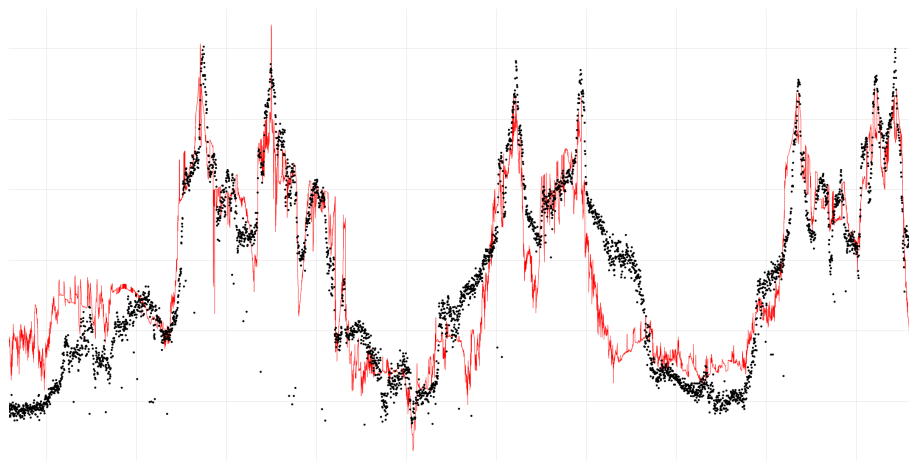




**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de  
Computadores**



**Estimação de Cobertura Rádio em Comunicações  
Ferroviárias recorrendo ao *Irregular Terrain Model***

**Pedro Manuel Morão Prior**

(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações

Orientador : Professor Nuno Cota

Júri:

Presidente: Professor Doutor António Serrador

Vogal: Professor Doutor Carlos Mendes

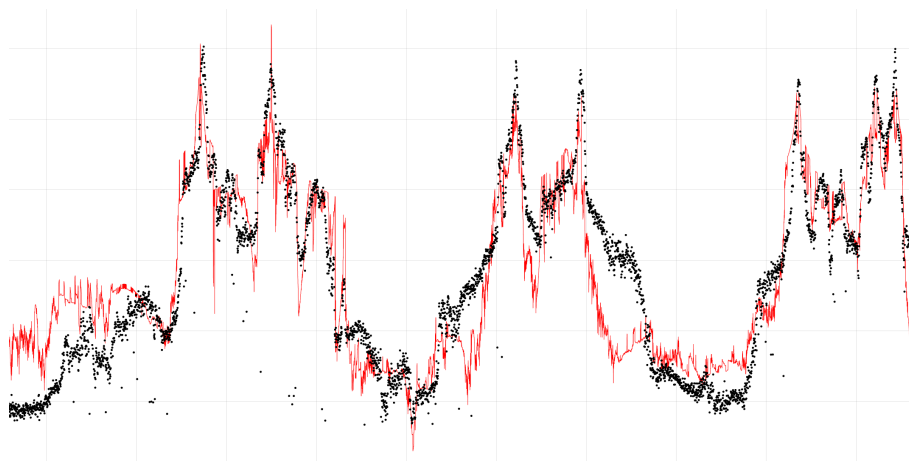
**Janeiro, 2021**





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de  
Computadores**



**Estimação de Cobertura Rádio em Comunicações  
Ferroviárias recorrendo ao *Irregular Terrain Model***

**Pedro Manuel Morão Prior**

(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações

Orientador : Professor Nuno Cota

Júri:

Presidente: Professor Doutor António Serrador

Vogal: Professor Doutor Carlos Mendes

**Janeiro, 2021**



# Agradecimentos

Esta dissertação é a conclusão de um ciclo composto por vários anos de estudo e muitas horas de trabalho investidas. Apesar de ser um projeto individual, para ela várias pessoas contribuíram e deixaram a sua marca, às quais gostaria de deixar o meu profundo agradecimento.

Ao professor Nuno Cota, por toda a orientação, tempo empregue e compreensão. Os conhecimentos transmitidos e o sentido prático aplicado impactaram não só o trabalho desenvolvido, como a minha forma de analisar muitas questões.

À empresa Solvit, mais particularmente à Ana Rita Beire, pelos recursos disponibilizados e pelo auxílio prestado em várias fases deste trabalho.

Aos meus pais e irmão - Carlos, Ana e João - por me acompanharem e possibilitarem o alcançar de mais uma meta, proporcionando, além dos meios, um apoio e preocupação incondicional.

À minha namorada - Joana - pela motivação e apoio constante e, principalmente, pelo porto de abrigo que sempre foi.

Aos meus colegas e amigos - Tiago, Gonçalo, André, David, Paulo e Tiago - que me acompanharam em todos os momentos desta longa jornada, desde os mais relaxados aos mais rigorosos.

Por fim, gostaria não só de agradecer, como dedicar esta dissertação aos meus avós - Lurdes, Joaquim, Helena e Manuel - que iniciaram este ciclo comigo e, infelizmente, nem todos o puderam ver concluído. No entanto, sei que me acompanham.



# Resumo

Um dos aspetos fundamentais para o desenvolvimento de uma rede de comunicações móveis é o planeamento das áreas de cobertura de cada estação base. Esta predição de sinal, estimada por modelos de propagação, tem de ser o mais próximo da realidade possível e implica o conhecimento de diversos fatores que influenciam a propagação num determinado ambiente. As comunicações em linhas ferroviárias localizam-se, muitas vezes, em ambientes rurais com significativa variação de perfis de terreno.

O *Irregular Terrain Model* (ITM) é um modelo que se apresenta promissor neste tipo de situações porque tem em especial consideração as características do terreno numa determinada área geográfica, assim como alguns fatores ambientais e estatísticos.

O objetivo deste trabalho reside na análise da capacidade de predição de sinal deste modelo. Neste sentido, foi implementado um *software* capaz de comparar o desempenho do ITM com outro muito utilizado neste tipo de ambiente, o *Okumura-Hata*, e escolhido um troço da linha da Beira Baixa caracterizado por irregularidades no terreno bastante acentuadas.

Inicialmente, o ITM foi otimizado para o tipo de ambiente analisado através da modificação de alguns parâmetros. De seguida, em oito estações base desta linha ferroviária, desde Belver a Ródão, foram realizadas comparações entre ambos os modelos de propagação e medidas a que se teve acesso. Analisaram-se, ponto a ponto e para cada percurso, os resultados de nível de sinal predito face à realidade, recorrendo a estatísticas de erro.

Os resultados obtidos suportam a ideia de o ITM ser um modelo promissor na

predição rádio em ambientes rurais com muitos desníveis no terreno, tendo apresentado um desempenho significativamente melhor que o *Okumura-Hata* na maioria das situações analisadas, assim como estimativas próximas às medidas registadas. No entanto, destaca-se a dificuldade em lidar com obstruções significativas na linha de vista de transmissão, principalmente em distâncias inferiores a 1 quilómetro, chegando a demonstrar desvios de 10 a 20 dB face às medidas.

**Palavras-chave:** *Irregular Terrain Model; Longley-Rice; Okumura-Hata; Modelos de Propagação; Comunicações Ferroviárias.*

# Abstract

One of the main aspects for the development of a mobile communications network is the planning of the coverage areas of each base station. This signal prediction, estimated by propagation models, has to be as close to reality as possible and implies the accountability of several factors that influence the propagation in a given area. Communications on railways are often located in rural areas with significant variation of terrain profiles.

The *Irregular Terrain Model* (ITM) presents itself as a promising model in this type of situation because it takes into account the characteristics of the terrain in a given geographical area, as well as some environmental and statistical factors.

The objective of this work lies in the analysis of the signal prediction quality of this model. For this purpose, a *software* capable of comparing the performance of ITM with another one widely used in this type of environment, *Okumura-Hata*, was implemented and a section of the Beira Baixa railway was chosen, being characterized by rather sharp irregularities in the terrain.

Initially, the ITM was tuned for the type of environment analyzed through the modification of some parameters. Then, in eight base stations of this railway, from Belver to Ródão, comparisons were made between both propagation models and measures. The results of the predicted signal level were analysed, point by point and for each path, using parameters of statistical error.

The results obtained support the idea that ITM is a promising model in rural areas with many terrain unevenness, having presented a significantly better performance than *Okumura-Hata* in most of the situations analyzed, as well as predicted signal levels very close to the measures recorded. However, the difficulty in dealing with significant obstructions in the transmission line-of-sight is highlighted,

especially at distances of less than 1 kilometer, even showing deviations of 10 to 20 dB from the measurements.

**Keywords:** Irregular Terrain Model; Longley-Rice; Okumura-Hata; Propagation Models; Railways Communications.

# Índice

<b>Resumo</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>xxi</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	2
1.4 Estrutura . . . . .	3
<b>2 Modelo de propagação ITM</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução . . . . .	5
2.2 Enquadramento geral . . . . .	6
2.3 Parametrização geral . . . . .	6
2.4 Parâmetros ambientais, atmosféricos e do solo . . . . .	10

2.5	Variabilidade . . . . .	11
2.6	Cálculo de parâmetros do terreno . . . . .	14
2.7	Cálculo de parâmetros adicionais . . . . .	18
2.8	Cálculo das atenuações por fenómenos físicos . . . . .	22
2.9	Cálculo da atenuação por aproximações estatísticas . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Aplicações do modelo</b>	<b>39</b>
3.1	Introdução . . . . .	39
3.2	Abordagem e sistema implementado . . . . .	40
3.3	Cenário de estudo . . . . .	42
3.4	Cálculo de cobertura . . . . .	43
3.5	Medidas rádio . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Análise de resultados</b>	<b>47</b>
4.1	Introdução . . . . .	47
4.2	Considerações iniciais . . . . .	48
4.3	Análise estatística de erro . . . . .	49
4.4	Barragem Fratel . . . . .	50
4.4.1	Validação do ITM . . . . .	50
4.4.2	Otimizações implementadas . . . . .	52
4.4.3	Análise das estações base . . . . .	55
4.5	Barragem Belver . . . . .	59
4.6	Belver . . . . .	61
4.7	Barca Amieira . . . . .	67
4.8	Fratel . . . . .	71
4.9	Ródão - 1 . . . . .	75
4.10	Ródão - 2 . . . . .	80
4.11	Sumário . . . . .	84

<i>ÍNDICE</i>	xiii
<b>5 Conclusões</b>	<b>89</b>
5.1 Trabalho desenvolvido . . . . .	89
5.2 Resultados . . . . .	90
5.3 Trabalho futuro . . . . .	91
<b>Referências</b>	<b>93</b>



# Lista de Figuras

2.1	Diagrama representativo do algoritmo do ITM. . . . .	7
2.2	Varição alternada dos dois tipos de variabilidade contabilizados pelo modo ponto-a-ponto. . . . .	12
2.3	Representação da irregularidade do terreno numa região do continente americano [4]. . . . .	15
2.4	Varição do parâmetro $\Delta_h(d)$ com a distância de um percurso. . . . .	16
2.5	Intervalo interdecil considerado para estimação do parâmetro de irregularidade do terreno [14]. . . . .	17
2.6	Geometria de uma ligação rádio trans-horizonte [4]. . . . .	18
2.7	Diagrama do cálculo de variáveis de terreno no modo ponto-a-ponto. . . . .	19
2.8	Cálculos auxiliares para a estimativa da altura efetiva das antenas em linha de vista - escala não real. . . . .	22
2.9	Influência das regiões na atenuação de referência - transmissão a 100 MHz e $\Delta_h$ de 150 metros [15]. . . . .	23
2.10	Diagrama da sequência de algoritmo do cálculo das atenuações. . . . .	25
2.11	Distâncias auxiliares para cálculo da atenuação por difração [15]. . . . .	26
2.12	Distâncias auxiliares para cálculo da atenuação em linha de vista [15]. . . . .	27
2.13	Distâncias auxiliares para cálculo da atenuação por dispersão [15]. . . . .	29
2.14	Representação da difração em dois obstáculos em lâmina [15]. . . . .	30
2.15	Ilustração do método dos dois raios [18]. . . . .	32

2.16	Registo do nível de sinal recebido ao longo do tempo [15]. . . . .	34
2.17	Registo do nível de sinal recebido ao longo do tempo e em diversos percursos [15]. . . . .	34
3.1	Fluxograma de implementação do sistema. . . . .	40
3.2	Perfil do terreno do troço analisado na linha da Beira Baixa, gerado pelo SIGRAIL <i>Planning</i> . . . . .	42
3.3	Vista aérea do troço da linha analisado. . . . .	42
3.4	Resultados de medidas reais para cada estação base relativos a nível de sinal, gerado pelo SIGRAIL <i>Planning</i> . . . . .	46
4.1	Influência da extrapolação da atenuação por difração no alcance de linha de vista. . . . .	49
4.2	Validação do modelo de propagação no percurso da estação base BarragemFratel23m. . . . .	51
4.3	Otimização efetuada na atenuação por difração em obstáculos em lâmina duplos. . . . .	53
4.4	Otimização efetuada no fator de ponderação. . . . .	54
4.5	Resultado final após as otimizações implementadas. . . . .	54
4.6	Predição de cobertura móvel da estação base BarragemFratel23m. . . . .	56
4.7	Estrutura montanhosa junto às estações base BarragemFratel. . . . .	57
4.8	Estrutura montanhosa junto às estações base BarragemFratel. . . . .	58
4.9	Predição de cobertura móvel da estação base BarragemBelver. . . . .	59
4.10	Estrutura montanhosa na zona de cobertura da estação base BarragemBelver. . . . .	60
4.11	Obstáculo junto à estação base BarragemBelver. . . . .	61
4.12	Predição de cobertura móvel da estação base Belver. . . . .	62
4.13	Obstáculo junto à estação base Belver. . . . .	63
4.14	Obstrução na estação base Belver. . . . .	64
4.15	Zona de extensa propagação do sinal da estação base Belver. . . . .	65
4.16	Propagação do sinal por uma extensão de água junto à estação base Belver. . . . .	66

4.17	Obstruções no percurso da estação base Belver. . . . .	67
4.18	Predição de cobertura móvel da estação base BarcaAmieira. . . . .	68
4.19	Curva no percurso de propagação da estação base BarcaAmieira. . . . .	69
4.20	Zona de propagação mais direta na estação base BarcaAmieira. . . . .	69
4.21	Zona de obstrução junto à estação base BarcaAmieira. . . . .	70
4.22	Zona de grande visibilidade na estação base BarcaAmieira. . . . .	71
4.23	Predição de cobertura móvel da estação base Fratel1. . . . .	72
4.24	Ligação junto à estação base Fratel1. . . . .	73
4.25	Zona com consideráveis irregularidades no terreno em ligações da estação base Fratel1. . . . .	73
4.26	Obstrução de terreno junto à estação base Fratel1. . . . .	74
4.27	Zona de consideráveis irregularidades no terreno em ligações da estação base Fratel1. . . . .	75
4.28	Posição das estações base Rodao1 e Rodao2. . . . .	76
4.29	Predição de cobertura móvel da estação base Rodao1. . . . .	76
4.30	Obstrução junto à estação base Rodao1. . . . .	77
4.31	Curvatura da linha ferroviária junto à estação base Rodao1. . . . .	78
4.32	Obstáculo na zona de propagação da estação base Rodao1. . . . .	79
4.33	Percursos com grande quantidade de irregularidades no terreno - estação base Rodao1. . . . .	80
4.34	Predição de cobertura móvel da estação base Rodao2. . . . .	81
4.35	Parte da linha oculta em U junto à estação base Rodao2. . . . .	82
4.36	Transmissão em terreno irregular pela estação base Rodao2. . . . .	83
4.37	Transmissão a longa distância e em terreno irregular pela estação base Rodao2. . . . .	84
4.38	Estatísticas de erro do ITM e <i>Okumura-Hata</i> para todas as estações base analisadas. . . . .	85
4.39	Medidas e predições de cobertura móvel de todas as estações base analisadas. . . . .	85
4.40	Comparação final entre a predição do ITM e as medidas na estação base Rodao1. . . . .	86

4.41 Comparação final entre a predição do ITM e as medidas na estação  
base Fratell. . . . . 87

## Lista de Tabelas

2.1	Valores padrão de clima e refratividade da superfície [6]. . . . .	10
2.2	Valores padrão de constantes do solo - permissividade e condutividade [6]. . . . .	11
2.3	Valores padrão do parâmetro de irregularidade do terreno [4]. . . .	15
3.1	Parâmetros das estações base escolhidas da linha da Beira Baixa. . .	43
4.1	Estatísticas de erro referentes à validação do ITM . . . . .	51
4.2	Estatísticas de erro antes e após as otimizações implementadas. . .	55
4.3	Estatísticas de erro da estação base BarragemFratel23m. . . . .	56
4.4	Comparação das estatísticas de erro das estações base Barragem-Fratel. . . . .	58
4.5	Estatísticas de erro da estação base BarragemBelver. . . . .	59
4.6	Estatísticas de erro da estação base Belver. . . . .	62
4.7	Estatísticas de erro da estação base BarcaAmieira. . . . .	68
4.8	Estatísticas de erro da estação base Fratel1. . . . .	72
4.9	Estatísticas de erro da estação base Rodao1. . . . .	77
4.10	Estatísticas de erro da estação base Rodao2. . . . .	81
4.11	Estatísticas de erro do ITM para todas as estações base analisadas. .	84



# Lista de Acrónimos

- ARFCN** *Absolute Radio-Frequency Channel Number.* 43
- CCIR** *Comité Consultatif International pour la Radio.* 17
- DEM** *Digital Elevation Model.* 40, 89
- ESD** *Estimated Standard Deviation.* 49, 59
- FCC** *Federal Communications Commission.* 17
- GSM-R** *Global System for Mobile Communications – Railway.* 76
- ITM** *Irregular Terrain Model.* vii, ix, xix, 2, 3, 5, 6, 13, 22, 31, 35, 39, 41, 42, 43, 44, 47, 48, 51, 52, 55, 56, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 86, 89, 90, 91, 92
- ITS** *Institute for Telecommunication Sciences.* 6
- ME** *Medium Error.* 49, 58
- NTIA** *National Telecommunications and Information Administration.* 6
- PK** *Ponto quilométrico.* 41, 45, 50, 55, 56, 57, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83

**RMSE**    *Root Mean Square Error.* 49, 58

**UHF**    *Ultra High Frequency.* 6

**VHF**    *Very High Frequency.* 6

# Lista de Símbolos

$a$	Raio efetivo da terra
$A(z_T, z_L, z_S)$	Atenuação contabilizando métodos estatísticos
$A_{1-6}$	Atenuações relativas às respectivas distâncias $d_{0-6}$
$A_d$	Atenuação extrapolada da atenuação de difração em linha de vista
$A_{diff}$	Função de atenuação por difração
$A_{ed}$	Atenuação no alcance de difração
$A_{el}$	Atenuação em linha de vista
$A_{es}$	Atenuação no alcance de dispersão
$A_{fo}$	Fator de <i>clutter</i>
$A_{fs}$	Atenuação em espaço livre
$A_k$	Atenuação devido a obstáculos em lâmina
$A_{los}$	Função de atenuação em linha de vista
$A_r$	Atenuação no modelo de Terra lisa (sem irregularidades)
$A_{ref}$	Atenuação de referência
$A_{scat}$	Função de atenuação por dispersão
$A_t$	Atenuação pelo método dos dois raios

$A_{total}$	Atenuação total do ITM
$C_1(K_0)$	Função de dependência da altura das constantes do solo e da polarização
$d$	Distância do percurso
$d_{0-6}$	Distâncias estimadas para cálculos intermédios de atenuação física
$d_{Lb,m}$	Distâncias das antenas ao horizonte (com irregularidades)
$d_{ls}$	Distância de linha de vista
$d_{Lsb,m}$	Distâncias das antenas ao horizonte (sem irregularidades)
$d_x$	Distância de dispersão
$f$	Frequência de trabalho
$F(x, K)$	Função de dependência da altura das antenas
$F(\theta d, N_s)$	Função de atenuação para cálculo da dispersão
$F_n(v(s))$	Fatores de difração de <i>Fresnel-Kirchhof</i>
$G_E$	Ganho de emissão
$G_R$	Ganho de receção
$G(x_0)$	Função de dependência da distância
$H_0$	Função de ganho de frequência
$h_{b,m}$	Alturas das antenas da estação base e do móvel (acima do solo)
$h_{eb,m}$	Alturas efetivas das antenas da estação base e do móvel
$h_{Lb,m}$	Elevações do terreno referenciadas para cada antena
$h_{Sb,m}$	Alturas das antenas acima do nível do mar, incluindo o terreno
$k$	Número de onda
$K_{0-2}$	Funções das constantes do solo
$klim$	Clima característico da região

$kst$	Critério de localização das antenas
$L_E$	Perdas de emissão
$L_{path}$	Atenuação total do percurso
$L_R$	Perdas de recepção
$m_d$	Declive da curva de atenuação no alcance de difração
$m_s$	Declive da curva de atenuação no alcance de dispersão
$mdvar$	Modo de variabilidade
$N_0$	Refratividade da superfície reduzida ao nível do mar
$N_s$	Refratividade da superfície
$pol$	Polarização das antenas
$P_E$	Potência de emissão
$P_{meas_i}$	Potência medida no ponto $i$ do percurso
$P_{pred_i}$	Potência predita no ponto $i$ do percurso
$P_R$	Potência de recepção
$q_{L,S,T}$	Fração de variabilidade de localização, situação e tempo, respectivamente
$Q(z)$	Função complementar de distribuição normal
$V_{med}$	Ajuste mediano anual
$w$	Fator de ponderação
$X_0$	Média relativa a uma distribuição normal
$x_{0-2}$	Funções adimensionais da distância, frequência e raio efetivo da Terra
$X_{ae}$	Variável adimensional para cálculo de distâncias
$X_{L1,2}$	Limites do alcance de interesse
$X(q)$	Quantil relativo a uma distribuição normal

$Y_{L,S,T}$	Desvios de localização, situação e tempo, respectivamente
$z_{L,S,T}$	Desvios padrão normais de localização, situação e tempo, respectivamente
$z(q)$	Desvio padrão normal
$z_s$	Elevação média do percurso acima do nível do mar
$\Delta_h$	Parâmetro de irregularidade do terreno
$\Delta_h(d)$	Intervalo interdecil de elevações de terreno
$\varepsilon$	Constante dielétrica do solo (ou permissividade)
$\theta$	Distância angular
$\theta_{eb,m}$	Ângulos de elevação ao horizonte da estação base e do móvel
$\theta_e$	Soma dos ângulos de elevação ao horizonte da estação base e do móvel
$\sigma_s$	Condutividade do solo
$\sigma$	Desvio padrão
$\lambda$	Comprimento de onda



# Introdução

## 1.1 Enquadramento

Um dos aspetos fundamentais para o desenvolvimento de uma rede de comunicações móveis é o planeamento das áreas de cobertura de cada estação base, ou seja, a predição das zonas limite onde o nível de sinal é mínimo e das zonas onde pode haver interferência, isto para ser possível alcançar qualquer terminal móvel. Esta predição de sinal tem de ser o mais próximo da realidade possível e implica o conhecimento de todos os fatores que influenciam a propagação num determinado ambiente, estando também associados a frequências de trabalho.

Para este efeito, utilizam-se modelos de propagação, que tanto podem ser teóricos, sendo baseados em curvas e equações determinísticas, como empíricos, que se baseiam em resultados experimentais e análise estatística. Atualmente, os modelos de propagação são modelos híbridos, ou seja, contêm as perspetivas globais dos dois tipos referidos. É importante realçar que não existe nenhum modelo de aplicação genérico e, por isto, é necessário escolher o que melhor se adequa não só à situação em questão, mas também ao ambiente, que normalmente se distingue como sendo rural, suburbano ou urbano.

Em ferrovias, a garantia de cobertura absoluta de sinal é especialmente importante visto ser necessário assegurar o funcionamento completo dos sistemas de comunicações móveis, não de domínio público, mas sim para efeitos operativos dos comboios e respetivas linhas. Estes sistemas são de utilização obrigatória

uma vez que suportam aspetos fundamentais como sinalização, controlo e proteção do comboio em caso de falha humana.

Em muitos casos, associados à transmissão rádio em linhas ferroviárias, existem, além do fator de elevada mobilidade por parte dos comboios, ambientes de propagação especialmente desafiantes pela variação dos perfis de terreno envolventes e que dificultam, por isso, a predição de cobertura por parte de um modelo.

## 1.2 Motivação

Em trabalhos previamente desenvolvidos, comprovou-se que existem mecanismos capazes de estimar valores de cobertura rádio muito satisfatórios e algo próximos de medidas já efetuadas. Modelos de propagação como o *Okumura-Hata* [1] ou o ITU-R 1546-5 [2] já foram anteriormente implementados e estudados em situações de comunicações ferroviárias, existindo, portanto, dados prontos a serem utilizados como método de comparação.

O *Irregular Terrain Model* (ITM) foi especificamente desenvolvido para ter em consideração as características do terreno numa determinada área geográfica, assim como alguns fatores ambientais e estatísticos, e adequa-se bastante bem às características de ambientes deste tipo.

Para validar alguns resultados encorajadores que este modelo tem revelado, é necessário estruturar uma forma de teste viável à comparação com outros modelos, de modo a validar o melhor desempenho dos mecanismos aplicados até ao momento ou, em caso contrário, provar a possibilidade de utilização de um novo modelo para predição de cobertura em linhas ferroviárias.

Posto tudo isto, a aplicação do ITM neste contexto de propagação é especialmente importante pela escassez de testes efetuados até à data e pela constante procura de predições mais rigorosas neste ramo da tecnologia, reforçando, ainda, que o modelo já se revelou algo promissor quando comparado com outros, embora que num contexto de propagação diferente do pretendido [3].

## 1.3 Objetivos

A validação do ITM num contexto de propagação ferroviária em ambientes rurais com irregularidade de terreno é o principal foco deste trabalho. Para tal, será realizado um estudo às zonas de cobertura de oito estações base da linha da

Beira Baixa, desde Belver a Ródão, sendo estas localizações especialmente caracterizadas por desníveis no terreno de grande dimensão. A qualidade de predição de cobertura rádio do modelo nestas condições ditará o êxito ou fracasso da sua aplicação neste tipo de ambiente.

De forma a aferir o desempenho do modelo neste contexto, é feita a comparação em cada região das estações base, não só com um modelo já validado e de boa aplicabilidade, o *Okumura-Hata*, como também com medidas de sinal rádio. A análise do nível de sinal em cada ponto dos percursos permitirá perceber qual o modelo com melhor adaptabilidade às circunstâncias destas regiões, sustentando, também, esta validação com o recurso a estatísticas de erro, que transmitem a proximidade das estimativas às medidas reais.

## 1.4 Estrutura

O presente trabalho divide-se em quatro partes principais, sendo elas o enquadramento teórico do modelo de propagação analisado, a implementação do sistema de teste, a análise dos resultados obtidos e uma quarta e última fase de conclusões e trabalho futuro a desenvolver.

O segundo capítulo aborda em detalhe todos os aspetos relacionados com o ITM, sendo este o objeto de estudo, desde a explicação do seu modo de funcionamento até ao pormenor de toda a algoritmia, abordando os vários tipos de atenuação que o modelo calcula.

No terceiro capítulo é descrita a abordagem ao problema e o sistema implementado, onde, através de um fluxograma, se demonstra a metodologia usada para os testes realizados. Além disto, são expostos os cenários de estudo das oito estações base, apresentadas as versões dos modelos de propagação implementados e descrito o método de obtenção e tratamento das medidas de sinal a que se teve acesso.

O quarto capítulo foca-se na análise dos resultados obtidos, sendo que inicialmente é realizada uma validação do ITM com recurso aos valores reais de atenuação, seguida de uma otimização a algumas componentes do modelo. Posteriormente, e com a melhor versão possível implementada, são examinadas em detalhe as curvas estimadas de nível de sinal para cada região, contracenando-as com o *Okumura-Hata* e com as medidas. É dado destaque às características de cada percurso e recorre-se às estatísticas de erro para aferir a capacidade de predição dos modelos de propagação.

Concluída a fase de testes, no quinto capítulo é feita a revisão geral do trabalho e dos resultados alcançados, destacadas as principais conclusões e sugeridas implementações futuras neste âmbito.



# Modelo de propagação ITM

## 2.1 Introdução

A propagação rádio em ambientes ferroviários apresenta características peculiares que levam métodos utilizados recorrentemente noutras aplicações a ter um desempenho menos favorável no que toca à predição do sinal rádio. Fatores como a irregularidade do terreno, a mistura de ambientes de propagação ou até mesmo climáticos, podem levar a que um modelo de propagação convencional não seja eficaz no cálculo da atenuação que um sinal eletromagnético sofre num percurso deste tipo.

A predição desta atenuação é bastante importante no dimensionamento de um sistema de comunicações móveis, uma vez que permite estimar o nível de sinal ao longo de uma linha ferroviária, de acordo com as parametrizações de cada estação base, verificando, depois, se existe um nível de sinal mínimo em localizações de interesse para comunicar de forma integral. O ITM tem especial atenção às características deste tipo de ambientes, sendo, por isso, o estudo e implementação do modelo o foco deste projeto.

O presente capítulo aborda em detalhe o ITM, nomeadamente toda a sua parametrização e cálculos de atenuação, tanto por fenómenos físicos, como por aproximações estatísticas.

## 2.2 Enquadramento geral

O ITM, também conhecido por modelo *Longley–Rice* devido à sua criação por *Anita Longley* e *Phil Rice* na década de 60, foi inicialmente desenvolvido pela necessidade de planeamento de frequências em difusão televisiva nos EUA, tendo sido muito utilizado para alocação de canais em VHF/UHF.

O algoritmo e a metodologia preparados para planeamento em frequências entre 20 MHz e 20 GHz foram descritos e publicados em 1968 [4] pelo ITS, sendo este instituto da agência NTIA do Departamento de Comércio dos Estados Unidos responsável pelo seu desenvolvimento até à data [5].

Este modelo, para além de ser baseado na teoria eletromagnética e na análise estatística do terreno, foi desenvolvido e calibrado usando medidas realizadas maioritariamente em áreas rurais dos EUA [6]. Assim, e uma vez que tem como parametrização os perfis de terreno, considera-se dos modelos mais aptos para predição de cobertura numa dada área em que a irregularidade do terreno seja uma característica importante.

É de realçar que o fator principal analisado é a potência recebida de uma maneira geral, e não o pormenor da caracterização do canal de comunicação. Assim, e uma vez qualquer sinal recebido neste contexto varia temporal (com mudanças atmosféricas) e espacialmente (com variação do terreno), é a esta variabilidade que o modelo dá privilégio, ou seja, oferece mecanismos não só de estimação de sinal, mas também a magnitude dos desvios esperados do nível estimado [6].

## 2.3 Parametrização geral

O ITM pode ser usado em dois modos: ponto-a-ponto, recorrendo a perfis de terreno detalhados representativos de um determinado percurso, ou predição de área, através de estimativas que descrevem características medianas de uma determinada área. Apesar desta possibilidade de operação em dois modos distintos, ambos são semelhantes no ponto de vista de metodologia, sendo que o que o realmente os distingue é a quantidade de dados de entrada e a forma como alguns parâmetros são estimados. Pode-se observar, na figura 2.1, um diagrama representativo da sequência do algoritmo do modelo.

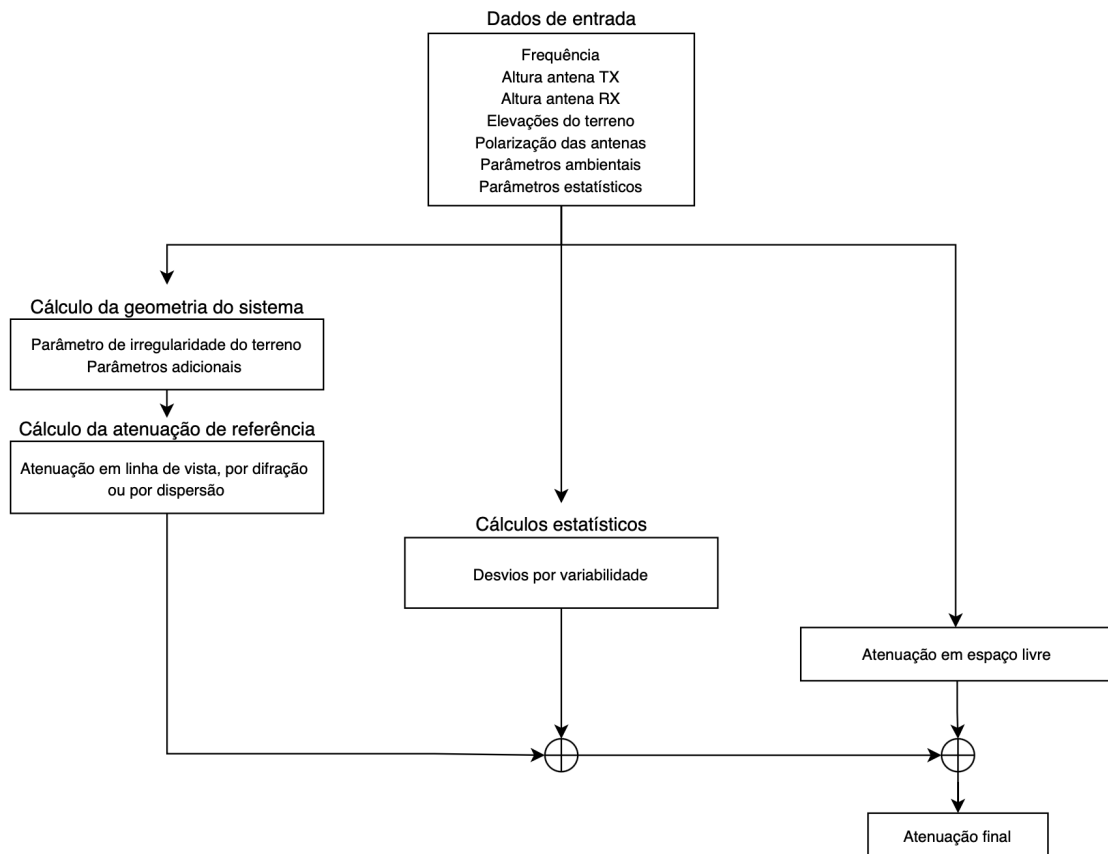


Figura 2.1: Diagrama representativo do algoritmo do ITM.

Independente do modo de utilização, é comum dividirem-se os parâmetros de entrada em quatro conjuntos, sendo eles de sistema, ambientais, de implementação e estatísticos. De seguida, será especificado cada um destes conjuntos, sendo que os parâmetros do sistema são limitados pela gama dinâmica do modelo.

**1. Parâmetros do sistema:** estão diretamente relacionados com o sistema rádio e independentes do ambiente externo.

- $f$  Frequência de trabalho [MHz] - 20 MHz a 20 GHz;
- $d$  Distância entre os terminais [km] - 1 a 2.000 km;
- $h_{b,m}$  Altura das antenas da estação base e do móvel (acima do solo) [m] - 0.5 a 3.000 m;
- $pol$  Polarização das antenas - horizontal ou vertical.

A possibilidade de propagação ionosférica [7] é o que limita a faixa de frequências ao seu limite inferior, uma vez que, dependendo de fatores como a distância,

altura das antenas, entre outros, este fenómeno pode originar reflexão ou absorção do sinal emitido, não permitindo a estimação pelo modelo. Não quer dizer que em frequências superiores isto não se verifique, mas, caso aconteça, apenas será em percursos muito longos e por frações de tempo muito reduzidas. Já o limite superior é definido nos 20 GHz por causa da absorção atmosférica, nomeadamente pelo efeito do vapor de água a 22 GHz [8].

**2. Parâmetros ambientais:** descrevem estatisticamente determinado tipo de ambiente sob o qual o sistema opera.

- $\Delta_h$  Irregularidade do terreno [m];
- $N_0$  Refratividade da superfície reduzida ao nível do mar [unidades N ou ppm];
- $\varepsilon$  Constante dielétrica do solo (ou permissividade);
- $\sigma_s$  Condutividade do solo [S/m];
- klim* Clima característico da região.

**3. Parâmetro de implementação:** tentam descrever formas de implementação do sistema. Neste modelo, apenas é considerado um parâmetro representativo do quão minucioso foi o critério para posicionamento das antenas de emissão e receção, sendo que este apenas é utilizado no modo de área.

- kst* Critério de localização das antenas - aleatório, rigoroso, muito rigoroso

Este parâmetro é uma representação qualitativa do quão bem posicionadas foram as antenas do ponto de vista de transmissão, para os diferentes terminais, tendo uma implicação direta na altura efetiva das mesmas. Assim, especificam-se os seguintes critérios e respetivas implicações na altura efetiva da antena:

- Muito rigoroso ( $kst=2$ ): antenas colocadas em sítios altos e que privilegiam a propagação do sinal com máxima intensidade - à altura efetiva da antena é adicionado um valor nunca superior a 10 metros;
- Rigoroso ( $kst=1$ ): antenas colocadas em sítios altos mas sem preocupação do ponto de vista de propagação - à altura efetiva da antena é adicionado um valor nunca superior a 5 metros;

- Aleatório ( $k_{st}=0$ ): antenas colocadas segundo fatores externos à transmissão, como por exemplo um requisito de uma construção - a altura efetiva é igual à da estrutura da antena.

Assim, a adição mencionada à altura efetiva de cada antena é dada pela altura acima do plano de reflexão, sendo, por isso, também uma caracterização do terreno intermediário. Como tal, é dependente do parâmetro de irregularidade do terreno, considerando-se que num terreno mais irregular haverá mais oportunidade de encontrar pontos mais altos de transmissão. Em terrenos planos, com  $\Delta_h$  praticamente nulo, considerar-se-á sempre a altura efetiva da antena igual à altura da sua estrutura, independentemente do critério de posicionamento.

Como se compreende, no modo de área, a altura da antena utilizada em grande parte dos cálculos é a calculada com base neste critério, ao invés da altura estrutural da antena. De tal forma, quando a altura aumenta, o modelo prevê menor atenuação e maior alcance de comunicação.

**4. Parâmetros estatísticos:** descrevem a variabilidade de dados estatísticos relacionados com o utilizador, sendo que existem quatro modos. Estes podem ser considerados como o ponto de vista, em termos de fiabilidade e confiança, dos cálculos efetuados no modelo.

- mdvar* Modo de variabilidade - *Single Message* (0), *Individual/Accidental* (1), *Mobile* (2), *Broadcast* (3);
- $q_T$  Fração de variabilidade temporal [%];
- $q_S$  Fração de variabilidade de situação [%];
- $q_L$  Fração de variabilidade de localização [%].

Dentro parâmetros referidos em cima, existe uma diferenciação entre os requeridos para o modo ponto-a-ponto e para o de área. Para este último, são necessários mais parâmetros de entrada uma vez que são realizados alguns cálculos e aproximações no sentido de compensar a falta de dados de entrada. Assim, dados como a distância, modo de variabilidade, critério de localização das antenas e variabilidade de localização são exclusivos para o modo área.

## 2.4 Parâmetros ambientais, atmosféricos e do solo

Apesar da grande variedade de parâmetros de entrada deste tipo, poucos são os que realmente influenciam de forma significativa a atenuação de uma transmissão. Por exemplo, a polarização e as duas constantes elétricas do solo são utilizadas para determinar, em combinação, a refletividade de porções planas do solo onde os raios incidentes estão na eminência de o tangenciar. No entanto, para frequências altas, esta refletividade pode-se assumir como uma constante, assim como, para antenas a um comprimento de onda acima do solo ou quatro comprimentos de onda acima do nível do mar, estes três parâmetros têm muito pouca influência e podem ser assumidos como constantes médias do solo. Ainda assim, é de notar que, em frequências abaixo dos 50 MHz, a condutividade é o fator dominante mas, de outra forma, a permissividade relativa é mais importante.

*Longley e Rice* afirmam que, numa previsão a longa distância e perto da superfície terrestre, o parâmetro atmosférico mais importante é a refratividade da superfície,  $N_s$ , que está diretamente relacionada com o índice de refração da atmosfera [9], e possibilita a determinação da curvatura de um raio de emissão entre um transmissor e um recetor ao passar a atmosfera, como será especificado no desenvolvimento desta secção.

Tipo de clima	Refratividade da superfície ( $N_s$ ) [unidades N]
1 - Equatorial	360
2 - Continental subtropical	320
3 - Marítimo subtropical	370
4 - Deserto	280
5 - Continental temperado	301 (médio)
6 - Mediterrâneo temperado (em terra)	320
7 - Mediterrâneo temperado (em oceano)	350

Tabela 2.1: Valores padrão de clima e refratividade da superfície [6].

Para distâncias curtas (inferiores a 50 km), os fatores ambientais e atmosféricos têm um efeito pouco notório na propagação rádio. Nestes casos, não são significativos na perda de sinal ao longo de um percurso [10] e, na maioria dos cenários, até poderia ser assumido um clima continental temperado e  $N_s = 301$  unidades N.

Tanto para efeitos de teste como para efeitos de planeamento, para além da refratividade em cima indicada, qualquer valor relacionado com o o solo é baseado na

tabela em baixo, onde estão referenciados valores padrão segundo os diferentes tipo de solo [6].

Tipo de solo	Constante dielétrica ( $\epsilon$ ) [F/m]	Condutividade ( $\sigma$ ) [1/ $\Omega$ m]
Gelo polar	1	0.0001
Solo seco/gelo marítimo	4	0.001
Solo comum	15	0.005
Solo húmido	25	0.02
Água doce	81	0.01
Água do mar	81	5

Tabela 2.2: Valores padrão de constantes do solo - permissividade e condutividade [6].

As constantes do solo são consideradas para os cálculos de atenuações em linha de vista e por difração, que serão também abordadas no desenvolvimento desta secção. Ainda assim, é importante mencionar que, para a maioria dos problemas tratados, seria suficiente considerar os cinco parâmetros fundamentais deste modelo (frequência, distância, alturas das antenas e irregularidade do terreno), uma vez que os valores não oscilariam significativamente quando comparados com a inserção de todos os outros.

## 2.5 Variabilidade

Os três tipos de variabilidade considerados pelo modelo - situação, temporal e de local - permitem a compensação estatística de variações que, de outra forma, não poderiam ser consideradas analiticamente. Em qualquer ligação em que toda a estrutura esteja fixa, existem sempre variações no nível de sinal que, através destes parâmetros, conseguem ser contabilizadas na atenuação na transmissão.

A variabilidade de situação refere-se à variabilidade que permanece após especificada a fiabilidade do sistema, mensurável pelo agregado de um elevado número de sistemas idênticos. Na prática, é representativa de variações que possam ocorrer, por exemplo, em medidas de sinal devido a diversas circunstâncias como instrumentos de medida diferentes, vários técnicos, entre outros. É descrita pela percentagem de 0.1 a 99.9.

A variabilidade temporal caracteriza as variações de valores medianos de atenuação numa escala horária, tendo em conta variações lentas na refração ou na

intensidade de turbulência atmosféricas. É expressa de 0.1 a 99.9%, sendo esta percentagem representativa da fração de tempo na qual a intensidade do campo recebido é igual ou maior que a do campo mediano por hora calculado pelo algoritmo.

A variabilidade de localização caracteriza as variações em larga escala que ocorrem de percurso para percurso devido a, por exemplo, diferentes perfis de terreno ou diferenças ambientais nos mesmos. Expressa-se de 0.1 a 99.9%, cuja percentagem é representativa da fração de localizações onde o campo recebido é esperado ser igual ou maior que o campo mediano calculado pelo algoritmo.

Para qualquer uma das anteriores, quanto maior for a percentagem de variabilidade, maior será a atenuação final estimada pelo modelo, uma vez que se considera que irão existir maiores variações ao longo da transmissão num determinado percurso. Este facto pode-se comprovar pela figura 2.2, onde se alternaram os valores de variabilidade que impactam o modo ponto-a-ponto (situação e temporal) de 0 a 100%. Observa-se um aumento gradual da atenuação final de um percurso, imposta, sobretudo, pela variabilidade de situação.

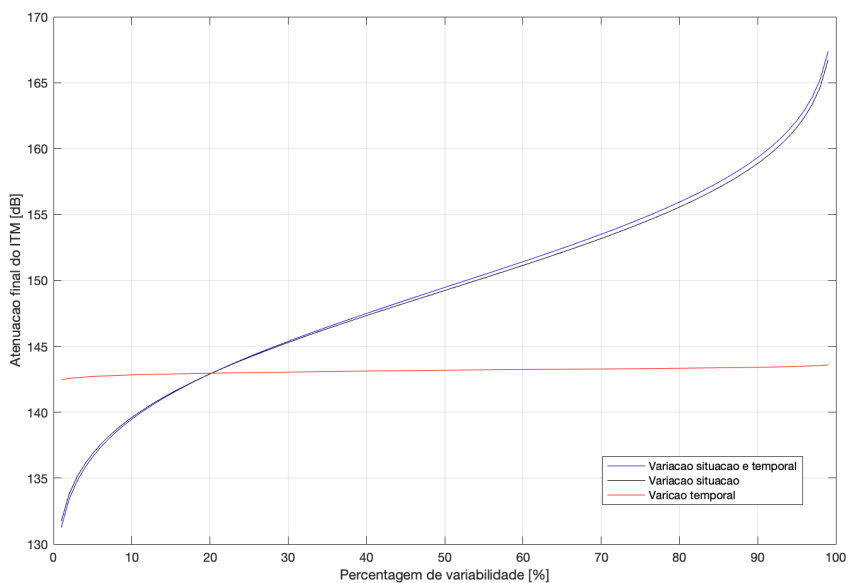


Figura 2.2: Variação alternada dos dois tipos de variabilidade contabilizados pelo modo ponto-a-ponto.

O modo de variabilidade pode ser interpretado como sendo o método para tratamento dos valores de variabilidade em combinação, consoante o tipo de serviço. São especificados como [6]:

- Modo *single message*: comunicações de mensagem única (por exemplo, para ativar um dispositivo de auto-destruição) - os três tipos de variabilidade são combinados e representados pela confiança;
- Modo *individual/accidental*: situação em que o usuário é o recetor individual de uma estação de difusão - a variabilidade temporal é representada pela fiabilidade e a variabilidade de situação e local são combinadas e medidas pela confiança;
- Modo *mobile*: dispositivo móvel que comunica com uma estação base única - numa situação móvel, a variabilidade de local e temporal são combinadas e representadas pela fiabilidade, traduzindo-se em frações de tentativas de estabelecimento de comunicação, enquanto que a variabilidade de situação é medida pela confiança;
- Modo *broadcast*: sistema a transmitir em difusão - os três tipos de variabilidade são tratados separadamente, sendo que a fiabilidade mede a variabilidade de local e temporal em simultâneo e a confiança mede a variabilidade de situação.

Dentro dos quatro modos de variabilidade, apenas em *broadcast* é contabilizada a variabilidade de localização, sendo que para qualquer um dos outros três este valor não é utilizado para os cálculos efetuados.

O termo fiabilidade reflete um serviço adequado e é uma medida de variabilidade que se irá observar durante a implementação do sistema. Já o outro termo baseia-se na assunção de que são tomadas um grande número de decisões e realizados vários cálculos de engenharia usando o mesmo nível de confiança, independentemente do sistema, e é mensurável através da análise de múltiplos sistemas. Ambos os termos estão altamente dependentes do modo de variabilidade (que identifica o tipo de implementação) e apresentam, como se pôde constatar, significados diferentes consoante essa mesma implementação.

É ainda importante referir dois aspetos: na maioria das aplicações do ITM, como é o caso do *software* desenvolvido para este projeto, no modo ponto-a-ponto, a variabilidade é apenas referida como confiança e fiabilidade (*confidence* e *reliability*) e o modo de variabilidade é definido como *individual*, não contabilizando a variabilidade de localização, uma vez que é sabida a localização exata para cada ponto de receção pelo perfil do terreno [6]; pela mesma razão, não é necessário o critério de localização das antenas que, no modo área, pode representar uma diferença de 6 dB quando comparado o aleatório com o muito rigoroso [10].

## 2.6 Cálculo de parâmetros do terreno

O número de onda,  $k$ , é uma grandeza física inversamente proporcional ao comprimento de onda e representativo da frequência espacial de uma onda, ou seja, o número de ciclos/ondas por unidade de distância. É definido pela equação 2.1, onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $f_0$  equivale a  $47.7 \text{ MHz} \cdot \text{m}$ .

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{f}{f_0} \quad (2.1)$$

A refratividade da superfície inserida como parâmetro de entrada do modelo,  $N_0$ , é um valor reduzido ao nível do mar, sendo que para obter o valor da refratividade da superfície,  $N_s$ , recorre-se à expressão em baixo, em que  $z_s$  é elevação média do percurso acima do nível do mar e  $z_1$  assume o valor referência de  $9.46 \text{ km}$ .

$$N_s = N_0 \cdot e^{\frac{-z_s}{z_1}} \quad (2.2)$$

Um raio emitido é possível ser representado como uma linha reta nos primeiros quilómetros acima da superfície terrestre se o raio efetivo da Terra,  $a$ , que em condições normais assume o valor de  $6370 \text{ km}$ , for definido como função da refratividade [4], segundo a dependência entre a curvatura de um raio e a refratividade da superfície referida anteriormente.

$$a = 6370 \times [1 - 0.04665 \times e^{(0.005577 \times N_s)}]^{-1} [km] \quad (2.3)$$

O parâmetro de irregularidade do terreno surge de um relatório apresentado por *Barsis e Rice* [11] que descreve um modelo de estimação de cobertura de sinais rádio sobre vários tipos de terreno. Neste, os autores apresentam dados recolhidos nas regiões de Colorado e Ohio, caracterizadas pela alternância entre planícies e montanhas, e a influência destes tipos de terrenos para a análise espectral de um sinal. Um vasto conjunto de testes foi realizado recorrendo à seguinte metodologia:

- Cada perfil de terreno foi representado por elevações discretas distanciadas uniformemente de  $0.5 \text{ km}$ ;
- Em cada região de teste, foram traçados 36 perfis de  $60 \text{ km}$  cada, em 6 direções, formando uma grelha de 216 perfis numa área de  $100 \text{ km}^2$ ;

- Cada perfil foi ainda considerado em distâncias de 5, 10, 20, até 60 km, para estudar os efeitos da distância nos parâmetros do terreno.

Um dos principais resultados deste estudo foi a determinação de um parâmetro que possibilitou a caracterização estatística das irregularidades do terreno. Para tal, recorrendo ao valor médio encontrado em cada distância, foi possível traçar uma curva sobre parte do continente americano e definir um valor de referência  $\Delta_h$ , que se pode observar na figura 2.3, assim como inferir valores consoante o tipo de terreno, presentes na tabela 2.3.

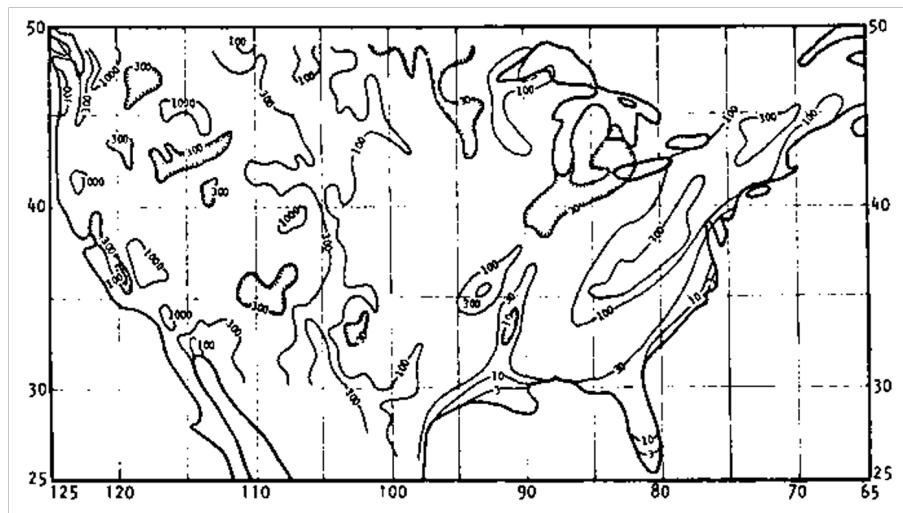


Figura 2.3: Representação da irregularidade do terreno numa região do continente americano [4].

Tipo de relevo	Irregularidade do terreno ( $\Delta_h$ ) [m]
Planar (ou água lisa)	0
Planícies	30
Colinas	90
Montanhas	200
Montanhas escarpadas	500
Para um valor médio, considerar $\Delta_h = 90$ m	

Tabela 2.3: Valores padrão do parâmetro de irregularidade do terreno [4].

Neste estudo, mais tarde complementado por *Longley*, definiu-se, para cada perfil e para cada uma das distâncias mencionadas, o intervalo interdecil  $\Delta_h(d)$  de elevações de terreno acima do nível do mar, isto é, a diferença de nível das elevações após as 10% máximas e 10% mínimas serem removidas, e traçou-se uma

reta em função da distância  $d$  (que, neste caso, é relativa ao comprimento do percurso), recorrendo ao método dos mínimos quadrados [12]. Chegou-se, assim, à expressão em baixo.

$$\Delta_h(d) = \Delta_h \times \left[ 1 - 0.8 \times e^{\left(-\frac{d}{D_0}\right)} \right] [m] \quad (2.4)$$

Uma estimativa de  $\Delta_h$  pode ser obtida para qualquer comprimento de percurso,  $d$ , com a equação 2.4, sendo  $D_0$  a distância de referência, equivalente a 50 km. Por esta distância de referência ser algo elevada, em percursos curtos esta estimação é pouco rigorosa.

Concluiu-se, também, que o valor mediano de  $\Delta_h(d)$  num vasto grupo de perfis de terreno com comprimentos diferentes e numa mesma área aumenta com a distância para um valor assintótico  $\Delta_h$ . Pode-se comprovar este facto através da figura 2.4, onde a equação 2.4 tende para um valor  $\Delta_h$  de 100 metros (previamente definido), a partir de uma distância de percurso de cerca de 300 km.

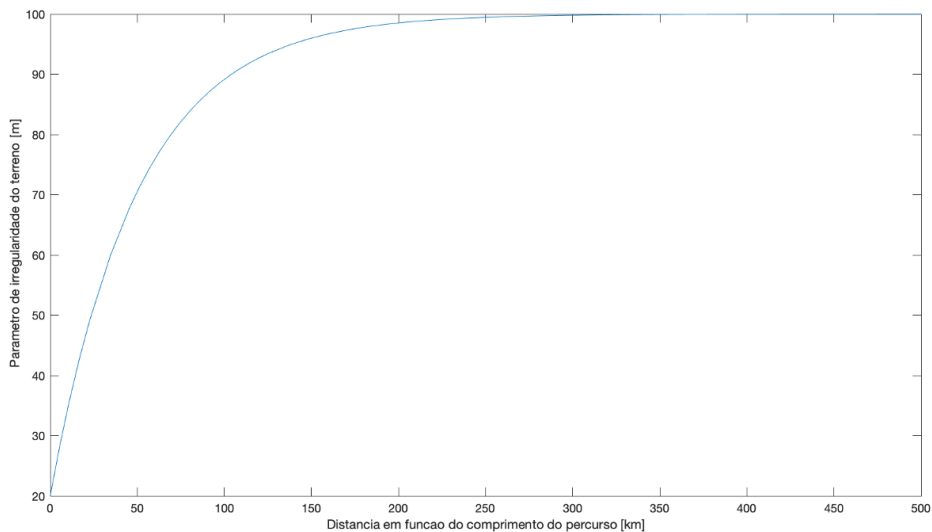


Figura 2.4: Variação do parâmetro  $\Delta_h(d)$  com a distância de um percurso.

Para terrenos homogêneos, os valores de  $\Delta_h(d)$  calculados a cada distância de percurso são bastante semelhantes aos estimados. No entanto, quando analisados terrenos não homogêneos, pode ocorrer uma certa dispersão, sendo que  $\Delta_h$  pode não representar uma mediana adequada a cada distância. Existem métodos alternativos para o seu cálculo, sendo que para certos tipos de aplicações deve ser adaptada a forma como é calculado este valor. É ainda de notar que o método

utilizado pelo modelo difere da definição aplicada pelo FCC e CCIR [13], sendo que ambos apenas definem o parâmetro de irregularidade do terreno como o intervalo interdecil de elevações acima do nível do mar num alcance de 10 a 50 km do transmissor. Isto resulta em valores diferentes de  $\Delta h$ , estimando-se serem 0.68 vezes inferiores.

A nível de algoritmia, este parâmetro é aplicado de igual forma, mas a sua determinação é diferente para os dois modos de operação. No modo de predição de área, na ausência de perfis de terreno reais, usam-se os valores de referência que foram apresentados na tabela 2.3. No modo ponto-a-ponto, e uma vez que é introduzido o conjunto de elevações ao longo do percurso, é necessário o cálculo do parâmetro de irregularidade do terreno, isto para o modelo usar um valor de referência baseado em cada perfil inserido.

De forma a definir o alcance de interesse, é calculada a distância de referência a cada antena,  $X_{L1,2}$ , definida pelo mínimo entre a relação da altura das antenas,  $h_{b,m}$ , e das distâncias ao horizonte,  $d_{Lb,m}$ . É de notar que o cálculo de alguns destes parâmetros será especificado nas próximas páginas.

$$X_{L1,2} = \min(15 \times h_{b,m}, 0.1 \times d_{Lb,m}) [km] \quad (2.5)$$

Encontrados estes valores, tem-se o limite de interesse que começa a uma distância  $X_{L1}$  da antena emissora, acabando a uma distância  $X_{L2}$  da antena recetora.

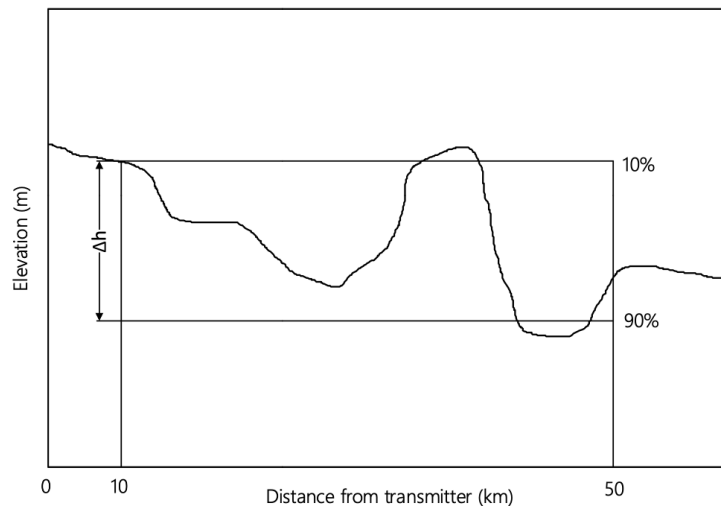


Figura 2.5: Intervalo interdecil considerado para estimativa do parâmetro de irregularidade do terreno [14].

Neste alcance, são estimadas as elevações 10% e 90% superiores por interpolação

linear do perfil do terreno, recorrendo ao método dos mínimos quadrados [12]. Calcula-se, então, o intervalo interdecil,  $\Delta_h(d)$ , subtraindo ambos os valores. Uma ilustração aproximada deste intervalo pode ser observada na figura 2.5 [14], onde está representado o limite vertical definido após removidas as 10% elevações mínimas e as 10% máximas.

De seguida, recorrendo à fórmula inversa do intervalo interdecil, e aplicando o valor já conhecido à equação 2.7, obtém-se, numa distância de percurso definida por  $d$  (equação 2.6), o valor final do parâmetro de irregularidade do terreno,  $\Delta_h$ , que será utilizado na sequência do algoritmo como compensação estatística da morfologia do percurso.

$$d = dist_{total} - X_{L2} - X_{L1} [m] \quad (2.6)$$

$$\Delta_h = \frac{\Delta_h(d)}{1 - 0.8 \times \exp\left(-\min\left(20, \frac{d}{D_0}\right)\right)} [m] \quad (2.7)$$

## 2.7 Cálculo de parâmetros adicionais

No sentido de calcular os diferentes tipo de atenuação inerentes a este modelo, é necessário o cálculo de mais três parâmetros: altura efetiva das antenas,  $h_{eb,m}$ , as suas distâncias ao horizonte (rádio-horizonte),  $d_{Lb,m}$ , e os seus ângulos de elevação,  $\theta_{eb,m}$ . Uma vez que estes parâmetros estão dependentes do fator de irregularidade do terreno, da altura das antenas e do critério de localização das antenas (este último apenas para o modo área), os seus valores podem ser estimados ou calculados com base nestas condicionantes. Na figura 2.6 pode-se observar a representação destes parâmetros relativos a uma transmissão trans-horizonte.

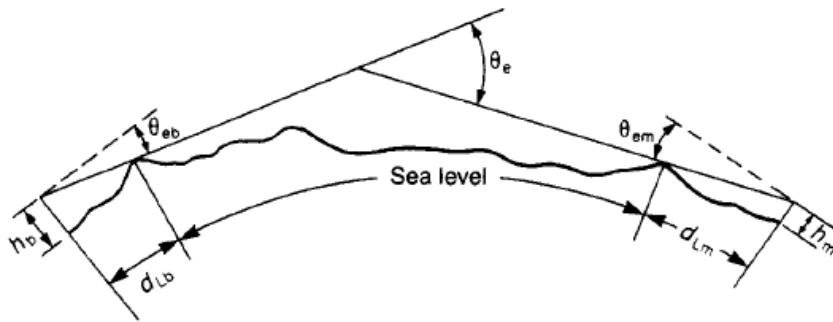


Figura 2.6: Geometria de uma ligação rádio trans-horizonte [4].

Existe uma diferença muito importante relativamente ao cálculo destes três parâmetros nos dois modos de operação: no modo área, qualquer um deles é estimado recorrendo a medianas obtidas por dados empíricos, enquanto que no modo ponto-a-ponto, para situações sem linha de vista entre o emissor e o receptor, estes são calculados com base no perfil do terreno; já para situações com linha de vista, apenas as alturas efetivas das antenas são calculadas com base no perfil topográfico (assim como o parâmetro de irregularidade do terreno), uma vez que tanto as distâncias ao horizonte como os seus ângulos de elevação são estimados de acordo com o método utilizado para o modo de área [15], isto porque serão valores “não reais” mas necessários para certos processos de computação do modelo. O diagrama em baixo resume a forma de cálculo destas variáveis para este modo de operação.

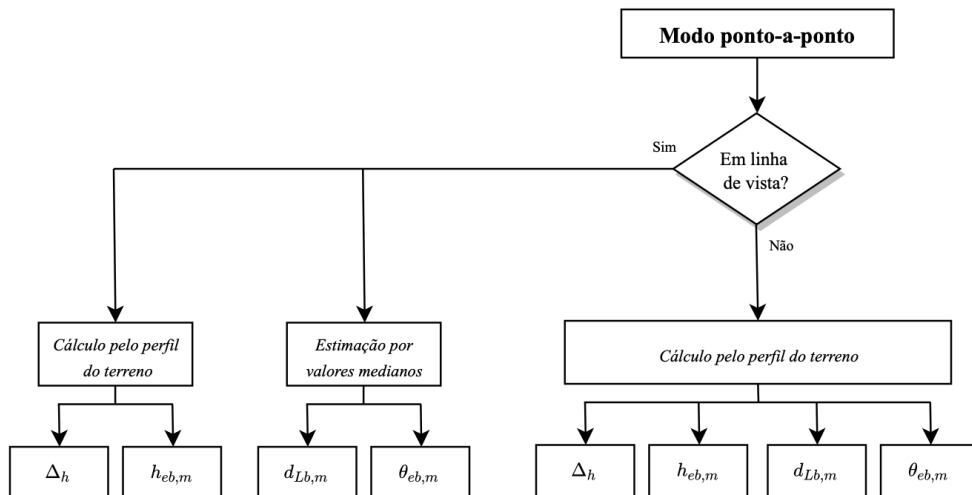


Figura 2.7: Diagrama do cálculo de variáveis de terreno no modo ponto-a-ponto.

Assim, e começando por analisar do ponto de vista de operação do modo área, para o caso de antenas situadas aleatoriamente tem-se uma igualdade quanto à altura efetiva das antenas de emissão (base) e receção (móvel),  $h_{eb,m}$ , e a altura acima do solo,  $h_{b,m}$ , inserida como parâmetro de entrada do modelo.

$$h_{eb,m} = h_{b,m}[m] \quad (2.8)$$

Para antenas localizadas rigorosa e muito rigorosamente, considera-se um fator  $k$  que é dependente do quão minucioso foi o posicionamento da antena e nunca ultrapassa o valor 50, pressupondo, assim, que a antena está posicionada num

terreno com elevação superior à sua estrutura. Tem-se, então:

$$h_{eb,m} = h_{b,m} + k \times e^{\left(\frac{-2 \times h_{b,m}}{\Delta_h}\right)} [m] \quad (2.9)$$

As distâncias ao horizonte do emissor e do recetor no modelo de Terra lisa (sem irregularidades),  $d_{Lsb,m}$ , dependem do raio efetivo da Terra (equação 2.3) e das alturas efetivas das antenas, e são dadas por:

$$d_{Lsb,m} = \sqrt{0.002 \times a \times h_{eb,m}} [km] \quad (2.10)$$

Sendo a expressão em baixo a soma das distâncias ao horizonte em Terra lisa, também tratada por  $d_{ls}$  (distância em linha de vista segundo o modelo, considerando-se esta a zona em que a convexidade da Terra não interfere com o raio direto) em algumas explicações adiante.

$$d_{Ls} = d_{ls} = d_{Lsb} + d_{Lsm} [km] \quad (2.11)$$

Com isto, os valores medianos de distâncias ao horizonte com terreno irregular são estimados pela equação 2.12 e dependem da altura efetiva da antena, da distância ao horizonte em Terra lisa e da irregularidade do terreno.

$$d_{Lb,m} = d_{Lsb,m} \times e^{\left(-0.07 \times \sqrt{\frac{\Delta_h}{h_e}}\right)} [km] \quad (2.12)$$

Onde:

$$h_e [m] = \begin{cases} h_{eb,m} & , h_{eb,m} \geq 5 \\ 5 & \end{cases} \quad (2.13)$$

Somando, então, os dois valores da equação 2.12, obtém-se a distância total entre as antenas e os seus horizontes, considerando irregularidades no terreno.

$$d_L = d_{Lb} + d_{Lm} [km] \quad (2.14)$$

Existe, ainda, um ângulo medido no sentido positivo ou negativo do horizonte em relação à horizontal de cada antena, intitulado ângulo de elevação do horizonte. Este tem em conta os vários fatores mencionados anteriormente e pode ser

calculado segundo a equação:

$$\theta_{eb,m} = \frac{0.005}{d_{Lsb,m}} \times \left[ \left( 1.3 \times \frac{d_{Lsb,m}}{d_{Lb,m}} \times \Delta_h \right) - 4 \times h_{eb,m} \right] [rad] \quad (2.15)$$

Para uma propagação onde o ponto recetor se encontra para lá do rádio-horizonte do ponto de emissão, chamada propagação trans-horizonte, a soma dos ângulos de elevação e da distância angular é dada pelas equações 2.16 e 2.17, onde  $d$  representa a distância total do percurso, em quilómetros. É de notar que estes valores são sempre positivos.

$$\theta_e = \theta_{eb} + \theta_{em} [rad] \quad (2.16)$$

$$\theta = \theta_e + \frac{d}{a} [rad] \quad (2.17)$$

No modo ponto-a-ponto, e tirando agora partido da informação que se tem sobre o perfil do terreno, a localização dos obstáculos no horizonte pode ser determinada testando todas as elevações do percurso e selecionando a que apresenta um maior ângulo de elevação do horizonte. Recorrendo à equação 2.18, pode-se percorrer todo o percurso variando os valores das elevações do terreno referenciadas para cada antena,  $h_{Lb,m}$ , sendo  $h_{Sb,m}$  as alturas das antenas acima do nível do mar (incluindo a elevação do terreno nesse ponto),  $a$  o raio efetivo da Terra e  $d_{Lb,m}$  as distâncias ao horizonte de ambas as antenas.

$$\theta_{eb,m} = \frac{0.001 \times (h_{Lb,m} - h_{Sb,m})}{h_{Lb,m}} - \frac{d_{Lb,m}}{2a} [rad] \quad (2.18)$$

No entanto, esta opção de cálculo apenas é válida quando  $\theta_{eb,m} \leq 0.2 \text{ rad}$ , uma vez que para valores superiores a suposição do cálculo do raio efetivo da Terra com base no valor de  $N_s$  não se aplica. Nesse caso, a altura efetiva de ambas as antenas é calculada de forma diferente, dependendo se a ligação está ou não em linha de vista.

Estando em linha de vista, recorre-se ao método dos mínimos quadrados para determinar as elevações do terreno correspondentes aos limites do alcance de interesse  $X_{L1,2}$ . São, então, somadas as alturas das antenas acima do solo,  $h_{b,m}$ , à diferença entre as elevações do terreno nesse ponto e as elevações dos pontos  $X_{L1,2}$ , obtendo, assim, as alturas efetivas das antenas. Pode-se observar na figura

2.8 uma ilustração representativa destas estimativas. Posteriormente, novas distâncias ao horizonte do transmissor e do recetor,  $d_{Lb,m}$ , são determinadas com recurso à equação 2.10. Se a soma destas distâncias for inferior à distância total do percurso, assume-se que as alturas efetivas das antenas e as distâncias ao horizonte foram subestimadas e será aplicada uma correção gradual de fatores iguais até à soma das distâncias corresponder ao valor da distância total do percurso. Naturalmente, e uma vez que existe linha de vista entre o transmissor e o recetor, estas distâncias e ângulos ao horizonte são “fictícias”, daí serem calculados por métodos empíricos. No entanto, estes parâmetros serão necessários para processamento posterior como, por exemplo, para o cálculo da atenuação por difração quando em linha de vista.

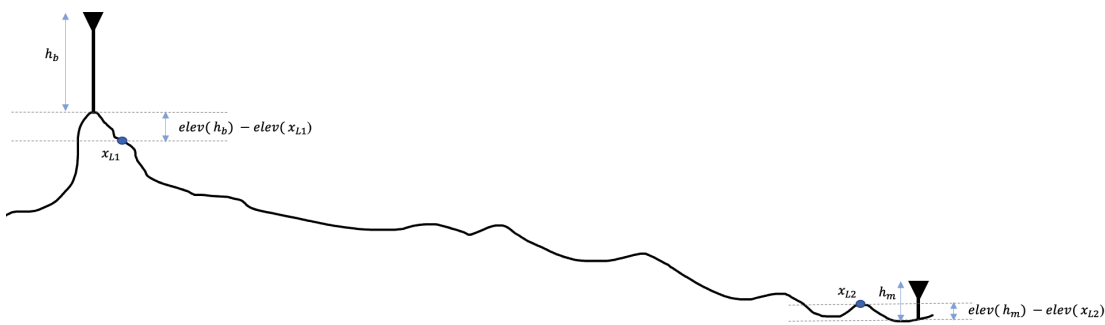


Figura 2.8: Cálculos auxiliares para a estimativa da altura efetiva das antenas em linha de vista - escala não real.

No caso de uma ligação sem linha de vista, é também utilizado o método dos mínimos quadrados para determinação das elevações do terreno mas, desta vez, aplicado às distâncias de  $X_{L1}$  a  $0.9 d_{Lb}$  e de  $dist_{total} - 0.9 d_{Lm}$  a  $X_{L2}$ , considerando-se dois percursos distintos. Encontradas as elevações, determina-se a altura efetivas de ambas as antenas pelo mesmo processo descrito em cima.

## 2.8 Cálculo das atenuações por fenómenos físicos

O ITM divide a atenuação total de uma ligação em duas vertentes: a atenuação por fenómenos físicos, representada pela atenuação em espaço livre,  $A_{fs}$ , e atenuação de referência,  $A_{ref}$ , e os desvios por variabilidade do sistema implementado, calculados por métodos puramente estatísticos.

A atenuação em espaço livre, como em qualquer sistema rádio, é calculada em função da distância de propagação e da frequência de trabalho (equação 2.19).

$$A_{fs} = 32.45 + 20 \times \log_{10}(f) + 20 \times \log_{10}(d)[dB] \quad (2.19)$$

Já a atenuação de referência tem um cálculo mais complexo uma vez que depende dos três parâmetros adicionais mencionados em cima e também da distância de cada terminal ao transmissor,  $d$ . Para o seu cálculo, tem-se em conta a equação 2.20, dada por uma função contínua e pontual, dependente da distância, com continuidade imposta em cada ponto final de cada região, sendo que as diferentes fórmulas apresentam o mesmo resultado nas transições onde  $d = d_{ls}$  ou  $d_x$ .

$$A_{ref} = \begin{cases} \max\left(0, A_{el} + K_1 \times d + K_2 \times \ln\left(\frac{d}{d_{ls}}\right)\right) & , d \leq d_{ls} \\ A_{ed} + m_d \times d & , d_{ls} \leq d \leq d_x \\ A_{es} + m_s \times d & , d \geq d_x \end{cases} \quad (2.20)$$

Como exemplo da influência destas regiões na atenuação de um sinal ao longo de um percurso, pode-se observar a figura 2.9, onde está representada uma transmissão a 100 MHz e com um parâmetro de irregularidade de terreno de 150 metros [15]. A figura retrata a evolução de valores da atenuação de referência que um sinal sofre com o incremento da distância de um terminal recetor face a um transmissor.

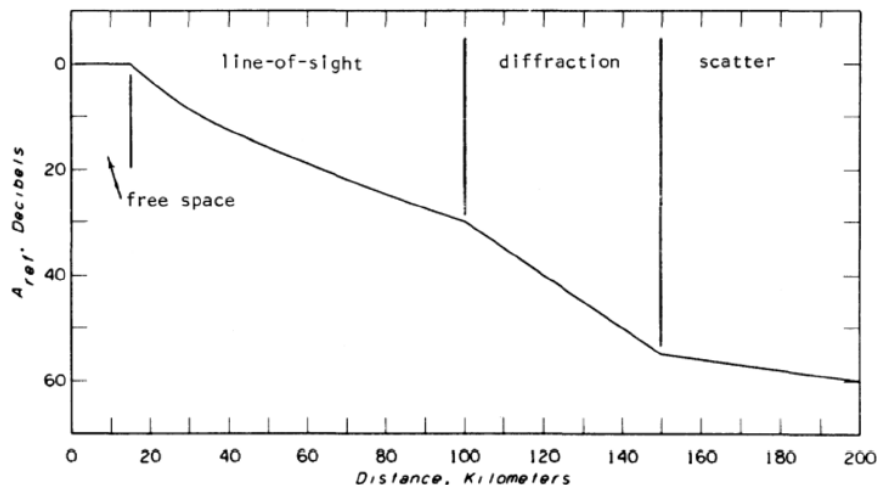


Figura 2.9: Influência das regiões na atenuação de referência - transmissão a 100 MHz e  $\Delta_h$  de 150 metros [15].

Consideram-se, assim, as seguintes regiões:

- Zona em linha de vista:  $d \leq d_{ls} \rightarrow$  região de certa forma mal denominada, uma vez que é representativa da zona em que a convexidade da Terra não interfere com o raio direto, mas que, no entanto, pode encontrar colinas ou outros obstáculos. A distância  $d_{ls}$  é estimada pela equação 2.11 referida anteriormente e a atenuação nesta região é calculada usando o método ótico dos dois raios;
- Zona de difração:  $d_{ls} < d \leq d_x \rightarrow$  considerando-se uma distância superior à de linha de vista, esta atenuação é calculada pela média ponderada de atenuações estimadas referentes a obstáculos em lâmina dupla e pelo modelo de Terra esférica lisa;
- Zona de dispersão:  $d > d_x \rightarrow$  atenuação calculada quando o percurso total ou a distância angular excedem certos limites impostos pelo modelo, considerando-se muito superior à distância de linha de vista. Calcula-se a atenuação com base em fatores de dispersão, assumindo que existe uma dependência linear da distância.

Assim, para um percurso trans-horizonte, a atenuação considerada para o cálculo da atenuação de referência é ou por difração, ou por dispersão, consoante a distância total do percurso. O limite onde as atenuações por difração e por dispersão são iguais é a distância  $d_x$ .

Uma vez expostas as três zonas, pode-se observar no diagrama da figura 2.10 a sequência de cálculos do algoritmo.

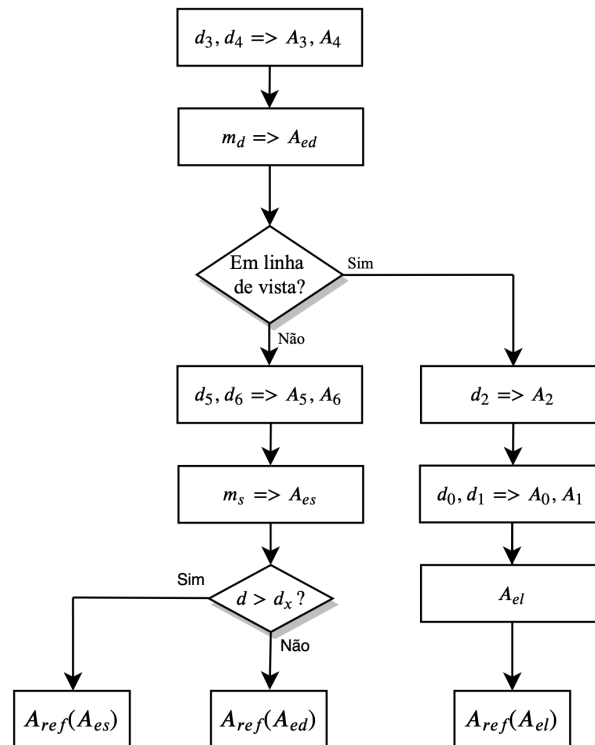


Figura 2.10: Diagrama da sequência de algoritmo do cálculo das atenuações.

De modo a especificar esta sucessão de cálculos, e recorrendo a figuras ilustrativas baseadas na figura 2.9, irão definir-se as operações da equação 2.20 tendo em conta as três zonas estabelecidas.

- **Atenuação na zona de difração**

Primeiramente, dentro de um alcance de difração especificado (distâncias superiores à de linha de vista), começa-se por definir dois pontos,  $d_3$  e  $d_4$ , para calcular a inclinação,  $m_d$ , e, posteriormente, a atenuação no alcance de difração,  $A_{ed}$ .

As distâncias  $d_3$  e  $d_4$  são estimadas pelas seguintes expressões, onde  $X_{ae}$  é uma variável calculada com base no comprimento de onda e na curvatura efetiva da Terra.

$$d_3 = \max(d_{Ls}, d_L + 1.3787X_{ae}); \quad d_4 = d_3 + 2.7574X_{ae} [km] \quad (2.21)$$

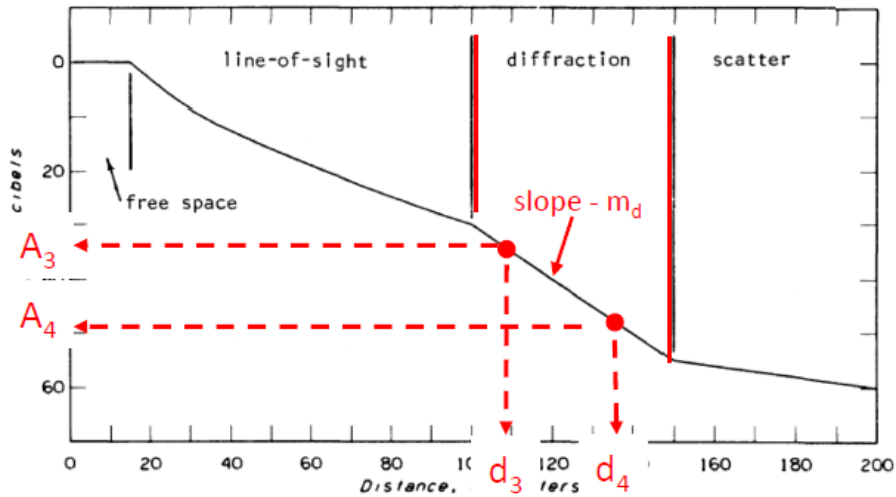


Figura 2.11: Distâncias auxiliares para cálculo da atenuação por difração [15].

Depois de definidas as distâncias, calculam-se as atenuações por difração em cada um desses pontos, resultando em  $A_3$  e  $A_4$ . Com estes quatro valores, consegue-se, então, estimar o declive  $m_d$ .

$$A_3 = A_{diff}(d_3); \quad A_4 = A_{diff}(d_4) \quad (2.22)$$

$$m_d = \frac{A_4 - A_3}{d_4 - d_3} \quad (2.23)$$

Assim, e com base neste declive, consegue-se estimar a atenuação total que resultará por fenómenos de difração, dada pela equação 2.24, que é representativa da função linear entre os dois valores de  $A_3$  e  $A_4$  às distâncias  $d_3$  e  $d_4$ .

$$A_{ed} = A_3 - m_d d_3 = \frac{A_3 \times d_4 - A_4 \times d_3}{d_4 - d_3} \quad (2.24)$$

- **Atenuação na zona em linha de vista**

Definindo  $d_2$  como o limite máximo de linha de vista (zona em que a convexidade da Terra não interfere com o raio direto), equivalente a  $d_{ls}$ , e sendo este também o ponto de transição para o alcance de difração, calcula-se a atenuação neste local através da equação 2.25. Como referido anteriormente, a função contínua da

equação 2.20 permite obter valores aproximadamente iguais nos pontos de continuidade e transição entre regiões de propagação.

$$A_2 = A_{ed} - m_d d_2 \quad (2.25)$$

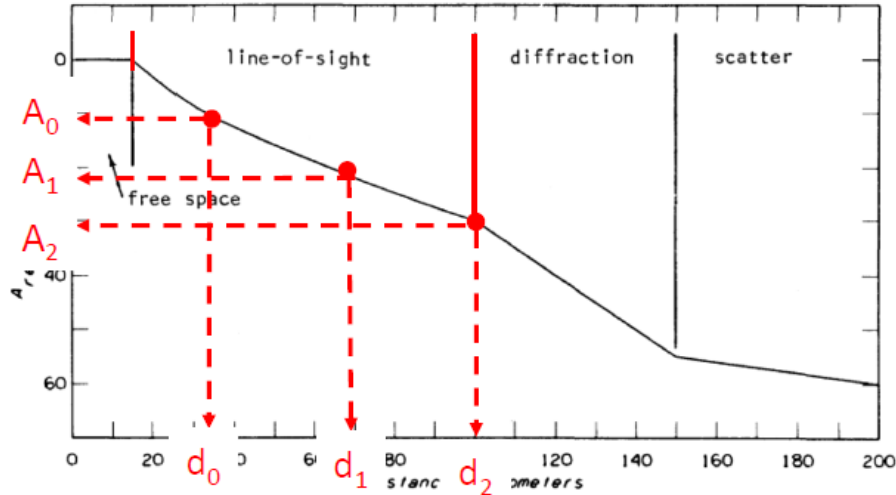


Figura 2.12: Distâncias auxiliares para cálculo da atenuação em linha de vista [15].

Com este valor, e tendo em conta duas distâncias  $d_0$  e  $d_1$  inferiores à zona de difração, sendo  $d_0$  uma aproximação à maior distância à qual a atenuação abaixo do espaço livre é zero (calculada por uma proporção entre o comprimento de onda e as alturas efetivas das antenas) e  $d_1$  uma distância superior, mas dentro do alcance onde o método dos dois raios é válido, calcula-se a atenuação pela função de linha de vista,  $A_{los}(d)$ , nesses dois pontos, que resulta em  $A_0$  e  $A_1$ . Estas distâncias estão ilustradas na figura 2.12, podendo-se encontrar o seu cálculo mais pormenorizado em [16].

Obtendo estes dados, a ideia é definir uma curva para o cálculo da atenuação com o formato da equação 2.26 (semelhantemente ao que foi realizado para a zona de difração anteriormente) e que passe, assim, pelos valores  $A_0$ ,  $A_1$  e  $A_2$  em  $d_0$ ,  $d_1$  e  $d_2$ , respetivamente.

$$A_{el} + K_1 d + K_2 \ln \left( \frac{d}{d_{Ls}} \right) \quad (2.26)$$

No entanto, isto requer que os coeficientes  $K_1$  e  $K_2$  sejam positivos e, por isso, são necessários alguns cálculos auxiliares para verificar esta condição, que se podem

também encontrar descritos em [16]. Definidos estes valores, resulta a atenuação no alcance de linha de vista, dada por:

$$A_{el} = A_2 - K_1 d_2 \quad (2.27)$$

- **Atenuação na zona de dispersão**

Finalmente, avaliando a distância na qual a dispersão troposférica é o mecanismo dominante, considerando uma distância de referência de 200 km ( $D_s$ ), analisam-se outros dois pontos,  $d_5$  e  $d_6$ , dados por:

$$d_5 = d_L + D_s; \quad d_6 = d_5 + D_s \quad (2.28)$$

Calculando as atenuações por dispersão,  $A_{scat}$ , nestes pontos, obtém-se  $A_5$  e  $A_6$ . Pelo mesmo método mencionado anteriormente para as outras zonas de propagação, estima-se a inclinação no limite de dispersão,  $m_s$ . Com estes valores, e contabilizando outros parâmetros já mencionados, define-se a distância de dispersão do percurso, utilizada para impor o limite de dispersão no cálculo da atenuação final  $A_{ref}$ , assumindo  $H_s$  como uma constante de valor 47.7 metros e  $k$  o número de onda. Por fim, a atenuação referente a este alcance,  $A_{es}$ , é obtida pela equação 2.32. Os parâmetros mencionados estão ilustrados na figura 2.13.

$$A_5 = A_{scat}(d_5); \quad A_6 = A_{scat}(d_6) \quad (2.29)$$

$$m_s = \frac{A_6 - A_5}{d_x} \quad (2.30)$$

$$d_x = \max \left( d_{L_s}, d_L + X_{ae} \times \log(kH_s), \frac{A_5 - A_{ed} - m_s d_5}{m_d - m_s} \right) \quad (2.31)$$

$$A_{es} = A_{ed} + (m_d - m_s) \times d_x \quad (2.32)$$

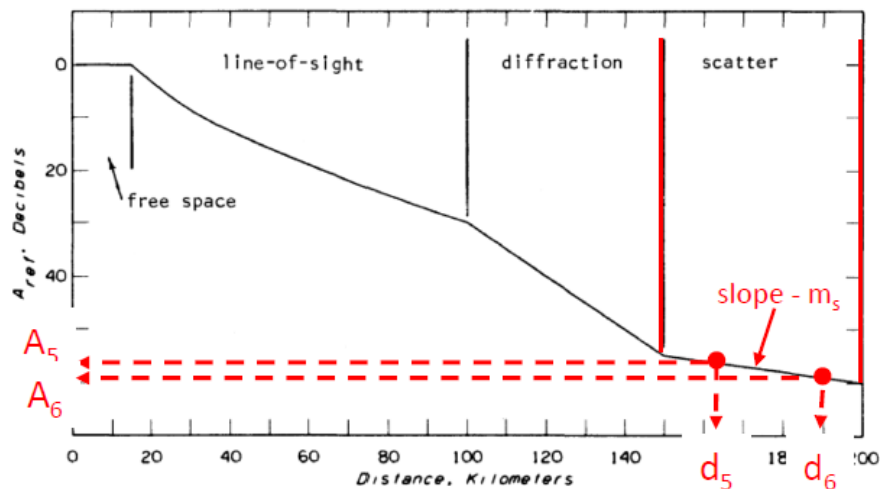


Figura 2.13: Distâncias auxiliares para cálculo da atenuação por dispersão [15].

Uma vez definidas as atenuações em cada um dos alcances, é necessário especificar o cálculo das funções representativas de cada zona. Assim, de seguida aborda-se a computação mais aprofundada das atenuações em linha de vista, por difração e por dispersão, sempre dependentes de uma distância,  $s$ , dentro desses alcances (definida de  $d_0$  a  $d_6$ ).

#### • Função de atenuação por difração

A atenuação por difração é calculada pela equação 2.33, sendo esta uma média ponderada entre os cálculos de atenuação devido a obstáculos em lâmina e de atenuação segundo o modelo de Terra esférica lisa. Definem-se, assim, as seguintes componentes:

- $A_k(s)$ : atenuação devido a obstáculos em lâmina - determinada fisicamente;
- $A_r(s)$ : atenuação segundo o modelo de Terra esférica lisa (sem irregularidades) - determinada fisicamente;
- $A_{fo}(s)$ : Fator de *clutter* - determinado empiricamente - contabiliza perdas adicionais por mecanismos de difração em obstáculos em lâmina, considerando o terreno irregular entre os rádio-horizontes dos terminais, assim como absorção e dispersão pelo oxigénio, vapor de água e precipitação;
- $w(s)$ : fator de ponderação - determinado empiricamente em função da frequência, alturas das antenas e parâmetros do terreno [16], é utilizado para obter

a média ponderada que resulta na atenuação final por difração. Denote-se que:

Se  $w(s) \rightarrow 1$  então  $\Delta_h \rightarrow 0$

Se  $w(s) \rightarrow 0$  então  $\Delta_h \rightarrow \infty$

$$A_{diff}(s) = (1 - w(s)) \times A_k(s) + w(s) \times A_r(s) + A_{fo} \quad (2.33)$$

A atenuação por difração em obstáculos em lâmina duplos é dada pela equação 2.34, cuja representação visual está presente na figura 2.14. Recorre ao método de *Epstein-Peterson*, onde as funções  $F_n(v(s))$  são os fatores de difração de *Fresnel-Kirchhoff* (equação 2.35) [17] e os obstáculos considerados são dependentes das distâncias ao horizonte de ambas as antenas e contabilizados através dos parâmetros de difração  $v_1(s)$  e  $v_2(s)$ , definidos na equação 2.36.

$$A_k(s) = F_n(v_1(s)) + F_n(v_2(s)) \quad (2.34)$$

$$F_n(v) = \begin{cases} 6.02 + 9.11v - 1.27v^2 & v \leq 2.4 \\ 12.953 + 20\log(v) & \text{de outra forma} \end{cases} \quad (2.35)$$

$$v_i(s) = \frac{\theta}{2} \left( \frac{k d_{Li}(s - d_L)}{\pi s - d_L + d_{Li}} \right)^{1/2}, \quad i = 1, 2 \quad (2.36)$$

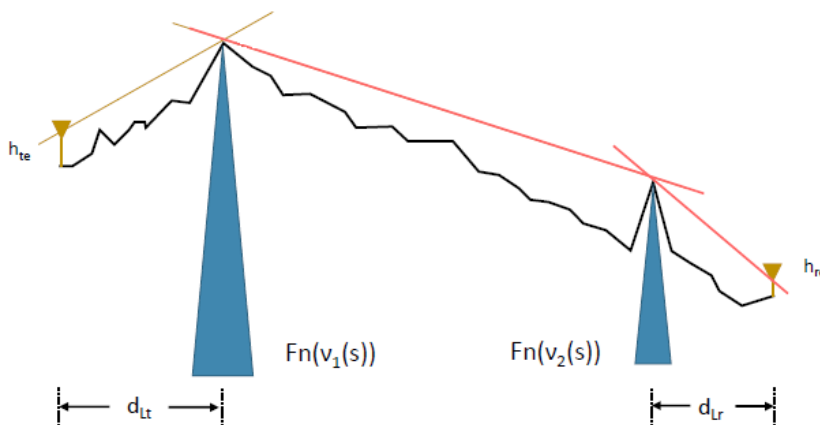


Figura 2.14: Representação da difração em dois obstáculos em lâmina [15].

A atenuação segundo o modelo de Terra esférica lisa ( $A_r$ ) é calculada pela equação

2.37, onde são contabilizados vários fatores, sendo eles, essencialmente, representados pelas dependências da distância (função  $G(x_0)$ ), das alturas das antenas (funções  $F(x, K)$ ), das constantes do solo (condutividade e permissividade) e da polarização (através de  $C_1(K_0)$ ). O seu método está descrito em detalhe em [16].

$$A_r(s) = G(x_0) - F(x_1, K_1) - F(x_2, K_2) - C_1(K_0) \quad (2.37)$$

É importante notar que, no modo ponto-a-ponto, o modelo relaciona a variância de elevações no terreno com a teoria clássica de difração, obtendo-se, teoricamente, resultados quase iguais a medidas realizadas. Isoladamente, a teoria da difração não tem capacidade para calcular valores precisos sob terreno irregular uma vez que não é possível a existência de dados em relação às irregularidades com tamanha definição. Enquanto que outros modelos de propagação contabilizam as irregularidades do terreno como aproximações a combinações de lâminas, o ITM constrói um obstáculo equivalente redondo com base em estatísticas de elevação do terreno, obtendo, assim, valores mais precisos e próximos da realidade [6].

- **Função de atenuação em linha de vista**

A atenuação em linha de vista,  $A_{los}$ , descrita na equação 2.39, tem em conta um fator de ponderação semelhante ao mencionado anteriormente ( $w$ , que contabiliza a irregularidade do terreno e as distâncias ao horizonte [16]) e dois tipos de atenuação:  $A_d$ , representativa da extrapolação/extensão da atenuação de difração nesse alcance (equação 2.38) e  $A_r$ , calculada pelo método ótico dos dois raios.

$$A_d(s) = A_{ed} + m_d \times s \quad (2.38)$$

$$A_{los}(s) = (1 - w) \times A_d(s) + w \times A_r(s) \quad (2.39)$$

Já várias vezes referido anteriormente, o método dos dois raios, aplicado para situações com linha de vista entre o emissor e o recetor e onde se cria uma zona de interferência entre o raio direto e o raio refletido na superfície, estima uma atenuação inerente a este facto. Esta é especificada pela equação 2.40, ilustrada na figura 2.15 e pode ser consultada numa descrição mais pormenorizada em [18]. Essencialmente, esta fórmula tem uma componente  $R_e$  representativa do sinal

recebido pela contabilização dos dois raios e do plano refletor e outra componente  $\delta$  que tem em conta as alturas efetivas das antenas.

$$A_t(s) = -20 \times \log |1 + R_e(s) \times e^{i \times \delta(s)}| \quad (2.40)$$

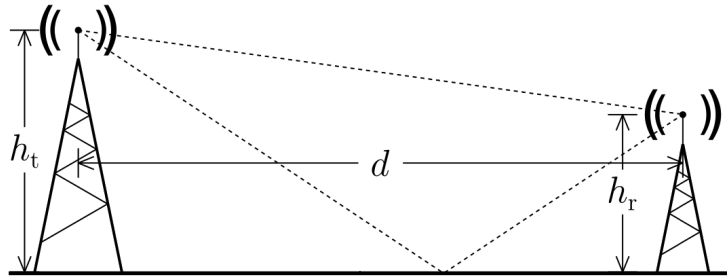


Figura 2.15: Ilustração do método dos dois raios [18].

- **Função de atenuação por dispersão**

Em percursos longos e na zona troposférica, a dispersão é o mecanismo de propagação dominante, especialmente durante alturas do dia e/ou estações do ano em que fenómenos como ductos são raros. Os métodos descritos para estimação da atenuação por dispersão são, na maioria dos casos, válidos para ambos os pontos de vista e baseados em dados empíricos. A equação 2.41 é representativa do conjunto destes cálculos, onde  $F(\theta_s, N_s)$  é a função de atenuação e  $H_0$  é a função de ganho de frequência.

$$A_{scat}(s) = 10 \times \log(47.7 \times k \times \theta^4) + F(\theta d, N_s) + H_0 \quad (2.41)$$

A função de atenuação depende das características principais de propagação e da refratividade da superfície ( $N_s$ ). Inclui, também, um pequeno ajuste empírico para frequências entre os 100 e 1000 MHz. A sua expressão é dada pela equação 2.42 em função da refratividade e do produto entre  $d$  e  $\theta$ , as distâncias do percurso e angular, respetivamente, em quilómetros. As suas curvas características estão definidas em [19] e pela fórmula da equação 2.43.

$$F(\theta d, N_s) = F(\theta d, 301) - 0.1 \times (N_s - 301) \times e^{-\frac{\theta d}{4 \times 10^4}} \quad (2.42)$$

$$F(\theta d, 301) = \begin{cases} 133.4 + 0.332 \times 10^{-3} \times \theta d - 10 \times \log(\theta d) & , 0 \leq \theta d \leq 10^4 \\ 104.6 + 0.212 \times 10^{-3} \times \theta d - 2.5 \times \log(\theta d) & , 10^4 \leq \theta d \leq 7 \times 10^4 \\ 71.8 + 0.157 \times 10^{-3} \times \theta d + 5 \times \log(\theta d) & , \text{de outra forma} \end{cases} \quad (2.43)$$

Assume-se que, se as antenas estiverem suficientemente altas, a reflexão de energia pelo solo duplica a potência incidente nos dispersores visíveis por ambas as antenas e, assim, duplica a potência dispersada para o recetor. À medida que a frequência diminui, a relação entre a altura efetiva das antenas e o comprimento de onda ( $h_{te}/\lambda$  e  $h_{re}/\lambda$ , representada por  $r_1$  e  $r_2$ ) diminui também e a energia refletida pelo solo tende a cancelar parte da energia do raio direto associada à máxima eficiência de dispersão (representada por  $\eta_s$ ). A função de ganho de frequência,  $H_0$ , é precisamente uma estimativa do aumento de atenuação na transmissão com base neste acontecimento. O cálculo desta pode ser encontrado em detalhe em [19]. A sua fórmula geral está representada na equação 2.44, dependente dos parâmetros mencionados, assim como de um fator de assimetria do terreno,  $s_s$ , e um coeficiente que relaciona a altura efetiva das antenas,  $q$ .

$$H_0 = H_{00}(r_1, r_2, \eta_s) + \Delta H_0(s_s, q, \eta_s) \quad (2.44)$$

## 2.9 Cálculo da atenuação por aproximações estatísticas

Uma vez explicados todos os tipos de atenuação física contabilizados pelo modelo, é necessário relacionar os parâmetros estatísticos de variabilidade anteriormente descritos (temporal, de situação e de local) com a atenuação resultante.

Em propagação rádio, o que fornece o contexto de variabilidade é o equipamento analisado de três perspetivas: como, onde e quando é utilizado. Em qualquer caso, a forma como o equipamento é utilizado tem frequentemente um efeito imprevisível nos níveis de sinal observados. Assim, propõe-se a utilização da palavra situação para indicar uma determinada implementação de um sistema. Em termos técnicos, uma situação é uma medida de probabilidade imposta pela recolha de todos os percursos de propagação possíveis em todos os momentos concebíveis do tempo. Escolher um percurso e um momento temporal “ao acaso” é, portanto, escolhê-los de acordo com esta medida de probabilidade de situação.

Em percursos fixos, pode-se fazer um registo das medianas do nível de sinal recebido numa escala horária, durante vários anos, criando um sistema de diversidade temporal, que possibilitará identificar uma variabilidade temporal - figura 2.16. É de notar que o modelo não assume desvanecimento rápido devido a componentes multipercurso. Para tal, além deste ser altamente dependente do sistema e do serviço em particular, seria necessário ter em conta características do canal de propagação que, neste caso, não são consideradas.

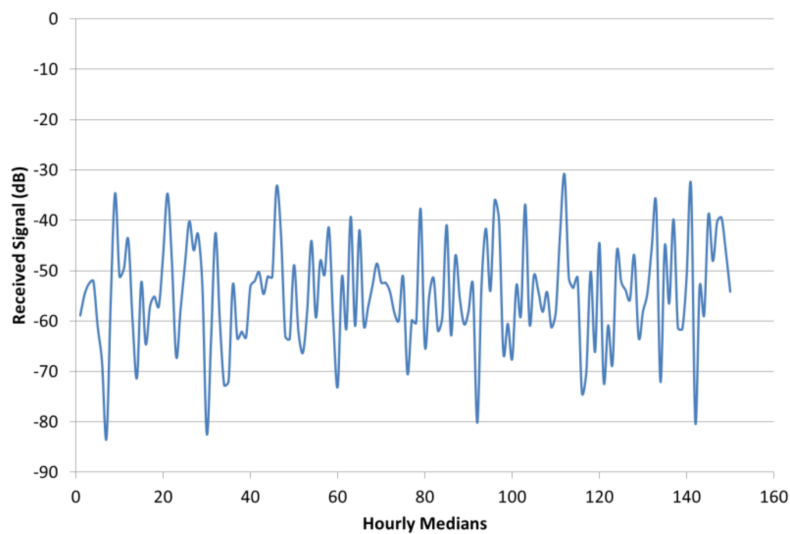


Figura 2.16: Registo do nível de sinal recebido ao longo do tempo [15].

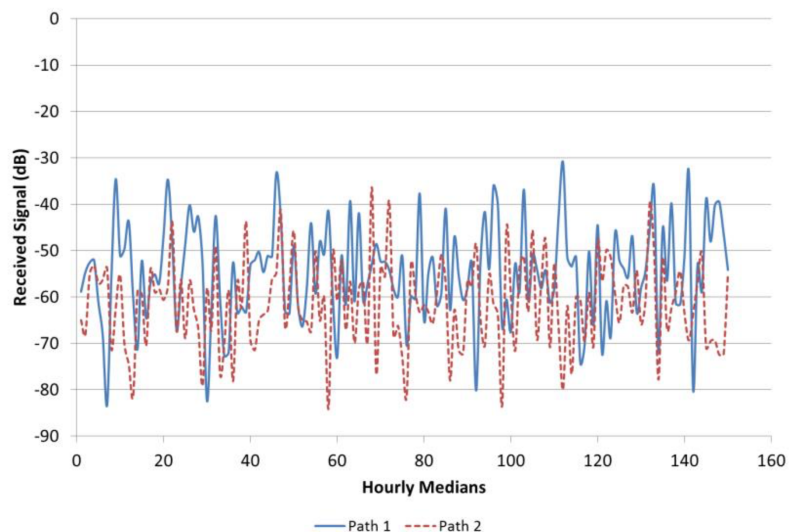


Figura 2.17: Registo do nível de sinal recebido ao longo do tempo e em diversos percursos [15].

Caso as medições sejam efetuadas com um dispositivo móvel, e mantendo condições de teste idênticas, podem-se registar variações do nível de sinal em larga escala, consoante várias distâncias testadas. Assim, criando um sistema de diversidade espacial, identifica-se a variabilidade de localização - figura 2.17.

É, no entanto, natural que as estatísticas recolhidas anteriormente sejam diferentes de outras recolhidas num ambiente de teste praticamente idêntico, isto porque, muito provavelmente, alguns pormenores na sua situação de análise mudaram. Se simplesmente se alterar a operação de uma área para outra, todo o esquema de registo de amostragem irá também mudar, desde os aparelhos de medição aos próprios técnicos. Assim, identifica-se a variabilidade de situação.

Estes dados estatísticos que descrevem os tipos de variabilidade podem ser caracterizados pela sua média e desvio padrão, sendo que as distribuições observadas tendem a ser normais ou, pelo menos, muito próximas de normais. É com base neste facto que o modelo trata as variáveis estatísticas descritas na sequência deste sub-capítulo, de forma a ser estimado o desvio que uma transmissão pode sofrer face à atenuação calculada com base em parâmetros físicos. Deste modo, podem-se usar os quantis destas observações, sendo estes valores do nível de sinal recebido,  $A(qS, qT, qL)$ , não excedidos por determinadas frações de situações, tempo ou locais ( $qS$ ,  $qT$  e  $qL$ , respetivamente). Seguindo esta suposição, pode-se dizer que, em  $qS$  das situações, vão haver pelo menos  $qL$  locais onde a atenuação não excede  $A(qT, qS, qL)$  durante, pelo menos,  $qT$  do tempo.

No modo ponto-a-ponto, como já referido anteriormente e uma vez que há dados concretos de localizações e elevações do terreno, a variabilidade de local não existe, usando-se, por isso, uma descrição bidimensional da distribuição cumulativa, ao invés de tridimensional. No entanto, de modo a evitar esta transformação e manter a tridimensionalidade, considera-se  $qL = 0.5$ , o que corresponde a um valor de  $z(qL)$  nulo, sendo este último o que é utilizado para os cálculos de variabilidade pela forma como o modelo está implementado para máxima eficiência. Assim, pode-se dizer com confiança  $qS$  que a atenuação não excederá  $A(qT, qS)$  durante, pelo menos,  $qT$  do tempo (ou com uma fiabilidade  $qT$ ) [6].

Como já mencionado, o ITM permite uma representação matemática de como o nível de sinal recebido é tratado na forma de uma variável aleatória. Para tal acontecer, assumem-se os parâmetros do sistema e ambientais como fixos. De seguida, do conjunto de todas as situações possíveis, escolhe-se uma em particular e de forma aleatória. Nessa situação, que é uma medida de probabilidade,

escolhe-se uma hora aleatória. Ignorando, mais uma vez, a variabilidade de localização, estas duas formas ( $qS$ ,  $qT$ ) do evento elementar e o nível de sinal recebido  $A(qS, qT)$  tornam-se uma variável aleatória.

De forma a determinar os quantis  $A(qT, qS, qL)$  considerando as frações  $qT$ ,  $qS$  e  $qL$ , recorre-se à função complementar de distribuição normal,  $Q(z)$ , em que o desvio padrão normal,  $z(q)$ , é simplesmente a sua a função inversa, sendo este último utilizado porque as variáveis aleatórias envolvidas são todas normalmente distribuídas (ou muito aproximadamente) e, desta forma, os cálculos que as utilizam são muito simplificados.

$$q = Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (2.45)$$

$$z(q) = Q^{-1}(q) \quad (2.46)$$

Usa-se a função complementar em vez da função normal uma vez que, normalmente, problemas deste género analisam-se em termos de um nível de sinal recebido, em vez de uma perda ou atenuação. Assim, consegue-se dizer que este nível é pelo menos tão grande numa fracção  $q = Q(z)$  das amostras.

Considerando uma variável aleatória  $x$  que segue um distribuição normal com média  $X_0$  e desvio padrão  $\sigma$ , os seus quantis são dados por:

$$X(q) = X_0 + \sigma z(q) \quad (2.47)$$

Definem-se, então, as seguintes equivalências, assumindo-se  $z_L = 0$  para o modo ponto-a-ponto.

$$z_T = z(q_T); \quad z_L = z(q_L); \quad z_S = z(q_S) \quad (2.48)$$

Os desvios de tempo  $Y_T$ , local  $Y_L$  e situação  $Y_S$  previstos pelo modelo são calculados de forma isolada, sendo que os valores  $Y_T$  e  $Y_L$  dependem das variáveis únicas  $z_T$  e  $z_L$ , respetivamente, enquanto que  $Y_S$ , por outro lado, depende destas últimas em conjunto com  $z_S$  [16].

- **Variabilidade temporal**

Os quantis de variabilidade temporal são processados com recurso a curvas características de cada clima, que estão descritas em [4]. Estas curvas empiricamente estimadas são representativas de quantis de desvios face à distância efetiva de um percurso.

O ajuste mediano anual,  $V_{med}$ , permite, como o nome indica, um ajuste da atenuação de referência para cada clima de forma a convertê-la numa atenuação mediana anual (uma vez que esta é calculada considerando uma atmosfera padrão em estado de repouso) e pode-se encontrar melhor descrito em [4]. Já o desvio  $Y_T$  é dado pela expressão 2.49, onde os multiplicadores  $\sigma_{T-}$  e  $\sigma_{T+}$ , assim como as restantes constantes  $z_D$  e  $\sigma_{TD}$  estão, também, especificadas com pormenor em [4].

$$Y_T = \begin{cases} \sigma_{T-} \times z_T & , z_T \leq 0 \\ \sigma_{T+} \times z_T & , 0 \leq z_T \leq z_D \\ \sigma_{T+} \times z_D + \sigma_{TD}(z_T - z_D) & , z_D \leq z_T \end{cases} \quad (2.49)$$

- **Variabilidade de localização**

Para a variabilidade de localização, apesar de desprezada no modo ponto-a-ponto, mas tida em conta no modo de área, define-se  $Y_L$ , onde  $k$  é um coeficiente dependente da distância e da frequência,  $\Delta_h(d)$  é o intervalo interdecil de elevações de terreno (equação 2.4) e  $\sigma_L$  é dado pela equação 2.51.

$$Y_L = \sigma_L z_L \quad (2.50)$$

$$\sigma_L = \frac{10k\Delta_h(d)}{k\Delta_h(d) + 13} \quad (2.51)$$

- **Variabilidade de situação**

Para a variabilidade de situação, tendo esta a intenção de demonstrar como as incertezas aumentam consoante a evolução das distribuições, define-se:

$$Y_S = \left( \sigma_S^2 + \frac{Y_T^2}{7.8 + z_S^2} + \frac{Y_L^2}{24 + z_S^2} \right)^{1/2} z_S \quad (2.52)$$

Onde, sendo  $D = 100km$  e  $d_e$  um coeficiente de distância, se define:

$$\sigma_S = 5 + 3e^{-\frac{d_e}{D}} \quad (2.53)$$

Estimados todos os desvios possíveis, e considerando que serão contabilizadas três variáveis aleatórias independentes resultantes de três distribuições estatísticas através de uma soma, o modelo adota uma “pseudo-convolução”, descrita em [6], que resulta na atenuação contabilizando as variabilidades estatísticas, dada pela equação em baixo, onde  $A_{ref}$  é a atenuação de referência calculada pelos métodos físicos descritos anteriormente (equação 2.20).

$$A' = A_{ref} - V_{med} - Y_T - Y_L - Y_S \quad (2.54)$$

A este valor de atenuação é ainda feita uma modificação de forma a corrigir valores acima da propagação em espaço livre. Para valores resultantes dos parâmetros de variabilidade superiores a  $A_{ref}$  (atenuação por fenômenos físicos), a função de modificação impõe um limite superior nos valores ou reduz os mesmos significativamente, cortando a atenuação excessiva até um fator de 10.

$$A(z_T, z_L, z_S) = \begin{cases} A' & , A' \geq 0 \\ A' \times \frac{29-A'}{29-10A'} & , \text{de outra forma} \end{cases} \quad (2.55)$$

Por último, resulta a atenuação final do modelo, adicionando ao valor anterior a atenuação em espaço livre (equação 2.19).

$$A_{total} = A(z_T, z_L, z_S) + A_{fs} [dB] \quad (2.56)$$

# Aplicações do modelo

## 3.1 Introdução

O principal objetivo do presente trabalho é analisar a viabilidade de implementação do ITM para estimação de cobertura móvel numa linha ferroviária envolvida por terreno irregular. Assim, e uma vez que um dos modelos mais utilizados atualmente para este efeito é o *Okumura-Hata*, ambos os modelos são confrontados com medidas ao longo de uma linha ferroviária. O acesso a estas medidas de cobertura rádio, além de validarem o modelo implementado, permitem, também, comparar o seu desempenho com o *Okumura-Hata*.

A versão implementada do ITM foi a 1.2.2, baseada no código original em *Fortran*, descrito em [16], que não contabiliza quaisquer fatores corretivos ou termos que contemplem, por exemplo, vegetação ou urbanização presentes num dado percurso. Já os resultados do *Okumura-Hata* foram obtidos através do *software SIGRAIL Planning* da empresa Solvit, com a qual se colaborou na realização deste projeto. A versão implementada deste último modelo será abordada em mais detalhe no desenvolvimento desta secção.

Neste capítulo é explicada a abordagem ao problema e todo o sistema implementado, desde os dados a que se teve acesso, ao algoritmo desenvolvido para as simulações desejadas. Apresenta-se o cenário de estudo, com a caracterização da linha férrea e das estações base montadas, as versões e parâmetros de entrada

dos modelos teóricos avaliados e, por fim, aborda-se o método de obtenção e tratamento das medidas, que não foi objeto de execução deste trabalho.

## 3.2 Abordagem e sistema implementado

A implementação do sistema de teste está dividida em dois blocos principais: um de informação de entrada e outro de processamento em MATLAB, sendo que o seu fluxograma representativo está presente na figura 3.1.

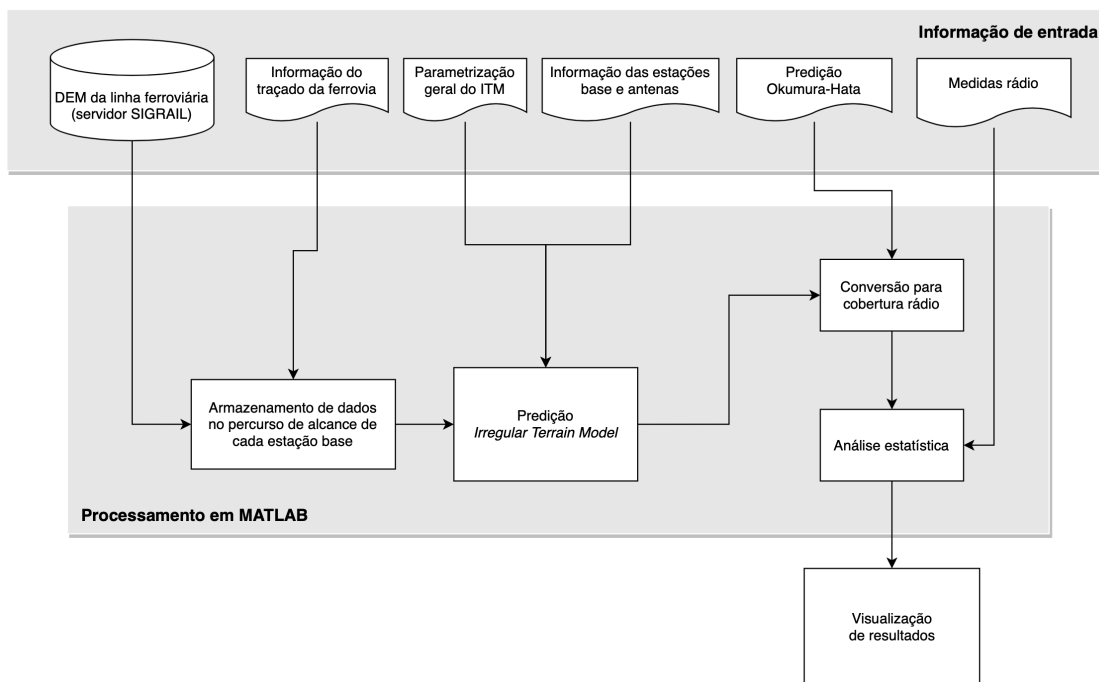


Figura 3.1: Fluxograma de implementação do sistema.

Como informação de entrada, utilizaram-se documentos gerados pelo SIGRAIL *Planning* relativos às predições de atenuação do modelo *Okumura-Hata* para as oito estações base, assim como a informação geográfica que, neste caso, foi obtida por intermediário de um servidor ativo no mesmo *software* e que aceita pedidos de informação. Através disto, conseguiu-se aceder remotamente a um DEM que permitiu capturar valores de elevação do terreno num dado percurso definido por dois pontos geográficos. Além destes dados, ainda se utilizaram parâmetros tabelados das estações base e medidas rádio recolhidas nos respetivos locais de teste.

Estando a informação do perfil do terreno apenas disponível por intermediário de um servidor, a primeira parte do processamento MATLAB é executada de

forma a garantir que estes dados são alojados localmente na máquina de testes, isto de modo a que, sempre que seja necessário aceder a esta informação, a tarefa seja o mais célere possível. Assim, para cada zona de alcance de cada uma das oito estações base, armazenaram-se em estruturas de dados informações como a latitude, longitude, distância do percurso, elevações e PK, em cada ponto do trajeto.

De seguida, através destes dados e da parametrização inicial definida, executou-se o algoritmo do ITM implementado em MATLAB para cada um dos trajetos, obtendo, com recurso aos dados das antenas de cada estação base, a potência de receção resultante das estimativas deste modelo, calculada pela adaptação da fórmula de Friis presente na equação 3.1.

As antenas são caracterizadas por um ganho que varia consoante o seu diagrama de radiação, assim como por uma perda, geralmente associada aos meios físicos que permitem a ligação ao resto do sistema, como cablagem, conectores, entre outros. Além desta perda, existe ainda o fenómeno de atenuação que o sinal sofre ao longo do percurso entre as duas antenas estabelecem uma comunicação, sendo esta, para efeitos teóricos, estimada pelos modelos de propagação.

Assim, por meio desta fórmula, conseguem-se relacionar todas estas variáveis: a potência recebida por uma antena,  $P_R$ , a potência emitida por uma outra antena,  $P_E$ , os ganhos de ambas as antenas,  $G_R$  e  $G_E$ , as suas perdas,  $L_R$  e  $L_E$ , e a atenuação ao longo do percurso,  $L_{path}$ , calculada pelos modelos ITM e *Okumura-Hata*.

$$P_R [dBm] = P_E [dBm] + G_R [dBi] + G_E [dBi] - L_R [dB] - L_E [dB] - L_{path} [dB] \quad (3.1)$$

Posto isto, o processamento das medidas rádio, assim como a conversão dos resultados de atenuação do *Okumura-Hata* para potência de receção, também foram passos necessários antes da análise estatística efetuada.

Possuindo estes três tipos de dados relativos a nível de sinal (medidas, ITM e *Okumura-Hata*), fez-se a análise de forma a confrontar os valores das predições de ambos os modelos comparados com os que são efetivamente reais. Para tal, recorreu-se a métricas estatísticas e avaliaram-se estes valores, assim como as curvas resultantes.

Todos os dados mencionados em cima, desde a informação da linha férrea às medidas e predições de cobertura, serão abordados nas seguintes secções de forma mais aprofundada.

### 3.3 Cenário de estudo

A linha ferroviária escolhida para o efeito foi a da Beira Baixa por ser caracterizada por terreno muito irregular, sendo que, supostamente, um dos pontos de destaque do ITM na predição de cobertura rádio é precisamente neste tipo de terreno.

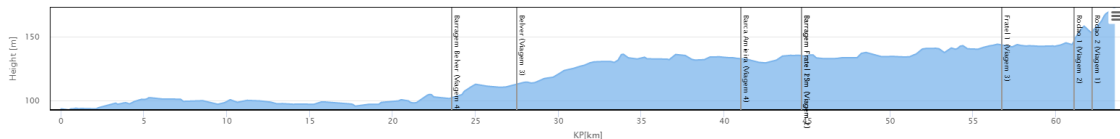


Figura 3.2: Perfil do terreno do trecho analisado na linha da Beira Baixa, gerado pelo SIGRAIL *Planning*.

O trecho seleccionado é constituído por oito estações base posicionadas ao longo de 65 quilómetros pelos vales do rio Tejo, desde a Barragem Belver à Rodao2, sendo caracterizado pela zona mais sinuosa e com maior quantidade de obstáculos montanhosos desta parte da ferrovia, assim como por características puramente rurais.



Figura 3.3: Vista aérea do trecho da linha analisado.

Cada estação base possui antenas omnidireccionais e parâmetros importantes que

são contabilizados pelo sistema implementado (assim como, em parte, pelos modelos de propagação), nomeadamente a sua posição geográfica (latitude e longitude), a altura da estrutura das antenas acima do solo, a potência de emissão, o canal ARFCN em que operam e as perdas associadas à cablagem. Esta informação está tabelada em 3.1.

Estação base	PK	Latitude	Longitude	Altura [m]	Ptx [dBm]	ARFCN	Perdas [dB]
BarragemBelver	23.73	39.481928	-8.001156	16.0	42.9	967	3.74800
Belver	27.45	39.492064	-7.958883	22.0	42.9	967	3.74800
BarcaAmieira	41.08	39.526280	-7.835156	14.3	38.5	961	1.91272
BarragemFratel15m	44.66	39.544703	-7.803847	15.0	43.3	967	3.74800
BarragemFratel23m	44.66	39.544703	-7.803847	23.0	43.3	967	3.74800
Fratel1	56.76	39.613502	-7.715961	14.3	38.5	961	1.91272
Rodao1	61.08	39.644164	-7.693527	14.3	38.5	961	1.91272
Rodao2	62.17	39.647105	-7.682320	14.3	38.5	961	1.91272

Tabela 3.1: Parâmetros das estações base escolhidas da linha da Beira Baixa.

O ganho das antenas de cada estação base foi obtido diretamente através dos documentos gerados pelo *SIGRAIL Planning*. Este *software*, além das predições de atenuação do *Okumura-Hata*, também calculou o ganho das antenas de emissão para cada ponto dos percursos, estando isto dependente da posição geográfica do equipamento de receção (por causa da relação entre o ângulo do raio direto e o diagrama de radiação das antenas).

### 3.4 Cálculo de cobertura

O algoritmo do ITM especificado no diagrama da figura 2.1 e desenvolvido teoricamente ao longo do segundo capítulo tem um conjunto de parametrização inicial necessário para a execução do modelo. Como já mencionado, e uma vez que se dispõe da informação relativa ao perfil do terreno, o ITM será implementado no modo ponto-a-ponto, sendo o perfil um parâmetro de entrada adicional através do qual se inferem outros parâmetros como a distância entre as antenas (pelas coordenadas geográficas), o parâmetro de irregularidade do terreno (pelas elevações ao longo do percurso), as alturas efetivas das antenas, entre outros.

Além do perfil do terreno, são considerados os seguintes parâmetros de entrada para qualquer execução do ITM:

- Frequência: considerou-se fixa a 900 MHz, uma vez que é nesta gama que os canais ARFCN (tabela 3.1) das várias estações base operam;

- Altura da antena da estação base acima do solo: varia dinamicamente consoante a estação base a ser analisada. Os dados de todas as estações base encontram-se resumidos na tabela 3.1;
- Altura da antena do móvel acima do solo: considerou-se uma altura fixa de 4 metros, sendo este o valor de referência assumindo que as medidas são realizadas com uma antena no topo do tejadilho do comboio;
- Ganho e perda da antena do móvel: na adaptação da fórmula de *Friis* presente na equação 3.1, estes valores do terminal móvel anulam-se, uma vez que foi considerado um ganho constante de  $2\text{ dBi}$  e perdas na cablagem de  $2\text{ dB}$ ;
- Polarização das antenas: definiu-se polarização vertical uma vez que é padrão nos sistemas de comunicações móveis;
- Parâmetros ambientais: tendo em conta a região da ferrovia que é objeto de teste, considerou-se um clima continental temperado e um tipo de solo comum. Resultante destas assunções, definiram-se valores fixos da refratividade da superfície a  $301\text{ unidades }N$ , da permissividade relativa do solo a 15 e da condutividade do solo a  $0.005\text{ S/m}$ ;
- Variabilidade: uma vez que o modelo foi implementado no modo ponto-a-ponto, define-se por omissão o modo de variabilidade como *individual*, desprezando, assim, a variabilidade de localização. As frações de variabilidade temporal e de situação foram consideradas a 50%, sendo este o valor equivalente à mediana. Desta forma, ignoram-se os efeitos dos parâmetros estatísticos no cálculo final da atenuação, que podem ser compensados, por exemplo, com a contabilização de margens para a definição do nível de sinal mínimo.

É de notar que, apesar de não gerados no âmbito deste trabalho, os resultados do *Okumura-Hata* obtidos através do *SIGRAIL Planning* dispuseram de uma parametrização de entrada equivalente à descrita em cima, apenas adaptada para os requisitos do modelo.

O *Okumura-Hata* foi escolhido para comparação com o ITM por ser um modelo já testado neste tipo de ambiente [1] e que se considera bastante adequado. A versão implementada pelo *software SIGRAIL Planning* considera algumas otimizações face à expressão original do modelo, tendo sido incluídos no algoritmo de

predição as seguintes componentes, que se encontram descritas ao pormenor em [20]:

- Método de *Deygout* - adicionado de forma a compensar as perdas por difração em obstáculos que originalmente não são contabilizadas;
- Fatores corretivos: subtraídos à atenuação final, compensando pormenores de propagação como ruas radiais (relacionando a orientação entre a linha ferroviária e a antena), ondulação do terreno, trajetos mistos e vegetação.

### 3.5 Medidas rádio

O presente trabalho não teve como objetivo a recolha de medidas no campo uma vez que estas já se encontram disponíveis para análise. O documento mencionado no bloco de informação de entrada da figura 3.1 já conta com as medidas finais processadas que foram disponibilizadas pela empresa Solvit - *Innovation on Telecommunications* para efeitos de estudo.

Este documento, utilizado como entrada no sistema implementado, reúne o nível de sinal, em *dBm*, para a área de cobertura de cada uma das oito estações base, numa escala de PK, ao longo do troço da linha analisado.

As medidas foram realizadas através da instalação de equipamentos de emissão em diversas posições ao longo da linha e de um equipamento de receção, inserido a bordo de uma unidade motora, que fará a cobertura completa da linha. Os transmissores, referidos como estações base ao longo deste trabalho, foram colocados estrategicamente apenas para efeitos de teste e não operando de forma simultânea. O método de recolha das medidas está descrito ao pormenor em [20], como caso exemplificativo, e podem-se encontrar detalhados alguns aspetos da campanha de medidas, como a instalação das antenas, os equipamentos de teste, a aquisição e armazenamento de informação e o processamento dos dados.

Relativamente a este último ponto, segundo [20], o equipamento de receção foi configurado com um tempo entre amostras de  $100\text{ ms}$  (uma frequência de  $10\text{ amostras/segundo}$ ) e, considerando que o comboio se desloca entre  $50\text{ a }60\text{ km/h}$ , o valor de distância relativo a cada amostra pode variar entre 1 e 3 metros. Com isto, conclui-se que a velocidade a que o aparelho recolhe as medidas é muito superior à velocidade do comboio, obtendo-se uma variação muito rápida do sinal. Este fenómeno de desvanecimento rápido tem de ser eliminado de forma a ser

possível caracterizar estatisticamente o sinal. Para tal, realiza-se uma filtragem ao sinal utilizando o método de Lee [21]. Após este processamento, obtiveram-se as medidas que são utilizadas na sequência deste relatório e que estão representadas na figura 3.4. Por aqui também se pode observar as zonas de cobertura de cada estação base, assumindo que o nível de sinal tem de ser superior a  $-98$  dBm, como indicado pela reta de *design level*.

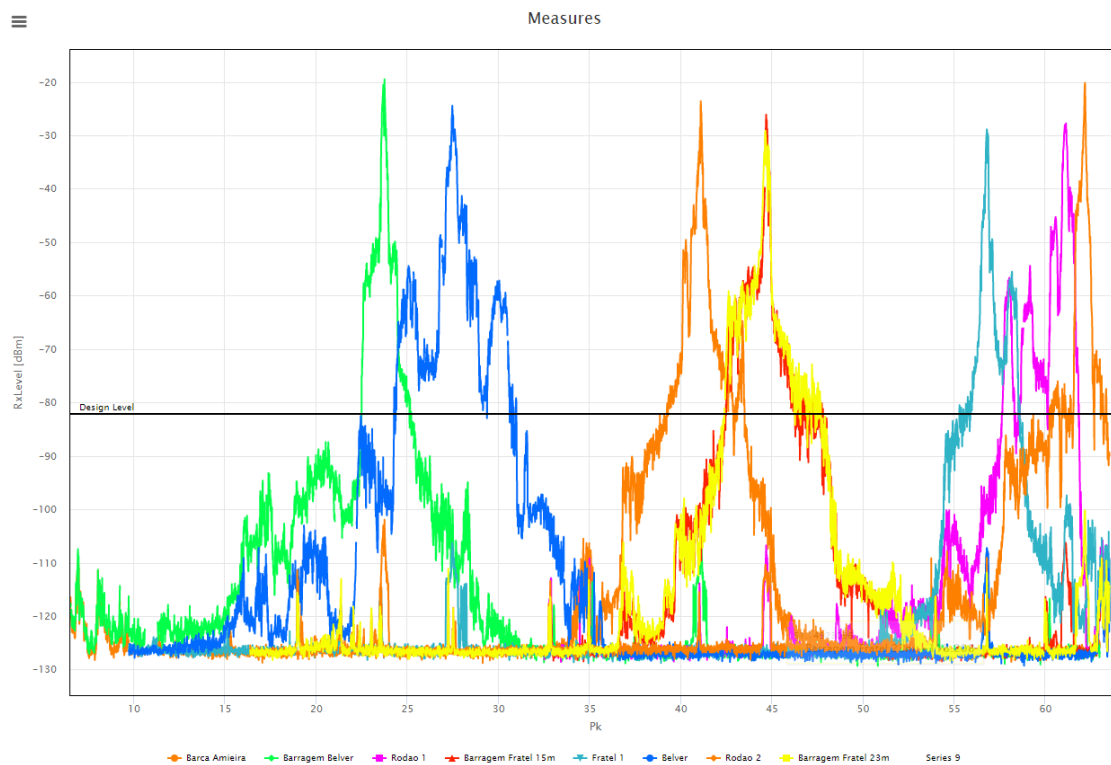


Figura 3.4: Resultados de medidas reais para cada estação base relativos a nível de sinal, gerado pelo SIGRAIL *Planning*.

# 4

## Análise de resultados

### 4.1 Introdução

Para avaliação do real desempenho do ITM num tipo de percurso especialmente desafiante (com muitas irregularidades no terreno), fizeram-se correr simulações para oito troços da linha da Beira Baixa, correspondentes às áreas de cobertura das estações base analisadas - desde Belver a Ródão. Assim como se obtiveram resultados para a predição de atenuação pelo ITM através do programa implementado em MATLAB, também se teve acesso a valores de atenuação dentro das mesmas condições mas recorrendo ao modelo *Okumura-Hata*, calculados pelo *software SIGRAIL Planning*, e ainda a medidas no terreno, já processadas e convertidas em nível de sinal.

Para confrontar o comportamento destes dois modelos e perceber qual se aproxima mais da realidade, recorreu-se a três parâmetros estatísticos de erro: o erro médio absoluto, a raiz do erro quadrático médio e desvio padrão do erro. Estes parâmetros, calculados para as oito estações base analisadas, desejam-se com o menor valor possível, sendo isto indicativo de ausência de erro e, por isso, de uma boa predição por parte do modelo de propagação.

Neste capítulo, além de analisadas estas métricas de erro para os troços das oito estações base, são também aprofundados os resultados da atenuação estimada pelo ITM segundo as características de cada percurso, fazendo-se um estudo das

particularidades de cada perfil e contracenando estes dados, também, com os resultados do *Okumura-Hata*.

## 4.2 Considerações iniciais

Dado o cenário de teste, as distâncias entre as diferentes estações base são relativamente reduzidas quando comparadas com a gama dinâmica do modelo, que, supostamente, suporta predições fidedignas até 2.000 quilómetros. Como tal, as distâncias dos percursos analisados (desde as estação base ao terminal) são induzidas pelas áreas de coberturas das estações base, não superando um máximo de, aproximadamente, 15 quilómetros.

Perante este facto, das três zonas consideradas pelo ITM para o cálculo da atenuação (figura 2.9), a única que realmente se teve oportunidade de testar foi a de linha de vista, uma vez que os alcances dos percursos analisados não ultrapassam as zonas de difração nem de dispersão. Como já abordado na secção 2.8, a distância de linha de vista representa o intervalo em que o raio direto não interfere com a superfície da Terra, podendo, no entanto, encontrar colinas ou outros obstáculos no terreno. Esta distância, geralmente, tem um alcance mínimo de 30 quilómetros, pelo que só a partir desta zona é que se considera atenuação puramente por difração. Já a atenuação por dispersão é considerada em alcances superiores a cerca de 200 quilómetros.

Apesar disto, e como descrito na equação 2.38, a atenuação em linha de vista considera uma extrapolação da atenuação por difração para esse alcance. Esta componente, nos casos analisados, constitui uma grande parte do valor de atenuação, fazendo com que a sua curva final seja altamente influenciada, como se pode comprovar pelo exemplo da estação base BarragemFratel23m da figura 4.1.

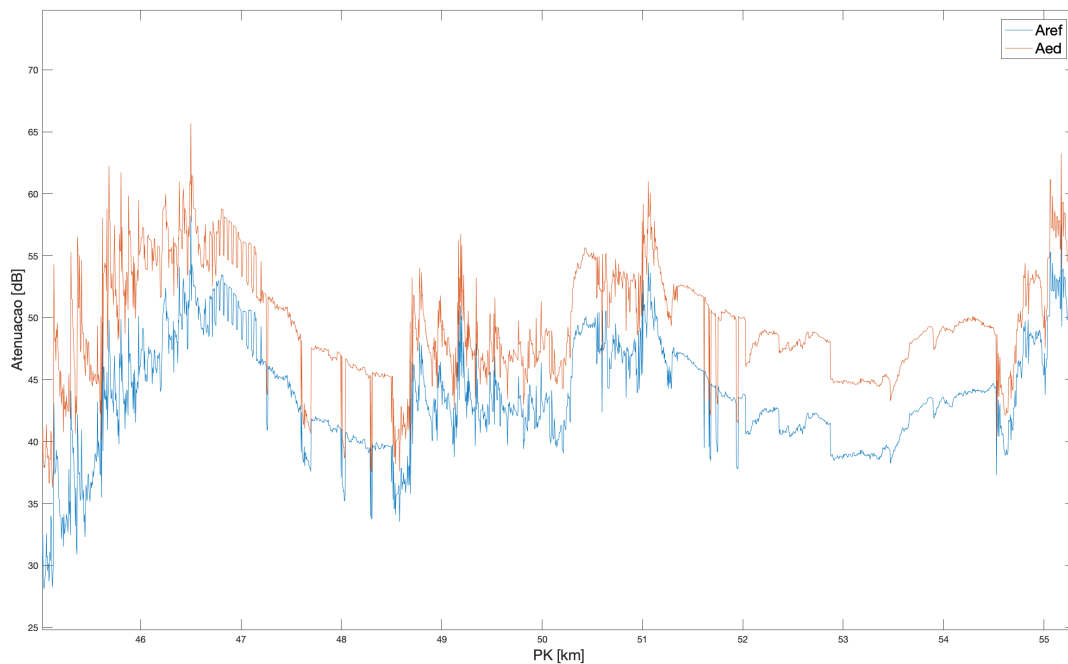


Figura 4.1: Influência da extrapolação da atenuação por difração no alcance de linha de vista.

Nestes cenários, as componentes que mais influência têm são as de atenuação por difração em obstáculos em lâmina e por difração pelo modelo de Terra Lisa, descritas nas equações 2.34 e 2.37, respectivamente.

### 4.3 Análise estatística de erro

De forma a poder quantificar a qualidade de predição de atenuação por parte de um modelo de propagação, geralmente recorre-se a três parâmetros estatísticos de erro: o erro médio absoluto, ME, a raiz do erro quadrático médio, RMSE, e desvio padrão do erro, ESD.

Com recurso a estes parâmetros, e na eventualidade de se dispor de medidas para comparação direta com o modelo de propagação, consegue-se aferir o quão próximos os cálculos são da realidade. Estes parâmetros também são especialmente interessantes para comparar o desempenho de modelos diferentes, sendo que quanto menores forem os seus valores, maior será a capacidade de predição do modelo.

O erro médio absoluto - equação 4.1 - representa a diferença percentual entre o

valor real de potência medido e o valor teórico estimado.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_{meas_i} - P_{pred_i}| \quad (4.1)$$

O erro quadrático médio - equação 4.2 - permite avaliar a diferença entre o valor aproximado e o real, medindo a média do quadrado do erro.

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

Por último, o desvio padrão do erro - equação 4.3 - permite medir o erro que existe em relação à média dos erros para cada amostra (ponto do percurso).

$$ESD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|P_{meas_i} - P_{pred_i}| - ME)^2} \quad (4.3)$$

Nas fórmulas em cima descritas, considera-se  $P_{meas_i}$  o nível de sinal, em dBm, medido no ponto  $i$  e  $P_{pred_i}$  o valor correspondente da predição, sendo  $n$  número total de pontos do percurso.

## 4.4 Barragem Fratel

A estação base BarragemFratel23m, apesar de não ser a primeira por ordem quilométrica no troço da linha analisado, foi a primeira a ser avaliada, uma vez que foram os primeiros dados a que se teve acesso para iniciar o presente estudo. Esta estação, assim como a BarragemFratel15m, estão situadas no PK 44.66. Foram colocadas na mesma posição para testar o impacto da altura da antena na transmissão do sinal. Assim, como os nomes indicam, uma foi posicionada a 15 e outra a 23 metros acima do solo. Todos os restantes parâmetros das antenas são precisamente iguais.

### 4.4.1 Validação do ITM

Tendo esta sido a primeira simulação efetuada com um percurso real, serviu como forma de validar o modelo implementado, bem como o resto do sistema,

em MATLAB. Os resultados obtidos estão presentes na figura 4.2, onde se podem observar as curvas de atenuação dos modelos de propagação, com o ITM a laranja e o *Okumura-Hata* a azul, face às medidas a amarelo.

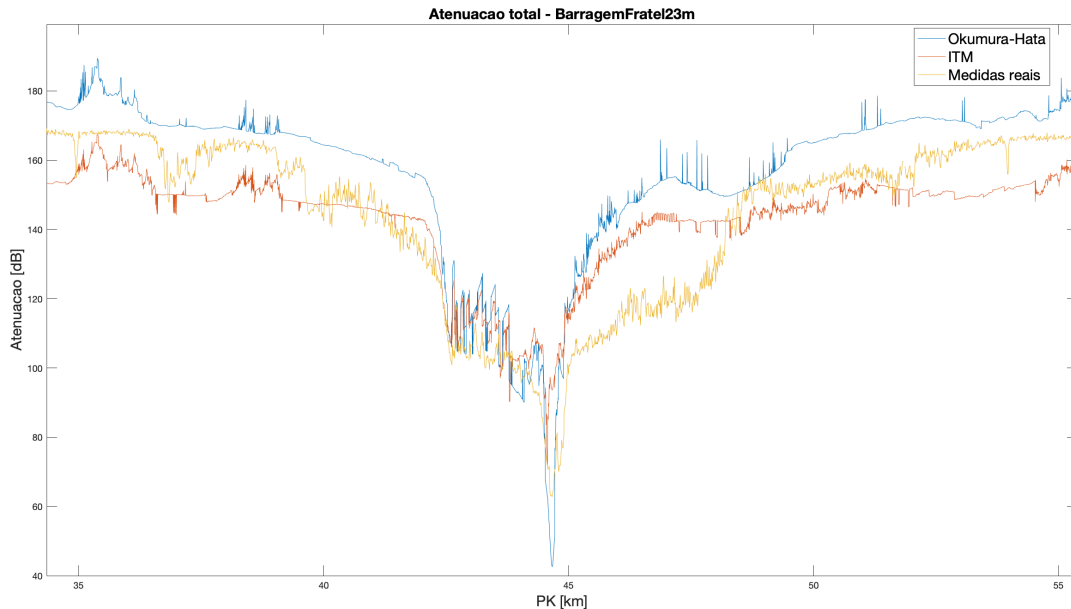


Figura 4.2: Validação do modelo de propagação no percurso da estação base BarragemFratel23m.

Tendo-se obtido resultados por parte do ITM relativamente próximos às medidas reais, pelo menos em grande parte do percurso, considerou-se que o modelo estava bem implementado. Para suportar isto, registaram-se, também, os valores das estatísticas de erro presentes na tabela 4.1.

Versão	ME	RMSE	ESD
Original, sem alterações	10.552	12.456	6.618

Tabela 4.1: Estatísticas de erro referentes à validação do ITM

Ainda assim, antes de avançar para a análise desta e das restantes estações base, fez-se uma análise mais profunda ao algoritmo implementado, isto na procura de possíveis alterações que resultassem numa melhor qualidade de predição por parte do ITM.

#### 4.4.2 Otimizações implementadas

Como já mencionado anteriormente, o ITM é, em parte, um modelo empírico, uma vez que foi calibrado e tem alguns fatores originados a partir de medições realizadas em áreas rurais dos EUA na década de 60 [6]. Ao investigar melhor a documentação do modelo e aprofundando no cálculo de cada componente da atenuação por difração (mesmo que na zona de linha de vista), percebeu-se que a função que contabiliza obstáculo em lâmina duplos e o fator de ponderação tinham algumas constantes definidas de forma empírica e que impactavam a atenuação final.

Além deste facto, tanto nas funções do modelo de Terra esférica lisa, como nas de obstáculos em lâmina, foram feitas algumas aproximações para simplificação de cálculos, por exemplo na passagem de integrais complexos para unidades logarítmicas. O próprio documento de suporte ao algoritmo [16] menciona que “nessas aproximações, a simplicidade computacional tem frequentemente tido maior prioridade do que a precisão”.

Posto isto, tentou-se implementar algumas otimizações de forma a aproximar a curva de predição do ITM às medidas reais, essencialmente através da observação dos resultados alcançados por modificação de algumas constantes ou pela multiplicação de fatores ponderados através de tentativa e erro.

Primeiramente, na função de cálculo de obstáculos em lâmina duplos (descrita na equação 2.34 e em maior detalhe em [17]), começou por se substituir manualmente, através de tentativa e erro, algumas das constantes que multiplicam na fórmula dos fatores de difração de *Fresnel-Kirchhoff*. Chegou-se à conclusão, após vários testes, que na equação 2.35, a componente  $20\log(v)$  adulterava muito significativamente o resultado final de atenuação. Após uma detalhada análise, conseguiu-se inferir que o valor mais indicado neste tipo de terreno para esta componente seria  $7\log(v)$ , pelo que se alterou esta constante. O resultado desta mudança pode-se observar na figura 4.3.

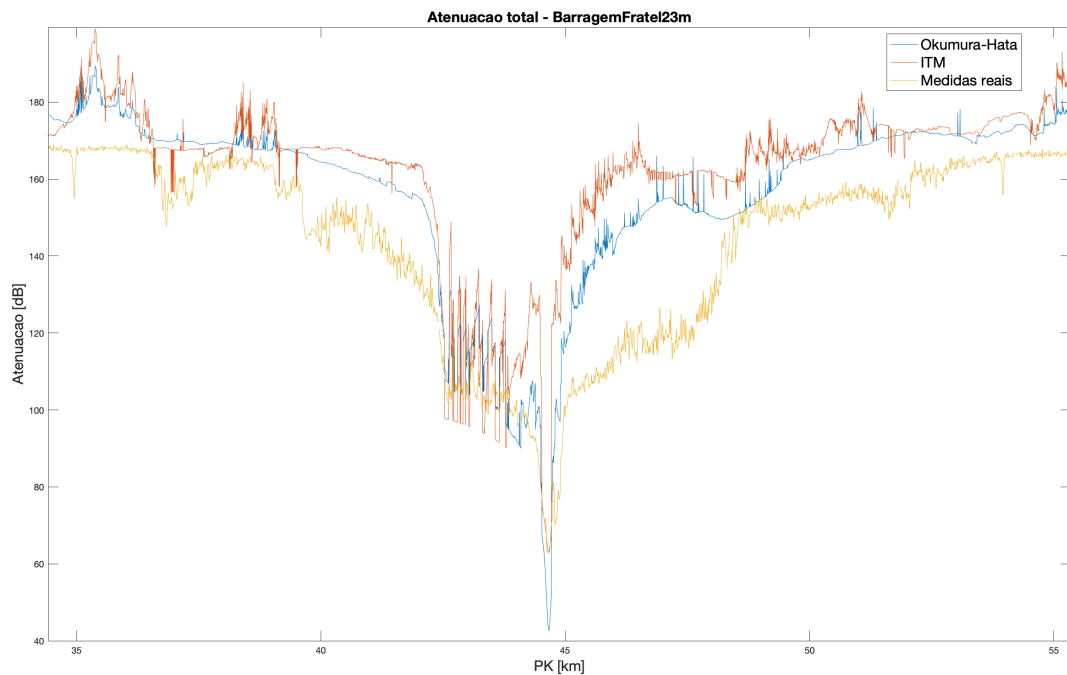


Figura 4.3: Otimização efetuada na atenuação por difração em obstáculos em lâmina duplos.

De seguida, analisou-se o impacto do fator de ponderação,  $w(s)$ , na curva final, uma vez que é multiplicado pelas componentes mais relevantes da atenuação por difração (equação 2.33), tendo como principal objetivo definir uma média ponderada desse resultado final. Começou por se modificar o fator de ponderação na totalidade, mas os resultados obtidos foram insatisfatórios. Depois, analisou-se o impacto da sua modificação nas componentes  $A_k(s)$  e  $A_r(s)$ , isoladamente. Ao aumentar o valor deste fator e, conseqüentemente, diminuir o valor da variável multiplicada por  $A_k(s)$ , percebeu-se que uma boa parte dos picos abruptos que se verificavam anteriormente foram minimizados.

Assim, após vários testes, estabeleceu-se a seguinte relação para modificação da equação 2.33:  $(1 - 5w(s)) \times A_k(s)$ . O resultado está presente na figura 4.4.

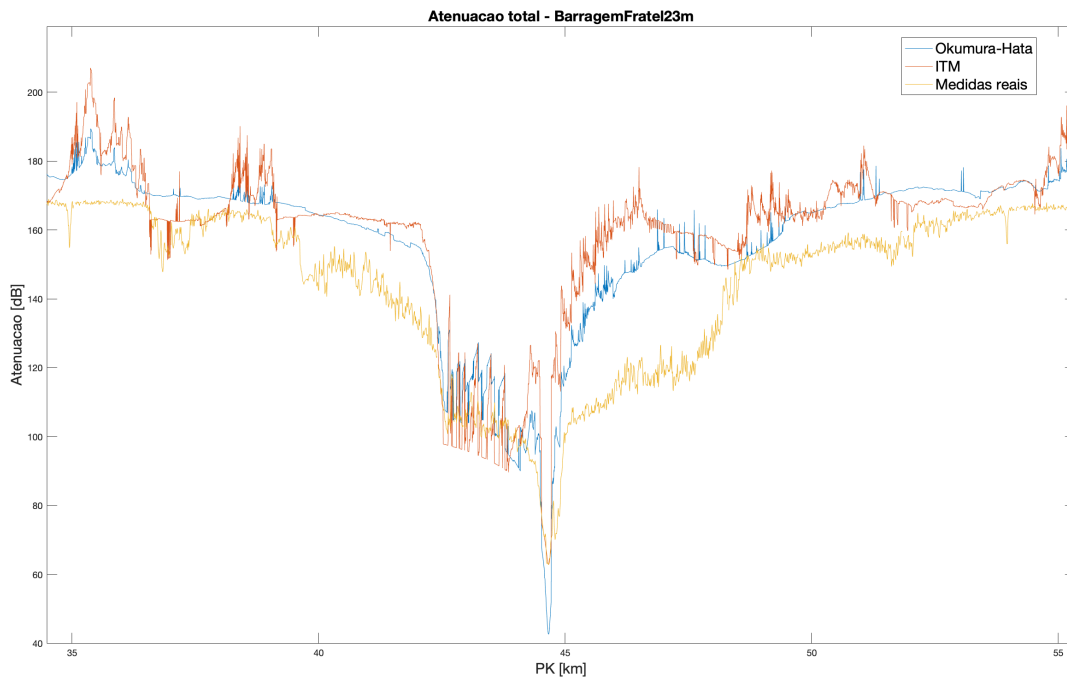


Figura 4.4: Otimização efetuada no fator de ponderação.

Da investigação efetuada, não houve outros parâmetros que fizessem sentido alterar, pelo que se implementaram estas duas otimizações. O resultado está presente na figura 4.5. Já na tabela 4.2, podem-se verificar os valores registados das métricas de erro para cada uma das otimizações, assim como para a versão final com todas as modificações implementadas.

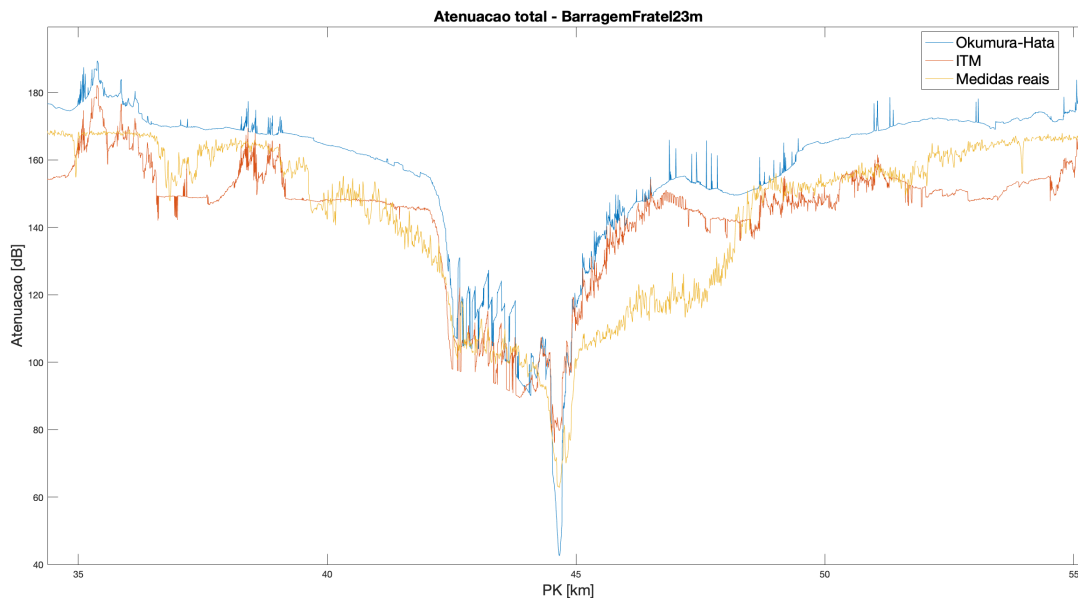


Figura 4.5: Resultado final após as otimizações implementadas.

Versão	ME	RMSE	ESD
Original, sem alterações	10.552	12.456	6.618
Otimização obstáculos em lâmina (sem correção)	18.903	22.821	12.786
Otimização fator de ponderação (sem correção)	16.453	21.164	13.312
Final (com correção e otimizações)	9.698	12.396	7.721

Tabela 4.2: Estatísticas de erro antes e após as otimizações implementadas.

Como se pode observar na versão final, o erro médio absoluto de 9.7 dB e a raiz do erro quadrático médio de 12.4 dB são inferiores aos valores da primeira versão do ITM testada. Apesar de o desvio padrão do erro ser superior, considera-se que estas alterações trouxeram ao modelo, de forma geral, uma maior capacidade de predição de atenuação. Como tal, e daqui em diante, considera-se esta a versão do modelo executada para as restantes estações base analisadas.

#### 4.4.3 Análise das estações base

Para a análise efetiva da capacidade de predição do ITM nesta zona de cobertura da linha da Beira Baixa, optou-se por analisar apenas as curvas da estação base com antena colocada a 23 metros de altura, sendo, em termos gerais, os resultados bastante semelhantes à da antena colocada a 15 metros.

Na figura 4.6 encontra-se a comparação entre as duas curvas de predição de ambos os modelos teóricos analisados (ITM a vermelho e *Okumura-Hata* a azul), assim como as medidas reais, a preto. Numa primeira análise, percebe-se que ambos os modelos (à exceção de no troço entre os PK 45 e 48.5) acompanham de forma relativamente próxima as medidas reais, sendo que o ITM apresenta uma curva de predição mais contígua às medidas reais. Tal facto pode-se comprovar pelos valores da tabela 4.3, onde se apresentam valores de erro médio absoluto e desvio padrão do erro de 3.6 e 0.9 dB inferiores, respetivamente, quando comparado o ITM com o *Okumura-Hata*.

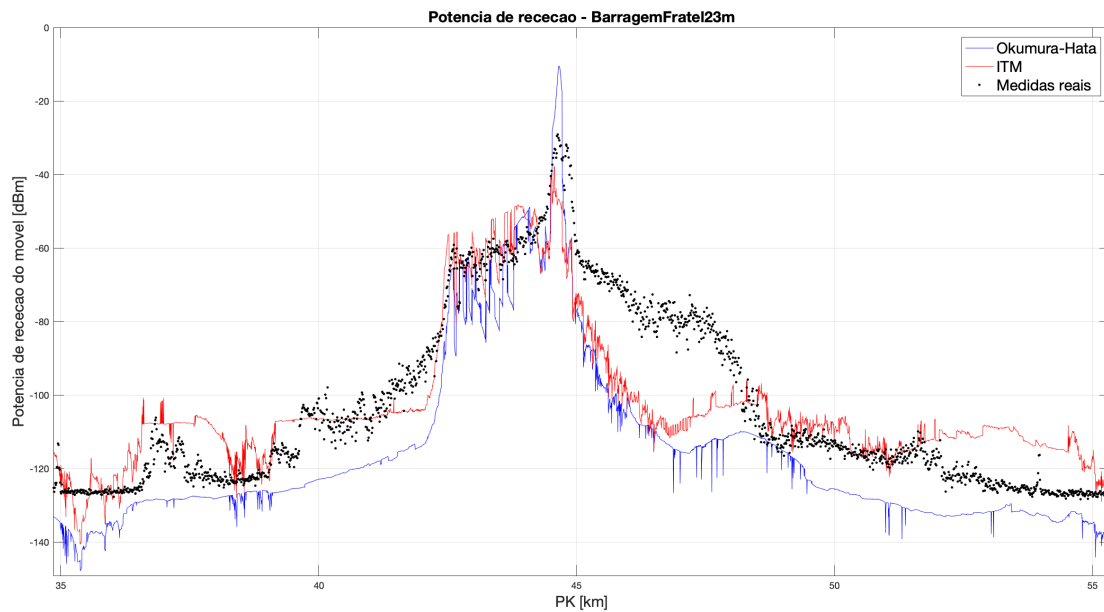


Figura 4.6: Predição de cobertura móvel da estação base BarragemFratel23m.

BarragemFratel23m	ME	RMSE	ESD
Irregular Terrain Model	9.74	12.45	7.74
Okumura-Hata	13.37	15.92	8.64

Tabela 4.3: Estatísticas de erro da estação base BarragemFratel23m.

Desde a estação base ao PK 42.5 (linha amarela da figura 4.7), ambos os modelos apresentam alguns picos irregulares de atenuação, evidenciando-se, no entanto, uma variação menos significativa por parte do ITM, assim como mais enquadrada no que são os valores reais. A partir do PK 42.5, a cerca de 2 quilómetros da estação base, aparece no percurso a estrutura montanhosa (também visível na figura 4.7) que acresce uma grande atenuação ao sinal propagado, sendo que, a partir deste ponto, ambos os modelos têm alguma dificuldade em calcular o nível de sinal recebido.

Como se pode observar pela linha vermelha representada, esta montanha apresenta não só uma elevação significativa no seu pico, como terreno bastante irregular e com vegetação abundante. Ainda que com algum desvio, o ITM acompanha as diferenças do nível de sinal que se verificam, ao contrário do *Okumura-Hata* que apresenta uma curva muito mais constante e continuamente decrescente. Situação semelhante a esta também se verifica a partir do PK 48.5.

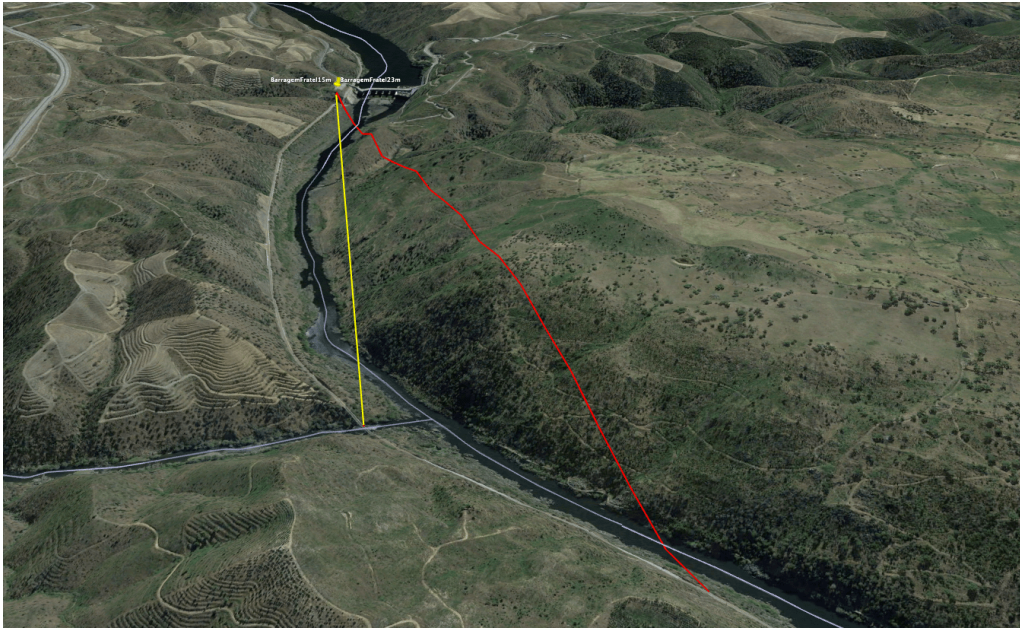


Figura 4.7: Estrutura montanhosa junto às estações base BarragemFratel.

Já entre os PK 45 e 48.5, ambos os modelos se desviam bastante das medidas reais, calculando uma atenuação muito superior à que efetivamente se verifica. Para despistar possíveis incoerências com a simulação efetuada, foram conferidos os valores de elevações do terreno a que se teve acesso para as simulações (comparando-os com dados do *Google Earth*), pois poderia existir uma incoerência neste troço. Tal facto não se verificou.

De seguida, colocou-se a possibilidade de existir apenas uma escarpa no trajeto real e os modelos teóricos, com base nos dados de entrada, “construírem” um obstáculo em lâmina muito mais extenso, provocando, assim, uma atenuação maior na distância referida. O mesmo não se verifica, como se pode observar pela figura 4.8, onde existe, mais uma vez, uma estrutura montanhosa de grande dimensão. Analisou-se, ainda, alguma possível incoerência no cálculo da atenuação por difração, mas os valores das várias componentes encontram-se dentro do normal para este tipo de percurso, verificando-se a influência evidente na atenuação do sinal provocada pelo topo da montanha, a cerca de 1 quilómetro da estação base, o que coincide com o pico do obstáculo identificado pela seta a vermelho na figura.

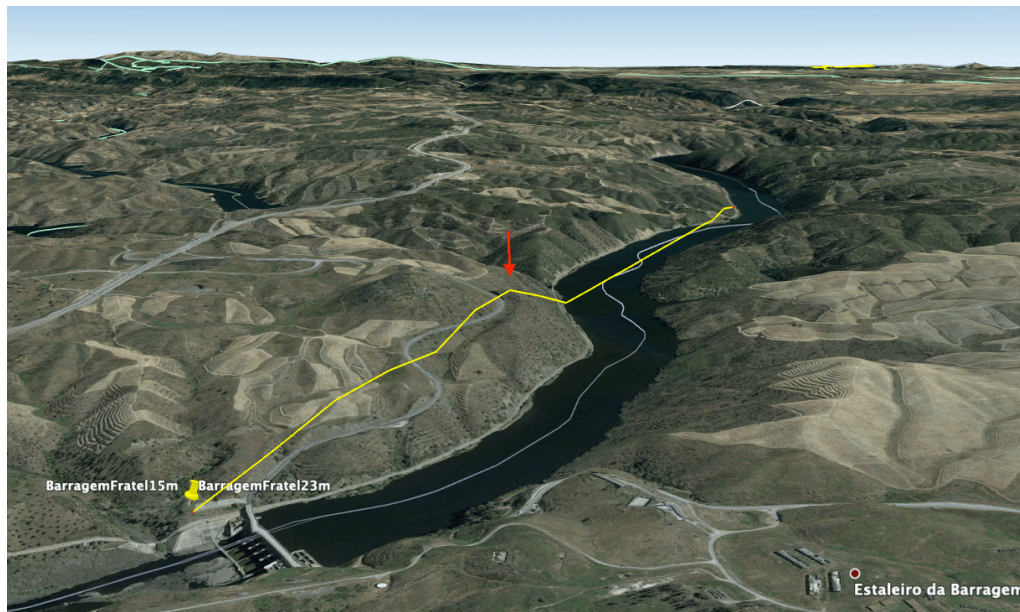


Figura 4.8: Estrutura montanhosa junto às estações base BarragemFratel.

Assim, e dados os recursos disponíveis para esta análise, não foi possível identificar a razão desta incoerência. Apenas se consegue supor que uma possível causa seja um fenómeno físico não contabilizado por ambos os modelos, como a propagação guiada do sinal ao longo do canal do rio. Caso tal acontecimento se verificasse, a propagação do sinal seria altamente beneficiada e a sua atenuação real muito inferior, que é precisamente o que acontece.

Quanto à comparação entre as duas antenas colocadas a 15 e 23 metros de altura na estação base da BarragemFratel, e como já referido, os valores das curvas são bastante semelhantes, apresentando diferenças de atenuação muito pouco significativas de 1 a 2 dB. O mesmo se verifica para as estatísticas de erro presentes na tabela 4.4, em que os valores são próximos.

BarragemFratel	ME	RMSE	ESD
Irregular Terrain Model (15m)	10.49	12.69	7.15
Irregular Terrain Model (23m)	9.74	12.45	7.74
Okumura-Hata (15m)	14.48	16.68	8.29
Okumura-Hata (23m)	13.37	15.92	8.64

Tabela 4.4: Comparação das estatísticas de erro das estações base BarragemFratel.

A antena a 23 metros apresenta um erro médio absoluto (ME) e, consequentemente, um erro quadrático médio (RMSE), inferior que a antena a 15 metros. No

entanto, o desvio padrão do erro (ESD) é ligeiramente superior na antena colocada a 23 metros.

## 4.5 Barragem Belver

Recuando uns quilómetros, e avaliando a zona referente à primeira estação base analisada na sequência quilométrica da linha da Beira Baixa, verifica-se uma grande disparidade do modelo *Okumura-Hata* face à predição pelo ITM, assim como às medidas reais. A figura 4.9 representa as curvas de nível de sinal rádio obtidas por ambos os modelos teóricos, assim como as medidas reais.

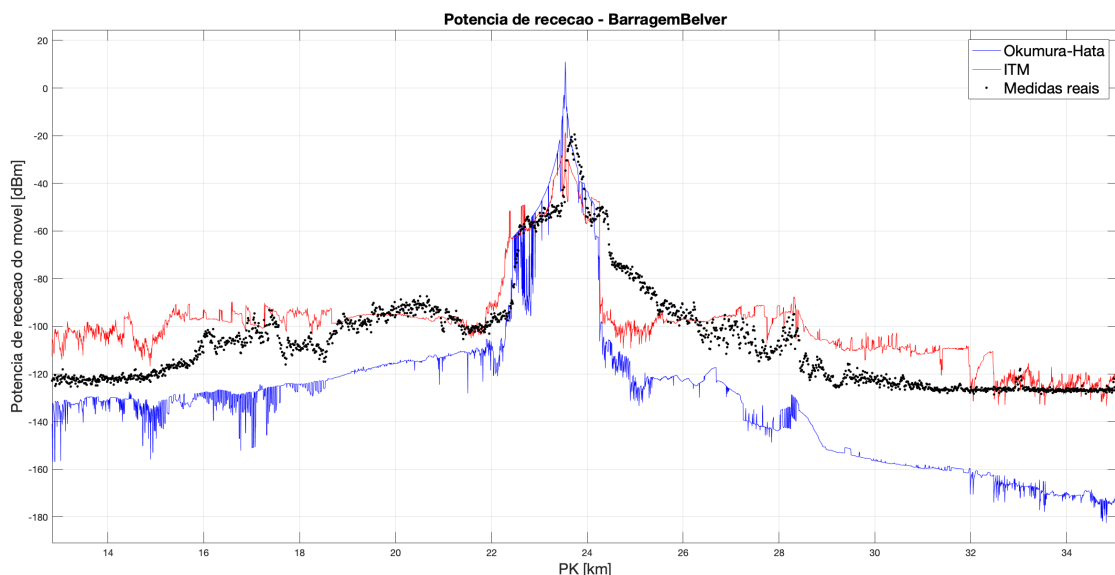


Figura 4.9: Predição de cobertura móvel da estação base BarragemBelver.

A incapacidade de predição do *Okumura-Hata* é evidente pelos valores de erro presentes na tabela 4.5, muito superiores aos do ITM. Já este último, apesar de não ser com o maior rigor desejado, consegue acompanhar com alguma regularidade a curva relativa às medidas reais, o que se reflete num erro médio absoluto significativamente inferior de menos 13 dB.

BarragemBelver	ME	RMSE	ESD
Irregular Terrain Model	11.74	14.36	8.27
Okumura-Hata	24.73	27.55	12.14

Tabela 4.5: Estatísticas de erro da estação base BarragemBelver.

Como se pode observar pelas curvas apresentadas, o ITM acompanha com relativa precisão as variações de atenuação ao longo do troço entre a estação base e o PK 18, sendo que a partir desta distância já revela alguma dificuldade, principalmente pela influência da estrutura montanhosa presente na figura 4.10. Esta estrutura também é responsável pelo aumento abrupto de atenuação que provoca uma queda do nível de sinal, a cerca de um quilómetro e meio da estação base. Por este motivo, até ao alcance da linha a vermelho representada na figura, a atenuação no percurso aumenta gradualmente, no entanto, ultrapassando este limite, a elevação da montanha é consideravelmente superior (linha amarela) e mais extensa, o que provoca o referido decaimento súbito de sinal.



Figura 4.10: Estrutura montanhosa na zona de cobertura da estação base Barragem Belver.

Averiguando no sentido de propagação oposto da estação base, percebe-se que a predição do ITM também é relativamente próxima das medidas reais, à exceção de no trajeto entre os PK 24.3 e 25.5. Até cerca de 600 metros da estação base situada no PK 23.73 (linha vermelha na figura 4.11), o aumento de atenuação calculado pelos modelos é próximo às medidas reais. No entanto, a partir desta distância, verifica-se um fenómeno muito semelhante ao da estação base Barragem Fratel (ainda que numa menor extensão), onde os modelos prevêem uma queda abrupta do nível de sinal, enquanto que, na realidade, isto não se verifica. Curiosamente, ambas as zonas estão, ainda mais que os restantes trajetos analisados, circundados por água, uma vez que se tratam de barragens. Este facto pode, mais uma vez, apoiar a suspeita de ocorrer algum tipo de propagação guiada ou reflexão na água que beneficie a propagação do sinal, mas que não é contabilizada pelos modelos teóricos.



Figura 4.11: Obstáculo junto à estação base Barragem Belver.

Esta incoerência inexplicável pelos recursos a que se tem acesso prolonga-se até ao PK 24.5, onde o nível de sinal predito e as medidas reais voltam a ser bastante próximas, sobretudo pelas estimativas do ITM. É evidente que os modelos de propagação contabilizam o impacto na atenuação do sinal provocado pelo obstáculo visível na figura 4.11, através da qual se pode observar que este obstrui a ligação estabelecida com um terminal móvel que se localize para lá do limite representado pela linha vermelha, como é o caso do trajeto desenhado pela linha amarela.

## 4.6 Belver

A zona de cobertura da estação base Belver mostrou-se especialmente desafiante para predição do nível de sinal por parte dos modelos, não pela incoerência de resultados no geral, mas sim pelas variações significativas de atenuação que ambos os métodos revelaram. Na figura 4.12 podem-se observar as três curvas, duas delas relativas ao ITM e *Okumura-Hata* e a terceira representativa das medidas reais.

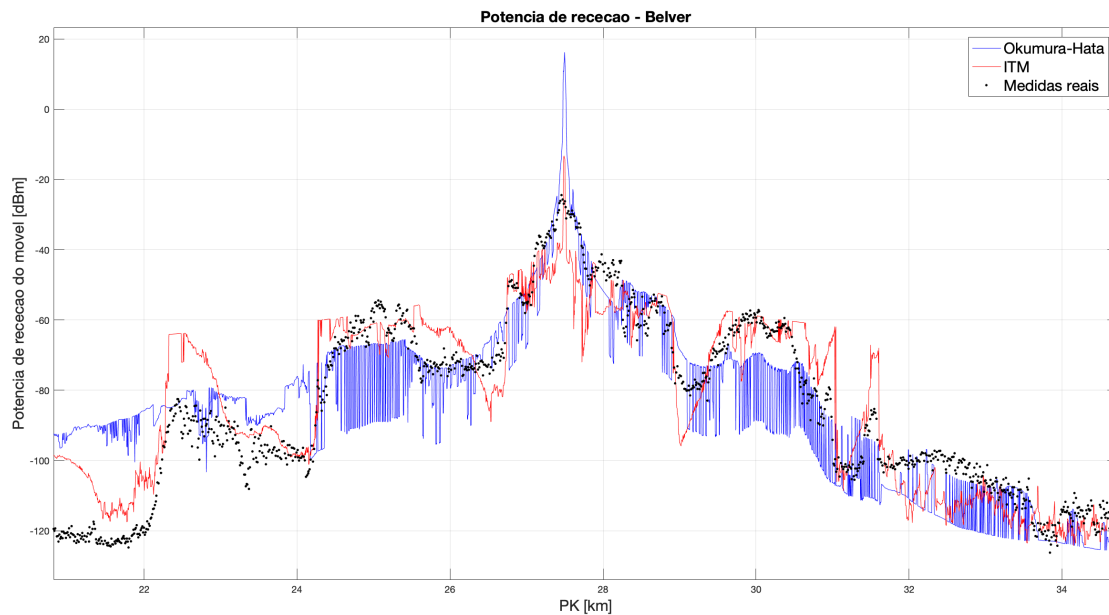


Figura 4.12: Predição de cobertura móvel da estação base Belver.

Como se pode observar, até cerca de 4 quilómetros em ambas as direções, os modelos apresentam um desempenho razoável na predição do nível de sinal, verificando-se, no entanto, alguns desvios com atenuações demasiado elevadas ou demasiado reduzidas. No caso específico do *Okumura-Hata*, existem zonas em que o modelo calcula variações sucessivas de pico a pico, provocando grandes desníveis face às medidas reais. Já o ITM tende a acompanhar melhor a curva das medidas reais, exagerando, no entanto, alguns valores de atenuação calculados.

Com isto, e através dos valores presentes na tabela 4.6, percebe-se que ambos os modelos tiveram alguma dificuldade a prever o nível de sinal, expressando valores de erro médio absoluto muito semelhantes, a rondar os 13.8 dB. No entanto, e apesar das variações bruscas que a sua curva mostra, o *Okumura-Hata* apresenta um valor de desvio padrão de erro 8.7 dB, ou seja, 0.6 dB inferior ao ITM. Em todos os casos analisados, esta estação base é a única em que o *Okumura-Hata* se aproxima dos valores de erro do ITM, sendo que em todas as outras este último apresenta valores de erro, pelo menos, 3 dB inferiores.

Belver	ME	RMSE	ESD
Irregular Terrain Model	13.72	16.63	9.39
Okumura-Hata	13.80	16.34	8.76

Tabela 4.6: Estatísticas de erro da estação base Belver.

Começando por analisar na direção decrescente da ordem quilométrica da linha,

consegue perceber-se que o ITM acompanha melhor a curva das medidas reais até ao PK 26.7, a cerca de 750 metros da estação base. Neste ponto (linha vermelha), ocorre um desvio muito grande do sinal, havendo um sobredimensionamento da atenuação até ao PK 26.3 (linha amarela). Na figura 4.13 pode-se observar o obstáculo que promove este aumento significativo de atenuação segundo o ITM, mas que, porém, não se verifica na realidade. O *Okumura-Hata* revela-se mais capaz de contabilizar a difração neste obstáculo, calculando valores próximos às medidas reais.

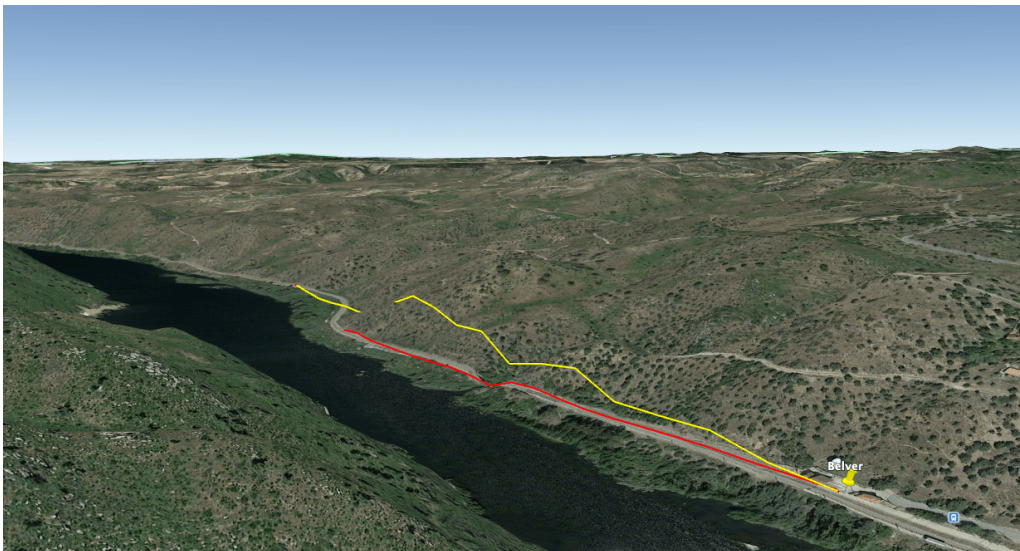


Figura 4.13: Obstáculo junto à estação base Belver.

Seguidamente, no PK 26.3, o ITM apresenta um aumento considerável do nível de sinal até ao PK 25.5, a partir do qual acompanha com relativa precisão as medidas reais durante alguns quilómetros. Na figura 4.14 pode-se observar o mesmo obstáculo mencionado em cima e que, mais uma vez, apesar de num troço diferente da linha, dificulta a capacidade de predição do modelo teórico. Nesta zona em específico, ocorre um efeito contrário ao acima indicado, havendo um subdimensionamento da atenuação.

O obstáculo em causa tapa parte da linha ferroviária (a curvatura entre os percursos das linhas vermelha e amarela ilustradas), contudo o ITM calcula uma atenuação inferior à que realmente se verifica, refletindo-se no nível de sinal incoerente. Aqui, mesmo o *Okumura-Hata* revela bastante dificuldade, apresentando as variações abruptas que se observam na figura 4.12.

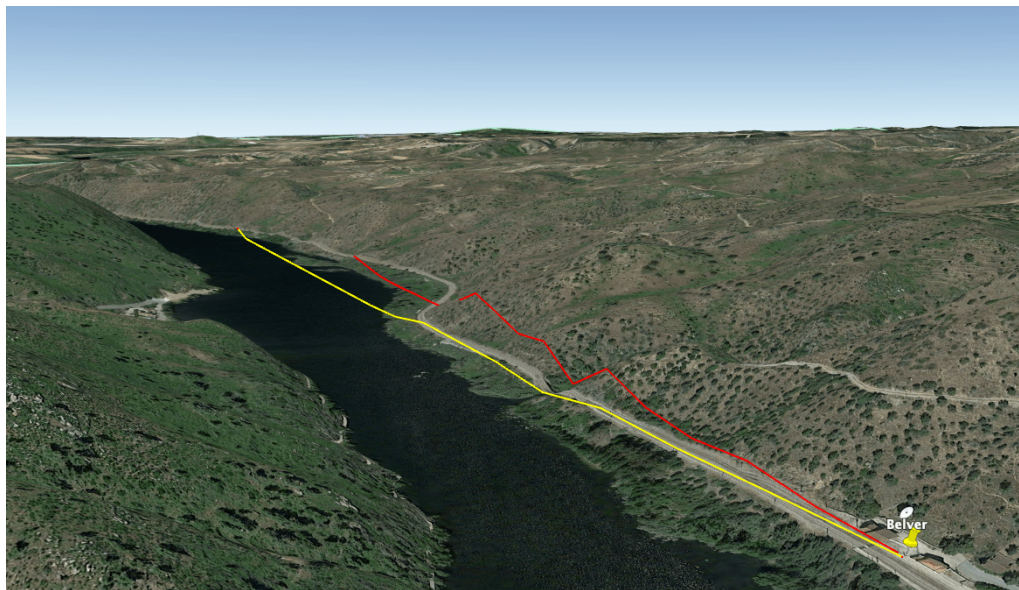


Figura 4.14: Obstrução na estação base Belver.

É importante mencionar que, além do obstáculo mais significativo mencionado, o sinal tem de atravessar vários altos e baixos no terreno e com adição de vegetação, como se pode observar pelo contorno da linha vermelha ilustrada na figura 4.14. Esta é a causa de ambos os modelos mostrarem um desempenho abaixo das expectativas, uma vez que se torna difícil para os seus algoritmos contabilizar tantas e tão evidenciadas irregularidades no terreno.

A uma distância já considerável face às que se estão a analisar neste estudo, e ultrapassando a estação base seguinte, no PK 23, a 4.45 quilómetros da estação base Belver, o ITM apresenta outro grande aumento do sinal até ao PK 22. Nesta zona, as medidas revelam uma maior atenuação, da mesma maneira que o *Okumura-Hata* consegue calcular este nível de sinal.

Pela figura 4.15 consegue-se perceber a extensão deste percurso que intersesta inúmeros desníveis no terreno e uma área abundante de água. O troço mencionado encontra-se entre a linha a vermelho (PK 23) e a linha a amarelo (PK 22) e, muito provavelmente, o obstáculo onde se encontra o pico da linha a vermelho é a causa desta obstrução no sinal que se verifica nas medidas reais e que, mais uma vez, o ITM fraqueja em estimar. Verifica-se, portanto, que o *Okumura-Hata* tem maior capacidade para predição deste tipo de obstáculos.

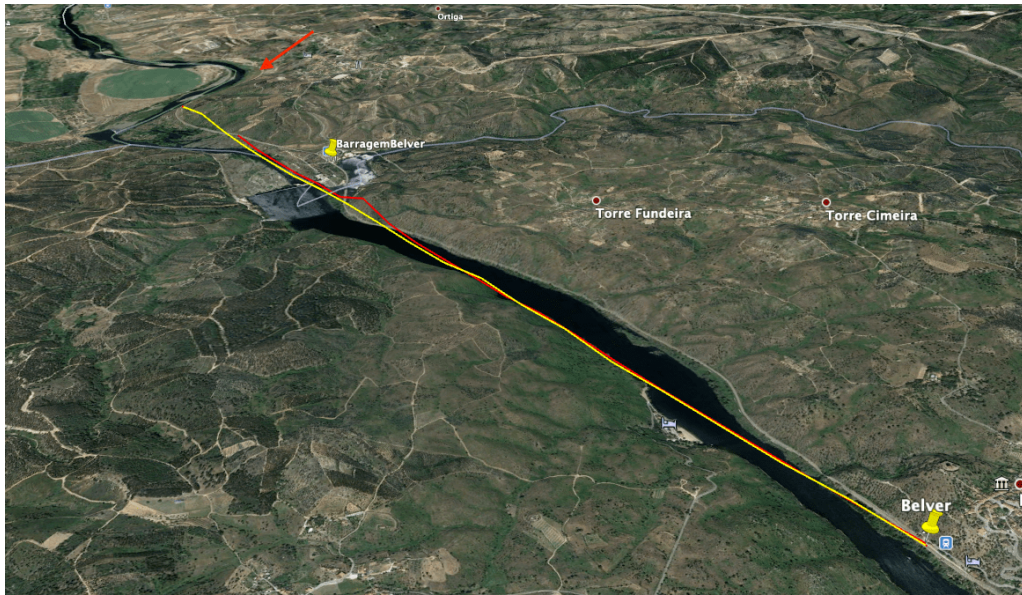


Figura 4.15: Zona de extensa propagação do sinal da estação base Belver.

A partir desta distância ambos os modelos ficam relativamente desviados das medidas, conseguindo, ainda assim, o ITM acompanhar melhor o nível de sinal real, como se pode verificar a partir do PK 22. A curvatura da linha férrea (identificada pela seta a vermelho na figura 4.15) e a introdução de mais irregularidades no terreno provocam esta dificuldade de predição por parte dos modelos.

Transitando para a direção oposta da linha, constata-se desníveis consideráveis na atenuação estimada pelo ITM até cerca de 300 metros da estação base (PK 27.8), causados pela morfologia do terreno identificada pela seta na figura 4.16. Nesta zona, apesar de pouco perceptível pela imagem, o raio direto da ligação é obstruído pelo terreno, o que provoca o aumento de atenuação calculada. Quando perante este tipo de obstruções e principalmente a curtas distâncias da estação base, e como já comprovado anteriormente por diversas situações semelhantes, o ITM não apresenta o melhor desempenho esperado.



Figura 4.16: Propagação do sinal por uma extensão de água junto à estação base Belver.

Até ao PK 29, e mesmo com um trajeto mais desafogado, as medidas apresentam algumas variações do nível de sinal, muito provavelmente provocadas pelo impacto do meio aquoso na ligação. Como se pode observar na figura 4.16, grande parte desta ligação é estabelecida por cima de uma superfície de água, o que pode deteriorar o sinal transmitido.

No PK 29, a 1.45 quilómetros da estação base, ocorre um aumento da atenuação estimada pelo ITM, provocado, novamente, por uma curvatura na linha ferroviária. Isto faz com que, em parte do percurso subsequente, o obstáculo montanhoso junto ao final da linha amarela (figura 4.16) oculte a propagação direta do sinal, resultando no mencionado aumento de atenuação calculado pelo modelo. Este crescimento de atenuação evidencia-se, também, nas medidas, embora que numa escala menor.

Após o PK 29.3, a estimacão do nível de sinal por parte do ITM regulariza-se face às medidas e, apesar de se verificarem alguns valores mais acentuados, regra geral este modelo é capaz de acompanhar com grande rigor a curva das medidas. A título de exemplo, podem-se constatar os picos de atenuação nos PK 31 e 31.5, que, mesmo estando refletidos nas medidas, se encontram com valores exagerados segundo a predicção do ITM.

Estes valores são provocados pelos sucessivos obstáculos montanhosos que se

deparam com a ligação da estação base ao móvel, como é visível no exemplo da figura 4.17. Perante tais irregularidades no percurso, considera-se que o ITM tem um desempenho bastante superior ao *Okumura-Hata*, uma vez que este último estima valores muito dispersos e com diferenças sucessivas de 20 dB.



Figura 4.17: Obstruções no percurso da estação base Belver.

Perante esta e outras provas já mencionadas, acredita-se que a versão do ITM implementada tenha uma capacidade de predição superior à do *Okumura-Hata* no que toca a percursos com um grande número de obstáculos e de elevações consideráveis.

## 4.7 Barca Amieira

De seguida, encontra-se a estação base Barca Amieira, situada no PK 41.08. Na figura 4.18 podem-se observar as curvas representativas das predições de ambos os modelos e as medidas. À semelhança da zona de cobertura da estação base Barragem Belver, as estimativas do *Okumura-Hata* são bastante afastadas dos valores reais, apresentando um desvio considerável. Já a predição pelo ITM acompanha de forma regular a curva das medidas. Estes factos são evidentes pelas estatísticas de erro expressas na tabela 4.7, onde o ITM apresenta um valor de erro absoluto 12.3 dB inferior ao *Okumura-Hata*, assim como um desvio padrão de erro de 5.4 dB face a 8.31 dB.

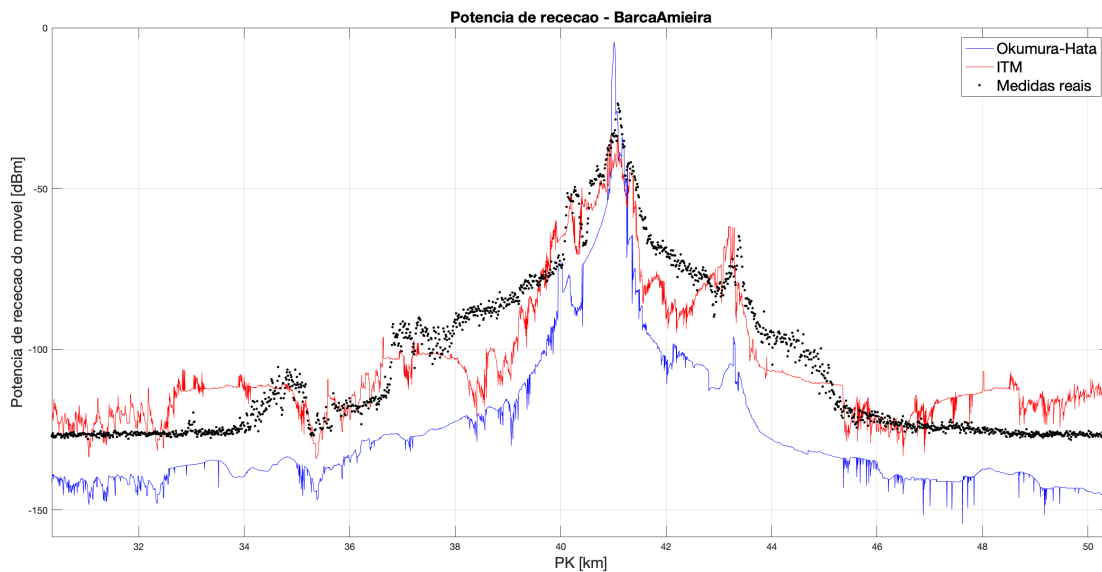


Figura 4.18: Predição de cobertura móvel da estação base BarcaAmieira.

BarcaAmieira	ME	RMSE	ESD
Irregular Terrain Model	8.47	10.06	5.42
Okumura-Hata	20.8	22.40	8.31

Tabela 4.7: Estatísticas de erro da estação base BarcaAmieira.

No entanto, apesar de os resultados serem relativamente próximos às medidas, observando em detalhe os valores simulados, existem alguns aspetos importantes a destacar. Primeiramente, analisando no sentido decrescente da ordem quilométrica da linha, observa-se uma descida significativa do nível de sinal predito a cerca de 1.5 quilómetros da estação base, no PK 39.5, voltando a regularizar para valores próximos das medidas a 3.3 quilómetros, no PK 37.7. Na figura 4.19, a linha amarela ilustrada representa este alcance de 1.5 quilómetros até onde não se verifica a curvatura da linha ferroviária que, ao contornar uma estrutura montanhosa, é responsável pela obstrução de sinal, provocando este aumento de atenuação estimada pelos modelos.



Figura 4.19: Curva no percurso de propagação da estação base BarcaAmieira.

Mais uma vez, os modelos teóricos contabilizam esta perda de sinal, enquanto que na realidade a mesma não se verifica, muito possivelmente por fenómenos de difração ou propagação guiada, como já discutidos anteriormente.

Ainda nesta direção, a cerca de 6 quilómetros da estação base, no PK 35, observa-se um aumento do nível de sinal, tanto nas medidas, como nas estimativas obtidas pelo ITM. Como se pode observar na representação da linha amarela na figura 4.20, a partir desta distância e durante várias centenas de metros, o sinal propaga-se muito mais em linha reta, não estando limitado por curvaturas da linha ferroviária, apenas pelo terreno que se encontra entre a estação base o móvel.

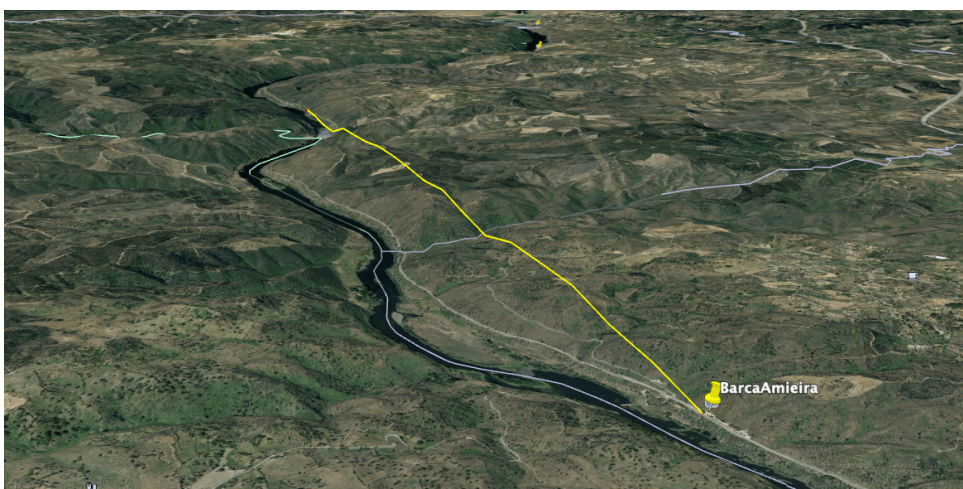


Figura 4.20: Zona de propagação mais direta na estação base BarcaAmieira.

Apesar de o ITM estimar com sucesso esta redução de atenuação a partir do PK

35, contabiliza-a durante cerca de 3 quilómetros, enquanto que na realidade o sinal decai após cerca de 1 quilómetro.

Analisando, agora, na direção oposta da estação base, observa-se um decréscimo a pique do nível de sinal predito pelos modelos a cerca de 300 metros do ponto de emissão, voltando a regularizar face às medidas no PK 42.8. Este alcance de 300 metros está representado pela linha a vermelho da figura 4.21, onde, novamente, ocorre obstrução da propagação do sinal provocada pela morfologia do terreno. Desta forma, e contabilizando esta zona oculta, os modelos calculam uma grande atenuação do sinal que, na realidade, não se verifica, possivelmente pelos mesmos motivos discutidos anteriormente.



Figura 4.21: Zona de obstrução junto à estação base BarcaAmieira.

A partir de 1.7 quilómetros (linha amarela da figura 4.21), onde o móvel já está visível pela estação base, o cálculo da atenuação normaliza-se.

Logo após este ponto, a 2.3 quilómetros da estação base, no PK 43.4, existe um troço de visibilidade máxima com mínima obstrução, representado pela linha amarela da figura 4.22. Neste local, o nível de sinal tem uma melhoria de quase 20 dB, começando, no entanto, a decrescer progressivamente à medida que se avança na linha ferroviária, causado pela obstrução da montanha assinalada com uma seta em ambas as figuras 4.21 e 4.22.

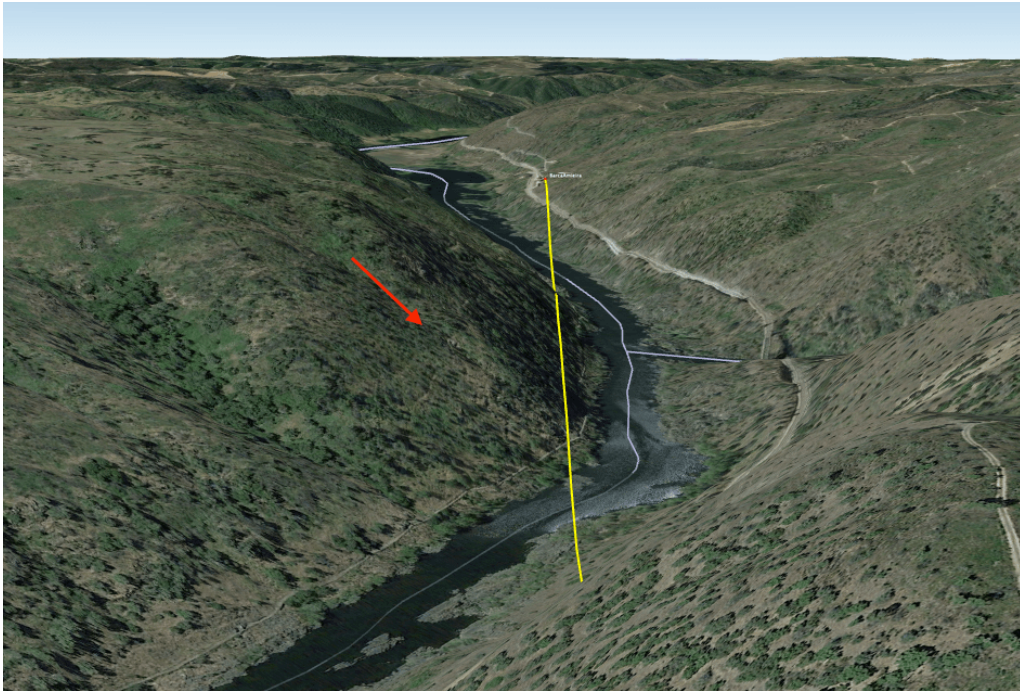


Figura 4.22: Zona de grande visibilidade na estação base BarcaAmieira.

## 4.8 Fratel

A estação base posterior é a Fratel1 que se revelou ser das zonas de cobertura em que o ITM apresentou melhor desempenho. Situada no PK 56.76, nesta área os valores de predição são muito contíguos às medidas, mesmo sendo uma extensão da linha com algumas curvaturas e terreno irregular de elevações consideráveis.

Como se pode observar na figura 4.23, a curva do ITM, a vermelho, acompanha com bastante boa precisão as medidas, a preto. Já o *Okumura-Hata* apresenta valores bastante mais díspares. A comparação da capacidade de predição de ambos os modelos teóricos também se pode comprovar pelas estatísticas de erro da tabela 4.8, onde o ITM apresenta um dos menores valores de erro médio absoluto observados no estudo realizado, cerca de metade do *Okumura-Hata*, assim como o menor desvio padrão de erro alcançado, com um valor muito favorável de 4.5 dB.

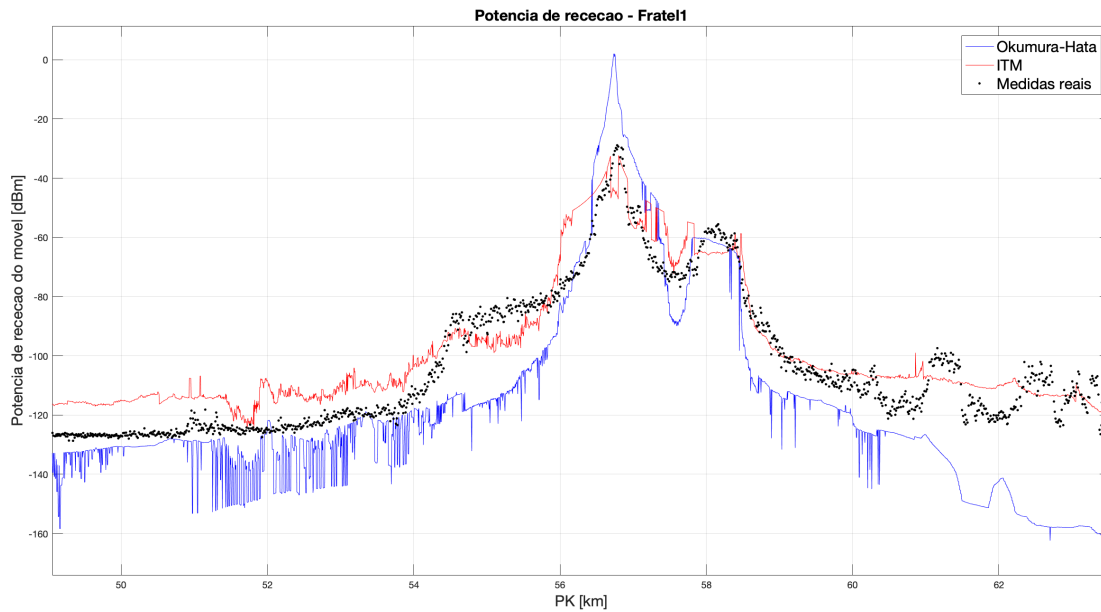


Figura 4.23: Predição de cobertura móvel da estação base Fratell1.

Fratell	ME	RMSE	ESD
Irregular Terrain Model	8.09	9.26	4.49
Okumura-Hata	16.61	21.43	13.29

Tabela 4.8: Estatísticas de erro da estação base Fratell1.

Começando por analisar à esquerda da estação base (representada pelo maior valor de nível de sinal na figura 4.23), percebe-se que o ITM, até ao PK 56, a 800 metros da estação base, contabiliza uma atenuação significativamente menor que a que realmente se verifica. Nesta zona, visível desde o ponto mais próximo da estação base até ao alcance da linha amarela da figura 4.24, o *Okumura-Hata* consegue calcular com maior rigor o nível de sinal, muito possivelmente por causa do impacto da vegetação e pela presença de algumas casas neste percurso, uma vez que o ITM não tem nenhum fator corretivo para contabilizar estes elementos.

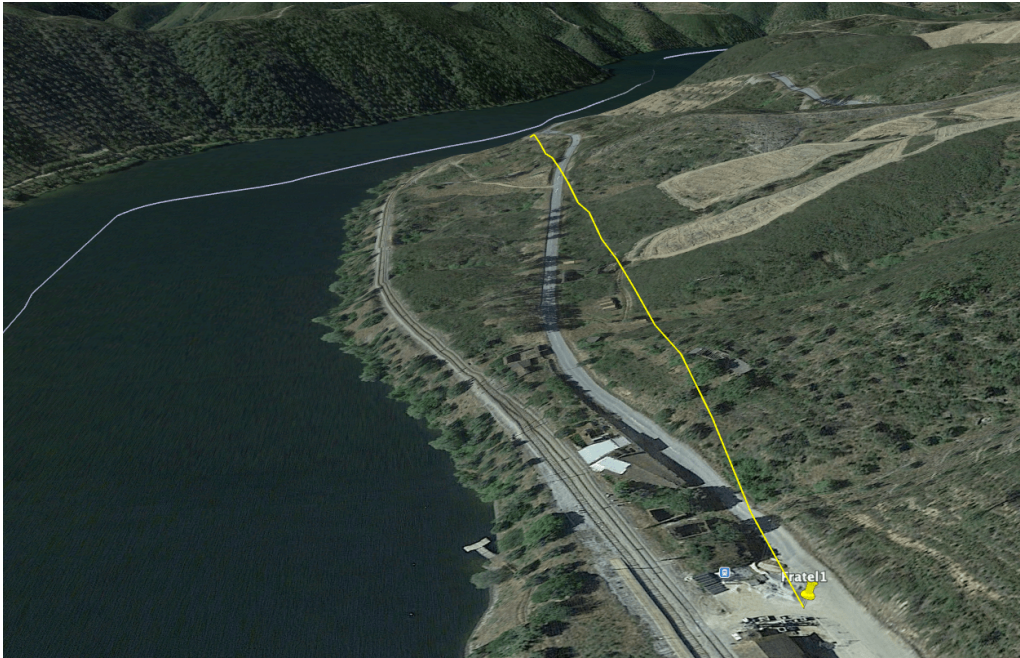


Figura 4.24: Ligação junto à estação base Fratell1.

Após o PK 56, o ITM revela um desempenho muito positivo, ao contrário do *Okumura-Hata* que exibe variações muito acentuadas do nível de sinal, com diferenças de atenuação entre 20 a 30 dB em poucos metros.



Figura 4.25: Zona com consideráveis irregularidades no terreno em ligações da estação base Fratell1.

Como já comprovado pelas simulações efetuadas na zona da estação base Belver, apesar de numa escala inferior, o ITM evidencia ser um modelo bastante fiável para predição de cobertura em terrenos irregulares, uma vez que tem a capacidade de contabilizar inúmeros desníveis e obstáculos de grande dimensão, como é o caso das montanhas visíveis nos percursos assinalados pelas linhas amarela e vermelha na figura 4.25.

Averiguando agora a direção oposta à estação base, constata-se que o ITM, de forma geral, também acompanha com boa precisão as medidas. No entanto, até cerca de 800 metros da estação base, revelam-se algumas variações. Precisamente no seguimento desta distância, no PK 57.6, o *Okumura-Hata* exhibe um aumento de atenuação considerável provocado pela elevação de terreno que obstrui a ligação, identificada pela linha amarela na figura 4.26. Como já foi verificado em análise às estações base anteriores, o *Okumura-Hata* tende a sobredimensionar os valores de atenuação quando na presença de uma zona oculta provocada pelo terreno.



Figura 4.26: Obstrução de terreno junto à estação base Fratel1.

A partir do PK 58.5, a 2 quilómetros da estação base, o *Okumura-Hata* regista um aumento de atenuação que se mantém constante ao longo da progressão da linha ferroviária, assumindo um desvio de 15 a 40 dB face às medidas reais. Já o ITM consegue acompanhar os valores reais com algum rigor. Este facto, mais uma vez, suporta a sua capacidade para predição em terrenos irregulares, ao contrário do *Okumura-Hata*. Dois exemplos de ligações com obstruções significativas na zona analisada estão presentes na figura 4.27, ilustrados pelas linhas vermelha e

amarela.

Além destes percursos assinalados, as medidas ainda registam dois picos de maior atenuação (nos PK 61 e 62.3) que o ITM não assinala, uma vez que este assume valores mais constantes ao longo do resto da linha ferroviária. No entanto, este incremento de atenuação provocado, muito possivelmente, por obstáculos montanhosos de grande dimensão, já se encontra a mais de 5 quilómetros da estação base, transpondo a zona de cobertura da estação base seguinte.

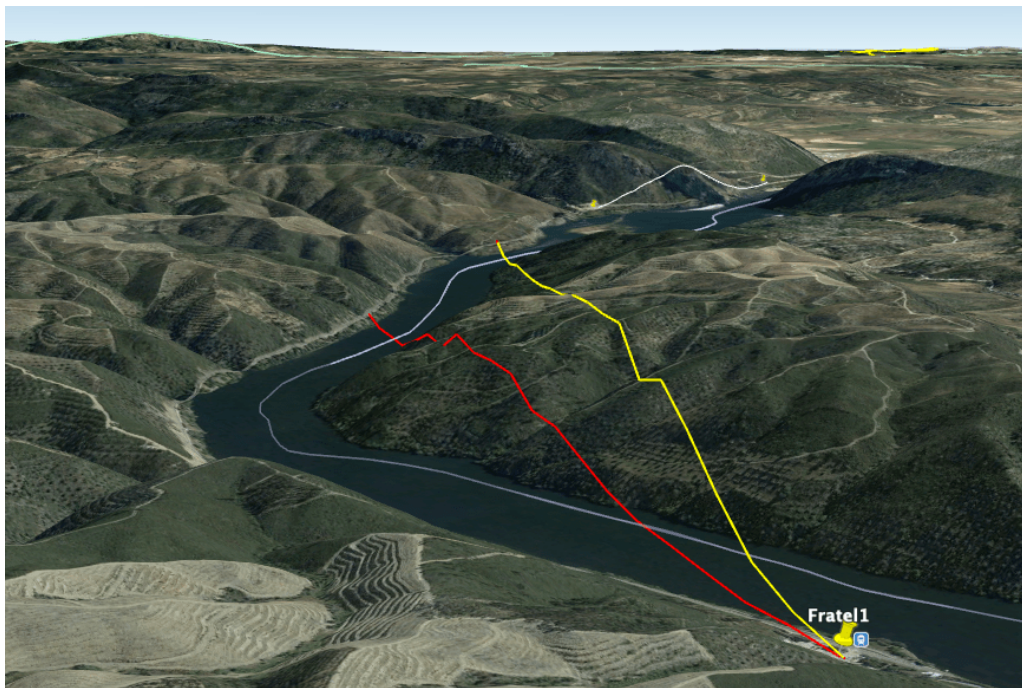


Figura 4.27: Zona de consideráveis irregularidades no terreno em ligações da estação base Fratel1.

## 4.9 Ródão - 1

A estação base Rodao1 localiza-se no PK 61.08 com a particularidade de estar colocada no seguimento de uma grande montanha. Esta situação verifica-se tanto neste emissor, como no seguinte, Rodao2, que se encontra entre duas estruturas montanhosas de elevada dimensão, conforme se pode observar na figura 4.28.



Figura 4.28: Posição das estações base Rodao1 e Rodao2.

Esta característica impossibilita a propagação do sinal no sentido da obstrução, decaindo para valores de nível de sinal abaixo do necessário para realizar uma comunicação fiável (-98 dBm no caso do GSM-R). Sendo assim, apenas se analisou a predição de sinal no sentido oposto, que se revelou ser bastante promissora por parte do ITM. Na análise da área desta estação base, o ITM registou o menor valor obtido de erro médio absoluto de 7.15 dB, assim como um dos menores valores de desvio padrão de erro de 5.5 dB.

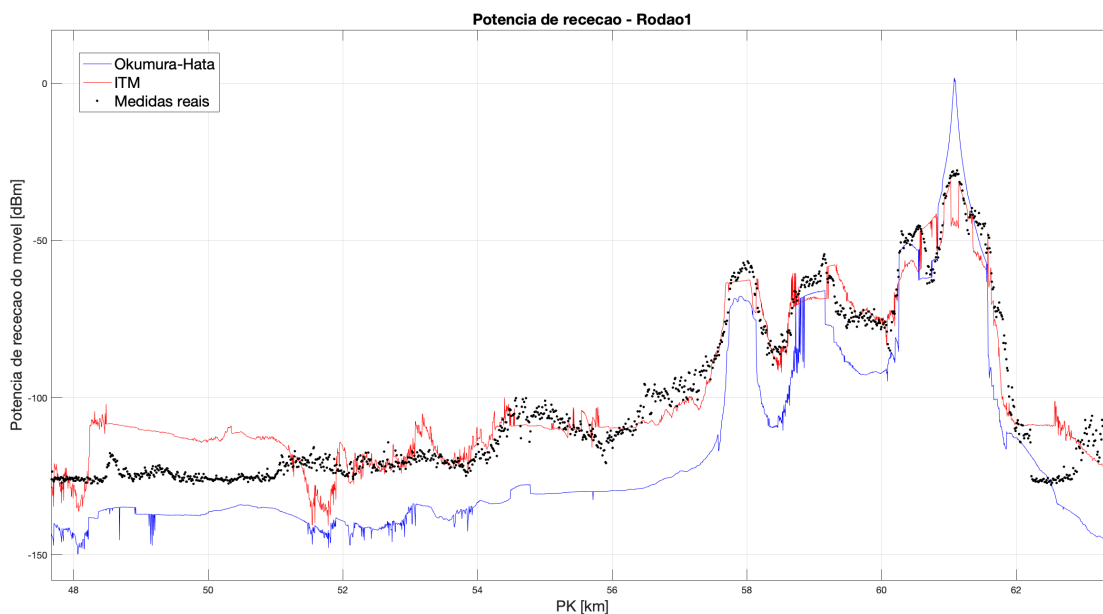


Figura 4.29: Predição de cobertura móvel da estação base Rodao1.

Observando a figura 4.29, pode-se verificar esta precisão da estimação do nível de sinal por parte do ITM que se revela ser bastante próxima às medidas (mesmo numa área muito além da zona de cobertura da estação base), ao contrário do *Okumura-Hata* que se afasta de forma considerável, conforme expressam as estatísticas de erro da tabela 4.9.

Rodao1	ME	RMSE	ESD
Irregular Terrain Model	7.15	9.02	5.50
Okumura-Hata	16.57	18.31	7.80

Tabela 4.9: Estatísticas de erro da estação base Rodao1.

Analisando em detalhe a curva de predição dos modelos, identifica-se uma redução de atenuação por parte do ITM a 400 metros da estação base. Este fenómeno é semelhante ao descrito na figura 4.24 junto à estação base Fratell1, provocado pelo obstáculo que oculta a linha ferroviária, visível também neste percurso na figura 4.30. Como já comprovado anteriormente, neste tipo de situações e na presença de vegetação, o ITM revela alguma dificuldade, apresentando, geralmente, valores de atenuação entre 10 a 20 dB abaixo das medidas. Já o *Okumura-Hata* acompanha bem os valores das medidas, revelando uma boa capacidade de predição.

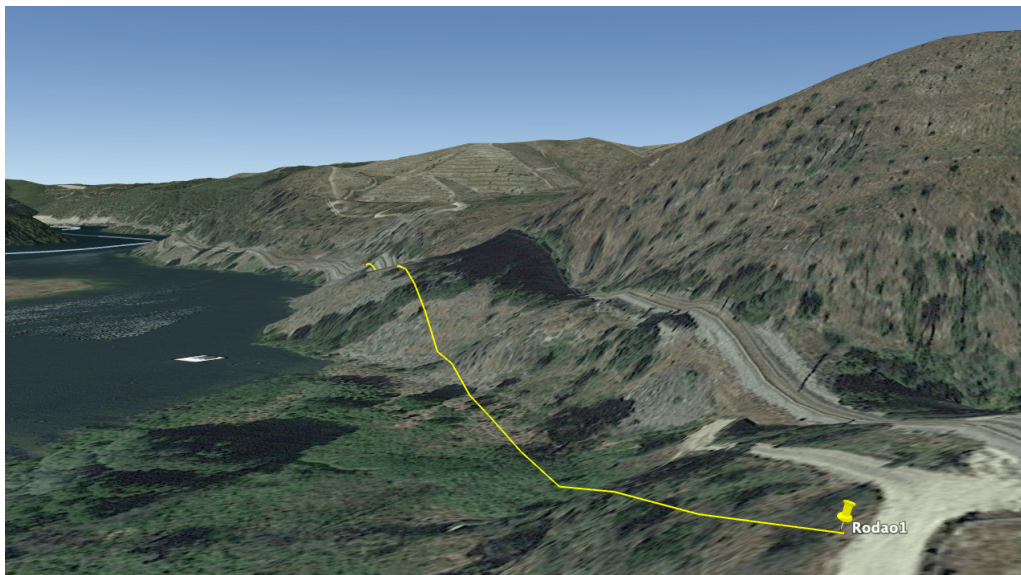


Figura 4.30: Obstrução junto à estação base Rodao1.

No PK 60.4, a 700 metros da estação base, o ITM calcula uma atenuação 10 dB

superior às medidas, enquanto que, mais uma vez, o *Okumura-Hata* as acompanha bem. Uma situação idêntica acontece na estação base BarcaAmieira (figura 4.19), onde a curvatura da linha e a presença de um obstáculo considerável no terreno faz com que o ITM assuma uma atenuação bastante superior à que realmente se regista. Neste caso em específico, pode-se visualizar a obstrução da linha pela figura 4.31, onde a seta identifica o monte no terreno responsável pela ocultação da linha férrea. No entanto, este fenómeno ocorre por uma distância curta, sendo que a capacidade de predição do ITM regulariza após cerca de 400 metros, assumindo valores bastante próximos às medidas.



Figura 4.31: Curvatura da linha ferroviária junto à estação base Rodao1.

A partir do PK 60.2, a 900 metros da estação base, até ao PK 59.2, o *Okumura-Hata* desce o nível de sinal relativamente às medidas e à predição do ITM em cerca de 20 dB. A mesma situação também ocorre posteriormente no PK 58.6. Como se pode observar na figura 4.32, logo de seguida à curvatura da linha férrea mencionada em cima, encontra-se o obstáculo que provoca este desnível na predição por parte do *Okumura-Hata* (ligações ilustradas pelas linhas a vermelho), sendo que o modelo apenas regulariza os valores após o sinal encontrar linha de vista, conforme ilustrado através da linha amarela.

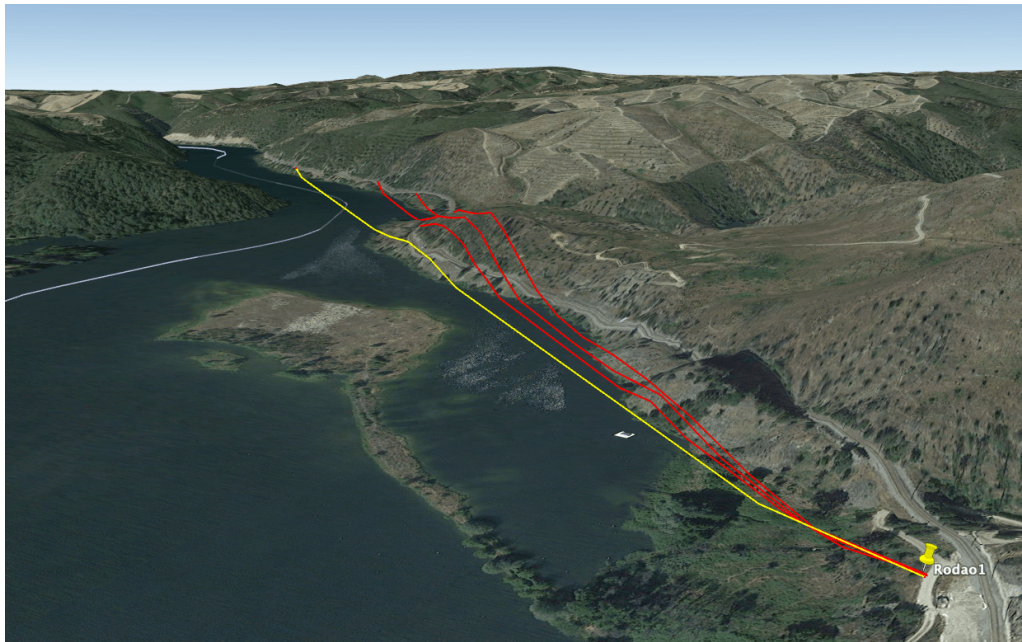


Figura 4.32: Obstáculo na zona de propagação da estação base Rodao1.

Como já se percebeu ser propenso, ao aparecer uma grande quantidade de obstáculos no percurso, o *Okumura-Hata* reduz significativamente o seu desempenho, não tendo capacidade para prever um nível de sinal fiável. Esta situação confirma-se novamente a partir do PK 57.7, a 3.4 quilómetros da estação base, onde este modelo apresenta níveis de atenuação 20 dB superiores às medidas e os mantém durante uma larga extensão.

Na figura 4.33 estão exemplificados, através das linhas vermelhas, alguns trajetos onde as irregularidades do terreno entre a estação base e um móvel são evidentes, tal como demonstrado anteriormente, por exemplo, na figura 4.25. Neste tipo de percursos, o ITM revela ser muito promissor, apresentando valores próximos às medidas, sendo esta a razão para um erro médio absoluto tão reduzido quanto o que se registou na análise desta estação base.

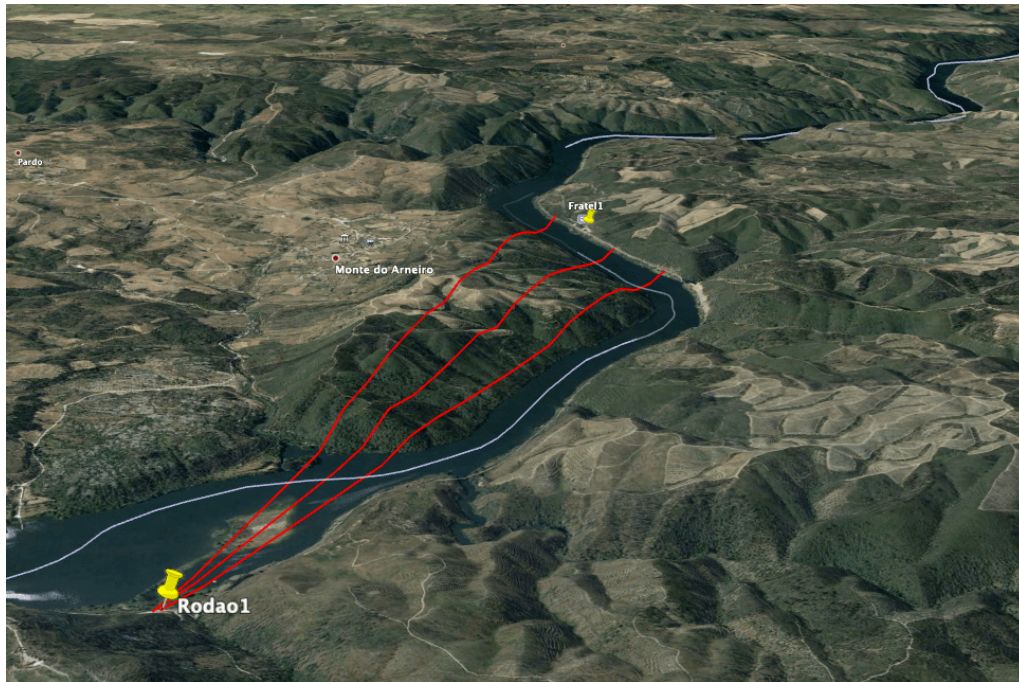


Figura 4.33: Percursos com grande quantidade de irregularidades no terreno - estação base Rodao1.

Como se pode observar na figura 4.33, as ligações exemplificadas já transpõem a zona de cobertura da estação base seguinte, a Fratel1. No entanto, é de realçar a boa capacidade do ITM para predição em distâncias superiores a 3 quilómetros e na presença de perfis de terreno bastante irregulares e com elevações consideráveis. Não sendo perfeito, este modelo apresenta algumas incoerências, como é o caso do intervalo entre os PK 51.2 e 48.3 (já entre 9.9 e 12.8 quilómetros da estação base), onde apresenta uma atenuação cerca de 10 dB inferior à que as medidas constataam. Tal como na emissão de sinal pela estação base Fratel1, onde se verifica este subdimensionamento de atenuação por parte do ITM nos PK 61 e 62.3, ambos os fenómenos são, muito provavelmente, provocados por um obstáculo de maior dimensão mal contabilizado.

## 4.10 Ródão - 2

Como já referido anteriormente, e visível na figura 4.28, a estação base Rodao2 foi colocada entre duas montanhas. Sem este emissor localizado neste ponto, não seria possível garantir a cobertura da linha férrea entre os dois obstáculos montanhosos de elevada dimensão.

Esta estação base situa-se no PK 62.17, a pouco mais de um quilómetro da Rodao1. Os trajetos analisados apenas se consideraram na direção oposta à Vila Velha de Ródão, uma vez que é neste género de percursos irregulares que se foca o presente estudo, sendo que na outra direção não existe predominância deste tipo de características.

Devido à presença da montanha no percurso entre as estações base, a capacidade de predição do ITM reduziu drasticamente, registando um aumento do erro médio absoluto de 4.6 dB relativamente aos mesmos percursos analisados pelo emissor Rodao1. O mesmo não se verificou no *Okumura-Hata* que, apesar de registar um valor superior ao do ITM, apresentou uma melhoria no erro médio absoluto de 1.8 dB. Desta forma, e como se pode comprovar pela figura 4.34, a curva de predição do ITM é significativamente mais distante das medidas que a curva que se obteve para a estação base Rodao1, presente em 4.29.

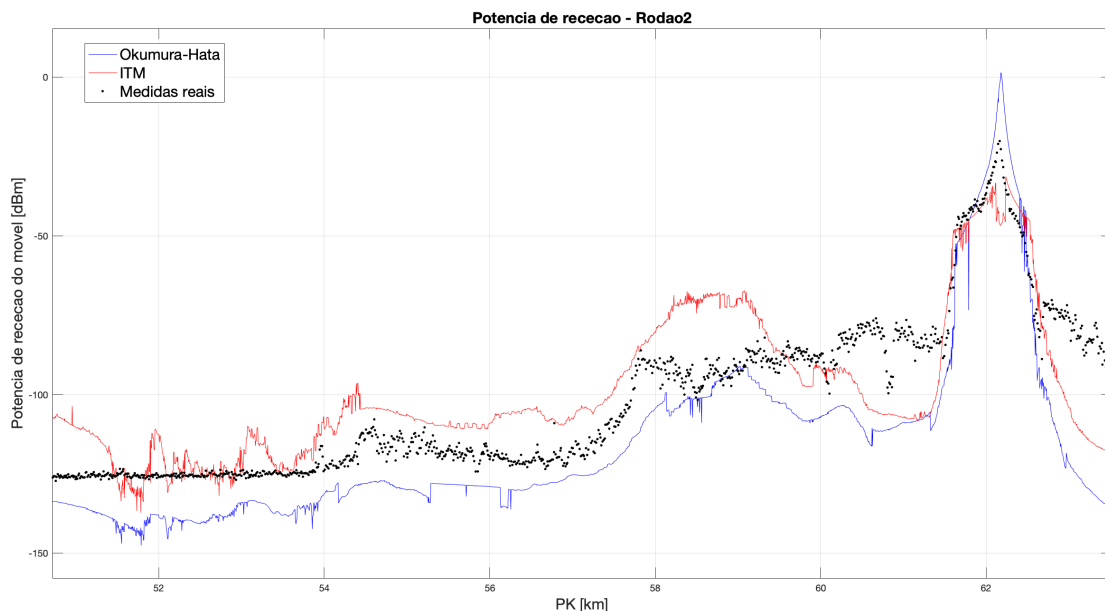


Figura 4.34: Predição de cobertura móvel da estação base Rodao2.

Rodao2	ME	RMSE	ESD
Irregular Terrain Model	11.77	14.32	8.15
Okumura-Hata	14.80	17.70	9.72

Tabela 4.10: Estatísticas de erro da estação base Rodao2.

Entre o PK 61.5, a 700 metros da estação base, e o PK 60.1, os modelos teóricos apresentam uma atenuação consideravelmente maior que as medidas, refletindo-se num nível de sinal cerca de 20 dB inferior. Esta ocorrência verifica-se numa

parte da linha ferroviária em forma de U que está oculta pela montanha, ilustrada pelo trajeto a tracejado da figura 4.35. Neste troço, ambos os modelos contabilizam uma atenuação superior à que realmente se verifica, comparavelmente a outras situações semelhantes que já se verificaram em que o sinal, muito provavelmente, beneficiou de algum tipo de fenómeno que favoreceu a sua transmissão.

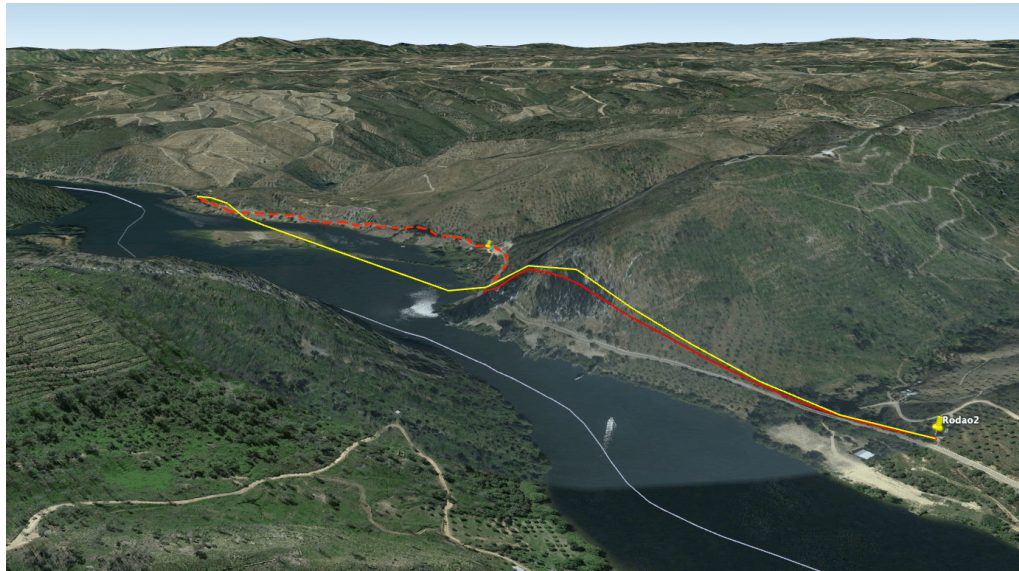


Figura 4.35: Parte da linha oculta em U junto à estação base Rodao2.

Entre os PK 59.3 e 57.8 (desde as linhas ilustradas a vermelho ao alcance da amarela na figura 4.36), o ITM tende a apresentar um nível de sinal superior às medidas, originado por uma atenuação significativamente inferior. Já o *Okumura-Hata* aproxima-se mais, ainda que de uma forma irregular. Desta forma, deduz-se que um obstáculo tão significativo quanto a montanha a 300 metros da estação base tem um impacto muito negativo no desempenho deste modelo, principalmente quando comparado à situação retratada na figura 4.33 (imagem do mesmo percurso, mas da estação base Rodao1), em que o ITM se revelou bastante promissor.

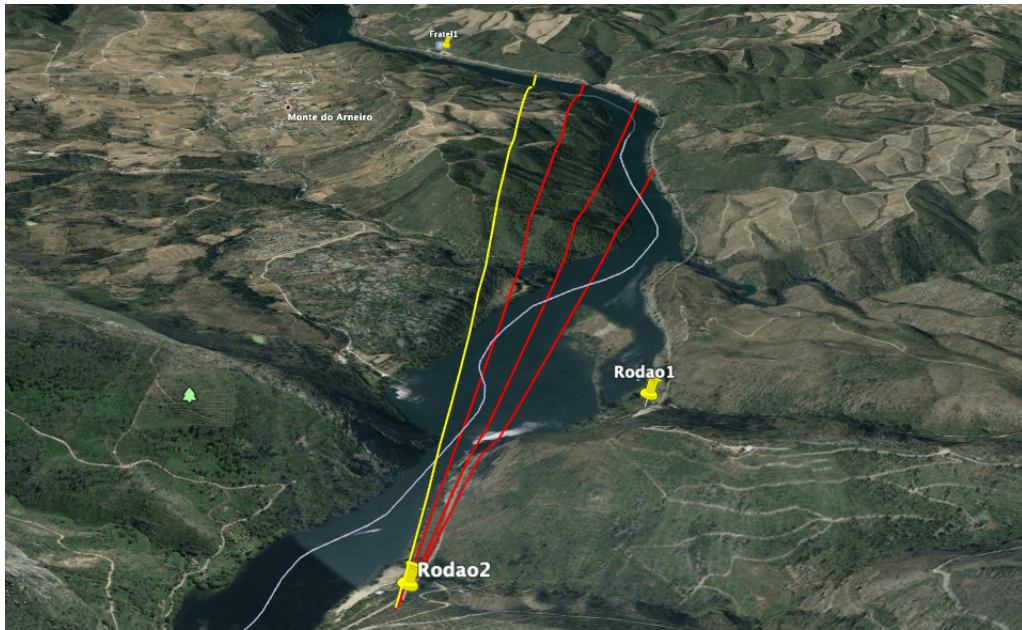


Figura 4.36: Transmissão em terreno irregular pela estação base Rodao2.

Do PK 57.8 ao 53.6, já a 8.5 quilómetros da estação base, o ITM acompanha a curva das medidas, embora com uma diferença superior de cerca de 10 dB face ao nível de sinal real. O *Okumura-Hata* apresenta este mesmo valor de diferença, mas em forma de decréscimo face às medidas, revelando-se mais conservativo. Resumindo, no mesmo tipo de percurso em que o ITM se mostrou bastante promissor na análise da estação base Rodao1 (ligação a longa distância e caracterizada por muitas irregularidades de terreno), desta vez revela um comportamento menos favorável quando na presença da montanha junto à estação base.

A partir do PK 53.9 em diante as medidas tendem a normalizar num valor inferior a -120 dBm, enquanto que o ITM apresenta variações crescentes no nível de sinal em cerca de 13 dB. Isto verifica-se, sobretudo, nos PK 53.2 e 52 e a partir do PK 51.5, já a mais de 10 quilómetros da estação base. O *Okumura-Hata* também aparenta estas variações, ainda que numa escala menor. Exemplos destes percursos estão ilustrados pelas linhas a vermelho e amarelo na figura 4.37.

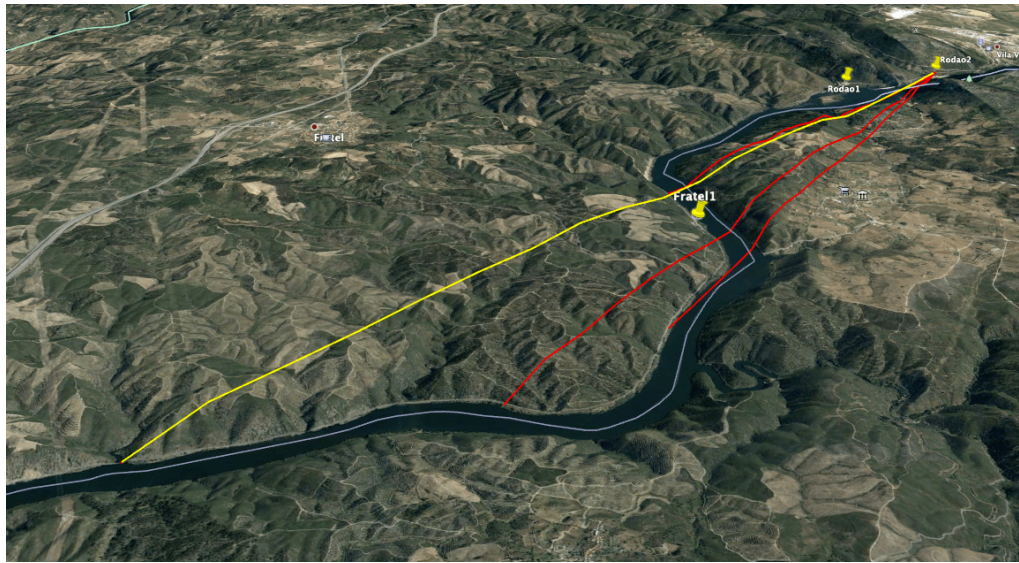


Figura 4.37: Transmissão a longa distância e em terreno irregular pela estação base Rodao2.

Apesar destas variações, o ITM aproxima-se com algum rigor dos valores reais, revelando uma clara vantagem face à predição do *Okumura-Hata*, que se afaste em cerca de 15 dB das medidas.

## 4.11 Sumário

Após analisadas as oito estações base nas quais este trabalho se foca, podem-se encontrar os resultados das estatísticas de erro do ITM resumidos na tabela 4.11, assim como no gráfico de barras da figura 4.38 para uma melhor perceção visual, onde é feita também uma comparação com o *Okumura-Hata*.

Estações base	ME	RMSE	ESD
BarragemFratel23m	9.74	12.45	7.74
BarragemFratel15m	10.49	12.69	7.15
BarragemBelver	11.74	14.36	8.27
Belver	13.72	16.63	9.39
BarcaAmieira	8.47	10.06	5.42
Fratel1	8.09	9.26	4.49
Rodao1	7.15	9.02	5.50
Rodao2	11.77	14.32	8.15

Tabela 4.11: Estatísticas de erro do ITM para todas as estações base analisadas.

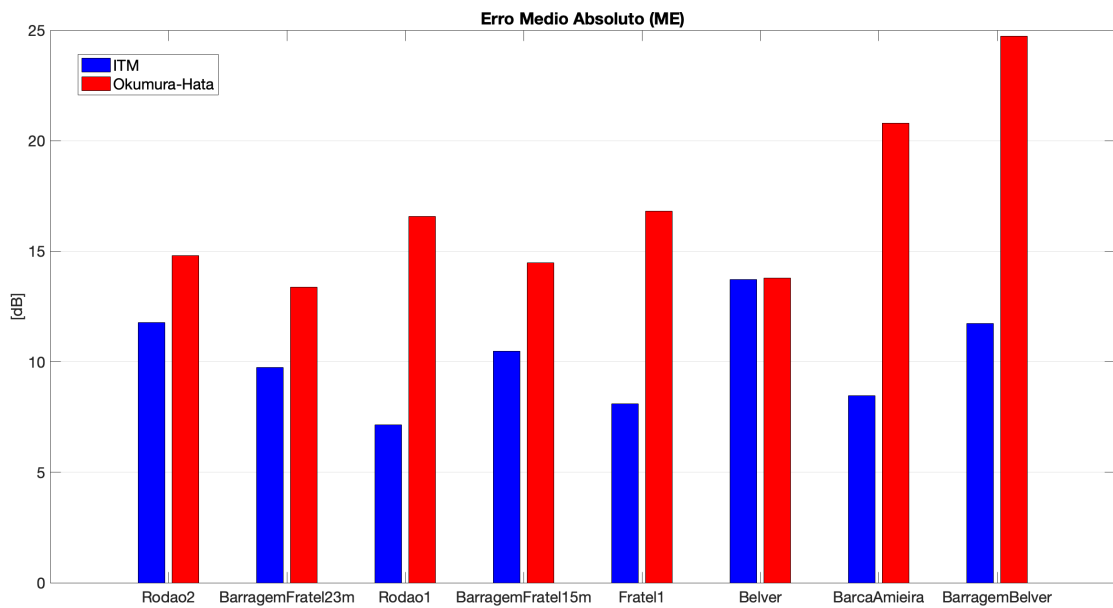


Figura 4.38: Estatísticas de erro do ITM e *Okumura-Hata* para todas as estações base analisadas.

As curvas relativas às medidas e à predição de ambos os modelos podem-se observar na figura 4.39, onde estão representadas as zonas de cobertura de todas as estações base avaliadas.

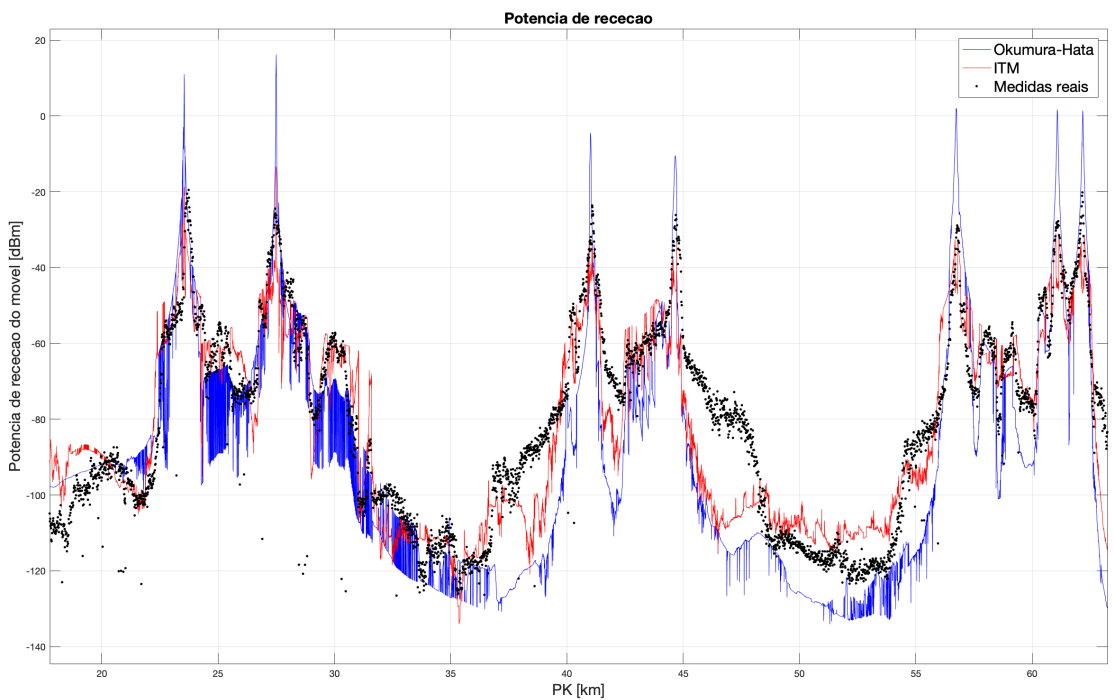


Figura 4.39: Medidas e predições de cobertura móvel de todas as estações base analisadas.

Como referido na análise desenvolvida ao longo deste capítulo, o desempenho do ITM na predição de cobertura móvel nas estações base Rodao1 e Fratel1 é notável, tendo-se registado os menores valores de erro nestas zonas.

Na área da estação base Rodao1, obteve-se tanto o menor erro médio absoluto, como a menor raiz do erro quadrático médio, com valores de 7.2 e 9 dB, respetivamente. Já o desvio padrão do erro, apesar de 1 dB acima do menor valor registado, também se revelou bastante baixo, de 5.5 dB. A curva de predição por parte do ITM e as medidas podem-se observar na figura 4.40, onde, de um ponto de vista visual, o ITM acompanha com grande sensibilidade os valores reais de nível de sinal.

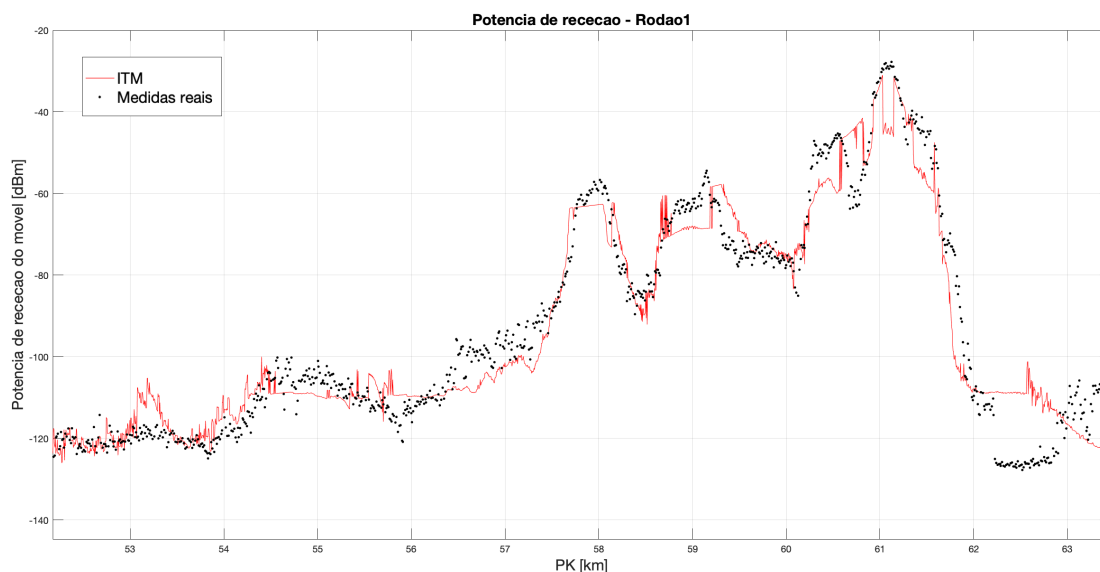


Figura 4.40: Comparação final entre a predição do ITM e as medidas na estação base Rodao1.

A estimativa do nível de sinal na estação base Fratel1 também se mostrou muito satisfatória, apresentando valores de erro médio absoluto e raiz do erro quadrático médio de 8 e 9.3 dB, respetivamente. O desvio padrão do erro nesta estação base foi o menor registado, de 4.5 dB. A curva comparativa desta predição, bem como a das medidas reais, encontram-se na figura 4.41.

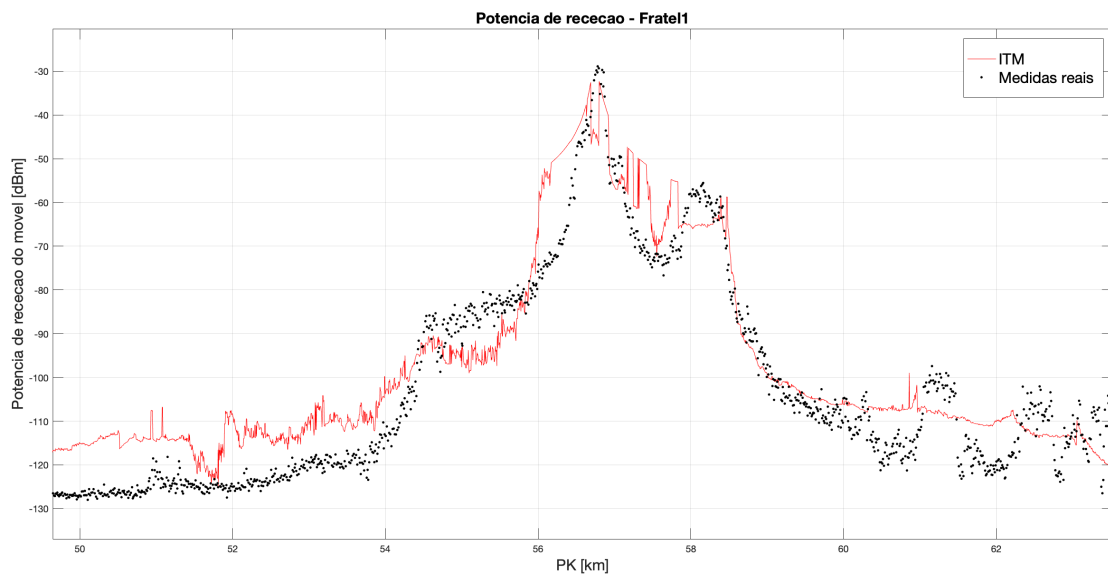


Figura 4.41: Comparação final entre a previsão do ITM e as medidas na estação base Fratel1.





# Conclusões

## 5.1 Trabalho desenvolvido

Este trabalho teve como objetivo principal a implementação do ITM (também conhecido como *Longley-Rice*) de modo a aferir a sua capacidade de predição em linhas ferroviárias caracterizadas por um meio de propagação rural e com irregularidades de terreno. O propósito desta análise foi, também, a comparação do desempenho do modelo de propagação em estudo com outro muito utilizado neste tipo de situações, o *Okumura-Hata*.

Antes de transitar para a fase de testes, o algoritmo desenvolvido foi objeto de uma validação através da comparação com medidas reais. Neste processo, foram realizadas algumas otimizações ao modelo, nomeadamente pelo ajuste de constantes determinadas empiricamente presentes nas equações de cálculo da atenuação por difração.

De forma a realizar a comparação entre os modelos de propagação e medidas reais, desenvolveu-se um *software* que recebe como dados de entrada, além da parametrização geral do ITM e um DEM da linha ferroviária, ficheiros que contêm as predições do *Okumura-Hata* (geradas pelo *software SIGRAIL Planning*) e as medidas reais. Com esta informação, procedeu-se, então, à aplicação do *software* nos oito cenários estudados, representados pelas zonas de cobertura de oito estações base, confrontando-se a predição do nível de sinal em cada ponto, tanto pelos cálculos do ITM, como do *Okumura-Hata*, com as medidas a que se teve

acesso. Através da análise destas curvas, assim como de estatísticas de erro em cada percurso, conseguiram-se inferir aspetos importantes relativamente ao desempenho de ambos os modelos neste tipo de ambiente de propagação.

## 5.2 Resultados

Para a discussão dos resultados obtidos, é importante mencionar três aspetos relativos ao modelo implementado e aos cenários de estudo:

- Os percursos analisados entre cada estação base desta linha ferroviária estão localizados, maioritariamente, em vales do rio Tejo. Por este motivo, em muitas zonas não existe linha de vista entre a estação base e o terminal, dada a grande quantidade de curvas na linha férrea, assim como a sua envolvência por montanhas de grande dimensão;
- Pela mesma razão mencionada em cima, qualquer transmissão pode ser altamente influenciada pela água, sendo que o modelo em estudo não contabiliza este fator;
- Ainda relativamente à versão implementada do ITM, não foi aplicado diretamente nenhum fator corretivo para a vegetação, enquanto que as áreas analisadas têm grande abundância da mesma. No entanto, é de ter em conta que este modelo foi empiricamente desenvolvido pela análise de zonas rurais dos EUA.

Em praticamente todos os percursos analisados o ITM apresentou um melhor desempenho que o *Okumura-Hata*, tanto pela semelhança com as curvas das medidas, como pelos valores das estatísticas de erro inferiores. Houve, porém, o caso de uma estação base com uma grande proximidade de valores dos dois modelos e em que o ITM teve especial dificuldade em prever o nível de sinal. Na estação base Belver, o valor de erro médio absoluto do ITM e do *Okumura-Hata* foram muito semelhantes (assim como o desvio padrão de erro), sendo que, dos casos analisados, por um lado, este valor é um dos mais reduzidos do *Okumura-Hata* e, por outro, o mais elevado do ITM.

Pela análise deste e de outros trajetos, percebe-se que o ITM tem dificuldade em lidar com obstáculos de grande dimensão que impeçam a linha de vista entre a estação base e o terminal, desde curtas (inferiores a 1 quilómetro) a longas distâncias (superiores a 8 quilómetros). Exemplos deste facto, são os vários desníveis de

atenuação verificados em distâncias específicas junto às estações base Belver, Fratell e Rodao1. Em alguns casos é a curvatura da linha férrea e a presença de uma montanha que inibe a linha de vista, enquanto que em outros, a distâncias mais longas, são, muito provavelmente, estruturas montanhosas de elevada dimensão que provocam esta diferença de 10 a 20 dB face às medidas. Nestas situações, o *Okumura-Hata* tem tendência a lidar melhor com este tipo de obstáculos e a apresentar valores relativamente próximos às medidas.

Outra prova do impacto negativo de obstáculos de grande dimensão na predição de cobertura por parte do ITM é a diferença de valores das estatísticas de erro entre as estações base Rodao1 e Rodao2. Enquanto que na Rodao1 o erro médio absoluto regista o menor valor de todos os testes efetuados, a introdução da montanha no percurso fez com que as predições fossem altamente afetadas na Rodao2, resultando, em grande parte da zona de cobertura, numa atenuação inferior face ao que as medidas registam.

Apesar dos aspetos menos positivos mencionados em cima, e como já indicado, o ITM revelou-se bastante promissor na grande maioria das situações analisadas. Neste seguimento, destaca-se especialmente o desempenho do modelo segundo as características das zonas de cobertura das estações base Rodao1 e Fratell. Em percursos com muitas irregularidades no terreno, mesmo que algo significativas em termos de elevação, o ITM mostrou-se bastante capaz ao acompanhar as curvas das medidas de forma rigorosa. Mesmo em distâncias entre 3 a 10 quilómetros, apesar de já um pouco fora do contexto das áreas de cobertura deste tipo de estações base, os valores estimados encontravam-se muito contíguos às medidas, o que indica uma grande capacidade do modelo para lidar com inúmeros obstáculos que se sobreponham a uma transmissão de sinal.

Resumindo, o ITM revela-se um modelo com muito potencial para predição rádio em ambientes rurais com grande densidade de desníveis no terreno. No entanto, tem alguma dificuldade em lidar com obstruções significativas na linha de vista de transmissão, principalmente em distâncias inferiores a 1 quilómetro.

### 5.3 Trabalho futuro

Apesar de este estudo apenas ter tido como foco o meio rural (dadas as características do modelo de propagação e como foi construído), a análise do desempenho do ITM noutros meios, nomeadamente suburbano, também seria válida, de forma a entender a precisão das suas estimativas “fora da zona de conforto”.

É provável que, alterando o contexto de análise desta forma, seja, também, necessário ajustar algumas das variáveis modificadas nas otimizações que foram implementadas.

A acumular com isto, seria útil estudar a implementação de fatores corretivos que contemplem, por exemplo, vegetação ou urbanização presentes num dado percurso, assim como a possível adição de um termo que contabilize a presença de água num trajeto. Estas condições são facilmente encontradas em situações de comunicações ferroviárias e fortaleceriam a capacidade de predição do modelo.

Caso haja possibilidade num trabalho futuro de acrescentar estas melhorias, uma comparação com versões mais evoluídas do *Okumura-Hata* faria todo o sentido. Não obstante, considera-se que a adição do ITM a qualquer ferramenta, mesmo que num âmbito profissional, traria mais valias na predição de cobertura móvel em ambientes com muitas irregularidades no terreno.

# Referências

- [1] Nuno Cota; António Serrador; Pedro Vieira; Ana Rita Beire; António Rodrigues. On the Use of Okumura–Hata Propagation Model on Railway Communications. 27 Dezembro 2014. (pp. 2 e 44)
- [2] G. F. M. Fernandes. Estimação de Cobertura Rádio em Comunicações Ferroviárias. Dezembro 2014. (p. 2)
- [3] S. Kasampalis; P. I. Lazaridis; Z. D. Zaharis; A. Bizopoulos; S. Zettas; J. Cosmas . Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata-Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction. 2014. (p. 2)
- [4] A.G. Longley; P. L. Rice. ESSA Technical Report ERL 79-ITS 67, Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain A Computer Method. Junho 1968. (pp. 6, 14, e 37)
- [5] Institute for Telecommunication Sciences. Irregular terrain model (itm) (longley-rice) (20 mhz – 20 ghz). <https://www.its.bldrdoc.gov/resources/radio-propagation-software/itm/itm.aspx>. [Acedido online a 12-Fevereiro-2019]. (p. 6)
- [6] G.A Hufford; A.G Longley; W.A. Kissick. A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode. Abril 1982. (pp. 6, 11, 12, 13, 31, 35, 38, e 52)
- [7] Campos Sarmento. Propagação ionosférica. <http://www.sarmento.eng.br/Propagacao.htm>. [Acedido online a 10 Julho 2019]. (p. 7)

- [8] RF Cafe. Atmospheric absorption (specific attenuation). <https://www.rfcafe.com/references/electrical/atm-absorption.htm>. [Acedido online a 20 Novembro 2019]. (p. 8)
- [9] ITU-R. The radio refractive index: its formula and refractivity data. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-11-201507-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-11-201507-S!!PDF-E.pdf). [Acedido online a 10 Julho 2019]. (p. 10)
- [10] Weiner, M.; Jappe, M. E.; Johnson, N. J. Input parameter specification for the longley-rice and johnson-gierhart tropospheric radio propagation programs, 0.02-40 ghz. 10 1982. (pp. 10 e 13)
- [11] A. P. Barsis; P. L. Rice. Prediction and measurement of VHF field strength over irregular terrain using low antenna heights. NBS Report 7962. 1963. (p. 14)
- [12] C. Alves. Instituto Superior Técnico. Método dos mínimos quadrados. <https://www.math.tecnico.ulisboa.pt/~calves/cursos/mmq.htm>. [Acedido online a 3 Abril 2019]. (pp. 16 e 18)
- [13] International Telecommunication Union. Recommendations and reports of the CCIR. XIVth plenary assembly, Kyoto, 1978. (p. 17)
- [14] Federal Communications Commission. Engineering Charts. Number vol. 4 in regulation 73.333. 2012. (p. 18)
- [15] Paul McKenna; Chriss Hammerschmidt. Institute for Telecommunication Sciences. Propagation Measurement Workshop - Radio Propagation Models. 28 Junho 2016. (pp. 19 e 23)
- [16] G.A Hufford. The ITS Irregular Terrain Model, version 1.2.2 The Algorithm. 2002. (pp. 27, 28, 29, 31, 36, 39, e 52)
- [17] Prasad, M.V.S.N.; Bhaskara Rao, S.V.; Rama Rao, T.; Sarkar, S.K.; Sharma, S. Double knife edge diffraction propagation studies over irregular terrain. indian journal of radio space physics, 33(3), 180-184. 2004. (pp. 30 e 52)
- [18] Autor desconhecido. Wireless Communications Systems. Two-ray model in wireless communications. <http://wireless-communications-systems.blogspot.com/2013/04/two-ray-model-in-wireless-communications.html>. [Acedido online a 3 Abril 2019]. (p. 31)

## REFERÊNCIAS

---

- [19] P.L. Rice. Institute for Telecommunication Sciences and Aeronomy (U.S.). Transmission Loss Predictions for Tropospheric Communication Circuits. Number vol. 1 in NBS technical note. U.S. National Bureau of Standards, 1967. (pp. 32 e 33)
- [20] Ana Rita Beire. Otimização de Modelo de Propagação utilizando Algoritmos Genéticos: Caso das Comunicações Móveis em Ferrovia. Dezembro 2013. (p. 45)
- [21] Lee, W. Estimate of local average power of a mobile radio signal - iee trans. on vehicular technology, vol. vt-34, no. 1, pp. 22-27. 2 1985. (p. 46)