E.14 - Localização de teste da estação do PK17 (Lado B).

S. João

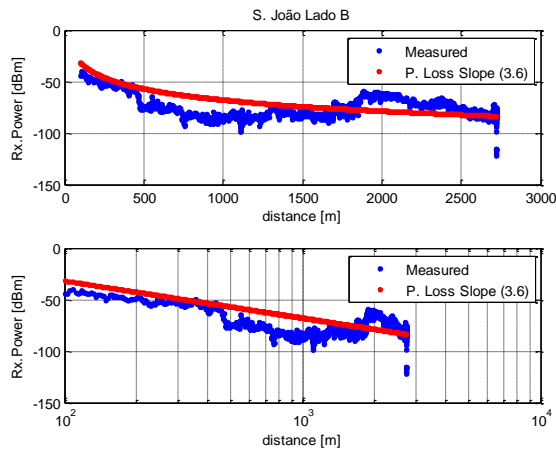
Na estação de S. João foi utilizada uma torre de 16 metros, colocada nas imediações da estação de comboio da linha. Neste cenário de teste é possível caracterizar o ambiente de propagação através da utilização de um factor de decaimento do campo de 4 para o lado A (na Figura E.15) e de 3.6 para o lado B (na Figura E.16).

O ambiente do lado A é caracterizado por proximidade de edifícios que provocam obstrução à propagação, visto estes se encontrarem a cerca de 20 metros relativamente a localização da linha, fazendo com que este ambiente seja caracterizado como muito denso.

Pela observação da Figura E.16 (b), pode-se concluir que é possível efectuar a cobertura da estação de Cascais, utilizando esta localização. Este facto deve-se às características do terreno, isto é, a propagação é feita através do atravessamento da baía de Cascais, facto que faz com que apesar da proximidade dos edifícios relativamente à linha seja compensado com a recuperação da potência do sinal devido ao efeito reflectivo da água. Este ambiente é classificado como ambiente denso.



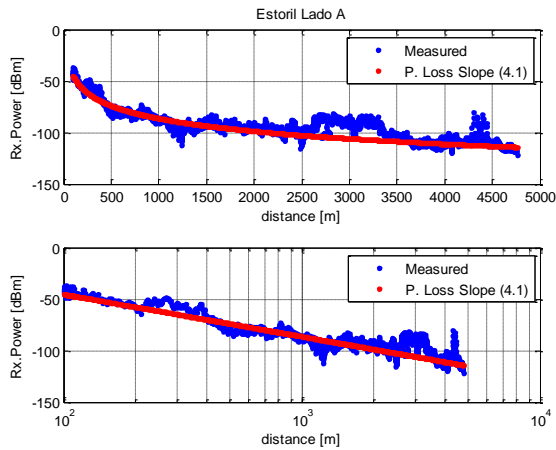
(a) (b)
Figura E.15 – Localização de teste da estação de S. João (Lado A).



(a) (b)
Figura E.16 – Localização de teste da estação de S. João (Lado B).

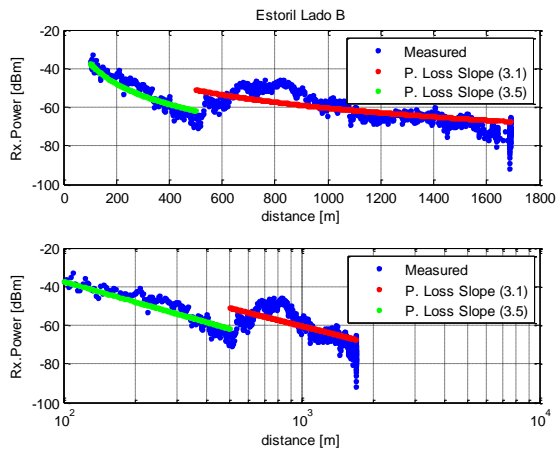
Estoril

Na estação de comboio do Estoril, foi utilizada uma torre de 16 metros. Para esta localização é possível demonstrar a presença de um ambiente de propagação considerado muito denso de factor de decaimento do campo electromagnético de 4.1 (ver Figura E.17). Neste cenário é possível também observar alguma influência causada pela reflexão do sinal na água do rio, concretamente entre os 2.5 km e os 3.5 km e novamente no que refere a proximidade do quilómetro 4.3, onde é existe uma recuperação da potência recebida pelo terminal receptor.



(a) (b)
Figura E.17 – Localização da estação de teste do Estoril (Lado A).

No lado B (Figura E.18), pode-se observar que há a mudança das características do canal rádio a partir da distância de 500 metros, esta mudança deve-se a uma zona onde o sinal atravessa a água do rio (baía de Cascais), havendo uma melhoria do sinal devido à reflexão das ondas electromagnéticas na água do rio. Até aos 500 metros da estação as amostras de sinal têm assim um decaimento do campo de 3.5 sendo que quando consideradas as amostras até ao fim da linha, o factor de decaimento do campo mais adequado para caracterizar o ambiente de propagação é de 3.1. Esta diminuição do factor de decaimento do campo electromagnético, consiste na recuperação causada pelo atravessamento da água no percurso de propagação. Sendo este cenário classificado com ambiente denso.



(a) (b)
Figura E.18 – Localização de teste da estação do Estoril (Lado B).

E.2 Linha de Sintra

Cruz de Pedra (PK 4.4)

A localização desta estação permitiu estudar se é possível a cobertura de toda a linha até ao túnel do Rossio, de forma a futuramente ser possível a implementação otimizada da tecnologia GSM-R nesta linha. Para esta localização foi utilizado um emissor à altura de 16 metros na localização PK 4.4 da linha. Considerando este cenário de teste, pôde-se confirmar o facto inicialmente pretendido, utilizando uma estação base nesta localização considera-se suficiente para a cobertura de toda a linha até ao túnel do Rossio, que se encontra a cerca de 1600 metros da torre de teste (Figura E.19). Relativamente ao comportamento do sinal, este é caracterizado por um decaimento de campo com o valor de 3.7, classificado como ambiente do tipo denso. A localização da antena encontra-se num ponto mais elevado, estando este troço da linha rodeado por alguma vegetação e um número reduzido de edifícios, que se encontram a cerca de 50 a 80 metros do limite da linha.

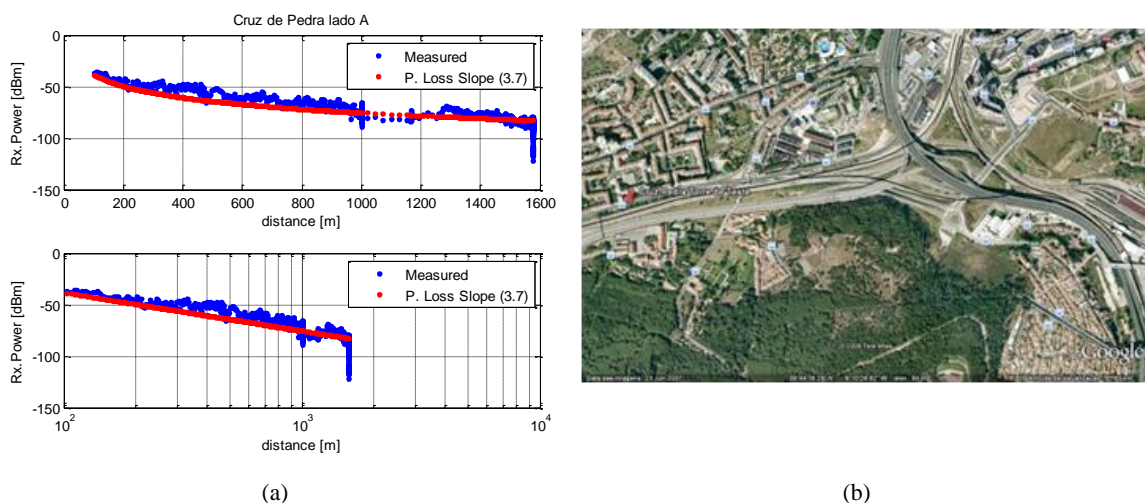


Figura E.19 – Localização de teste da estação da Cruz de Pedra (Lado A)

No que diz respeito ao lado B (na Figura E.20), este é caracterizado por um ambiente do tipo muito denso, com factor de decaimento de campo de 3.9. Este facto deve-se à linha se encontrar a subir e haver uma proximidade dos edifícios relativamente ao limite da linha que varia entre 20 a 50 metros ao longo do percurso considerado. Apesar deste facto é possível verificar que é possível obter uma distância de cobertura razoável de cerca de 7 km.

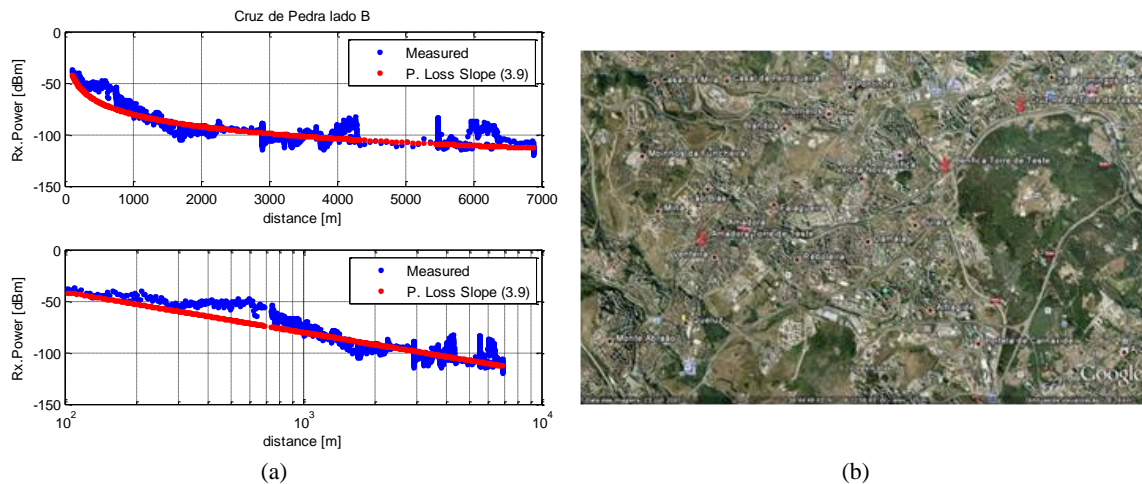


Figura E.20 – Localização de teste da estação da Cruz de Pedra (Lado B).

Benfica

No teste realizado na estação de comboio de Benfica, foi colocado o emissor a uma altura de 26.2 metros do solo.

Podendo observar-se pela Figura E.21 (a) que é possível determinar dois factores de decaimento do campo no que diz respeito ao lado A. Até aos 600 metros é possível observar que as amostras de sinal têm um decaimento do campo de 3.4, havendo uma mudança do comportamento das amostras a partir desse ponto. Esta mudança de comportamento deve-se a obstrução causada por uma ponte à distância referida, reflectindo-se numa degradação da potência do sinal mais acentuada a partir desta zona, passando o factor de decaimento de campo a ser de 3.8. Quanto a classificação deste tipo de ambiente é do tipo denso.

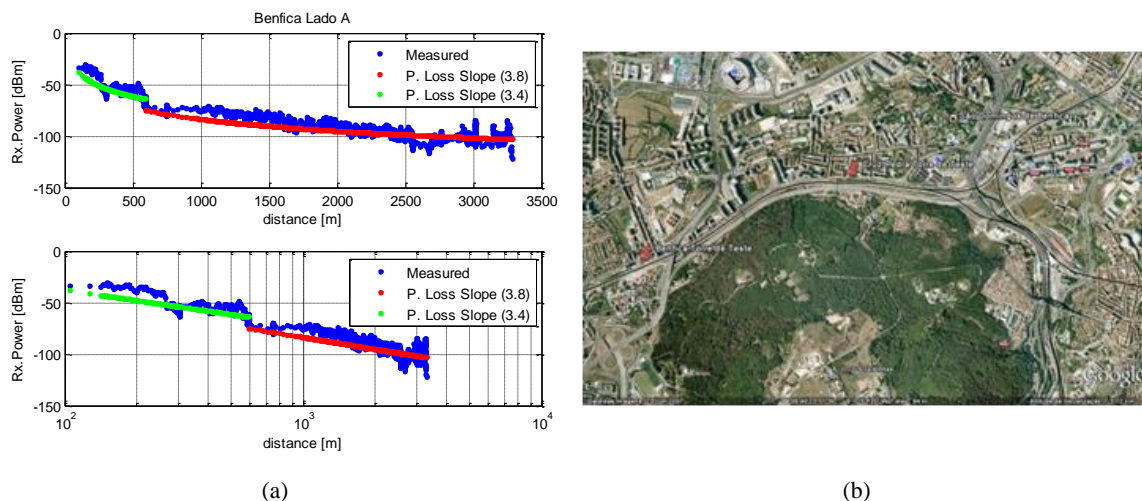


Figura E.21 – Localização de teste da estação de Benfica (Lado A).

No que refere ao lado B (na Figura E.22), pode-se observar que o factor de decaimento do campo mais adequado para caracterizar as amostras obtidas é de 3.5. Pode-se ver também uma variação abrupta a cerca de 1500 metros da estação, que se deve à

existência de uma curva nesta localização. Esta variação abrupta da potência do sinal não se reflecte no entanto na alterações do factor de decaimento do campo. De salientar ainda que a obstrução à propagação do sinal verificada neste troço ocorre apenas devido à vegetação envolvente à linha de comboio, tendo este ambiente sido classificado como denso.

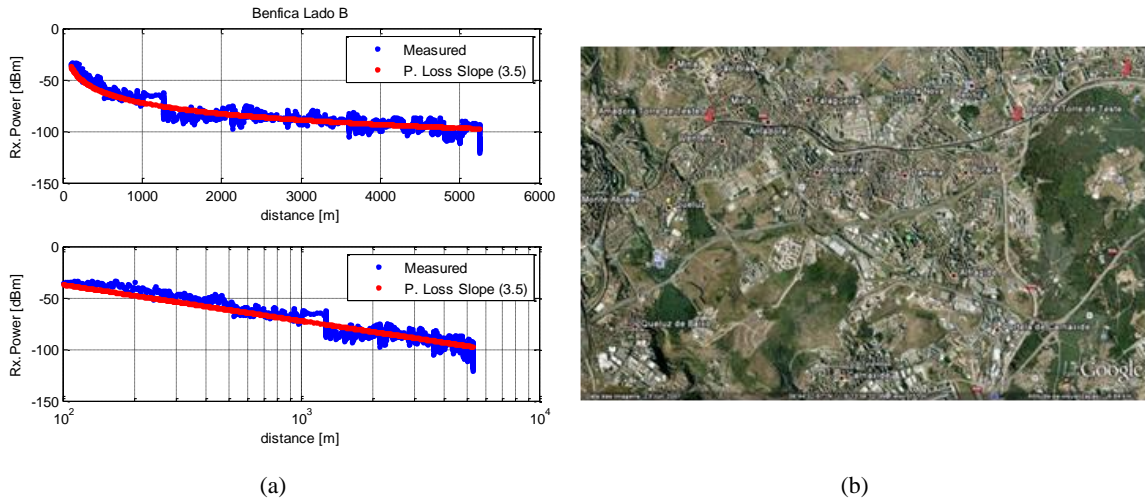


Figura E.22 – Localização de teste da estação de Benfíca (Lado B).

Amadora

Nesta localização foi utilizada uma torre de 16 metros de altura, tendo sido possível observar alguns fenómenos interessantes que serão descritos de forma detalhada.

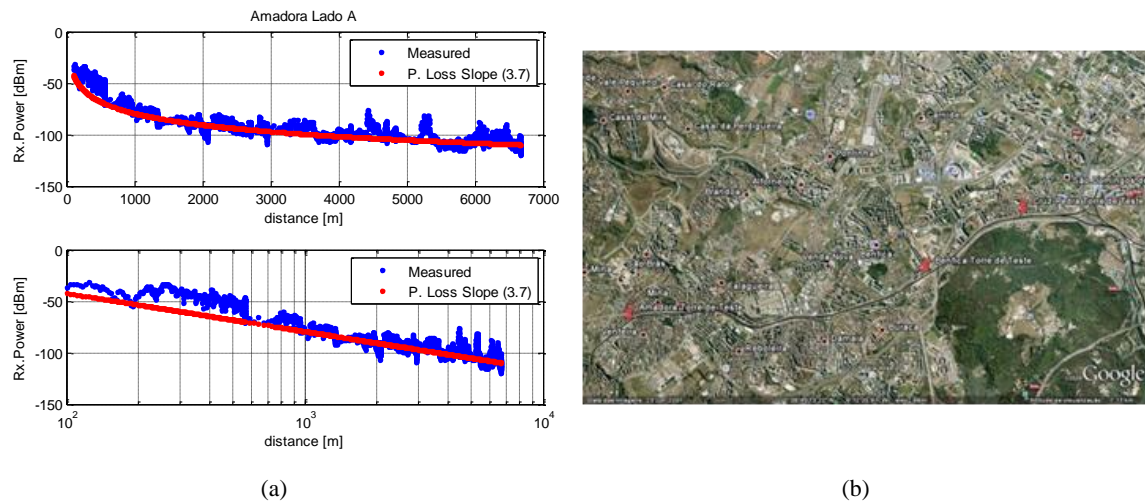


Figura E.23 – Localização de teste da estação da Amadora (Lado A)

Para ambos os lados da estação de teste da Amadora é possível obter um decaimento do campo semelhante, uma vez que para o lado A (na Figura E.23) este é 3.7 e para o lado B (na Figura E.24) é 3.5, identificando a zona como ambiente denso. Este facto deve-se

a esta estação encontra-se localizada numa zona onde a presença de linha de vista é quase sempre possível, apesar da existência de edifícios nas proximidades da linha.

No que diz respeito ao lado A, a linha de vista é possível devido às características quase retilíneas do percurso. No entanto para o lado B, é possível observar nas proximidades da estação de Barcarena uma curva, onde a manutenção da linha de vista é apenas justificada pela estação da Amadora se encontrar numa localização mais elevada, permitindo um maior alcance do sinal para o lado B independentemente da existência da curva.

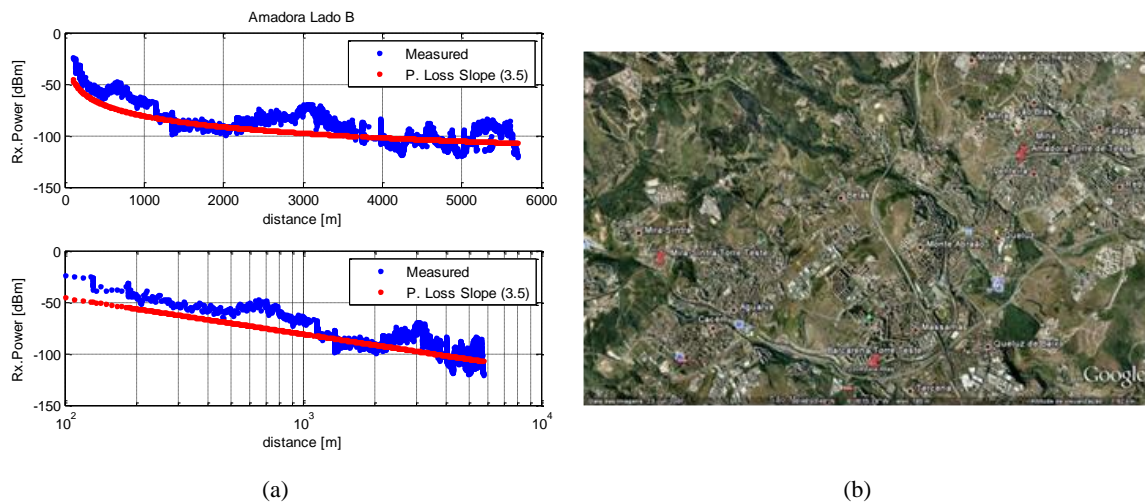


Figura E.24 – Localização de teste da estação da Amadora (Lado B).

Barcarena

O emissor colocado na estação de Barcarena encontrava-se a 20.2 metros do nível da linha, tendo sido colocado numa localização onde a estação de teste se encontrava “escondida” atrás de uma curva, relativamente ao lado A. Este facto provoca no sinal um efeito de alteração do decaimento do campo como se pode observar pela Figura E.25 (a). Assim e como é possível observar, até à distância de 1 km da estação base, local onde se encontra o início da curva, deixa de existir linha de vista com a estação base, considerando o trajecto Sintra-Rossio. Isto faz com que factor de decaimento do campo seja 2.7 para distancias inferiores a mil metros e para as restantes distâncias o sinal tenha um decaimento de potência de 3.7. Esta variação confirma o esperado, pois a potência do sinal cai de forma mais rápida a quando da ausência de linha de vista.

Posto isto verifica-se neste troço a passagem de um ambiente pouco denso para denso, devido às características do terreno imporem obstrução ao percurso de propagação do

sinal electromagnético, que não é possível contornar com as características mais elevadas da estação de Barcarena.

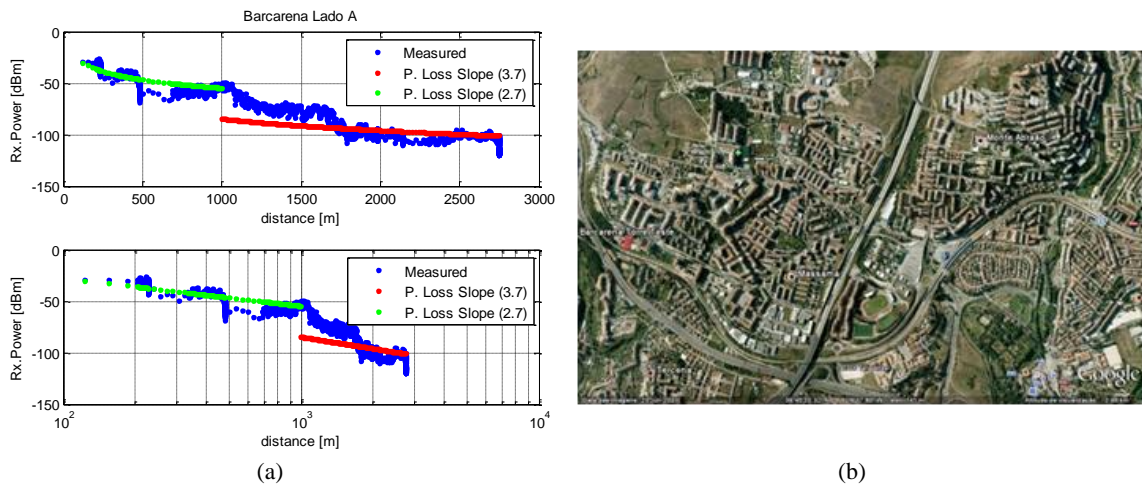


Figura E.25 – Localização de teste da estação de Barcarena (Lado A).

No que refere ao lado B, verificou-se que devido à linha ter um percurso que se aproxima de uma recta, não se verificam alterações significativas do factor de decaimento do campo ao longo das amostras consideradas, sendo o valor deste facto de 4 para este cenário. Este factor de decaimento de campo que classifica este troço da linha como sendo um ambiente do tipo muito denso, deve-se ao facto da linha se encontrar a subir e a linha se encontrar em algumas zonas “escavada” relativamente ao terreno envolvente, facto que causa uma maior dificuldade à propagação do sinal devido a obstrução do mesmo.

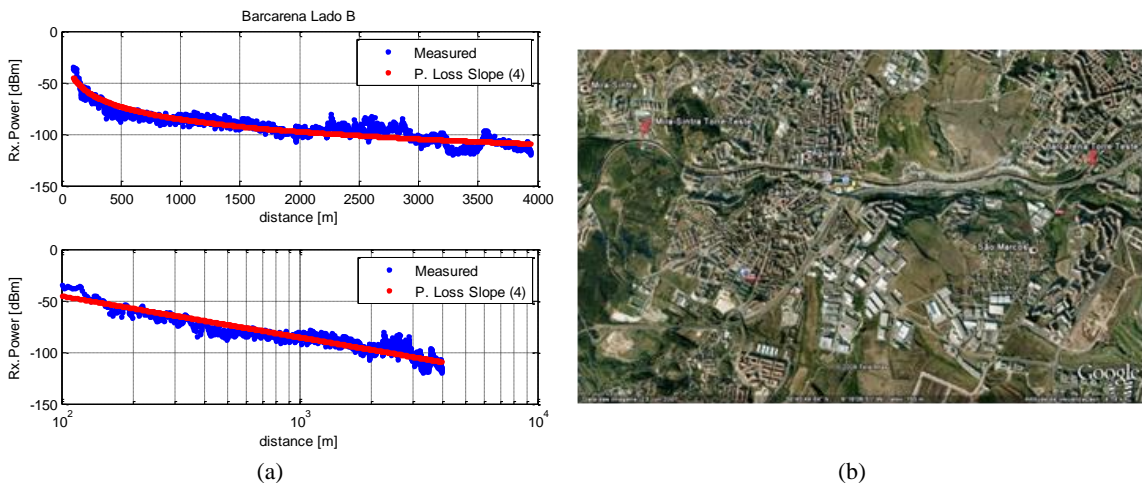


Figura E.26 – Localização de teste da estação de Barcarena (Lado B).

Mira Sintra

Em Mira Sintra, verificou-se alterações na caracterização do factor de decaimento do campo. Sendo que emissor colocado neste localização se encontrava a 23.2 metros do nível da linha e no início de uma curva.

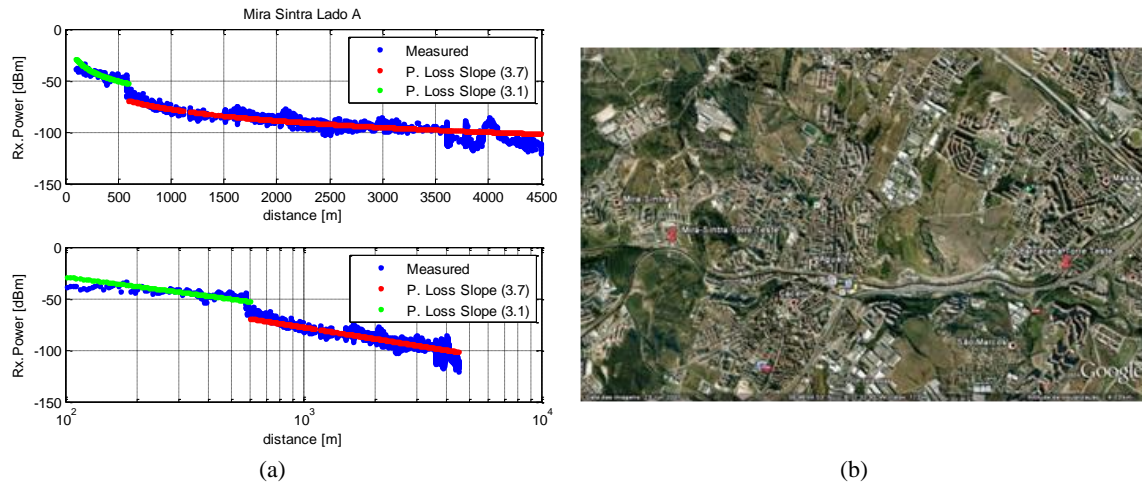


Figura E.27 – Localização de teste da estação de Mira-Sintra (Lado A).

É possível concluir que para o lado A é detectável uma queda abrupta do sinal a aproximadamente 600 metros da estação (Figura E.27 (a)), esta queda do sinal deve-se ao emissor se encontrar localizado numa curva, como já referido, fazendo com que algumas centenas de metros ao lado do mesmo haja uma queda significativa da potência do sinal devido ao facto de deixar de existir linha de vista entre o emissor e o receptor. Pode-se então determinar dois decaimentos de campo para este cenário de teste, para os primeiros 600 metros, 3.1 e 3.7 para as amostras nas restantes distâncias consideradas. Sendo este ambiente caracterizado por ser do tipo denso.

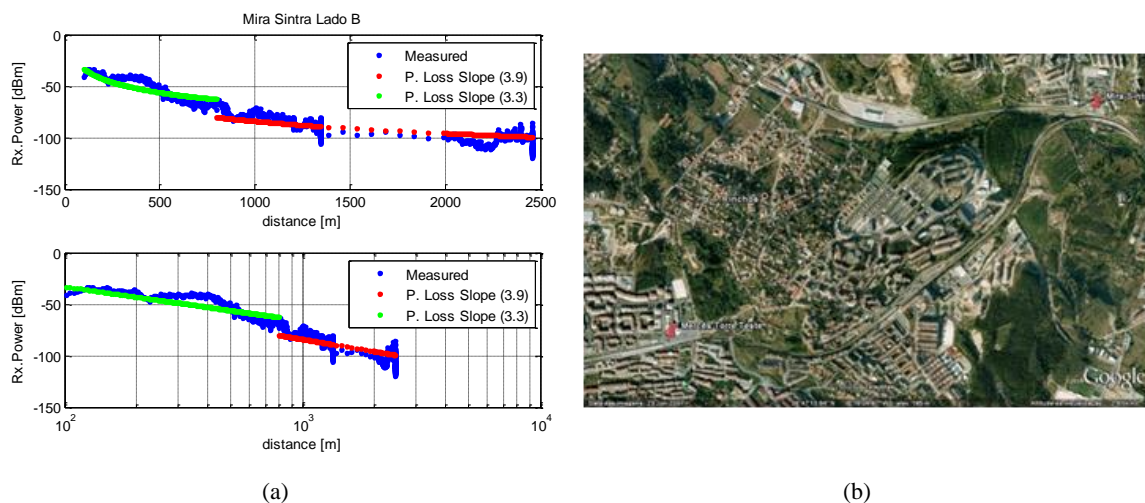
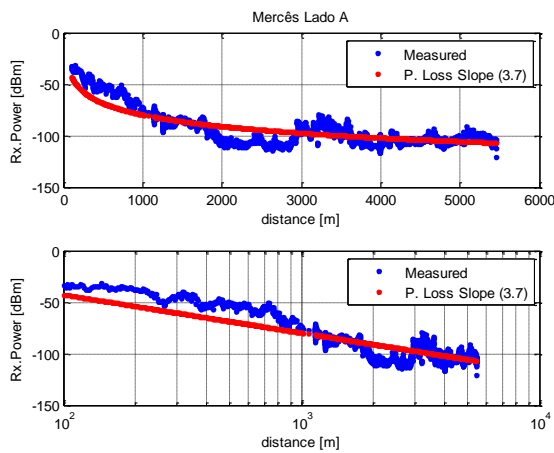


Figura E.28 – Localização de teste da estação de Mira-Sintra (Lado B).

No que refere ao lado B (Figura E.28) pode-se observar o mesmo comportamento referido para o lado A, há nos primeiros 800 metros um comportamento do sinal que pode ser caracterizado por um factor de decaimento de campo de 3.3. Para as restantes amostras o decaimento de campo toma o valor de 3.9, isto devido à ausência da linha de vista, existência de edifícios e curvatura da linha. Neste caso pode-se observar a passagem de um ambiente do tipo denso (primeiros 800 metros da estação de teste) para muito denso.

Mercês

Para o teste realizado na estação das Mercês, foi colocado o emissor de teste à altura de 23.2 metros, tendo-se conseguido os resultados apresentados na Figura E.29 e Figura E.30, de onde se pode concluir que é possível obter uma adaptação quase perfeita do sinal através da utilização de um factor de decaimento do campo 3.7 para o lado A e 3.6 para o lado B.

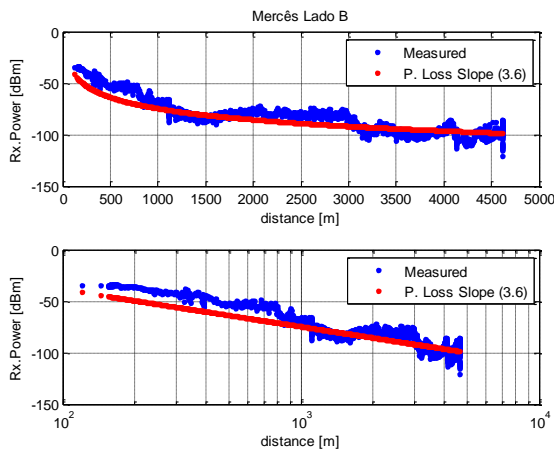


(a)



(b)

Figura E.29 – Localização de teste da estação das Mercês (Lado A).



(a)



(b)

Figura E.30 – Localização de teste da estação das Mercês (Lado B).

Pode-se ainda concluir que o ambiente que rodeia a estação das Mercês é aproximadamente o mesmo para ambos os lados, podendo ser este caracterizado por uma área de ambiente denso.

Sintra

A estação de Sintra encontra-se numa zona mais elevada da linha, facilitando a propagação do sinal, como se pode observar pela Figura E.31 (b). Neste teste foi utilizada uma torre de 3 metros no cimo de uma plataforma de 12, fazendo com que o emissor se encontrasse a 15 metros do solo.

Analisando as amostras de sinal recolhidos, pode-se caracterizar o factor de decaimento do campo electromagnético através do valor 3.9, correspondendo este ambiente a um ambiente muito denso. Este valor é justificado pelo facto de na zona envolvente à estação existirem e inúmeras casa a rodear a linha, existindo também obstrução devido ao relevo do terreno na direcção de propagação do sinal. Estes factos provocam nesta zona uma queda do valor da potência ao longo de percurso de propagação, como se observa pela Figura E.31 (a).

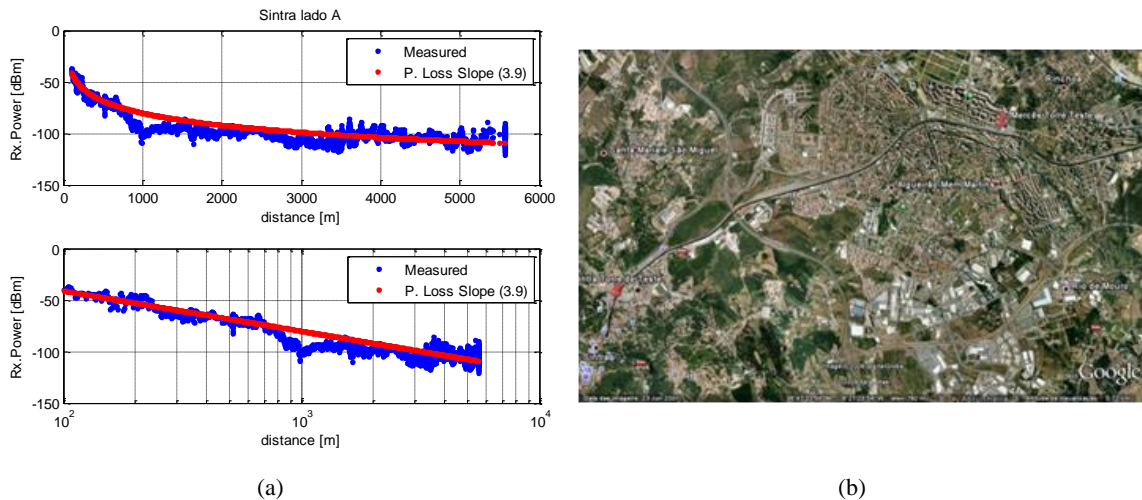


Figura E.31 – Localização de teste da estação de Sintra.

E.3 Linha do Oeste

Meleças

Neste teste foi colocado o emissor de teste a 17 metros, relativamente ao nível da linha, encontrando-se esta estação a 150 metros de altitude. Para esta localização, pretende-se verificar qual o nível de cobertura conseguida, tal como o comportamento do sinal ao longo do percurso.

Pode-se concluir por observação da Figura E.32 que através desta localização é possível obter um elevado nível de cobertura, sendo este facto justificado pelas características do ambiente de propagação. Esta zona é caracterizada por existência de poucos edifícios em que apenas a variação do declive do terreno pode provocar dificuldades de penetração do sinal no percurso da linha. Só após 8 km de cobertura, há uma diminuição abrupta do sinal, devido a existência de uma curva muito acentuada nesta localização. Outro fenómeno interessante de observar é a recuperação do sinal entre a distância de 5 e 6 km da estação base, podendo ser justificado por uma zona favorável à propagação do sinal, devido a existência de uma recta numa zona onde é possível linha de vista com a estação de teste. Conclui-se também que o factor de decaimento do campo para esta situação é 3.5, classificando este ambiente como do tipo denso.

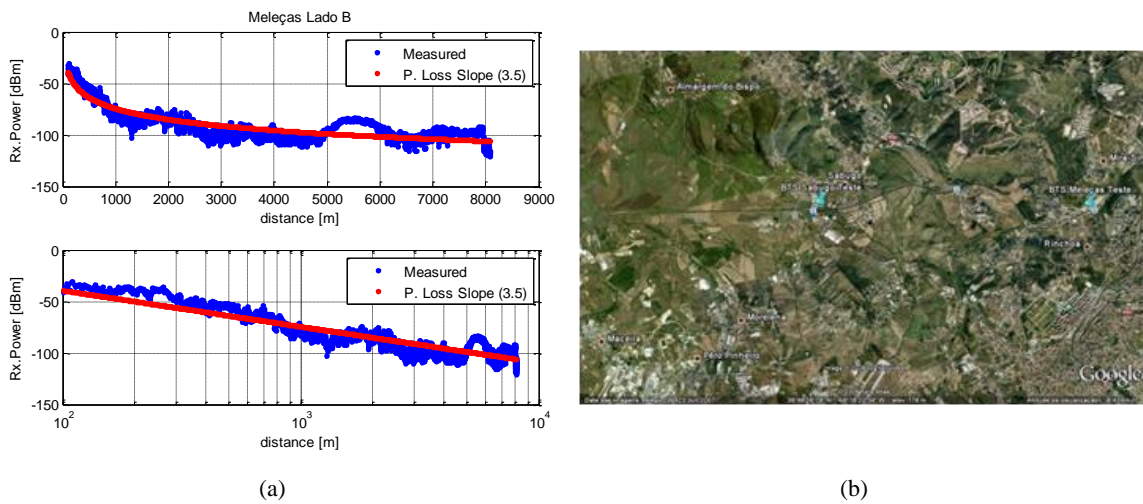


Figura E.32 – Localização de teste da estação de Meleças.

Sabugo

Na estação do Sabugo foi utilizada uma torre que permitiu a colocação do emissor de teste a 18 metros, em relação ao nível da linha, estando a estação a 174 metros de altitude.

Observando a Figura E.33 (a) pode-se concluir que é possível definir dois factores de decaimento do campo para este cenário, até aos 600 da estação tem-se 2.7 e para as restantes distâncias 3.2. Esta mudança de comportamento deve-se à curva que se encontra a 600 metros da estação, que permite linha de vista até este ponto, possibilitando a classificação deste tipo de ambiente como pouco denso. Relativamente às restantes distâncias consideradas o ambiente é classificado como denso. Pode-se também observar próximo dos 1100 metros um aumento brusco da potência do sinal durante aproximadamente 500 metros, que se deve a uma zona onde as características

do terreno permitam linha de vista com a estação de teste, pois coincide com a existência de uma recta na linha.

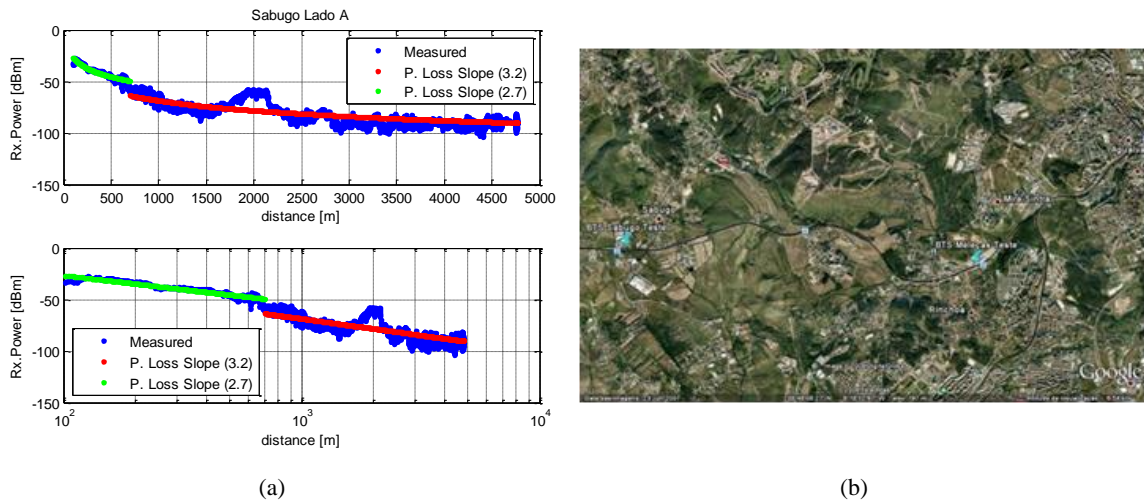


Figura E.33 – Localização de teste da estação do Sabugo (Lado A).

Para o lado de B é possível observar claramente o fenómeno do efeito do desaparecimento da linha de vista. Este fenómeno pode-se observar pela mudança de comportamento do sinal no ponto correspondente a 3 km da estação de teste. Até à distância referida, observa-se zonas abertas, reduzida mudança de altitude e reduzida oscilação da elevação do terreno, dando origem a um comportamento do sinal característico de um ambiente do tipo pouco denso com decaimento de campo de valor 2.9. Relativamente às restantes distâncias, verificou-se que após a curva existente na linha e a consequente obstrução da linha de vista o decaimento de campo sobe para o valor 3.5, passando o ambiente a comportar-se como sendo do tipo denso, tal como se observa na Figura E.34.

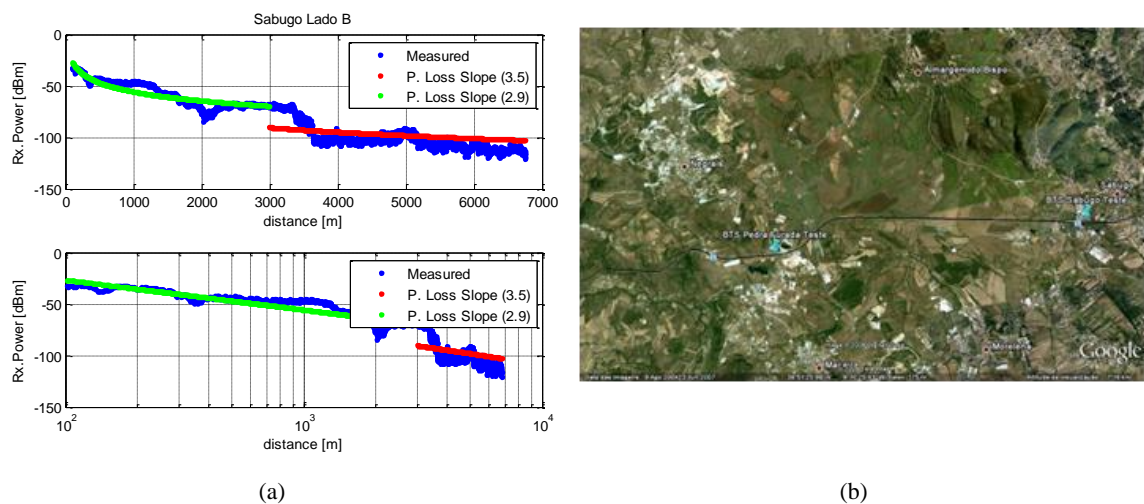


Figura E.34 – Localização de teste da estação do Sabugo (Lado B).

Pedra Furada

Para este cenário de teste foi utilizado um emissor à altura de 18 metros, tendo este sido colocado no interior do apeadeiro, que se encontra a uma altitude de 175 metros.

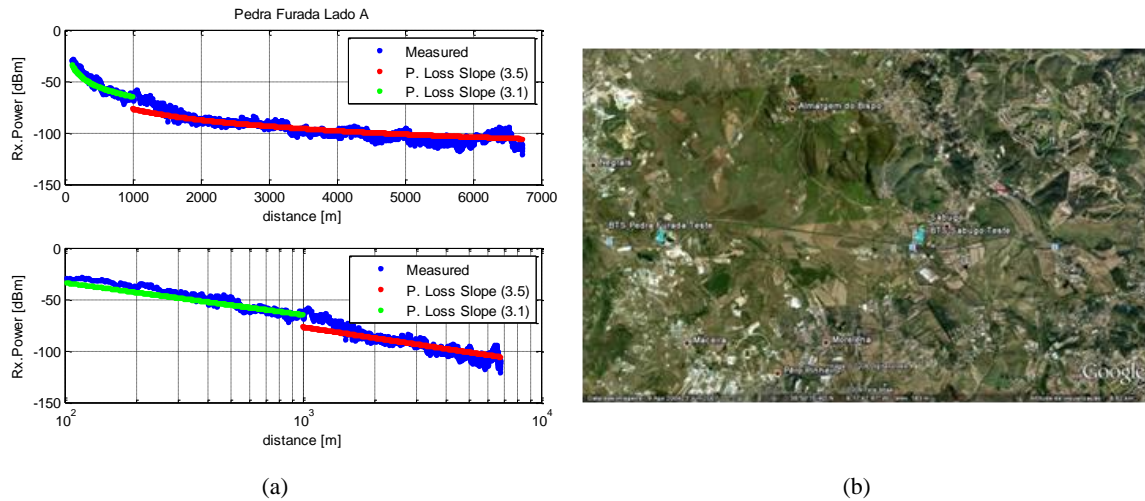


Figura E.35 – Localização de teste da estação de Pedra Furada (Lado A).

Na Figura E.35 (a) pode-se observar uma pequena alteração do valor do factor de decaimento do campo na distância de 1 km da estação de teste, sendo este facto justificado pela existência de uma pequena curva nesta localização que provoca uma alteração do comportamento do sinal devido à existência de obstrução desde este ponto, assim o factor de decaimento do campo é de 3.1 para distancias inferiores a 1000 metros e de 3.5 para as restantes distâncias. Para qualquer um dos casos o ambiente envolvente deste troço engloba-se no tipo denso.

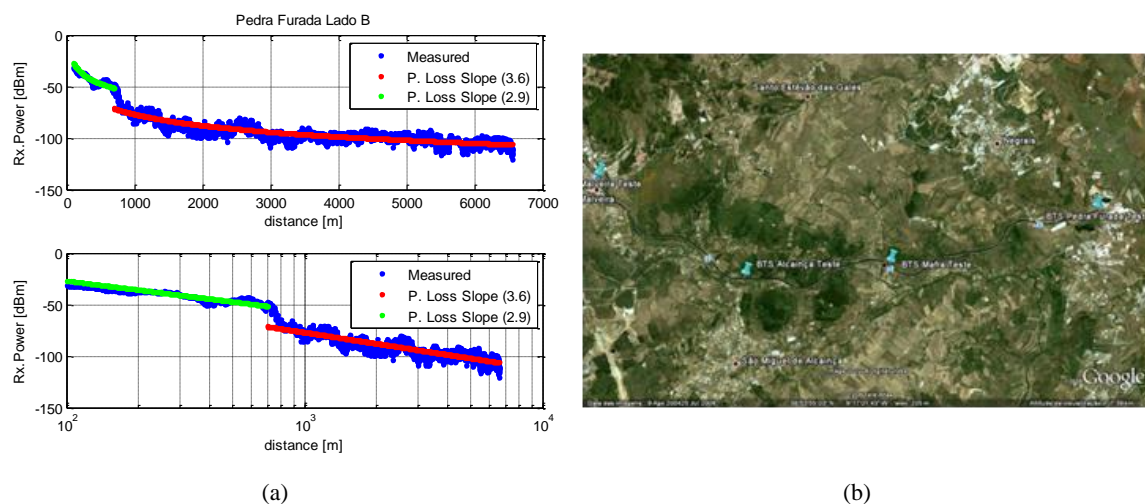


Figura E.36 – Localização de teste da estação de Pedra Furada (Lado B).

Tal como no caso anterior, há uma curva a algumas centenas de metros da localização da estação de teste, mas neste caso o efeito observado (na Figura E.36 (a)) é mais

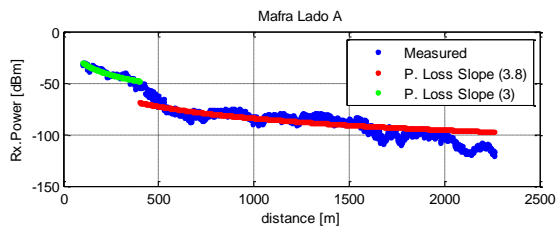
acentuado, podendo da mesma forma que no caso anterior observar-se e definir dois decaimentos de campo para esta situação. Até aos 800 metros da estação o comportamento do sinal tem um decaimento de campo de 2.9, para valores acima desta distância o factor de decaimento é caracterizado pelo valor 3.6. Consistindo este fenómeno numa passagem de um ambiente do tipo pouco denso para um ambiente do tipo denso. Este facto, mais uma vez está relacionado com a perda de linha de vista com a estação de teste, podendo também salienta-se que neste sentido da linha observou-se uma subida gradual da altitude que vai provocando uma diminuição da altura efectiva da antena, reflectindo-se este facto numa degradação da potência do sinal. Esta degradação da potência do sinal é ainda agravada após a curva que se encontra a 800 metros, provocando uma diminuição das condições de propagação devido à ausência de linha de vista.

Mafra

A estação de Mafra encontra-se a 158 metros da linha do mar, tendo sido utilizado para este teste uma torre que permite colocar a estação emissora a 18 metros acima do nível da linha ferroviária.

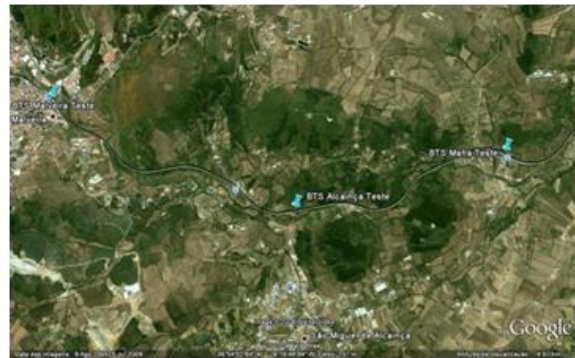
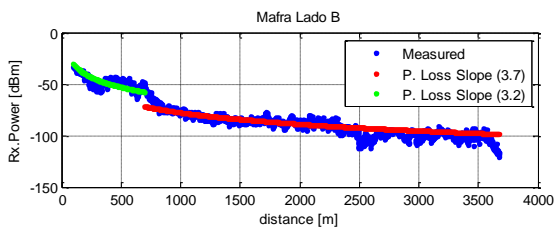
Relativamente aos resultados obtidos neste teste, estes são semelhantes aos apresentados no caso anterior (Pedra Furada), a existência de uma curva numa zona muito próxima da estação, como se pode observar pela Figura E.37 (b), provoca uma variação do factor de decaimento do campo, devido ao desaparecimento da linha de vista com a estação emissora. Assim até 300 metros da estação de teste, pode-se observar que o sinal tem um factor de decaimento do campo de 3, aumentando para 3.8 para as restantes distâncias consideradas. Esta mudança no entanto não reflecte qualquer alteração relativamente ao tipo de ambiente, que neste local é classificado como denso.

No que refere ao lado B da estação, verifica-se o mesmo comportamento (Figura E.38 (a)). Pode observar-se que a curva existente a aproximadamente 700 metros da estação de teste provoca uma variação do decaimento do campo, sendo este de 3.2 até esta distância e para as restantes distâncias de 3.7. Relativamente ao tipo de ambiente este é do tipo denso.



(a) (b)

Figura E.37 – Localização de teste da estação de Mafra (Lado A).

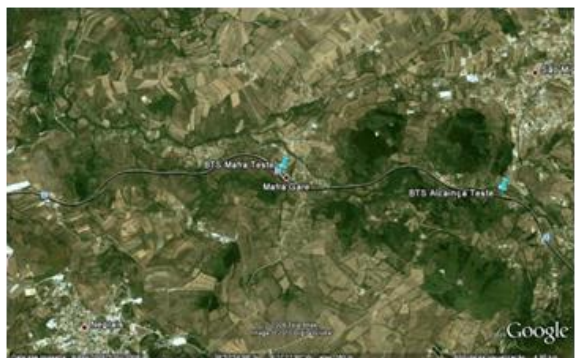
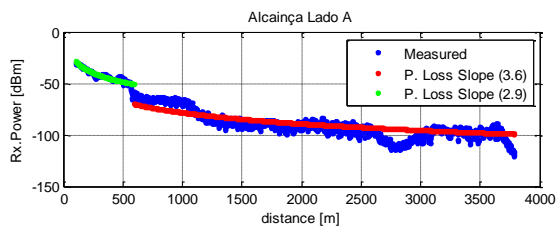


(a) (b)

Figura E.38 – Localização de teste da estação de Mafra (Lado B).

Alcainça

Este apeadeiro encontra-se à altitude de 200 metros, tendo no local de teste sido colocada uma torre de 19.5 metros relativamente à linha do comboio.



(a) (b)

Figura E.39 – Localização de teste da estação de Alcainça (Lado A).

Pode-se observar mais uma vez, pela Figura E.39, o efeito da passagem de receptor de uma situação de linha de vista, para ausência da mesma devido a uma curva na linha, neste caso a 600 metros da estação emissora. Assim pode-se observar nesta localização uma alteração do factor de decaimento do campo de 2.9 (até ao 600 metros da estação emissora) para 3.6 (para as distâncias a partir dos 600 metros). Comportando-se o sinal no primeiros 600 metros como característico de um ambiente pouco denso e para as restantes distâncias como ambiente denso.

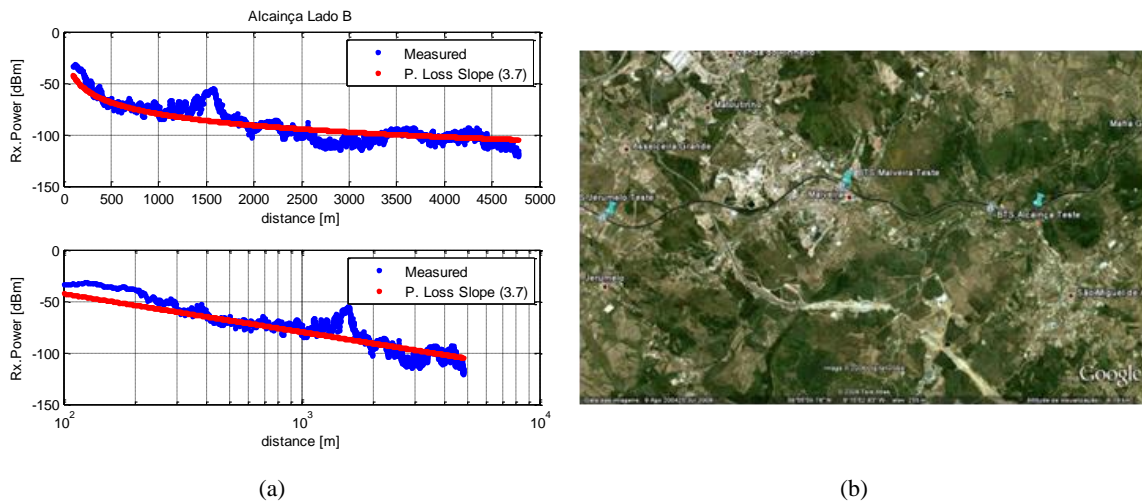


Figura E.40 – Localização de teste da estação de Alcainça (Lado B).

No teste também se pode observar para o lado B da estação um fenómeno que se considera relevantes. Analisando a Figura E.40 (b), pode-se ver que esta zona é caracterizada por curvas e contra-curvas, causando um efeito de aparecimento e desaparecimento de linha de vista ao longo do percurso, fenómeno que se pode observar em detalhe na Figura E.40 (a) entre a distância 1.2 km e 1.7 km, onde existe uma subida da potência do sinal, correspondente a uma passagem de não linha de vista para linha de vista ao longo de aproximadamente 500 metros. No que diz respeito ao decaimento do campo para este cenário, este toma o valor de 3.7.

Malveira

A estação da Malveira encontra-se numa zona de maior intensidade urbanística e à altitude de 227 metros relativamente a linha de água e o emissor colocado nesta estação encontra-se a 16 metros em relação ao nível da linha.

Pela análise das amostras (na Figura E.41 (a)) pode observar-se que a existência de uma curva a 400 metros (Figura E.41 (b)) da estação na direcção lado A provoca a alteração do comportamento do sinal, passado o decaimento do campo de 2.5 (para os primeiros

400 metros da estação) para 3.6 (para as restantes distâncias). Esta mudança reflecte-se na alteração das características do ambiente de pouco denso para denso.

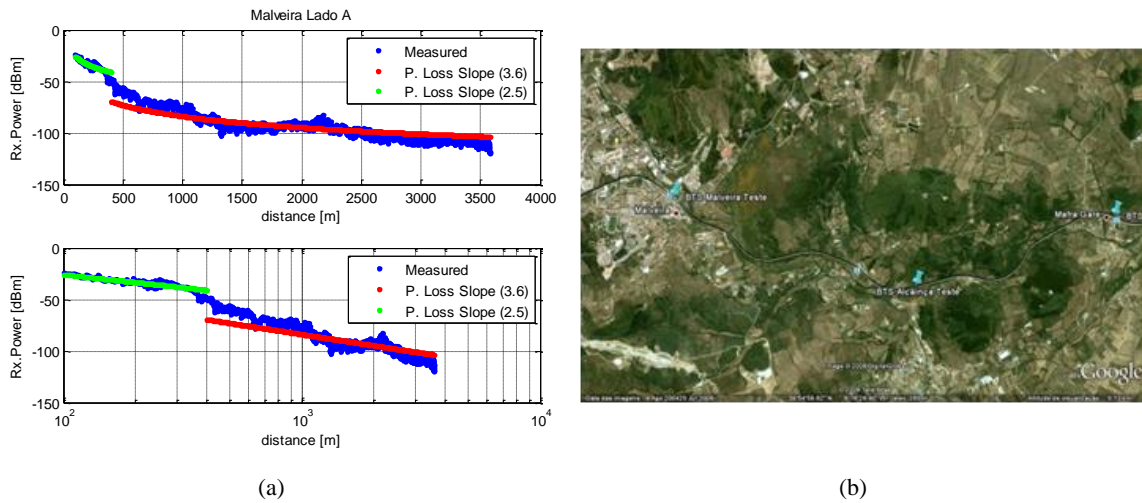


Figura E.41 – Localização de teste da estação da Malveira (Lado A).

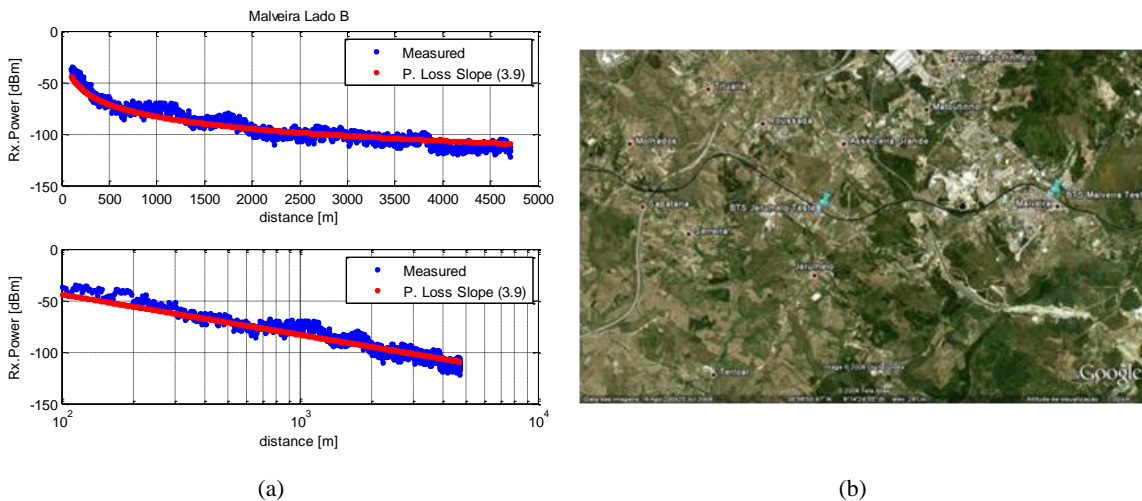
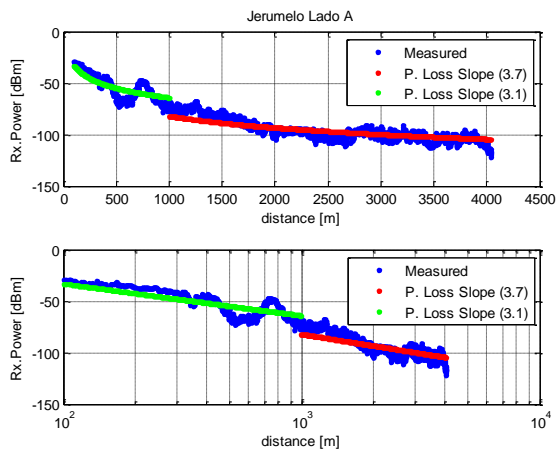


Figura E.42 – Localização de teste da estação da Malveira (Lado B).

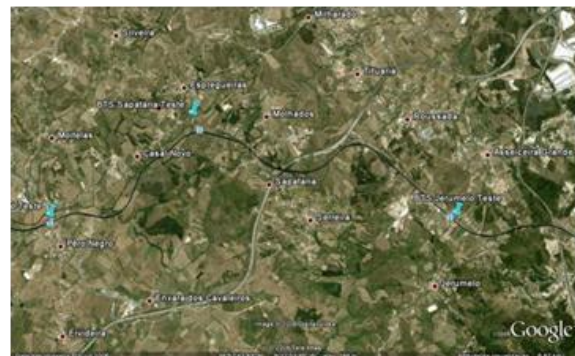
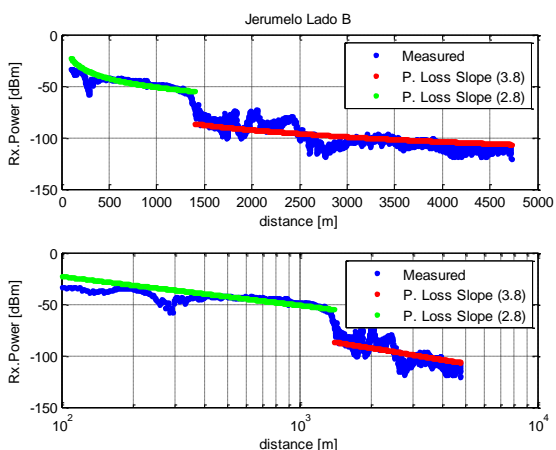
Para o cenário da Malveira lado B pode-se observar que o decaimento do campo é sempre o mesmo para todas as amostras, tendo-se conseguido uma aproximação considerando um factor de decaimento de 3.9. Pode-se também concluir que o comportamento do sinal é bastante estável ao longo do percurso, facto que se deve à localização da estação de teste se encontrar numa zona em que a altitude é a mais elevada em relação ao resto do terreno. Apesar disto nesta localização verifica-se a existência de proximidade de alguns edifícios (a 40 metros do limite da linha), tal como o facto da linha em determinados pontos se encontrar “escavada” relativamente ao terreno envolvente, provocando dificuldades de propagação do sinal. Este facto reflecte-se na degradação mais rápida do sinal e daí a sua classificação em termos de ambiente ser classificada como sendo muito denso.

Jerumelo

O apeadeiro de Jerumelo, encontra-se à altitude de 241 metros e nas suas proximidades foi colocada uma torre de teste de 16 metros. Com recurso às amostras recolhidas no local é possível apurar algumas conclusões relativamente ao ambiente que rodeia esta zona. Observando o lado A (Figura E.43), pode-se concluir que entre a distância 400 metros e 1 km há uma variação repentina do sinal, havendo oscilações na potência nesta zona, isto é justificado pela existência de curvas e contra-curvas que em alguns caso provocam o desaparecimento da linha de vista e em outros caso o aparecimento da mesma, provocando uma variação do factor de decaimento do campo. Assim pode-se dizer que até à distância de 1 km o factor de decaimento específico é de 3.1 e para as restantes distâncias o mais adequado é 3.7. Sendo o ambiente caracterizado como denso.



(a) (b)
Figura E.43 – Localização de teste da estação do Jerumelo (Lado A).



(a) (b)
Figura E.44 – Localização de teste da estação do Jerumelo (Lado B).

Já no diz respeito ao lado B (Figura E.44) o comportamento é idêntico, pelo mesmo motivo do lado A. Devido à curva existente a 1.4 km da estação de teste há uma

alteração do decaimento do campo, pois esta curva faz com que deixe de haver linha de vista com a estação de teste, provocando uma alteração do comportamento do sinal. Assim tem-se um decaimento do campo de 2.8 para distâncias até 1.4 km e um decaimento de campo de 3.8 para as restantes distancias. Mais uma vez devido à existência de curvas consecutivas na linha, verifica-se oscilação da potência do sinal, verificando-se neste caso entre os 1500 e os 2500 metros da estação de teste. Este cenário reflecte mais uma vez a passagem de um ambiente pouco denso para denso.

Sapataria

A Sapataria é uma zona considerada rural, à altitude de 180 metros da linha do mar e onde se colocou uma estação de teste à altura de 16 metros, considerando o nível da linha.

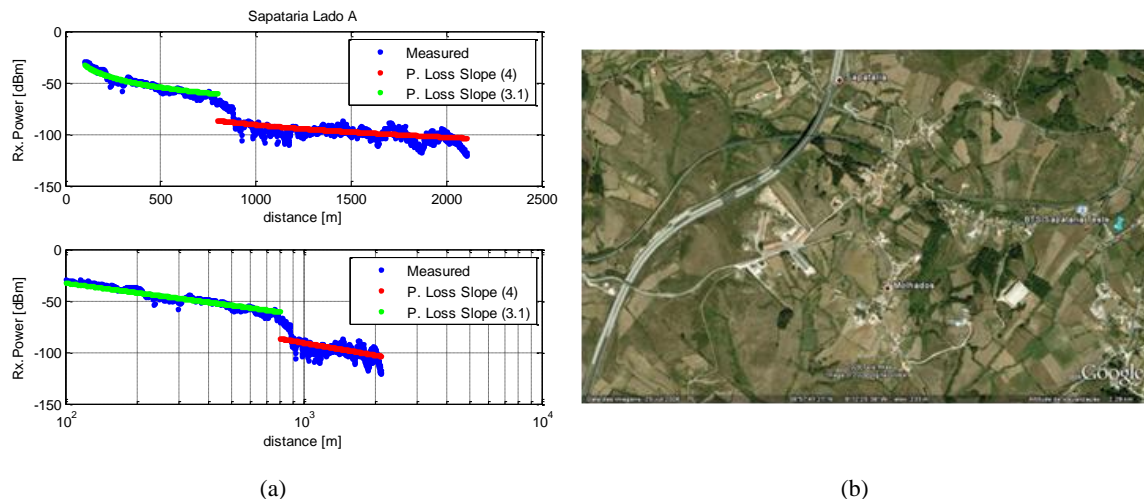
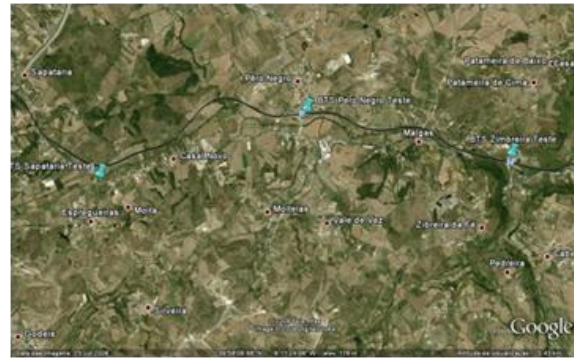
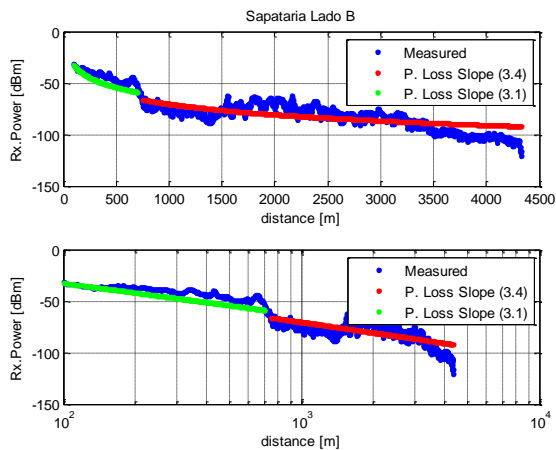


Figura E.45 – Localização de teste da estação da Sapataria (Lado A).

Nesta estação de teste e considerando apenas o lado A pode-se observar pela Figura E.45 (a), que existe uma diminuição repentina da potencia a cerca de 800 metros da estação base, podendo ser caracterizado o decaimento do campo até este valor por 3.1 e para a restante distância de cobertura por 4. Esta variação deve-se ao facto desta estação de teste se encontrar numa elevação mais reduzida relativamente ao resto do troço, apenas possibilitando a existência de linha de vista até à primeira curva após a estação de teste, como se pode confirmar pelo mapa da Figura E.45 (b). Após a curva e devido à obstrução causada pelo terreno existe uma degradação do sinal que se reflecte na passagem de um ambiente considerado denso para um muito denso.

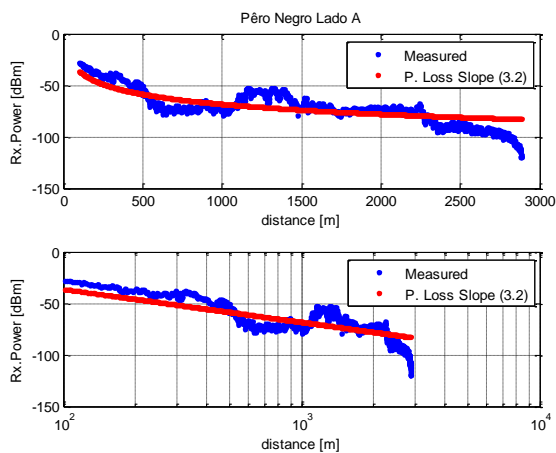


(a) (b)
Figura E.46 – Localização de teste da estação da Sapataria (Lado B).

Analisando o lado B e observando a Figura E.46 pode-se assinalar uma variação da potência ao longo da distância, podendo-se caracterizar o factor de decaimento do campo com o valor de 3.1 para distancias inferiores a 700 metros da estação de teste e 3.4 para distancias superiores à mesma. Esta variação deve-se à oscilação em termos de declive de terreno juntamente com a existência de uma pequena curva à distância de 700 metros, provocando uma obstrução à propagação do sinal.

Pêro Negro

A estação de Pêro Negro encontra-se a 150 metros de altura, relativamente ao nível do mar e foi colocada uma torre de teste de 17 metros, para a recolha de medidas no local.



(a) (b)
Figura E.47 – Localização de teste da estação de Pêro Negro (Lado A).

Na Figura E.47 (a) (lado A) é possível observar a variação da potência, podendo concluir-se que apesar da existência de algumas curvas é possível cobrir sensivelmente 3 km. Pode-se caracterizar este ambiente de propagação como do tipo de denso, com um

decaimento de campo de 3.2. Verifica-se também que para esta zona o único impedimento para a extensão do alcance de cobertura será a variação da altitude do terreno, pois esta é caracterizada por ambientes abertos, que facilitam a propagação do sinal.

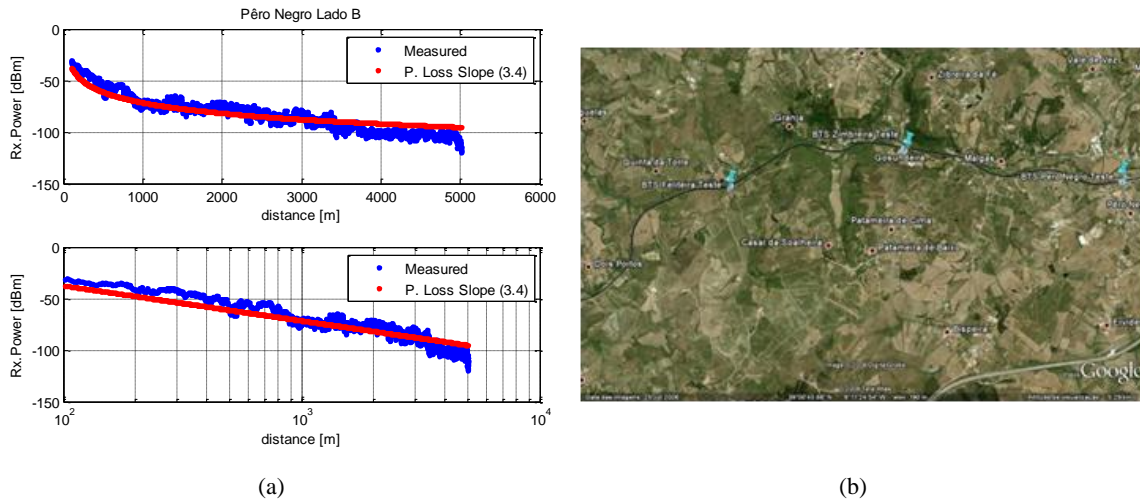
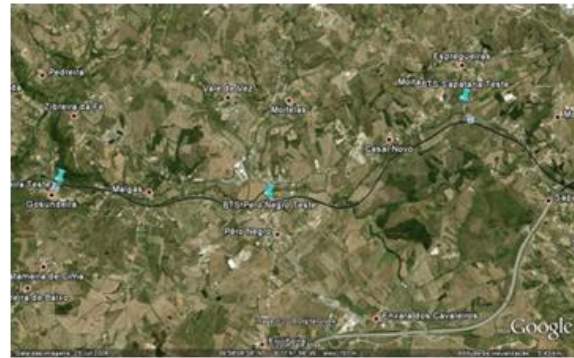
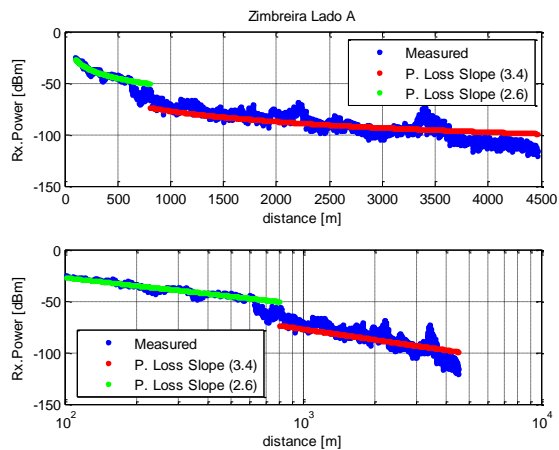


Figura E.48 – Localização de teste da estação de Pêro Negro (Lado B).

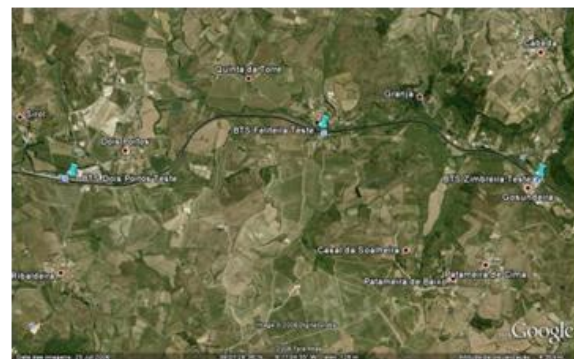
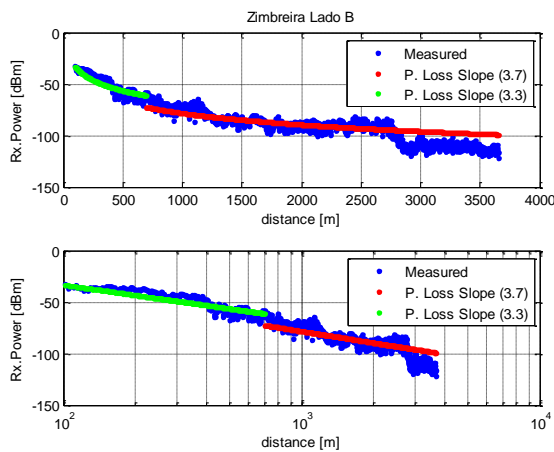
Para o lado B, Figura E.48 (b), é possível conseguir cobertura até 5 km da estação base sendo possível caracterizar o decaimento do campo com o valor de 3.4 (ambiente denso). Este facto verifica-se porque este troço da linha tem um comportamento quase rectilíneo, e a linha encontra-se a descer facilitando a propagação para este lado da estação de teste.

Zimbreira

O apeadeiro da Zimbreira encontra-se a 125 metros da linha do mar e o emissor a 16 metros do nível da linha. Relativamente ao terreno envolvente este apeadeiro encontra-se num vale relativamente ao lado A da linha. Devido a esse facto, como se pode observar na Figura E.49 (a), aproximadamente a 800 metros da estação base há uma redução brusca da potência do sinal recebido no receptor. Esta redução coincide com a existência de uma curva que diminui a linha de vista com a estação de teste, como se pode confirmar pela Figura E.49 (b). Podemos então definir que temos dois factores de decaimento para esta situação, até aos 800 metros o factor de decaimento do campo pode ser caracterizado pelo valor 2.6 (ambiente do tipo pouco denso) e para as restantes distâncias aumenta para 3.4 (ambiente do tipo denso).



(a) (b)
Figura E.49 – Localização de teste da estação da Zimbreira (Lado A).



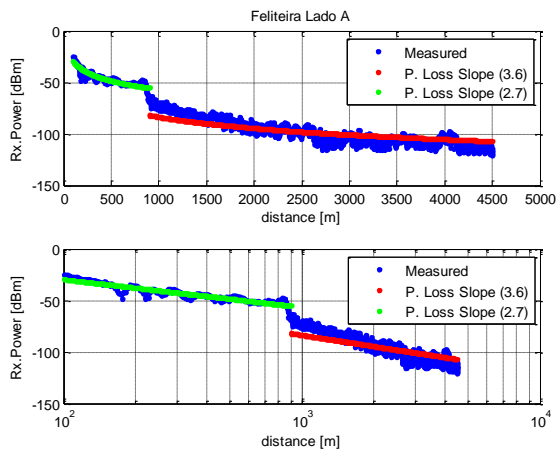
(a) (b)
Figura E.50 – Localização de teste da estação da Zimbreira (Lado B).

No que refere ao lado B, tal como acontece para o lado A, as condições de localização do apeadeiro da Zimbreira mantêm-se, isto é, esta estação encontra-se num vale e devido ao declive do terreno neste local deixa de haver linha de vista com a estação de teste a cerca de 600 metros da estação, provocando uma descida do sinal que neste caso é menos acentuada que no anterior. Assim pode-se dizer que é possível para esta localização obter dois factores de decaimento do campo, 3.3 até cerca de 800 metros da estação e para as restantes distâncias consideradas, 3.7. Sendo o tipo de ambiente envolvente classificado como denso.

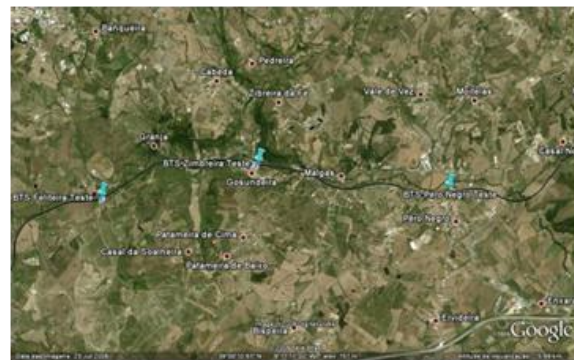
Feliteira

Para o teste realizado no apeadeiro da Feliteira foi colocada uma estação de teste a 16 metros de altura, estando este local à altitude de 100 metro.

Por análise da Figura E.51, pode-se observar uma variação do factor de decaimento do campo à distância de 900 metros da estação de teste, este facto deve-se a existência de uma variação do declive do terreno, com a existência de uma curva que não permite que exista linha de vista a partir da distância referida. Podendo ser definido dois factores de decaimento para este cenário, 2.7 para distâncias à estação de teste inferiores a 900 metros e 3.6 para as restantes distâncias até ao limite de -120 dBm. Esta mudança de decaimento do campo consiste numa alteração do tipo de ambiente de pouco denso para denso.

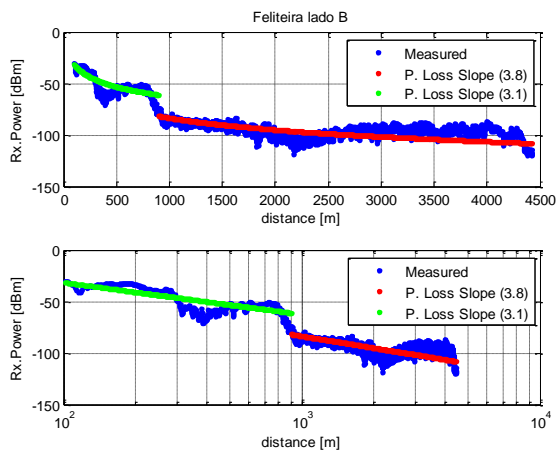


(a)

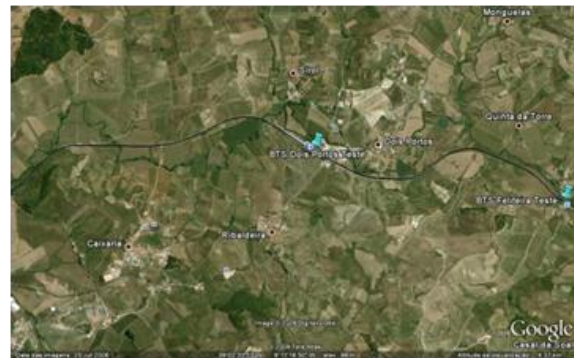


(b)

Figura E.51 – Localização de teste da estação da Feliteira (Lado A).



(a)



(b)

Figura E.52 – Localização de teste da estação da Feliteira (Lado B).

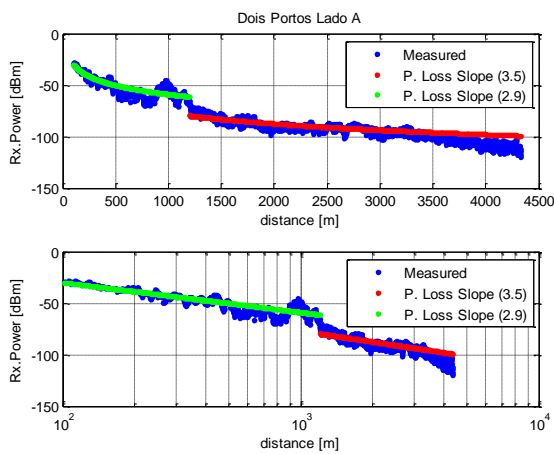
Na Figura E.52 (a) pode-se observar uma variação do factor de decaimento do campo para distâncias a estação de teste acima dos 900 metros, este comportamento do sinal é justificado pela existência neste ponto da linha de uma curva que provoca um desaparecimento da linha de vista com o receptor que se encontra na carruagem de teste, provocando uma atenuação do sinal neste ponto. Assim sendo é possível definir para os

primeiros 900 metros um factor de decaimento do campo de 3.1 e para as restantes distâncias 3.8. Para este caso a variação do decaimento de campo não se reflecte na classificação do tipo de ambiente, que para esta troço é do tipo denso.

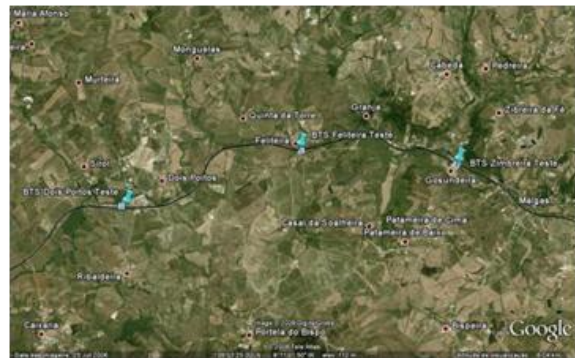
Dois Portos

A estação de Dois Portos encontra-se localizada à altitude de 78 metros e nesta localização foi colocada um mastro de 16 metros para que o emissor de teste ficasse no cimo.

Relativamente às amostras recolhidas pode observar-se para o lado A (na Figura E.53), que até ao 1.2 km o decaimento do campo é 2.9 (ambiente pouco denso) e para as restantes distâncias é 3.5, justificado pela existência de uma curva que cria a partir desse ponto uma ausência de linha de vista com o emissor.

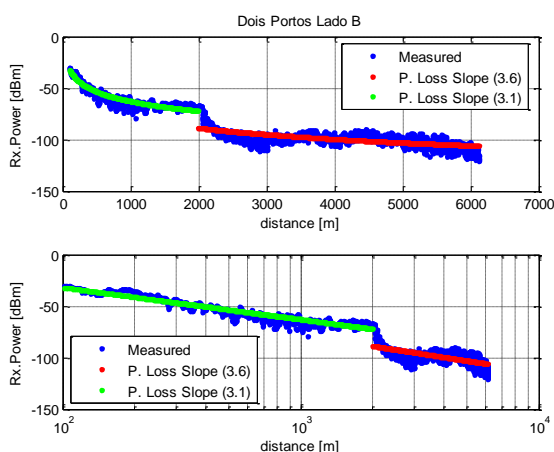


(a)

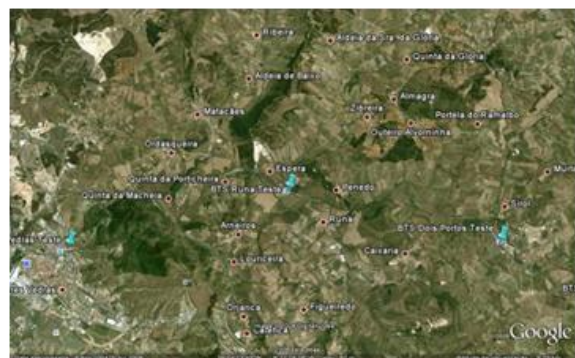


(b)

Figura E.53 – Localização de teste da estação de Dois Portos (Lado A).



(a)



(b)

Figura E.54 – Localização de teste da estação de Dois Portos (Lado B).

Relativamente ao lado B (Figura E.54), pode-se observar um comportamento semelhante acrescentado pelo aumento da altitude da linha provocando a 2 km da

estação base uma alteração do factor de decaimento do campo. Assim é possível determinar para as amostras nos primeiros 2 km têm um factor de decaimento do campo de 3.1, todas as restantes são possível determinar um factor de 3.6. Sendo este ambiente classificado como denso.

Runa

Esta estação encontra-se a uma elevação de 60 metros, tendo sido colocado o emissor a 17 metros do nível da linha.

Como se pode observar pela Figura E.55 (a) pode-se caracterizar este ambiente dividindo a situação de teste em duas partes, dependentes apenas da distância do emissor à estação base. Este facto deve-se a esta estação se encontrar numa zona mais baixa do terreno, fazendo com que à medida que o comboio se afaste da estação base para o sentido Meleças, haja uma diminuição da altura efectiva da antena, pois este encontra-se a subir, fazendo com que a existência da linha de vista diminua até à distância de 1000 metros da estação, existindo uma diminuição de potência a partir deste ponto. Assim pode-se definir um factor de decaimento do campo de 3.2 para os primeiros mil metros da estação e 3.7 para os restantes, abrangendo sempre a classificação do troço como sendo do tipo denso.

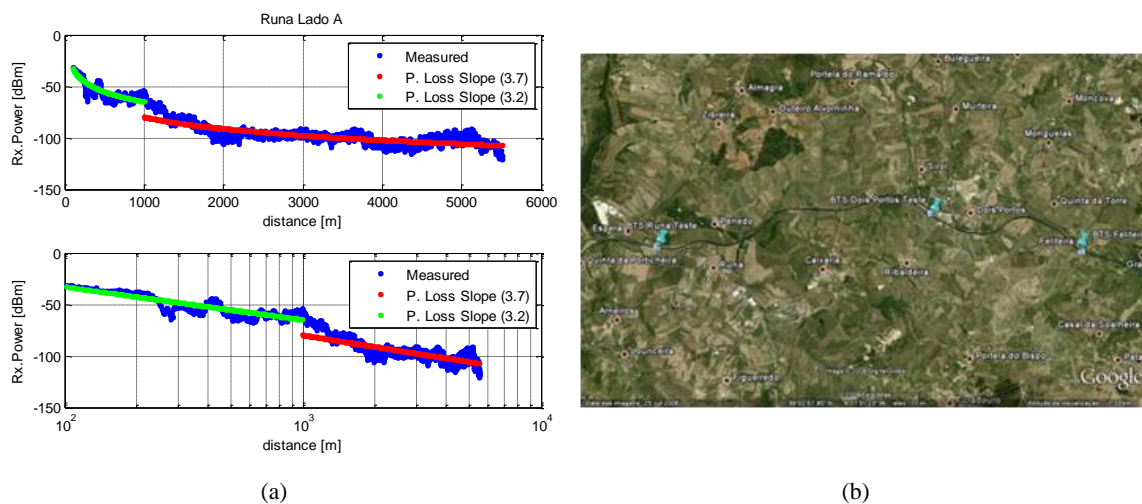
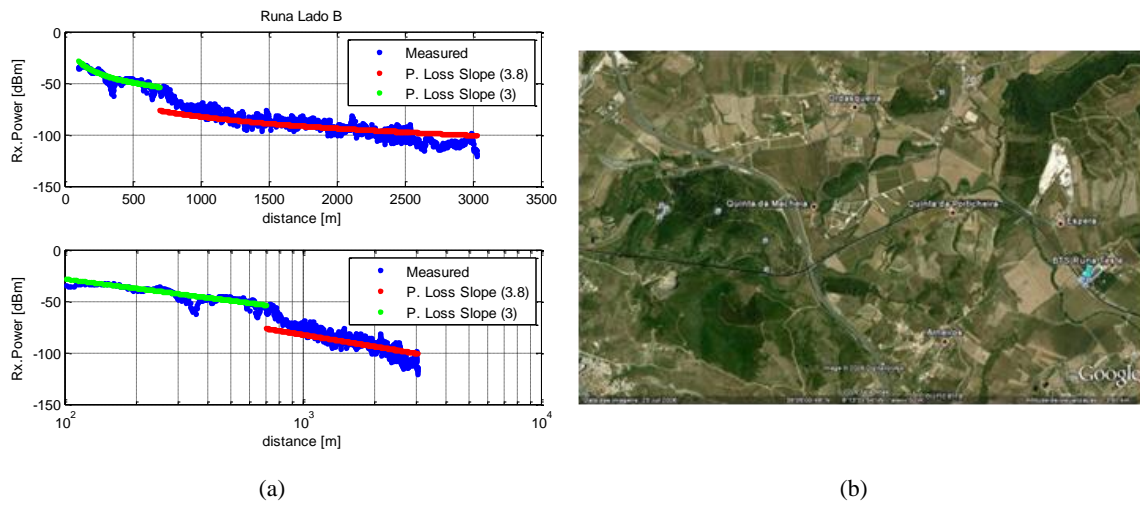


Figura E.55 – Localização de teste da estação da Runa (Lado A).

Para a situação de teste apresentada na Figura E.56 (a), lado B, pode-se concluir que há uma variação do factor de decaimento do campo ao quilómetro um, devido à curva que se encontra na linha, como se pode confirmar pela Figura E.56 (b), provocando o desaparecimento da linha de vista, devido à elevação do terreno no sentido de propagação do sinal que provoca uma obstrução total do sinal a partir da curva. Assim sendo o decaimento do campo é 3 para amostras em que a distância é inferior a 1000

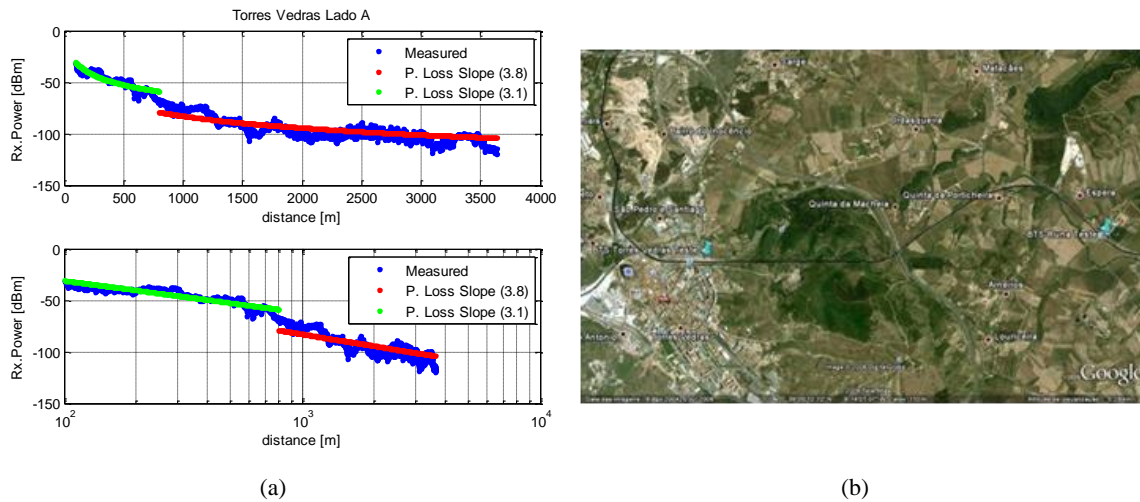
metros da estação de teste e para as restantes localizações 3.8. Relativamente ao tipo de ambiente este é caracterizado sempre como denso.



(a) (b)
Figura E.56 – Localização de teste da estação da Runa (Lado B).

Torres Vedras

Nesta localização foi colocado o terminal emissor à altura de 8 metros, de forma a que fosse possível uma mais fácil penetração do sinal nos três túneis existentes à saída da estação de Torres Vedras, estando a estação de comboio localizada a 50 metros de altitude.



(a) (b)
Figura E.57 – Localização de teste da estação de Torres Vedras.

Por análise dos resultados obtidos (na Figura E.57 (a)), observa-se uma variação do factor de decaimento do campo a partir dos 800 metros da estação de teste, este facto deve-se à existência dos já referidos túneis localizados à saída da estação. Verifica-se que o sinal consegue penetrar no primeiro túnel sem grande variação da potência, mas alguns metros após a saída do mesmo surge uma diminuição do sinal que provoca uma alteração do decaimento do campo. Pode-se considerar então para este cenário de teste

dois decaimentos do campo, 3.1 para os primeiros 800 metros e 3.8 para as restantes distâncias. Apesar da existência destes dos decaimentos de campo distintos o tipo de ambiente característico é classificado como do tipo denso.