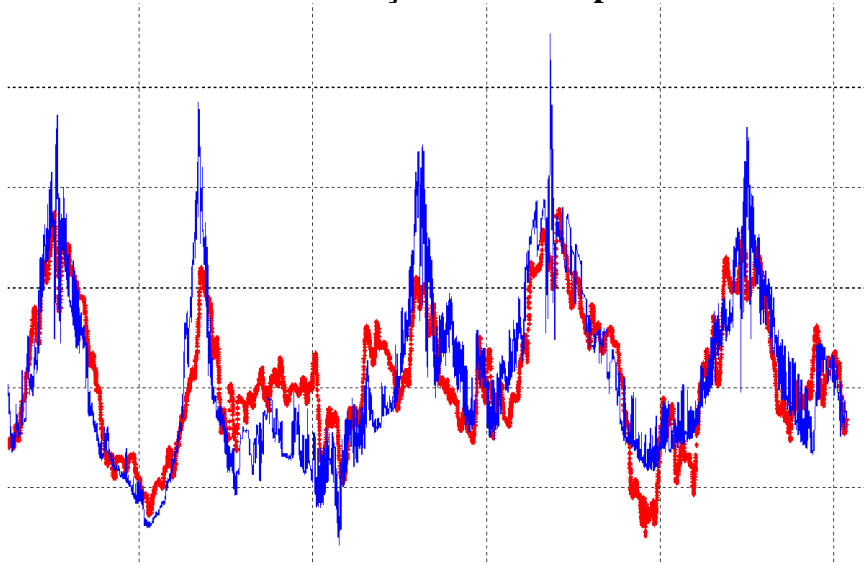


**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia de Electrónica e**  
**Telecomunicações e de Computadores**



**Estimação de Cobertura Rádio em Comunicações**  
**Ferrovíarias**

Gonçalo Filipe Marques Fernandes  
(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de  
Electrónica e Telecomunicações

**Orientadores:**

Mestre Nuno Cota  
Doutor António Serrador

**Júri:**

Presidente: Professora Doutora Maria Manuela Almeida Carvalho Vieira

**Vogais:**

Professor Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira  
Professor Doutor António João Nunes Serrador

**Dezembro de 2014**



## **Agradecimentos**

A conclusão deste projeto não seria possível sem a contribuição das pessoas que em seguida faço referência.

Gostaria de agradecer ao Professor Nuno Cota pelo apoio, orientação e por todo o trabalho e tempo despendidos, bem como pelo conhecimento partilhado ao longo deste projeto.

Ao Professor António Serrador pela disponibilidade em orientar este projeto.

Aos meus pais, à minha avó, ao meu irmão e à minha namorada por todo o apoio e motivação que me deram ao longo do desenvolvimento do projeto.

Ao meu amigo Tiago Correia por toda a ajuda e contribuição que teve neste projeto.



# Resumo

A estimação do nível de sinal num ambiente ferroviário deve ser efetuada com a maior precisão possível, garantindo a qualidade elevada das ligações ao longo de uma linha. Deste modo, devem utilizar-se modelos de propagação que permitam um elevado grau de precisão e, conseqüentemente, um erro pequeno.

O modelo de propagação ITU-R 1546-5 fornece as especificações necessárias para que esses requisitos sejam cumpridos, pois permite estimar o nível de sinal tendo em conta as obstruções, os perfis de terreno e os diferentes ambientes.

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um *software* que implemente o modelo ITU-R 1546-5 e permita a aferição da sua qualidade, comparando-o com medidas de sinal rádio e medidas de sinal preditas através de um modelo com qualidade de predição comprovada, o modelo de Okumura-Hata.

A aferição da qualidade do modelo é feita, recorrendo a três parâmetros de erro estatístico:

- o erro médio;
- a raiz do erro quadrático médio;
- o desvio padrão do erro.

Quanto menor for o valor destes parâmetros, maior será a qualidade do modelo de predição.

As comparações são feitas entre o modelo ITU-R 1546-5 e as medidas de sinal rádio, o modelo de Okumura-Hata e as medidas de sinal rádio, para todas as estações base das linhas de Cascais, Vendas Novas-Évora e Algarve.

Os resultados finais obtidos permitem comprovar a aplicabilidade do modelo de predição ITU-R 1546-5, em ambientes rurais, com poucas obstruções ao sinal, tendo uma melhor prestação que o modelo Okumura-Hata neste tipo de ambientes.

## Palavras-chave:

ITU-R 1546-5; Modelos de propagação; Linhas Ferroviárias; Estatística do erro.

# Abstract

The estimation of the signal level in a railway environment should be done with the most possible precision, ensuring the high quality of the signal level along the railway. Therefore the propagation models that one shall use, must give a high level of accuracy and, consequently, a small error.

The propagation model ITU-R 1546-5 provides the necessary specifications so that these requirements are met, because it allows the estimation of a signal level taking into account the clutter, the terrain profile and the different environments.

The work's objective is to develop a software that implements the ITU-R 1546-5 model and allow the assessment of its quality by comparing it to radio signal measures, and by comparing a model with proven prediction quality, the Okumura-Hata model, with radio signal measures, as well.

The quality assessment of the ITUR model is made by using three parameters of statistical error:

- the mean error,
- the root mean square error
- the standard deviation of the error.

The smaller the value of these parameters, the better the quality of the prediction model.

The comparisons are made between the ITU-R 1546-5 model and the radio signal measures, as well as between the Okumura-Hata and the radio signal measures for all the transmitter stations of Cascais, Vendas Novas-Évora and Algarve.

The final results prove the applicability of the prediction model ITU-R 1546-5, in rural environments, with few signal obstructions, having a better performance in this type of environments than the Okumura-Hata model.

## Keywords:

ITU-R 1546-5; Propagation Models; Railways; Statistical Error.

# Índice

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vi
Índice.....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas .....	xi
Lista de Acrónimos .....	xiii
Lista de Símbolos.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Motivação .....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Estrutura do trabalho .....	3
2. Modelo de propagação ITU-R 1546-5 .....	5
2.1. Introdução .....	5
2.2. Predição da atenuação de percurso.....	5
2.3. Curvas de atenuação de percurso .....	7
2.4. Interpolação do campo elétrico em função da frequência .....	10
2.5. Interpolação do campo elétrico em função da distância.....	11
2.6. Interpolação do campo elétrico em função da altura da antena do emissor .....	12
2.7. Campo elétrico para altura da antena do emissor inferior a 10 metros .....	13
2.8. Campo elétrico para distâncias inferiores a 1 km. ....	15
2.9. Traçados mistos.....	16
2.10. Fatores Corretivos .....	17
2.10.1. Ângulo de desobstrução do recetor .....	18
2.10.2. Altura da antena de receção .....	19

2.10.3. Diferença da altura das antenas .....	22
2.11. Valores máximos de campo elétrico .....	23
2.12. Conversão dos valores de campo elétrico para atenuação .....	23
3. Abordagem ao problema .....	25
3.1. Introdução .....	25
3.2. Abordagem.....	25
3.3. Aplicação do modelo ITU-R 1546-5.....	28
3.4. Medidas rádio.....	29
3.5. Tratamento das medidas rádio .....	30
3.6. Cenários de estudo .....	32
3.6.1. Linha de Cascais.....	32
3.6.2. Linha de Vendas Novas-Évora.....	33
3.6.3. Linha do Algarve .....	34
4. Análise dos resultados.....	37
4.1. Introdução .....	37
4.2. Análise estatística.....	37
4.3. Linha de Cascais .....	38
4.4. Linha de Vendas Novas-Évora .....	46
4.5. Análise da linha do Algarve.....	50
5. Conclusões.....	55
5.1. Trabalho Desenvolvido.....	55
5.2. Resultados.....	55
5.3. Trabalho futuro .....	56
Anexos.....	57
A. Modelo de propagação Okumura-Hata .....	59
Referências .....	63

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Campo elétrico para 600 MHz em terra. ....	6
Figura 2.2 – Comparação da atenuação obtida entre os modelos.....	7
Figura 2.3 - Campo elétrico para 600 MHz em terra. ....	8
Figura 2.4 - Campo elétrico para 600 MHz em mar. ....	9
Figura 2.5 - Campo elétrico para 2000 MHz em terra. ....	9
Figura 2.6 - Campo elétrico para 2000 MHz em mar. ....	10
Figura 2.7 - Fator básico de interpolação para traçados mistos.....	17
Figura 2.8 - Ângulo de desobstrução, adaptado de [5]. ....	18
Figura 2.9 - Correção do ângulo de desobstrução. ....	19
Figura 2.10 - Altura da antena do emissor, retirado de [2]. ....	20
Figura 2.11 – Representação das dimensões utilizadas em (2.18). ....	22
Figura 3.1 - Fluxograma da abordagem ao problema. ....	26
Figura 3.2 - Fluxograma da aplicação do modelo ITU-R 1546-5. ....	28
Figura 3.3 - PRx-Aplicação do método de Lee. ....	31
Figura 3.4 - PRx vs PK-Todas as estações, filtrado.....	31
Figura 3.5 – Linha de Cascais, retirado de Railwave. ....	32
Figura 3.6 - Linha de Vendas Novas-Évora, retirado de Railwave.. ....	34
Figura 3.7 - Linha do Algarve. ....	35
Figura 4.1 – Predição para o repetidor de Santos. ....	39
Figura 4.2 - Predição para a estação base Alcântara B).....	40
Figura 4.3 - Predição para a estação base de Alcântara B) (PK 2.6 a 3.5).....	40
Figura 4.4 - Trajeto do sinal Alcântara B) -> PK 10. ....	41
Figura 4.5 - Predição para a estação base de Pedrouços B). ....	41
Figura 4.6 - Trajeto do sinal Pedrouços B) -> PK 11. ....	41

Figura 4.7 – Predição para a estação base de Pedrouços B) utilizando o método de traçados mistos do modelo Okumura-Hata. ....	42
Figura 4.8 - Predição para a estação base de São João A). ....	43
Figura 4.9 - Predição para a estação base de São João A), utilizando o método de Deygout. ....	44
Figura 4.10 - Indicadores de erro de predição para o modelo Okumura-Hata, na linha de Cascais.....	45
Figura 4.11 – Indicadores de erro de predição para o modelo ITU-R 1546-5, na linha de Cascais.....	45
Figura 4.12 - Predição para a estação base de Vendas Novas.....	46
Figura 4.13 - Predição para a estação base de Torre da Gadanha. ....	47
Figura 4.14 - Predição para a estação base de Torre da Gadanha utilizando o método de Deygout. ....	48
Figura 4.15 - Predição para a estação base de Casa Branca.....	48
Figura 4.16 - Indicadores de erro de predição para o modelo Okumura-Hata, na linha de Vendas Novas-Évora.....	49
Figura 4.17 - Indicadores de erro de predição para o modelo ITU-R 1546-5, na linha de Vendas Novas-Évora.....	49
Figura 4.18 - Predição para a estação base de Faro. ....	50
Figura 4.19 - Predição para a estação base de Faro utilizando o método de Deygout....	51
Figura 4.20 - Predição para a estação base do Livramento.....	52
Figura 4.21 - Predição para a estação base de Castro Marim.....	53
Figura 4.22 - Indicadores de erro de predição para o modelo Okumura-Hata, na linha do Algarve. ....	53
Figura 4.23 – Indicadores de erro de predição para o modelo ITU-R 1546-5, na linha do Algarve.....	54

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Frequências tabeladas, adaptada de [5]. .....	10
Tabela 2.2 - Valores de distância pré-definidas em km, adaptada de [5]. .....	11
Tabela 2.3 - Alturas da antena do emissor pré-definidas em m, adaptada de [5]. .....	12
Tabela 3.1 – Valores originais do modelo de Okumura-Hata. ....	27
Tabela 3.2 – Características da linha de Cascais. ....	32
Tabela 3.3 - Características da linha do Algarve. ....	35
Tabela 4.1 – Diferença entre o método de traçados misto do modelo ITU-R e do Okumura-Hata. ....	42
Tabela 4.2 - Diferença entre o modelo ITU-R com a correção do ângulo de desobstrução do recetor e com a aplicação do método de Deygout. ....	44
Tabela 4.3 - Diferença entre o modelo ITU-R com a correção do ângulo de desobstrução do recetor e com a aplicação do método de Deygout. ....	51



## **Lista de Acrónimos**

*ANACOM - Autoridade Nacional para as Comunicações*

*ESD – Error Standard Deviation*

*ERMETS - European Rail Traffic Management*

*ETCS - European Train Control System*

*GSM-R - Global System for Mobile Communications – Railway*

*ITU-R - International Telecommunication Union – Radiocommunication sector*

*ME - Medium Error*

*PK - Ponto Quilométrico*

*RMSE - Root Mean Square Error*



## Lista de Símbolos

$\theta_{tca}$  – Ângulo de desobstrução

$A$  – Fator de interpolação

$C_{tca}$  – Correção do ângulo de desobstrução do recetor

$C_{rha}$  – Correção à altura da antena de receção

$C_{hdiff}$  – Correção da diferença da altura das antenas

$C_{h1neg10}$  – Correção  $C_{h1}$ , em dB, para altura da antena do emissor igual a -10 metros

$d$  – Distância desejada para a predição

$dB$  – Decibel

$dBm$  – Decibel – milliwatt

$d_{inf}$  – Distância menor, mais próxima de  $d$

$d_{sup}$  – Distância maior, mais próxima de  $d$

$d_{slope}$  – Gradiente da distância entre as antenas.

$E$  – Campo elétrico

$E_{inf}$  – Campo elétrico menor;

$E_{sup}$  – Campo elétrico maior

$E_{land}(d_{total})$  – Campo elétrico referente a terra

$E_{sea}(d_{total})$  – Campo elétrico referente a mar

$E_{10}$  e  $E_{20}$  – Campo elétrico, em dB ( $\mu V/m$ ), para uma altura da antena do emissor igual a 10 e 20

$E_{fs}$  – Campo elétrico de espaço livre para 1 kW e.r.p

$E_{se}$  – Melhoramento para as curvas de mar

$E_{max}$  – Valor máximo do campo elétrico

$f$  – Frequência

$f_{inf}$  – Frequência menor

$f_{sup}$  – Frequência maior

$F_{sea}$  – Percentagem de água no percurso total.

$h_1$  – Altura da antena do emissor acima da altura média do terreno (0,8d)

$h_{inf}$  – Altura menor, mais próxima de  $h_1$

$h_{sup}$  – Altura maior, mais próxima de  $h_1$

$h_a$  – Altura da antena do emissor acima do nível do solo

$h_2$  – Altura da antena recetora acima do nível do solo

$h_{tter}$  – Altura da antena do emissor acima do nível do mar

$h_{rter}$  – Altura da antena recetora acima do nível do mar

$L_B$  – Atenuação de propagação

$n$  - Número de amostras

$P_m$  - Potência medida

$P_p$  – Potência predita

$R_2'$  – Altura equivalente do terreno

$t$  – Percentagem de tempo

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

O GSM-R, *Global System for Mobile Communications – Railway*, é uma tecnologia sem fios utilizada como padrão de comunicação nas linhas ferroviárias de toda a Europa. Esta tecnologia, desenvolvida a partir do GSM, tem como objetivo assegurar um modelo comum de comunicação, garantindo assim a interoperabilidade de todo o sistema de comunicações ferroviário. Este sistema é de utilização obrigatória nas linhas, no sistema de comunicação e no suporte às ligações rádio envolvidas no sistema de sinalização ferroviária, designado por European Rail Traffic Management System (ERTMS), que é responsável pela sinalização e gestão dos caminhos de ferro europeus, sendo o GSM-R e o European Train Control System (ETCS), este último parte integrante do sistema ERTMS, responsável pela sinalização, controlo e proteção comboio em caso de falha humana, partes fundamentais deste sistema que tem como objetivo fundamental a comunicação entre linhas e comboios [1].

O sistema GSM-R utiliza duas bandas de 4 MHz: a banda de *uplink* opera na faixa de frequência 876 - 880 MHz enquanto a banda de *downlink* opera na faixa de frequência 921 - 925 MHz, cada banda utiliza 19 canais com 200 kHz de largura de banda e uma banda de guarda de 200 kHz [2].

O sistema GSM-R, apesar de ser baseado na norma GSM, tem certos fatores que se devem ter em conta, e que diferem do sistema tradicional. Um desses fatores é o nível mínimo de sinal recebido, que deve ser de pelo menos -98 dBm, com uma probabilidade de cobertura de 95 % em cada intervalo de localização, sendo este último um segmento da linha com 100 metros de comprimento. No caso do GSM a probabilidade de cobertura aplica-se a toda a área da célula. No caso do recetor, a velocidade máxima permitida, no GSM-R, é de 500 km/h, devido à aplicabilidade do sistema a comboios de alta velocidade, ao contrário dos 250 km/h permitidos pelo GSM [2].

## **1.2. Motivação**

Em trabalhos desenvolvidos em colaboração com o operador público de comunicações ferroviárias português, REFERTelecom, o modelo de estimação de cobertura rádio Okumura-Hata [3] tem apresentado resultados muito satisfatórios [4]. Contudo, interessa confrontar os resultados obtidos até ao momento nos diversos estudos desenvolvidos com outros modelos de propagação, de forma a comprovar a adequabilidade do modelo Okumura-Hata à estimação de cobertura rádio em ambientes ferroviários, ou a encontrar soluções mais adequadas ao problema em causa.

Um dos modelos mais utilizados em alternativa ao Okumura-Hata é o modelo ITU-R 1546-5 [5]. Este modelo tem apresentado resultados muito encorajadores em estudos de estimação de cobertura em ambientes não urbanos, como é tipicamente o caso dos ambientes ferroviários.

A existência de um modelo de propagação, pouco estudado na aplicação a linhas ferroviárias, mas que possa chegar a resultados semelhantes ao modelo de Okumura-Hata serve de motivação ao estudo do modelo ITU-R 1546-5. O modelo ITU-R 1546-5 permite calcular a atenuação de percurso, com base na interpolação de valores de curvas de atenuação de percurso, adaptar o cálculo do campo elétrico às diferentes alturas de antena do emissor. Permite também considerar obstáculos ao sinal, através do cálculo de fatores corretivos, e calcular a influência da água na propagação do sinal. Esta capacidade de adaptação às diversas situações e ambientes de propagação torna o modelo ITU-R 1546-5 um bom alvo de estudo.

## **1.3. Objetivos**

O estudo da aplicação do modelo ITU-R 1546-5 às comunicações ferroviárias é o objetivo principal deste trabalho, este estudo será feito na linha de Cascais, na linha de Vendas Novas-Évora e na linha do Algarve, cada uma com particularidades distintas, tais como a presença de água ou o tipo de antena utilizado em cada estação base. A adaptabilidade do modelo ITUR 1546-5 a essas mesmas particularidades e a diferentes ambientes de propagação definirá o sucesso ou insucesso da aplicação do modelo às linhas ferroviárias.

A adaptabilidade do modelo é aferida através de uma análise estatística do erro. Esta análise é feita comparando o resultado da predição, calculado a partir da implementação

do modelo, com as medidas de sinal rádio. As medidas de sinal rádio são recolhidas através de aparelhos de medição, que registam o valor do sinal em vários pontos da linha. Depois de recolhidas, são tratadas e só depois podem ser comparadas com os resultados teóricos. A análise estatística do erro é efetuada também para o modelo de Okumura-Hata permitindo assim uma referência de comparação com o modelo ITUR 1546-5.

## **1.4. Estrutura do trabalho**

Este trabalho começa por apresentar um estudo teórico sobre o modelo de propagação ITU-R 1546-5, no Capítulo 2. São apresentados os fatores corretivos aplicados na predição, são explicadas as interpolações do campo elétrico em função da frequência, da distância e da altura da antena do emissor e são apresentadas as curvas de atenuação de percurso do campo elétrico. O método de traçados mistos é explicado em seguida, bem como duas situações particulares no cálculo do campo elétrico, no caso da altura do emissor ser inferior a 10 metros e no caso da distância entre o emissor e o recetor ser inferior a 1 km. Por fim são explicados os valores máximos de campo elétrico permitidos e a conversão dos valores de campo elétrico para atenuação de propagação.

No Capítulo 3 é explicada a abordagem seguida neste trabalho bem como a aplicação do modelo ITU-R 1546-5. São apresentados os casos em estudo, a linha ferroviária de Cascais, a linha ferroviária de Vendas Novas-Évora e a linha ferroviária do Algarve, os seus ambientes de propagação, morfologia do terreno e a configuração das suas estações base e repetidores. São também referidos os processos de tratamentos das medidas de sinal rádio antes de serem comparadas aos resultados teóricos.

No Capítulo 4 é explicada a análise estatística das medidas, recorrendo a três indicadores estatísticos de erro, o erro médio absoluto, a raiz do erro quadrático médio e o desvio padrão do erro. Por fim é feita a análise dos resultados por cada linha ferroviária e respetivas estações base, ou repetidores

Por fim, o Capítulo 5 é constituído pelas conclusões dos resultados obtidos e pelas propostas de trabalho futuro.



## **2. Modelo de propagação ITU-R 1546-5**

### **2.1. Introdução**

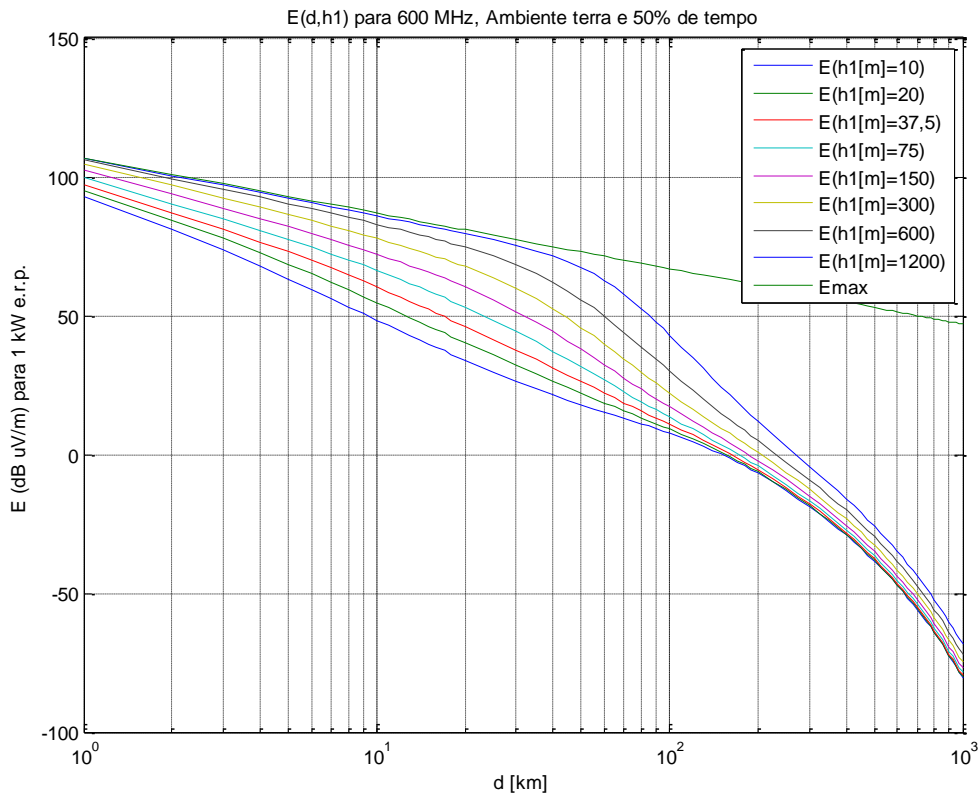
A predição da atenuação de percurso é um dos pontos mais importantes neste trabalho, pois permite ter uma noção teórica do nível de sinal ao longo da linha ferroviária. A predição de atenuação de percurso é bastante importante no dimensionamento de sistemas de comunicações móveis pois permite estimar o nível de sinal ao longo da linha, de acordo com as parametrizações de cada estação base, e assim verificar se o nível de sinal mínimo respeita as condições do GSM-R.

Neste capítulo é apresentado o modelo de propagação ITU-R 1546-5 [5], explicando-se os princípios utilizados na definição do modelo e o método de aplicação do mesmo, para a determinação da intensidade de campo elétrico. Além do modelo base, serão apresentados os fatores corretivos de interesse para aplicação no presente trabalho.

### **2.2. Predição da atenuação de percurso**

O modelo de propagação ITU-R 1546-5 permite fazer predições de cobertura rádio na gama de frequências 30 – 3000 MHz e é destinado à estimação de cobertura rádio em ambientes terrestres, sobre mar ou mistos, até 1000 km, com antenas de altura não superior a 3000 metros. É baseado na interpolação, ou extrapolação, de curvas de campo elétrico obtidas empiricamente, em função da distância à estação base, da altura da antena, da frequência e da percentagem de tempo.

Na Figura 2.1 estão ilustradas curvas de campo elétrico, na situação de propagação sobre terra, para a frequência de 600 MHz, para uma percentagem de tempo de 50%, em função da distância e para vários valores de altura do emissor. Nesta figura está igualmente representada a curva que representa o limite máximo de campo elétrico, calculado a partir da expressão de propagação em espaço livre.



**Figura 2.1 - Campo elétrico para 600 MHz em terra.**

Tal como outros modelos de predição, o modelo inclui correções aos resultados obtidos para atenuação, que dependem de diversos fatores. Além destas correções, o modelo contém diversos valores tabelados para diferentes valores de potência, frequência ou até mesmo distância à estação base, pelo que são fornecidas expressões que permitam calcular valores aproximados de acordo com os parâmetros apresentados.

Os parâmetros utilizados no cálculo do campo elétrico nem sempre são comuns aos valores tabelados, nomeadamente, a frequência, a distância ou a altura da antena do emissor. Nestes casos é necessário fazer interpolação ou uma extrapolação. Caso existam diferentes tipos de ambientes de propagação no percurso entre o emissor e o recetor, é necessário aferir a influência de cada um no campo elétrico, neste caso é feita a predição para traçados mistos.

Na Figura 2.2 é efetuada uma comparação entre o modelo ITU-R 1546-5, o modelo de Okumura-Hata, e a atenuação de propagação em espaço livre. Considerou-se uma frequência de 920 MHz, uma altura da antena do emissor de 10 metros e uma altura da antena de receção de 4 metros, de modo a ser feita uma aproximação comparativa ao GSM-R.

Pela análise da figura verifica-se que os valores de atenuação, obtidos no modelo de espaço livre, são menores que os restantes, pois este modelo assume uma situação ideal. Os modelos ITUR-1546-5 e Okumura-Hata evoluem de forma semelhante, verificando-se uma diferença média de 16 dB. O modelo ITU-R 1546-5 considera sempre a distância igual a 1 km, quando esta varia entre 0,04 km e 1 km, daí os valores calculados neste intervalo serem constantes. Só é utilizado o valor real da distância no cálculo dos fatores corretivos.

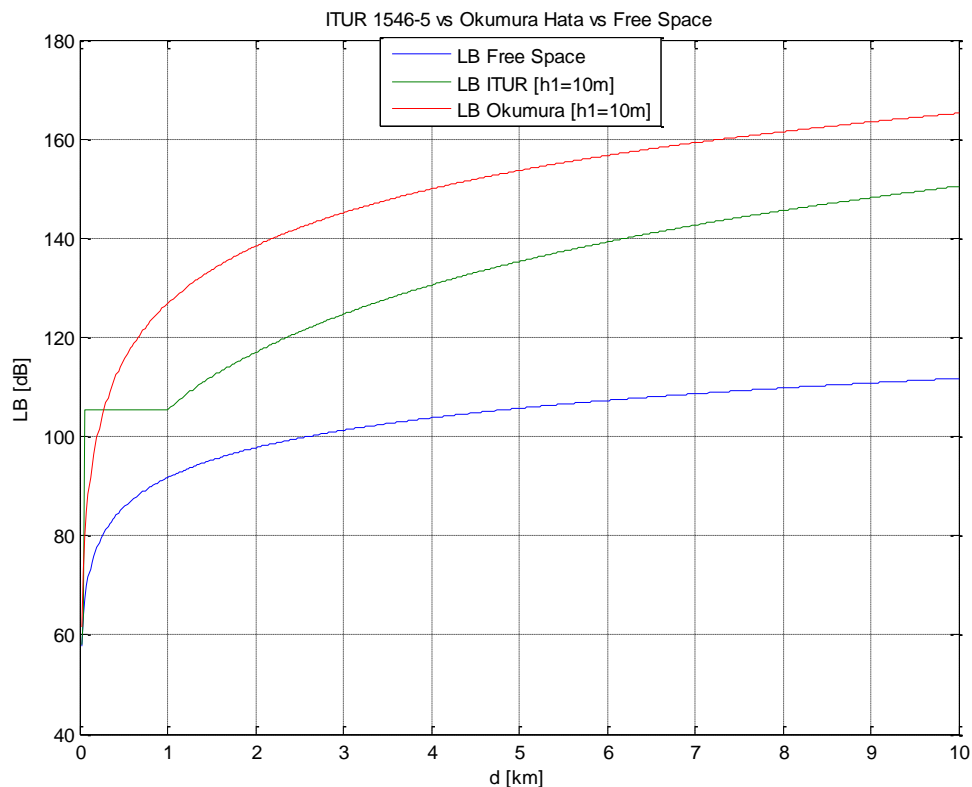


Figura 2.2 – Comparação da atenuação obtida entre os modelos.

### 2.3. Curvas de atenuação de percurso

As curvas de atenuação de percurso em seguida apresentadas são resultado de medições feitas maioritariamente em países com climas temperados, como exemplo a Europa, para os percursos terrestres, e o mar Mediterrâneo, para percursos de mar, e representam o andamento do campo elétrico em função da altura do emissor e da distância entre este e o recetor, para uma determinada frequência e percentagem de tempo. A partir destas curvas é possível retirar os valores tabelados do campo elétrico para a altura do emissor e à distância desejada, sendo assim possível fazer a interpolação, ou extrapolação, dos valores do mesmo. As curvas de atenuação de percurso utilizadas no trabalho referem-se

às frequências de 600 MHz e 2000 MHz, nos ambientes de terra e de mar, para uma percentagem de tempo de 50%. Todas as curvas estão limitadas pelo valor do campo elétrico em espaço livre.

Na Figura 2.3 estão representadas as curvas de atenuação de percurso para uma frequência de 600 MHz, para uma percentagem de tempo de 50%, num percurso terrestre, para as diferentes alturas de emissor ( $h_1$ ).

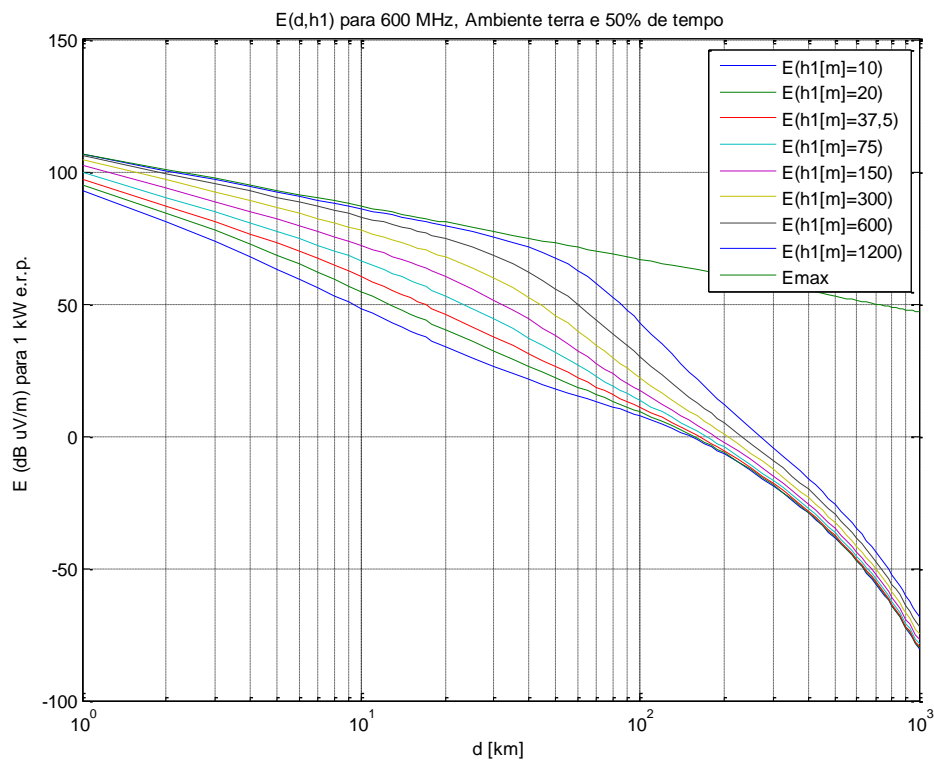


Figura 2.3 - Campo elétrico para 600 MHz em terra.

Na Figura 2.4 estão demonstradas as curvas de atenuação de percurso para uma frequência de 600 MHz, para uma percentagem de tempo de 50%, num percurso de mar, para as diferentes alturas de emissor ( $h_1$ ).

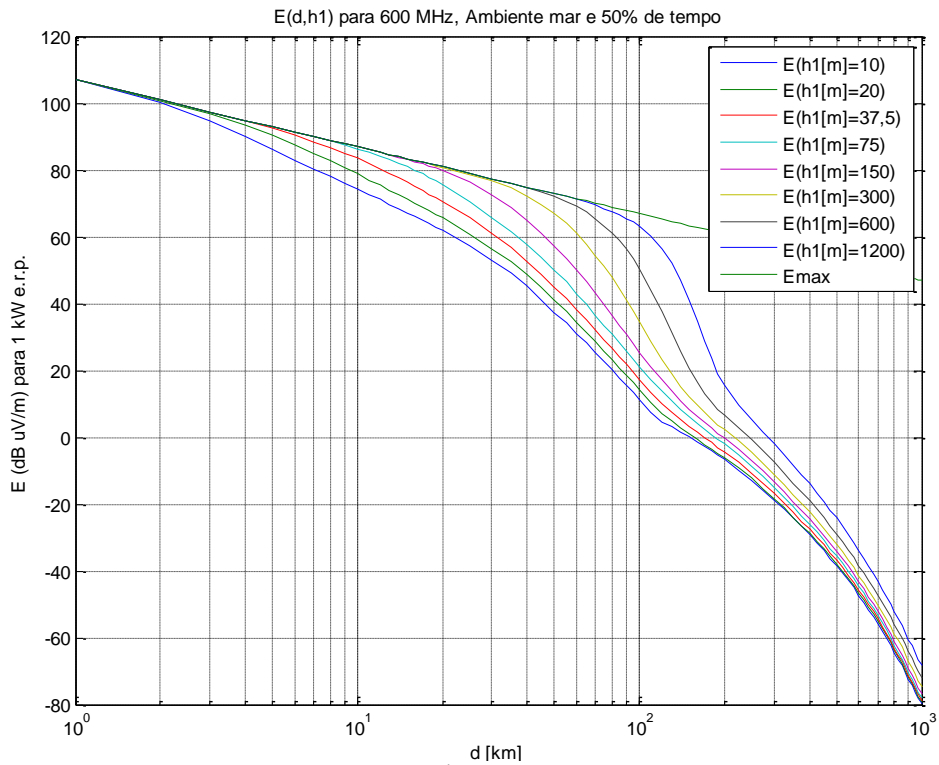


Figura 2.4 - Campo elétrico para 600 MHz em mar.

Na Figura 2.5 estão reproduzidas as curvas de atenuação de percurso para uma frequência de 2000 MHz, para uma percentagem de tempo de 50%, num percurso terrestre, para as diferentes alturas de emissor ( $h_1$ ).

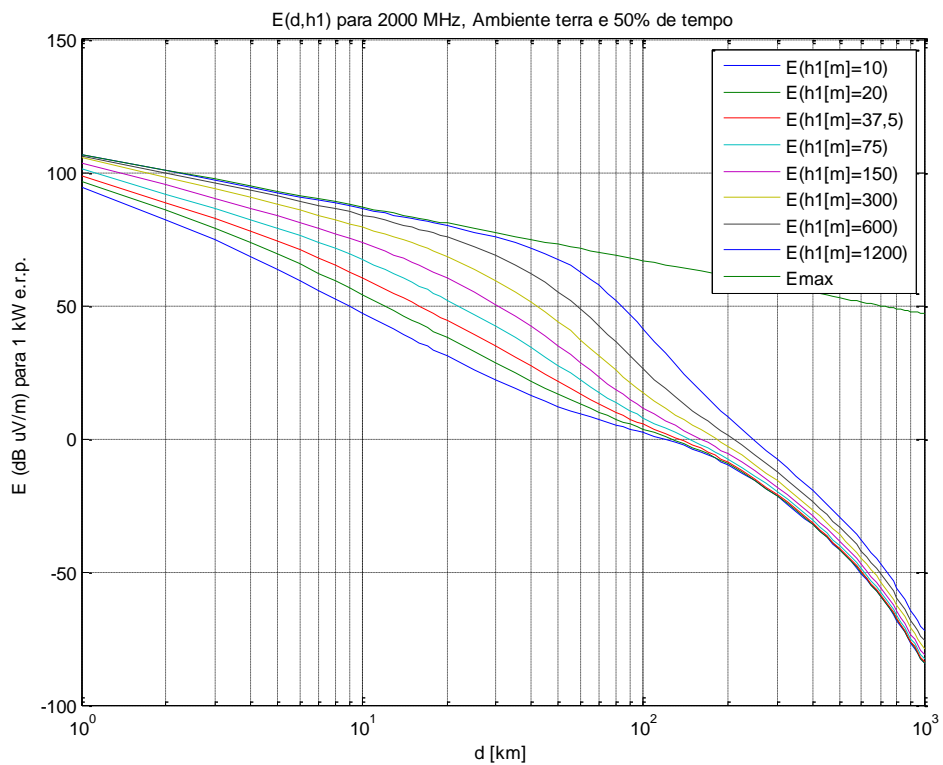


Figura 2.5 - Campo elétrico para 2000 MHz em terra.

Na Figura 2.6 estão representadas as curvas de atenuação de percurso para uma frequência de 2000 MHz, para uma percentagem de tempo de 50%, num percurso de mar, para as diferentes alturas de emissor ( $h_1$ ).

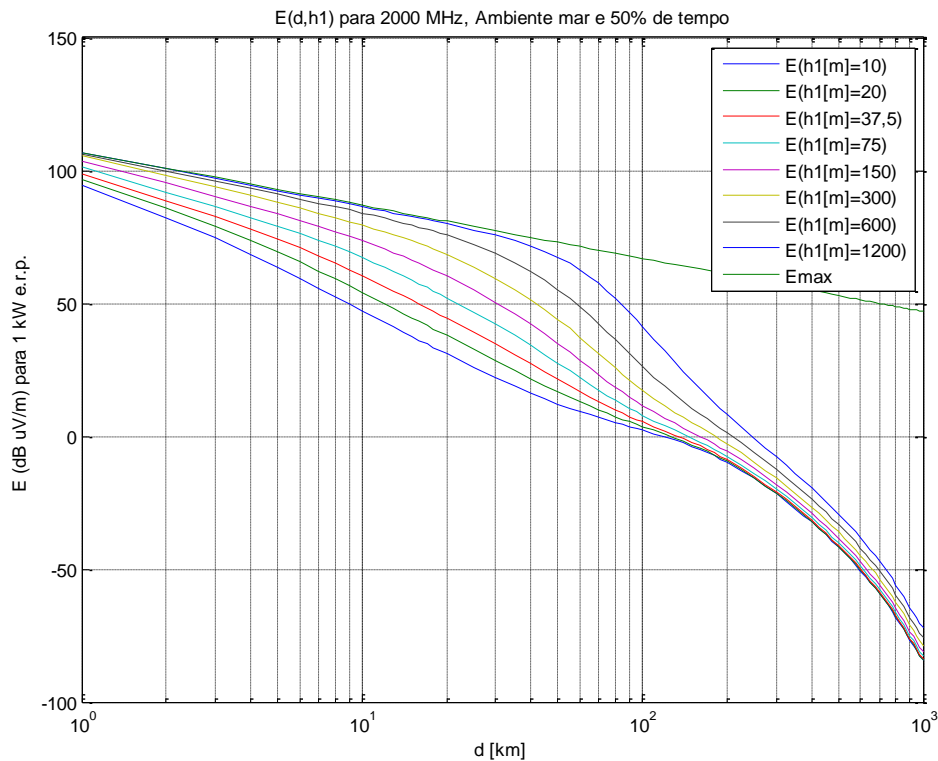


Figura 2.6 - Campo elétrico para 2000 MHz em mar.

A partir das curvas apresentadas nesta secção é possível interpolar/extrapolar os valores de frequência, altura do emissor e distância desejadas, de modo a implementar o modelo corretamente.

## 2.4. Interpolação do campo elétrico em função da frequência

A interpolação ou extrapolação do campo elétrico em função da frequência deve ser efetuada quando a frequência desejada não consta nos valores de frequência tabelados. Caso a frequência desejada seja igual aos valores tabelados não é necessário interpolar ou extrapolar o valor do campo elétrico. Estes valores tabelados, presentes na Tabela 2.1, representam as frequências utilizadas aquando da recolha das medidas de campo elétrico.

Tabela 2.1 - Frequências tabeladas, adaptada de [5].

Frequências tabeladas [MHz]
100
600
2000

As frequências usadas neste trabalho são todas na gama dos 900 MHz, sendo assim é apenas necessário fazer a interpolação, considerando a frequência nominal inferior 600 MHz e a frequência nominal superior 2000 MHz. A extrapolação apenas é necessária quando se utilizam frequências inferiores a 100 MHz ou superiores a 2000 MHz. Para percursos terrestres ou mar onde a frequência seja superior a 100 MHz deve calcular-se o campo elétrico de acordo com (2.1).

$$E_{[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})]} = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \times \log(f/f_{inf})/\log(f_{sup}/f_{inf}) \quad (2.1)$$

onde:

- $f_{[\text{MHz}]}$  – Frequência em MHz.
- $f_{inf}$  [MHz] – Frequência menor, mais próxima de  $f$ .
- $f_{sup}$ [MHz] – Frequência maior, mais próxima de  $f$ .
- $E_{inf}$  – Campo elétrico para  $f_{inf}$ .
- $E_{sup}$  – Campo elétrico para  $f_{sup}$ .

Os valores de  $E_{sup}$  e  $E_{inf}$  são retirados das curvas da figuras 2.3 a 2.6.

## 2.5. Interpolação do campo elétrico em função da distância

A interpolação do campo elétrico em função da distância deve ser efetuada quando a distância desejada não constar dos valores apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores de distância pré-definidas em km, adaptada de [5].

Distâncias pré-definidas, em km					
1	14	55	140	375	700
2	15	60	150	400	725
3	16	65	160	425	750
4	17	70	170	450	775
5	18	75	180	475	800
6	19	80	190	500	825
7	20	85	200	525	850
8	25	90	225	550	875
9	30	95	250	575	900
10	35	100	275	600	925
11	40	110	300	625	950
12	45	120	325	650	975
13	50	130	350	675	1000

Quando a distância desejada não constar da tabela devem ser utilizados dois valores da tabela, a distância inferior mais próxima do valor desejado e a distância superior mais próxima do valor desejado, no cálculo do campo elétrico segundo (2.2).

$$E_{[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})]} = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \times \log(d/d_{inf})/\log(d_{sup}/d_{inf}) \quad (2.2)$$

onde:

- $d_{[\text{km}]}$  – Distância desejada para a predição em km.
- $d_{inf[\text{km}]}$  – Distância menor, mais próxima de  $d$  em km.
- $d_{sup [\text{km}]}$  – Distância maior, mais próxima de  $d$  em km.
- $E_{inf}$  – Campo elétrico para  $d_{inf}$ .
- $E_{sup}$  – Campo elétrico para  $d_{sup}$ .

O valor de  $d$  não deve ser maior que 1000 km.

Os valores de  $E_{sup}$  e  $E_{inf}$  são retirados das curvas das figuras 2.3 a 2.6.

## 2.6. Interpolação do campo elétrico em função da altura da antena do emissor

A interpolação do campo elétrico em função da altura da antena do emissor deve ser efetuada quando a altura desejada não constar dos valores apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Alturas da antena do emissor pré-definidas em m, adaptada de [5].

Alturas da antena do emissor em m
10
20
37,5
75
150
300
600
1200

Quando a altura desejada não constar da tabela devem ser usados dois valores da tabela, a altura inferior mais próxima do valor desejado e a altura superior mais próxima do valor desejado, no cálculo do campo elétrico de acordo com (2.3).

$$E_{[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})]} = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \times \log(h_1/h_{inf})/\log(h_{sup}/h_{inf}) \quad (2.3)$$

onde:

- $h_1$  [m] – Altura desejada para a predição em metros.
- $h_{inf}$  [m] – Altura menor, mais próxima de  $h_1$  em metros.
- $h_{sup}$  [m] – Altura maior, mais próxima de  $h_1$  em metros.
- $E_{inf}$  – Campo elétrico para  $h_{inf}$ , à distância desejada.
- $E_{sup}$  – Campo elétrico para  $h_{sup}$ , à distância desejada.

O valor de  $h_1$  não pode ser maior que 3000 metros.

Os valores de  $E_{sup}$  e  $E_{inf}$  são retirados das curvas das figuras 2.3 a 2.6.

## 2.7. Campo elétrico para altura da antena do emissor inferior a 10 metros

O método para o cálculo do campo elétrico para altura da antena do emissor inferior a 10 metros depende do tipo de ambiente em que se está a fazer a predição, ou seja, terra ou mar, por isso existem dois métodos para o seu cálculo. Para percursos terrestres à distância desejada, calcula-se o campo elétrico de acordo com (2.4).

$$E_{[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})]} = E_{zero} + 0,1 * h_1(E_{10} - E_{zero}) \quad (2.4)$$

onde:

$$E_{zero} [\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})] = E_{10} + 0,5(C_{1020} + C_{h1neg10}) \quad (2.4.1)$$

$$C_{h1neg10} = 6,03 - J(v) \quad (2.4.2)$$

$$J(v) = \left[ 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \right] \quad (2.4.3)$$

$$v = 3,92 \times 0,064 \quad (2.4.4)$$

- $C_{h1neg10}$  – Correção  $C_{h1}$ , em dB, para altura da antena do emissor igual a -10 metros.

- $E_{10}$  e  $E_{20}$  – Campo elétrico, em dB ( $\mu\text{V}/\text{m}$ ), calculado na secção 2.4 para uma altura da antena do emissor igual a 10 e 20, respectivamente.

Nota:  $C_{h_{1neg10}}$  e  $C_{1020}$  devem ser ambos valores negativos.

Para percursos de mar:

A altura da antena do emissor não deve ser inferior a 1 metro. O procedimento a seguir apresentado requer a distância à qual 60% da primeira zona de *Fresnel* esteja desobstruída pela superfície do mar. Esta distância é dada por (2.5).

$$D_{h1} [\text{km}] = D_{06}(f, h_1, 10) \quad (2.5)$$

onde:

- $f_{[\text{MHz}]}$  – Frequência em MHz.
- $D_{06}$  – Definido na secção 2.10.2.

Caso a distância seja maior que  $D_{06}$ , é necessário calcular a distância à qual 60% da primeira zona de *Fresnel* esteja desobstruída pela superfície do mar, considerando a altura do emissor igual a 20 metros.

$$D_{20} [\text{km}] = D_{06}(f, 20, 10) \quad (2.6)$$

O valor campo elétrico à distância e altura da antena do emissor desejadas.

$$E_{[(\mu\text{V}/\text{m})]} = \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} E_{max}, & d \leq D_{h1} \\ E_{Dh1} + (E_{D20} + E_{Dh1}) \log(d/D_{h1})/\log(D_{20}/D_{h1}), & D_{h1} < d < D_{20} \\ E'(1 - F_s) + E'' * F_s, & d \geq D_{20} \end{cases}$$

onde:

- $E_{max}$  – Valor máximo do campo elétrico, à distância desejada, calculado segundo a secção 2.11.
- $E_{Dh1}$  –  $E_{max}$  para a distância  $D_{h1}$ , calculado segundo a secção 2.11.
- $E_{D20} = E_{10}(D_{20}) + (E_{20}(D_{20}) - E_{10}(D_{20})) \log(h_1/10) / \log(20/10)$  (2.7.1)

- $E_{10}(x)$  – Campo elétrico considerando a altura da antena do emissor igual a 10 metros interpolado para a distância  $x$ .
- $E_{20}(x)$  – Campo elétrico considerando a altura da antena do emissor igual a 20 metros interpolado para a distância  $x$ .
- $E' = E_{10}(d) + (E_{20}(d) - E_{10}(d)) \log(h_1/10) / \log(20/10)$  (2.7.2)
- $E'' = E_{zero} + 0,1 \times h_1(E_{10} - E_{zero})$ , à distância desejada. (2.7.3)
- $F_s = (d - D_{20})/d$  (2.7.4)

## 2.8. Campo elétrico para distâncias inferiores a 1 km.

O cálculo do campo elétrico, para distâncias inferiores a 1 km, baseia-se no pressuposto de que à medida que a distância, inferior a 1 km diminui, a probabilidade de não existirem obstruções ao sinal aumenta. Para distâncias inferiores a 0,04 km, assume-se que o emissor e o recetor se encontram em linha de vista e calcula-se o campo elétrico para espaço livre. Este processo é descrito na expressão (2.8), para distâncias iguais ou inferiores a 0,04 km, e na expressão (2.9), para distâncias superiores a 0,04 km e inferiores a 1 km.

$$E_{[(\mu V/m)]} = 106,9 - 20 \log(d_{slope}) \quad (2.8)$$

$$E_{[(\mu V/m)]} = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \log(d_{slope}/d_{inf}) / \log(d_{sup}/d_{inf}) \quad (2.9)$$

onde:

- $d_{slope}$  [km] – Gradiente da distância calculado em 2.10.3 em km.
- $d_{inf}$  [km] – Gradiente da distância calculado em 2.10.3, para  $d = 0,04$  km, em km.
- $d_{sup}$  [km] – Gradiente da distância calculado em 2.10.3, para  $d = 1$  km, em km.
- $E_{inf} - 106,9 - 20 \log(d_{inf})$  (2.9.1)
- $E_{sup}$  – Campo elétrico calculado considerando  $d = 1$  km.

## 2.9. Traçados mistos

O método de traçados mistos é utilizado quando o ambiente de propagação assim o impuser, ou seja, pressupõe a existência de duas, ou mais, zonas de propagação. Neste trabalho são estudados traçados mistos compostos por terra e mar. O campo elétrico de um traçado misto é calculado de acordo com (2.10).

$$E_{[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})]} = (1 - A) \times E_{\text{land}}(d_{\text{total}}) + A \times E_{\text{sea}}(d_{\text{total}}) \quad (2.10)$$

onde:

- $A$  – Fator de interpolação de traçados mistos.
- $E_{\text{land}}(d_{\text{total}})$  – Campo elétrico referente a terra.
- $E_{\text{sea}}(d_{\text{total}})$  – Campo elétrico referente a mar.

O fator de interpolação de traçados mistos é dado pelas seguintes expressões.

$$\text{○ } A = A_0(F_{\text{sea}})^V \quad (2.10.1)$$

$$\text{○ } A_0(F_{\text{sea}}) = 1 - (1 - F_{\text{sea}})^{2/3} \quad (2.10.2)$$

$$\text{○ } V = \max\left[1, 1 + \frac{\Delta}{40}\right] \quad (2.10.3)$$

$$\text{○ } \Delta = E_{\text{sea}}(d_{\text{total}}) - E_{\text{land}}(d_{\text{total}}) \quad (2.10.4)$$

em que  $F_{\text{sea}}$  é a percentagem de água no percurso total.

Na Figura 2.7 é apresentado o andamento do fator  $A_0$  em função da percentagem de água no percurso total,  $F_{\text{sea}}$ .

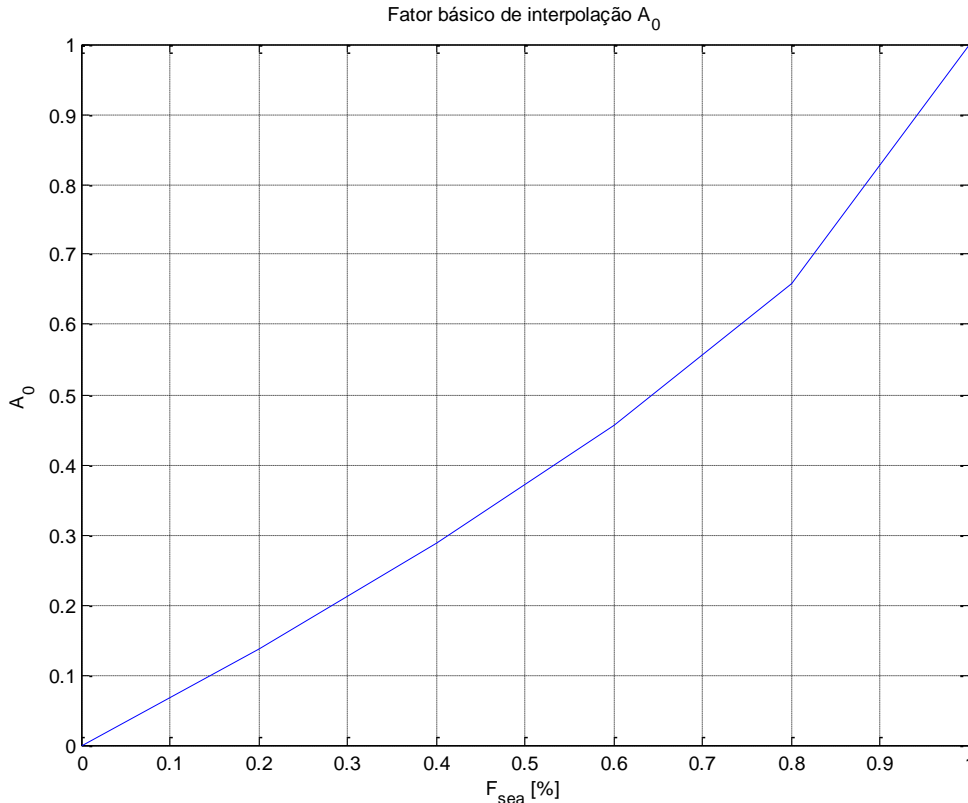


Figura 2.7 - Fator básico de interpolação para traçados mistos.

## 2.10. Fatores Corretivos

O modelo de propagação ITU-R 1546-5 prevê a utilização de diversos fatores de correção que permitem ajustar a predição de cobertura, de acordo com as características particulares do ambiente de propagação. Estes fatores corretivos deverão ser determinados com base na informação das características do emissor e do ambiente envolvido na propagação do sinal. Os fatores são:

- Ângulo de desobstrução do recetor;
- Correção para a altura da antena de receção;
- Correção da diferença da altura das antenas;
- O espalhamento troposférico do sinal;
- Correção do perfil do terreno.

Todas estas correções serão abordadas nas secções seguintes. O fator de correção do perfil de terreno não foi aplicado neste trabalho pois, dada a altura de mastro normalmente utilizada em coberturas rádio de sistemas ferroviários, nunca existe obstrução da antena emissora nas suas imediações. O fator de correção do espalhamento troposférico do sinal

não foi tido em conta neste trabalho pois a distância entre o emissor e recetor é relativamente curta comparada com a curvatura da terra e a altura das antenas é baixa.

### 2.10.1. Ângulo de desobstrução do recetor

A correção do ângulo de desobstrução do recetor deve ser aplicada quando se pretende uma maior precisão na predição do campo elétrico, por exemplo numa pequena área de receção, e apenas deve ser calculada quando o recetor se encontra num ambiente de terra.

O ângulo de desobstrução do recetor,  $\theta_{tca}$ , é o ângulo que a linha tangente a todos os obstáculos faz com uma linha horizontal na direção do emissor, não ultrapassando os 16 km. Este ângulo não pode ser menor que  $0,55^\circ$ , nem maior que  $40^\circ$ , conforme se representa na Figura 2.8.

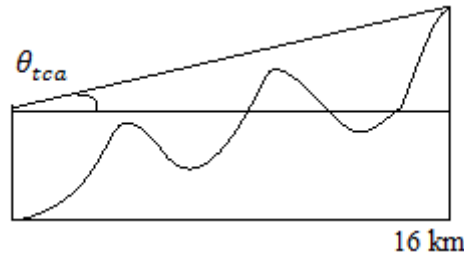


Figura 2.8 - Ângulo de desobstrução, adaptado de [5].

Caso a morfologia do terreno esteja disponível deve adicionar-se esta correção,  $C_{tca}$ , ao valor do campo elétrico, segundo a expressão (2.11).

$$C_{tca} \text{ [dB]} = J(v') - J(v) \quad (2.11)$$

em que:

$$J(v) = \left[ 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \right] \quad (2.11.1)$$

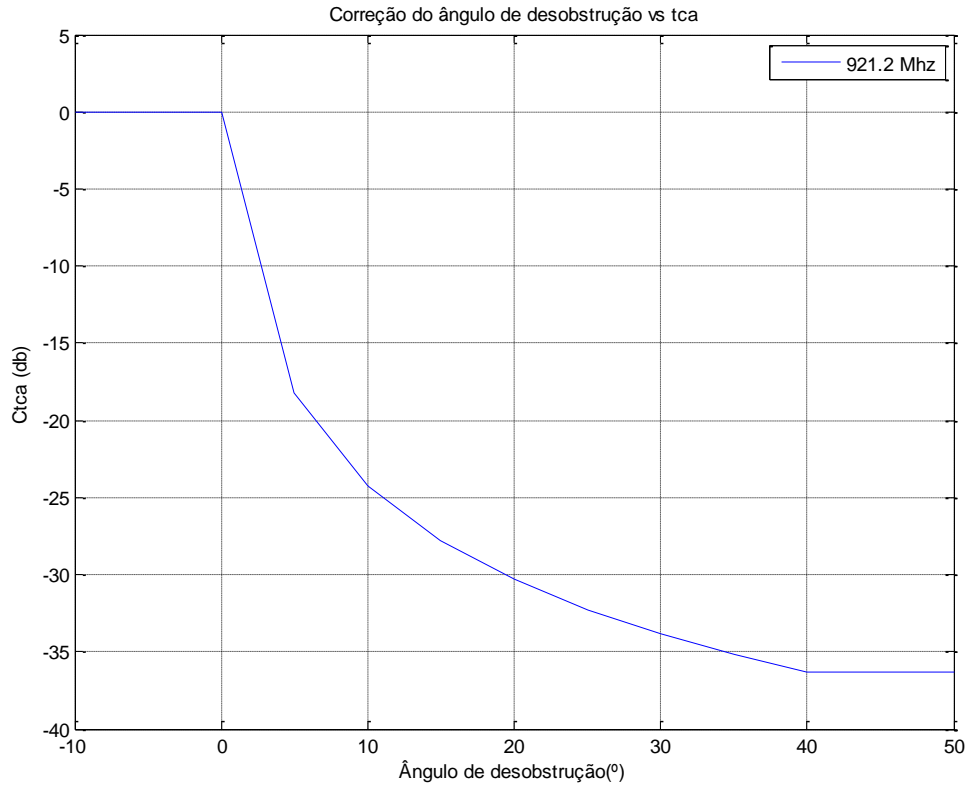
$$v' = 0,036 \sqrt{f} \quad (2.11.2)$$

$$v = 0,065 \theta_{tca} \sqrt{f} \quad (2.11.3)$$

onde:

- $\theta_{tca} [^\circ]$  – Ângulo de desobstrução em graus.
- $f_{\text{[MHz]}}$  – Frequência em MHz.

Na Figura 2.9 é representado o andamento da correção do ângulo de obstrução à frequência de 921,2 MHz.



**Figura 2.9 - Correção do ângulo de desobstrução.**

Como se pode verificar o valor da correção é igual a 0 dB, quando o ângulo é menor que 0,55°. Quando o ângulo é superior a 40°, o valor da correção é de aproximadamente 36 dB. Estes valores foram obtidos para uma frequência de 921,2 MHz.

### 2.10.2. Altura da antena de recepção

Os valores das curvas de atenuação de percurso das figuras 2.3 a 2.6 e os valores tabelados em 2.1, 2.2 e 2.3, foram obtidos assumindo que a altura do terreno,  $R_2$ , na proximidade do recetor, era igual ou superior a 10 metros. Como referência considera-se para ambiente urbanos o valor de 20 metros, para ambientes urbanos densos o valor de 30 metros e para ambientes suburbanos ou de mar o valor de 10 metros [5]. Quando o recetor estiver em ambiente de terra deve-se ter em conta o ângulo de chegada, para isso calcula-se a altura equivalente do terreno,  $R_2'$ .

$$R_2'_{[m]} = (1000 * d * R_2 - 15h_1)/(1000 * d - 15) \quad (2.12)$$

onde:

- $d_{[\text{km}]}$  – Distância horizontal entre emissor e recetor em km.
- $h_1$  [m] – Altura da antena do emissor acima da altura média do terreno ( $0,8d$ ) em metros.

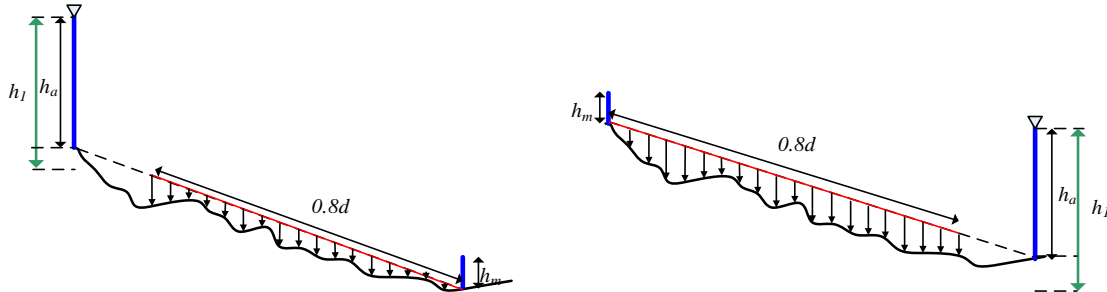


Figura 2.10 - Altura da antena do emissor, retirado de [2].

A altura do emissor,  $h_1$ , é calculada a partir da soma da altura da antena da estação base com a diferença média de alturas entre a linha traçada e as cotas do terreno, ao longo do percurso numa distância correspondente a 80% da distância total. Este método de cálculo da altura do emissor é uma adaptação do método definido em [5]. O método definido na figura foi utilizado pois as alturas do emissor já se encontravam processadas.

O valor da altura equivalente,  $R_2'$ , deve ter um valor mínimo de 1 metro. Caso a expressão  $h_1 < 6,5d + R_2$  se verifique, a altura equivalente deve ser aproximadamente igual à altura do terreno.

Para ambientes urbanos o fator corretivo deve ser calculado de acordo com (2.13).

$$C_{rha} [\text{dB}] = \begin{cases} 6,03 - J(v) & , h_2 < R_2' \\ K_{h2} \log(h_2/R_2') & , h_2 \geq R_2' \end{cases} \quad (2.13)$$

onde:

$$\circ J(v) = \left[ 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \right] \quad (2.13.1)$$

$$\circ v = K_{nu} \sqrt{h_{dfi2} * \theta_{clut2}} \quad (2.13.2)$$

$$\circ h_{dfi2} [\text{m}] = R_2' - h_2 \quad (2.13.3)$$

$$\circ \theta_{clut2} [^\circ] = \arctan(h_{dfi2}/27) \quad (2.13.4)$$

$$\circ K_{h2} = 3,2 + 6,2 \log(f) \quad (2.13.5)$$

$$\circ K_{nu} = 0,0108 \sqrt{f} \quad (2.13.6)$$

- $f_{[\text{MHz}]}$  – Frequência em MHz.

Caso se verifique que  $R_2'$  é menor do que 10, em ambiente urbano, o fator corretivo é dado por (2.14).

$$C_{rha} [\text{dB}] = \begin{cases} 6,03 - J(v) - K_{h_2} \log(10/R_2'), & h_2 < R_2' \\ K_{h_2} \log(h_2/R_2') - K_{h_2} \log(10/R_2'), & h_2 \geq R_2' \end{cases} \quad (2.14)$$

Para ambientes não urbanos o fator corretivo deve ser calculado de acordo com (2.15).

$$C_{rha} [\text{dB}] = K_{h_2} \log(h_2/10) \quad (2.15)$$

Para ambientes de mar deve calcular-se o fator corretivo de acordo com (2.16).

$$C_{rha} [\text{dB}] = K_{h_2} \log(h_2/10), \quad h_2 \geq 10 \quad (2.16)$$

Caso a altura do receptor,  $h_2$ , seja menor do que 10 metros, é necessário utilizar um método alternativo para calcular o fator de correção. Esse método consiste no cálculo da distância máxima de desobstrução na primeira zona de *Fresnel*,  $d_{10}$ , fixando a altura do receptor,  $h_2$ , em 10 metros. Deve calcular-se o valor do fator corretivo de acordo com (2.17).

$$C_{rha} [\text{dB}] = \begin{cases} 0, & d \leq d_{h_2} \\ C_{10} * \log(d/d_{h_2})/\log(d_{10}/d_{h_2}), & d_{h_2} < d < d_{10} \\ K_{h_2} \log(h_2/10), & d \geq d_{10} \end{cases} \quad (2.17)$$

onde:

- $C_{10} = K_{h_2} \log(h_2/10) \quad (2.17.1)$

- $d_{10} = D_{06}(f, h_1, 10)$ , com  $h_2 = 10$  metros.  $(2.17.2)$

- $d_{h_2} = D_{06}(f, h_1, h_2) \quad (2.17.3)$

- $D_{06} [\text{km}] = \frac{D_f \times D_h}{D_f + D_h}$ , caso seja necessário, limitar o resultado garantindo que não seja inferior a 0,001 km.  $(2.17.4)$

- $D_f [\text{km}] = 0,0000389 \times f \times h_1 \times h_2 \quad (2.17.5)$

- $D_h [\text{km}] = 4,1(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (2.17.6)$

- $f$  em MHz,  $h_1$  e  $h_2$  em metros.

Nas equações  $D_f$  e  $D_h$ , o valor de  $h_1$  deve ser limitado, caso seja necessário, de modo a ser sempre superior a 0.

Este fator corretivo apenas pode ser utilizado caso a altura do recetor seja igual, ou superior, a 1 metro, caso este esteja situado em terra, ou maior ou igual a 3 metros caso este esteja situado no mar.

### 2.10.3. Diferença da altura das antenas

Esta correção permite ter em conta a diferença entre as alturas, do emissor e do recetor, na predição do campo elétrico. É calculada de acordo com (2.18).

$$C_{ndiff} \text{ [dB]} = 20 \log \left( \frac{d}{d_{slope}} \right) \quad (2.18)$$

onde:

- $d_{slope} \text{ [km]} = \sqrt{d^2 + 10^{-6} [(h_a + h_{tter}) - (h_2 + h_{rter})]^2}$
- $d_{slope} \text{ [km]}$  – Gradiente da distância entre as antenas em km.
- $d \text{ [km]}$  – Distância horizontal entre as antenas em km.
- $h_a \text{ [m]}$  – Altura da antena do emissor acima do nível do solo em metros.
- $h_2 \text{ [m]}$  – Altura da antena recetora acima do nível do solo em metros.
- $h_{tter} \text{ [m]}$  – Altura da antena do emissor acima do nível do mar em metros.
- $h_{rter} \text{ [m]}$  – Altura da antena recetora acima do nível do mar em metros.

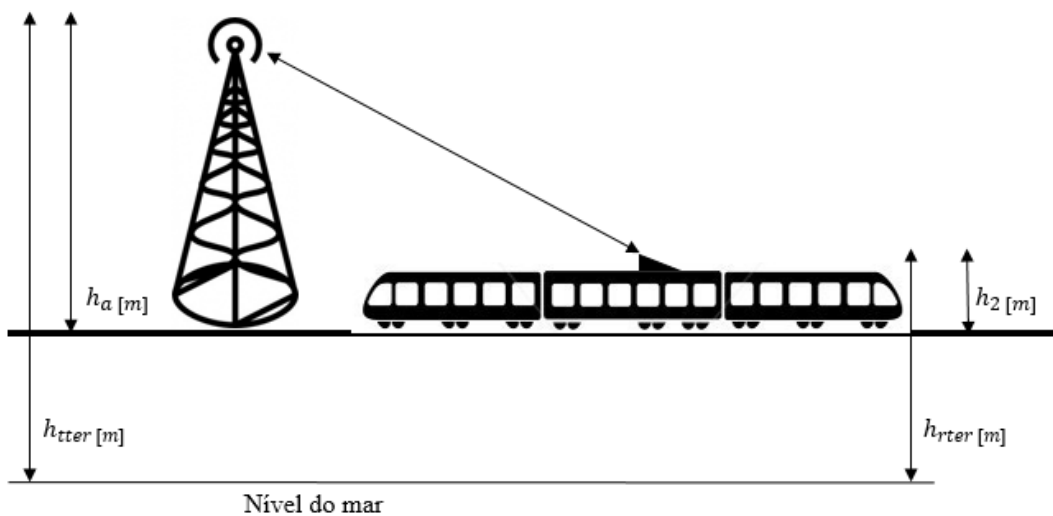


Figura 2.11 – Representação das dimensões utilizadas em (2.18).

## 2.11. Valores máximos de campo elétrico

Os valores de campo elétrico calculados não podem exceder o valor de campo elétrico máximo, o valor máximo é definido em (2.19) e (2.20).

$$E_{\max} [\text{dB } (\mu\text{V/m})] = E_{fs}, \text{ para caminhos terrestres} \quad (2.19)$$

$$E_{\max} [\text{dB } (\mu\text{V/m})] = E_{fs} + E_{se}, \text{ para caminhos de mar} \quad (2.20)$$

$$E_{fs} [\text{dB } (\mu\text{V/m})] = 106,9 - 20\log(d) \quad (2.21)$$

$$E_{se} [\text{dB } (\mu\text{V/m})] = 2,38\{1 - \exp(-d/8,94)\}\log(50/t) \quad (2.22)$$

onde:

- $E_{fs}$  – Campo elétrico de espaço livre para 1 kW e.r.p.
- $E_{se}$  – Melhoramento para as curvas de mar.
- $d_{[\text{km}]}$  – Distância em quilómetros.
- $t$  – Percentagem de tempo.

## 2.12. Conversão dos valores de campo elétrico para atenuação

Como todo o cálculo da predição é feito com base no campo elétrico, é necessário converter esses valores para atenuação, para depois serem comparados com os valores obtidos pelo modelo Okumura-Hata e as medidas de sinal rádio, a expressão que calcula o seu equivalente é dado por (2.23).

$$L_B = 139,3 - E + 20 \log(f) \quad (2.23)$$

onde:

- $L_B$  - Atenuação de propagação equivalente
- $E$  - Campo elétrico calculado
- $f$  - Frequência a que funciona a estação base



## 3. Abordagem ao problema

### 3.1. Introdução

Para a análise do modelo de propagação ITU-R foi considerado um conjunto de linhas ferroviárias que permitiram obter uma referência na comparação e avaliação do desempenho do modelo de estimação de cobertura rádio. As linhas consideradas tiveram por base a disponibilidade de informação geográfica, de forma a permitir realizar a predição de cobertura rádio, mas também a existência de medidas de cobertura rádio que permitem validar os resultados obtidos.

Neste capítulo é feita uma descrição do problema e a abordagem seguida. É descrita a aplicação do modelo ITU-R 1546-5 e é feita uma apresentação das linhas ferroviárias nas quais foram realizados os testes, designadamente a linha de Cascais, Vendas Novas-Évora e Algarve. São referidas as características das suas estações base bem como o seu ambiente de propagação. O processo de tratamento das medidas de sinal rádio também é abordado neste capítulo.

### 3.2. Abordagem

O fluxograma da Figura 3.1 representa a abordagem ao problema feita neste trabalho. Esta abordagem foi dividida em três grandes blocos iniciais: a recolha da informação de entrada, obtida através do *software* Railwave [7], a simulação, onde foram implementados, em MATLAB, os algoritmos correspondentes aos modelos Okumura-Hata e ITU-R 1546-5 e, por último, o processamento das medidas rádio. Nos dois últimos blocos foram feitas a análise estatística do erro e a visualização/interpretação dos resultados finais.

O *software* Railwave é responsável pelo fornecimento da informação de entrada dos modelos de propagação. No Railwave é feito o processamento da morfologia do terreno (DTM) e da morfologia urbana. Fornece as informações referentes à parametrização das estações base, tais como, a altura do mastro, frequência de operação, ganho das antenas e potência de emissão. É feito o processamento da altura do emissor, como está descrito na secção 2.10.2. Também é responsável pelo cálculo da parametrização dos fatores

corretivos, a utilizar como parâmetros de entrada, na implementação do modelo Okumura-Hata.

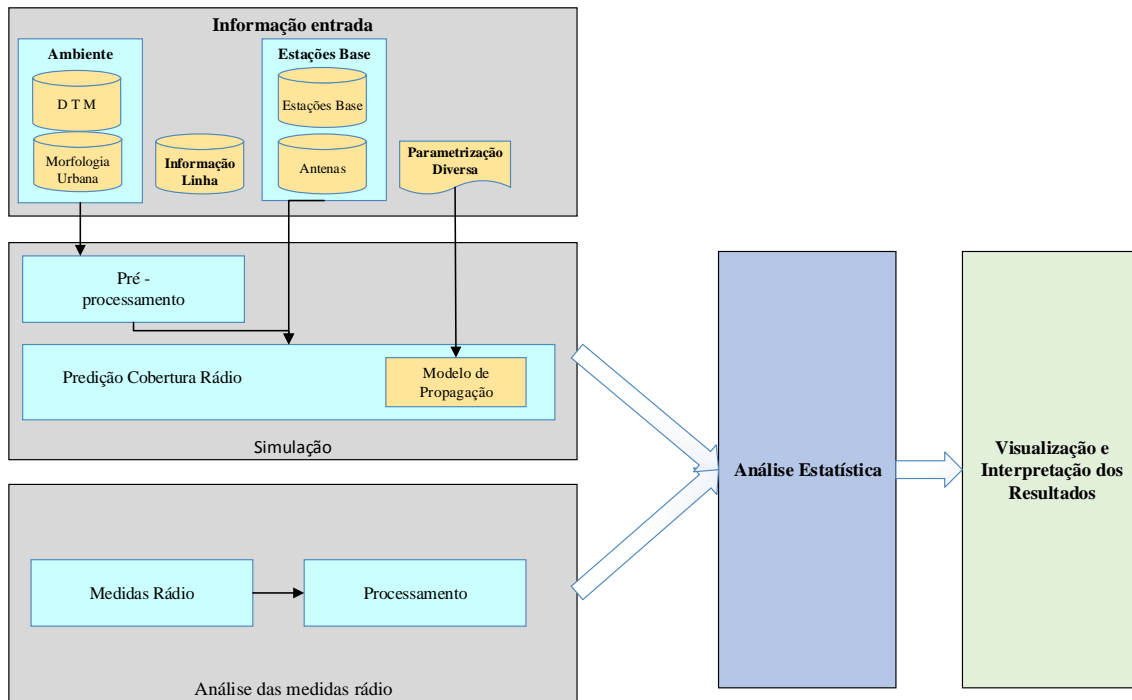


Figura 3.1 - Fluxograma da abordagem ao problema.

Foi implementado em MATLAB um algoritmo responsável pelo cálculo da atenuação de percurso referente ao modelo de Okumura-Hata original, com as calibrações originais e sem otimizações [8], apenas sendo consideradas as perdas por difração pelo método de Deygout. Foram ainda utilizados os seguintes fatores corretivos: influência da água (Traçados Mistos), ondulação do terreno, posição na ondulação do terreno e correção orientação. Todos estes fatores corretivos estão descritos no Anexo A. A atenuação de propagação é dada pela expressão (3.1).

$$Lp_{[dB]} = a_1 + a_2 \log(f_{[MHz]}) + a_3 \log(h_{be[m]}) + b_1 \log(d_{[km]}) + b_2 \log(h_{be[m]}) \log(d_{[km]}) - a(h_m) - \Sigma(\text{factores correctivos}) \quad (3.1)$$

onde:

- $a_k$  e  $b_k$  – Parâmetros de calibração originais.
- $f_{[MHz]}$  – Frequência em MHz.
- $h_{be[m]}$  – Altura da estação base em metros.
- $h_m$  – Altura do móvel em metros.

- $d_{[\text{km}]}$  – Distância entre emissor e recetor em quilómetros.

O termo  $a(h_m)$  é um termo de correção que depende do ambiente de propagação. Foi utilizado o termo para ambiente sub-urbano, o seu cálculo é dado por (3.2).

$$a(h_m) = [(1,1 \log(f_{[\text{MHz}]}) - 0,7)h_m - 1,56 \log(f_{[\text{MHz}]}) + 0,8] \quad (3.2)$$

Os parâmetros  $a_k$  e  $b_k$  são os parâmetros de calibração originais, e estão representados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Valores originais do modelo de Okumura-Hata.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
a <sub>1</sub>	69,55
a <sub>2</sub>	26,16
a <sub>3</sub>	-13,82
b <sub>1</sub>	44,9
b <sub>2</sub>	-6,55

Para o modelo ITU-R 1546-5 foi também implementado um algoritmo que faz o cálculo do campo elétrico, converte o valor deste para atenuação de propagação e posteriormente para valores de potência recebida no recetor. Os fatores corretivos, descritos no capítulo 2, implementados no algoritmo do modelo ITU-R 1546-5 são: perdas por difração são calculadas pelo método do ângulo de desobstrução do recetor, é feita uma correção à altura da antena de receção e também uma correção à diferença das alturas das antenas do emissor e do recetor. A influência da água é calculada utilizando o método de traçados mistos do modelo ITU-R 1546.

A contabilização das perdas por difração no modelo ITU-R 1546-5 diferem da contabilização feita no modelo de Okumura-Hata. No modelo de ITU-R apenas se considera o obstáculo mais importante enquanto no modelo de Okumura-Hata se consideram os três obstáculos mais importantes.

O *software* Railwave fornece os dados relativos ao ambiente e ao terreno, parametrizações das estações base e alturas de emissor processadas. A implementação deste algoritmo está explicada na secção 3.3.

### 3.3. Aplicação do modelo ITU-R 1546-5

A aplicação do modelo ITU-R 1546-5 é exemplificada na Figura 3.2. Esta descreve os passos a seguir na implementação do modelo ITU-R, desde o cálculo do campo elétrico e aplicação dos fatores corretivos até à conversão dos valores de campo elétrico para atenuação e potência.

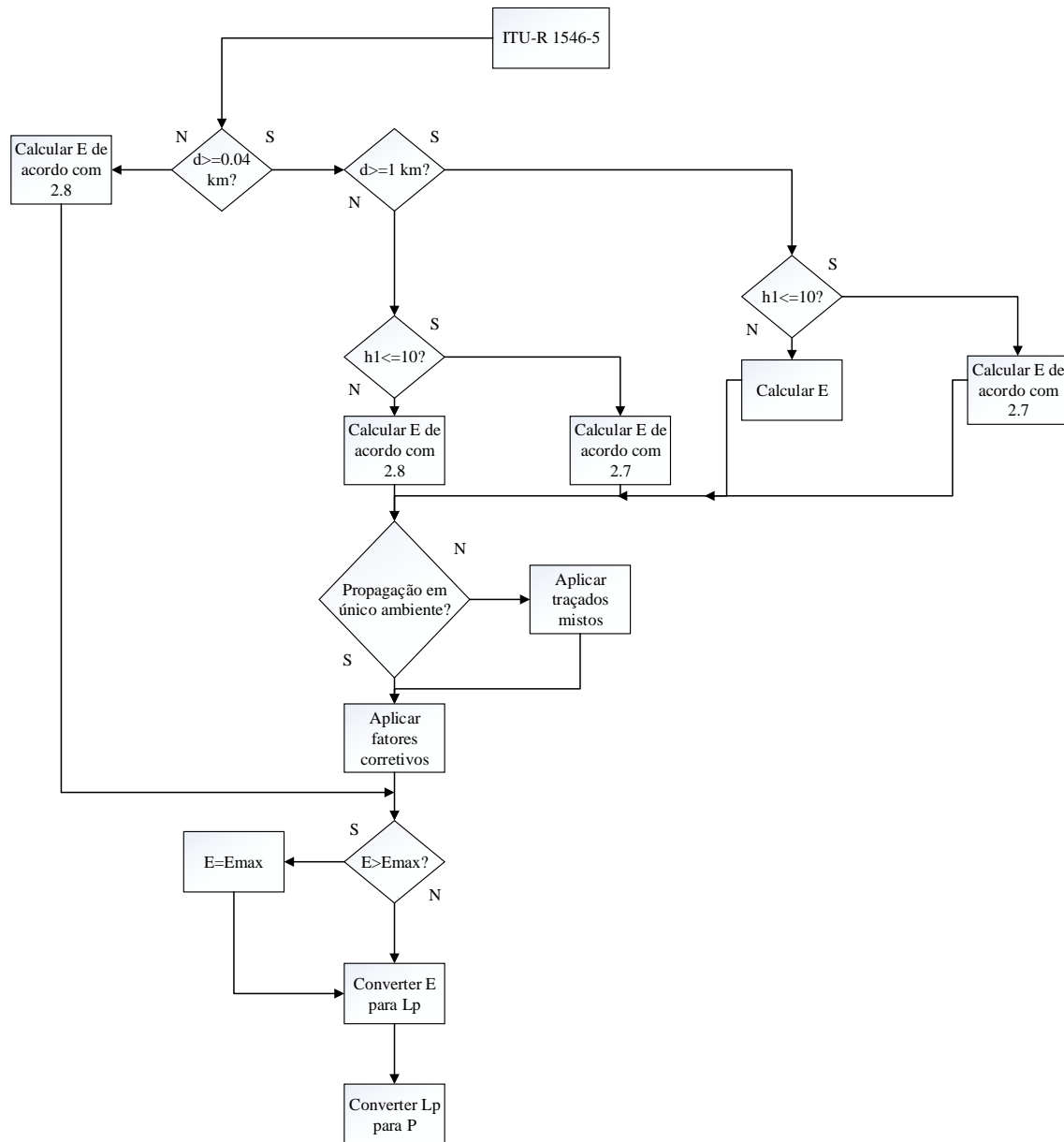


Figura 3.2 - Fluxograma da aplicação do modelo ITU-R 1546-5.

O primeiro parâmetro a analisar é o da distância entre o emissor e o recetor. Se esta for igual, ou inferior, a 0,04 km calcula-se o campo eléctrico correspondente a esta distância, verifica-se se o valor é menor que o máximo permitido e aplicam-se as conversões para valores de atenuação e potência. Se a distância se encontrar entre 0,04 e 1 km, deve considerar-se o valor da distância igual a 1 km em todos os cálculos efetuados, utilizando apenas o valor real na verificação do valor de campo eléctrico máximo. Em seguida, analisa-se a altura do emissor. Se a altura do emissor for inferior a 10 m, o cálculo do campo eléctrico deve ser feito segundo a secção 2.7, caso contrário deve calcular-se segundo a secção 2.8. Se o percurso de propagação percorrer mais do que um ambiente deve aplicar-se o método dos traçados mistos. Em seguida aplicam-se os fatores corretivos e verifica-se se o valor do campo eléctrico final é superior ao máximo permitido. Por fim, aplicam-se as conversões para atenuação e potência. Caso a distância seja superior a 1 km, o processo é semelhante ao descrito anteriormente, utilizando-se a distância real entre emissor e recetor, em todos os cálculos, e, no caso de a altura do emissor ser superior a 10 m, calcula-se o valor do campo eléctrico de acordo com as secções 2.4 a 2.6.

### **3.4. Medidas rádio**

A recolha de medidas é um fator fundamental para a aferição da qualidade do modelo de predição, pois fornece os dados de situações reais que servem de referência comparativa aos dados preditos pelo modelo.

A aquisição das medidas foi feita recorrendo a equipamento de emissão, situado em posições distintas da linha, e de equipamento de receção colocado a bordo do comboio, desta forma é possível cobrir a totalidade das linhas em estudo [2]. A análise das medidas é feita através do método de Lee [4], [6], de maneira a remover a influência do desvanecimento rápido, causado pela diferença de velocidade do comboio e da aquisição de medidas por parte do equipamento de receção, da remoção de picos de interferência e de medidas saturadas. Todas estas questões serão abordadas nas secções deste capítulo.

As distâncias na linha ferroviária são identificadas por um PK, ou ponto quilométrico. A cada PK estão associadas as suas coordenadas (x, y, z) permitindo assim identificar geograficamente cada ponto de uma linha ferroviária. Os PKs não dependem do comprimento da linha por isso necessitam de ser previamente definidos.

### 3.5. Tratamento das medidas rádio

O equipamento de recepção consegue recolher 10 amostras/segundo, considerando que o comboio se desloca a uma velocidade média de 60 km/h, o valor de distância relativo a cada amostra pode variar entre 1 e 3 metros, ou seja, a velocidade a que o aparelho recorre as medidas é muito superior à velocidade do comboio, obtendo-se uma variação muito rápida do sinal [2]. Esta variação rápida do sinal, ou desvanecimento rápido, necessita de ser eliminada de modo a ser possível caracterizar estatisticamente o sinal, assim efetua-se uma filtragem do sinal utilizando o método de Lee [4], [6].

A aplicação do método de Lee consiste no cálculo da média dos valores de potência num determinado intervalo, respeitando as seguintes imposições:

- Cada intervalo deve conter no mínimo 36 amostras;
- A distância percorrida no intervalo deve ser no máximo 13 metros, cálculo efetuado segundo a expressão  $2L = 40\lambda$ , com  $\lambda = 0.33$  ( $f \approx 900\text{MHz}$ ), vem  $2L = 13$  metros;
- Converter os valores de potência para unidades lineares.

A média dos valores de potência é feita num intervalo de 13 metros e com um número mínimo de 36 amostras obtendo-se as seguintes figuras. Na Figura 3.3 estão representados os valores de potência filtrados através do método de Lee, e os valores de potência pré-filtragem.

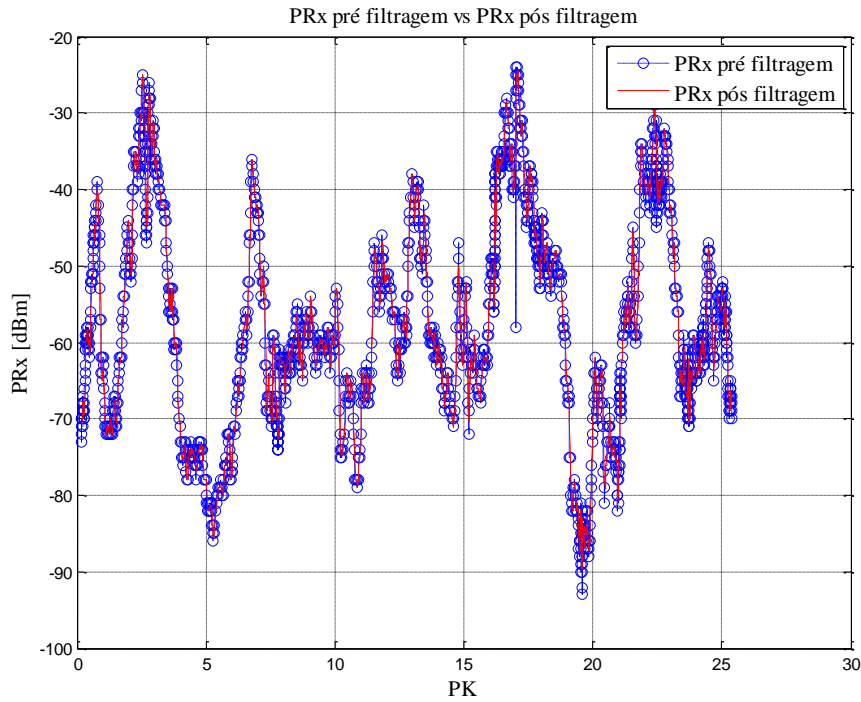


Figura 3.3 - PRx-Aplicação do método de Lee.

A Figura 3.4 mostra os valores de potência recebida filtrada para cada estação base na linha de Cascais.

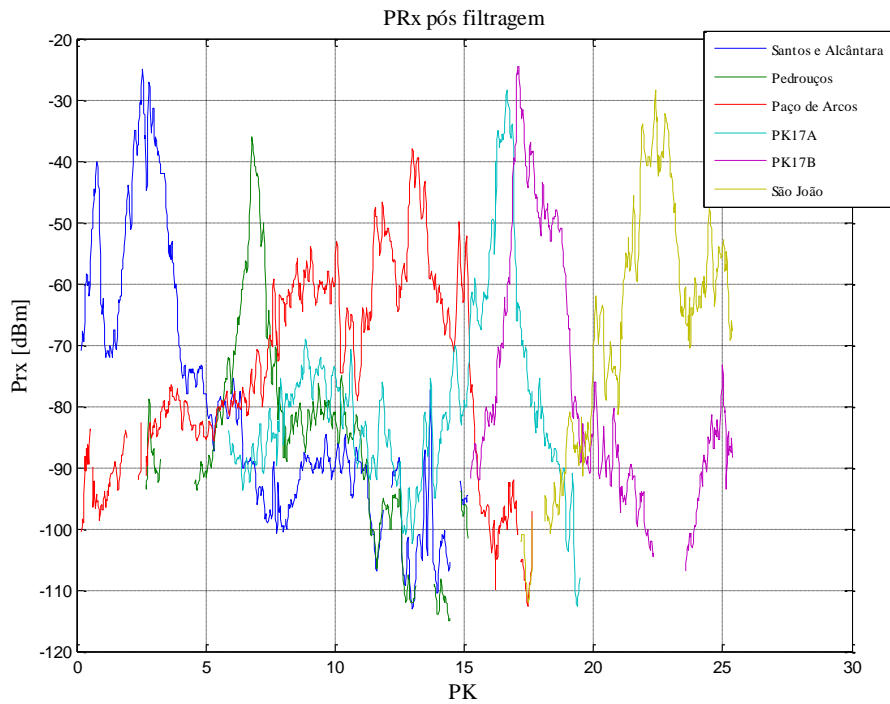


Figura 3.4 - PRx vs PK-Todas as estações, filtrado.

As figuras anteriores representam o método de análise das medidas para a linha de Cascais. O mesmo processo foi utilizado para as linhas de Vendas Novas-Évora e do Algarve.

## 3.6. Cenários de estudo

Os cenários em estudo, neste trabalho, são a linha de Cascais, a linha de Vendas Novas-Évora e a linha do Algarve. As características das linhas e das suas estações base, ou repetidores, serão descritas nas secções seguintes.

### 3.6.1. Linha de Cascais

A linha de Cascais é constituída por quatro estações base situadas em Alcântara, Paço de Arcos, PK 16.865 e São João do Estoril, bem como dois repetidores situados em Santos e Pedrouços. Todas estas estações base operam na gama de frequências 921,2-923,6 MHz. Esta linha tem a particularidade de já estar a operar em GSM-R, o que significa que as medidas obtidas são provenientes de um sinal GSM, de acordo com as especificações da tecnologia. A Figura 3.5 apresenta a linha de Cascais, o traçado da linha e a posição das estações base. A linha de Cascais tem um comprimento total de 26 km.

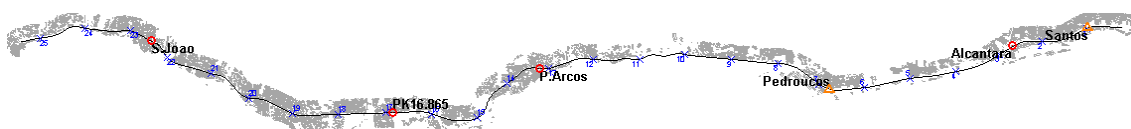


Figura 3.5 – Linha de Cascais, retirado de Railwave.

Na linha de Cascais os ensaios foram realizados numa única viagem pois, das linhas estudadas neste trabalho, é a única que traduz uma de utilização de GSM-R. Por esta razão foram utilizadas antenas diretivas, quer nas medidas de sinal rádio, quer nas predições. Esta linha caracteriza-se maioritariamente por ter um ambiente sub-urbano com influência de água, uma vez que em determinados troços da linha, o percurso de propagação entre o emissor e o recetor atravessa superfícies aquáticas.

Tabela 3.2 – Características da linha de Cascais.

Estação base	Altura das antenas (m)	Frequência (MHz)	Ganho (dBi)	Potência de emissão (dBm)
Santos	10	921,2	17,05	33
Alcântara	24	921,2	20,81	36,7
Pedrouços	10	922	17,15	30
Paço de Arcos	27	922,8	20,81	39,7
PK 16.865	27	923,6/921,2	20,81	42,7
São João do Estoril	27	922	20,81	39,7

A Tabela 3.2 contém as configurações das estações base, e repetidores, da linha de Cascais. Para além dessa informação convém referir a direção das antenas de cada estação base. No repetidor de Santos está presente uma antena diretiva. Esta antena está direcionada para Alcântara.

Na estação base de Alcântara estão presentes duas antenas diretivas. Uma das antenas está direcionada para Santos enquanto a outra está direcionada para Pedrouços, denominando-se Alcântara A) e Alcântara B), respetivamente.

No repetidor de Pedrouços estão presentes duas antenas diretivas. Uma das antenas está direcionada para Alcântara e a outra para Paço de Arcos, denominando-se Pedrouços a) e Pedrouços b), respetivamente.

Na estação base de Paço de Arcos estão presentes duas antenas diretivas. Uma das antenas está direcionada para Pedrouços e a outra para PK 16.865, denominando-se Paço de Arcos a) e Paço de Arcos b), respetivamente.

Na estação base PK 16.865 estão presentes duas antenas diretivas, com a particularidade de operarem em frequências diferentes. Uma das antenas está direcionada para Paço de Arcos e a outra para São João do Estoril, denominando-se PK 17 a) e PK 17 b), respetivamente.

Na estação base de São João do Estoril estão presentes duas antenas diretivas. Uma das antenas está direcionada para PK 16.865 e a outra encontra-se na direção do PK 23, denominam-se São João a) e São João b), respetivamente.

### **3.6.2. Linha de Vendas Novas-Évora**

A linha de Vendas Novas-Évora é composta por sete estações base situadas em Vendas Novas-Évora, PK 71+450, Torre da Gadanha, Escoural, Casa Branca, Tojal e Évora. Todas estas estações base operam na gama de frequências 923,6-924 MHz. A Figura 3.6 apresenta a linha de Vendas Novas-Évora, o traçado da linha e a posição das estações base.

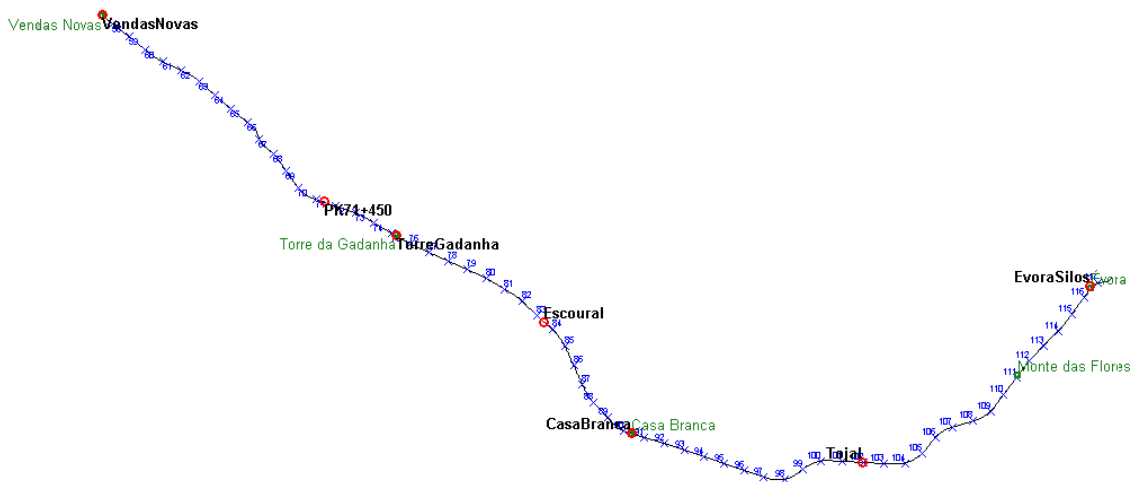


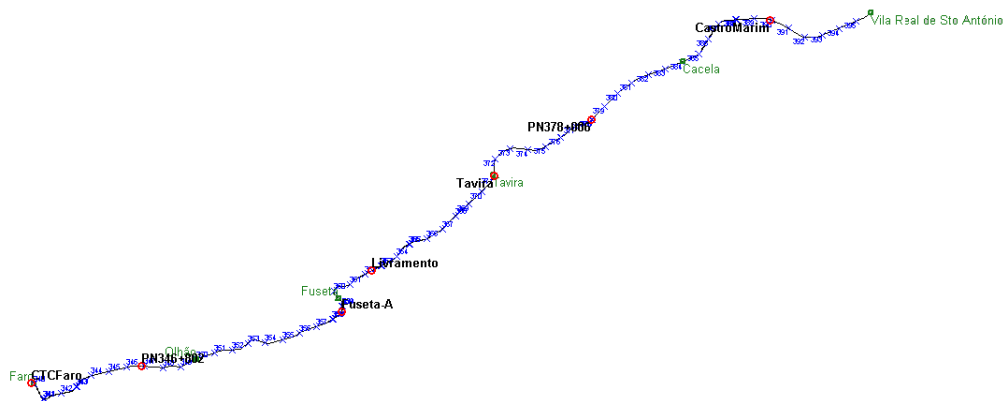
Figura 3.6 - Linha de Vendas Novas-Évora, retirado de Railwawe..

Na linha de Vendas Novas-Évora os ensaios foram realizados em três viagens distintas, na primeira viagem apenas se encontravam ativas as estações base PK 71+450 e Casa Branca, na segunda viagem as estações base de Torre da Gadanha, Escoural e Évora estavam ativas, por último, na terceira viagem, encontravam-se ativas as estações base de Vendas Novas e Tojal. Nesta linha foram utilizadas antenas omnidirecionais, quer nas medidas de sinal rádio, quer nos cálculos das predições, isto deve-se ao facto de o GSM-R não estar implementado nesta linha na altura da recolha das medidas. Esta linha caracteriza-se por ter um ambiente rural, verificando-se poucas obstruções ao sinal. A linha de Vendas Novas-Évora tem um comprimento total de 60 km.

Na linha de Vendas Novas-Évora estão presentes antenas omnidirecionais, de 18 metros de altura, com ganho de 3 dBi, que operam na frequência 923,6 MHz, no caso das estações base de Vendas Novas, PK 71+450 e Torre da Gadanha, na frequência 924 MHz, no caso das estações base de Escoural, Casa Branca e Tojal, e na frequência 923,8 no caso de Évora. Todas as antenas têm uma potência de emissão de 43 dBm.

### 3.6.3. Linha do Algarve

A linha do Algarve é composta por sete estações base situadas em Faro, PN 346+802, Fuseta, Livramento, Tavira, PN 378+006 e Castro Marim. Todas estas estações base operam na gama de frequências 921,8-924,2 MHz. A Figura 3.7 apresenta a linha do Algarve, o traçado da linha e a posição das estações base.



**Figura 3.7 - Linha do Algarve.**

Na linha do Algarve os ensaios foram realizados em quatro viagens distintas, na primeira viagem encontravam-se ativas as estações base de Faro e do Livramento, na segunda viagem, apenas se encontrava ativas a estação base de Castro Marim, na terceira viagem as estações base da Fuseta e do PN 378+006 estavam ativas, por último, na quarta viagem encontravam-se ativas as estações base do PN 346+802 e de Tavira. Nesta linha foram utilizadas antenas omnidirecionais, quer nas medidas de sinal rádio, quer nos cálculos das predições, isto deve-se ao facto de o GSM-R não estar implementado nesta linha na altura da recolha de medidas. Esta linha caracteriza-se por ter um ambiente rural com influência de água, verificando-se poucas obstruções ao sinal e situações de traçados mistos, onde o sinal percorre zonas terrestres e de mar. A linha do Algarve tem um comprimento total de 50 km. A Tabela 3.3 contém as configurações das estações base da linha do Algarve. Todas as estações base desta linha têm antenas omnidirecionais.

**Tabela 3.3 - Características da linha do Algarve.**

<b>Estação base</b>	<b>Altura das antenas (m)</b>	<b>Frequência (MHz)</b>	<b>Ganho (dBi)</b>	<b>Potência de emissão (dBm)</b>
Faro	21	921,8	8,1	43,01
PN 346+802	18	921,8	8,1	43,18
Fuseta	21	921,8	8,1	42,94
Livramento	18	924,2	8,1	42,62
Tavira	21	924,2	8,1	42,18
PN 378+006	21	924,2	8,1	42,28
Castro Marim	18	924,2	8,1	42,46



## 4. Análise dos resultados

### 4.1. Introdução

A aferição da qualidade do modelo é efetuada recorrendo a três parâmetros estatísticos de erro, descritos na secção seguinte: o erro médio absoluto, a raiz do erro quadrático médio e desvio padrão do erro. Quanto menores forem estes valores, maior será a qualidade dos modelos. Os parâmetros estatísticos de erro foram calculados para todas as estações base/repetidores das linhas estudadas neste trabalho, e expressam a comparação entre o modelo Okumura-Hata e as medidas de sinal rádio, e o modelo ITU-R 1546-5 e as medidas de sinal rádio.

Neste capítulo são analisados os dados da predição do modelo ITU-R 1546-5 para as linhas de Cascais, Vendas Novas-Évora e Algarve. A análise dos resultados é o último passo no processo de aferição da qualidade do modelo de predição, este passo só deverá ser efetuado depois da recolha e análise de medidas, predição do modelo Okumura-Hata [3] e predição do modelo ITU-R 1546-5.

### 4.2. Análise estatística

A análise estatística é feita recorrendo a três indicadores:

- Erro médio absoluto -  $Me$ ;
- Raiz do erro quadrático médio -  $RMSE$ ;
- Desvio padrão do erro -  $ESD$ .

As suas expressões são demonstradas a seguir, é feita a comparação entre o resultado da predição e as medidas de sinal rádio. O erro médio absoluto representa a diferença percentual entre o valor real de potência (medido) e o seu valor aproximado (teórico), o erro quadrático médio permite avaliar a diferença entre o valor aproximado e o real, medindo a média do quadrado do erro e por último o desvio padrão do erro permite medir o erro que existe em relação à média dos erros para cada amostra.

$$Me = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_m(i) - P_p(i)| \quad (4.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_m(i) - P_p(i)|^2} \quad (4.2)$$

$$ESD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|P_m(i) - P_p(i)| - Me)^2} \quad (4.3)$$

Onde:

- $n$  – Número de amostras;
- $P_m$  – Potência medida;
- $P_p$  – Potência predita.

### 4.3. Linha de Cascais

Na linha de Cascais foram analisadas as coberturas rádio das quatro estações base e dois repetidores, comparando os resultados de predição do modelo Okumura-Hata e do modelo ITU-R 1546-5 com as medidas de sinal rádio, e extraíndo os resultados através dos parâmetros estatísticos de erro. Nas figuras seguintes são apresentados os resultados. As linhas a azul representam a predição pelo modelo ITU-R 1546-5, as linhas a verde representam a predição pelo modelo Okumura-Hata, e as linhas a vermelho representam as medidas de sinal rádio.

Na Figura 4.1 é feita uma comparação entre a predição, que resulta da aplicação dos modelos teóricos, com as medidas de sinal rádio para o repetidor de Santos. Nesta situação verifica-se que, com o modelo ITU-R 1546-5, obteve-se um erro muito menor do que com o modelo Okumura-Hata, isto deve-se à proximidade da curva do modelo ITU-R com as medidas de sinal rádio. Nesta figura é também possível perceber que o modelo ITU-R apenas contabiliza um obstáculo ao longo do percurso, no PK 0.2, introduzindo uma atenuação de 15 dB superior à introduzida pelo modelo de Okumura-Hata, que se aproxima das medidas de sinal rádio. Excetuando este caso, os níveis de sinal, referentes ao modelo Okumura-Hata, encontram-se sempre distanciados das

medidas, o que explica o melhor desempenho do modelo ITU-R na predição deste repetidor.

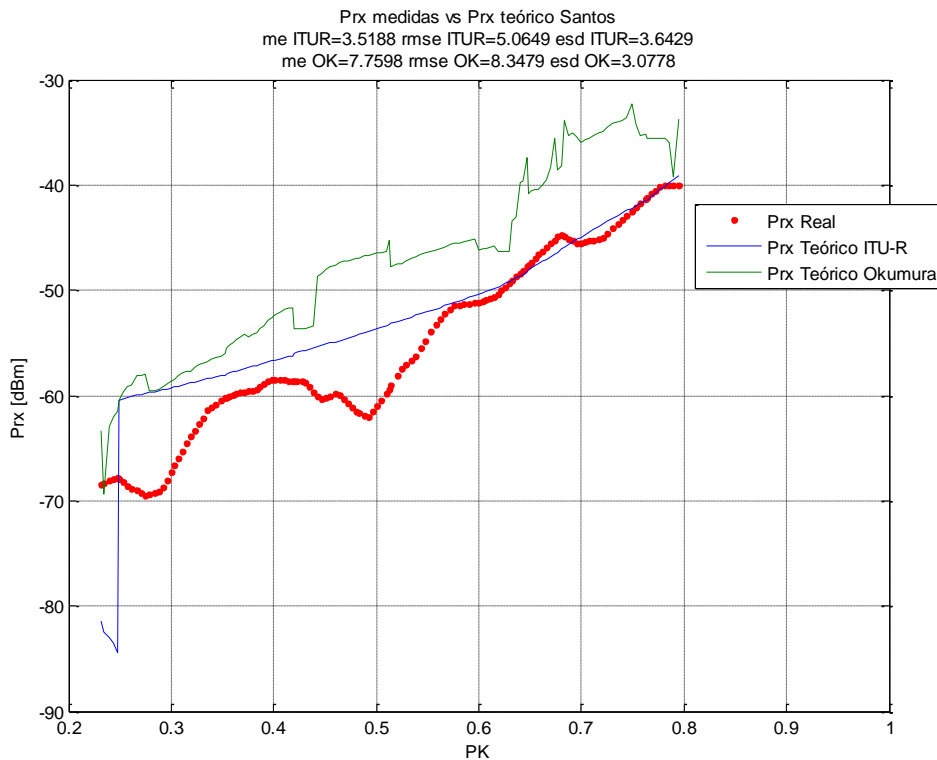
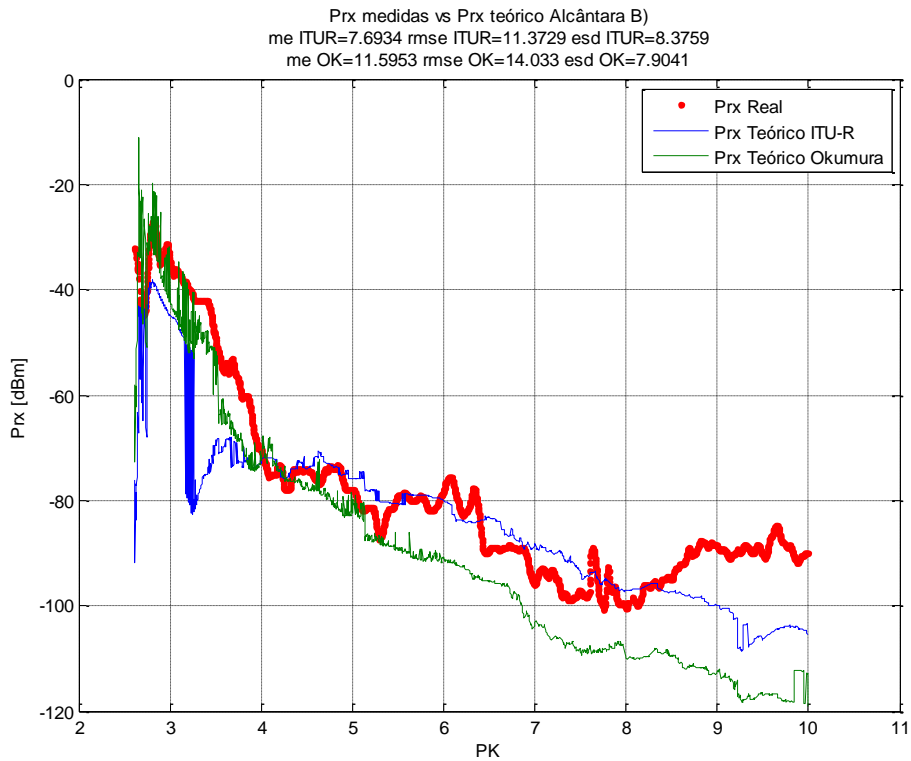


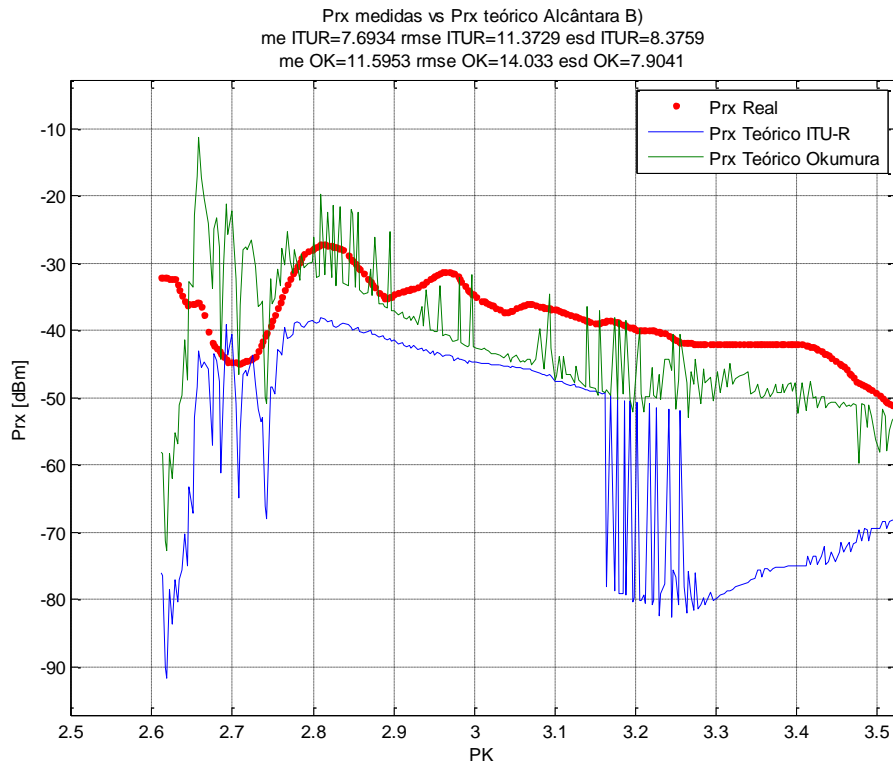
Figura 4.1 – Predição para o repetidor de Santos.

Na Figura 4.2 é possível comparar os resultados da predição com as medidas de sinal rádio na estação base de Alcântara B). Nesta figura é possível perceber que, entre o PK 2.6 e 3.5, existe uma zona com um elevado número de obstáculos. Do PK 4 até ao PK 10, verifica-se uma aproximação da curva referente ao modelo ITU-R e da curva das medidas, explicando-se assim o melhor desempenho do modelo ITU-R na predição desta estação base. Entre o PK 9 e 10 verifica-se uma diferença significativa entre as curvas dos modelos de predição e a curva das medidas. O aumento do nível de sinal na curva das medidas deve-se à presença de água no trajeto. Os modelos de propagação não acompanham esta subida de nível de sinal pois, para esta estação base, a presença de água não é tida em conta na parametrização do terreno exportada pelo *software* Railwave, como é possível perceber na Figura 4.4. Apesar disto o modelo ITU-R 1546-5 obteve um melhor desempenho na predição desta estação base devido à proximidade das curvas na maioria do trajeto.



**Figura 4.2 - Predição para a estação base Alcântara B).**

Analisando a Figura 4.3 verifica-se que a curva referente ao modelo Okumura-Hata se aproxima das medidas, enquanto a curva referente ao modelo ITU-R se afasta devido à atenuação adicional causada pelos obstáculos.



**Figura 4.3 - Predição para a estação base de Alcântara B) (PK 2.6 a 3.5).**

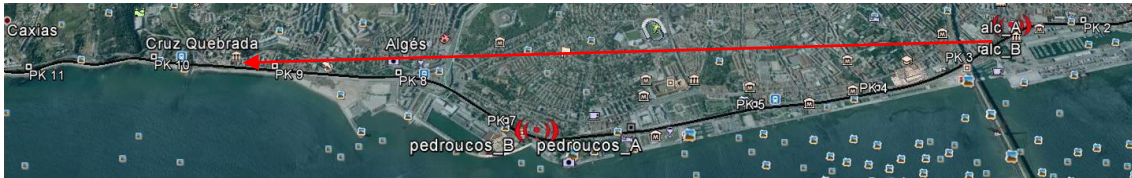


Figura 4.4 - Trajeto do sinal Alcântara B) -> PK 10.

Na Figura 4.5 é feita uma comparação entre a predição e as medidas de sinal rádio referentes à estação base de Pedrouços B). Como é possível observar pela análise da figura ambas as curvas se aproximam da curva das medidas ao longo de todo o percurso. Verifica-se um aumento do nível de sinal na curva do modelo Okumura-Hata entre os PKs 9.5 e 11, provocado pela presença de água no trajeto. O modelo Okumura-Hata traduz este efeito de melhor forma que o modelo ITU-R 1546-5.

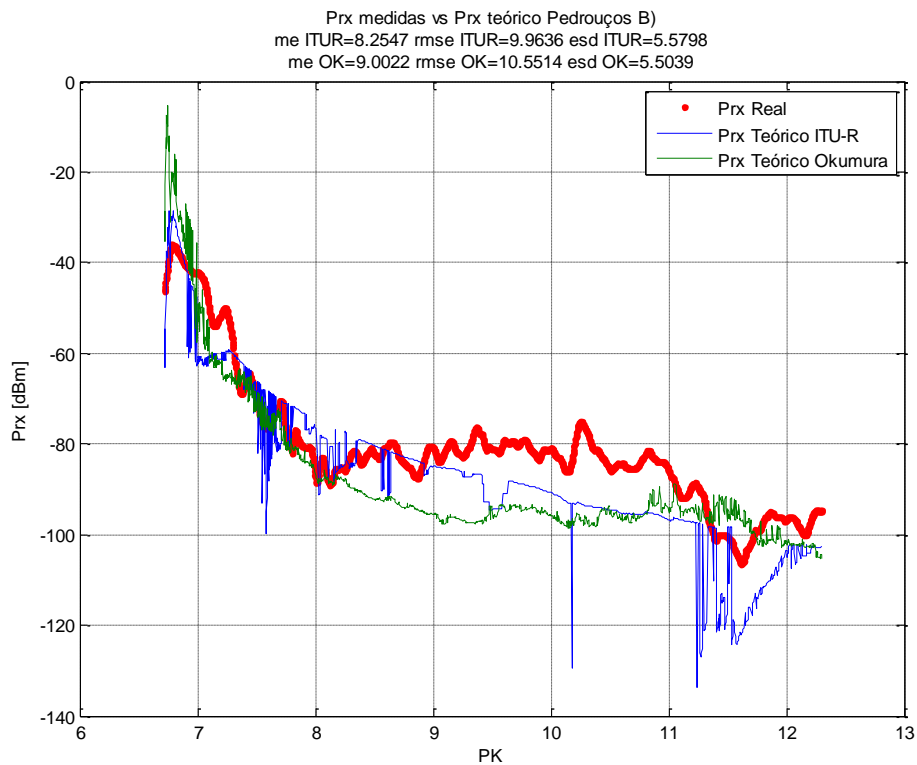


Figura 4.5 - Predição para a estação base de Pedrouços B).

O percurso de propagação nesta zona tem a particularidade de percorrer zonas de mar, como se pode ver na Figura 4.6, o que provoca um aumento do nível do sinal nas zonas onde isso ocorre.

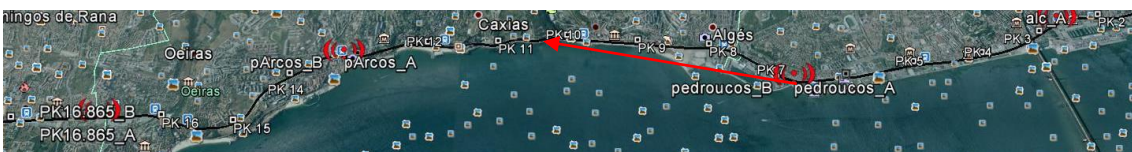
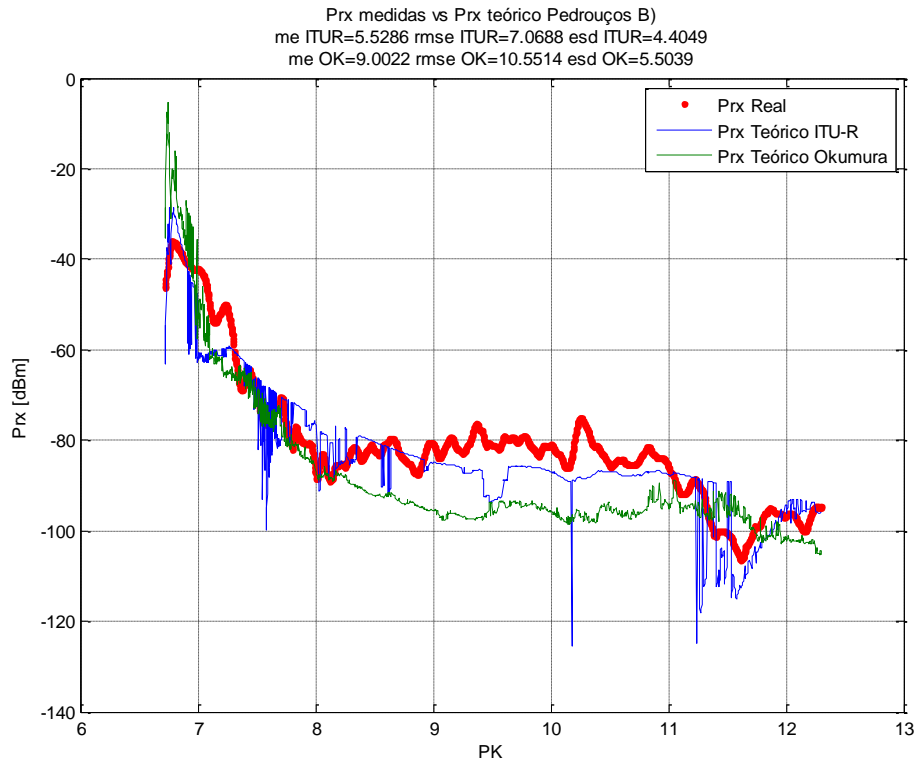


Figura 4.6 - Trajeto do sinal Pedrouços B) -> PK 11.

A Figura 4.7 representa a predição para o modelo ITU-R 1546-5 utilizando o método de traçados mistos do modelo Okumura-Hata. Verifica-se um aumento do nível de sinal na curva do modelo ITU-R 1546-5 entre o PK 9.5 e o 12.5, isto deve-se à influência da água no trajeto de propagação, representada pelo método de traçados mistos utilizado no modelo de Okumura-Hata.



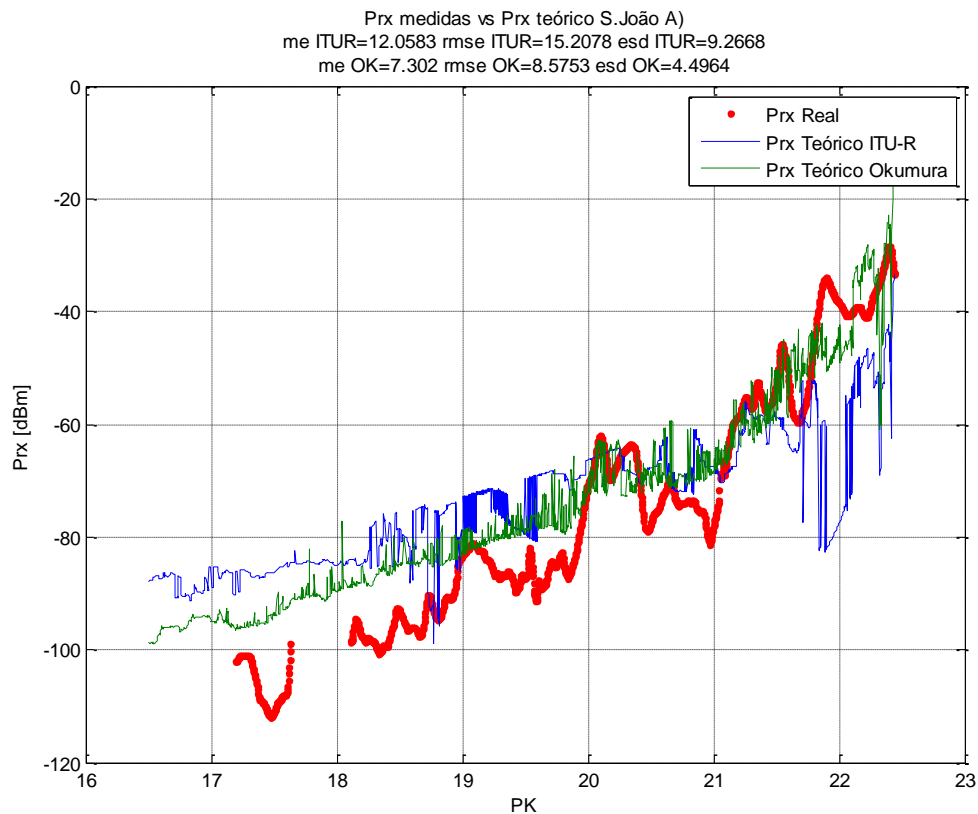
**Figura 4.7 – Predição para a estação base de Pedrouços B) utilizando o método de traçados mistos do modelo Okumura-Hata.**

A Tabela 4.1 mostra a alteração dos indicadores utilizando o método de traçados mistos do modelo ITU-R e do modelo Okumura-Hata. Utilizando o método de traçados mistos do modelo Okumura-Hata verifica-se uma melhoria de 3 dB no erro médio e uma redução de 1,2 dB do desvio padrão do erro, diminuindo a margem para 4,4 dB. Com isto conclui-se que o método de traçados mistos do modelo Okumura-Hata é superior ao modelo de traçados mistos do modelo ITU-R 1546-5.

**Tabela 4.1 – Diferença entre o método de traçados misto do modelo ITU-R e do Okumura-Hata.**

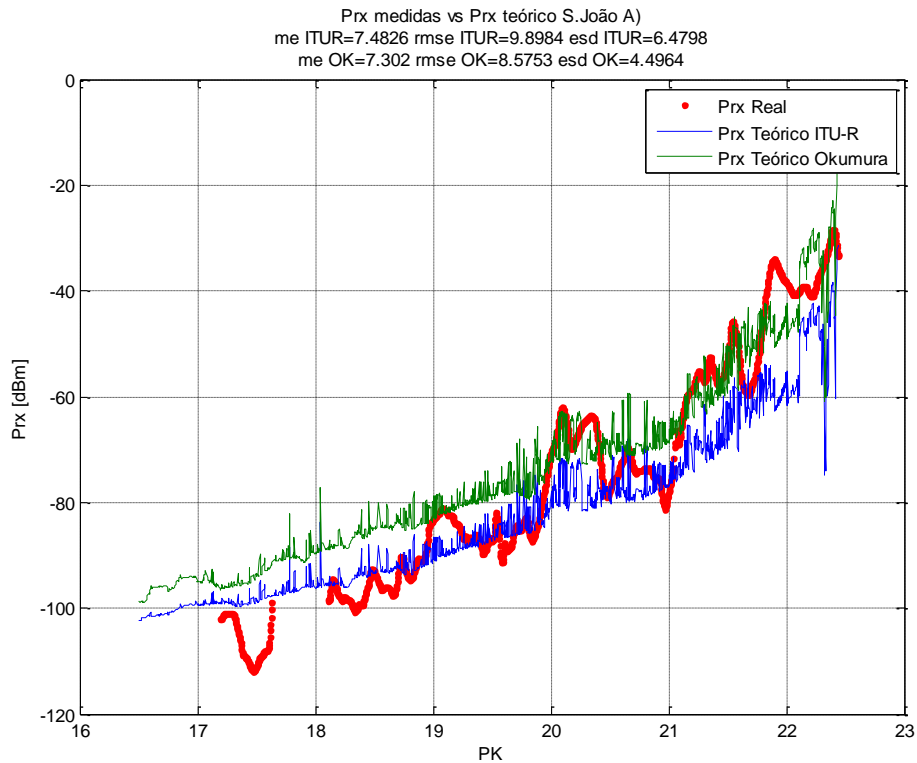
	ME	RMSE	ESD
ITU-R	8,26	9,96	5,58
ITU-R com traçados mistos Okumura	5,53	7,1	4,4

Na Figura 4.8 é feita uma comparação entre a predição e as medidas de sinal rádio referentes à estação base de São João A). Entre o PK 17 e 18 verifica-se uma diferença bastante significativa entre a predição e as medidas de sinal rádio de ambos os modelos de predição. Esta diferença deve-se ao facto de ter sido construída uma urbanização, nas proximidades da linha, que não está contabilizada na cartografia utilizada nas predições, pois esta alteração foi feita posteriormente à data de aquisição da cartografia. Esta ocorrência serve para demonstra a importância de se trabalhar com informação geográfica atual [2]. Na predição desta estação base verifica-se que existem diversas obstruções ao sinal, principalmente entre o PK 21 e 23, isto provoca uma diferença grande entre as curvas de medidas e do modelo ITU-R causando um aumento do erro medido. Pelo contrário o modelo Okumura-Hata acompanha as medidas de sinal rádio ao longo do percurso, superiorizando-se na predição do nível de sinal referente a esta estação base.



**Figura 4.8 - Predição para a estação base de São João A).**

Com o objetivo de tentar diminuir o erro de predição do modelo ITU-R substituiu-se o método que contabiliza as perdas por difração do modelo ITU-R, ângulo de desobstrução do recetor, pelo método utilizado no modelo Okumura-Hata, o método de Deygout. Esta alteração é mostrada na Figura 4.9.



**Figura 4.9 - Predição para a estação base de São João A), utilizando o método de Deygout.**

Pela análise da Figura 4.9 percebe-se que a curva referente ao modelo ITU-R 1546-5 fica com um comportamento semelhante ao da curva do modelo Okumura-Hata, aproximando-se das medidas de sinal rádio. Isto contribui para uma diminuição do erro de predição, como mostra a Tabela 4.2. Regista-se uma diminuição do erro médio de 4,6 dB e uma redução de 2,8 dB do desvio padrão, diminuindo a margem para 6,5 dB. Com isto conclui-se que o método de contabilizar as perdas por difração do modelo ITU-R 1546-5 introduz perdas no nível de sinal muito elevados, quando comparado ao modelo Okumura-Hata, aumentando assim o erro de predição em ambientes sub-urbanos.

**Tabela 4.2 - Diferença entre o modelo ITU-R com a correção do ângulo de desobstrução do recetor e com a aplicação do método de Deygout.**

	<b>ME</b>	<b>RMSE</b>	<b>ESD</b>
ITU-R	12,1	15,2	9,27
ITU-R com Deygout	7,48	9,9	6,48

As figuras 4.10 e 4.11 representam os indicadores de erro de predição para os modelos de propagação Okumura-Hata e ITU-R 1546-5, respetivamente.

### Indicadores de erro de predição - Okumura-Hata

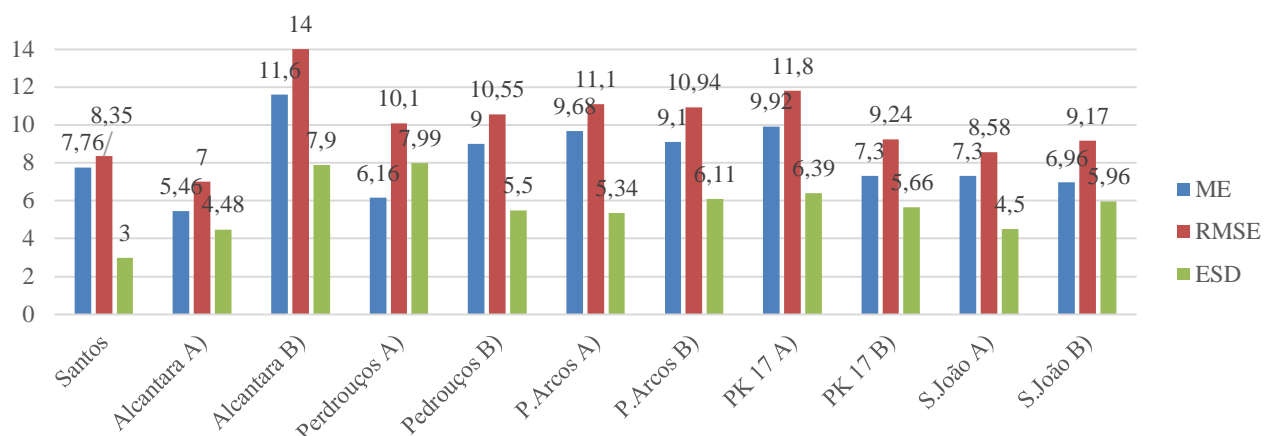


Figura 4.10 - Indicadores de erro de predição para o modelo Okumura-Hata, na linha de Cascais.

### Indicadores de erro de predição - ITU-R 1546-5

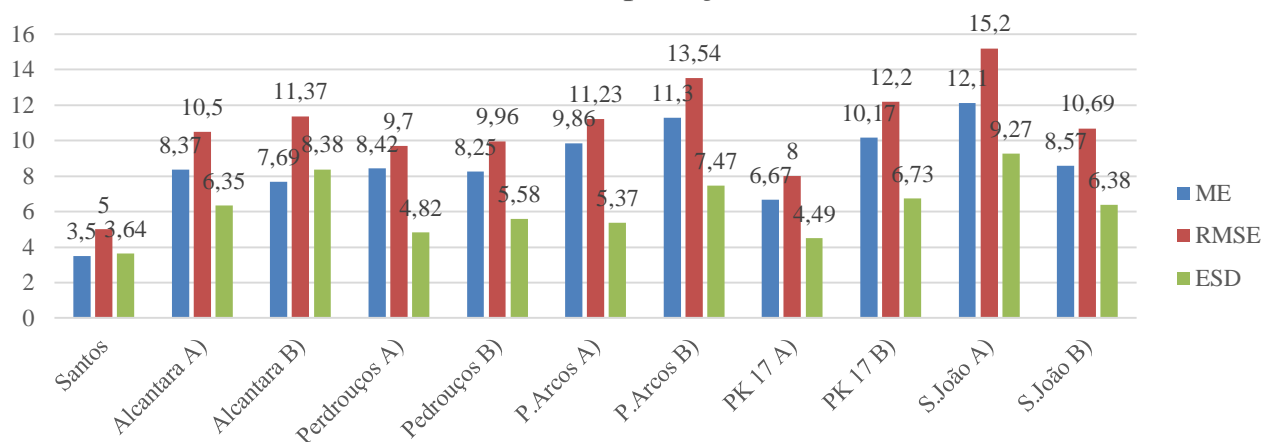


Figura 4.11 – Indicadores de erro de predição para o modelo ITU-R 1546-5, na linha de Cascais.

Na linha de Cascais o desempenho da predição do modelo de Okumura-Hata foi superior ao desempenho do modelo de ITU-R. O modelo de Okumura-Hata foi superior na predição de sete estações, Alcântara a), Pedrouços a), Paço de Arcos a), Paço de Arcos b), PK 17 b), São João a) e São João b). O modelo de ITU-R foi superior na predição de quatro estações, Santos, Alcântara b), Pedrouços b) e PK 17 a). O facto do ambiente de propagação ser sub-urbano, o que se traduz num maior número de obstáculos ao sinal, e o facto de o sinal transpor zonas de mar leva a que se consiga obter melhor desempenho com o modelo de Okumura-Hata. Este modelo traduz melhor estas situações, como se pode perceber pela análise das figuras e tabelas anteriores, pois a atenuação do sinal, causada por obstáculos, aproxima-se mais da situação real, ao contrário do modelo ITU-R 1546-5, que adiciona uma atenuação ao sinal muito superior à situação real.

## 4.4. Linha de Vendas Novas-Évora

Na linha de Vendas Novas-Évora foram analisadas as coberturas rádio de sete estações base, comparando o resultado da predição do modelo Okumura-Hata e do modelo ITU-R 1546-5 com as medidas de sinal rádio, e extraindo os resultados através dos parâmetros estatísticos de erro. Nas figuras seguintes são apresentados os resultados. As linhas a azul representam a predição pelo modelo ITU-R 1546-5, as linhas a verde representam a predição pelo modelo Okumura-Hata, e as linhas a vermelho representam as medidas de sinal rádio.

Na Figura 4.12 é feita uma comparação entre a predição, que resulta da aplicação dos modelos teóricos, com as medidas de sinal rádio para a estação base de Vendas Novas. O nível de sinal predito pelo modelo ITU-R aproxima-se mais, em comparação com o nível de sinal do modelo Okumura-Hata, do nível de sinal das medidas, verificando-se a maior diferença entre o PK 73 e o PK 77. Isto e o facto de existirem poucas obstruções significativas ao sinal, registando-se três no PK 63, PK 66 e no PK 69, fazem com que o modelo ITU-R tenha um desempenho superior na predição desta estação base.

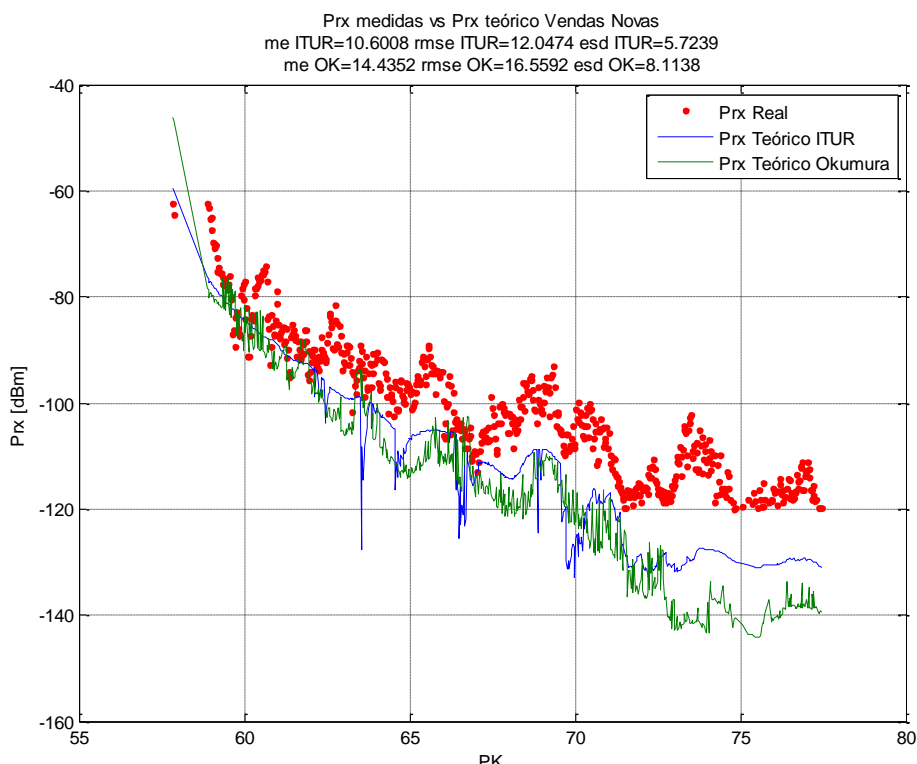


Figura 4.12 - Predição para a estação base de Vendas Novas.

Na Figura 4.13 é feita uma comparação entre a predição e as medidas de sinal rádio referentes à estação base de Torre da Gadanha. Pela análise da figura verifica-se que a curva correspondente ao modelo ITU-R evolui de forma semelhante à curva das medidas de sinal rádio. O facto de não existirem obstruções significativas ao sinal e a proximidade da predição aos valores das medidas, traduz-se numa melhor predição por parte do modelo ITU-R, obtendo-se um erro médio baixo e uma margem baixa.

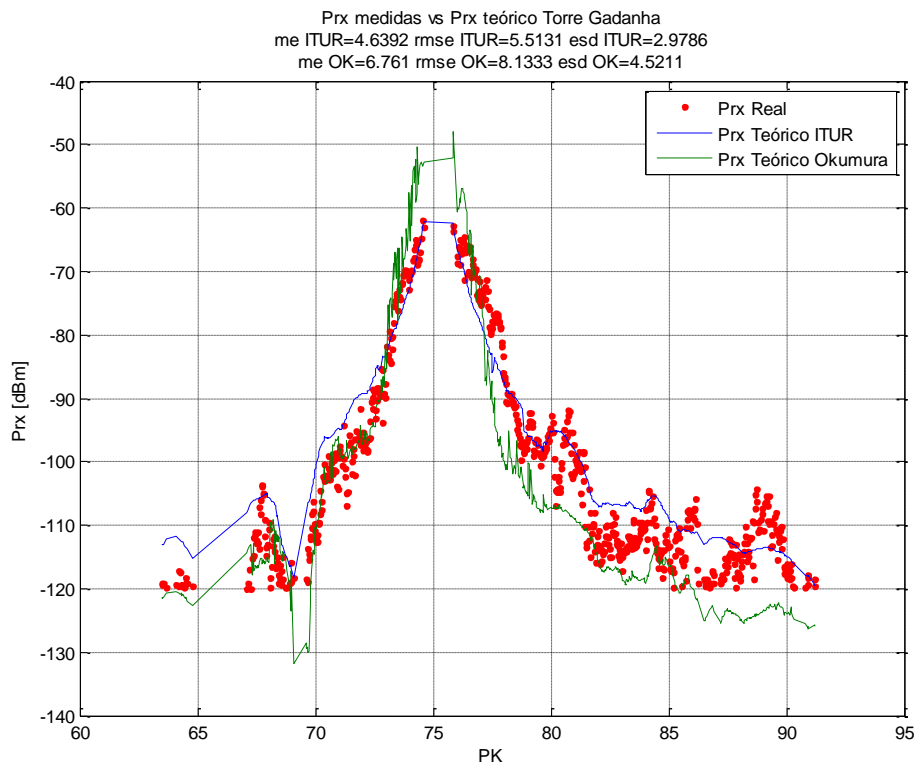
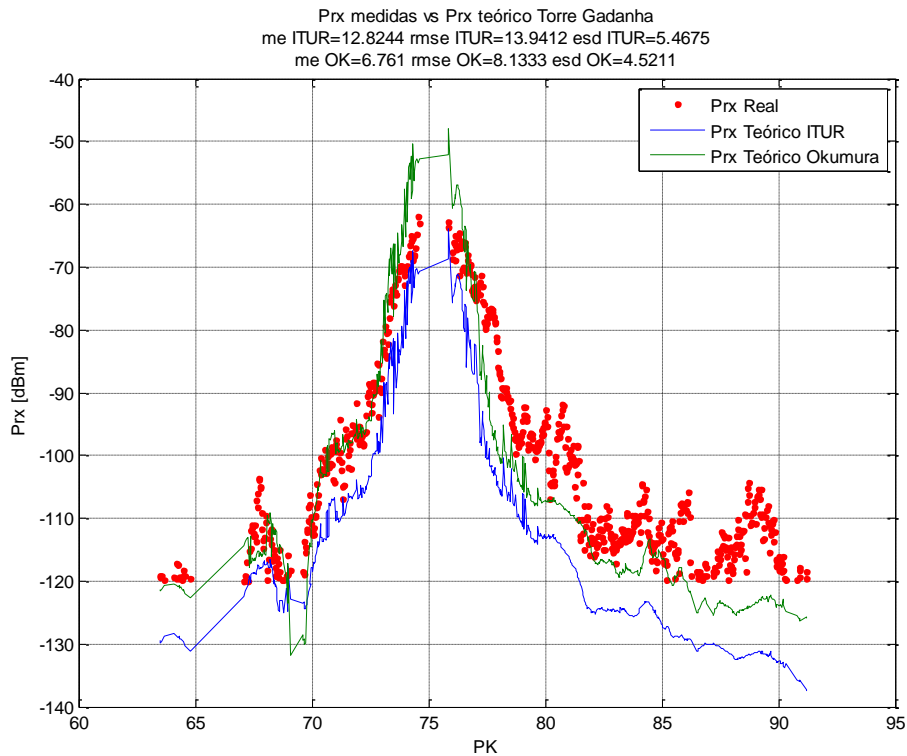


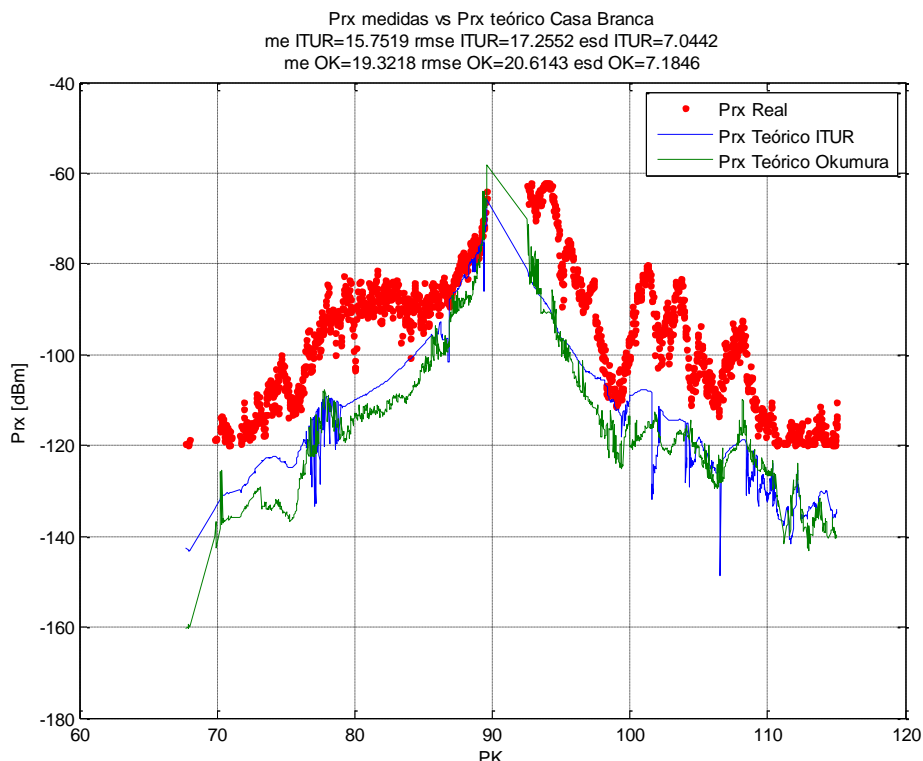
Figura 4.13 - Predição para a estação base de Torre da Gadanha.

De modo a verificar a possibilidade da diminuição do erro de predição nesta estação base, aplicou-se o método de Deygout ao modelo ITU-R 1546-5, como se pode verificar na Figura 4.14. O resultado foi um aumento do erro médio em 8 dB, passando a curva do modelo ITU-R a ter um comportamento semelhante a curva do modelo Okumura-Hata. Esta alteração de comportamento provoca um afastamento da predição em relação as medidas de sinal rádio, o que se traduz num aumento do erro médio.



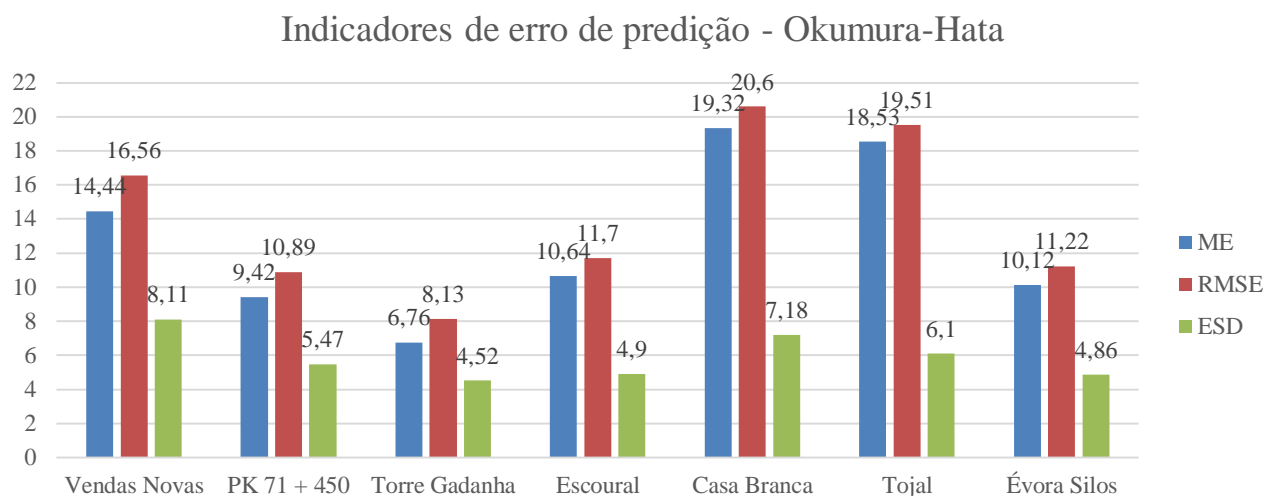
**Figura 4.14 - Predição para a estação base de Torre da Gadanha utilizando o método de Deygout.**

Na Figura 4.15 é feita uma comparação entre a predição e as medidas de sinal rádio referentes à estação base de Casa Branca. Nesta estação base obtiveram-se os piores resultados, verificando-se um afastamento significativo entre as medidas de sinal rádio e os valores de sinal predito pelos dois modelos. Assim, os valores de erro médio são bastante altos.

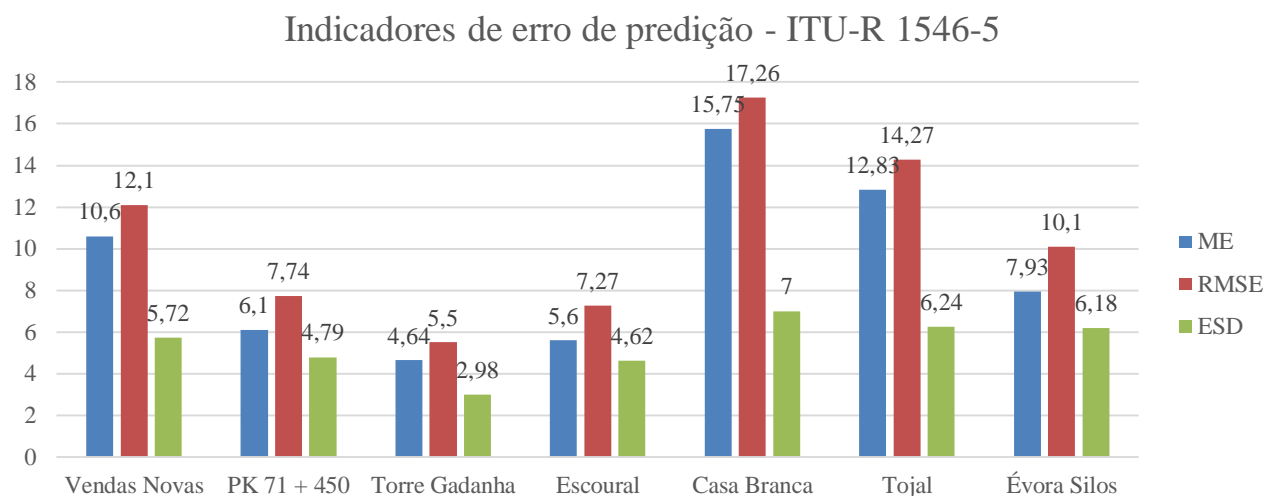


**Figura 4.15 - Predição para a estação base de Casa Branca.**

As figuras 4.16 e 4.17 representam os indicadores de erro de predição para os modelos de propagação Okumura-Hata e ITU-R 1546-5, respetivamente.



**Figura 4.16 - Indicadores de erro de predição para o modelo Okumura-Hata, na linha de Vendas Novas-Évora.**



**Figura 4.17 - Indicadores de erro de predição para o modelo ITU-R 1546-5, na linha de Vendas Novas-Évora.**

Na linha de Vendas Novas-Évora o desempenho da predição do modelo de ITU-R 1546-5 foi superior ao desempenho do modelo de Okumura-Hata. O modelo de ITU-R foi melhor na predição de todas as estações base presentes na linha. O facto de não existirem zonas mar e do número de obstruções significativas ser menor que num ambiente sub-urbano, pois é um ambiente puramente rural, contribuem para o sucesso do modelo ITU-R 1546-5 na linha de Vendas Novas-Évora.

## 4.5. Análise da linha do Algarve

Na linha do Algarve foram analisadas as coberturas rádio de sete estações base, comparando os resultados da predição do modelo Okumura-Hata e do modelo ITU-R 1546-5 com as medidas de sinal rádio, e extraindo os resultados através dos parâmetros estatísticos de erro. Nas figuras seguintes são apresentados os resultados. As linhas a azul representam a predição pelo modelo ITU-R 1546-5, as linhas a verde representam a predição pelo modelo Okumura-Hata, e as linhas a vermelho representam as medidas de sinal rádio.

Na Figura 4.18 é feita uma comparação entre a predição, que resulta da aplicação dos modelos teóricos, com as medidas de sinal rádio para a estação base de Faro. Como é possível observar pela análise da figura, existem diversas obstruções significativas ao sinal. A forma como são contabilizadas estas obstruções no modelo ITU-R, adicionando uma atenuação excessiva quando comparado com o modelo Okumura-Hata, penalizam o modelo ITU-R. De modo a tentar diminuir o erro utilizou-se o método de Deygout. O resultado pode ser comprovado na Figura 4.19.

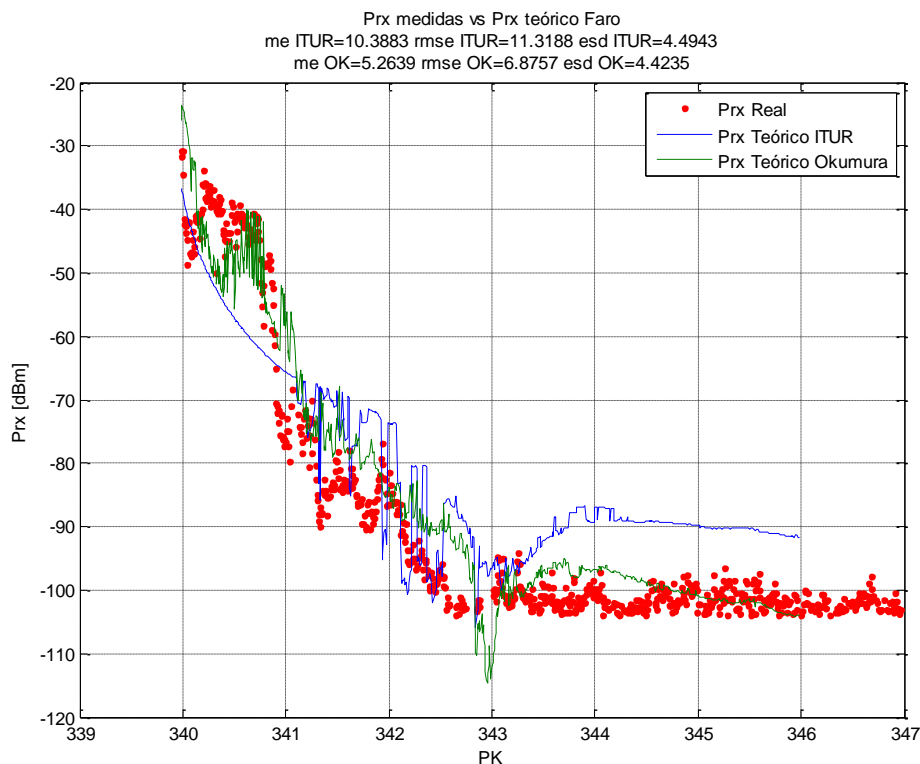
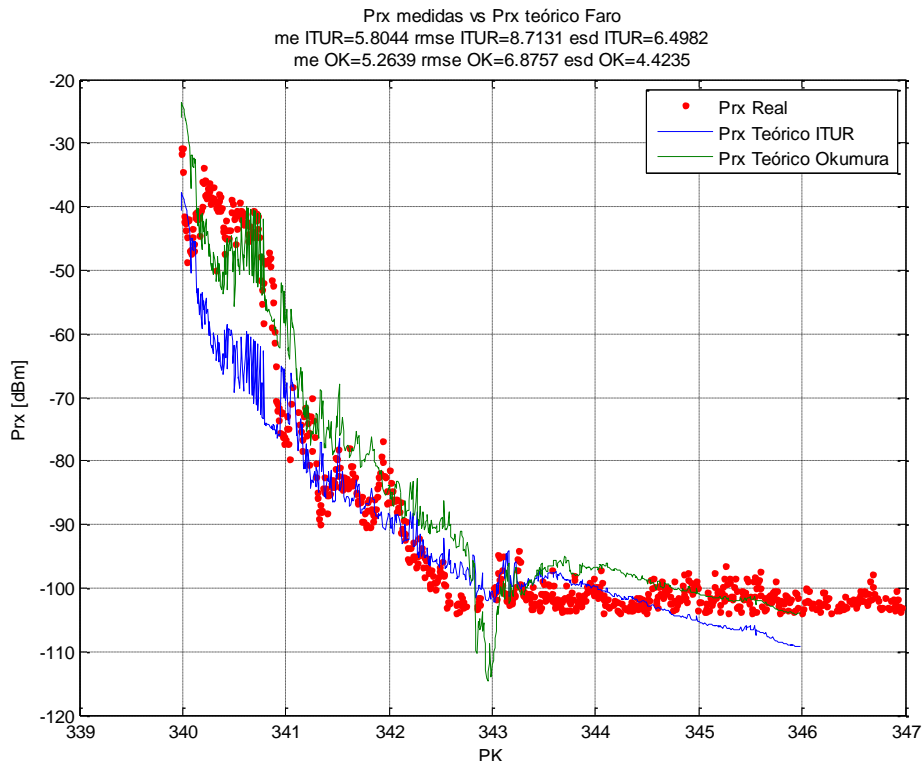


Figura 4.18 - Predição para a estação base de Faro.



**Figura 4.19 - Predição para a estação base de Faro utilizando o método de Deygout.**

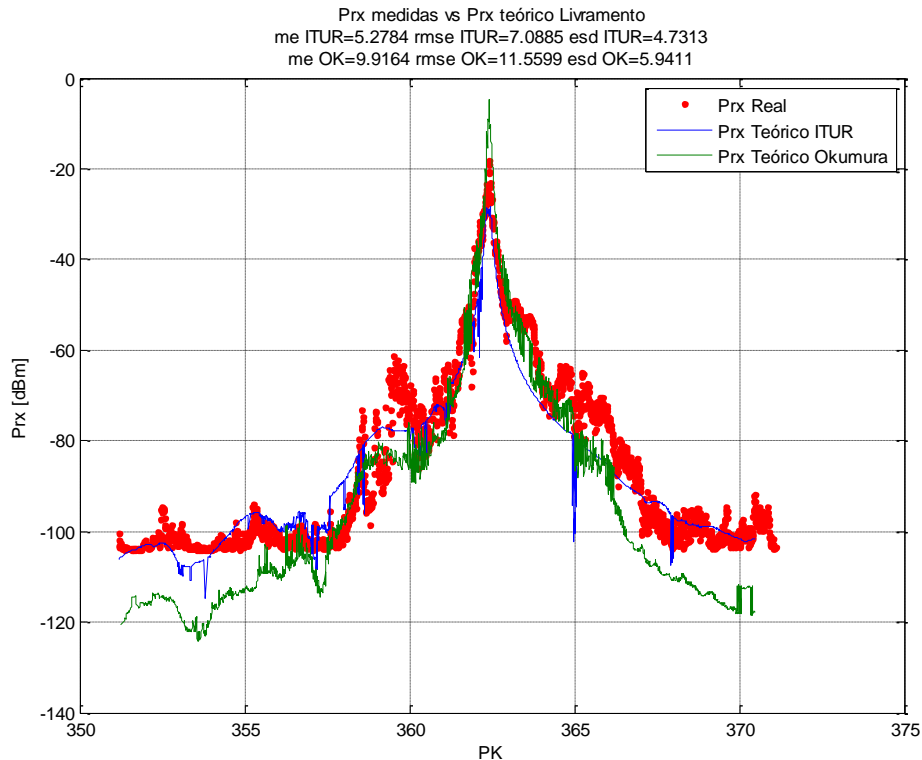
Pela análise da Figura 4.19 percebe-se que a curva referente ao modelo ITU-R 1546-5 fica com um comportamento semelhante ao da curva do modelo Okumura-Hata, aproximando-se das medidas de sinal rádio. Isto contribui para uma diminuição do erro de predição, como mostra a Tabela 4.3. Regista-se uma diminuição do erro médio de 4,6 dB e um aumento de 2,2 dB do desvio padrão, aumentado a margem para 6,5 dB. Com isto conclui-se, mais uma vez, que o método de contabilizar as perdas por difração do modelo ITU-R 1546-5 introduz perdas no nível de sinal muito elevados, quando comparado ao modelo Okumura-Hata, aumentando assim o erro de predição em ambientes sub-urbanos.

**Tabela 4.3 - Diferença entre o modelo ITU-R com a correção do ângulo de desobstrução do recetor e com a aplicação do método de Deygout.**

	<b>ME</b>	<b>RMSE</b>	<b>ESD</b>
ITU-R	10,39	11,32	4,49
ITU-R com Deygout	5,8	8,7	6,5

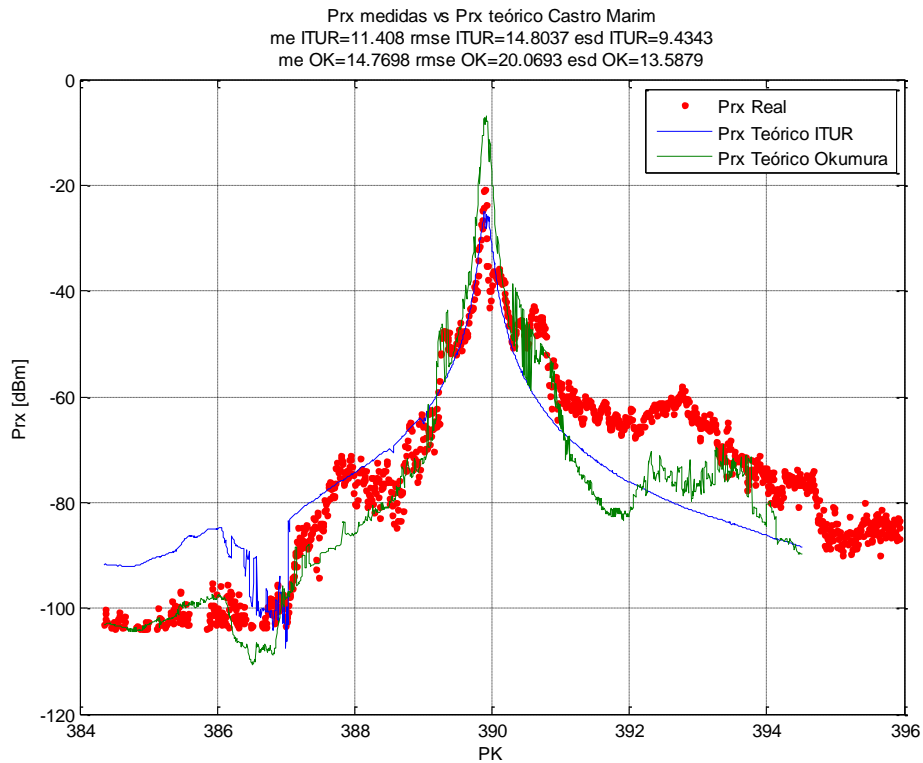
Na Figura 4.20 é feita uma comparação entre a predição e as medidas de sinal rádio para a estação base do Livramento. Na análise à figura verifica-se que a curva referente ao modelo ITU-R 1546-5 acompanha a curva das medidas de sinal rádio. Na predição desta estação base verifica-se a presença de apenas um obstáculo significante, no PK 365, esta

situação aliada à proximidade das curvas do modelo teórico e de sinal rádio provam a aplicabilidade do modelo ITU-R a ambientes com poucos obstáculos, ou seja, rurais.



**Figura 4.20 - Predição para a estação base do Livramento.**

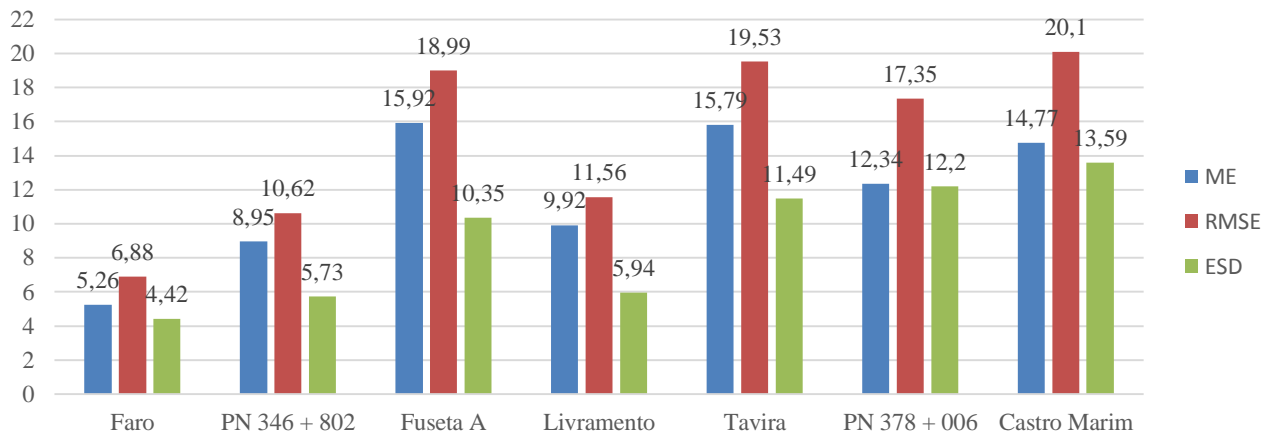
Na Figura 4.21 é feita uma comparação entre a predição, que resulta da aplicação dos modelos teóricos, com as medidas de sinal rádio para a estação base de Castro Marim. Na análise à figura verifica-se que a curva referente ao modelo ITU-R 1546-5 acompanha a curva das medidas de sinal rádio, exceto entre o PK 391 e 394. Na predição desta estação base verifica-se a presença de poucos obstáculos significantes, apenas no PK 387, esta situação aliada à diferença entre as curvas de sinal medido e predito traduz-se num erro de predição um pouco alto, aproximadamente 11,4 dB, mas inferior ao erro de predição do modelo Okumura-Hata, aproximadamente 14,77.



**Figura 4.21 - Predição para a estação base de Castro Marim.**

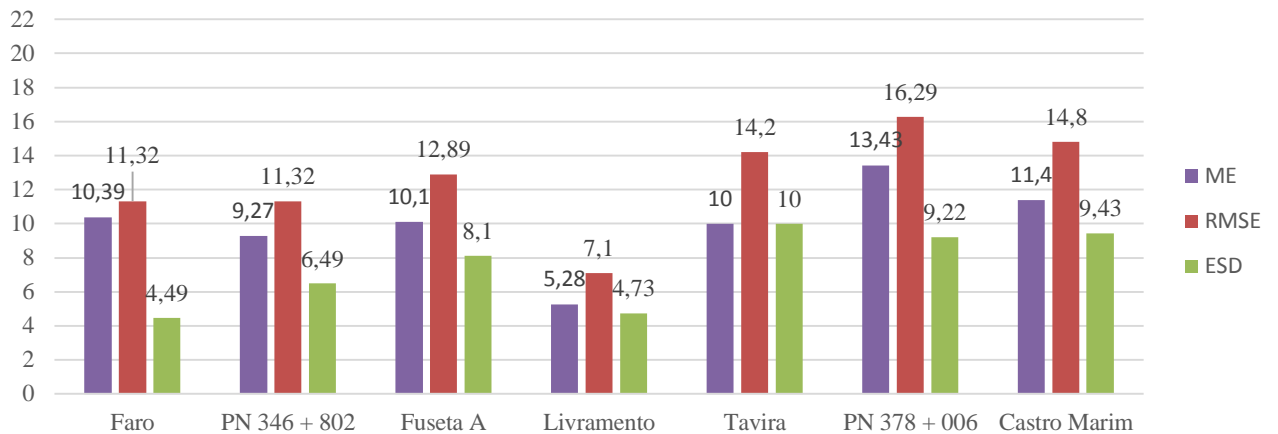
As figuras 4.22 e 4.23 representam os indicadores de erro de predição para os modelos de propagação Okumura-Hata e ITU-R 1546-5, respetivamente.

### Indicadores de erro de predição - Okumura-Hata



**Figura 4.22 - Indicadores de erro de predição para o modelo Okumura-Hata, na linha do Algarve.**

## Indicadores de erro de predição - ITU-R 1546-5



**Figura 4.23 – Indicadores de erro de predição para o modelo ITU-R 1546-5, na linha do Algarve.**

Na linha do Algarve o desempenho da predição do modelo de ITU-R 1546-5 foi semelhante ao desempenho do modelo de Okumura-Hata. O modelo de ITU-R foi superior na predição de quatro estações base presentes na linha, e o modelo de Okumura-Hata foi superior em três estações base. O facto do número de obstruções significativas ser menor, pois é um trajeto rural, com algumas zonas de mar contribuem para o equilíbrio dos modelos na predição do nível de sinal na linha do Algarve.

## 5. Conclusões

### 5.1. Trabalho Desenvolvido

Este trabalho tinha como objetivo principal aferir a qualidade de predição, em linhas ferroviárias, do modelo ITU-R 1546-5, comparando-o com o modelo que é atualmente utilizado na predição neste tipo ambientes, o modelo de Okumura-Hata.

De modo a realizar-se a predição, através do modelo ITU-R 1546-5, desenvolveu-se um *software* que através dos parâmetros de entrada, altura da estação base emissora, distância entre emissor e recetor, perfil do terreno, morfologia do terreno, presença de água no trajeto e obstrução de obstáculos, permitiu calcular o campo elétrico referente a cada PK da linha. O valor da atenuação de propagação é convertido a partir do valor do campo elétrico calculado. Através da atenuação de propagação, da potência da antena do emissor, da atenuação dos cabos e do ganho da antena, calcula-se a potência recebida no terminal recetor.

### 5.2. Resultados

O facto do ambiente de propagação, na linha de Cascais, ser sub-urbano, o que se traduz num maior número de obstáculos ao sinal, e o facto de o sinal transpor zonas de mar leva a que se consiga obter melhor desempenho com o modelo de Okumura-Hata neste tipo de ambientes. Este modelo traduz melhor estas situações, como se pode perceber pela análise das figuras e tabelas do Capítulo 4, pois a atenuação do sinal, causada por obstáculos, aproxima-se mais da situação real, ao contrário do modelo ITU-R 1546-5, que adiciona uma atenuação ao sinal muito superior à situação real, aumentando o erro de predição relativo ao modelo. A utilização dos métodos de Deygout e traçados mistos, aplicados no modelo Okumura-Hata, no modelo ITU-R 1546-5 revelaram-se satisfatórios pois permitiram diminuir o erro de predição associado a este modelo. Deste modo foi possível provar, que em ambientes sub-urbanos e com presença de mar, o modelo de Okumura-Hata deve ser aplicado em detrimento do modelo ITU-R 1546-5.

Na linha de Vendas Novas-Évora o desempenho da predição do modelo de ITU-R 1546-5 foi superior ao desempenho do modelo de Okumura-Hata. O modelo de ITU-R foi melhor na predição de todas as estações base presentes na linha. O facto de não existir

zonas de mar e do número de obstruções significativas ao sinal ser menor, pois é um ambiente puramente rural, contribuem para o sucesso do modelo ITU-R 1546-5 na linha de Vendas Novas-Évora. Neste tipo de ambiente o modelo ITU-R 1546-5 deve ser utilizado em detrimento do modelo Okumura-Hata.

Na linha do Algarve o desempenho da predição do modelo de ITU-R 1546-5 foi semelhante ao desempenho do modelo de Okumura-Hata. O modelo de ITU-R foi superior na predição de quatro estações base presentes na linha, e o modelo de Okumura-Hata foi superior em três estações base. O facto do número de obstruções significativas variar na predição das várias estações base, algumas com zonas de mar, contribuem para o equilíbrio dos modelos na predição do nível de sinal na linha do Algarve. Nas predições onde o número de obstáculos é maior o modelo de Okumura-Hata consegue ter melhores resultados pois traduz estas situações de melhor forma que o modelo ITU-R. Pelo contrário, nas predições onde o número de obstáculo é reduzido, ou nulo, o modelo ITU-R 1546-5 consegue obter menores erros de predição que o modelo de Okumura-Hata.

Em suma, o modelo ITU-R 1546-5 revelou-se superior na predição em ambientes rurais, com poucas obstruções ao sinal, e sem zonas de mar. O modelo Okumura-Hata revelou-se superior em ambientes sub-urbanos, com presença de mar, e com várias obstruções ao sinal.

### **5.3. Trabalho futuro**

O estudo de outras linhas ferroviárias onde o GSM-R possa ser implementado, com ambientes de propagação diferentes dos estudados neste trabalho, tais como ambientes urbanos, seria um bom teste ao modelo ITU-R 1546-5. A implementação do modelo ITU-R 1546-5 no *software* Railwave seria uma mais-valia para esta ferramenta.

# **Anexos**



## A. Modelo de propagação Okumura-Hata

### Modelo Okumura-Hata

A expressão que caracteriza a atenuação de propagação calculada pelo modelo de Okumura-Hata é dada por (3.1).

$$Lp_{[dB]} = a_1 + a_2 \log(f_{[MHz]}) + a_3 \log(h_{be[m]}) + b_1 \log(d_{[km]}) + b_2 \log(h_{be[m]}) \log(d_{[km]}) - [(1,1 \log(f_{[MHz]}) - 0,7)h_m - 1,56 \log(f_{[MHz]}) + 0,8] - \Sigma(\text{factores correctivos}) \quad (3.1)$$

onde:

- $a_1 = 69,55$
- $a_2 = 26,16$
- $a_3 = -13,82$
- $b_1 = 44,9$
- $b_2 = -6,55$

O somatório dos fatores corretivos é dado pela soma da influência da água, ondulação do terreno, posição da na ondulação do terreno, orientação e difração [8].

### Influência da água

$$K_{mp}(\beta)_{[dB]} = \begin{cases} m_{11} \times \beta^2 + m_{21} \times \beta \\ m_{12} \times \beta^2 + m_{22} \times \beta \end{cases} \quad (3.2)$$

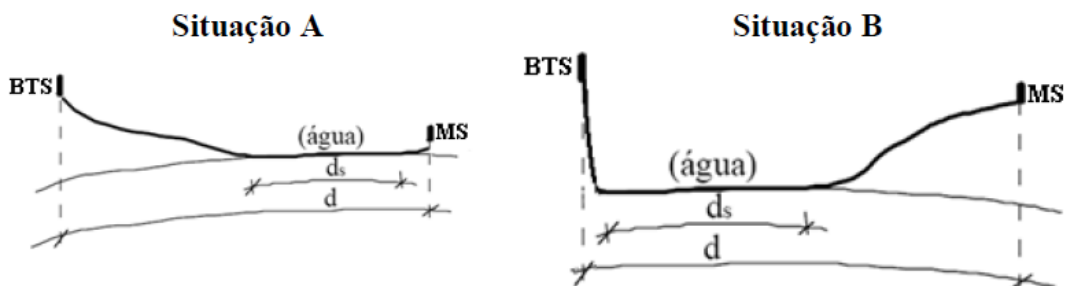


Figura A. 1 - Influência da água, retirado de [8].

onde:

- $\beta = d_s/d$
- $m_{11} = -8$

- $m_{12} = 7,8$
- $m_{21} = 19$
- $m_{22} = 5,8$

A distância entre emissor e receptor,  $d$ , não pode ser superior a 30 km.

### Ondulação do terreno

$$K_{th}(\Delta h)_{[dB]} = u_1 \times \log^2(\Delta h_{[m]}) + u_2 \times \log(\Delta h_{[m]}) + u_3 \quad (3.3)$$

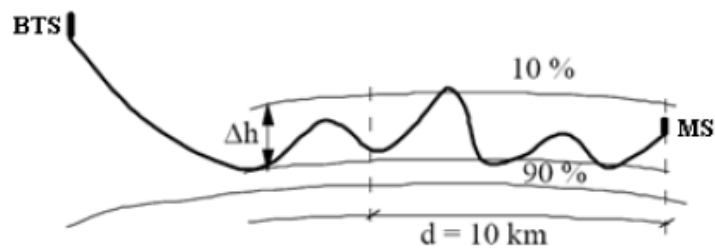


Figura A. 2 - Ondulação do terreno, retirado de [8].

onde:

- $u_1 = -3$
- $u_2 = -0,5$
- $u_3 = 4,5$

### Posição da na ondulação do terreno

$$K_{hp}(\Delta h)_{[dB]} = p_1 \times \log^2(\Delta h_{[m]}) + p_2 \times \log(\Delta h_{[m]}) + p_3 \quad (3.4)$$

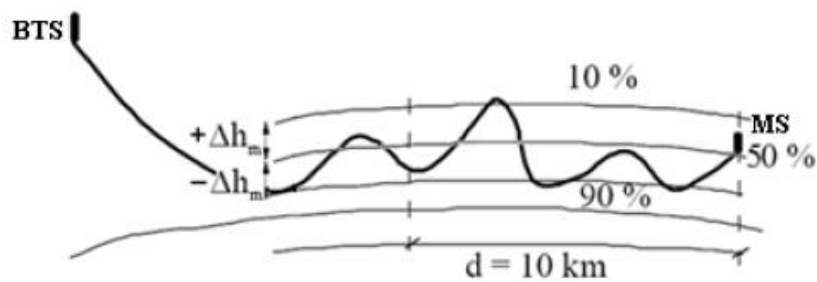


Figura A. 3 - Posição na ondulação do terreno, retirado de [8].

onde:

- $p_1 = -2$
- $p_2 = 16$
- $p_3 = -12$

## Orientação

$$K_{acl}(d)_{[dB]} = c_1 + \log(d_{[km]}) + c_2 \quad (3.5)$$

onde:

- $c_1 = -2,7$
- $c_2 = 8,6$

## Difração – Método de Deygout

$$L_{diff} = L_{diff_1} + L_{diff_2} + L_{diff_3} \quad (3.6)$$

$$L_{diff_k}(v)_{[dB]} = \begin{cases} 0 & , v \leq x_3 \\ x_1 + x_2 * \log(\sqrt{(v_k - 0,1)^2 + 1} + v_k - 0,1), & v > x_3 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$v_k = h \sqrt{\frac{2d}{\lambda d_1 d_2}} \quad (3.8)$$

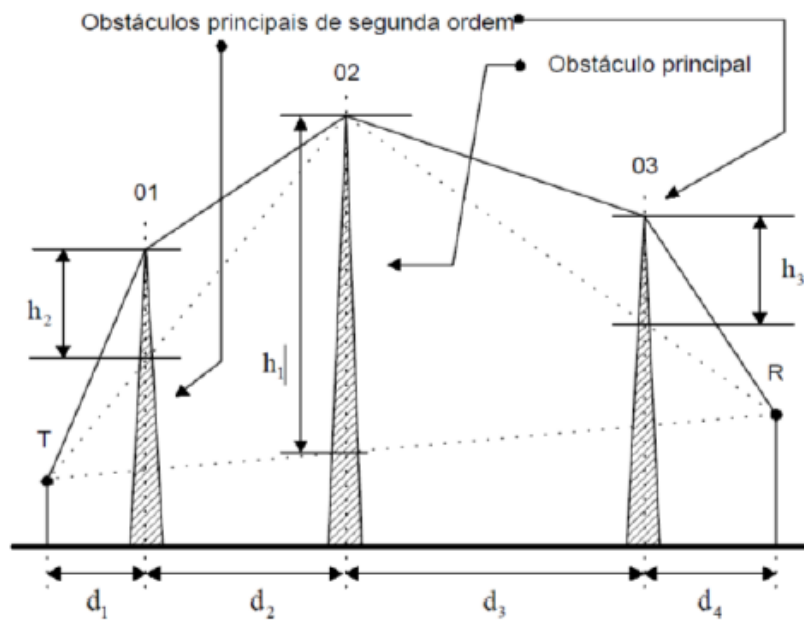


Figura A. 4 - Difração (Método de Deygout), retirado de [8].

onde:

- $x_1 = 6,4$
- $x_2 = 20$
- $x_3 = -0,7$

### **Somatório dos fatores corretivos**

O somatório dos fatores corretivos é dado por (3.9).

$$\sum (\text{factores correctivos}) = K_{mp} + K_{th} + K_{hp} + K_{acl} - L_{diff} \quad (3.9)$$

### **Potência recebida**

$$P_{Rx[\text{dBm}]} = P_{Tx[\text{dBm}]} - L_{feed[\text{dB}]} + G_{ant[\text{dBi}]} - L_p[\text{dB}] \quad (3.10)$$

onde:

- $P_{Tx[\text{dBm}]}$  – Potência de emissão da estação base em dBm.
- $L_{feed[\text{dB}]}$  – Atenuação de cabos conectores e filtros existentes em dB.
- $G_{ant[\text{dBi}]}$  – Ganho da antena de emissão em dBi.
- $L_p[\text{dB}]$  – Atenuação de propagação em dB.

## Referências

- [1] - Introdução do sistema GSM-R e definição do respectivo tipo de autorização. <http://www.anacom.pt/>, Acedido em: Setembro 2014.
- [2] – Ana Beire, "Otimização de Modelo de Propagação utilizando Algoritmos Genéticos: Caso das Comunicações Móveis em Ferrovia", Dezembro 2013.
- [3] - Okumura, Y., "Field Strength and Its Variability in UHF and VHF Land-Mobile Radio Service". Review of the Electrical Communication Laboratory, Vol. 16, Nº 9-10, October 1968.
- [4] - Nuno Cota, António Serrador, Pedro Vieira, Ana Beire, António Rodrigues, "On the Use of Okumura-Hata Propagation Model on Railway Communications", in Wireless Personal Multimedia Communications Symposium (WPMC2013), Atlantic City, New Jersey, USA, 2013.
- [5] – ITU-R Recommendation P.1546-5, "Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz", September 2013.
- [6] – W. Lee, "Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. VT-34, no. 1, pp. 22-27, February 1985.
- [7] – REFER Telecom / ISEL, "RailWave: User Manual", version 1.0, Janeiro 2013
- [8] – ADEETC/ GIEST, "RailWave - Especificações da predição", 2012.