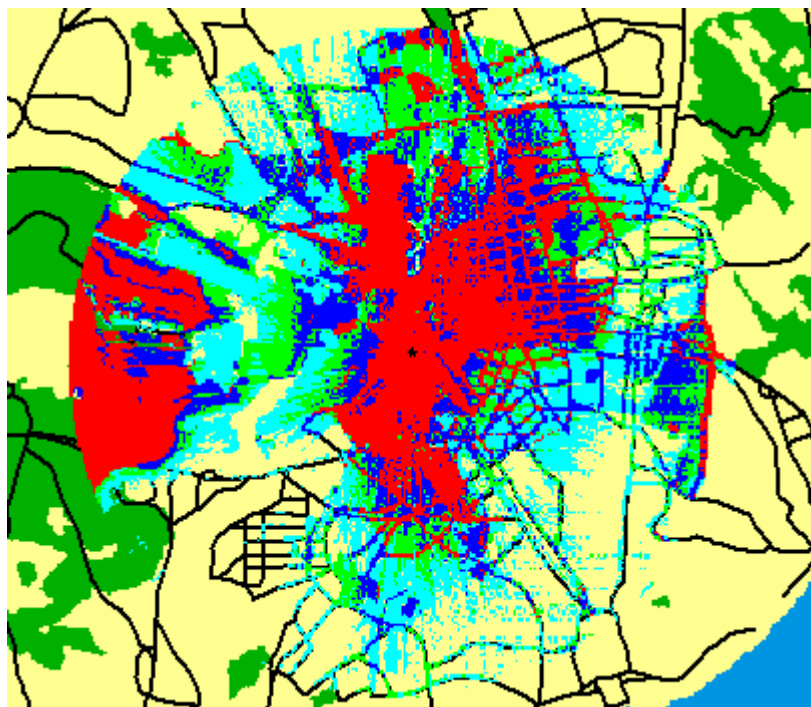


UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



MODELOS DE PROPAGAÇÃO PARA O UMTS

Paulo Amaral, nº 43869
Samuel Ferreira, nº 43826

LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES
Relatório de Trabalho Final de Curso
047/2002/L

Prof. Orientador: Luís M. Correia

Setembro de 2003

Sob a orientação de

Prof. Luís M. Correia

Secção de Telecomunicações
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Instituto Superior Técnico

*A maior recompensa do nosso trabalho
não é o que nos pagam por ele,
mas aquilo em que ele
nos transforma.*

John Ruskin

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Luís Correia, pela excelente oportunidade que nos proporcionou, pela atenção e incondicional apoio que nos concedeu e pela disponibilidade para partilhar connosco o seu saber.

À Vodafone, pela disponibilidade com que nos cedeu dados essenciais para a concretização deste trabalho; aos Engenheiros Carlos Caseiro e Jorge Fernandes pelo seu apoio. Uma palavra especial de apreço ao Eng. Jorge Fernandes que valiosamente colaborou durante todo o processo de medidas no Porto, demonstrando interesse e entusiasmo por este projecto.

Estes agradecimentos são extensivos a todos os membros do GROW, pelos conhecimentos que, durante as reuniões mensais, partilharam connosco, e ainda por todas as sugestões e críticas que nos dirigiram com o principal objectivo de melhorarmos o nosso trabalho.

Ao Lúcio, Venes, Xavier, Martijn, Filipe Cardoso e Jorge Aguiar, agradecemos todo o auxílio prestado.

Agradecemos ainda, sem ordem preferencial, aos nossos companheiros de laboratório, Alex, João, Hélder, “Tino” de Souto Xico e Angelino pelo espírito de companheirismo e de entre ajuda que vigorou, ajudando-nos a minimizar os problemas e a ultrapassar as intermináveis horas de trabalho.

Aos nossos amigos, Joana, ”Xica” Carla, “Xica” Vânia, “Xico” Gonçalo, “Mangas”, Eduardo, Radek, Jurek, Márinho, Filipe, Luís, Ana, Montalverne, Félix, Caiado, Crispim que sempre nos apoiaram.

Por fim, mas não em último lugar, aos nossos pais e irmãos pelo encorajamento, força e confiança...por nos terem permitido realizar este sonho!

Resumo

Este trabalho tem como objectivo avaliar modelos de propagação para o UMTS. São analisados os modelos do COST231 - Walfisch - Ikegami, do 3GPP para macro-células, e como modelo complementar, é também considerado o modelo de Gonçalves que permite caracterizar o comportamento do sinal no interior dos cruzamentos.

Para esse efeito, foi desenvolvido um simulador para a cidade de Lisboa e do Porto que, recorrendo a uma ferramenta SIG, nomeadamente o *MapInfo* e tendo esses modelos como base, permite calcular a atenuação de propagação do sinal entre a EB e o TM, dando também a possibilidade de calcular a evolução da atenuação ao longo de uma rua, bem como estimar a cobertura de cada um dos serviços do UMTS.

Posteriormente, os modelos foram aferidos, recorrendo a uma campanha de medidas efectuada no Porto. Após o tratamento dos dados medidos, procedeu-se à sua comparação com os resultados das simulações. O melhor caso ocorre para uma das zonas regulares onde o modelo do COST231 apresenta um valor da média de erro absoluto de 5.56 dB e o desvio padrão do erro de 5.50 dB, enquanto que o modelo do 3GPP apresenta valores de média do erro absoluto de 4.22 dB e desvio padrão do erro de 4.91 dB. O pior caso dá-se numa das zonas irregulares onde a EB está abaixo do nível médio dos telhados, apresentando para o modelo do COST231 valores da média de erro absoluto de 46.63 dB e desvio padrão do erro de 9.15 dB. Para o modelo do 3GPP, a média do erro absoluto é de 14.01 dB enquanto que o desvio padrão do erro é de 5.63 dB.

Analisando os resultados, verificou-se que o modelo do COST231 sobrestima o sinal para ruas regulares, enquanto que nas ruas irregulares é subestimado. Quanto ao modelo do 3GPP, este exhibe um bom desempenho na predição do sinal para as zonas regulares, enquanto que nas zonas irregulares, o modelo apresenta por vezes erros consideráveis.

Após a aferição dos modelos foi possível verificar que o simulador MapModel apresenta resultados próximos da realidade, desde que a EB esteja colocada acima dos edifícios, e que os dados de entrada caracterizem o terreno sem grandes discrepâncias com a realidade.

Palavras Chave

UMTS. Ambientes Urbanos. Modelos de Propagação. SIG. Cobertura.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Índice	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Lista de Siglas	xi
Lista de Símbolos	xiii
 1. Introdução	 1
 2. Aspectos Básicos sobre o UMTS	 5
2.1. Serviços	5
2.2. W-CDMA	6
2.3. Capacidade e Interferência	7
 3. Modelos de Propagação	 11
3.1. Considerações Iniciais	11
3.2. Modelo COST 231 – Walfisch – Ikegami	13
3.3. Modelos do 3GPP	14
3.4. Influência dos Cruzamentos	15
 4. Implementação dos Modelos	 17
4.1. Sistemas de Informação Geográfica	17
4.2. Estrutura do Algoritmo	18
4.3. Parâmetros de Entrada	22
4.4. Implementação dos Modelos de Propagação	26
4.5. Implementação das Antenas	28
4.6. Cálculo dos Balanços de Potência	29
4.7. Parâmetros de Saída	32
 5. Análise dos Resultados	 35
5.1. Campanha de Medidas	35
5.2. Aferição dos Modelos	38
5.2.1. Considerações Iniciais	38
5.2.2. Zonas Regulares	40
5.2.3. Zonas Irregulares	44
5.3. Aplicação dos Modelos	48
 6. Conclusões	 53

Anexo A – Classificação dos Serviços pelo 3GPP.....	A-1
Anexo B – Alguns Aspectos Básicos Sobre o UMTS.....	B-1
Anexo C – Caracterização do UL e DL nos Balanços de Potência.....	C-1
Anexo D - Modelo COST 231 – Hata	D-1
Anexo E –Modelo de Okumura-Hata.....	E-1
Anexo F - Modelo COST 231 - Walfisch - Ikegami	F-1
Anexo G - Análise da Variação dos Termos de Atenuação de Propagação para o Modelo COST – 231 – Walfisch – Ikegami.....	G-1
Anexo H – Influência da Variação dos Parâmetros de Entrada na Atenuação de Propagação do Modelo do 3GPP macro-celular.....	H-1
Anexo I - Influência dos Cruzamentos	I-1
Anexo J – Fluxogramas.....	J-1
Anexo K – Cálculo das Diferenças Angulares ϕ e θ	K-1
Anexo L – Diagrama de Radiação das Antenas	L-1
Anexo M – Modelo para contabilizar a penetração em edifícios.....	M-1
Anexo N - Aferição das Zonas Regulares.....	N-1
Anexo O - Aferição das Zonas Irregulares	O-1
Anexo P – Cobertura para a Cidade do Porto	P-1
Anexo Q – Cobertura para a Cidade de Lisboa.....	Q-1
Anexo R – Resultados do Modo Continuo para a Avenida Elias Garcia em Lisboa.....	R-1
Anexo S – Dados Geográficos de Lisboa.....	S-1
Anexo T - Dados Geográficos do Porto.....	T-1
Referências	Ref-1

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Atributos do UMTS.....	1
Figura 1.2 - Espectro de frequências no mundo para o IMT-2000 (extraído de [1]).	2
Figura 2.1 - Estrutura da rede UTRAN (extraído de [2]).	7
Figura 3.1 - Potência recebida por um TM em função da sua distância à EB (adaptado de [5]).	12
Figura 3.2 - Descrição geométrica do modelo (extraído de [2]).	13
Figura 3.3 - Ângulo que a rua faz com o raio directo (extraído de [2]).	13
Figura 3.4 - Visualização das variáveis θ e r	15
Figura 3.5 - Geometria de um cruzamento considerado no Modelo Gonçalves.....	16
Figura 3.6 - Variação da atenuação de propagação devido à influência de um cruzamento, para $\varphi_c = 90^\circ$, $d_c = 500$ m, $w_s = 25$ m e $\Delta h_b = 3$ m (extraído de [13]).	16
Figura 4.1 - Sobreposição de camadas de informação (extraído de [15]).	17
Figura 4.2 – Construção do formato matricial (extraído de [15]).	17
Figura 4.3 - Princípio de funcionamento da construção do formato matricial.....	18
Figura 4.4 – Exemplificação do Modo Ponto Localizado.....	18
Figura 4.5 – Exemplificação do Modo Contínuo.....	19
Figura 4.6 - Diagrama de blocos da ferramenta desenvolvida.....	20
Figura 4.7 – Fluxograma geral do algoritmo.....	21
Figura 4.8 - Metodologia utilizada para o cálculo do ângulo de rua φ	25
Figura 4.9 – Esquema tridimensional utilizado para a extrapolação do ganho da antena na direcção do ponto P (extraído de [13]).	28
Figura 4.10 - Evolução da percentagem de área coberta com a margem de desvanecimento lento	31
Figura 4.11 - Funções acumuladas de probabilidade das várias categorias (extraído de [18]).	32
Figura 4.12 – Exemplo de um resultado de saída para o Modo Continuo.	33
Figura 4.13 - Exemplo do resultado de saída para o Modo Cobertura.....	34
Figura 5.1- Interface do <i>TEMS WCDMA</i>	36
Figura 5.2 – Mapa do Porto com as zonas regulares e irregulares analisadas.	37
Figura 5.3 – Marcação das medidas efectuadas no mapa vectorial das ruas do Porto.....	38
Figura 5.4 – Fotografia aérea da zona da rotunda da Boavista (extraído de [20]).	40
Figura 5.5 – Comparação da potência medida com os modelos para a Rua António Cardoso.....	41
Figura 5.6 – Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Rua António Cardoso.	42
Figura 5.7 - Comparação dos modelos com as medidas para a Rua Soares dos Passos.	43
Figura 5.8 - Fotografia aérea da Avenida da Boavista (Parque da Cidade) (extraído de [20]).	44
Figura 5.9 - Comparação dos modelos com as medidas para o troço da Avenida da Boavista (Parque da Cidade).	45
Figura 5.10 - Fotografia aérea da intersecção da VCI com a Avenida da Boavista (extraído de [20]).	46
Figura 5.11 - Comparação dos modelos com as medidas para o troço da Avenida da Boavista que intersecta a VCI.	46

Figura 5.12 - Cobertura para a zona da Avenida da Boavista, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 85%, mas com azimute de 180°.	49
Figura 5.13 - Modo Contínuo para a Avenida Elias Garcia.	51
Figura B.1 - Espectro disponível para o UMTS na Europa.	B-1
Figura B.2 - Método de geração dos códigos (OVSF) (extraído de [22]).	B-1
Figura E.1 - Representação de dois tipos de trajectos mistos (extraído de [2]).	E-2
Figura G.1 - Variação do L_{msd} com a diferença de alturas da EB e do edifício (Δh_{bB}).	G-1
Figura G.2 - Variação do L_{msd} com a separação de edifícios (w_B).	G-1
Figura G.3 - Variação de L_{msd} com a frequência (f).	G-2
Figura G.4 - Variação de L_{msd} com a distância (d).	G-2
Figura G.5 - Variação de L_{rts} com o ângulo de rua (ϕ).	G-3
Figura G.6 - Variação de L_{rts} com a largura da rua (w_S).	G-3
Figura G.7 - Variação de L_{rts} com a diferença de alturas do TM e do último edifício (Δh_{Bm}).	G-3
Figura H.1 - Variação de L_b com a diferença entre a altura da antena da EB e a altura dos edifícios (Δh_b).	H-1
Figura H.2 - Variação de L_b com a diferença de alturas entre o último edifício e o TM (Δh_m).	H-1
Figura H.3 - Variação de L_b com a separação média entre edifícios (b).	H-2
Figura H.4 - Variação de L_b com a distância da EB ao TM (d).	H-2
Figura H.5 - Variação de L_b com a distância do TM ao último edifício (x).	H-3
Figura H.6 - Variação de L_b com a frequência (f).	H-3
Figura J.1 - Fluxograma do algoritmo em <i>MapBasic</i> para o Modo Cobertura.	J-1
Figura J.2 - Fluxograma do algoritmo em <i>MapBasic</i> para o Modo Contínuo e Modo Ponto Localizado.	J-2
Figura J.3 - Fluxograma do algoritmo em <i>C++</i> .	J-3
Figura K.1 - Metodologia utilizada para o cálculo de ϕ (extraído de [13]).	K-1
Figura K.2 - Metodologia utilizada para o cálculo de θ (extraído de [13]).	K-1
Figura L.1 - Diagrama de Radiação Horizontal e Vertical do modelo Katherein - 742265.	L-1
Figura M.1 - Aspecto da função densidade de probabilidade típica dos resultados obtidos (extraído de [18]).	M-1
Figura M.2 - O processo de conversão em duas normais (extraído de [18]).	M-1
Figura N.1 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Rua António Cardoso.	N-1
Figura N.2 - Fotografia aérea da Rua Duarte Pacheco Pereira (extraído de [20]).	N-2
Figura N.3 - Comparação dos modelos com as medidas para a Rua Duarte Pacheco Pereira.	N-2
Figura N.4 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Rua Duarte Pacheco Pereira.	N-3

Figura O.1 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final para a Avenida da Boavista (Parque da Cidade)	O-1
Figura O.2 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Avenida da Boavista com a intersecção da VCI.	O-2
Figura O.3 - Fotografia aérea da Rua Serpa Pinto (extraído de [20])	O-3
Figura O.4 - Comparação dos modelos com as medidas para a Rua Serpa Pinto.....	O-3
Figura O.5 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Rua Serpa Pinto.	O-4
Figura O.6 - Fotografia aérea da Rua Dr. R. Jorge (extraído de [20]).	O-5
Figura O.7 - Comparação dos modelos com as medidas para a Rua Dr. R. Jorge.....	O-5
Figura O.8 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Rua Dr. Jorge.....	O-6
Figura P.1 - Cobertura para a zona da rotunda da Boavista, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 85%.	P-1
Figura P.2 - Cobertura para a zona da rotunda da Boavista, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 50%.	P-1
Figura P.3 - Cobertura para a zona de Serralves, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 85%.	P-2
Figura P.4 - Cobertura para a zona de Serralves, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 50%.	P-2
Figura Q.1 - Cobertura para a zona das Avenidas Novas, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 85%.	Q-1
Figura Q.2 - Cobertura para a zona das Avenidas Novas, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 50%.	Q-1
Figura Q.3 - Cobertura para a zona da Avenida António Augusto de Aguiar, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 25%.	Q-2
Figura R.1 - Evolução do sinal estimado pelo modelo COST231 – Walfisch – Ikegami ao longo da Avenida Elias Garcia	R-1
Figura R.2 - Evolução do sinal estimado pelo modelo 3GPP ao longo da Avenida Elias Garcia	R-1
Figura R.3 - Influência do ganho de emissão da EB ao longo do percurso da Avenida Elias Garcia.	R-2
Figura R.4 - Redução da atenuação de propagação por influência do cruzamentos para a Avenida Elias Garcia.	R-2
Figura S.1 - Cota do terreno da cidade de Lisboa.	S-1
Figura S.2 - Tipo de ocupação do terreno na cidade de Lisboa.	S-2
Figura S.3 - Rede Viária da Cidade Lisboa.....	S-2
Figura T.1 - Cota do terreno da cidade do Porto.....	T-1
Figura T.2 - Tipo de ocupação do terreno na cidade de Lisboa.	T-2
Figura T.3 - Rede viária da cidade do Porto	T-2

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação dos serviços pelo UMTS-Forum [1].	5
Tabela 4.1 - Classificação do terreno e respectiva altura média.	23
Tabela 4.2 - Sensibilidade para cada tipo de serviço.	30
Tabela 4.3 - Margens de Desvanecimento Rápido Máximas.	31
Tabela 5.1 - Parâmetros associados à Rua António Cardoso.	41
Tabela 5.2 - Parâmetros estatísticos das zonas regulares analisadas.	43
Tabela 5.3 - Parâmetros estatísticos para as zonas irregulares analisadas.	47
Tabela A.1 - Classificação dos serviços pelo 3GPP [21].	A-1
Tabela C.1 - Valores de EIRP para o UMTS (extraído de [2]).	C-1
Tabela C.2 - Valores de Eb/N0 para diferentes serviços (extraído de [23]).	C-4
Tabela D.1- Restrições do modelo formulado por COST 231 – Hata.	D-1
Tabela E.1- Restrições do modelo formulado por Hata.	D-2
Tabela F.1- Restrições do modelo formulado por COST 231 – Walfisch – Ikegami.	D-3
Tabela N.1- Parâmetros associados à Rua Soares dos Passos.	N-1
Tabela N.2 - Parâmetros associados à Rua Duarte Pacheco Pereira.	N-3
Tabela O. 1 - Parâmetros associados à Avenida da Boavista (Parque da Cidade).	O-1
Tabela O.2- Parâmetros associados à Avenida da Boavista com a intersecção da VCI.	O-2
Tabela O. 3 - Parâmetros associados à Rua Serpa Pinto.	O-4
Tabela O.4 - Parâmetros associados à Rua Dr. R. Jorge.	O-6

Lista de Siglas

3GPP	<i>3rd Generations Partnership Project</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CN	<i>Core Network</i>
CPICH	<i>Common Pilot Channel</i>
CS	<i>Circuit Switching</i>
DL	<i>DownLink</i>
EB	<i>Estação Base</i>
EIRP	<i>Equivalent Isotropically Radiated Power</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HIMM	<i>High Interactive Multimedia</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HMM	<i>High Multimedia</i>
IMT-2000	<i>International Mobile Telephony 2000</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
LoS	<i>Line-of-Sight</i>
MMM	<i>Medium Multimedia</i>
MSC	<i>Mobile Switching Center</i>
NF	<i>Noise Factor</i>
NLoS	<i>Non-Line-of-Sight</i>
OVSF	<i>Orthogonal Variable Spreading Factor</i>
PS	<i>Packet Switching</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RNS	<i>Radio Network Subsystem</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
S	<i>Speech</i>
SC	<i>Scrambling Code</i>
SD	<i>Switched Data</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SIG	<i>Sistemas de Informação Geográfica</i>
SM	<i>Simple Messaging</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TEMS	<i>Test Mobile System</i>
TM	<i>Terminal Móvel</i>
UL	<i>UpLink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Access Network</i>

WARC	<i>World Administrative Radio Conference</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

Lista de Símbolos

α_j	Factor de ortogonalidade dos códigos em DL
η_{DL}	Factor de carga em DL
η_{UL}	Factor de carga em UL
θ	Ângulo formado pela diferença entre o ângulo de incidência no ponto P e o ângulo de inclinação da direcção de radiação máxima da antena no plano vertical
θ_{dt}	Ângulo de <i>downtilt</i> da antena
λ	Comprimento de onda
σ	Desvio padrão da potência do sinal
σ_{hed}	Desvio padrão da altura média dos edifícios que intersectam o primeiro elipsóide de Fresnel
υ	Factor de actividade
φ	Ângulo que a rua faz com o raio directo
φ_c	Ângulo entre o eixo da rua, onde o TM se desloca, e o segmento entre a posição da EB e o centro do cruzamento
ϕ	Ângulo formado pela diferença entre o azimute da antena e o ângulo que a direcção do ponto P faz com o Norte
Ψ_{EB_N}	Azimute da antena
ΔP	Margem de desvanecimento lento
ΔP_i	Diferença de potências
Δf	Largura de banda do sinal
Δh_b	Diferença entre a altura da antena da estação base e a altura dos edifícios
Δh_m	Diferença entre a altura dos edifícios e a altura do TM
b	Separação média entre edifícios
d	Distância entre a EB e o TM
d_1	Distância da EB ao pixel
d_2	Distância da EB até ao último edifício
d_{EB_P}	Distância entre a EB e o ponto P
d_c	Distância entre a EB e o centro do cruzamento
d_{via}	Distância do móvel ao centro do cruzamento
d_n	Distância fictícia
E_c/I_0	Relação potência do sinal-interferência
$EIRP$	Potência equivalente radiada isotropicamente
$EIRP^{DL}$	Potência equivalente radiada isotropicamente no sentido descendente
$EIRP^{UL}$	Potência equivalente radiada isotropicamente no sentido ascendente
f	Frequência da portadora
G_{eb}^{max}	Ganho da antena da EB na direcção de máximo
G_{eb}	Ganho da EB na direcção do receptor
G_e	Ganho da antena de emissão
G_r	Ganho da antena de recepção
G_p	Ganho de processamento
G_{SH}	Ganho de <i>Soft-Handover</i>
E_b/N_0	Relação sinal-ruído
F	Factor de ruído do receptor

h_b	Altura da EB ao solo
H_B	Altura dos edifícios
h_{EB}	Altura da EB
h_{ed}	Média das alturas dos edifícios que intersectam o primeiro elipsóide de Fresnel
h_m	Altura da antena do móvel ao solo
h_P	Altura do ponto P
i	Quociente entre a interferência proveniente de outras células e a interferência da própria célula
$\overline{I_0}$	Valor médio da interferência de todos os SC que são medidos num ponto
k_a	Representa o aumento da atenuação de propagação devido ao facto da antena da estação base estar abaixo do nível do telhado do edifício adjacente
k_B	Constante de Boltzman
k_d	Representa a dependência da difracção no topo dos edifícios com a distância
k_f	Representa a dependência da difracção no topo dos edifícios com a frequência
L_j	Atenuação de propagação entre o TM e a EB
L_u	Perdas devido à proximidade do terminal móvel com o utilizador
L_0	Atenuação em espaço livre
$L_{bodyloss}$	Perdas do sinal provocadas pela proximidade entre o TM e o utilizador
L_{bsh}	Perdas introduzidas pelo facto de a antena da estação base estar colocada a uma altura superior ou inferior ao nível do telhado do edifício
L_{cruz}	Atenuação de propagação devido à influência de um cruzamento
L_{int}	Atenuação por penetração no interior dos edifícios
L_{ori}	Atenuação devido à mudança da orientação do raio
L_p	Atenuação de propagação
L_{rts}	Atenuação devido a difracções entre os telhados e a rua
L_{msd}	Atenuação devido às multilâminas
MI	Margem de interferência
M_{FSF}	Margem do desvanecimento lento
M_{FFF}	Margem do desvanecimento rápido
n	Factor de decaimento da potência do sinal com a distância
N	Valor total da potência de ruído
N_u	Número de utilizadores numa célula
N_0	Valor médio da potência de ruído
N_p	Número de pontos em que se comparam as medidas aos resultados teóricos
NF	Factor de ruído do TM
P^t	Potência prevista pelo modelo de propagação
P^m	Potência das medidas
P_{Tx}^{EB}	Potência de transmissão total necessária para uma dada estação base
P_{Tx}	Potência de saída do emissor
P_e	Potência de emissão aos terminais da antena
P_r	Potência de recepção disponível aos terminais da antena
P_{Rx}	Potência à entrada do receptor
$P_{Rx \min}$	Sensibilidade do receptor
r	Distância entre o telhado do edifício e o TM
R_b	Débito do sinal do utilizador
R_c	Débito de <i>chip</i>

R_j	Débito binário do utilizador j
T	Temperatura
ν_j	Factor de actividade do utilizador j
w_s	Largura das ruas
w_B	Distância entre o ponto médio de dois edificios adjacentes
x	Distância horizontal entre o TM e o edificio
x_{br}	Ponto de quebra definido para uma distância de 300 m
x_{EB}, y_{EB}	Coordenadas cartesianas da EB
x_P, y_P	Coordenadas cartesianas do ponto P

1. Introdução

Hoje em dia, as comunicações móveis têm vindo a desempenhar um papel de destaque na sociedade. A avaliar pela taxa de penetração em Portugal, da ordem dos 85% à data da elaboração deste relatório, já quase ninguém dispensa a sua utilização.

O início destes sistemas data de meados da década de 80 com o aparecimento dos sistemas de comunicações móveis analógicos (1ª geração). No entanto, estes sistemas não tiveram grande aceitação no mercado, devido ao facto dos terminais serem muito grandes e da autonomia da sua bateria ser muito limitada. A revolução digital ocorre no início dos anos 90 com a introdução dos sistemas de 2ª geração que vieram proporcionar uma maior eficiência espectral, maior capacidade, e um maior número de serviços.

Com o uso massivo da Internet, Intranet e com o aumento da mobilidade no trabalho, tornou-se imperativa a necessidade de transferir dados de uma forma rápida e eficiente, de modo a serem satisfeitas as necessidades dos vários utilizadores.

Uma vez que os sistemas existentes foram desenhados de raiz para o transporte de voz, por muitas alterações que se possam fazer a esses sistemas, é praticamente impossível cumprir os requisitos dos serviços de banda larga, surgindo assim a necessidade da criação dos sistemas de 3ª geração, de modo a oferecerem um aumento de capacidade, transmissão de dados e um maior número de serviços utilizando um esquema inovador e uma rede muito mais avançada.

Os sistemas de 3ª geração, conhecidos globalmente como IMT-2000¹, foram concebidos para uniformizar e globalizar as comunicações móveis mundialmente, disponibilizarem débitos binários elevados, da ordem dos 2 Mbps (dependendo da mobilidade/velocidade), para suportarem transferência de dados por comutação de pacotes (PS) e por comutação de circuitos (CS), e oferecerem uma elevada eficiência espectral, entre outros atributos, Figura 1.1.

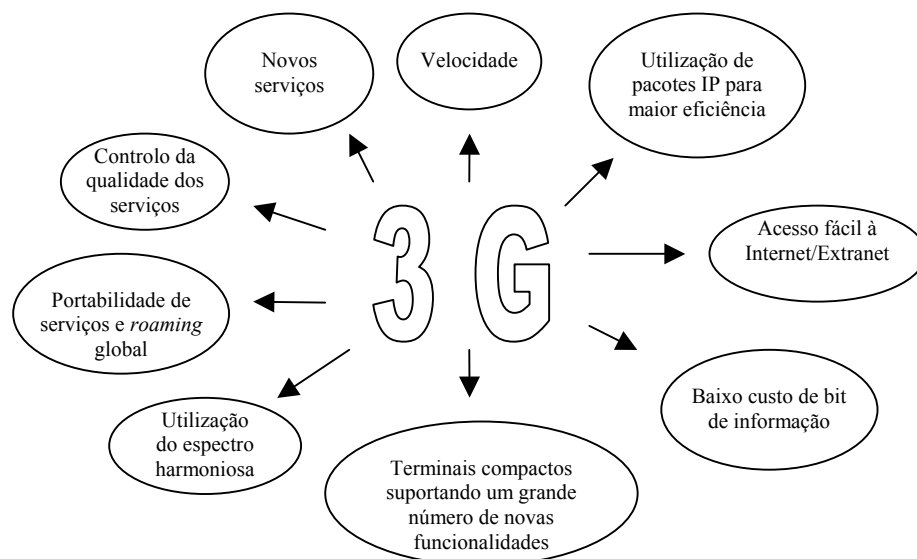
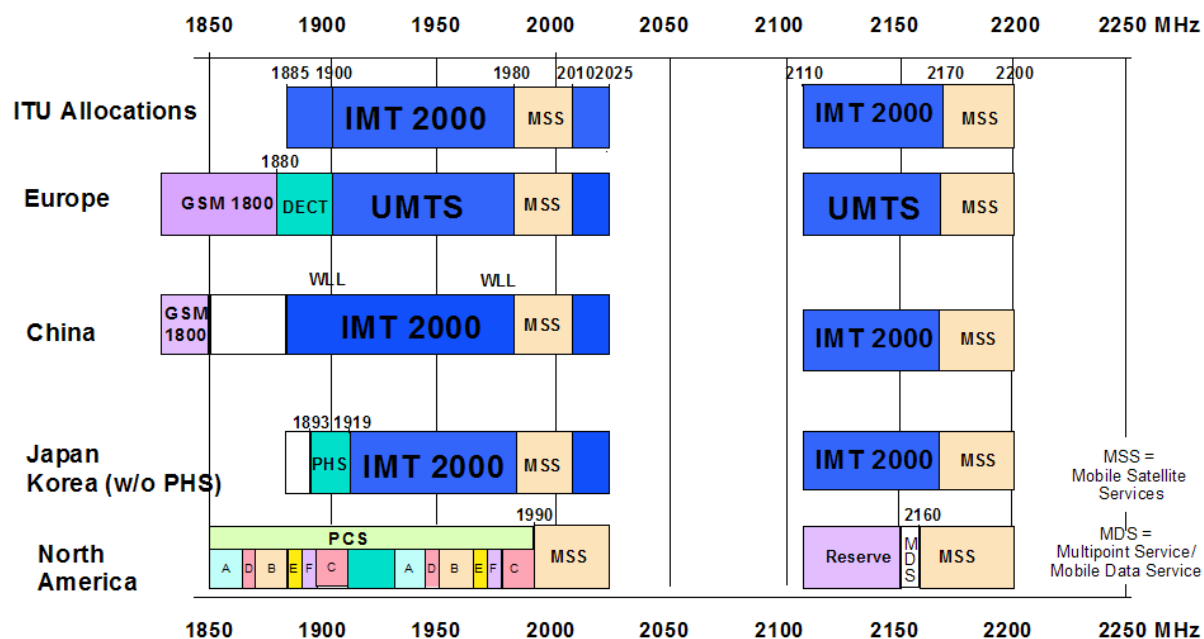


Figura 1.1 - Atributos do UMTS.

¹ *International Mobile Telephony 2000.*

Um dos objectivos destes sistemas era a uniformização a nível mundial do espectro de frequências a utilizar pelo IMT-2000. Para isso, em 1992 o WARC² da ITU³ decidiu que a gama de frequências a utilizar seria cerca de 2 GHz. Mas na América do Norte parte desse espectro já estava reservado para sistemas de 2ª geração, e também porque não têm espectro livre para o sistema IMT-2000, vão ter que substituir gradualmente os sistemas. Entretanto, a Europa e a Ásia não tiveram problemas em disponibilizar o espectro padronizado pelo WARC-92, como se pode ver na Figura 1.2.



Na Europa, como sistema de 3ª geração, surgiu o UMTS⁴ que muito em breve vai entrar em operação, possibilitando a convergência de diversas tecnologias e serviços num só equipamento, ou seja o utilizador terá acesso permanente a informação e entretenimento, tornando a aldeia global mais pequena.

Para que o UMTS comece a operar é essencial ser elaborado um estudo intensivo do planeamento celular. Para tal, é preciso estimar com alguma precisão o valor do sinal a determinada distância da estação base. Deste modo é importantíssimo existirem modelos de propagação que permitam calcular a atenuação de propagação o mais próximo possível da realidade.

É neste contexto que surge este trabalho, que apresenta o estudo dos modelos já existentes, e apresenta propostas de modificação a fim de se obter uma boa estimativa do sinal. Neste sentido, foi desenvolvida uma ferramenta que permite calcular a atenuação do sinal entre a EB e uma posição fixa do TM, bem como a evolução da atenuação que o sinal sofre ao longo de uma rua. Permite também estimar a cobertura de cada um dos serviços do UMTS para uma dada posição da EB.

² World Administrative Radio Conference.

³ International Telecommunications Union.

⁴ Universal Mobile Telecommunications System.

No Capítulo 2 são introduzidos os aspectos básicos do UMTS. Começa-se por enunciar os diferentes tipos de classes de serviços definidos pelo UMTS – Fórum e pelo 3GPP⁵. Seguidamente, é feita uma abordagem geral ao W-CDMA⁶, onde é discutido o princípio de funcionamento do espalhamento do sinal no espectro e são apresentadas as características gerais do processo de geração da árvore de códigos. Depois são descritos os diversos elementos que formam a estrutura da rede de acesso rádio. É feita também uma abordagem aos balanços de potência e finaliza-se o capítulo com uma análise da relação capacidade/interferência e da forma como estes dois parâmetros influenciam o desempenho da rede.

No Capítulo 3 é feita uma abordagem teórica dos modelos de propagação considerados na elaboração deste trabalho. São descritos individualmente os modelos: COST⁷ 231-Okumura – Hata, COST 231 Walfisch – Ikegami, 3GPP, e o modelo Gonçalves que contabiliza o efeito dos cruzamentos. Para cada um deles são enunciadas as expressões que constituem o modelo em si e são referidos os seus limites de validade.

O Capítulo 4 contém uma descrição detalhada da ferramenta desenvolvida para o cálculo da atenuação de propagação entre a estação base (EB) e o terminal móvel (TM) e da respectiva potência de receção. Nele incluem-se as explicações dos métodos utilizados para o cálculo dos diversos parâmetros de entrada do modelo COST 231 – Walfisch – Ikegami e do modelo do 3GPP e inclui-se também a descrição do método de implementação dos modelos na ferramenta. É dada ainda uma especial atenção aos sistemas de informação geográfica nos quais se baseia a ferramenta desenvolvida.

No Capítulo 5 é feita a análise dos resultados. Descreve-se a campanha de medidas realizada na cidade do Porto, bem como o material utilizado para esse efeito. De seguida, são referidos os locais escolhidos para a realização das medidas e o procedimento utilizado para o tratamento das mesmas. A aferição dos modelos é feita através da comparação dos resultados das simulações com os resultados das medidas realizadas na cidade do Porto. Para tal, recorre-se a parâmetros estatísticos que permitem caracterizar melhor as diferenças entre as curvas teóricas e as experimentais. É feita ainda uma análise em termos de cobertura monocelular, onde é possível averiguar a cobertura de uma célula para cada um dos tipos de serviço que o UMTS disponibiliza.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho, bem como um possível trabalho futuro. Incluem-se ainda anexos com informação de consulta auxiliar que permite uma melhor compreensão do relatório.

⁵ 3rd Generation Partnership Project.

⁶ Wideband Code Division Multiple Access.

⁷ European Co-operation in the field of Scientific and Technical research.

2. Aspectos Básicos sobre o UMTS

2.1. Serviços

O UMTS é um sistema que permite elevados débitos binários, abrindo assim portas para um grande número de novos serviços. Estes são definidos como a plataforma de suporte das aplicações, em que todas as suas capacidades se complementam e cooperam [2], enquanto que as aplicações são tarefas que necessitam de comunicar entre dois ou mais terminais distintos, tais como videoconferência, vídeo a pedido (*video-on-demand*), acessos rápidos à Internet, entre outros. Para cada utilizador, e consoante o serviço pretendido, o sistema tem a possibilidade de negociar as características da ligação, das quais se destacam flutuações do débito binário, o atraso e taxa de erros binários.

Os serviços podem ser divididos em classes consoante o tipo de tráfego gerado. As duas classificações para os serviços mais usadas são a classificação da 3GPP QoS⁸, Anexo A, e a classificação do UMTS-Forum.

O UMTS-Forum [1] define, considerando a perspectiva do mercado, seis categorias de serviços que podem ser vistos na Tabela 2.1, assim como algumas das suas características, tais como: ritmo binário, factor de assimetria no sentido ascendente (UL) e descendente (DL), modo de comutação e tipo de células.

Tabela 2.1 - Classificação dos serviços pelo UMTS-Forum [1].

Serviço	Ritmo binário [kbps]	Factor de assimetria [UL,DL]	Modo de Comutação	Célula	Exemplos de aplicações
<i>Simple Messaging</i> (SM)	14.4	1/1	PS	Pico, Micro, Macro	SMS, <i>Paging</i> , <i>Email</i>
<i>Switched Data</i> (SD)	14.4	1/1	CS	Pico, Micro, Macro	Fax, acesso lento à Internet
<i>Speech</i> (S)	16	1/1	CS	Pico, Micro, Macro	Voz, correio de voz
<i>High Interactive Multimedia</i> (HIMM)	128	1/1	CS	Pico, Micro, Macro	Vídeo-telefonía, Vídeo-conferência
<i>Medium Multimedia</i> (MMM)	384	0.026/1	PS	Pico, Micro	Acesso à Internet, Comércio electrónico, Jogos interactivos
<i>High Multimedia</i> (HMM)	2000	0.005/1	PS	Pico	Acesso rápido à Internet/Intranet

⁸ *Quality of Service.*

As transmissões de HMM são efectuadas essencialmente por terminais com pouca mobilidade e que estejam abrangidos por pico-células, possibilitando, nomeadamente, a transmissão de vídeo de elevada qualidade. As MMM apresentam a vantagem de poderem ser recebidas em terminais com muita mobilidade que estejam abrangidos pela área das macro- e micro-células, o que permite, por exemplo, sequências de vídeo comprimidas. A necessidade de interactividade e serviços simétricos é suprimida pelas transmissões HMM, que poderão ser acedidas por terminais abrangidos por macro- e micro-células, para partilha de serviços em tempo real ou serviços de videoconferência.

2.2. W-CDMA

O UMTS usa WCDMA para o acesso múltiplo via rádio [3], atribuindo diferentes códigos a cada utilizador, que são ortogonais entre si, de maneira a limitar a interferência entre canais.

O WCDMA suporta dois modos de operação [3], FDD⁹ e TDD¹⁰: o modo FDD usa portadoras separadas com uma largura de banda de 5 MHz para o UL e para o DL, enquanto que o modo TDD apenas usa uma portadora com largura de banda de 5 MHz repartida no tempo para o UL e para o DL. O espectro de frequências disponível para o UMTS pode ser visto no Anexo B.

No processo de espalhamento espectral, cada utilizador terá um código OVSF¹¹ único e ortogonal ao dos outros utilizadores, Figura B.2 do Anexo B. Este processo consiste em duas operações [3], *channelisation* e *scrambling*. Na primeira, a informação do utilizador é correlacionada com um código (*channelisation code*) que lhe foi atribuído, com um débito (*chip rate*) de 3.84 Mcps. Para contabilizar o número de chips utilizados por cada bit de informação do utilizador é definido o factor de espalhamento (SF¹²), que para o modo de funcionamento FDD varia entre 4 a 512. Durante o UL, esta 1ª operação é utilizada para separar a informação de dados e os canais de controlo do mesmo terminal, enquanto no DL permite separar as ligações dos diferentes utilizadores na mesma célula. A segunda operação consiste em atribuir um *scrambling code* ao sinal previamente espalhado, cuja função durante o UL é fazer uma distinção dos terminais móveis, enquanto que no DL é efectuar uma separação dos sectores (células).

A rede UMTS divide-se em três blocos principais: rede de núcleo (CN¹³), rede terrestre de acesso rádio do UMTS (UTRAN¹⁴) e o terminal móvel (TM). A CN é o coração da rede UMTS, tem como funções comutar e reencaminhar o tráfego de cada utilizador. Além disso é o bloco onde se situam as bases de dados e funções de gestão de rede, essenciais para o funcionamento do sistema [4].

Uma grande vantagem do UMTS é o facto de ser possível implementá-lo sobre a estrutura do GSM existente, em que certos elementos da rede, tais como o MSC¹⁵, SGSN¹⁶ e o HLR¹⁷

⁹ Frequency Division Duplex.

¹⁰ Time Division Duplex.

¹¹ Orthogonal Variable Spreading Factor.

¹² Spreading Factor.

¹³ Core Network.

¹⁴ UMTS Terrestrial Access Network.

¹⁵ Mobile Switching Center.

¹⁶ Serving GPRS Support Node.

podem ser actualizados de forma a poderem suportar todos os requisitos do UMTS. No entanto, a rede de acesso rádio tem de ser completamente reformulada, Figura 2.1. A UTRAN é formada por vários *Radio Network Subsystems* (RNS), em que cada um destes RNS é constituído por um *Radio Network Controller* (RNC) e por um ou mais *Node B*. Para ligar os vários elementos da rede, foram definidas 4 tipos de interfaces: Uu (entre o TM e o *Node B*), Iub (entre o *Node B* e o RNC), Iur (para interligar 2 RNC), e o Iu (entre a RNC e a CN).

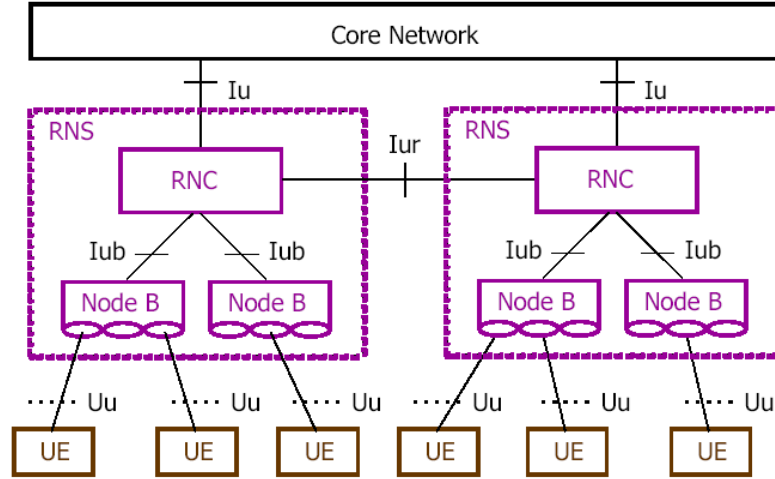


Figura 2.1 - Estrutura da rede UTRAN (extraído de [2]).

De entre as principais funções de RNC destacam-se o controlo dos recursos rádio, o controlo de admissão, a reserva de canais, as definições do controlo de potência, o controlo de *Handover*, a macro-diversidade, cifra, a segmentação/reunião, a transmissão do sinal e controlo de potência em malha aberta. Algumas das funções desempenhadas anteriormente pela CN do sistema GSM, nomeadamente as de gestão central dos elementos da RNS (RNC e *Node B*), são agora completamente asseguradas pela respectiva RNC, libertando a CN dessa carga.

2.3. Capacidade e Interferência

No UMTS, a capacidade de cada célula é imposta essencialmente pelo número de utilizadores, e pelo tipo de serviço que usam [3]. O sistema é tipicamente limitado pelo nível máximo de interferência que permita manter uma QoS aceitável, interferência esta que é causada pela existência e proximidade de outros utilizadores na célula. Deste modo, o sistema deve analisar sempre a interferência, em UL e DL, que uma nova ligação provoca nas ligações existentes, usando-se para isso o factor de carga.

O factor de carga para UL é dado pela expressão (2.1):

$$\eta_{UL} = (1+i) \sum_{j=1}^{N_u} \frac{1}{1 + \frac{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j \cdot R_j \cdot v_j}{R_c}} \quad (2.1)$$

¹⁷ Home Location Register.

onde:

- N_u representa o numero de utilizadores,
- $R_c = 3.84$ Mcps é o débito de *chip*,
- R_j é o débito binário do utilizador j ,
- $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j$ é a relação sinal-ruído do utilizador j ,
- v_j é o factor de actividade do utilizador j ,
- i representa o quociente ente a interferência proveniente de outras células e a interferência da própria célula.

Em DL o factor de carga é dado pela expressão:

$$\eta_{DL} = \sum_{j=1}^{N_u} v_j \cdot \frac{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j}{\frac{R_c}{R_j}} \cdot [(1 - \alpha_j) + i_j] \quad (2.2)$$

onde:

- α_j representa o factor de ortogonalidade dos códigos em DL.

Uma das principais diferenças entre o DL e o UL é o parâmetro de ortogonalidade dos códigos. Como já foi visto anteriormente, o WCDMA usa códigos ortogonais no DL para a separação dos utilizadores, pelo que se poderia pensar que o número de utilizadores dependesse do número de códigos ortogonais que se conseguir arranjar. Este facto não é verdade, pois com a propagação por multipercurso vai existir atraso de potência no canal rádio, o que faz com que os sinais deixem de ser totalmente ortogonais provocando interferência. Outras diferenças são a interferência inter-célula com o DL a depender da localização dos utilizadores, a potência transmitida pela EB quando dividida por todos os utilizadores, e a sua distribuição depender da posição de cada terminal.

Com o cálculo do factor de carga pode-se calcular a margem de interferência pela expressão:

$$M_I = -10 \log(1 - \eta) \quad (2.3)$$

Assim, pode-se claramente concluir que quanto maior for a carga maior será a interferência entre utilizadores, diminuindo portanto a capacidade da célula.

A potência de transmissão da antena da EB é partilhada por todos os utilizadores, pelo que, para o dimensionamento do DL é importante fazer uma estimativa da potência de transmissão total, necessária para uma dada EB. Essa estimativa pode se obtida por:

$$P_{Tx}^{EB} = \frac{N_0 R_c \sum_{j=1}^M v_j \frac{(E_b/N_0)_j}{R_c/R_j} L_j}{1 - \eta_{DL}} \quad (2.4)$$

em que:

- L_j caracteriza a atenuação de propagação entre o TM e a EB,

- N_0 é a densidade de potência de ruído dada pela seguinte expressão:

$$N_{0[\text{dB/Hz}]} = k_B T_{[\text{dB}]} + NF_{[\text{dB}]} \quad (2.5)$$

onde:

- k_B é a constante de Boltzman ($k_B = 1.380658 \times 10^{-23}$ J/K),
- T designa a temperatura em grau Kelvin,
- NF representa o factor de ruído do TM.

Ao analisar (2.4) é possível verificar que a atenuação de propagação é um factor preponderante para o cálculo da potência de transmissão da EB. Deste modo, é necessário obter uma correcta estimacão do seu valor, de maneira a evitar erros de dimensionamento da potência de transmissão necessária na EB, optimizando assim a capacidade da célula. No Capítulo 3 é feito um estudo mais aprofundado do cálculo da atenuação de propagação.

Para um correcto dimensionamento de uma célula, a nível da cobertura, capacidade e optimização, é necessário caracterizar a atenuação máxima de propagação admitida. Assim sendo, é de vital importância a análise dos balanços de potência.

A atenuação de propagação é dada por [2]:

$$L_{P[\text{dB}]} = P_{e[\text{dBm}]} + G_{e[\text{dBi}]} - P_{r[\text{dBm}]} + G_{r[\text{dBi}]} \quad (2.6)$$

onde:

- P_e representa a potência de emissão aos terminais da antena,
- G_e é o ganho da antena de emissão,
- P_r caracteriza a potência de recepção disponível aos terminais da antena,
- G_r descreve o ganho da antena de recepção.

Também se pode representar a atenuação de propagação pela expressão:

$$L_{P[\text{dB}]} = EIRP_{[\text{dBm}]} - P_{r[\text{dBm}]} + G_{r[\text{dBi}]} \quad (2.7)$$

Uma vez que a EB e o TM são dispositivos diferentes, é necessário contabilizar essas diferenças quando se está a referir ao sentido ascendente ou ao sentido descendente da comunicação. Desse modo, no Anexo C é feita uma análise das diferenças entre os dois sentidos.

3. Modelos de Propagação

3.1. Considerações Iniciais

Em comunicações móveis, como a propagação das ondas rádio entre a EB e o TM se processa em condições não ideais, tem que ser tido em conta o ambiente envolvente, nomeadamente vegetação, irregularidades no solo, edifícios, entre outros factores. Os fenómenos que influenciam a propagação podem ser descritos por quatro mecanismos básicos: reflexão, refacção, difracção e dispersão.

O fenómeno da reflexão consiste num raio incidente que é reflectido com o mesmo ângulo de incidência, mas com a possibilidade de se modificar na amplitude e na fase, dependendo das características do meio onde esta ocorre, enquanto que a refacção é um fenómeno associado à reflexão, no qual uma onda é transmitida através da superfície onde ocorre a incidência, com um ângulo, amplitude e fase diferentes da onda incidente. A difracção é um fenómeno de propagação que permite transições não abruptas entre uma região iluminada e uma região de sombra, sendo possível a recepção de sinal num TM na sombra da EB; normalmente, este fenómeno ocorre no topo e nas esquinas dos edifícios. Por último, a dispersão consiste na distribuição de energia em várias direcções da onda incidente numa superfície rugosa.

Estes fenómenos provocam alterações na direcção, na amplitude e na fase do sinal que chega à antena de recepção, isto é, aumentam o multipercurso e a atenuação do sinal. Esta conjugação de factores leva à variação no tempo da potência do sinal recebido, ou seja, o sinal apresenta flutuações (por vezes de grande amplitude) em torno do seu valor médio, sendo este fenómeno vulgarmente designado por desvanecimento.

A variação da potência do sinal ao longo do espaço e do tempo pode ser lenta ou rápida, ou seja, pode existir desvanecimento lento ou rápido. O desvanecimento lento deve-se essencialmente à presença de sucessivos obstáculos que criam o efeito sombra mediante a variação da distância entre a EB e o TM, sendo usualmente caracterizado pela distribuição log-normal. Relativamente ao desvanecimento rápido, este está associado ao multipercurso, isto é, o sinal na antena de recepção resulta de mais do que um percurso distinto, provocando assim diferenças de fase entre cada um dos sinais recebidos, podendo levar à sua ampliação, ou à sua anulação. O desvanecimento rápido pode ser modelado pelas distribuições de Rayleigh ou Rice: a distribuição de Rayleigh é usada para caracterizar o sinal quando não existe linha de vista entre a EB e o TM, enquanto que a distribuição de Rice caracteriza o sinal quando existe linha de vista.

Para uma melhor compreensão do comportamento da potência do sinal ao longo da distância, pode ser visto na Figura 3.1 o resultado das medidas efectuadas por um TM [5]. É possível observar que o seu valor médio tende a diminuir com a distância, e que existem flutuações do sinal devido aos desvanecimentos lento e rápido.

Para um correcto dimensionamento de uma rede de comunicações móveis devem-se considerar margens de desvanecimento que contabilizem a variação do sinal em torno dos valores médios. Para a implementação de um sistema de comunicações móveis, é indispensável recorrer a modelos que contabilizem as características de propagação do meio envolvente, de modo a se obter uma estimativa do sinal, possibilitando assim, uma cobertura eficiente e fiável.

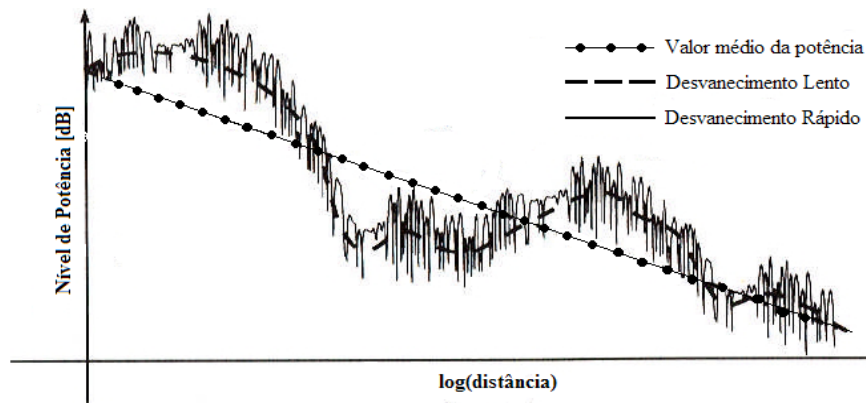


Figura 3.1 - Potência recebida por um TM em função da sua distância à EB
(adaptado de [5]).

Os modelos de propagação dividem-se em duas grandes categorias: teóricos e empíricos. Os modelos teóricos apresentam resultados em que descrevem a realidade electromagnética e o meio envolvente com algum rigor; no entanto, têm como desvantagens a pouca mobilidade entre cenários e o facto de não contabilizarem todos os factores que influenciam o sinal, apesar de permitirem uma fácil alteração dos valores dos parâmetros. Os modelos empíricos baseiam-se em medidas reais que levam à formulação de equações que melhor se adequam a essas medidas, têm como vantagens a abordagem de cenários muito mais complexos, pois as medidas contabilizam todos os factores que afectam a propagação, mas têm como desvantagem serem limitados à zona das medidas, pelo que a sua extrapolação para outras áreas necessita de validação, uma vez que os novos ambientes em causa podem ter características de propagação diferentes do ambiente inicial. Actualmente existem modelos que podem ser simultaneamente empíricos e teóricos proporcionando uma melhor estimativa do sinal.

A aplicação dos modelos de propagação requer um conhecimento prévio do ambiente onde é aplicado, sendo importante classificar os ambientes. Usualmente são levados em conta para a sua classificação os seguintes parâmetros: ondulação do terreno, densidade da vegetação, densidade e altura dos edifícios, existência de áreas abertas e existência de superfícies aquáticas. Assim sendo, os ambientes são geralmente classificados em três grandes categorias:

- rural - espaço aberto onde não existem obstáculos consideráveis ao percurso do raio directo;
- suburbano - existência de alguns obstáculos perto do TM, por exemplo vilas ou vias rodeadas de árvores e edifícios dispersos;
- urbano - zona com grande densidade de urbanização, com edifícios de dois ou mais andares, nomeadamente grandes cidades.

Para além da classificação do ambiente, é também importante caracterizar as áreas de serviço onde os modelos são aplicados, ou seja, definir claramente as células de acordo com as suas características. Segundo [6], as células podem ser classificadas em quatro tipos: macro-células grandes, macro-células pequenas, micro-células e pico-células. As macro-células grandes são usadas para ambientes exteriores com antenas das EBs, colocadas acima do nível médio dos telhados e em que todos os edifícios circundantes estão abaixo da altura da EB, atingindo coberturas até 30 km. Relativamente às macro-células pequenas, também são aplicadas em ambientes exteriores e colocadas acima do nível médio dos telhados, mas alguns edifícios circundantes podem estar acima da altura da EB, sendo a cobertura limitada até 3 km. Quanto

às micro-células, a sua cobertura vai até 1 km, aplica-se a ambientes exteriores e é usualmente montada abaixo do nível médio dos telhados dos edifícios. As pico-células têm um alcance até 500 m e são colocadas em ambientes interiores ou exteriores (abaixo do nível dos telhados).

Após a definição e caracterização dos cenários previsíveis para as comunicações móveis pode-se começar a descrever os diversos modelos de propagação, nomeadamente os modelos adequados ao UMTS. Uma vez que muitos dos modelos existentes cobrem frequências abaixo da frequência de trabalho do UMTS, foram então escolhidos os modelos formulados pelo COST231 e 3GPP que abrangem as frequências pretendidas.

3.2. Modelo COST 231 – Walfisch – Ikegami

O COST 231 propôs dois modelos [6], um para ambientes suburbanos, COST 231 – Hata que se encontra descrito detalhadamente no Anexo D, baseado no modelo de Hata [7], Anexo E, e outro para ambientes urbanos, COST 231 – Walfisch – Ikegami. Este último resulta da combinação de outros dois: Walfisch e Bertoni [8] e Ikegami *et al.* [9], aferidos com os resultados de medidas efectuadas em cidades europeias. O modelo de Walfisch e Bertoni permite contabilizar as perdas entre a antena da EB e o topo do último edifício antes do móvel, considerando que os edifícios têm alturas aproximadamente uniformes, enquanto que o modelo de Ikegami *et al.* contabiliza as perdas que o sinal sofre desde o topo do último edifício, partindo do campo aí existente, até ao TM. Esta conjugação de modelos com as medidas efectuadas veio melhorar a estimação da atenuação de propagação, uma vez que são considerados mais aspectos que permitem descrever melhor a estrutura urbana, Figura 3.2, tais como: altura dos edifícios, largura das ruas, distância de separação entre edifícios e o ângulo que a rua faz com o raio directo (ϕ),

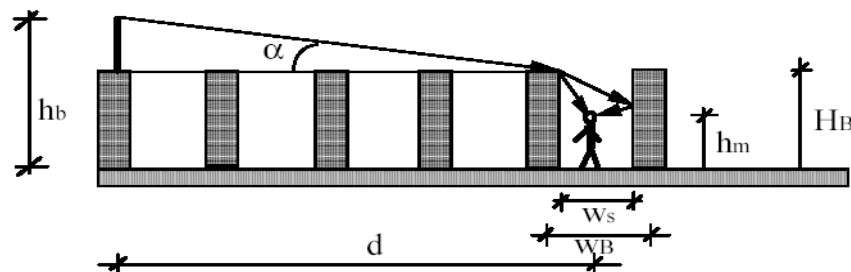


Figura 3.2 - Descrição geométrica do modelo (extraído de [2]).

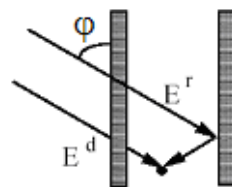


Figura 3.3 - Ângulo que a rua faz com o raio directo (extraído de [2]).

Neste modelo é possível distinguir duas situações: quando existe linha de vista (LoS¹⁸) e quando não existe linha de vista (NLoS¹⁹) entre a EB e o TM. Na situação de linha de vista

¹⁸ Line-of-Sight

em que a propagação se faz na direcção de uma rua ($\varphi = 0$), a atenuação de propagação é dada pela expressão (3.1), baseada em medidas realizadas na cidade de Estocolmo.

$$L_p \text{ [dB]} = 42.6 + 26 \log(d_{\text{[km]}}) + 20 \log(f_{\text{[MHz]}}) \quad , \quad d \geq 20 \text{ m} \quad (3.1)$$

Quando não existe linha de vista, é possível dividir o modelo em três termos: L_0 , L_{rts} e L_{msd} . O 1º termo, L_0 , traduz a atenuação que o sinal sofre em espaço livre; o segundo, L_{rts} , contabiliza as perdas que o sinal sofre desde o topo do último edifício até ao TM e baseia-se no modelo proposto por Ikegami *et al.*; o último termo, L_{msd} , diz respeito às perdas que o sinal sofre por difracção no topo dos edifícios entre a EB e o topo do edifício antes do TM, sendo este resultado baseado num estudo primeiramente realizado por Walfisch e Bertoni.

A conjugação destes três termos permite chegar à expressão da atenuação total:

$$L_p \text{ [dB]} = \begin{cases} L_0 \text{ [dB]} + L_{rts} \text{ [dB]} + L_{msd} \text{ [dB]} & , \quad L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 \text{ [dB]} & , \quad L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

No Anexo F é apresentada uma descrição mais detalhada deste modelo.

De modo a ser possível compreender o peso de cada parâmetro de entrada no resultado final do modelo, no Anexo G encontra-se uma análise da variação dos termos de atenuação com os diferentes parâmetros de entrada, onde se pode verificar que a distância e a diferença de alturas entre as antenas e os edifícios são os parâmetros mais sensíveis para o cálculo da atenuação de propagação.

3.3. Modelos do 3GPP

O 3GPP [10] define 2 modelos de propagação para a caracterização das perdas entre a EB e o TM, sendo cada um desses modelos referido a um tipo de ambiente celular: macro ou micro-celular. No entanto, há que realçar a existência de alguma indefinição e por vezes alguns erros na descrição desses modelos pelo 3GPP, com mais incidência para o modelo para micro-células, o que levou os autores deste trabalho a apresentar os modelos de forma limitada. O modelo para macro-células é aplicável a cenários urbanos e suburbanos em que os edifícios têm uma estrutura uniforme. Este modelo é o proposto por Walfisch e Bertoni [8], mas ajustado através de medidas efectuadas em ambientes urbanos [11], obtendo-se assim:

$$L_p \text{ [dB]} = -10 \log \left[\left(\frac{\lambda_{\text{[m]}}}{4\pi d_{\text{[m]}}} \right)^2 \right] - 10 \log \left[\frac{\lambda_{\text{[m]}}}{2\pi^2 r_{\text{[m]}}} \left(\frac{1}{\theta_{\text{[rad]}}} - \frac{1}{2\pi + \theta_{\text{[rad]}}} \right)^2 \right] \\ - 10 \log \left[\frac{2.35^2}{d_{\text{[m]}}^{2(1-0.004\Delta h_b \text{ [m]})}} \left(\Delta h_m \text{ [m]} \sqrt{\frac{b_{\text{[m]}}}{\lambda_{\text{[m]}}}} \right)^{1.8} \right] \quad (3.3)$$

onde:

¹⁹ Non-Line-of-Sight

- Δh_b é a diferença entre a altura da antena da EB e a altura dos edifícios,
- b é a separação média entre edifícios.
- r é a distância entre o telhado do edifício e o TM como se pode ver na Figura 3.4, que pode ser expresso pela seguinte equação:

$$r_{[m]} = \sqrt{(\Delta h_{m[m]})^2 + x_{[m]}^2} \quad (3.4)$$

- θ é definido pela seguinte expressão:

$$\theta_{[\text{rad}]} = \tan^{-1} \left(\frac{|\Delta h_{m[m]}|}{x_{[m]}} \right) \quad (3.5)$$

sendo:

- Δh_m a diferença entre a altura dos edifícios e a altura do TM,
- x a distância horizontal entre o TM e o edifício.

No Anexo H pode ser analisado a influência dos vários parâmetros de entrada na atenuação de propagação do 3GPP macro-celular, em que se pode verificar que a distância da EB ao TM e a separação entre edifícios são os parâmetros mais sensíveis.

O primeiro parâmetro de (3.3) representa a atenuação em espaço livre, enquanto que o segundo contabiliza as perdas que ocorrem no topo do último edifício antes do TM. O terceiro parâmetro modela a atenuação provocada pela difracção do sinal no topo dos edifícios.

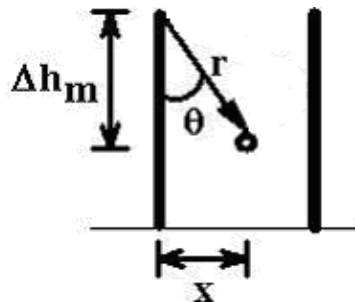


Figura 3.4 - Visualização das variáveis θ e r .

Este modelo tem algumas limitações: apenas é válido para distâncias superiores a algumas centenas de metros, só pode ser aplicado quando Δh_b está compreendido entre 0 e 50 m, e a atenuação de propagação nunca poderá ser inferior à atenuação em espaço livre.

3.4. Influência dos Cruzamentos

Os modelos apresentados não englobam todos os fenómenos envolvidos na ligação entre a EB e o TM, considerando apenas que o sinal se propaga através dos principais mecanismos de propagação, tais como por difracção no topo dos edifícios entre a EB e o topo do último edifício antes do TM, e a difracção que o sinal sofre desde o topo desse último edifício até ao TM. No entanto, existe um fenómeno que pode contribuir significativamente para a redução da atenuação do sinal que é a propagação guiada do sinal no interior das ruas laterais. Este efeito pode fazer-se notar quando o TM se encontra na proximidade de um cruzamento, onde os sinais provenientes das ruas laterais podem contribuir para um aumento do nível médio do

sinal recebido. Assim sendo, foi desenvolvido por Gonçalves [12], um modelo que permite contabilizar a influência dos cruzamentos, baseado no método das imagens e na Teoria Uniforme da Difracção.

Na Figura 3.5 pode ser vista a geometria do modelo, bem como os seus principais parâmetros geométricos: φ_c representa o ângulo entre o eixo da rua, onde o TM se desloca, e o segmento que liga a EB ao centro do cruzamento, d_c a distância da EB ao centro do cruzamento, w_s a largura da rua e Δh_b a altura efectiva da EB.

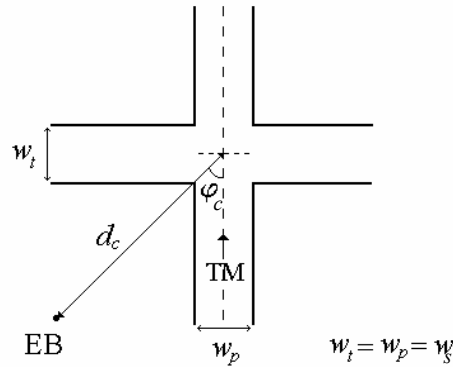


Figura 3.5 - Geometria de um cruzamento considerado no Modelo Gonçalves (extraído de [13]).

A Figura 3.6 representa a redução do sinal em função da distância do TM ao centro do cruzamento d_{via} . Ao mesmo tempo, pode-se observar um decréscimo exponencial da redução da atenuação de propagação, L_{cruz} , na zona onde o cruzamento tem influência no sinal.

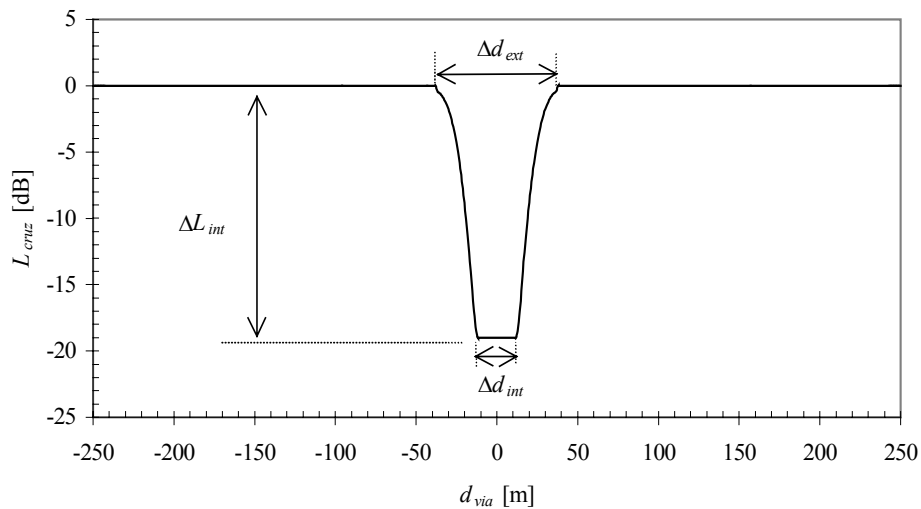


Figura 3.6 - Variação da atenuação de propagação devido à influência de um cruzamento, para $\varphi_c = 90^\circ$, $d_c = 500$ m, $w_s = 25$ m e $\Delta h_b = 3$ m (extraído de [13]).

As expressões que permitem determinar os valores de L_{cruz} , ΔL_{int} , Δd_{int} e Δd_{ext} , são apresentadas no Anexo I. Este modelo fornece o valor de redução da atenuação de propagação L_{cruz} , que deverá ser adicionada à atenuação de propagação obtida pelos modelos descritos anteriormente. Deste modo, este modelo funciona como complemento aos outros modelos.

4. Implementação dos Modelos

4.1. Sistemas de Informação Geográfica

Na elaboração do algoritmo para a aplicação dos modelos foi necessário recorrer a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), nomeadamente a aplicação *MapInfo* [14]. Os SIGs permitem visualizar, manipular e analisar dados espaciais, integram várias camadas de informação de uma região como se vê na Figura 4.1, de modo a proporcionar uma perspectiva de análise mais profunda e precisa ao utilizador. As suas áreas de aplicação são tão vastas que vão desde a gestão de ecossistemas, monitorização de focos de poluição, modelação de futuras tendências de mercado, e planeamento de redes de telecomunicações, até ao cálculo das atenuações de propagação em ambientes urbanos que é o âmbito deste trabalho.



Figura 4.1 - Sobreposição de camadas de informação (extraído de [15]).

Os dados de entrada de uma ferramenta SIG podem ser do formato vectorial ou formato *raster*. O formato vectorial utiliza objectos que são caracterizados por segmentos de recta ou pontos. O formato *raster*, também conhecido por matricial, consiste, como se pode ver na Figura 4.2, na divisão da zona de estudo numa grelha regular de células (*pixels*), permitindo representar objectos de formas complexas num formato simples de os analisar.

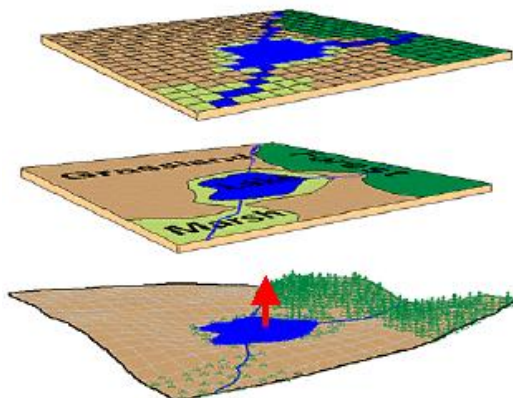


Figura 4.2 – Construção do formato matricial (extraído de [15]).

Cada célula contém informação numérica que pode ser do tipo números inteiros, reais ou bytes. A esta informação corresponde um atributo específico que está contido numa base de dados, mas que tem correspondência directa a cada uma das células. Os dados da matriz, por

convenção, são extraídos de um ficheiro com uma coluna, em que cada linha dessa coluna tem a informação correspondente a uma célula, ficheiro que no *MapInfo* é do formato *mid*. Por outro lado, com um ficheiro tipo *mif* correspondente à matriz com $n \times m$ campos georeferenciados mas sem informação, é possível preencher a matriz de uma forma sequencial com a informação contida em cada linha do ficheiro *mid*. Esta operação é elucidada na Figura 4.3.

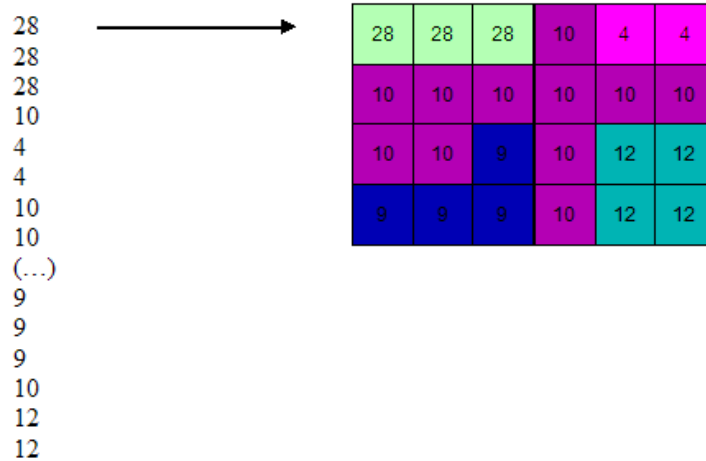


Figura 4.3 - Princípio de funcionamento da construção do formato matricial.

Este formato, ao disponibilizar *pixels* com informação, é o que melhor se enquadra para a elaboração do algoritmo dos modelos de propagação, uma vez que, cruzando a informação de várias tabelas, é possível obter todas as características do terreno necessárias para o cálculo dos parâmetros dos modelos.

4.2. Estrutura do Algoritmo

A ferramenta comporta três modos de funcionamento: Ponto Localizado, Figura 4.4, Contínuo, Figura 4.5, e Cobertura, Figura 4.13. O Modo Ponto Localizado, como o próprio nome indica, permite ao utilizador posicionar o TM num ponto qualquer do mapa, e a partir daí a ferramenta calcula a atenuação sofrida pelo sinal entre a EB e o TM, bem como a potência recebida pelo TM, com base no perfil do terreno entre os dois pontos.

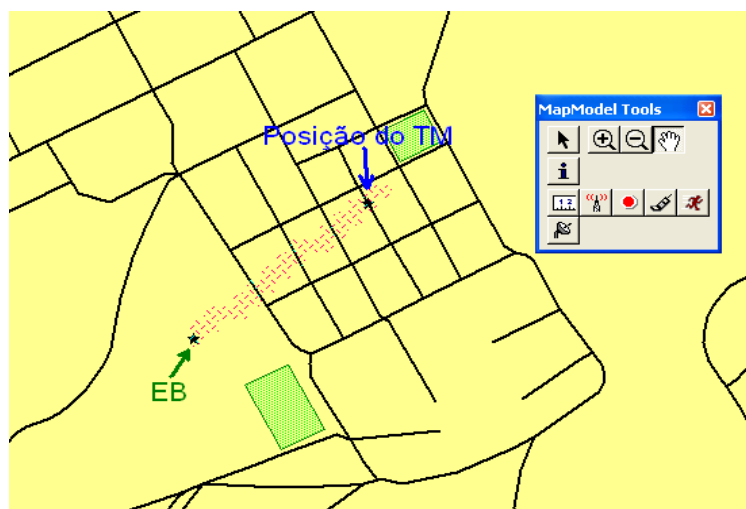


Figura 4.4 – Exemplificação do Modo Ponto Localizado.

O Modo Contínuo dá a possibilidade do utilizador marcar numa rua uma posição inicial do TM e uma final; com essas referências, a aplicação extrai perfis entre a EB e cada uma das posições do TM, espaçadas de uma distância Δs da posição anterior, e com base nesses perfis, a ferramenta calcula a respectiva atenuação de propagação e potência recebida pelo TM.

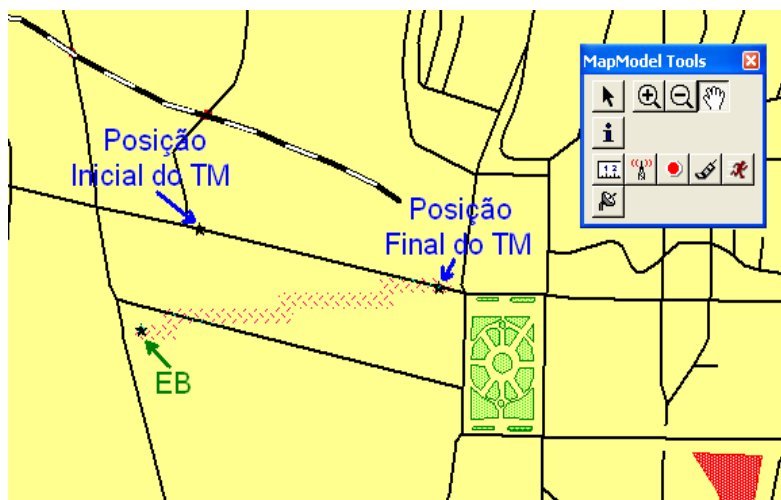


Figura 4.5 – Exemplificação do Modo Contínuo.

O Modo Cobertura permite estimar a cobertura de uma EB para os diferentes tipos de serviço até a um determinado raio limite especificado pelo utilizador, para isso, a ferramenta desenha circunferências centradas na posição da EB com raios de $20 \times m$, em que m é o número de circunferências traçadas até que o raio atinja a distância estipulada. Para além disso, esta opção também permite estimar o raio de alcance de uma EB para cada um dos diferentes tipos de serviço. Para tal, compara a potência recebida dos *pixels* de 10 circunferências seguidas com a sensibilidade de cada serviço, verificando se 80% de todos esses *pixels* apresentam potências inferiores à sensibilidade da voz. Se isso se verificar, o simulador MapModel pára o processo e desenha a cobertura de cada um dos serviços; caso não se verifique, o simulador repete o processo para mais 10 circunferências. Este modo testa a cobertura da EB para a situação mais desfavorável, isto é, no sentido ascendente, que é quando a potência de emissão em causa é mais baixa.

O algoritmo para a implementação dos modelos é feito em *MapBasic* [14] e *C++* [16]. O *MapBasic* trata-se de uma linguagem de programação que interage com o *MapInfo*, que permite manipular tabelas de informação de modo a extrair com alguma precisão a informação necessária para o cálculo dos modelos, gerir a interface com o utilizador, bem como a representação dos resultados. Uma vez que o processamento do código em *MapBasic* é muito lento, foi usada outra linguagem de programação que tem como entrada a informação extraída pelo *MapBasic*, isto é, foi escolhido o *C++* como linguagem complementar, pois é uma linguagem mais completa e eficiente. Esses dados são tratados de maneira a serem obtidos os parâmetros de entrada para os modelos, sendo depois calculada a atenuação. Como saída, o *C++* devolve para o *MapBasic* os valores de atenuação pretendidos. Através da Figura 4.6 é possível ver esquematicamente a funcionalidade da aplicação.

No algoritmo em *MapBasic*, através das tabelas de entrada, é construído um mapa da cidade com toda a informação necessária. Após o utilizador inserir todos os parâmetros de entrada (ex: posição EB, posição TM, frequência, etc.) é traçado um perfil entre a EB e o TM, sendo

extraída a informação dos *pixels* que o intersectam em cada uma das camadas. Seguidamente, a informação retirada de cada camada é escrita num ficheiro que vai depois ser utilizado pelo algoritmo de C++. Na opção Modo Contínuo, esta operação é repetida várias vezes até que a posição do TM seja igual à posição final estipulada pelo utilizador; por outro lado, no Modo Ponto Localizado esta operação é só efectuada uma vez; no Modo Cobertura esta acção é repetida até serem obtidos todos os perfis num determinado raio. De maneira a elucidar o algoritmo numa forma mais detalhada, encontram-se no Anexo J os fluxogramas destes três modos de funcionamento, bem como do algoritmo em C++. Na Figura 4.7 encontra-se o fluxograma simplificado da estrutura do simulador MapModel.

Após o *MapBasic* escrever os ficheiros com os dados do perfil para cada uma das camadas, o algoritmo em C++ vai organizar a informação, transpondo-a para uma lista de dados. Essa lista tem um número de estruturas igual ao número de *pixels* de uma camada num perfil. Cada uma dessas estruturas tem cinco campos: cota do terreno, vias, tipo de terreno, altura dos edifícios e distância à EB. A informação da altura dos edifícios é estimada recorrendo à Tabela 4.1, que representa a correspondência que a Vodafone utiliza entre tipo de edifícios e altura média. A distância à EB é dada em relação ao ponto do *pixel* mais próximo da EB.

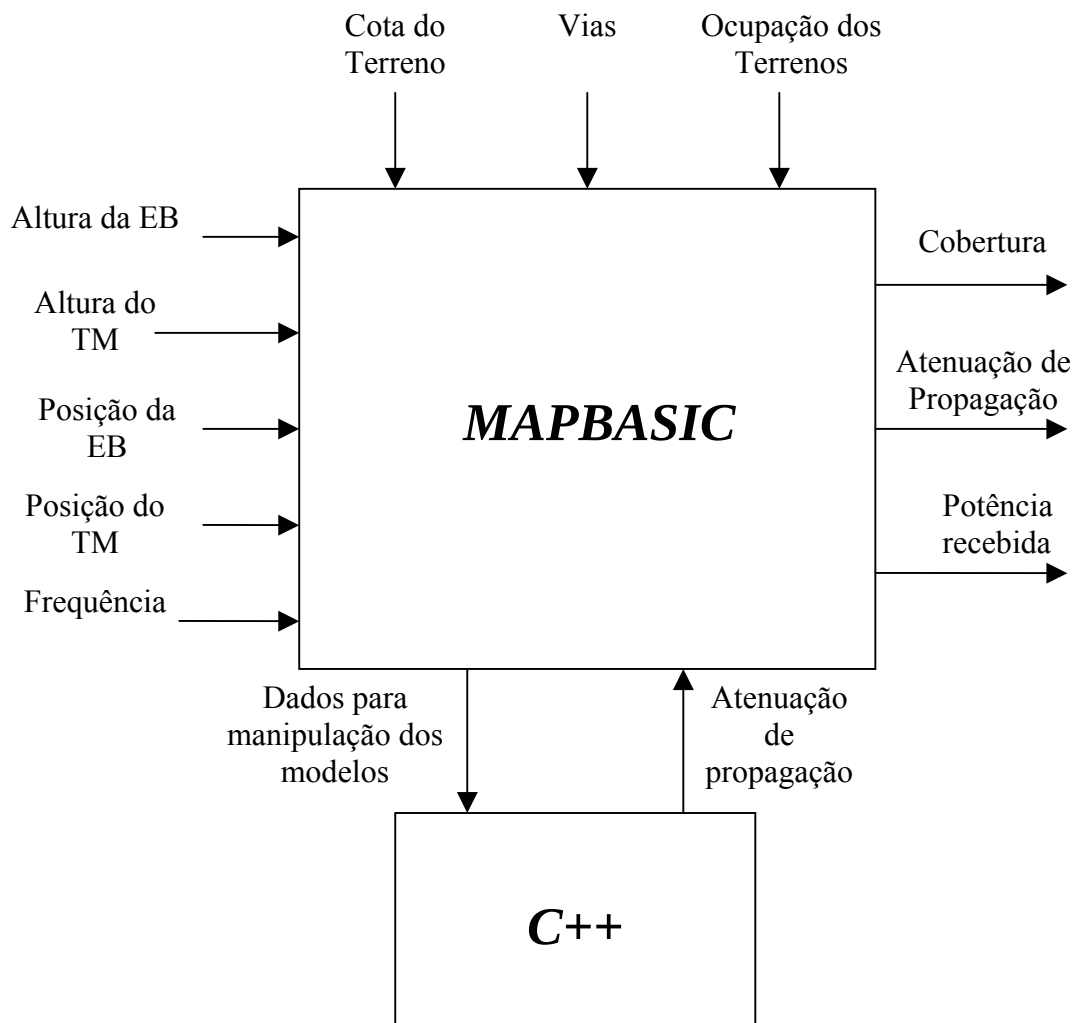


Figura 4.6 - Diagrama de blocos da ferramenta desenvolvida.

No fim do C++ organizar a lista de dados, vai manipular os dados de modo a obter os valores dos parâmetros de entrada do modelo COST 231 – Walfisch - Ikegami ou do 3GPP para

macro-células, consoante o modelo escolhido pelo utilizador, calculando depois o valor da atenuação de propagação. Se estiver activada a opção Modo Contínuo, antes dos resultados serem enviados para o *MapBasic*, é determinada a potência de recepção para cada um dos perfis de terreno através da atenuação. O algoritmo em *Mapbasic* é depois responsável pela representação dos dados de saída e pelo cálculo da potência de recepção, caso a operação seja o Modo Cobertura. De notar que na opção Cobertura, para a estimação do sinal, só é usado o modelo COST231 –Walfisch – Ikegami, uma vez que é um modelo que tem as suas condições de validade bem definidas, ao contrário do modelo do 3GPP em que as distâncias máxima e mínima de validade do modelo não são definidas .

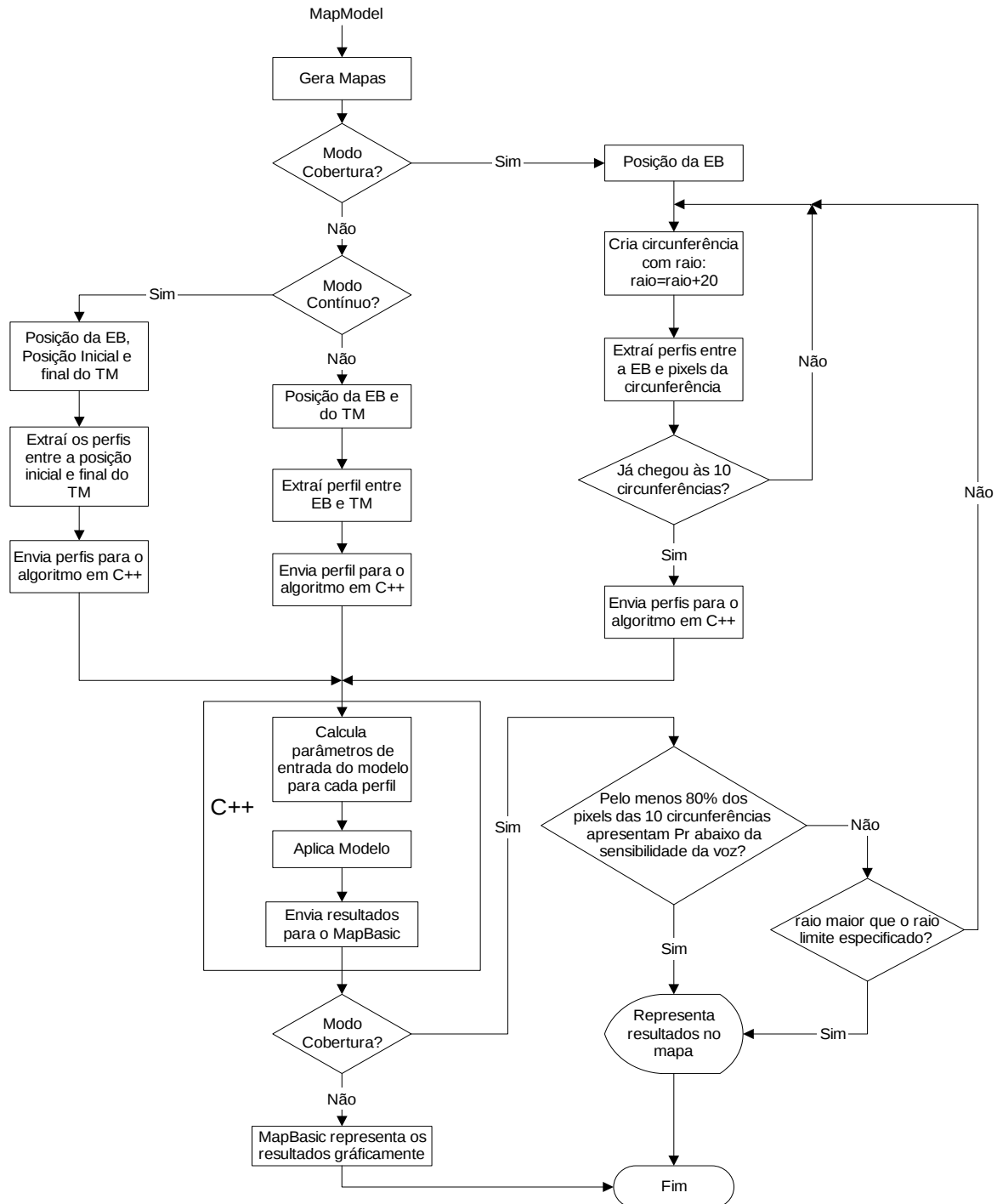


Figura 4.7 – Fluxograma geral do algoritmo.

De referir que algumas partes do código do *software* foram baseados em [13], nomeadamente o cálculo da altura média dos edifícios, ganho da EB e a influência dos cruzamentos na atenuação.

4.3. Parâmetros de Entrada

No *software*, para além dos parâmetros de entrada inseridos pelo utilizador como a altura da EB, altura do TM, posição da EB, posição do TM, frequência, etc., existem outros de extrema importância para o funcionamento do programa, nomeadamente as tabelas de informação geográfica, e os parâmetros de entrada do modelo de propagação obtidos através da manipulação dos dados.

As tabelas de informação geográfica são essenciais pois, como já se viu anteriormente, permitem ser sobrepostas de modo a extrair vários tipos de informação num perfil. Deste modo, através da informação gentilmente fornecida pela Vodafone em formato vectorial para as ruas e em formato matricial para a caracterização do tipo e altura de terreno, foi necessário converter o formato vectorial das ruas para o formato matricial. Esta operação foi morosa, nomeadamente para a cidade do Porto uma vez que a caracterização do terreno e altura do terreno tinha uma georeferenciação diferente da do formato vectorial, i.e., as coordenadas do tipo de terreno eram cartesianas com uma projecção do tipo *Non-Earth*, e as vectoriais eram esféricas com uma projecção Latitude/Longitude. Foi necessário voltar a georeferenciar o formato vectorial para uma projecção cartésiana. Esta mudança de projecções de coordenadas esféricas para um plano de coordenadas cartesianas tem de ser efectuada com muito cuidado, pois, como se sabe, a projecção de uma esfera num plano não pode ser feita sem distorções, deste modo, é essencial usar uma projecção que minimize o erro. Assim, usando uma projecção *Transverse Mercator*, as distâncias e as direcções podem ser preservadas na transformação sem erro significativo; a projecção desse tipo que melhor se enquadra para a zona de Portugal Continental é a *Universal Transverse Mercator Zona 29 (ED50)*. Com a conversão do formato vectorial para essa nova projecção, converteu-se o formato vectorial para matricial, e ao mesmo tempo foi necessário georeferenciar as tabelas que caracterizam o tipo de terreno e altura do terreno, para essa nova projecção.

Após a conversão de todas as tabelas com informação do terreno para a mesma projecção e com uma resolução de 20 m, foi possível sobrepor-las permitindo assim uma caracterização razoável do terreno, quer para Lisboa quer para o Porto. As tabelas utilizadas para caracterizar as cidades foram as seguintes:

- **Cota do terreno**, que contém para cada célula a informação do valor médio de altura do terreno, onde se consideram *pixels* quadrados com 20 m de lado. Na Figura S.1, referente a Lisboa, pode ser vista a representação gráfica da cota do terreno.
- **Tipo de ocupação do terreno**, representado graficamente na Figura S.2, em que cada célula de informação contém um valor que corresponde a uma descrição do terreno nos 400 m² caracterizados pelo *pixel*. Para elucidar essa correspondência pode ser analisada na Tabela 4.1 a classificação da Vodafone.

Tabela 4.1 - Classificação do terreno e respectiva altura média.

Código	Classificação	Valor médio da altura dos edifícios [m]
0	Não classificado	-
1	Área aberta	-
2	Mar	-
3	Rios, lagos e canais	-
4	Residencial	10
5	Urbano médio	25
6	Urbano denso	30
7	Edifícios altos	60
8	Habitações baixas	10
9	Industria	15
10	Área aberta em meio urbano	-
11	Floresta	-
12	Parque	-
27	Bloco de edifícios	10
28	Bloco de edifícios denso	10

- **Vias**, apresentadas na Figura S.3, que são tabelas que contêm um valor de 0 a 15, em que o zero corresponde às posições em que não existe nenhuma via, enquanto os outros valores indicam a presença desta. A existência de via é numerada de 1 a 15. Essa numeração vai representar quais os *pixels* adjacentes que também são via, facultando assim a hipótese de identificar facilmente quais os que correspondem a cruzamentos (7, 11, 13, 14 e 15), de modo a poder ser contabilizada a influência dos cruzamentos (Modelo Gonçalves). A tabela das vias de Lisboa fornecidas pela Vodafone, infelizmente, não tem em conta todas as ruas da cidade, apenas as principais, o que torna os resultados do software limitados para Lisboa. Pelo contrário a tabela das vias para a cidade do Porto contabiliza todas as ruas, o que viabiliza a aferição do modelo, uma vez que as medidas no campo foram efectuadas no Porto como irá ser explicado no Capítulo 5.

Deste modo, através do cruzamento da informação das tabelas é possível obter todas as características do terreno necessárias para o cálculo dos parâmetros dos modelos.

Os modelos base usados no software são o modelo COST231-Walfisch-Ikegami e o 3GPP para macro-células. Estes modelos consideram edifícios com estrutura uniforme, com alturas e separações idênticas. Como a cidade de Lisboa e do Porto têm poucas zonas com essas características, foi necessário adaptar alguns parâmetros de entrada dos modelos, nomeadamente a altura dos edifícios, a largura das ruas e separação entre edifícios, de maneira a se poder aplicar o modelo em todas as circunstâncias.

Os parâmetros de entrada para o modelo de propagação COST231-Walfisch-Ikegami são:

- d - distância entre a EB e o TM;
- f - frequência;
- w_s - largura das ruas;
- H_B - altura dos edifícios;
- h_m - altura do TM;
- h_b - altura da EB;
- w_B - separação entre edifícios;

- φ - ângulo de rua.

Os parâmetros de entrada para o modelo de propagação 3GPP para macro-células são:

- d - distância entre a EB e o TM;
- f - frequência;
- b - separação média entre edifícios;
- Δh_b - diferença entre a altura da antena da EB e a altura dos edifícios;
- Δh_m - diferença entre a altura dos edifícios e a altura do TM;
- x - distância horizontal entre o M e o edifício.

Como modelo complementar, foi utilizado o modelo Gonçalves, que contabiliza a influência dos cruzamentos no sinal. Os parâmetros de entrada para este modelo são:

- φ_c - ângulo entre o eixo da rua, onde o TM se desloca, e o segmento entre a posição da EB e o centro do cruzamento;
- d_c - distância entre a EB e o centro do cruzamento;
- w_s - largura das ruas;
- Δh_b - diferença entre a altura da antena da EB e a altura dos edifícios;
- d_{via} - distância do móvel ao centro do cruzamento.

De seguida, é explicada a forma como é calculado cada um dos parâmetros de entrada do modelo de propagação COST231-Walfisch-Ikegami. De referir, que os parâmetros: d , f , h_m e h_b são introduzidos pelo utilizador nas definições do simulador MapModel.

Para a **altura dos edifícios** (H_B) optou-se por calcular uma média de alturas. Assim, o algoritmo em C++ vai somar para cada *pixel* do perfil a cota do terreno e a altura dos edifícios (caso existam). Para o primeiro e último *pixel* soma ainda a altura da EB e do TM respectivamente. Seguidamente, para cada um dos *pixels* calcula a altura do raio directo entre a EB e o topo do último edifício antes do TM, e verifica através de (4.1) se esse *pixel* interrompe o primeiro elipsóide de Fresnel. Caso o TM esteja numa posição acima do topo do último edifício, o raio directo é calculado entre a posição da EB e do TM.

$$RaioElipsóide = \sqrt{\frac{d_1(d_2 - d_1)}{d_2} \cdot \lambda} \quad (4.1)$$

onde:

- d_1 corresponde à distância da EB ao *pixel*,
- d_2 é a distância da EB até ao último edifício antes do TM, ou ao TM caso este esteja situado acima do topo do último edifício.

Se o primeiro elipsóide de Fresnel for interrompido, então a soma da cota do terreno e da altura dos edifícios para esse *pixel* é armazenada numa variável. No fim de todos os *pixels* serem verificados é calculada a média das alturas dos edifícios que intersectam o primeiro elipsóide de Fresnel (h_{ed}), uma vez que são estes que contribuem fortemente para a atenuação de propagação. Deste modo, é calculada a altura dos edifícios que vai servir de entrada para o cálculo dos modelos.

No cálculo da **largura das ruas** (w_s) também se adoptou a sua média como parâmetro de entrada para o modelo. Para tal, é analisado o perfil desde o primeiro *pixel* onde se encontra a EB até ao *pixel* posterior à posição do TM, somando 20 m à variável ruas cada vez que é

encontrado na lista que caracteriza o perfil, uma estrutura com o campo ruas activado. No fim divide-se a variável ruas pelo número de ocorrências, sendo assim obtida a média da largura das ruas.

A análise efectuada para o cálculo da **separação entre edifícios** (w_B), parâmetro de entrada para o modelo COST231-Walfisch-Ikegami, consiste em, a partir do momento em que é encontrada a primeira rua que intersecta o perfil, somar 20 m a uma variável todas as vezes que o campo altura do edifício é diferente de zero. Deste modo calcula-se a largura média de cada edifício dividindo essa variável pelo número de ruas que intersectam o perfil. A separação entre cada edifício é dada então pela soma da largura média das ruas com a largura média de cada edifício.

Para além dos parâmetros enunciados anteriormente existe outro do COST231-Walfisch-Ikegami que é calculado através do algoritmo, nomeadamente o **ângulo de rua** (φ). No Modo Contínuo esse parâmetro é calculado da seguinte maneira: com as coordenadas do ponto inicial e ponto final do TM, é traçada uma recta que intersecta esses dois pontos. De seguida é traçada uma nova recta perpendicular a essa e que passa pelas coordenadas da EB. Com o ponto resultante da intersecção das duas rectas é calculada a distância entre esse ponto e o TM. Deste modo como já é sabida a distância entre a EB e o TM em cada posição, facilmente é extraído o ângulo φ como se vê em (4.2) e ilustrado na Figura 4.8.

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{d_{aux_TM}}{d_{EB_TM}}\right) \quad (4.2)$$

onde:

- d_{aux_TM} representa a distância entre ponto de intersecção das duas rectas e o TM,
- d_{EB_TM} é a distância entre a EB e o TM.

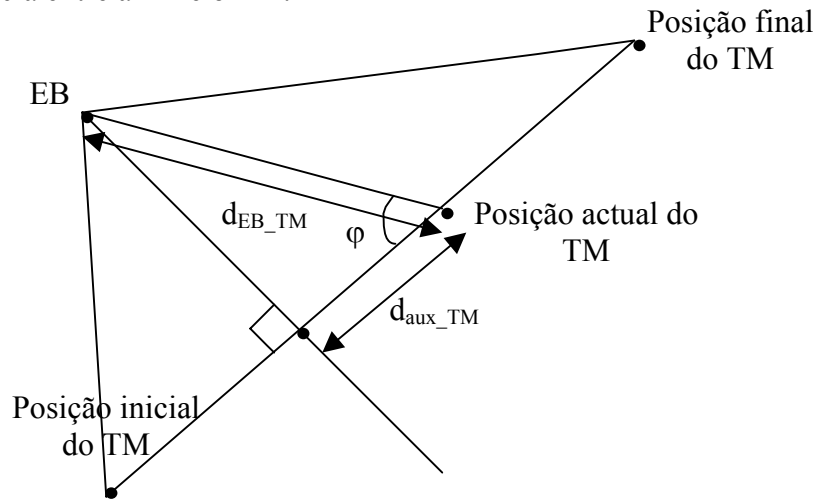


Figura 4.8 - Metodologia utilizada para o cálculo do ângulo de rua φ .

Após a descrição da forma como são calculados os parâmetros de entrada para o modelo de propagação COST231-Walfisch-Ikegami, passa-se a descrever os parâmetros relativos ao modelo 3GPP. Alguns desses parâmetros são comuns aos dois modelos, nomeadamente a separação e a altura dos edifícios, não sendo necessário voltar a explicar a forma como são calculados.

Quanto à **distância do TM ao centro da rua** (x), um parâmetro específico do 3GPP, é calculado através da largura das ruas, i.e., é considerado sempre que o TM está no meio da rua.

O parâmetro Δh_b é obtido através da diferença entre a altura da antena da EB e a altura dos edifícios (H_B), enquanto que o valor de Δh_m é calculado através da diferença entre a altura dos edifícios (H_B) e a altura do TM.

Para o modelo Gonçalves, os parâmetros de entrada w_s e o Δh_b são calculados da forma já enunciada anteriormente. O φ_c corresponde ao ângulo entre a rua da posição do TM e a recta entre a EB e o centro do cruzamento, sendo facilmente obtido através das coordenadas da EB, centro do cruzamento e TM. A distância ao cruzamento d_c é calculada entre as coordenadas da EB e o centro do *pixel* do cruzamento. Quanto à distância do TM ao centro do cruzamento, d_{via} , é determinado a partir das coordenadas do TM e o centro do cruzamento.

Após a uniformização destes parâmetros, o algoritmo vai calcular as atenuações de propagação.

4.4. Implementação dos Modelos de Propagação

Para a aplicação do modelo de propagação COST231-Walfisch-Ikegami, o algoritmo primeiro vai verificar se para o perfil entre a EB e o TM é possível aplicar o modelo, i.e., com os dados gerados no cálculo dos parâmetros averigua se a EB não está em linha de vista com o TM e se existe mais do que uma rua a intersectar o perfil. Se essas duas condições forem verificadas a atenuação total vem dada por (3.2).

Através da análise dos gráficos obtidos no Anexo G que caracterizam a variação de cada um dos parâmetros de entrada do modelo com os termos que quantificam a atenuação, verifica-se que no termo L_{rts} a diferença de altura dos edifícios e o TM pode ser crítica, respectivamente quando a diferença é próxima de zero, pois representa um valor negativo elevado, o que provoca uma enorme descontinuidade na evolução da atenuação. Deste modo, a solução adoptada foi, quando a diferença de alturas for inferior a 1 m, considerar o valor da difracção no topo do último edifício igual a zero. Ao mesmo tempo através dos primeiros resultados obtidos pelo simulador, verificou-se que muitas das variações abruptas do valor de atenuação ao longo da mesma rua se deviam ao facto do L_{msd} ou o L_{rts} serem negativos, pois por vezes o simulador MapModel não tem resolução suficiente para calcular correctamente a largura das ruas e a separação dos edifícios. Assim, para suavizar a evolução do valor da atenuação ao longo de uma rua optou-se por fazer uma leve modificação ao modelo que consiste em considerar o L_{msd} e o L_{rts} nulos, caso o seu valor seja negativo.

Caso as duas condições enunciadas anteriormente não sejam confirmadas, o modelo COST231-Walfisch-Ikegami sofre alterações, dependendo da condição não verificada.

Se a EB estiver em linha de vista com o TM a atenuação é calculada consoante o ambiente de propagação do sinal, ou seja, se a propagação se fizer ao longo de uma rua ($\varphi = 0$) com prédios em ambos os lados, a atenuação é calculada por (3.1) (efeito *Canyon*). Caso contrário a atenuação é dada por (F.2) (atenuação em espaço livre). De referir que nesta situação, para ângulos próximos de zero podem ocorrer erros elevados, uma vez que existe uma discrepância

nos resultados entre (3.1) e (F.2). Na prática para um ângulo de rua de 3° pode ainda ocorrer o fenómeno descrito por (3.1).

Na situação em que o perfil é intersectado por uma só rua e o elipsóide de Fresnel é intersectado, o modelo é alterado, nomeadamente ao não se considerar o termo que contabiliza as perdas por difracção no topo dos edifícios (L_{msd}). Assim, a atenuação de propagação vem dada por (4.3), onde o L_{rts} é dado por (F.3) e se o seu valor for negativo é considerado igual a zero.

$$L_{tot} \text{ [dB]} = L_0 \text{ [dB]} + L_{rts} \text{ [dB]} \quad (4.3)$$

Nas situações em que existe uma área aberta depois da rua onde se encontra o TM e é contabilizado o termo L_{rts} na atenuação, o modelo sobrestima o sinal recebido pelo TM, uma vez que o termo L_{rts} contabiliza dois termos da atenuação, nomeadamente a difracção no topo do último edifício e a reflexão no edifício depois do TM, quando este último não devia ser contabilizado.

No caso do utilizador escolher o modelo 3GPP para macro-células, o algoritmo vai verificar se a EB e o TM estão em linha de vista. Se não estiverem, então vai calcular a atenuação de propagação por (3.3). Quando $\Delta h_{m[m]}$ é negativo, ou seja quando o TM está a uma altura superior ao último edifício, o terceiro parâmetro de (3.3) é considerado igual a zero, de modo a assegurar que não existem resultados indefinidos.

Se a EB estiver em linha de vista com o TM, ou seja, se o primeiro elipsóide de Fresnel não for intersectado no perfil entre as duas antenas, ou se o resultado de (3.3) for inferior à atenuação em espaço livre, então a atenuação de propagação vem igual a (F.2) correspondente à atenuação em espaço livre.

Nos casos em que o perfil é intersectado por uma só rua, e a EB não está em linha de vista com o TM, o modelo é alterado para (4.3) tal como acontece para o modelo COST231, mas em que o L_{rts} corresponde ao segundo termo de (3.3). De notar que esse termo apenas contabiliza o sinal difractado no último edifício, excluindo o reflectido no edifício atrás do TM. Como consequência, nas situações em que existe edifício atrás do TM o sinal recebido é subestimado.

Para contabilizar a influência dos cruzamentos é usado o modelo Gonçalves, que só pode ser executado quando o utilizador escolhe a opção Modo Contínuo. Nesse caso, o algoritmo procura ao longo da rua todos os cruzamentos que potencialmente vão influenciar o sinal, analisando para cada um a distância da EB ao centro do respectivo cruzamento, d_c , o ângulo de rua, φ_c , a diferença entre a altura da antena da EB e a altura média dos edifícios, Δh_b e a distância do TM ao centro do cruzamento, d_{via} .

Uma das condições para a aplicação do modelo é que a largura das ruas que se cruzam seja igual. Como na realidade isso por vezes não acontece, a largura das ruas perpendiculares ao percurso do móvel é considerada igual à largura da rua percorrida pelo móvel, w_p . Outro factor que pode contribuir para a introdução de erros no resultado do modelo, é quando um parâmetro de entrada está fora do limite de validade para a aplicação do modelo. Nesses casos o algoritmo assume o valor máximo ou o mínimo do intervalo de validade, consoante o valor do parâmetro de entrada.

Através do valor do Δd_{ext} de cada um dos cruzamentos, para cada posição do TM o algoritmo analisa a influência dos dois cruzamentos mais próximos, ou seja, contabiliza assim a sua influência no decréscimo na atenuação de propagação, L_{cruz} .

4.5. Implementação das Antenas

Para fazer face aos problemas de capacidade, associados ao aumento de tráfego, normalmente recorre-se à sectorização das células. Assim, e à semelhança do que se passa com o GSM, as células do UMTS nos centros urbanos tendem a ser sectorizadas, o que as torna bastante directivas. Outro problema que surge é a interferência entre células. Assim sendo, uma forma de minorar esta dificuldade consiste em orientar a antena de tal modo que o seu lobo principal fique inclinado para baixo, isto é, se as antenas possuírem *downtilt*.

A base de dados das antenas usada corresponde a informação relativa ao diagrama de radiação no plano horizontal e no plano vertical. No entanto, para o cálculo da potência de recepção no móvel numa direcção pretendida, o que realmente interessa é o ganho da antena em termos tridimensionais.

Na ferramenta desenvolvida, para a obtenção do ganho tridimensional da antena da EB foi utilizado um método que permite extrapolar o ganho da antena da EB em qualquer direcção a partir dos diagramas de radiação no plano horizontal e vertical [13]. Na Figura 4.9 está representado o esquema utilizado.

O processo consiste em extrapolar o ganho do diagrama tridimensional a partir dos pontos que lhe estão mais próximos. Para a obtenção do ganho na direcção do ponto P os quatro ganhos mais próximos são: $G_{\phi 1}$, $G_{\phi 2}$, $G_{\theta 1}$ e $G_{\theta 2}$. Os três primeiros encontram-se no plano vertical com uma distância angular a P de ϕ_1 , ϕ_2 e θ_1 respectivamente, estando o último no horizontal e com uma distância angular a P de θ_2 .

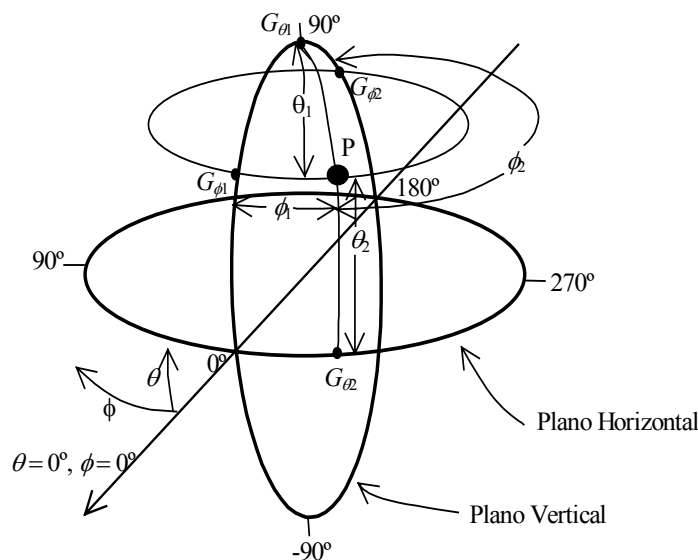


Figura 4.9 – Esquema tridimensional utilizado para a extrapolação do ganho da antena na direcção do ponto P (extraído de [13]).

No Anexo K é descrita a metodologia adoptada para o cálculo da diferença angular nos planos horizontal e vertical entre a direcção do máximo de radiação da antena e uma determinada direcção, e no Anexo L são apresentados graficamente os diagramas de radiação das antenas utilizadas pela Vodafone.

O ganho da antena obtido através do método da extrapolação é dado por:

$$G_{EB} = \frac{[\phi_1 G_{\phi_2} + \phi_2 G_{\phi_1}] \frac{\theta_1 \theta_2}{(\theta_1 + \theta_2)^2} + [\theta_1 G_{\theta_2} + \theta_2 G_{\theta_1}] \frac{\phi_1 \phi_2}{(\phi_1 + \phi_2)^2}}{[\phi_1 + \phi_2] \frac{\theta_1 \theta_2}{(\theta_1 + \theta_2)^2} + [\theta_1 + \theta_2] \frac{\phi_1 \phi_2}{(\phi_1 + \phi_2)^2}} \quad (4.4)$$

No algoritmo existem duas alternativas para a determinação do ganho. Se a EB estiver em linha de vista com o TM o ganho é calculado na direcção do móvel. Caso não esteja em linha de vista, o ganho é determinado na direcção do edifício mais alto do percurso visto pela EB, pois é nesse obstáculo que o sinal é difractado antes de chegar ao móvel.

4.6. Cálculo dos Balanços de Potência

Após o cálculo da atenuação, o algoritmo em C++ no caso do Modo Ponto Localizado e Modo Contínuo calcula a potência recebida pelo TM pela expressão:

$$P_r[\text{dBm}] = 10 \cdot \log(EIRP_w) + 30 - G_{eb}^{max}[\text{dBi}] + G_{eb}[\text{dBi}] + G_m[\text{dBi}] - L_{tot}[\text{dB}] - L_{bodyloss}[\text{dB}] - M[\text{dB}] \quad (4.5)$$

em que:

- $EIRP_w$ representa a soma entre a potência de emissão da antena da EB e o ganho de emissão na direcção de máximo,
- G_{eb}^{max} o ganho da antena da EB na direcção de máximo,
- G_{eb} o ganho da EB na direcção do receptor,
- $L_{bodyloss}$ corresponde às perdas do sinal provocadas pela proximidade entre o TM e o utilizador. Para dados é assumido uma perda de 3 dB, para voz assume-se 10 dB,
- G_m é o ganho do móvel que para serviços de dados corresponde a 2 dBi e para voz 0 dBi,
- M caracteriza as margens adicionais, definidas em (C.9), a levar em conta para o cálculo da potência recebida.

Foi assumido um valor de 3 dB para o ganho de *Soft-Handover*, G_{SH} . É de salientar que a margem referente à atenuação por penetração nos interiores, L_{int} , só é levado em conta quando é seleccionada a opção Cobertura.

No caso da opção Cobertura, como já foi referido anteriormente, a análise da potência de recepção faz-se no UL. Desse modo a potência recebida na EB é dada pela expressão:

$$P_r[\text{dBm}] = P_e[\text{dBm}] + G_m[\text{dBi}] + G_{EB}[\text{dB}] - L_{tot}[\text{dB}] - L_{bodyloss}[\text{dB}] - M[\text{dB}] \quad (4.6)$$

Na determinação da cobertura é necessário usar a expressão (C.4) para calcular a sensibilidade de cada serviço, de modo a ser comparada com o valor da potência recebida na EB e com isto poder desenhar no mapa da cidade a cobertura para cada serviço. Através da Tabela 4.2 pode-se ver qual a sensibilidade para cada serviço.

No cálculo das sensibilidades foi assumida uma margem de interferência de 3 dB. Os valores de E_b/N_0 para cada serviço foram extraídos da Tabela C.2 para o tipo de utilizador pedestre e foi assumido 5 dB para o factor de ruído.

Tabela 4.2 - Sensibilidade para cada tipo de serviço.

Serviço [kbps]	Sensibilidade [dBm]
12.2	-119.34
64	-113.74
144	-110.22
384	-105.96

Tal como foi visto na Secção 3.1, o sinal recebido pelo TM apresenta flutuações em torno de um valor médio. De forma a contabilizar essas variações no sinal, é necessário adicionar margens de desvanecimento à expressão da estimativa da potência de recepção no TM. Essas margens contabilizam o desvanecimento rápido e o lento

A margem de desvanecimento lento a ser considerada pode ser obtida por dois métodos diferentes, consoante o modo que a ferramenta estiver a executar. Se a ferramenta estiver a operar no Modo Cobertura, o desvanecimento lento é obtido para uma dada percentagem de área coberta pela EB, especificada pelo utilizador. No Modo Ponto Localizado e no Modo Contínuo a situação já é diferente, visto que aqui o que interessa é garantir uma percentagem de locais cobertos a uma determinada distância da EB.

Para o Modo Cobertura, a margem de desvanecimento lento é obtida através de um processo iterativo usando a percentagem de área coberta F_{area} que vem dada por (C.10). Como os valores de σ dependem do modelo de propagação utilizado, torna-se necessário averiguar esses parâmetros para o modelo COST 231 – Walfisch – Ikegami. Assim, para esse modelo o desvio padrão pode tomar valores no intervalo [4, 7] dB, [2], sendo assumido um valor de 6 dB para os cálculos.

A expressão da atenuação de propagação do modelo varia com a distância da forma:

$$L_{p[dB]} \propto 20 \log(d_{[km]}) + \begin{cases} 18 & , h_b > H_B \\ 18 - 15 \frac{h_b - H_B}{H_B} & , h_b \leq H_B \end{cases} \log(d_{[km]}) \quad (4.23)$$

retirando-se daqui o factor de decaimento da potência n :

$$n = \frac{20 + A}{10} \quad (4.24)$$

em que:

$$A = \begin{cases} 18 & , h_b > H_B \\ 18 - 15 \frac{h_b - H_B}{H_B} & , h_b \leq H_B \end{cases} \quad (4.25)$$

Iterando o valor F_{area} em (C.10) pode-se calcular a respectiva margem de desvanecimento lento $M_{F_{area}}^{p\%}$. Na Figura 4.10 pode ser vista a evolução da percentagem de área coberta com a margem de desvanecimento lento.

Caso o programa esteja a trabalhar em Modo Contínuo ou Modo Ponto Localizado a margem de desvanecimento lento vem dada por (C.13).

O desvanecimento rápido, como foi visto anteriormente, é provocado pelo multipercurso. Na implementação do software a contribuição do desvanecimento rápido foi baseada em [17]. O seu valor é dependente da posição do TM perante a EB, ou seja, se estão ou não em linha de vista. Assim, segundo [17], vem representado na Tabela 4.3 para ambientes tipicamente urbanos, as margens de desvanecimento rápido para o pior caso.

Tabela 4.3 - Margens de Desvanecimento Rápido Máximas.

Ambiente	Margem de Desvanecimento Rápido Máxima [dB]	
	Sem linha de vista	Em linha de vista
Urbano Pedestre	12.3	9.1

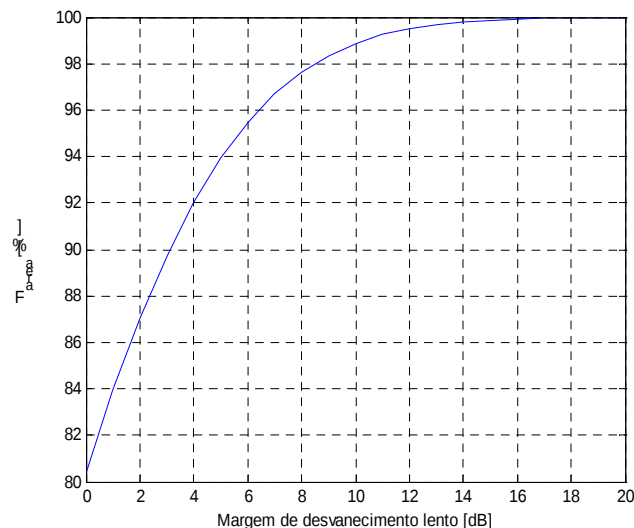


Figura 4.10 - Evolução da percentagem de área coberta com a margem de desvanecimento lento.

Outro factor que deve ser contabilizado nas margens é a atenuação que o sinal sofre devido à penetração em edifícios L_{int} nomeadamente para a opção cobertura. O método utilizado para o cálculo de L_{int} baseia-se no modelo da dupla normal [18]. Este modelo empírico, descrito no Anexo M, consiste na modelação dos resultados experimentais adquiridos de modo a obter uma distribuição normal que caracteriza cada tipo de edifício em termos da relação percentagem de cobertura/ L_{int} . Esse trabalho, como se pode ver pela Figura 4.11, demonstrou que edifícios com menos pisos e isolados apresentam valores mais altos de atenuação em função da percentagem de cobertura. Deste modo, de maneira a garantir a fiabilidade dos resultados, assumiu-se o pior caso, aquele que oferece maiores atenuações para a mesma percentagem de cobertura. Foi utilizada pelo algoritmo a distribuição normal que caracteriza edifícios baixos isolados e que toma os seguintes valores: $\sigma = 12.95$ dB (desvio padrão) e $\mu = 15.97$ dB (valor médio). Assim, foi possível tirar o valor de L_{int} para uma dada percentagem de cobertura.

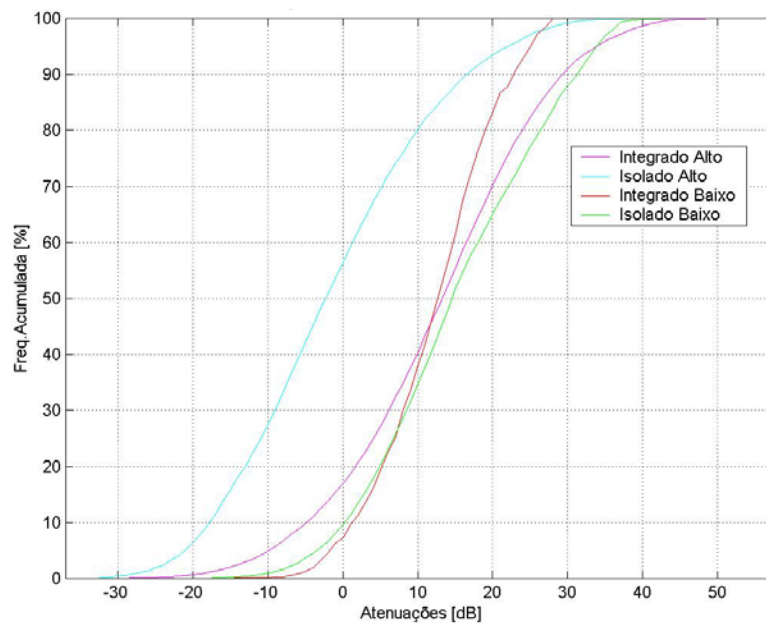


Figura 4.11 - Funções acumuladas de probabilidade das várias categorias (extraído de [18]).

4.7. Parâmetros de Saída

No Modo de funcionamento Contínuo, o algoritmo em C++ após calcular as atenuações totais e as potências de recepção, envia esses resultados juntamente com alguns parâmetros para o *MapBasic* onde são inseridos numa tabela Saída. Essa tabela contém os seguintes dados:

- Influência dos cruzamentos na atenuação (L_{cruz});
- Atenuação do sinal no topo dos telhados dos edifícios (L_{msd});
- Atenuação por difracção no topo do último edifício (L_{rts});
- Atenuação em espaço livre (L_0);
- Atenuação total (L_{tot});
- Ganho da EB (G_{EB});
- Potência de recepção no TM (P_r);
- Distância ao ponto inicial do percurso na rua;

- Desvio padrão da altura média dos edifícios que intersectam o primeiro elipsóide de Fresnel (σ_{hed});
- Média das alturas dos edifícios que intersectam o primeiro elipsóide de Fresnel (h_{ed});
- Desvio padrão da largura média das ruas que intersectam o perfil entre a EB e o TM;
- Largura média das ruas que intersectam o perfil entre a EB e o TM (w_s);
- Ângulo de rua (φ);
- Distância média entre edifícios (w_B);

Além da tabela Saída o Modo Contínuo também representa graficamente alguns dos parâmetros enunciados anteriormente em função do percurso na rua, nomeadamente: L_{cruz} , L_{tot} , G_{EB} , P_r , σ_{hed} , e h_{ed} . A título de exemplo, pode ser vista a Figura 4.12. que representa a evolução da atenuação ao longo da rua.



Figura 4.12 – Exemplo de um resultado de saída para o Modo Contínuo.

O Modo Ponto Localizado, tal como o Modo Contínuo, tem como saída a tabela Saída, mas neste caso não contabiliza a influência dos cruzamentos na atenuação. Para além desta tabela existe ainda outra que contém os seguintes parâmetros:

- Distância da EB ao TM;
- Altura do terreno;
- Altura dos edifícios;

Este modo de funcionamento tem também como saída o perfil do terreno entre a EB e o TM.

Para o Modo Cobertura o *MapBasic* recebe as atenuações totais, calculando depois a potência recebida na EB, como já foi visto anteriormente, comparando de seguida o valor da potência com os valores da sensibilidade para cada tipo de serviço. Se o valor da potência for inferior ao da sensibilidade então é representado no mapa com a cor respectiva do serviço. Na Figura 4.13 poder ser observado o resultado de saída desta opção.

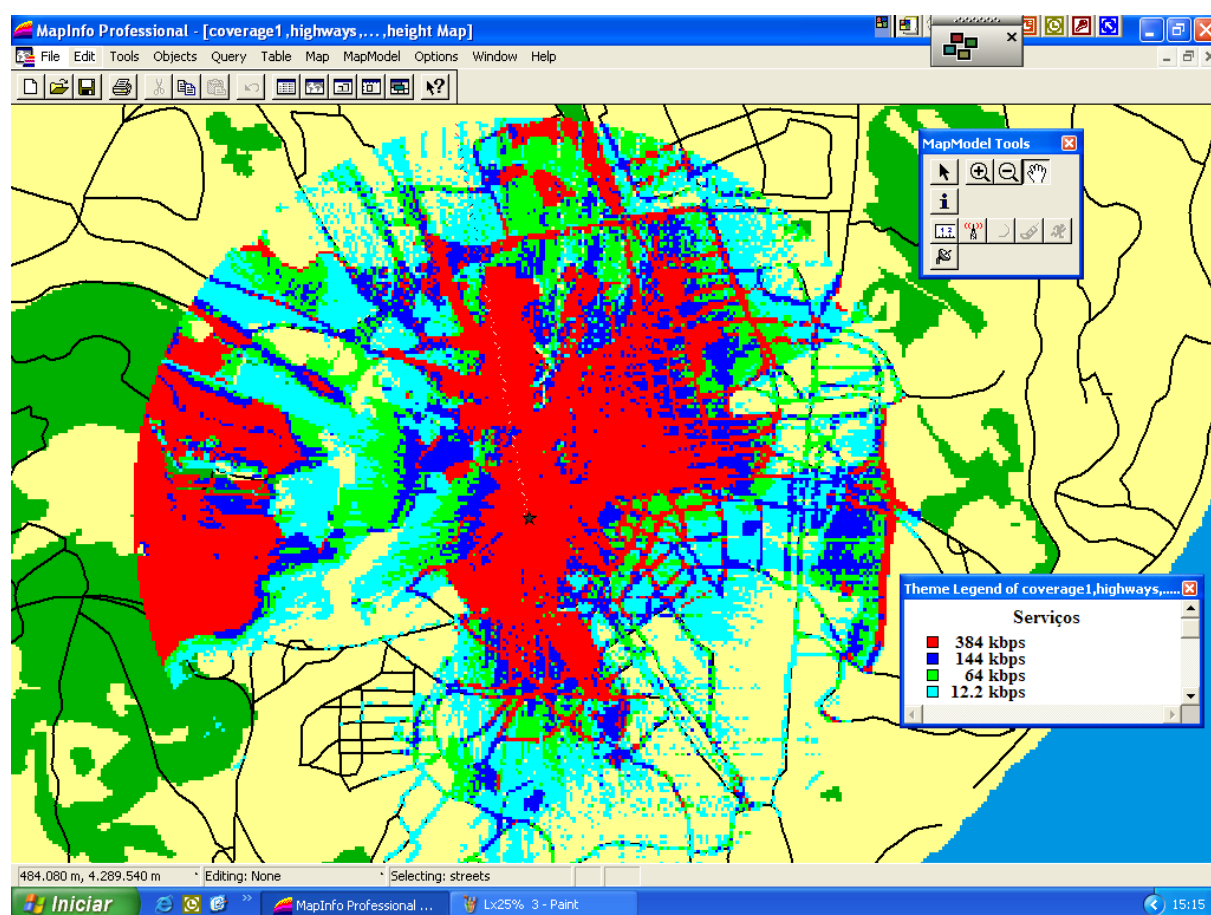


Figura 4.13 - Exemplo do resultado de saída para o Modo Cobertura.

5. Análise dos Resultados

5.1. Campanha de Medidas

Com a ferramenta concluída é importante poder aferir os resultados com medidas no terreno, de modo a garantir a fiabilidade do simulador MapModel e ao mesmo tempo analisar quais as suas limitações.

No início, os autores deste projecto, previam fazer medidas na cidade de Lisboa para a avaliação do sinal ao longo das ruas. Infelizmente, como a rede UMTS à data da elaboração do projecto estava atrasada, foi decidido efectuar essas medidas na cidade do Porto, uma vez que aí a rede UMTS estava mais avançada. Como a Vodafone estava em processo de optimização da rede no Porto e havia alguma indisponibilidade de terminais para efectuar as medidas, foi necessário fazer uma adaptação às circunstâncias. Deste modo, por questões logísticas foi combinado com a Vodafone fazer as medidas no Porto. Quanto às medidas a usar para aferição dos modelos, foi necessário usar as medidas efectuadas pela Vodafone num determinado dia, pois as medidas efectuadas no Porto na presença dos autores deste projecto eram desajustadas para usar na aferição dos modelos uma vez que nesse dia a Vodafone andava a fazer pequenas afinações nas antenas, nomeadamente na sua altura e *downtilt*.

Para a aquisição de medidas recorreu-se a uma sonda TEMS da Ericsson [19] com um tempo de amostragem de 340 ms, um portátil e um medidor GPS de coordenadas. A sonda foi ligada ao PC onde previamente tinha sido instalado o programa *TEMS WCDMA Investigation* da Ericsson. Este programa é utilizado para fazer optimização de redes WCDMA, verificar o verdadeiro comportamento de terminais móveis através de medidas, verificar a cobertura celular, capacidade e acessibilidade, e também pesquisar e tentar resolver problemas da rede. A título de exemplo pode ser vista a Figura 5.1 que representa a interface gráfica.

No presente trabalho, esta ferramenta foi usada essencialmente para se fazer a aquisição do sinal proveniente de várias estações base, mais especificamente do SC (*scrambling code*) no canal primário do piloto comum (CPICH). De entre os parâmetros que são possíveis medir com o programa, destacam-se:

- Relação sinal-ruído (E_b/N_0) do canal CPICH
- Potência transmitida pelo TM (P_{Tx})
- Probabilidade de erro de bloco do canal de transporte (BLER)
- Relação potência do sinal-interferência (E_c/I_0)

Os dados detalhados da rede são apresentados em tempo real e podem ser conservados para mais tarde poderem ser processados.

A obtenção das medidas é feita de automóvel, sendo o percurso efectuado dentro das zonas que se pretendiam analisar. No tejadilho do automóvel ao lado da antena da sonda foi colocado o sistema GPS para ser possível localizar espacialmente as medidas da sonda. Assim, para cada amostra do sinal recebido foi possível associar a respectiva coordenada de latitude e longitude.

Para a aferição da robustez do simulador MapModel é importante testar todo o tipo de cenários que ele abrange, para que se possa avaliar o desempenho dos modelos para zonas urbanas regulares e em zonas que o terreno é irregular. Surgiram algumas dificuldades na escolha de zonas urbanas regulares, uma vez que o Porto apresenta uma estrutura urbana

bastante irregular, ao contrário do cenário típico de aplicabilidade do modelo de propagação, onde se consideram terrenos planos e edifícios com alturas e separações semelhantes.

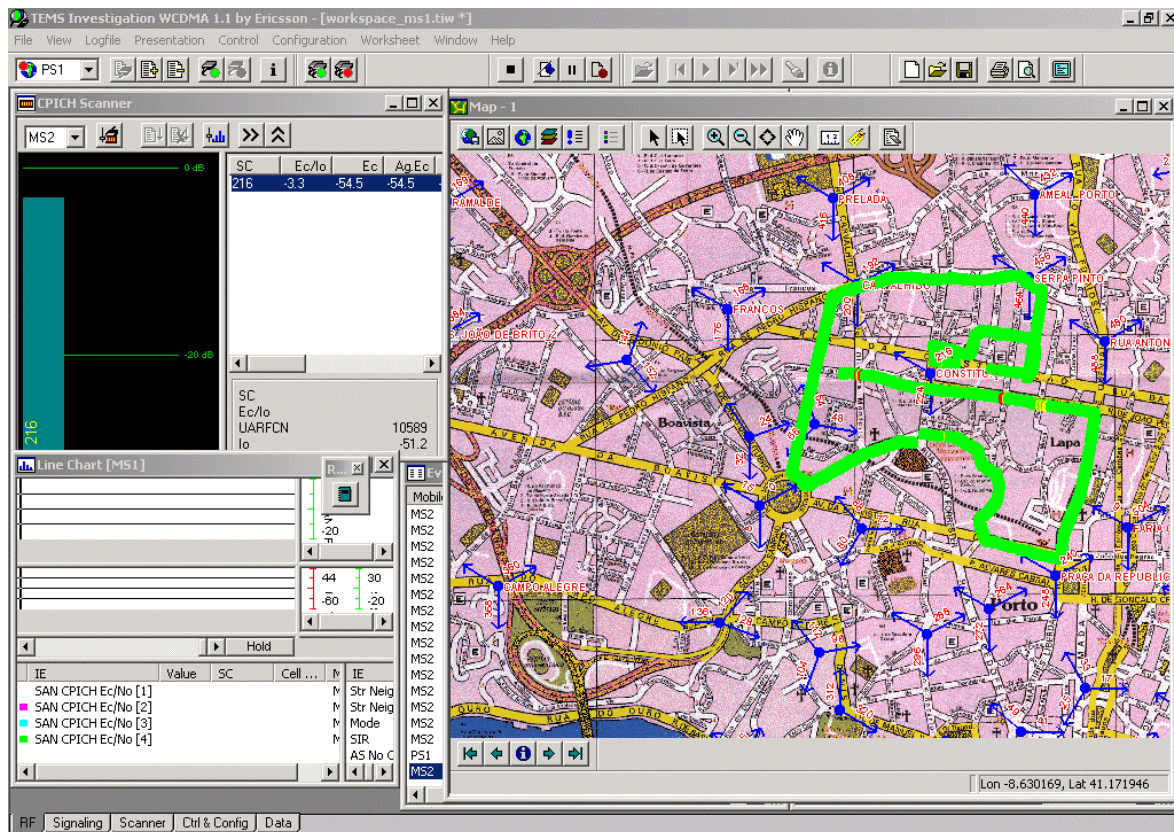


Figura 5.1- Interface do *TEMS WCDMA*.

Esta tarefa foi morosa, pois para além da cidade ser urbanamente irregular, os autores deste trabalho conheciam mal a cidade do Porto. Assim, foi necessário fazer uma análise muito atenta com base em fotografias aéreas da cidade e na representação gráfica de perfis do terreno através do simulador MapModel. A juntar a isso, há que salientar que na cobertura do UMTS para o centro da cidade do Porto, as EBs estão relativamente próximas uma das outras. Como a implementação da rede do UMTS no Porto já está num estado avançado, as EBs já estavam configuradas para atingirem alcances baixos de modo a reduzir a interferência. Assim, após uma extensa análise, Figura 5.2, foram encontradas algumas ruas que apresentam características de zonas regulares, nomeadamente, a zona entre a avenida da Boavista e a rua do Campo Alegre onde a cota do terreno é regular, a disposição geométrica das ruas é próxima da rectangular, e ao mesmo tempo a EB está relativamente afastada da rua. Outra zona com estas características é a área entre a rua Duarte Pacheco Pereira e a rua de D. Fra. de Almeida.

Para as zonas irregulares foram analisadas a rua Serpa Pinto, rua do Dr. R. Jorge e um troço da Avenida da Boavista. Outro factor importante de aferir é o comportamento dos modelos quando a EB está abaixo dos edifícios. Para tal é analisado um pequeno troço da avenida da Boavista que caracteriza essa situação.

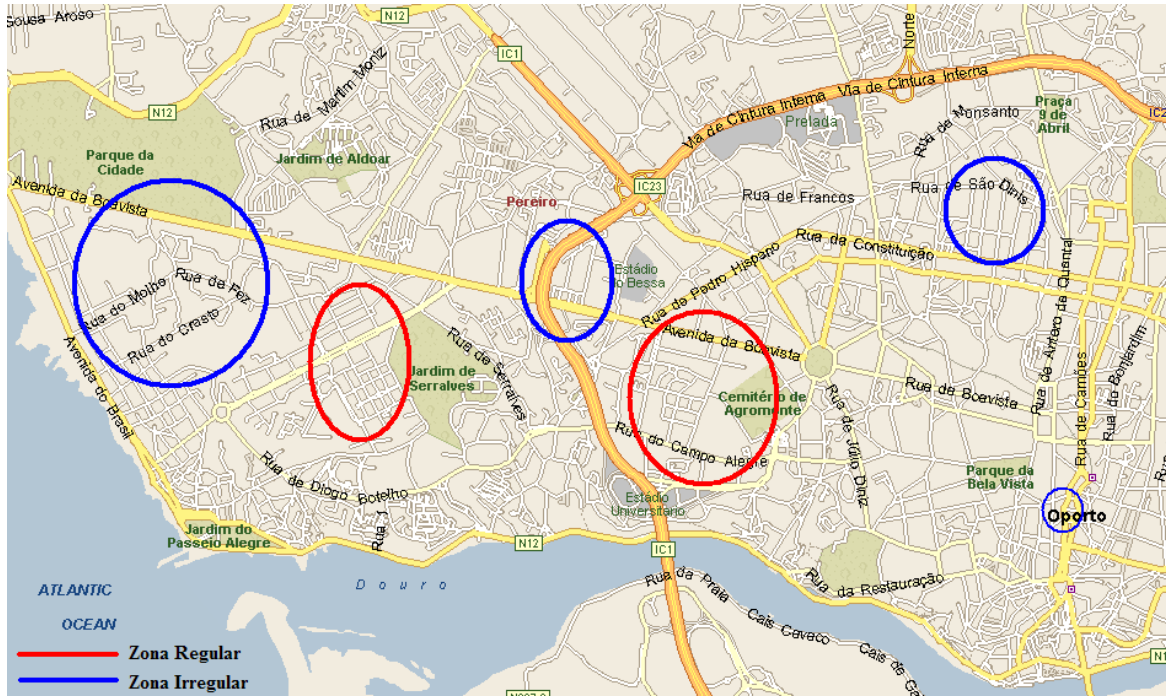


Figura 5.2 – Mapa do Porto com as zonas regulares e irregulares analisadas.

As medidas estão armazenadas no ficheiro por ordem temporal, em que cada linha contém o tempo da amostragem, a respectiva latitude e longitude, o melhor SC, o valor da potência do melhor SC, a relação potência do sinal/interferência (E_c/I_0) do melhor SC, o valor médio da interferência $\overline{I_0}$, o 2º melhor SC, a relação E_c/I_0 do 2º melhor SC e assim sucessivamente até aos doze melhores SC recebidos. Entenda-se melhor SC como o SC com o sinal mais forte na recepção. Cada um destes SC no DL como foi visto no Capítulo 2 permitem identificar uma EB na estrutura celular.

Para que fosse possível analisar facilmente o comportamento do sinal ao longo de uma rua, foi criada uma ferramenta que marca a posição geográfica de cada ponto medido num mapa vectorial de ruas da cidade do Porto com a respectiva informação das medidas como se pode ver na Figura 5.3. A partir daqui é dada a possibilidade ao utilizador de seleccionar o percurso e o SC que quer analisar, sendo a ferramenta responsável por extrair os valores da relação E_c/I_0 ao longo desse percurso. Caso o SC pretendido for diferente do melhor, a partir do valor do E_c/I_0 , a ferramenta calcula a potência recebida através da seguinte expressão:

$$(E_{c[\text{dBm}]})_{SC} \cong \left(\left(\frac{E_c}{I_0} \right)_{[\text{dBm}]} \right)_{SC} + \overline{I_0} [\text{dB}] \quad (5.1)$$

No caso do SC ser diferente do melhor, o valor de E_c obtido não corresponde exactamente ao valor da potência recebida, uma vez que $\overline{I_0}$ representa o valor médio da interferência de todos os SC que são medidos nesse ponto, pelo que o mais correcto seria utilizar o valor da interferência do respectivo SC.

De forma a extrair o andamento médio do sinal, recorre-se normalmente ao método da janela deslizante para filtrar o desvanecimento rápido. No entanto, devido ao facto de por vezes

haver poucas medidas ao longo de uma rua ou estarem separadas a uma distância superior a 30λ , e noutras situações o sinal ser medido repetidamente no mesmo local, i.e., quando o automóvel estava parado, foi impossível filtrar o desvanecimento rápido.

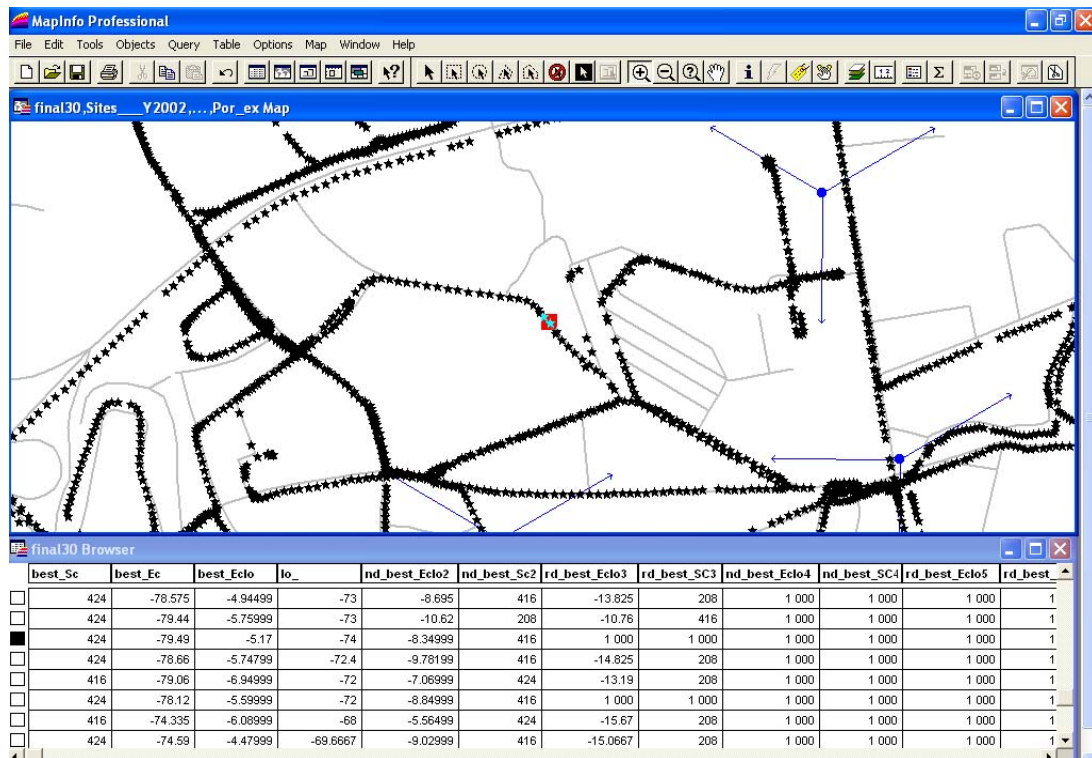


Figura 5.3 – Marcação das medidas efectuadas no mapa vectorial das ruas do Porto.

5.2. Aferição dos Modelos

5.2.1. Considerações Iniciais

Nesta secção é feita uma análise comparativa dos resultados obtidos das medidas com os resultados obtidos das simulações dos modelos de propagação. Para tal, são usados vários parâmetros estatísticos referentes às diferenças entre a curva do sinal medido, e a curva da potência estimada pelo modelo de propagação.

Os parâmetros estatísticos utilizados são a média do erro (μ), a média do módulo do erro (μ_{abs}) e o desvio padrão do erro (σ). A média do erro pode ser obtida através da seguinte expressão [2]:

$$\mu_{[dB]} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \Delta P_i}{N_p} \quad (5.2)$$

onde:

- N_p é o nº de pontos em que se comparam as medidas aos resultados teóricos,
- ΔP_i é a diferença de potências.

$$\Delta P_{i[dB]} = P^t - P^m \quad (5.3)$$

em que:

- P^t é o valor da potência prevista pelo modelo de propagação,
- P^m representa a potência das medidas.

A média do módulo do erro (μ_{abs}) é dada por:

$$\mu_{abs[dB]} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} |\Delta P_i|}{N_p} \quad (5.4)$$

Enquanto que o desvio padrão do erro (σ) pode ser calculado através de:

$$\sigma_{[dB]} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (\Delta P_i - \mu)^2}{N_p}} \quad (5.5)$$

Com a média do erro, μ , é possível estimar a tendência de sub ou sobrestimação da atenuação por parte do modelo. Contudo, o seu valor pode ser 0 dB com um erro elevado (ex: quando as curvas experimental e prevista são simétricas uma da outra). Por essa razão, é preferível utilizar a média do erro absoluto, que sendo um parâmetro mais exigente, só se torna nulo quando as duas curvas coincidem. Relativamente ao desvio padrão, este indica se a curva teórica acompanha ou não a curva experimental. Deve-se referir que quanto mais baixo for o valor destes três parâmetros, mais próximo está o sinal medido do previsto pelo modelo de propagação.

Para a aferição dos modelos o simulador sofreu umas ligeiras alterações, i.e., foi necessário considerar nulas as margens de desvanecimento e as perdas devido à influência da proximidade do utilizador. Estas foram dimensionadas para garantir uma margem de segurança na estimação da potência para fins de dimensionamento celular e para análise de cobertura da célula. Além disso foi considerado que o ganho do TM para o serviço de voz como 0 dBi.

Como os modelos COST231-Walfisch-Ikegami e 3GPP para Macro-células não contabilizam a influência dos cruzamentos, então os resultados obtidos necessitam de ser corrigidos de modo a ser contabilizada a influência dos cruzamentos. Desta maneira em todas as simulações efectuadas para a aferição do modelo foi considerada a influência dos cruzamentos.

Na campanha de medidas, como já foi referido anteriormente, por vezes não foi possível garantir uma separação constante entre medidas, devido ao facto da velocidade do automóvel variar ao longo do percurso. Isto fez com que o número de amostras de rua para rua fosse diferente, e por vezes em número reduzido. Para a simulação foi considerada uma separação de 2 m entre estimativas. Por estes motivos as curvas que mostram o andamento do sinal estimado vêm caracterizadas por mais pontos do que as curvas do andamento do sinal medido.

5.2.2. Zonas Regulares

As zonas regulares, como já foi enunciado atrás, são fundamentais para aferir os modelos, pois neste caso na manipulação dos parâmetros de entrada não sofrem grandes alterações em relação à realidade. Deste modo foi escolhida a rua António Cardoso, a rua Soares dos Passos e a rua Duarte Pacheco Pereira.

Na Figura 5.4 está representado a verde o percurso efectuado pelo móvel na rua António Cardoso e ao mesmo tempo a posição da EB, que vem representada pelo ponto azul claro.

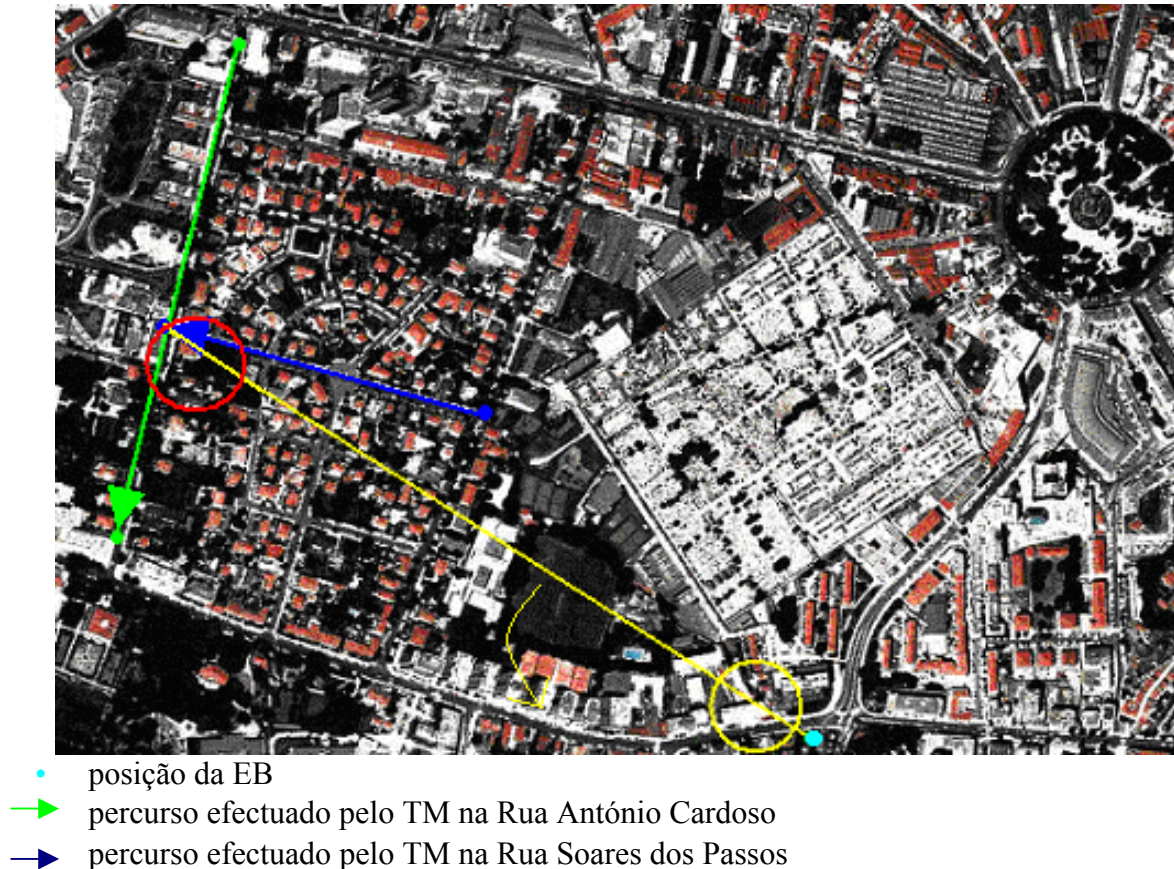


Figura 5.4 – Fotografia aérea da zona da rotunda da Boavista (extraído de [20]).

Na Tabela 5.1 estão representadas as coordenadas da posição inicial e final do TM, a posição da EB e respectivo azimuth, *downtilt*, altura, bem como distância entre pontos medidos e os parâmetros de entrada que caracterizam o modelo. Com estes dados é possível obter no simulador a potência estimada ao longo do percurso de modo a se poder comparar com a potência medida na rua, Figura 5.5. Para se caracterizar da melhor maneira a diferença entre as duas curvas recorre-se aos parâmetros estatísticos representados na Tabela 5.2.

Ao se analisar a Figura 5.5, e com a ajuda dos parâmetros estatísticos, é possível verificar que os modelos simulados têm um bom desempenho no acompanhamento da evolução do sinal medido, chegando mesmo a serem quase coincidente até aos 310 m. A partir desse ponto, a potência medida decresce, enquanto que o modelo do 3GPP se mantém razoavelmente constante. Relativamente à potência estimada pelo COST231 esta sobe um pouco, mantendo-se depois constante, acabando por decrescer perto do fim do percurso.

Tabela 5.1 – Parâmetros associados à Rua António Cardoso.

	Coordenadas		Azimute [°]	Downtilt [°]	Altura [m]
	X	Y			
EB	530 918.0	4 555 976.0	270	3	25
Ponto inicial	530 269.9	4 556 738.9			
Ponto final	530 123.7	4 556 172.1			
Parâmetro			Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
w_s [m]			20.00	77.14	46.50
Desvio padrão de w_s			0.00	71.18	22.75
hed [m]			93.81	107.20	96.18
Desvio padrão de hed			1.01	6.70	2.72
φ [°]			54.61	89.86	70.96
G_{EB} [dBi]			-3.64	2.50	0.35
w_B [m]			142.23	410	234.90
Distância entre pontos medidos [m]			0.021	20.63	3.91

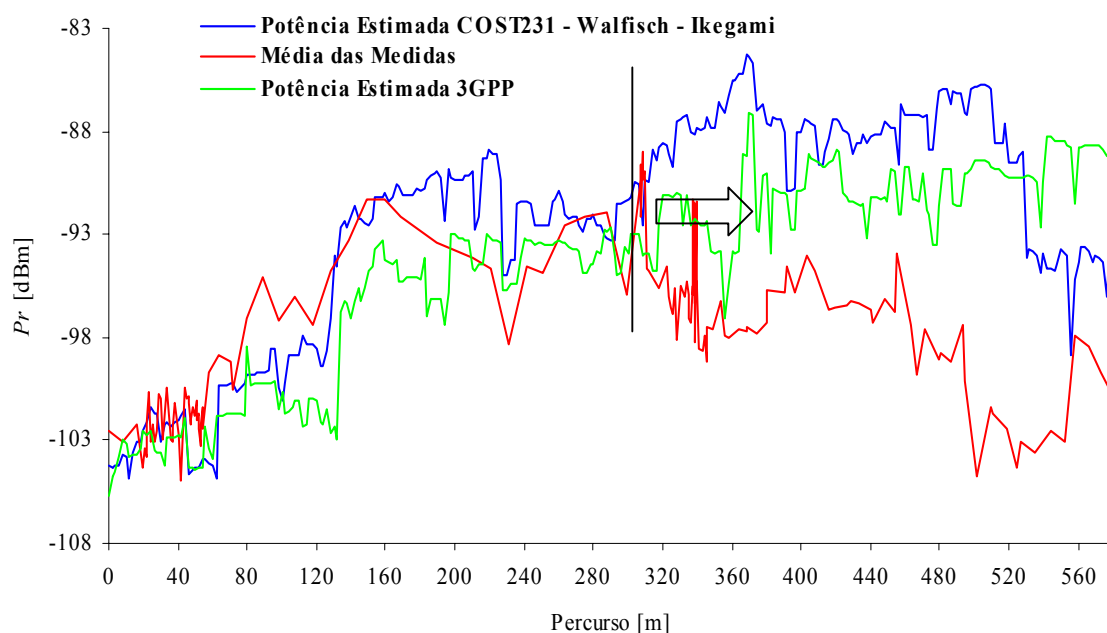


Figura 5.5 – Comparação da potência medida com os modelos para a Rua António Cardoso.

Com a ajuda da Figura 5.4 e com os resultados da Tabela 5.1 é possível analisar quais as causas das diferenças ocorridas no andamento do sinal a partir dos 310 m. Um dos factores de erro deve-se ao facto de na área do círculo amarelo se encontrar uma zona de transição de edifícios baixos e edifícios altos, o que provoca uma diminuição do sinal medido. Na imagem matricial do simulador que serve de caracterização do terreno essa transição não ocorre, pois o terreno nessa zona é considerado sempre com edifícios com altura de 10 m, que para uma antena de 25 m de altitude têm pouca influência no sinal. Outro factor de erro tem a haver com o cálculo da largura das ruas e separação de edifícios, uma vez que o facto de se estar a trabalhar com uma resolução de 20 m, faz com que existam erros significativos no cálculo da largura das ruas, principalmente quando no meio do perfil este intersecta ruas que têm o seu

ângulo com a EB perto de zero. Como consequência, para além de causar erros ao valor associado à largura de ruas, vai também provocar erros no valor da distância entre edifício e implicitamente no sinal estimado pelos modelos. Deste modo é explicado porque é que o sinal do modelo COST 231 e 3GPP têm um pico depois por volta do 340 m, uma vez que nessa zona o comprimento da largura das ruas é máximo devido o perfil intersectar uma rua com um ângulo com a EB próximo de zero, fazendo com que a atenuação de propagação diminua e consequentemente o sinal aumente.

Analisando o perfil do terreno para o ponto inicial e final do TM, Figura 5.6, é possível verificar que os resultados obtidos estão de acordo com as características reais do terreno, apesar dos parâmetros de entrada dos modelos caracterizarem uma orografia modificada, diferente da realidade. Para o ponto inicial do TM constata-se que o baixo valor da potência se deve à existência de prédios altos a meio do percurso, contribuindo para o aumento do parâmetro h_{ed} e em consequência a diminuição da potência recebida pelo TM. No ponto final do TM, o facto de os prédios serem baixos e com altura constante, faz com que o valor da potência recebida pelo TM calculada pelos modelos seja mais alta do que para o ponto inicial.

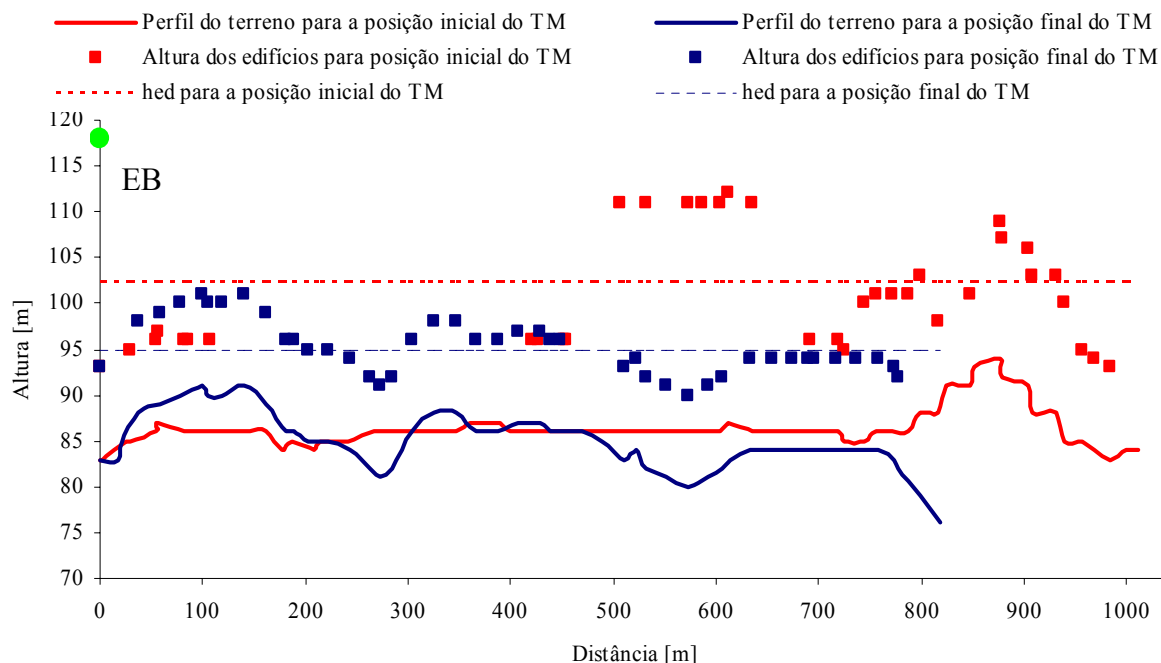


Figura 5.6 – Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Rua António Cardoso.

Para a Rua Soares dos Passos, Figura 5.4, após ter sido marcado o percurso do TM e a posição da EB, foi possível comparar as medidas com os valores estimados, Figura 5.7. De maneira a poder compreender da melhor forma os resultados obtidos, é possível analisar a Tabela N.1 com os dados da EB e parâmetros de entrada nos modelos, e a Tabela 5.2 com os parâmetros estatísticos.

Analisando os resultados obtidos, é possível observar que os sinais previstos pelos dois modelos andam muito próximos um do outro, mas um pouco afastados em relação ao obtido pelas medidas; isto deve-se possivelmente à discrepância da altura dos prédios entre a realidade e a base de dados usada no simulador. Embora os sinais estimados acompanhem quase sempre o andamento das medidas, nos últimos 100 m o sinal medido tem um forte crescimento. Este crescimento deve-se ao facto de a última parte do percurso ser uma área

aberta como se pode ver na circunferência vermelha representada na Figura 5.4. No entanto a caracterização do terreno do simulador tem essa zona como residencial com edifícios com alturas de 10 m, o que assim provoca esse erro entre os sinais estimados e o experimental. Para uma melhor compreensão das características do terreno da base de dados é possível ver a Figura N.1 no Anexo N.

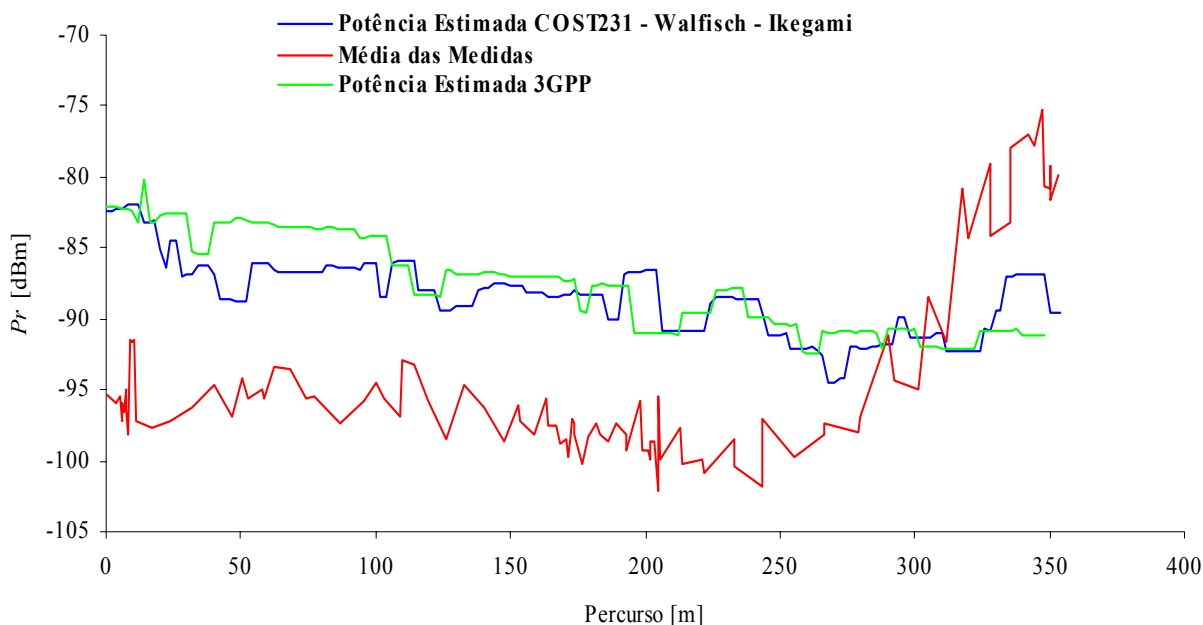


Figura 5.7 - Comparação dos modelos com as medidas para a Rua Soares dos Passos.

Para que esta secção não se torne demasiado extensa, os gráficos e as tabelas para a Rua Duarte Pacheco Pereira encontram-se no Anexo N. Apenas os dados da análise estatística se encontram nesta secção, Tabela 5.2. Antes de se analisar os resultados obtidos para esta situação, é conveniente realçar que o número de pontos medidos nesta rua são apenas 25 e com separação média de 9.68 m, o que é péssimo para a aferição de resultados.

Tabela 5.2 – Parâmetros estatísticos das zonas regulares analisadas.

Ruas	COST231			3GPP			Nº Pontos Estimados	Nº Pontos Medidos
	$\mu_{[dB]}$	$\mu_{abs[dB]}$	$\sigma_{[dB]}$	$\mu_{[dB]}$	$\mu_{abs[dB]}$	$\sigma_{[dB]}$		
António Cardoso	4.41	5.56	5.50	2.28	4.22	4.91	298	151
Soares dos Passos	7.17	9.38	6.78	7.78	10.15	7.21	180	101
Duarte Pacheco Pereira	7.69	7.77	2.64	13.13	13.13	3.37	120	25

Analisando a Figura N.3 é possível ver que os sinais estimados acompanham a evolução do sinal medido, embora estejam um pouco acima do valor deste sinal. Para o modelo do COST 231 essa ocorrência em princípio deve-se ao facto do TM nunca ter edifícios atrás de si durante o percurso ao longo da rua. Assim, como não existem edifícios depois da rua, não vai haver sinal reflectido; como o COST231 contabiliza esse sinal reflectido, então o valor do

sinal estimado é ligeiramente superior ao medido. Quanto ao modelo do 3GPP, este tem um valor de sinal estimado superior aos outros a partir dos 50 m, pois por volta deste ponto a separação dos edifícios aumenta; como este parâmetro é muito sensível para este modelo, então o valor da atenuação estimado pelo 3GPP diminui e consequentemente o valor do sinal estimado aumente.

Analisando os resultados obtidos, é possível concluir que os modelos estimam razoavelmente o sinal, no entanto o modelo do COST231 apresenta ligeiramente melhores resultados do que o 3GPP, uma vez que é menos sensível a erros na caracterização do terreno.

5.2.3. Zonas Irregulares

Sabendo que os modelos não têm, nas zonas irregulares, um comportamento tão bom como nas zonas regulares, é de interesse averiguar o seu desempenho nessas zonas onde as características do terreno diferem do ambiente padrão. Assim, foram escolhidas para análise duas zonas da Avenida da Boavista, a Rua Serpa Pinto e a Rua Dr. R. Jorge.

Na zona da Avenida da Boavista perto do Parque da Cidade, Figura 5.8, depois de ser marcada a posição da EB, a posição inicial e final do TM, é possível obter através do simulador o comportamento do sinal estimado ao longo do troço marcado. Dessa forma é então possível comparar os valores medidos com os estimados, Figura 5.9. Para uma melhor compreensão do desempenho dos modelos é possível consultar a Tabela O. 1 e a Tabela 5.3.



- posição da EB
- percurso efectuado pelo TM

Figura 5.8 - Fotografia aérea da Avenida da Boavista (Parque da Cidade) (extraído de [20]).

Comparando o andamento das potências estimadas com a medida pode ser verificado que o modelo do COST231 tem um andamento muito próximo do sinal medido, existindo apenas uma variação entre os 480 e os 750 m. O modelo do 3GPP também acompanha o andamento

do sinal medido, mas com a potência mais elevada do que a potência medida. A diferença no decaimento da potência medida, entre os 480 e os 750 m, e os restantes modelos poderá ter a ver com algum obstáculo que não é contabilizado na caracterização do terreno no simulador. O motivo de o modelo do 3GPP ter uma potência estimada mais elevada, prende-se com o facto de o simulador não conseguir estimar bem a separação entre edifícios, principalmente quando no meio do perfil entre a EB e o TM existem áreas abertas, levando a que a separação entre edifícios seja sobrestimada, provocando um aumento no sinal estimado pelo 3GPP em relação à realidade, uma vez que a separação entre os edifícios é um parâmetro muito sensível neste modelo, Figura H.3.

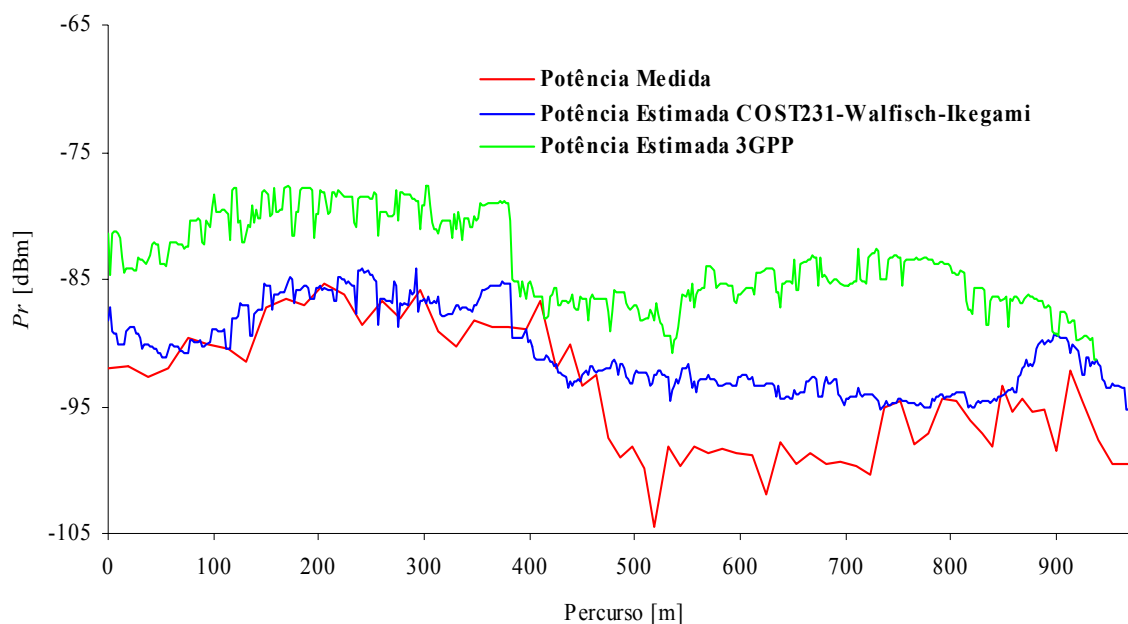


Figura 5.9 - Comparação dos modelos com as medidas para o troço da Avenida da Boavista (Parque da Cidade).

Outra zona analisada foi um troço da Avenida da Boavista que é intersectado pela VCI, Figura 5.10. Na Tabela O.2 estão representadas as coordenadas da EB e as do ponto inicial e final do TM; para além disso também podem ser vistas algumas características da EB, tais como o azimuth, o *downtilt* e a altura, bem como os parâmetros de entrada dos modelos. A partir destes dados o simulador traçou as curvas representadas na Figura 5.11. Analisando essa figura e recorrendo aos parâmetros estatísticos da Tabela 5.3 é possível verificar que os modelos não têm um comportamento muito bom, tal como era de esperar. Para além do andamento das curvas simuladas ser diferente da curva medida, estas apresentam também uma gama de valores de potências estimadas bastante mais abaixo das potências medidas.

A grande diferença de gamas de valores deve-se ao facto da antena da EB se encontrar abaixo da altura dos edifícios durante todo o percurso do TM, e como se sabe o modelo não apresenta bons resultados nessas condições. Isso pode ser confirmado através da análise do parâmetro μ_{abs} de cada modelo. No entanto, o modelo 3GPP apresenta valores de potência mais próximos, 14.01 contra os 46.63 dB do modelo COST231, pois tal como aconteceu anteriormente, o valor da separação entre edifícios calculado pelo simulador vem sobrestimado, provocando o aumento do sinal estimado pelo 3GPP.

Relativamente à diferença que se verifica no andamento das curvas, fica-se a dever ao facto de, para o cálculo da potência estimada, se contabilizar a influência dos cruzamentos na zona

intermédia do percurso. Nessa zona nota-se um ligeiro aumento das potências estimadas, ao contrário das medidas que sofrem um ligeiro decréscimo, pois, a velocidade elevada a que o automóvel se deslocava não permitiu medir um número suficiente de pontos nos cruzamentos que contabilizassem esse efeito. De referir que estavam disponíveis para análise apenas 24 pontos medidos, face aos 208 pontos estimados.



- posição da EB
- percurso efectuado pelo TM

Figura 5.10 - Fotografia aérea da intersecção da VCI com a Avenida da Boavista (extraído de [20]).

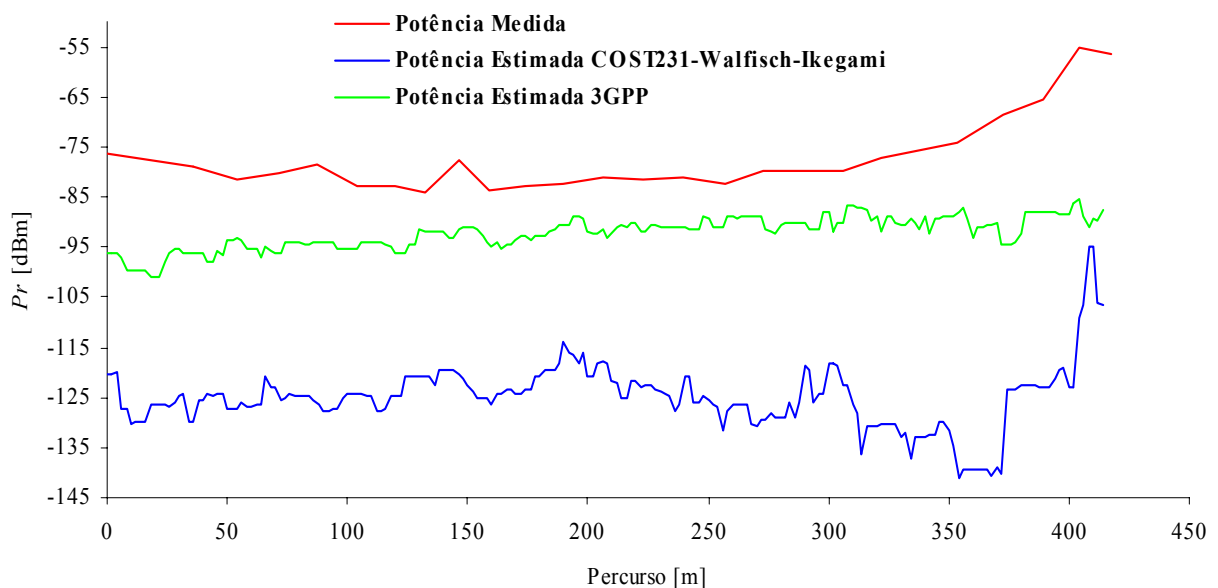


Figura 5.11 - Comparação dos modelos com as medidas para o troço da Avenida da Boavista que intersecta a VCI.

Na rua de Serpa Pinto, Figura O.3, a potência do sinal previsto pelos modelos apresenta um andamento semelhante ao das medidas. No entanto, como se pode ver na Figura O.4 o modelo COST231 comporta-se melhor que o modelo do 3GPP, sendo este comportamento confirmado pelos valores de μ_{abs} e de σ mais baixos como se pode ver na Tabela 5.3. O pico inicial que se pode ver no gráfico do modelo do 3GPP fica-se a dever ao facto de o perfil intersectar *pixels* da rua de S. Dinis, o que vai provocar um aumento da separação entre edifícios. No cenário real a rua nunca é intersectada, apenas no modelo, pois, os *pixels* têm um erro associado devido à sua resolução de 20 m. Este parâmetro é mais crítico no modelo do 3GPP do que no modelo do COST231, o que permite justificar a diferença nas duas curvas.

Com o objectivo de averiguar o comportamento dos modelos numa zona irregular e para distâncias curtas entre a EB e o TM, escolheu-se o centro da cidade do Porto, junto à Câmara Municipal, mais propriamente a rua do Dr. R. Jorge, como se pode ver na fotografia da Figura O.6. As respectivas coordenadas da EB e das posições iniciais e final do TM podem ser vistas na Tabela O.4. Na Figura O.7 estão representadas as curvas referentes às potências estimadas pelos dois modelos e a curva com a potência do sinal medido. Na Tabela 5.3 encontram-se os valores dos diferentes parâmetros estatísticos para cada um dos modelos, bem como o número de pontos estimados e os medidos.

Ambos os modelos dão resultados um pouco afastados em relação aos valores medidos. Isto já era esperado à partida, pois como o simulador tem resolução de 20 m, então para distâncias curtas é muito difícil ao simulador caracterizar o terreno da melhor maneira, sendo isso, uma forte fonte de erros nos resultados. O valor baixo do sinal estimado pelo 3GPP entre os 40 e 80 m deve-se uma vez mais à separação entre os edifícios, pois como o simulador não tem resolução suficiente vai subestimar a separação dos edifícios, que vai levar a uma sobrestimação do sinal. Em relação ao pico de sinal que é observado nas curvas do 3GPP e COST231 aos 90 m, este deve-se ao ganho da EB nesse ponto.

Tabela 5.3 - Parâmetros estatísticos para as zonas irregulares analisadas.

Ruas	COST231			3GPP			Nº Pontos Estimados	Nº Pontos Medidos
	$\mu_{[dB]}$	$\mu_{abs_{[dB]}}$	$\sigma_{[dB]}$	$\mu_{[dB]}$	$\mu_{abs_{[dB]}}$	$\sigma_{[dB]}$		
Av. da Boavista (Parque da Cidade)	3.12	3.44	2.98	10.08	10.08	3.59	485	68
Av. da Boavista (Intersecção com a VCI)	-46.63	46.63	9.15	-14.01	14.01	5.73	208	24
Serpa Pinto	-3.49	3.49	2.12	-6.95	6.95	3.67	83	11
Dr. R. Jorge	-8.29	10.00	10.37	-23.44	23.57	15.19	79	41

Nas zonas irregulares, o modelo do COST231 apresenta bons resultados, salvo quando a EB está abaixo da altura média dos edifícios ou quando a distância entre EB e TM é demasiado curta. O modelo do 3GPP não tem um desempenho tão bom, pois, nestas zonas aumenta o erro da estimação da separação entre os edifícios.

5.3. Aplicação dos Modelos

Após a aferição do simulador, e verificadas as suas limitações, é estimada a área de cobertura para uma célula em diferentes cenários. Como os modelos de propagação foram dimensionados para o UMTS, torna-se imperativo estimar essa área de cobertura para cada um dos serviços, uma vez que esta é sensível ao tipo de serviço utilizado, como foi visto no Capítulo 2.

Como o objectivo desta ferramenta é ajudar a tomar decisões no planeamento celular, torna-se indispensável assegurar que não hajam sobrestimações do sinal, pelo que, é necessário usar margens de segurança. Assim, a cobertura é estimada para o UL pois é o TM que limita o alcance da ligação. Além disso, como já foi referido no Capítulo 4, é necessário levar em consideração as margens de desvanecimento rápido, lento, atenuações de interiores e as perdas devido à proximidade do utilizador para o pior caso.

Na representação da cobertura em cada uma dos mapas é usada uma cor para cada um dos serviços. Assim, a vermelho é representada a cobertura para o serviço mais limitativo, 384 kbps, a azul-escuro o serviço a 144 kbps, o verde descreve a cobertura para os 64 kbps, e por fim o azul-claro corresponde à cobertura para a voz. De referir, que em todas as zonas onde estiver uma destas cores é garantida a cobertura para o serviço associado a essa cor e a todos os serviços que tenham uma exigência mais baixa a nível de potência.

De realçar mais uma vez que o modelo base utilizado para a opção Cobertura do simulador foi o COST231 – Walfisch – Ikegami, uma vez que é um modelo que tem as suas condições de validade bem definidas. E para além disso apresenta resultados mais fiáveis em todas as condições aferidas do que o modelo do 3GPP.

Para uma primeira análise foi escolhida a cidade do Porto, nomeadamente a zona da Rotunda da Boavista. Colocando a EB a 10 m de altura acima do edifício e com um azimute de 90°, para uma frequência de 2120 MHz e uma percentagem de 85 % para a cobertura dos edifícios, obtém-se o resultado da Figura P.1. Ao analisar-se a Figura P.1., é possível ver que está completamente de acordo com os parâmetros de entrada.

Primeiro, quanto ao facto de ter sido escolhida uma percentagem de cobertura em edifícios de 85 %, correspondente a 25 dB de acréscimo na atenuação total. Como se pode ver existe uma correspondência directa entre a existência de edifícios e falhas na cobertura, evidenciando desta forma as ruas no mapa de cobertura.

Segundo, relativamente ao azimute da antena, uma vez que os 90° escolhidos de azimute correspondem à direcção do alcance máximo da cobertura, cerca de 2540 m, a mancha azul escura correspondente ao serviço dos 144 kbps do lado oeste da EB, pelo facto de essa zona ser uma área aberta e plana. As pequenas zonas vermelhas afastadas da EB correspondem a pontos onde a EB fica em linha de vista com o TM, ou seja, são pontos onde o primeiro elipsóide de Fresnel não é intersectado, sendo desse modo a atenuação de propagação total igual à atenuação em espaço livre.

Variando a percentagem de cobertura em edifícios para 50 %, valor que corresponde a um aumento de 15 dB na atenuação total de propagação, é possível obter a Figura P.2. Tal como era previsto, a cobertura melhorou para os edifícios circundantes.

Ao se variar o azimuth para os 180° a cobertura anterior vai variar, como se pode ver pela Figura 5.12. O alcance máximo da cobertura vai rodar 90°; ao mesmo tempo, como nessa direcção o terreno é menos irregular em relação ao caso anterior, existem então mais zonas cobertas na direcção de ganho máximo. A zona a encarnado a sul da EB, no lado de Gaia, deve-se, como já foi dito atrás, ao facto da EB estar em linha de vista com o TM. É de realçar que quando os autores deste trabalho realizaram a campanha de medidas no Porto com a Vodafone, notaram que precisamente nessa zona de Gaia chegava sinal de nove antenas distintas situadas no centro do Porto, o que a nível de interferência é péssimo, mas que neste caso confirma o resultado obtido pelo simulador.

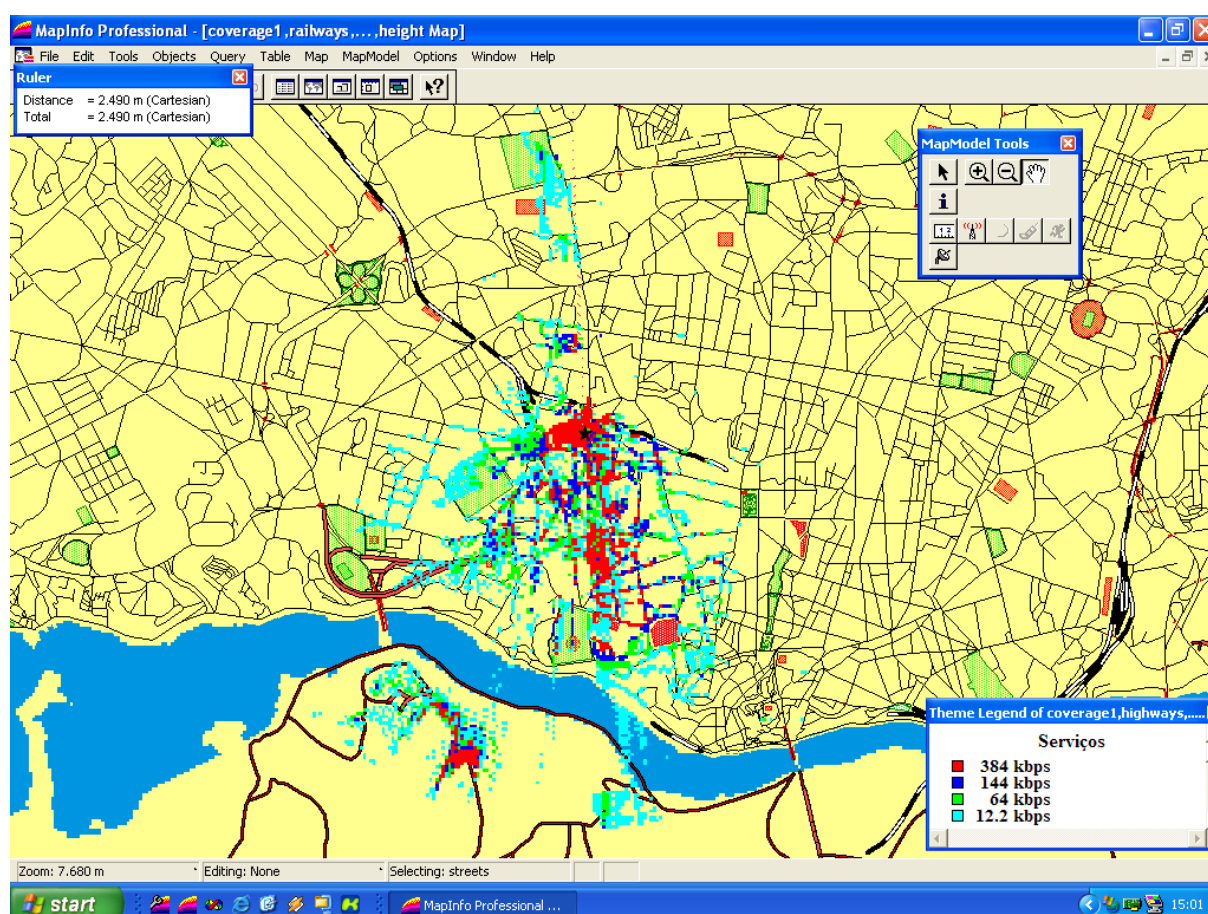


Figura 5.12 - Cobertura para a zona da Avenida da Boavista, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 85 %, mas com azimuth de 180°.

Como foi visto nos casos anteriores, o azimuth da antena tem um forte peso nos resultados da cobertura. Assim, para analisar o alcance máximo da cobertura em todas as direcções e a influência do terreno no resultado, foi assumida a EB como omnidireccional e com o ganho máximo de 18.5 dBi para os restantes casos analisados.

Colocando agora a EB noutra zona do Porto, concretamente na zona de Serralves, com uma altura de 10 m, frequência 2120 MHz e percentagem de cobertura para os edifícios de 85 %, é

obtida a Figura P.3. Analisando esta figura podemos ver que, considerando a antena omnidirecional, as áreas cobertas aumentam. Outro factor para que neste caso aumente a cobertura, nomeadamente para o serviço a 384 kbps, deve-se ao facto de a zona em causa ser menos irregular e ter mais áreas abertas em relação ao caso anterior. A zona a oeste da EB não tem cobertura pois nessa zona existe uma ligeira subida da altura do terreno, bem como a existência de edifícios altos, que fazem com que a EB esteja abaixo deles. Como foi visto na secção anterior o modelo COST231 não é fiável para estes casos uma vez que subestima o sinal. Diminuindo a percentagem de cobertura de edifícios de 85 para 50 % a cobertura aumenta como era previsto, e se pode ver na Figura P.4.

Em relação à cidade de Lisboa foram simuladas as coberturas para a zona das Avenidas Novas e para o cimo da avenida António Augusto de Aguiar. Infelizmente devido à falta de resolução não foi simulado a zona da Baixa Pombalina.

Deste modo para a zona das Avenidas Novas, colocando a EB a 15 m acima dos prédios, frequência 2120 MHz e percentagem de cobertura para os edifícios de 85 %, obtém-se a Figura Q.1, onde se pode ver claramente o detalhe das ruas no mapa da cobertura. Como a EB está muito acima dos edifícios então a cobertura para os 384 kbps é mais alargada. Reduzindo a percentagem para os 50 %, é possível ver com facilidade na Figura Q.2 a existência de dois tipos de andamento na evolução da cobertura para os quatro serviços: um andamento para as ruas e áreas abertas e outro para os edifícios, uma vez que a atenuação dos edifícios é 15 dB acima da atenuação nas ruas.

De maneira a ser visualizada na cobertura de uma célula uma separação uniforme entre os serviços foi considerado a partir do próximo caso uma percentagem de cobertura para edifícios de 25 %, que corresponde somente a um acréscimo de 5 dB no valor da atenuação de propagação. Assim para a zona da avenida António Augusto Aguiar, colocando a EB a 15 m acima dos edifícios e frequência de 2120 MHz observa-se para a cobertura a Figura Q.3. Nesta situação é possível visualizar bem a fronteira entre cada um dos serviços. Para o lado oeste da EB, nomeadamente em direcção da zona de Monsanto pode-se verificar a evolução da cobertura uniformemente para cada serviço até desaparecer, devido ao desnível do terreno na zona de Campolide. Depois, à medida que a altura do terreno vai subindo, e aproximando-se da situação da linha de vista com a EB, a cobertura para cada um dos serviços vai voltar a ocorrer, aparecendo primeiro para a voz, e vai evoluindo até ao serviço mais rigoroso. A área de serviço para os 384 kbps estende-se mais para o norte da EB do que para o sul, pois para norte o terreno é plano, sofre apenas ligeiras alterações e a EB está bem acima dos edifícios. Para sul o terreno é irregular e com grandes desníveis fazendo com que, num ponto de vista do modelo, a diferença entre altura do último edifício e o TM seja grande, provocando assim um forte aumento no valor da atenuação de propagação devida à difracção do sinal no último edifício.

Analisando a opção Modo Continuo para a Avenida Elias Garcia em Lisboa, Figura 5.13, com a EB colocada a 10 m acima dos edifícios obtém-se a evolução da potência recebida estimada pelo modelo COST231 – Walfisch – Ikegami, Figura R.1. Ao mesmo tempo fazendo a análise para o modelo do 3GPP é obtido a Figura R.2. De modo a poder avaliar os resultados obtidos é possível consultar a Figura R.3, correspondente à evolução do ganho ao longo do percurso, e a Figura R.4 que representa a redução de atenuação por influência dos cruzamentos ao longo da Avenida.

Observando o sinal para os dois modelos pode-se constatar que as curvas apresentam um andamento semelhante, embora o sinal estimado pelo modelo do 3GPP esteja ligeiramente acima do previsto pelo modelo do COST231, uma vez que, como já foi referido atrás, para o 3GPP a largura dos edifícios pesa muito no resultado da atenuação, assim basta um ligeiro erro na determinação do parâmetro da largura dos edifícios, para que haja uma diferença entre o 3GPP e o COST231. A variação brusca do valor do sinal nos dois modelos deve-se à redução da influência dos cruzamentos, Figura R.4. Esta variação acontece pois como se pode ver na Figura 5.13, o último cruzamento tem um peso menor em relação ao primeiro, uma vez que a distância do centro do cruzamento à EB é maior e o ângulo φ_c é menor.

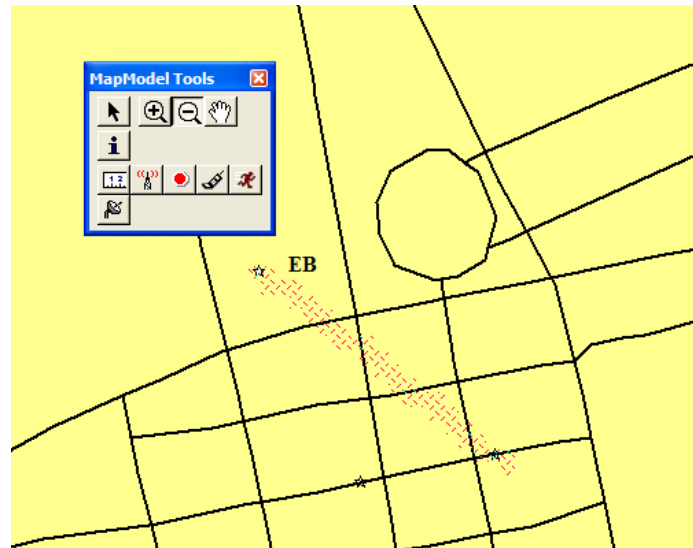


Figura 5.13 – Modo Continuo para a Avenida Elias Garcia.

6. Conclusões

O grande objectivo deste trabalho foi criar uma ferramenta que permitisse simular o comportamento da atenuação de propagação para o UMTS em ambientes urbanos com base nos modelos já existentes. Para tal, o projecto foi dividido em três partes.

A primeira parte deste trabalho consistiu na consolidação de conceitos, mais propriamente na interface rádio do sistema UMTS. De seguida, para uma melhor compreensão do comportamento das ondas electromagnéticas em ambientes urbanos, foi feito um estudo intensivo dos aspectos teóricos da propagação. Consequentemente, analisaram-se vários modelos de propagação existentes, válidos para a terceira geração, concretamente os modelos COST231 – Hata, COST231-Walfisch-Ikegami, o modelo do 3GPP para macro-células e ainda o modelo Gonçalves que contabiliza a influência dos cruzamentos na evolução do sinal ao longo de uma rua, e que serve de complemento aos outros modelos.

Na segunda parte do trabalho foi desenvolvida uma ferramenta para a implementação dos modelos de propagação. Como a Vodafone disponibilizou dados do terreno em formato matricial, foi decidido usar como plataforma do simulador, o software *MapInfo*, uma vez que tem grandes potencialidades para trabalhar este tipo de informação. Para o tratamento dos dados relativos ao terreno e para gestão da interface no simulador foi necessário criar um algoritmo em *MapBasic*. De maneira a tornar o simulador mais rápido e eficiente decidiu-se usar o C++ para a manipulação dos parâmetros de entrada dos modelos de propagação, bem como para o seu cálculo. Em anos anteriores já tinham sido elaborados alguns programas para a aplicação de modelos de propagação. Deste modo, antes de se começar a escrever o código do algoritmo do simulador MapModel, os autores deste trabalho analisaram o algoritmo de alguns desses trabalhos, de maneira a facilitar a implementação do MapModel. Verificou-se que era possível extrair dos trabalhos anteriores, partes de código que se ajustavam bem à estrutura planeada do algoritmo do MapModel, nomeadamente código relativo ao cálculo do ganho da EB e da influência dos cruzamentos no sinal.

Uma vez que as cidades na maior parte das vezes não apresentam uma estrutura regular, para a qual os modelos foram criados, i.e., prédios igualmente separados com alturas uniformes, torna-se imperativo desenvolver métodos que permitam a aplicação destes modelos em qualquer situação. Deste modo surge o grande desafio do trabalho.

A abordagem feita para ultrapassar este desafio consiste em modelar alguns parâmetros de entrada dos modelos de maneira a que qualquer perfil estudado seja considerado uniforme no ponto de vista do modelo. Para tal, é necessário dar especial atenção aos parâmetros mais críticos, nomeadamente a altura dos edifícios, a largura das ruas e à separação de edifícios. Deste modo, para a altura dos edifícios considera-se que o seu valor de entrada nos modelos, corresponde à média das alturas dos edifícios que intersectam o primeiro elipsóide de Fresnel. Para a largura das ruas são levadas em conta todas as ruas que intersectam o perfil entre a EB e o TM sendo o seu valor na entrada do modelo igual à média da largura dessas ruas. Quanto à separação entre edifícios é usado também o mesmo método da média.

A terceira parte do trabalho teve como objectivo aferir o comportamento do simulador. Para isso, procedeu-se a uma campanha de medidas realizada na cidade do Porto com a colaboração do operador de comunicações móveis Vodafone. Como na altura o operador andava a fazer testes de optimização de rede a nível de interferência, não foi possível realizar

as medidas nas condições ideais para a aferição dos modelos de propagação, uma vez que as medidas foram efectuadas num automóvel, que devido aos condicionaisismos no trânsito impossibilitou a recolha de medidas em intervalos pequenos e uniformes.

Finalizada a campanha de medidas da Vodafone, foram então escolhidas as ruas da cidade do Porto que apresentassem medidas que cumprissem os requisitos mínimos para realizar a aferição. Optou-se por dividir a aferição dos modelos em dois tipos de terreno, terrenos irregulares e terrenos regulares.

Da análise entre as medidas experimentais e as previsões teóricas, obtiveram-se de uma maneira geral resultados bastante satisfatórios. Nomeadamente para as zonas regulares, foram obtidos resultados para o valor da média do erro absoluto entre 4.22 e 13.13 dB para o modelo do 3GPP e para o modelo COST231-Walfisch-Ikegami entre 5.56 e 9.38 dB. Para o desvio padrão do erro este varia entre 3.37 e os 7.22 dB para o modelo 3GPP enquanto que para o modelo do COST231 tem uma variação entre 2.64 e 6.78 dB. O desvio padrão é grande num dos casos, devido numa parte da rua existirem grandes diferenças entre a realidade e a tabela matricial que caracteriza o terreno.

Quanto às zonas irregulares, foi possível analisar um caso em que a EB estava abaixo dos edifícios. Nessa situação verificou-se uma grande diferença entre as medidas experimentais e os valores simulados. O valor da média do erro absoluto e desvio padrão do erro para o modelo COST231 foi respectivamente de 46.63 e 9.15 dB, enquanto que para o modelo 3GPP 14.01 e 23.57 dB. Este desacordo entre as medidas e os valores simulados para este caso já era previsto, uma vez que o modelo do 3GPP utilizado foi dimensionado para situações em que a EB está acima dos telhados. Na especificação do modelo do COST231 vem realçado que a previsão da atenuação de propagação, nos casos que a EB estiver abaixo dos edifícios, é má.

Para as situações em que a EB estava acima dos edifícios em terrenos irregulares, foram obtidos resultados razoáveis. Para o modelo 3GPP o valor da média do erro absoluto foi entre os 4.22 e 13.13 dB e para o desvio padrão do erro foram obtidos valores entre 5.73 e 15.19 dB. Para o modelo COST 231 obtiveram-se os valores entre 3.44 dB e 10 dB para o valor da média do erro absoluto, e 2.12 e 10.37 dB para o desvio padrão do erro.

O valor elevado do desvio padrão do erro e do valor da média do erro absoluto para um dos casos, foi devido à proximidade entre a EB e o TM, uma vez que a resolução do simulador é de 20 m, que é extremamente baixo para uma boa caracterização do terreno para o caso em que a distância entre a EB e o TM é cerca de 60 m. Nos restantes casos para o modelo do COST231 os resultados são bastante satisfatórios. Pelo contrário o modelo do 3GPP nas zonas irregulares apresenta por vezes erros consideráveis.

Algumas das variações entre o sinal estimado e medido ocorrem devido ao facto de o perfil entre o TM e a EB por vezes intersectar ruas que fazem um ângulo com a EB próximo de zero. Nesses casos o valor da largura de ruas e da separação entre edifício difere muito da realidade, pois como o simulador tem uma resolução de 20 m, não consegue caracterizar bem o terreno na zona onde ocorre a intersecção do perfil com essas ruas. Outras das razões para a variação do sinal, deve-se à má caracterização de alguns cruzamentos nas medidas efectuadas, uma vez que o automóvel a movimentar-se com alguma velocidade não permite a recolha de um número de pontos suficiente para caracterizar o cruzamento.

Relativamente à comparação do desempenho do simulador no caso da utilização do modelo COST231 para as zonas regulares e irregulares, é curioso salientar o facto de nas ruas regulares o sinal simulado ser sobrestimado, enquanto que nas ruas irregulares é subestimado. Esta variação da estimação do sinal deve-se ao cálculo da altura dos edifícios, uma vez que nas ruas regulares a altura dos edifícios praticamente não varia, enquanto que no caso das ruas irregulares varia muito, o que aumenta o valor médio da altura dos edifícios em relação ao valor médio dos edifícios para ruas regulares. Deste modo para a maioria das ruas irregulares a diferença entre a altura do TM e a altura do último edifício é sobrestimada em relação ao seu valor real. Como a diferença de alturas entre o TM e o último edifício influencia bastante o termo da atenuação que contabiliza a difracção no topo do último edifício pelo que o seu valor vai aumentar, provocando uma subestimação do sinal simulado.

Embora a caracterização dos limites de validade da aplicação do modelo do 3GPP serem indefinidos por parte de [10], verifica-se que tem um bom desempenho na predição do sinal para as zonas regulares, embora com alguns erros associados pois o simulador tem dificuldade em estimar correctamente o valor da separação entre edifícios provocando em algumas situações a sobrestimação do sinal. Para as zonas irregulares o modelo não tem um desempenho tão bom, pois nessas zonas agrava-se o erro da estimação da separação entre os edifícios por parte do simulador, e como este modelo é muito sensível a esse parâmetro, o sinal é estimado com erro.

Desta forma é possível concluir que para o modelo do COST231 de uma maneira geral o simulador tem bons desempenhos, salvo quando a EB está abaixo da altura dos edifícios, quando está muito próxima do TM, quando o perfil intersecta ruas com ângulos de rua reduzidos ou quando o TM situa-se em áreas abertas sem linha de vista.

Através do resultado obtido, o simulador MapModel torna-se uma ferramenta com bastante utilidade para a análise da cobertura das EB acima dos edifícios no UMTS, uma vez que dá resultados muito próximos da realidade e com alguma margem de segurança.

Como trabalho futuro é sugerido que os modelos sejam aferidos com um processo de campanha de medidas diferente do usado, ou seja com um maior número de pontos medidos por rua, equiespaçados a distâncias curtas, e escolhendo os locais que melhor se adequam para fazer medições. Ao mesmo tempo era interessante testar um modelo adequado para a estimação do sinal para os casos em que a EB está abaixo da altura dos edifícios.

Por outro lado como o simulador MapModel também calcula e representa a área de cobertura para cada um dos serviços do UMTS, seria bastante interessante como trabalho futuro, estudar a evolução da área de cobertura de uma célula com o aumento do seu factor de carga, ou seja testar o desempenho da cobertura da célula com vários utilizadores a usarem diversos serviços. Ao mesmo tempo seria interessante aperfeiçoar o simulador para que fosse possível simular a cobertura em simultâneo de várias células e estudar a interferência destas.

Anexo A – Classificação dos Serviços pelo 3GPP

Segundo a 3GPP QoS [21] os serviços podem ser classificados consoante o tipo de tráfego gerado. Assim, são definidas as seguintes classes:

- *Conversational*
- *Streaming*
- *Interactive*
- *Background*

Conversational é a classe em que o atraso é uma variável crítica, adequada a aplicações em tempo real, enquanto *streaming* é uma classe assimétrica, apropriada para visualizar vídeos em tempo real, pois a informação chega continuamente, e é armazenada em *buffers*, o que permite em paralelo executar a aplicação, ao contrário da classe anterior, o atraso não é tão crítico. A classe *interactive* é caracterizada pelo tráfego interativo, ou seja quando é necessário o utilizador interagir com uma aplicação, como por exemplo *web browsing*, acesso a servidores e acesso a base de dados. Por último, a classe *background* destina-se a tráfego insensível ao tempo, como o correio electrónico e mensagens escritas. Como se pode ver, a classe *conversational* é a mais exigente, uma vez que as aplicações em tempo real são mais sensíveis ao tempo de atraso e têm que ter um determinado débito binário garantido, usando-se para isso a comutação por circuitos para estabelecimento da ligação. O resumo das características de cada uma destas classes encontra-se na Tabela A.1.

Tabela A.1 - Classificação dos serviços pelo 3GPP [21].

Classes de Tráfego	<i>Conversational</i>	<i>Streaming</i>	<i>Interactive</i>	<i>Background</i>
Características fundamentais	- Ritmo binário garantido - Grande sensibilidade ao atraso (100 ms até 400 ms) $10^{-5} < \text{BER} < 10^{-3}$	- Ritmo binário garantido - Sensibilidade média ao atraso (<1 s) $10^{-8} < \text{BER} < 10^{-5}$	- Ritmo binário não garantido - Baixa sensibilidade ao atraso (~2 s) $\text{BER} < 10^{-9}$	- Ritmo binário não garantido - Sem sensibilidade ao atraso $\text{BER} < 10^{-9}$
Exemplos de aplicações	Voz, Vídeo-Conferencia	<i>Video streaming</i>	Acesso à internet	Telemetria, <i>email</i>

Anexo B – Alguns Aspectos Básicos Sobre o UMTS

O espectro de frequências para o UMTS é situado entre os 1900 MHz e os 2025 MHz e entre os 2110 MHz e 2200 MHz. Nomeadamente, o espectro terrestre é dividido em dois modos de operação. No modo FDD o espectro de frequências é simétrico, em UL situa-se entre os 1920 MHz e os 1980 MHz, enquanto que em DL encontra-se na gama de frequências dos 2110 MHz a 2170 MHz. No modo TDD visto que o UL e o DL usam a mesma portadora o espectro é assimétrico, e situa-se entre os 1900 MHz e os 1920 MHz e entre os 2010 MHz e 2025 MHz. Existe também uma parte do espectro destinada às comunicações via satélite que em UL se situam entre os 1980 MHz e os 2010 MHz e em DL encontram-se entre os 2170 MHz e os 2200 MHz. Na Figura B.1 podemos visualizar a atribuição do espectro para o UMTS.

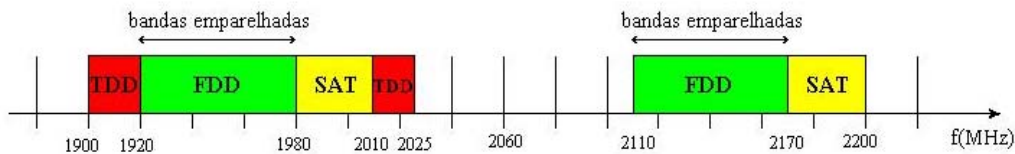


Figura B.1 - Espectro disponível para o UMTS na Europa.

Na Figura B.2 está ilustrada a forma como a árvore de códigos (OVSF) é gerada.

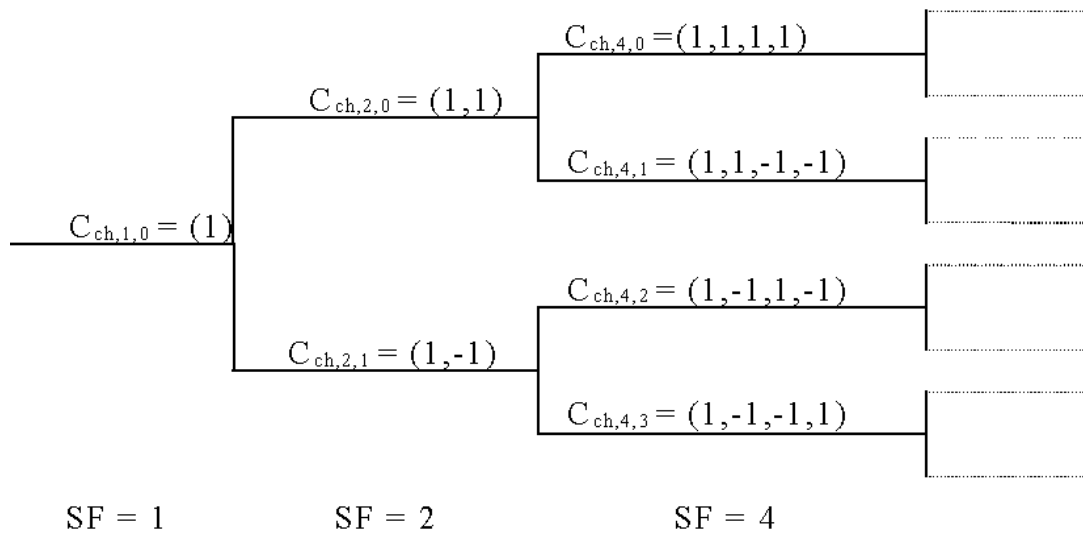


Figura B.2 - Método de geração dos códigos (OVSF) (extraído de [22]).

Anexo C – Caracterização do UL e DL nos Balanços de Potência

Existem diferenças nos balanços de potência quer para o UL e o DL, nomeadamente no cálculo do EIRP e na potência à entrada no receptor.

Quando o sentido da ligação é o descendente a EIRP é dado por:

$$EIRP^{DL}_{[dBm]} = P_{Tx[dBm]} - L_c[dB] + G_e[dBi] \quad (C.1)$$

sendo:

- L_c as perdas no cabo entre o emissor e a antena,
- P_{Tx} a potência de saída do emissor.

No sentido ascendente é (C.2) que caracteriza o EIRP.

$$EIRP^{UL}_{[dBm]} = P_{Tx[dBm]} - L_u[dB] + G_e[dBi] \quad (C.2)$$

em que:

- L_u depende do tipo de serviço, se for voz tem que ter em conta as perdas devido à proximidade do TM com a cabeça do utilizador (entre 3 dB a 10 dB), se o serviço for dados então as perdas são aproximadamente 3 dB.

Para o UMTS, o EIRP assume os valores apresentados na Tabela C.1.

Tabela C.1 - Valores de EIRP para o UMTS (extraído de [2]).

Estação Base			Terminal Móvel
Macro Célula	Micro Célula	Pico Célula	
[40,43] dBm	[30,43] dBm	[20,43] dBm	[10,33] dBm

A potência no receptor depende do sentido da ligação e do sistema. Assim, para o sentido ascendente a potência à entrada do receptor é dada pela equação:

$$P_{Rx[dBm]} = P_r[dBm] - L_c[dB] \quad (C.2)$$

onde:

- P_r caracteriza a potência disponível na recepção aos terminais da antena.

enquanto que (C.3) representa a potência à entrada do receptor no sentido descendente

$$P_{Rx[dBm]} = P_r[dBm] - L_u[dB] \quad (C.3)$$

No UMTS, a sensibilidade do receptor, $P_{Rx \text{ min}}$, representada em (C.4) é um factor preponderante para o cálculo da atenuação máxima, uma vez que para além de depender do

sentido da ligação, depende fortemente do tipo de serviço, débito binário e margem de interferência.

$$P_{Rx\min}[\text{dBm}] = N_{[\text{dBm}]} - G_p[\text{dB}] + \frac{E_b}{N_0} [\text{dB}] \quad (\text{C.4})$$

em que:

- G_p define o ganho de processamento caracterizado por (C.6), dependente do ritmo de transmissão associado ao serviço, R_b , e do ritmo de codificação R_c ,

$$G_p[\text{dB}] = 10 \log \left(\frac{R_c}{R_b} \right) \quad (\text{C.6})$$

- $\frac{E_b}{N_0}$ descreve a relação sinal-ruído consoante o serviço utilizado, como se pode ver na Tabela C.2,
- N representa o valor total da potência de ruído e é calculado por,

$$N_{[\text{dBm}]} = N_{0[\text{dBm}]} + M_I[\text{dB}] \quad (\text{C.7})$$

onde:

- M_I caracteriza a margem de interferência, dependente da carga no sistema, já representada em (2.3),
- N_0 é o valor médio da potência de ruído que pode ser estimado através da equação (C.8).

$$N_{0[\text{dBm}]} = -174 + 10 \log(\Delta f_{[\text{Hz}]}) + NF_{[\text{dB}]} \quad (\text{C.8})$$

sendo:

- F o factor de ruído,
- Δf a largura de banda do sinal, neste caso é assumida como o ritmo de codificação R_c .

No cálculo dos Balanços de Potência, para além das margens de desvanecimento lento e rápido, é necessário contabilizar também outras margens, tais como: o ganho de *Soft-Handover* e a atenuação por penetração no interior dos edifícios.

As margens adicionais contempladas são:

$$M_{[\text{dB}]} = M_{FSF}[\text{dB}] + M_{FFF}[\text{dB}] - G_{SH}[\text{dB}] + L_{int}[\text{dB}] \quad (\text{C.9})$$

onde:

- M_{FSF} representa a margem do desvanecimento lento,
- M_{FFF} é a margem do desvanecimento rápido,
- G_{SH} é o ganho de *Soft-Handover*,
- L_{int} corresponde à atenuação por penetração no interior dos edifícios.

A margem de desvanecimento lento pode ser obtida para uma percentagem de área coberta dentro de um círculo de raio R , ou para uma percentagem de locais cobertos a uma distância

R da EB. Considerando a percentagem de área coberta F_{area} , a margem desvanecimento lento é obtida através de um processo iterativo usando a expressão (C.10) extraída de [2].

$$F_{area} = \frac{1 + \operatorname{erf}(a) + e^{(2ab+1)/b^2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{ab+1}{b}\right) \right]}{2} \quad (C.10)$$

com:

$$a = \frac{\Delta P_{[\text{dBm}]}}{\sigma_{[\text{dB}]} \sqrt{2}} \quad (C.11)$$

$$b = \frac{10n \log(e)}{\sigma_{[\text{dB}]} \sqrt{2}} \quad (C.12)$$

onde:

- ΔP é tomado como a margem de desvanecimento lento ($M_{Farea}^{p\%}$).
- n indica o factor de decaimento da potência do sinal com a distância (varia com o modelo de propagação utilizado).
- σ é o desvio padrão da potência do sinal (varia com o modelo de propagação utilizado).

Quanto à margem de desvanecimento lento para uma determinada percentagem de locais cobertos, esta pode ser calculada através de:

$$M_{Farea}^{p\%} = u(p\%) \sigma_{[\text{dB}]} \quad (C.13)$$

em que $u(p\%)$ é obtido para o respectivo valor percentual a partir da Distribuição Normal.

De notar que na Tabela C.2 se considera que o utilizador pedestre se desloca a 3 km/h e o veicular a 50 km/h. É fundamental ter uma correcta estimativa do balanço de potência, pois assim, evitam-se erros no dimensionamento da capacidade da célula, uma vez que o factor de carga está relacionado com a margem de interferência.

Tabela C.2 - Valores de E_b/N_0 para diferentes serviços (extraído de [23]).

Serviço [kbps]	Modo de Comutação	Tipo de Utilizador	E_b/N_0 [dB]	
			Sentido da Ligação	
			UL	DL
12.2	Circuitos	Interior	5.8	7.7
		Pedestre	5.8	7.7
		Veicular	6.9	8.0
64	Circuitos	Interior	4.1	6.7
		Pedestre	4.2	6.7
		Veicular	5.8	7.8
64	Pacotes	Interior	4.2	6.6
		Pedestre	4.2	6.6
		Veicular	5.5	7.3
144	Circuitos	Interior	4.0	5.9
		Pedestre	4.2	6.0
		Veicular	5.8	7.5
144	Pacotes	Interior	4.0	5.9
		Pedestre	4.2	5.9
		Veicular	5.5	6.3
384	Pacotes	Interior	4.0	6.5
		Pedestre	4.2	6.7
		Veicular	5.5	7.7

Anexo D - Modelo COST 231 – Hata

O COST 231, tomando o modelo de Hata [7], cuja formulação pode ser vista no Anexo E, ao analisar as curvas de propagação de Okumura [24] para as frequências mais altas, estendeu a expressão de Hata para uma gama de frequências de [1.5,2.0] GHz. Criou-se assim o modelo COST 231 – Hata [6], que caracteriza a atenuação de propagação através de (D.1).

$$L_{p[dB]} = 46.3 + 33.9 \log(f_{[MHz]}) - 13.82 \log(h_{b[m]}) - a(h_m f)_{[dB]} + [44.90 - 6.55 \log(h_{b[m]})] \log(d_{[km]}) + C_{m[dB]} \quad (D.1)$$

em que:

$$a(h_m f) = [1.1 \log(f_{[MHz]}) - 0.7] h_{m[m]} - [1.56 \log(f_{[MHz]}) - 0.8] \quad (D.2)$$

e

$$C_{m[dB]} = \begin{cases} 0 & , \text{ cidades médias} \\ 3 & , \text{ centros urbanos} \end{cases} \quad (D.3)$$

Na Tabela D.1 estão representadas as limitações do modelo COST 231 – Hata.

Tabela D.1- Restrições do modelo formulado por COST 231 – Hata.

Parâmetro	Intervalo de Validade
Frequência (f)	[1.5,2.0] GHz
Altura da EB (h_b)	[30,200] m
Altura do TM (h_m)	[1,10] m
Distância entre a EB e o TM (d)	[1,20] km

Ao analisar a Tabela D.1 pode-se concluir que o modelo COST 231 – Hata é adequado para a estimação de atenuações de propagação para distâncias grandes, ou seja, o modelo é restrito a macro-células, não podendo assim ser usado para micro-células.

Anexo E –Modelo de Okumura-Hata

O modelo de Hata [7], empírico, baseado no modelo padrão proposto por Okumura [24] usa quatro parâmetros para a estimação da atenuação de propagação: frequência, distância, altura da EB ao solo e altura da antena do TM ao solo. Assim, segundo Hata a mediana da atenuação de propagação, para um ambiente urbano, é dada pela expressão (E.1).

$$L_p = 69.55 + 26.16 \log(f_{[\text{MHz}]}) - 13.82 \log(h_{b[\text{m}]}) - a(h_m, f)_{[\text{dB}]} + [44.90 - 6.55 \log(h_{b[\text{m}]})] \log(d_{[\text{km}]}) - \sum \text{factores de correcção} \quad (\text{E.1})$$

onde:

- h_b é a altura da EB ao solo,
- h_m representa a altura da antena do móvel ao solo,
- d caracteriza a distância entre a EB e o móvel,
- f define a frequência,
- $a(h_m, f)$ é representado pela equação (B.2).

$$a(h_m, f) = \begin{cases} [1.1 \log(f_{[\text{MHz}]}) - 0.7] h_{m[\text{m}]} - [1.56 \log(f_{[\text{MHz}]}) - 0.8] & \text{cidade pequena ou média} \\ 3.20 \log^2(11.75 h_{m[\text{m}]}) - 4.97, & f \geq 400 \text{ MHz} \quad \text{cidade grande} \end{cases} \quad (\text{E.2})$$

De forma a obter resultados o mais próximos possível da realidade, Okumura *et al.* propõe alguns factores de correcção à expressão da mediana da atenuação.

Os factores de correcção são:

- ruas radiais e circunferenciais, K_{al} , K_{ac} :

$$K_{al}(d)_{[\text{dB}]} = \begin{cases} -2.7 \log(d_{[\text{km}]}) + 8.6, & d \leq 40 \text{ km} \\ -4.0 \log(d_{[\text{km}]}) + 10.7, & d > 40 \text{ km} \end{cases} \quad (\text{E.3})$$

$$K_{ac}(d)_{[\text{dB}]} = 2.1 \log(d_{[\text{km}]}) - 6.3 \quad (\text{E.4})$$

- posição da ondulação do terreno, $\pm K_{hp}$:

$$K_{hp}(\Delta h)_{[\text{dB}]} = -2 \log^2(\Delta h_{[\text{m}]}) + 16 \log(\Delta h_{[\text{m}]}) - 12 \quad (\text{E.5})$$

em que: Δh representa a altura da ondulação do terreno.

- trajectos mistos, K_{mp} :

$$K_{mp}(\beta)_{[dB]} = \begin{cases} \begin{cases} -12.4\beta^2 + 27.2\beta & , d > 60 \text{ km} \\ -8.0\beta^2 + 19.0\beta & , d < 30 \text{ km} \end{cases} & A \\ \begin{cases} 11.9\beta^2 + 4.7\beta & , d > 60 \text{ km} \\ 7.8\beta^2 + 5.6\beta & , d < 30 \text{ km} \end{cases} & B \ (\beta < 0.8) \end{cases} \quad (E.6)$$

onde:



Figura E.1 – Representação de dois tipos de trajetórias mistas (extraído de [2])

com $\beta = d_s/d$. (E.7)

- áreas abertas, K_{oa} , ou quase abertas, K_{qo} :

$$K_{oa}(f)_{[dB]} = 4.78 \log^2(f_{[MHz]}) - 18.33 \log(f_{[MHz]}) + 40.9 \quad (E.8)$$

$$K_{qo}(f)_{[dB]} = K_{oa}(f)_{[dB]} - 5 \quad (E.9)$$

- áreas suburbanas, K_{su} :

$$K_{su}(f)_{[dB]} = 2.00 \log^2\left(\frac{f_{[MHz]}}{28}\right) + 5.40 \quad (E.10)$$

Na Tabela E.1 pode-se ver as restrições do modelo formulado por Hata.

Tabela E.1- Restrições do modelo formulado por Hata.

Parâmetro	Intervalo de Validade
Frequência (f)	[150,1500] MHz
Altura da EB (h_b)	[30,200] m
Altura do móvel (h_m)	[1,10] m
Distância entre a EB e o móvel	[1,20] km

Como se pode ver na Tabela E.1 a gama de frequências do modelo é muito limitada, estando muito longe do espectro de frequências para o UMTS.

Anexo F - Modelo COST 231 - Walfisch - Ikegami

O modelo COST 231 – Walfisch – Ikegami conjuga os modelos de Walfisch e Bertoni e Ikegami, obtendo a equação (F.1).

$$L_p \text{ [dB]} = \begin{cases} L_0 \text{ [dB]} + L_{rts} \text{ [dB]} + L_{msd} \text{ [dB]} , & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 \text{ [dB]} , & L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (F.1)$$

A atenuação em espaço livre é por:

$$L_0 \text{ [dB]} = 32.4 + 20 \log(d_{\text{[km]}}) + 20 \log(f_{\text{[MHz]}}) \quad (F.2)$$

Na formulação proposta por Ikegami *et al*, foi referido que, para o cálculo das perdas que o sinal sofre desde o topo do último edifício até ao TM é necessário levar em conta a largura das ruas e a sua orientação em relação ao raio directo. No entanto, foi acrescentado pelo COST 231 ao modelo original uma outra função do ângulo que a rua faz com o raio directo, resultando em:

$$L_{rts} \text{ [dB]} = -16.9 - 10 \log(w_s \text{ [m]}) + 10 \log(f_{\text{[MHz]}}) + 20 \log(H_B \text{ [m]} - h_m \text{ [m]}) + L_{ori} \text{ [dB]} \quad (F.3)$$

com:

- w_s define a largura da rua (entre paredes dos edifícios),
- H_B traduz a altura dos edifícios,

$$L_{ori} \text{ [dB]} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi_{[^\circ]} , & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi_{[^\circ]} - 35) , & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi_{[^\circ]} - 55) , & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (F.4)$$

Relativamente às perdas que o sinal sofre no topo dos edifícios, o COST 231 expandiu o modelo originalmente formulado por Walfisch e Bertoni para permitir suportar situações em que a antena da EB está colocada em alturas inferiores à altura dos edifícios. Mais uma vez, o resultado é baseado em medidas efectuadas, conduzindo à seguinte expressão:

$$L_{msd} \text{ [dB]} = L_{bsh} \text{ [dB]} + k_a + k_d \log(d_{\text{[km]}}) + k_f \log(f_{\text{[MHz]}}) - 9 \log(w_B \text{ [m]}) \quad (F.5)$$

onde:

- w_B representa a distância entre o ponto médio de dois edifícios adjacentes,

- L_{bsh} contabiliza as perdas introduzidas pelo facto de a antena da EB estar colocada a uma altura superior ou inferior ao nível do telhado do edifício,

$$L_{bsh} \text{ [dB]} = \begin{cases} -18 \log(h_b \text{ [m]} - H_B \text{ [m]} + 1) & , h_b > H_B \\ 0 & , h_b \leq H_B \end{cases} \quad (\text{F.6})$$

- k_a representa o aumento da atenuação de propagação devido ao facto da antena da EB estar abaixo do nível do telhado do edifício adjacente,

$$k_a \text{ [dB]} = \begin{cases} 54 & , h_b > H_B \\ 54 - 0.8(h_b \text{ [m]} - H_B \text{ [m]}) & , d \geq 0.5 \text{ km} \wedge h_b \leq H_B \\ 54 - 1.6(h_b \text{ [m]} - H_B \text{ [m]})d \text{ [km]} & , d < 0.5 \text{ km} \wedge h_b \leq H_B \end{cases} \quad (\text{F.7})$$

- k_d controla a dependência da difracção no topo dos edifícios com a distância,

$$k_d \text{ [dB]} = \begin{cases} 18 & , h_b > H_B \\ 18 - 15 \frac{h_b - H_B}{H_B} & , h_b \leq H_B \end{cases} \quad (\text{F.8})$$

- k_f caracteriza dependência da difracção no topo dos edifícios com a frequência.

$$k_f \text{ [dB]} = -4 + \begin{cases} 0.7 \left(\frac{f_{\text{[MHz]}}}{925} - 1 \right) & , \text{ para centros de tamanho médio e centros} \\ & \text{suburbanos com média densidade de vegetação.} \\ 1.5 \left(\frac{f_{\text{[MHz]}}}{925} - 1 \right) & , \text{ para centros metropolitanos.} \end{cases} \quad (\text{F.9})$$

Na ausência de dados dos edifícios e das ruas, o modelo recomenda os seguintes valores:

$$- H_B \text{ [m]} = 3 \cdot \{\text{nº de pisos}\} + H_{tel} \text{ [m]} \quad (\text{F.10})$$

em que:

$$- H_{tel} \text{ [m]} = \begin{cases} 3 & , \text{ inclinado} \\ 0 & , \text{ plano} \end{cases} \quad (\text{F.11})$$

$$- w_B : 20 \dots 50 \text{ m}$$

$$- w_s = \frac{w_B}{2}$$

$$- \varphi = 90^\circ$$

Na Tabela F.1 estão representadas as limitações do modelo COST 231 – Walfisch – Ikegami. Ao analisar a tabela pode-se concluir que o modelo é adequado para a estimação de atenuações de propagação para distâncias curtas, mas ao mesmo tempo é limitado para o UMTS, uma vez que o espectro atribuído a este sistema não se engloba totalmente nas gamas de frequências apresentadas por este modelo.

Tabela F.1- Restrições do modelo formulado por COST 231 – Walfisch – Ikegami.

Parâmetro	Intervalo de Validade
Frequência (f)	[0.8,2.0] GHz
Altura da EB (h_b)	[4,50] m
Altura do TM (h_m)	[1,3] m
Distância entre a EB e o TM (d)	[0.02,5] km

Anexo G - Análise da Variação dos Termos de Atenuação de Propagação para o Modelo COST – 231 – Walfisch – Ikegami

Para efectuar esta análise considerou-se um ambiente padrão, avaliando a evolução de cada um dos termos de atenuação para cada um dos parâmetros de entrada. Deste modo, são assumidos os seguintes valores para caracterizar o ambiente padrão: $w_B=50$ m; $f=2000$ MHz; $\phi = 60^\circ$; $w_s=25$ m; $d=0.6$ km; $H_B=30$ m; ΔhBm que consiste na diferença de altura do último edifício de percurso com o TM foi considerada igual a 15 m e ΔhbB a diferença de alturas da EB e do edifício que a suporta é igual a 5 m.

Assim, para o termo de atenuação L_{msd} que caracteriza as perdas do sinal no topo dos edifícios e considerando a variação de cada um dos parâmetros de entrada individualmente para um ambiente padrão, é possível obter os gráficos representados na Figura G.1, G.2, G.3 e G.4.

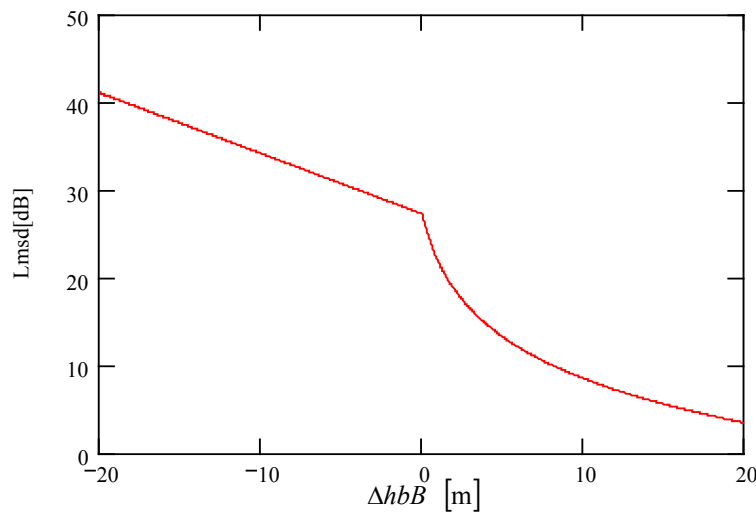


Figura G.1 - Variação do L_{msd} com a diferença de alturas da EB e do edifício (ΔhbB).

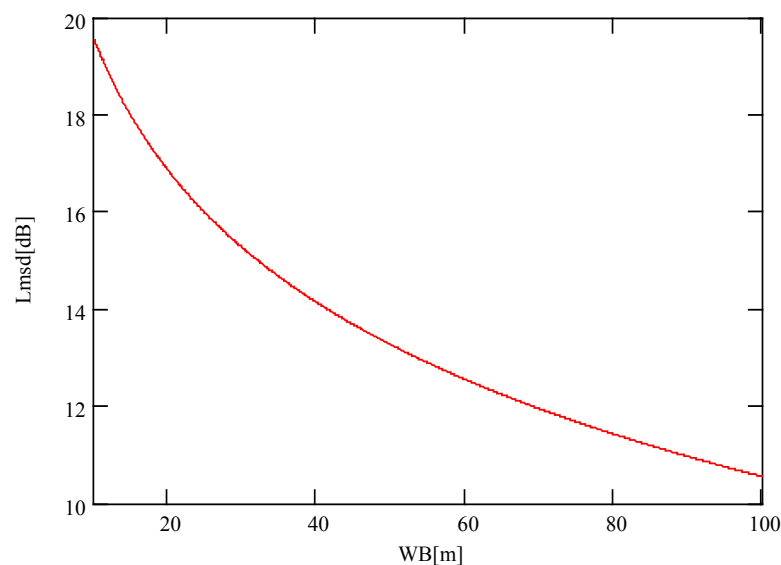


Figura G.2 - Variação do L_{msd} com a separação de edifícios (w_B).

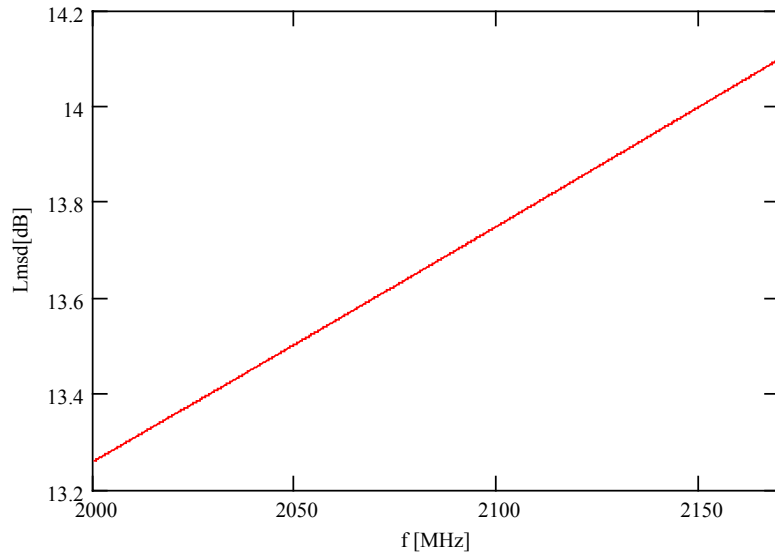


Figura G.3 -Variação de L_{msd} com a frequência (f).

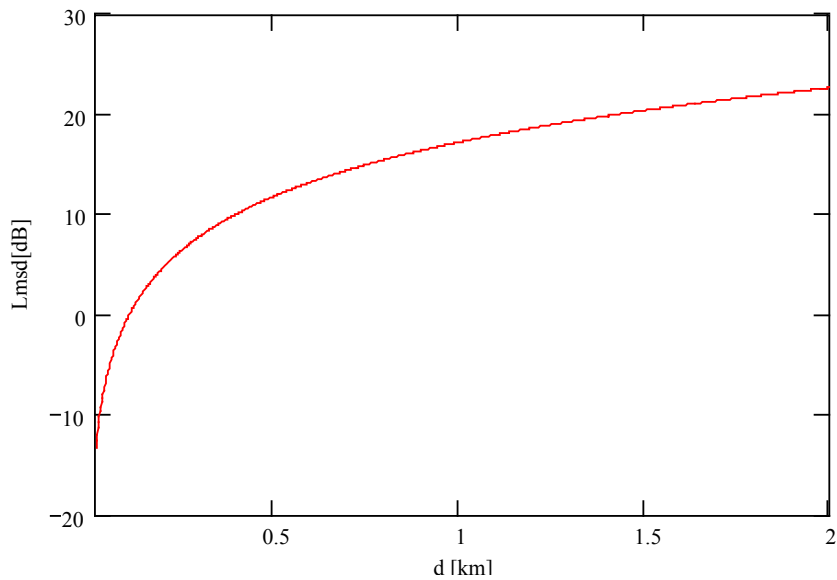


Figura G.4 -Variação de L_{msd} com a distância (d).

Ao se analisar os gráficos obtidos é possível verificar que os parâmetros mais sensíveis são a diferença de alturas entre a EB e os edifícios e a distância à EB.

Quanto ao termo da atenuação que contabiliza a difracção no topo do último edifício, L_{rts} , a sua variação com cada um dos seus parâmetros de entrada pode ser verificada nas Figura G.5, G.6 e G.7. Na observação dessas figuras pode ser visto claramente que o parâmetro mais sensível deste termo é a diferença de alturas entre o TM e os edifícios. Nomeadamente quando existem pequenas diferenças entre a altura do prédio e do TM.

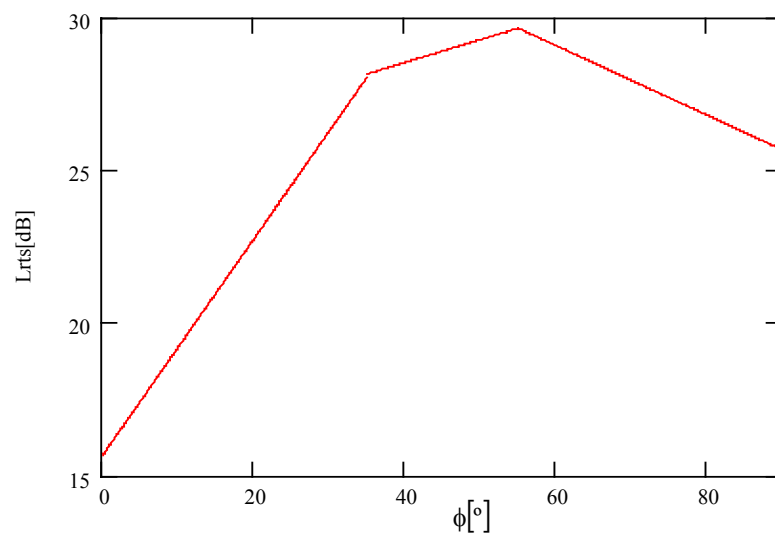


Figura G.5 - Variação de L_{rts} com o ângulo de rua (ϕ).

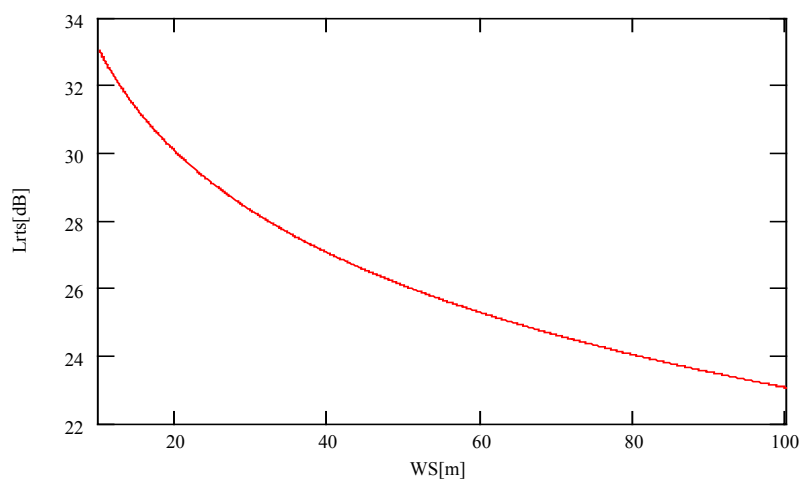


Figura G.6 - Variação de L_{rts} com a largura da rua (w_s).

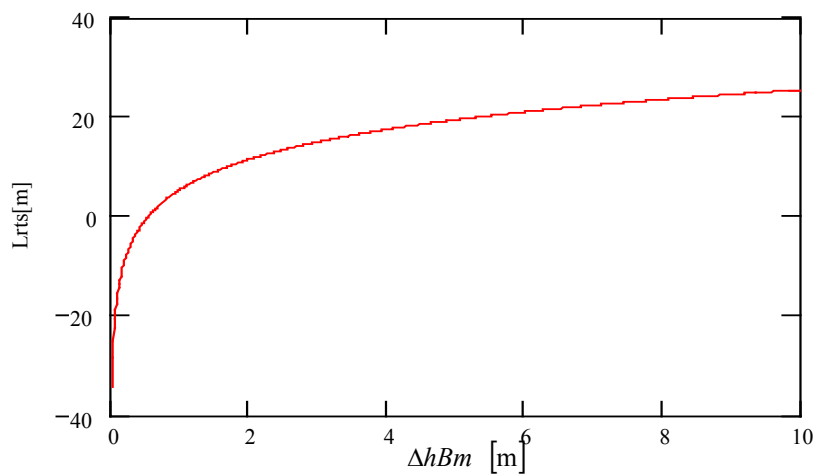


Figura G.7 - Variação de L_{rts} com a diferença de alturas do TM e do último edifício ($\Delta h Bm$).

Anexo H – Influência da Variação dos Parâmetros de Entrada na Atenuação de Propagação do Modelo do 3GPP macro-celular

Neste anexo pode ser visto o comportamento do modelo do 3GPP macro-celular quando se faz variar cada um dos seus parâmetros de entrada. Para tal, é considerado um ambiente padrão em que os parâmetros assumem os seguintes valores: $b=50$ m (separação média entre edifícios); $f=2000$ MHz (frequência); $\Delta h_m=10.5$ m (diferença de alturas entre o último edifício e o TM); $x=15$ m (distância do TM ao último edifício); $d=400$ m (distância da EB ao TM); $\Delta h_b=30$ m (diferença entre a altura da antena da EB e a altura dos edifícios). Assim, fazendo variar cada um destes parâmetros individualmente na expressão da atenuação de propagação, é possível obter os gráficos representados nas Figura H.1, H.2, H.3, H.4, H.5, H.6.

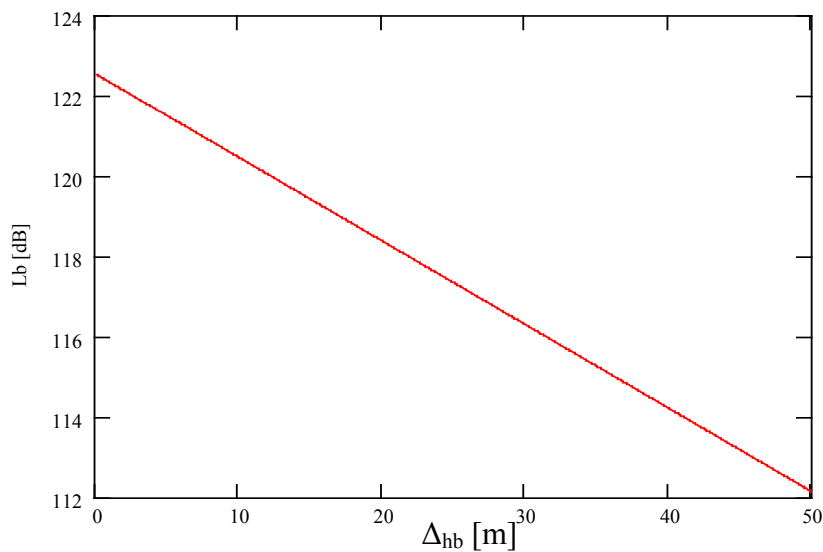


Figura H.1 -Variação de L_b com a diferença entre a altura da antena da EB e a altura dos edifícios (Δh_b).

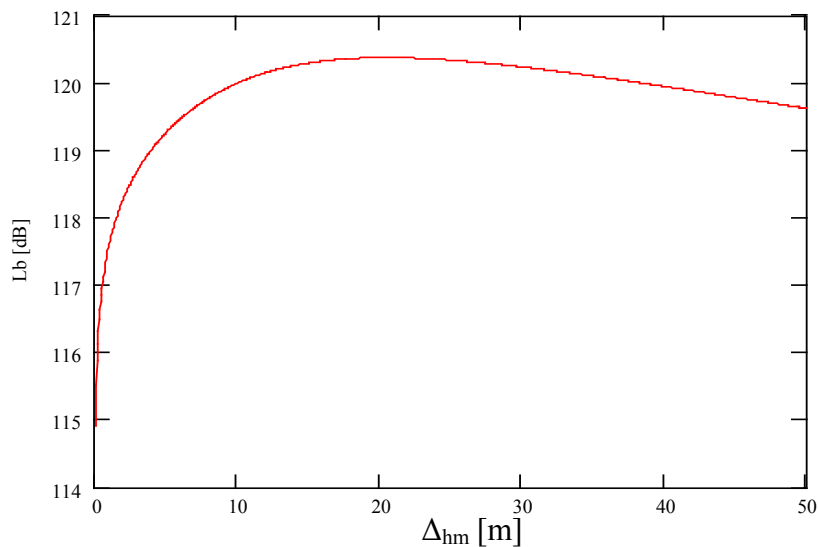


Figura H.2 - Variação de L_b com a diferença de alturas entre o último edifício e o TM (Δh_m).

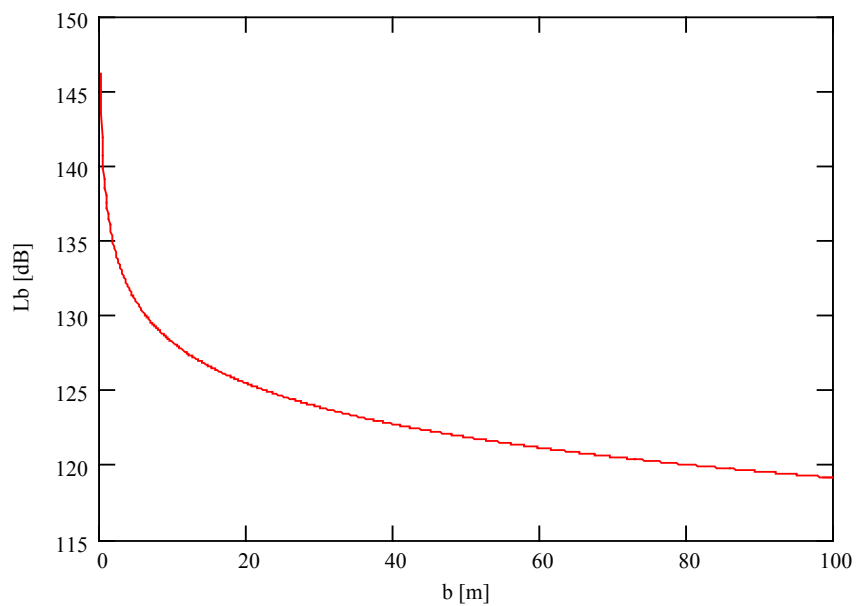


Figura H.3 - Variação de L_b com a separação média entre edifícios (b).

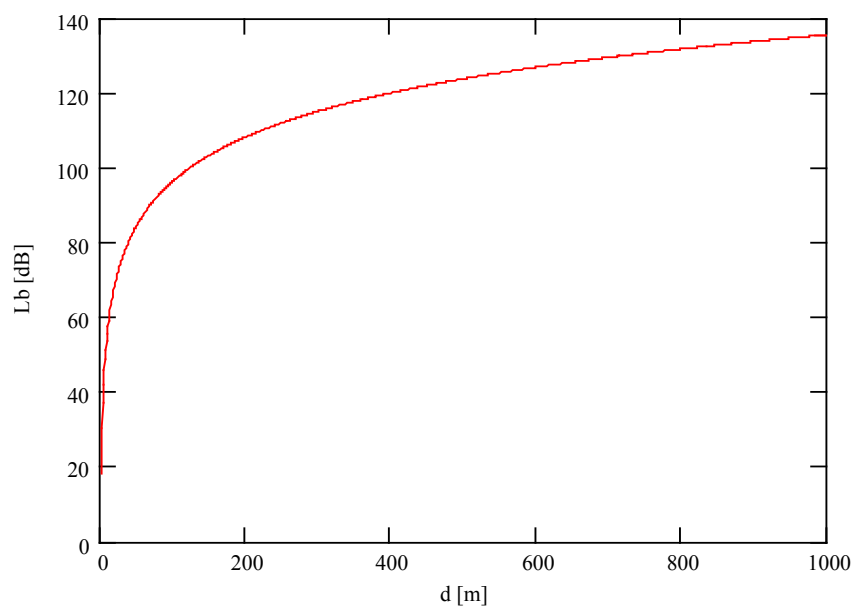


Figura H.4 - Variação de L_b com a distância da EB ao TM (d).

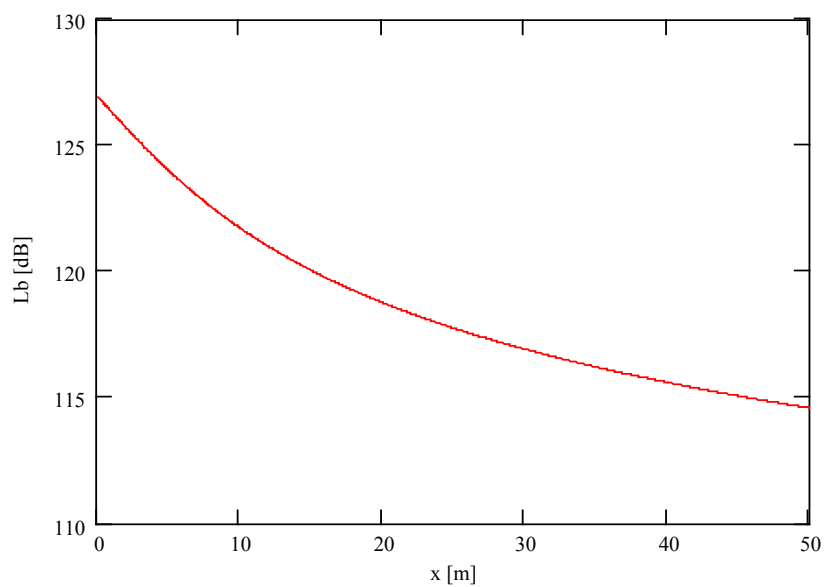


Figura H.5 - Variação de L_b com a distância do TM ao último edifício (x).

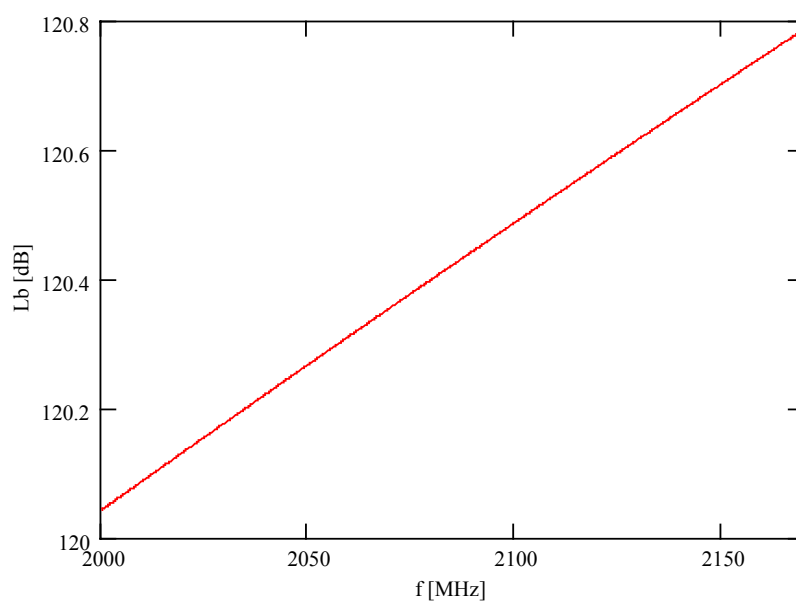


Figura H.6 - Variação de L_b com a frequência (f).

Anexo I - Influência dos Cruzamentos

A redução do valor da atenuação por influência dos cruzamentos, L_{cruz} , é calculada pela expressão I.1:

$$L_{cruz}[\text{dB}] = \begin{cases} 0 & , |d_{via}| \geq \frac{\Delta d_{ext}}{2} \\ -A_m \exp\left[-18\left(\frac{d_{via}}{\Delta d_{ext}}\right)^2\right] & , \Delta d_{int} < |d_{via}| < \frac{\Delta d_{ext}}{2} \\ \Delta L_{int} & , |d_{via}| \leq \frac{\Delta d_{int}}{2} \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

com:

$$A_m = -\Delta L_{int} \cdot \exp\left[4.5\left(\frac{\Delta d_{int}}{\Delta d_{ext}}\right)^2\right] \quad (\text{I.2})$$

e onde:

- d_{via} representa a distância do móvel ao centro do cruzamento.

Para a determinação das expressões que permitem calcular os valores de ΔL_{int} , Δd_{int} e Δd_{ext} , Gonçalves considerou a sua variação com os parâmetros geométricos φ_c , d_c , w_s e Δh_b , assumindo a existência de um ambiente padrão caracterizado por $\varphi_c=90^\circ$, $d_c=500$ m, $w_s=25$ m e $\Delta h_b=3$ m. De referir que para efeitos de simplificação do estudo, foi também assumido que a variação de L_{cruz} com um parâmetro geométrico é independente do valor dos outros parâmetros.

A expressão (I.1) representa a variação do parâmetro ΔL_{int} com a distância, onde se considerou que d_c variava entre 200 e 2000 m e que w_s e Δh_b tomavam os valores padrão definidos anteriormente, isto é, $w_s=25$ m e $\Delta h_b=3$ m.

$$\Delta L_{int}(\varphi_c, d_c) = -A_{Li} \cdot \exp\left[-\frac{(\varphi_c - 90)^2}{2 \cdot \sigma_{Li}(d_c)^2}\right] \quad (\text{I.3})$$

onde:

$$A_{Li} = 19 \text{ dB} \quad (\text{I.4})$$

$$\sigma_{Li}(d_c) = 51.94 - 10.97d_c^{0.25} + 0.51d_c^{0.5} \quad (\text{I.5})$$

Para a variação de ΔL_{int} com a largura das ruas, considerou-se que $d_c=500$ m, $\Delta h_b=3$ m e que w_s variava entre 12.5 e 50 m.

$$\Delta L_{int}(\varphi_c, w_s) = -A_{Li} \cdot \exp\left[-\frac{(\varphi_c - 90)^2}{2 \cdot \sigma_{Li}(w_s)^2}\right] \quad (I.6)$$

onde:

$$\sigma_{Li}(w_s) = -19.51 + 17.33w_s^{0.25} - 0.76w_s^{0.5} \quad (I.7)$$

Relativamente à variação de ΔL_{int} com a altura efectiva da EB, foi assumido mais uma vez que $d_c=500$ m, $w_s=25$ m e que Δh_b variava entre -7 e 11 m.

$$\Delta L_{int}(\varphi_c, \Delta h_{base}) = -A_{Li} \cdot \exp\left[-\frac{(\varphi_c - 90)^2}{2 \cdot \sigma_{Li}(\Delta h_b)^2}\right] \quad (I.8)$$

em que:

$$A_{Li}(\Delta h_b)_{[dB]} = \begin{cases} 18.5 & , \Delta h_b \leq 0 \\ 19 & , \Delta h_b \geq 1 \end{cases} \quad (I.9)$$

$$\sigma_{Li}(\Delta h_b) = \begin{cases} 5.7 & , \Delta h_b \leq 0 \\ 9.43 + 2.14\Delta h_b - 0.093\Delta h_b^2 & , \Delta h_b \geq 1 \end{cases} \quad (I.10)$$

Parâmetro Δd_{int}

À semelhança do que foi feito anteriormente, foram fixados dois valores padrão e fez-se variar Δd_{int} com cada um dos parâmetros geométricos. Quanto à variação com a distância d_c , pode ser vista na seguinte expressão:

$$\Delta d_{int}(\varphi_c, d_c) = \Delta d_{int}(\varphi_c) = -0.48\varphi_c + 68.57 \quad (I.11)$$

Se for considerada a variação com a largura das ruas w_s , o parâmetro Δd_{int} pode tomar os valores dados por:

$$\Delta d_{int}(\varphi_c, w_s) = a(w_s) \cdot \varphi_c + b(w_s) \quad (I.12)$$

$$a(w_s) = -0.38 + 4.43 \cdot 10^{-3} w_s - 3.80 \cdot 10^{-4} w_s^2 \quad (I.13)$$

$$b(w_s) = 29.73 + 0.91w_s + 0.03w_s^2 \quad (I.14)$$

A variação com a altura efectiva da EB Δh_b pode ser obtida através de:

$$\Delta d_{int}(\varphi_c, \Delta h_b) = \Delta d_{int}(\varphi_c) = -0.48\varphi_c + 68.57 \quad (I.15)$$

Parâmetro Δd_{ext}

Considerando a variação de Δd_{ext} com a distância d_c

$$\Delta d_{ext}(\varphi_c, d_c) = \begin{cases} A_{de}(d_c) & , \varphi_c \leq \varphi_{de}(d_c) \\ A_{de}(d_c) \cdot \exp\left[\frac{-(\varphi_c - \varphi_{de}(d_c))^2}{2 \cdot \sigma_{de}(d_c)^2}\right] & , \varphi_c > \varphi_{de}(d_c) \end{cases} \quad (I.16)$$

com:

$$A_{de}(d_c) = 683.90 - 171.64d_c^{0.25} + 12.38d_c^{0.5} \quad (I.17)$$

$$\varphi_{de}(d_c) = 21.97 + 17.28d_c^{0.25} - 1.18d_c^{0.5} \quad (I.18)$$

$$\sigma_{de}(d_c) = 7.85 - 58591.8d_c^{-2} + 1607.1d_c^{-1} \quad (I.19)$$

Relativamente à variação de Δd_{ext} com a largura das ruas w_s

$$\Delta d_{ext}(\varphi_c, w_s) = \begin{cases} A_{de}(w_s) & , \varphi_c \leq \varphi_{de}(w_s) \\ A_{de}(w_s) \cdot \exp\left[\frac{-(\varphi_c - \varphi_{de}(w_s))^2}{2 \cdot \sigma_{de}(w_s)^2}\right] & , \varphi_c > \varphi_{de}(w_s) \end{cases} \quad (I.20)$$

$$A_{de}(w_s) = 1.25 + 3.38w_s + 0.10w_s^2 \quad (I.21)$$

$$\varphi_{de}(w_s) = 80.63 - 0.01w_s - 0.004w_s^2 \quad (I.22)$$

$$\sigma_{de}(w_s) = 10.57 + 1.46 \cdot 10^{-3} w_s + 5.86 \cdot 10^{-7} w_s^4 \quad (I.23)$$

A variação com a altura efectiva da EB Δh_b é dada por:

$$\Delta d_{ext}(\varphi_c, \Delta h_b) = \begin{cases} A_{de}(\Delta h_b) & , \varphi_c \leq \varphi_{de}(\Delta h_b) \\ A_{de}(\Delta h_b) \cdot \exp\left[\frac{-(\varphi_c - \varphi_{de}(\Delta h_b))^2}{2 \cdot \sigma_{de}(\Delta h_b)^2}\right] & , \varphi_c > \varphi_{de}(\Delta h_b) \end{cases} \quad (I.24)$$

$$A_{de}(\Delta h_b) = \begin{cases} 120 & , \Delta h_b \leq 0 \\ 128.15 + 8.0\Delta h_b - 0.36\Delta h_b^2 & , \Delta h_b \geq 1 \end{cases} \quad (I.25)$$

$$\varphi_{de}(\Delta h_b) = \begin{cases} 80 & , \Delta h_b \leq 0 \\ 81.25 - 1.25 \Delta h_b & , \Delta h_b \geq 1 \end{cases} \quad (I.26)$$

$$\sigma_{de}(\Delta h_b) = \begin{cases} 12 & , \Delta h_b \leq 0 \\ 9.0 + 0.82 \Delta h_b & , \Delta h_b \geq 1 \end{cases} \quad (I.27)$$

Conhecidas as variações de ΔL_{int} , Δd_{int} e Δd_{ext} com cada um desses parâmetros, as expressões finais das grandezas em função de φ_c e parametrizadas em φ_c , d_c , w_s e Δh_b , são dadas por:

$$f(\varphi_c, d_c, w_s, \Delta h_b) = f_{d_c}(\varphi_c, d_{c0}, w_{s0}, \Delta h_{b0}) + \Delta f_{d_c}(\varphi_c, d_c) + \Delta f_{w_s}(\varphi_c, w_s) + \Delta f_{\Delta h_b}(\varphi_c, \Delta h_b) \quad (I.28)$$

para ΔL_{int} e

$$f(\varphi_c, d_c, w_s, \Delta h_b) = f_{d_c}(\varphi_c, d_{c0}, w_{s0}, \Delta h_{b0}) \cdot \prod f_{d_c}(\varphi_c, d_c) \cdot \prod f_{w_s}(\varphi_c, w_s) \cdot \prod f_{\Delta h_b}(\varphi_c, \Delta h_b) \quad (\text{I.29})$$

para Δd_{int} e Δd_{ext} , em que:

$$\Delta f_m(\varphi_c, m) = f_m(\varphi_c, m) - f_m(\varphi_c, m_0) \quad (\text{I.30})$$

$$\prod f_m(\varphi_c, m) = f_m(\varphi_c, m) / f_m(\varphi_c, m_0) \quad (\text{I.31})$$

onde d_{c0} , w_{s0} e Δh_{b0} são os valores assumidos para a situação padrão, e f_{d_c} , f_{w_s} e $f_{\Delta h_b}$ traduzem a variação com cada um dos parâmetros separadamente, fixando os restantes no valor padrão. Estas expressões só são válidas para os seguintes intervalos de validade: $200 \leq d_c \leq 2000$ m, $12.5 \leq w_s \leq 50$ m e $-7 \leq \Delta h_b \leq 11$ m.

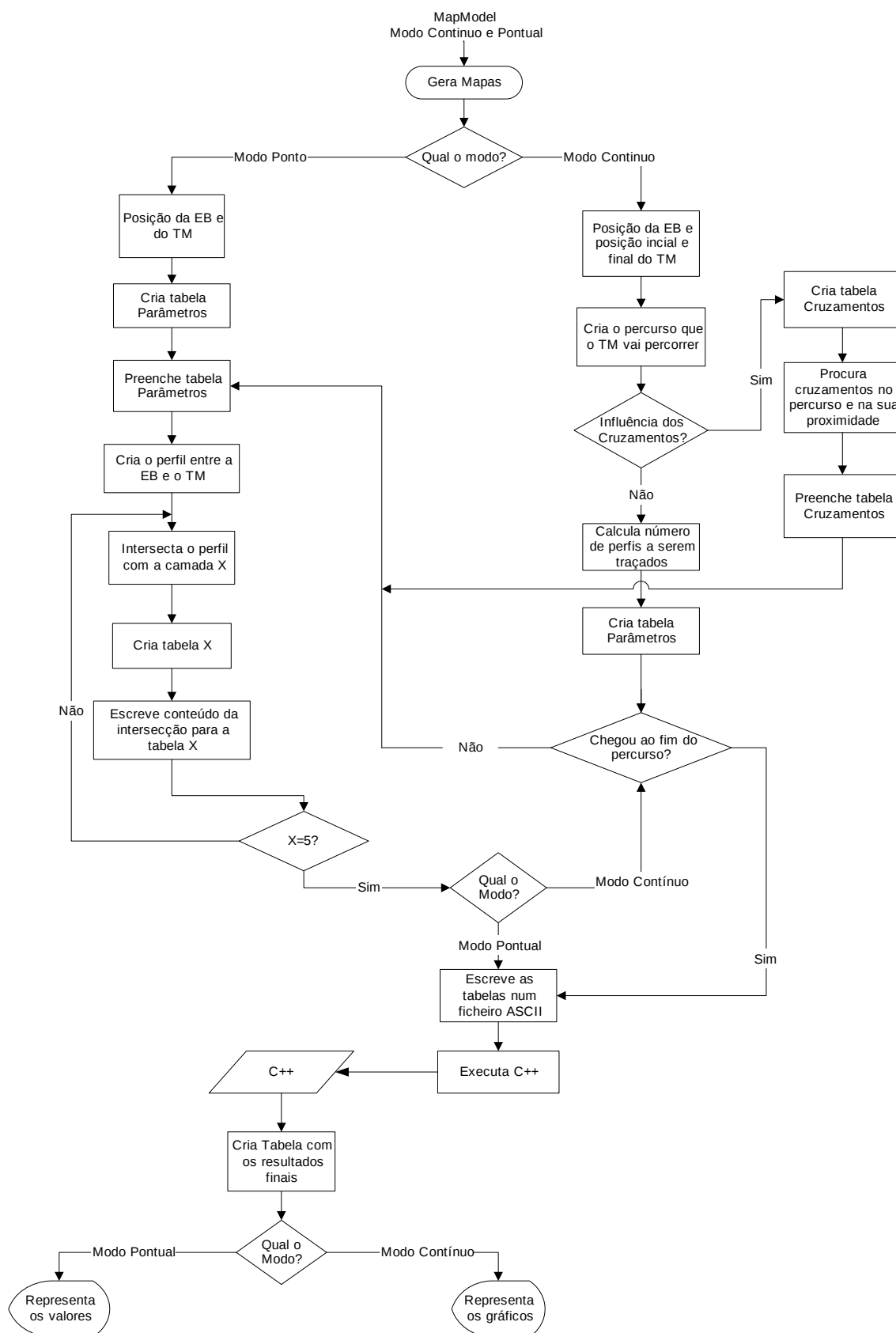


Figura J.2- Fluxograma do algoritmo em *MapBasic* para o Modo Contínuo e Modo Ponto Localizado.

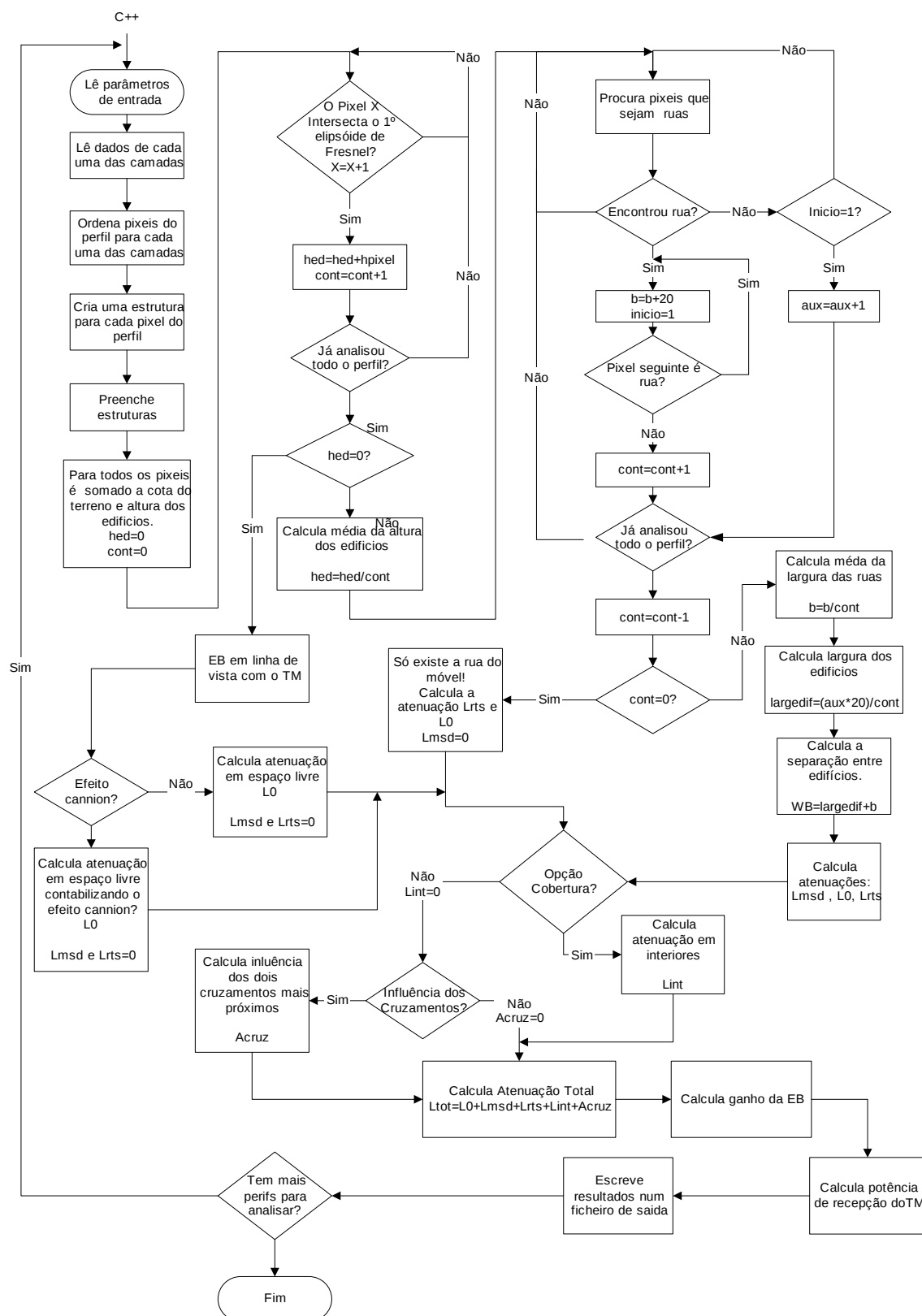


Figura J.3 - Fluxograma do algoritmo em C++.

Anexo K – Cálculo das Diferenças Angulares ϕ e θ

Neste anexo é descrita a metodologia utilizada para o cálculo da diferença angular nos planos horizontal e vertical entre a direcção do máximo de radiação da antena e uma determinada direcção.

Na Figura K.1 e Figura K.2 pode ser vista uma descrição detalhada do problema nas perspectivas de planta e de perfil respectivamente.

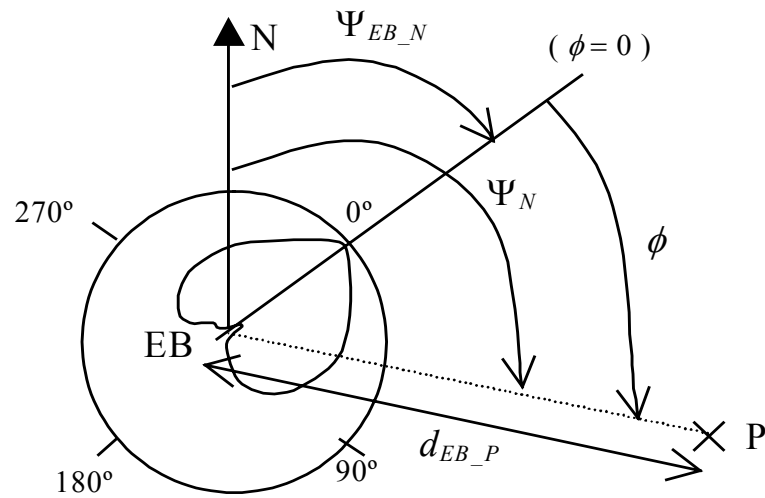


Figura K.1 - Metodologia utilizada para o cálculo de ϕ (extraído de [13]).

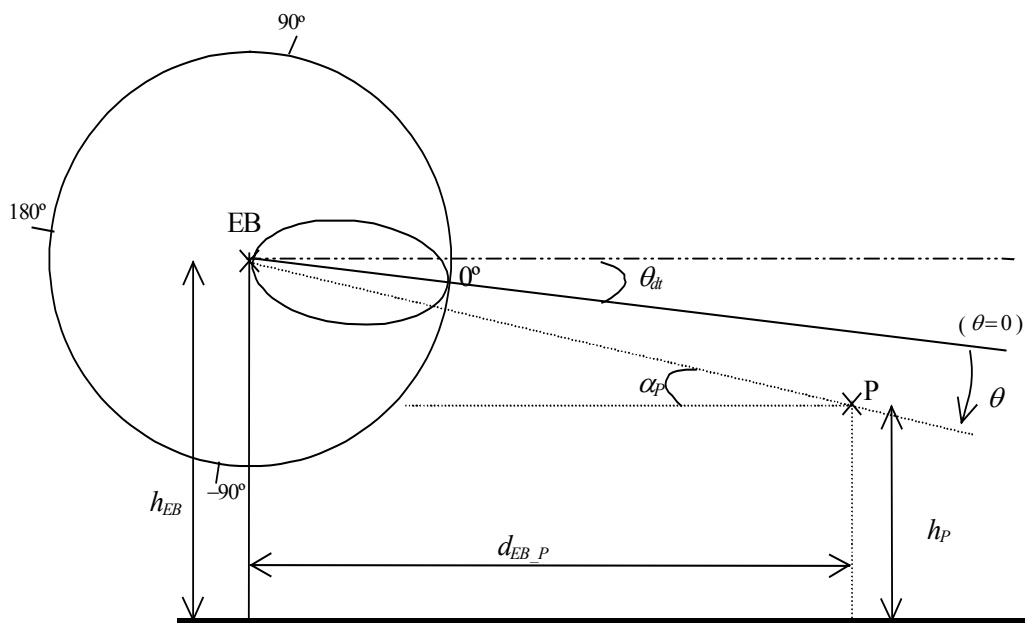


Figura K.2 - Metodologia utilizada para o cálculo de θ (extraído de [13]).

Tridimensionalmente é possível definir um ponto P pelos seus ângulos ϕ e θ , relativamente aos planos horizontal e vertical respectivamente. O ângulo ϕ como a diferença entre o azimute da antena, Ψ_{EB_N} , e o ângulo que a direcção do ponto P faz com o Norte, Ψ_N . Enquanto que o ângulo θ é obtido pela diferença entre o ângulo de incidência, α_P , no ponto P e o ângulo de inclinação da direcção de radiação máxima da antena no plano vertical (*downtilt*), θ_{dt} .

O valor de Ψ_N pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\Psi_N[^\circ] = \begin{cases} a \tan\left(\left|\frac{\Delta x}{\Delta y}\right|\right) & , \Delta x > 0 \wedge \Delta y > 0 \\ 90 + a \tan\left(\left|\frac{\Delta x}{\Delta y}\right|\right) & , \Delta x > 0 \wedge \Delta y < 0 \\ 180 + a \tan\left(\left|\frac{\Delta x}{\Delta y}\right|\right) & , \Delta x < 0 \wedge \Delta y < 0 \\ 270 + a \tan\left(\left|\frac{\Delta x}{\Delta y}\right|\right) & , \Delta x < 0 \wedge \Delta y > 0 \end{cases} \quad (K.1)$$

com:

$$\Delta x = x_P - x_{EB} \quad (K.2)$$

$$\Delta y = y_P - y_{EB} \quad (K.3)$$

e em que:

- x_P e y_P representam as coordenadas cartesianas do ponto P,
- x_{EB} e y_{EB} as coordenadas cartesianas da EB.

Assim, depois de obtido o valor de Ψ_N pode-se determinar o valor de ϕ :

$$\phi[^\circ] = \begin{cases} \Psi_N - \Psi_{EB_N} & , \Psi_N \geq \Psi_{EB_N} \\ 360 - (\Psi_N - \Psi_{EB_N}) & , \Psi_N < \Psi_{EB_N} \end{cases} \quad (K.4)$$

O ângulo θ é dado por:

$$\theta = - \left[a \tan\left(\frac{h_{EB} - h_P}{d_{EB_P}}\right) - \theta_{dt} \right] \quad (K.5)$$

onde:

- h_{EB} é a altura da EB,
- h_P a altura do ponto P,
- d_{EB_P} a distância entre a EB e o ponto P,
- θ_{dt} é o *downtilt* da antena.

Anexo L – Diagrama de Radiação das Antenas

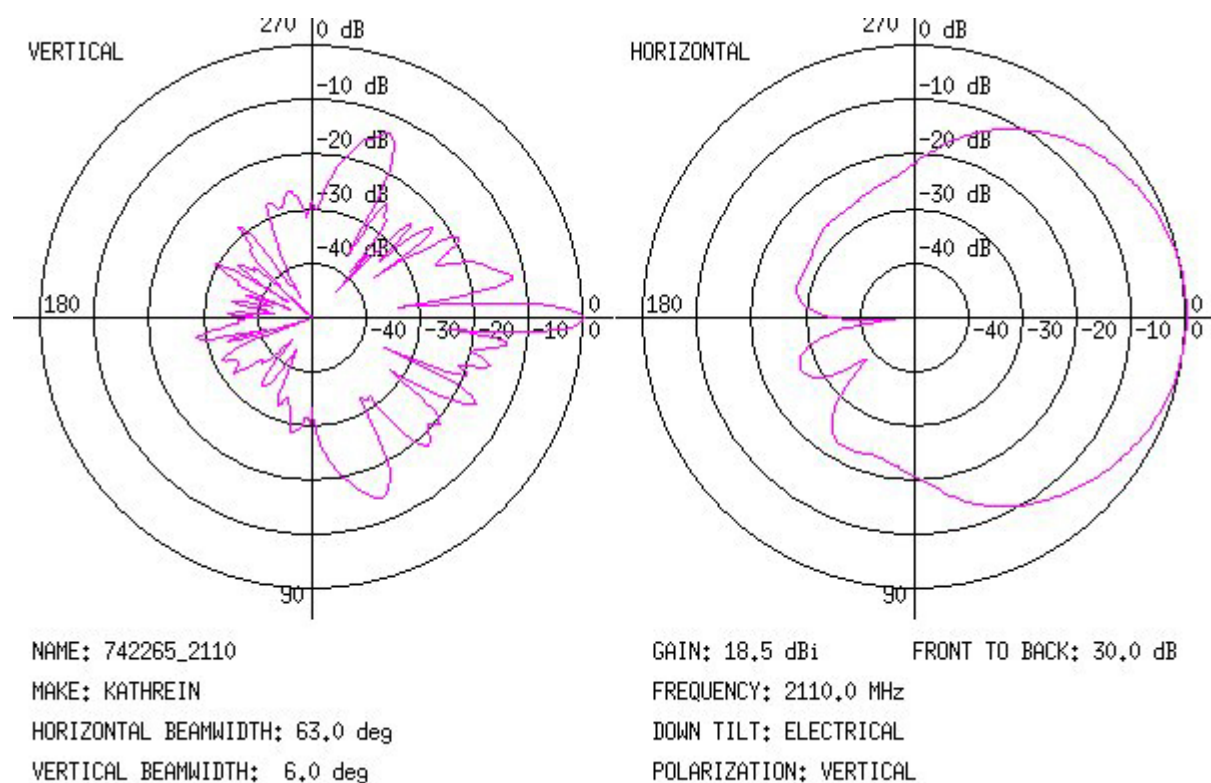


Figura L.1 – Diagrama de Radiação Horizontal e Vertical do modelo Katherein - 742265

Anexo M – Modelo para contabilizar a penetração em edifícios

O modelo da “dupla normal” [18] é um modelo empírico que surgiu com o objectivo de modelar os resultados obtidos em medidas no interior de edifícios. Foi verificado que para cada edifício, a aparência do histograma de probabilidades de ocorrência de valores de atenuação obedecia normalmente a uma estrutura padrão que se assemelhava a uma função densidade de probabilidade Normal “desequilibrada”, em que o desvio padrão apresenta valores diferentes à esquerda e à direita do valor médio, como se pode ver na Figura M.1.

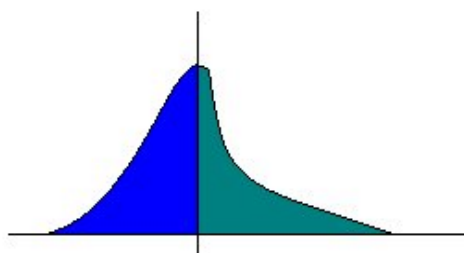


Figura M.1 - Aspecto da função densidade de probabilidade típica dos resultados obtidos (extraído de [18]).

O modelo consiste em dividir o histograma pela moda, obtendo-se dois semi-histogramas com a aparência de semi-normais, invertendo o sinal desses semi-histogramas e adicioná-los aos já existentes permite obter duas normais com desvios padrão diferentes como se pode ver pela Figura M.2.

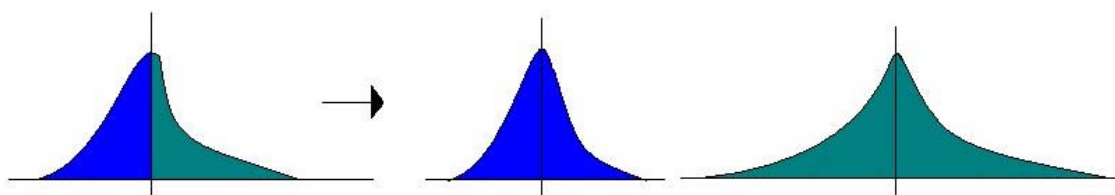


Figura M.2 - O processo de conversão em duas normais (extraído de [18]).

Considerando a média e o valor máximo dos desvios padrão obtidos pelo processo anterior, é possível definir uma distribuição normal que permite caracterizar a atenuação em interiores para um determinado tipo de edifício e para uma dada percentagem de cobertura.

Anexo N - Aferição das Zonas Regulares

Para fazer uma análise dos resultados obtidos pelos modelos, é muito importante poder analisar os parâmetros de entrada dos modelos calculados pelo simulador, deste modo para o caso da Rua Soares dos Passos é possível analisar a Tabela N.1.

Tabela N.1- Parâmetros associados à Rua Soares dos Passos.

	Coordenadas		Azimute [°]	Downtilt [°]	Altura [m]
	X	Y			
EB	530 918	4 555 976	270	3	25
Ponto inicial	530 180	4 556 420			
Ponto final	530 530	4 556 320			
Parâmetro			Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
w_s [m]			32	68	46.96
Desvio padrão de w_s			0	42.71	12.23
h_{ed} [m]			94.78	97	96.09
Desvio padrão de h_{ed}			0.96	2.42	1.54
φ [°]			15.95	27.00	20.63
G_{EB} [dBi]			1.81	2.40	1.98
w_B [m]			196	423.33	272.42
Distância entre pontos medidos [m]			0.005	12.17	3.50

Para a Rua António Cardoso o perfil do terreno entre a EB e o TM para a posição inicial e final do TM vem representado na Figura N.1.

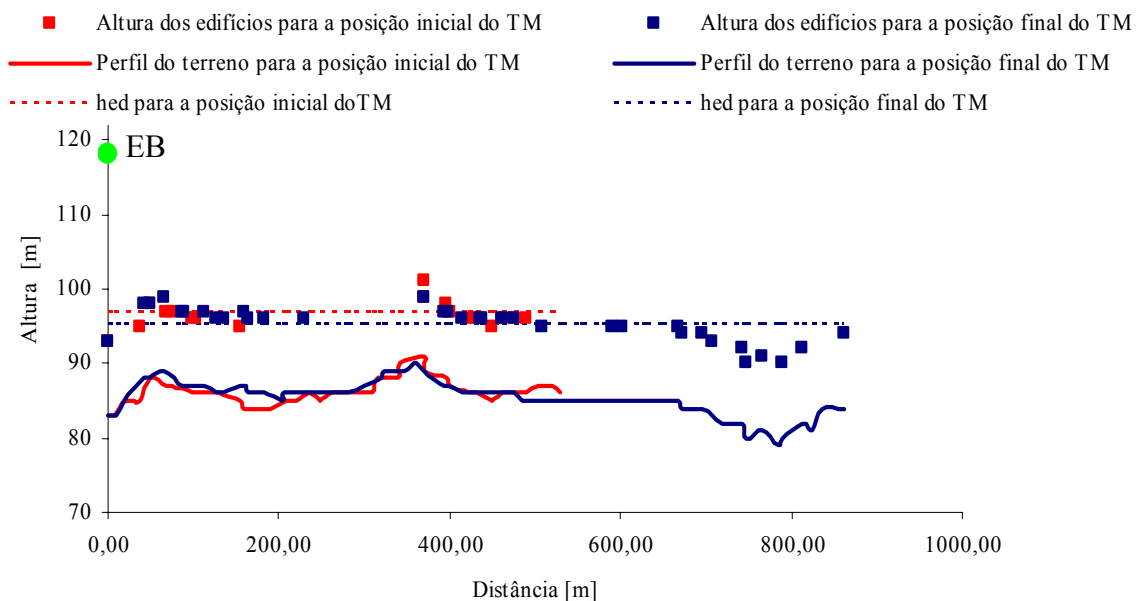


Figura N.1 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Rua António Cardoso.

Relativamente à Rua Duarte Pacheco Pereira, a Figura N.2, Figura N.3, Figura N.4 e a Tabela N.2 permitem observar os resultados obtidos pelos modelos:



- posição da EB
- percurso efectuado pelo TM

Figura N.2 – Fotografia aérea da Rua Duarte Pacheco Pereira (extraído de [20]).

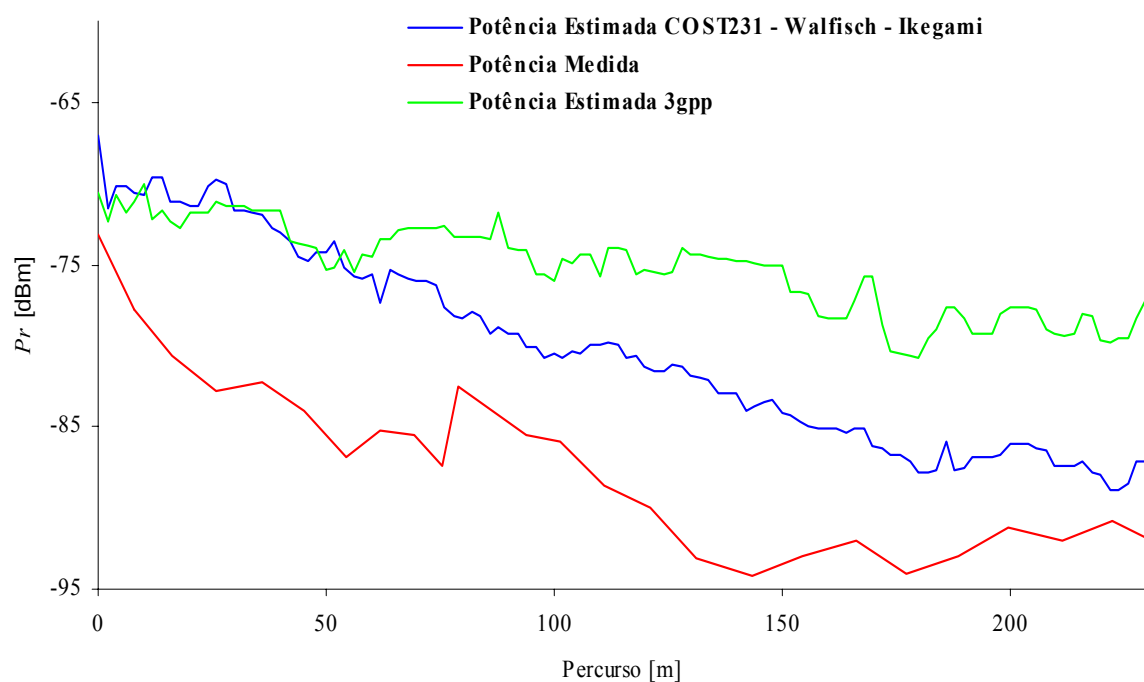


Figura N.3 - Comparação dos modelos com as medidas para a Rua Duarte Pacheco Pereira.

Tabela N.2 - Parâmetros associados à Rua Duarte Pacheco Pereira.

	Coordenadas		Azimute [°]	Downtilt [°]	Altura [m]
	X	Y			
EB	528 277	4 556 335	60	0	27
Ponto inicial	520 515	4 556 771			
Ponto final	528 399	4 556 999			
Parâmetro			Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
w_s [m]			50	60	51.55
Desvio padrão de w_s			0	38.78	17.01
h_{ed} [m]			78	81	80
Desvio padrão de h_{ed}			0.35	2.40	1.13
φ [°]			40.30	57.55	48.25
G_{EB} [dBi]			13	16	14
w_B [m]			109.78	185.33	153.24
Distância entre pontos medidos [m]			3.73	14.79	9.68

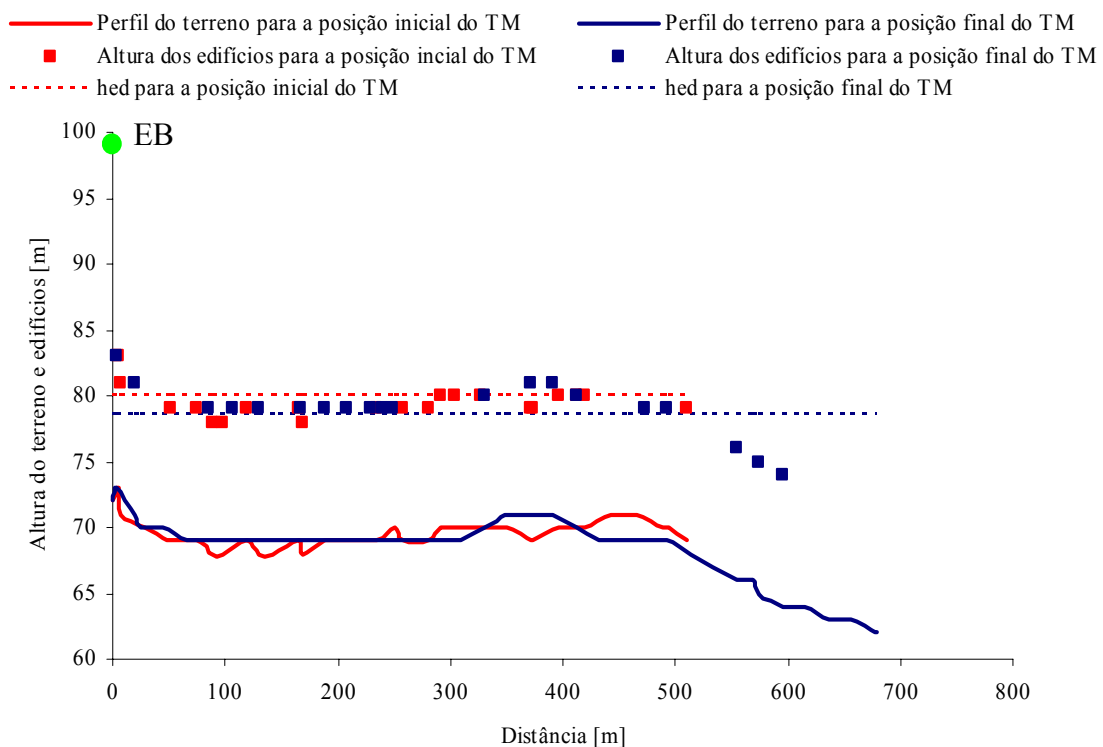


Figura N.4 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Rua Duarte Pacheco Pereira.

Anexo O - Aferição das Zonas Irregulares

Para o troço da Avenida da Boavista (Parque da Cidade), os dados relativamente à EB, TM e parâmetros de entrada dos modelos podem ser vistos na Tabela O. 1. O perfil para a posição inicial e final do TM é representado na Figura O.1.

Tabela O. 1 - Parâmetros associados à Avenida da Boavista (Parque da Cidade).

	Coordenadas		Azimute [°]	Downtilt [°]	Altura [m]
	X	Y			
EB	527 168	4 556 749	65	0	36
Ponto inicial	526 791	4 557 522			
Ponto final	527 750	4 557 320			
Parâmetro			Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
w_s [m]			42.5	140	66.79
Desvio padrão de w_s			12.65	179.65	37.18
h_{ed} [m]			45	64.45	53.53
Desvio padrão de h_{ed}			0	10.10	4.74
φ [°]			54.58	89.92	71.68
G_{EB} [dBi]			6.47	13.67	9.09
w_B [m]			61.42	767.23	256.44
Distância entre pontos medidos [m]			8.66	19.54	14.46

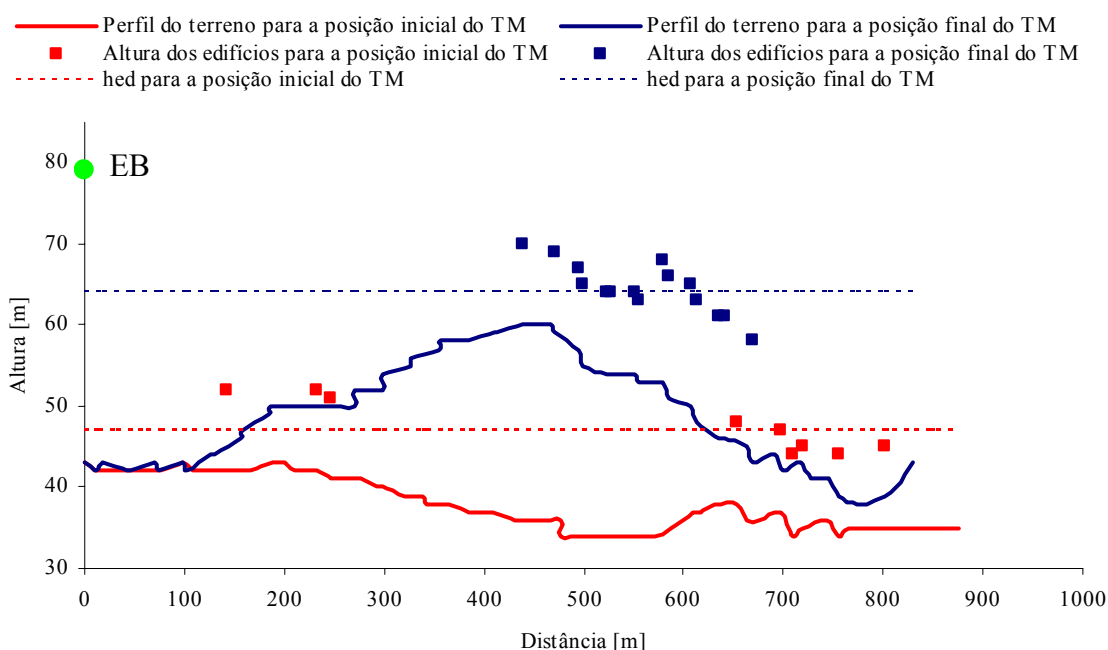


Figura O.1 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final para a Avenida da Boavista (Parque da Cidade).

Para a intersecção da VCI com a Avenida da Boavista, os parâmetros e o perfil do terreno vêm representados pela Tabela O.2 e Figura O.2 respectivamente.

Tabela O.2- Parâmetros associados à Avenida da Boavista com a intersecção da VCI.

	Coordenadas		Azimute [°]	Downtilt [°]	Altura [m]
	X	Y			
EB	529 576	4 557 351	180	0	30
Ponto inicial	529 946	4 556 853			
Ponto final	529 537	4 556 942			
Parâmetro			Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
w_s [m]			50	80	55.59
Desvio padrão de w_s			14.14	72.66	31.03
h_{ed} [m]			99	130	110.51
Desvio padrão de h_{ed}			10.23	25.77	19.17
ϕ [°]			41.96	82.63	59.50
G_{EB} [dBi]			-5.51	-0.15	-2.17
w_B [m]			99	270	177.49
Distância entre pontos medidos [m]			12.74	35.46	18.17

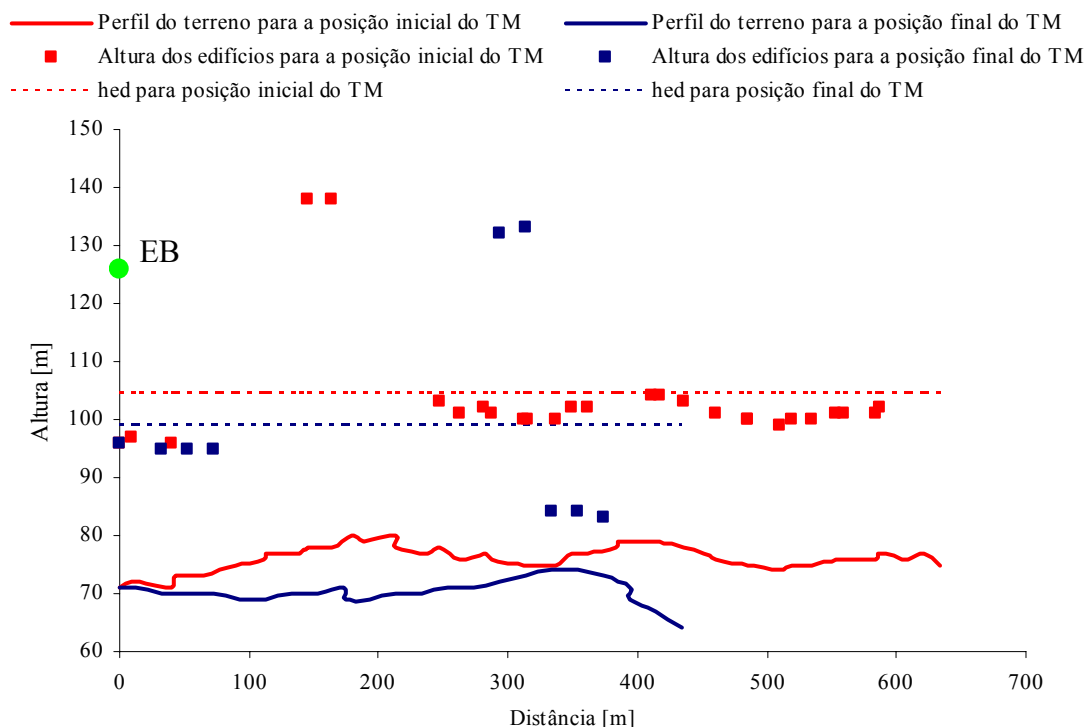
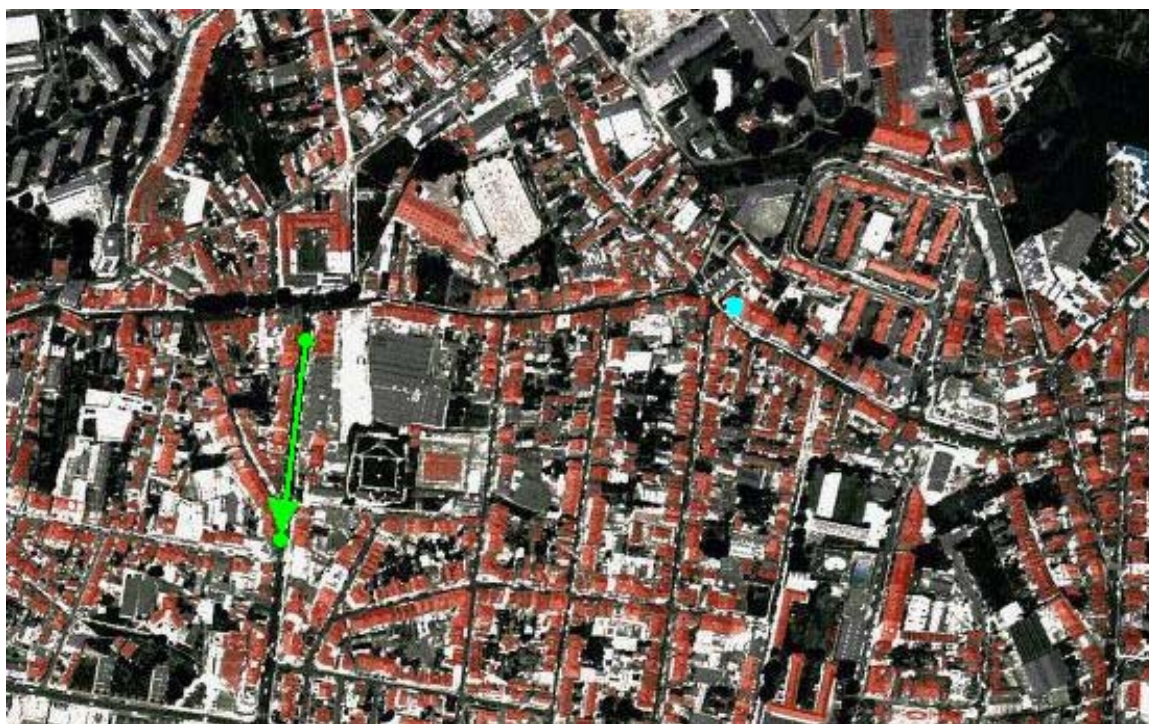


Figura O.2 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Avenida da Boavista com a intersecção da VCI.

Quanto à Rua Serpa Pinto, de maneira a poder analisar bem o desempenho dos modelos seguem-se a Figura O.3, Figura O.4, Figura O.5 e a Tabela O. 3.



- posição da EB
- percurso efectuado pelo TM

Figura O.3 - Fotografia aérea da Rua Serpa Pinto (extraído de [20]).

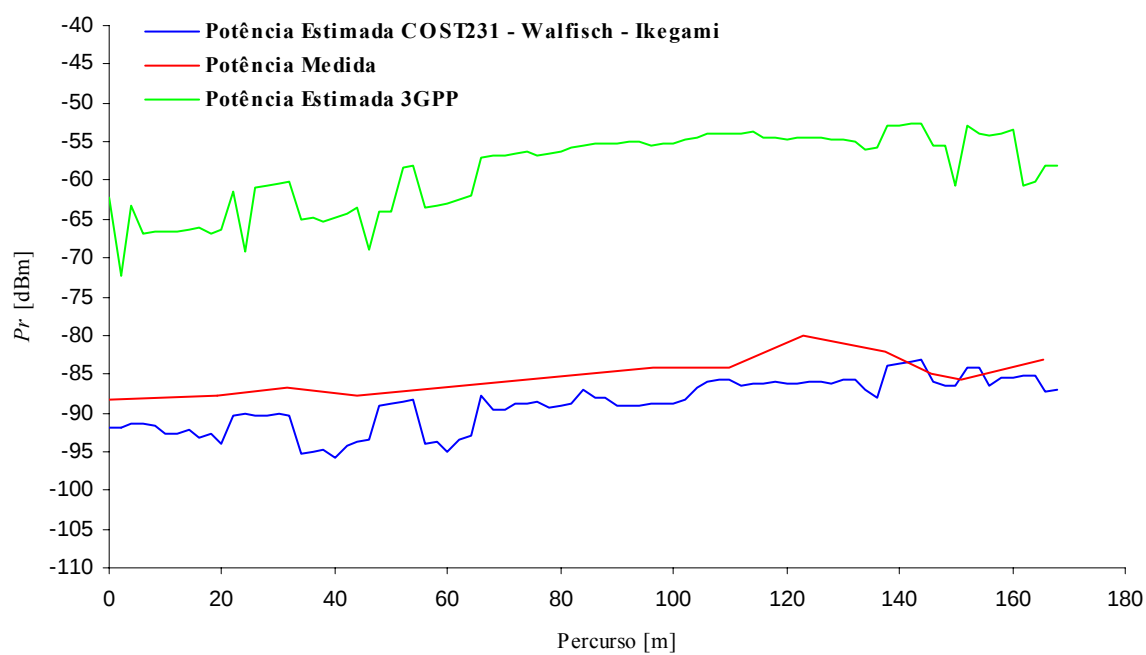


Figura O.4 - Comparação dos modelos com as medidas para a Rua Serpa Pinto.

Tabela O. 3 - Parâmetros associados à Rua Serpa Pinto.

	Coordenadas		Azimute [°]	Downtilt [°]	Altura [m]
	X	Y			
EB	532 386	4 557 648	180	0	23
Ponto inicial	531 961	4 557 600			
Ponto final	531 942	4 557 411			
Parâmetro			Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
w_s [m]			50	65	50.72
Desvio padrão de w_s			8.66	33.99	16.87
h_{ed} [m]			137.4	148.33	144.33
Desvio padrão de h_{ed}			3.41	7.65	6.13
φ [°]			57.79	76.87	50.72
G_{EB} [dBi]			-1.07	5.78	2.51
w_B [m]			137.4	255	203.76
Distância entre pontos medidos [m]			5.43	52.49	16.54

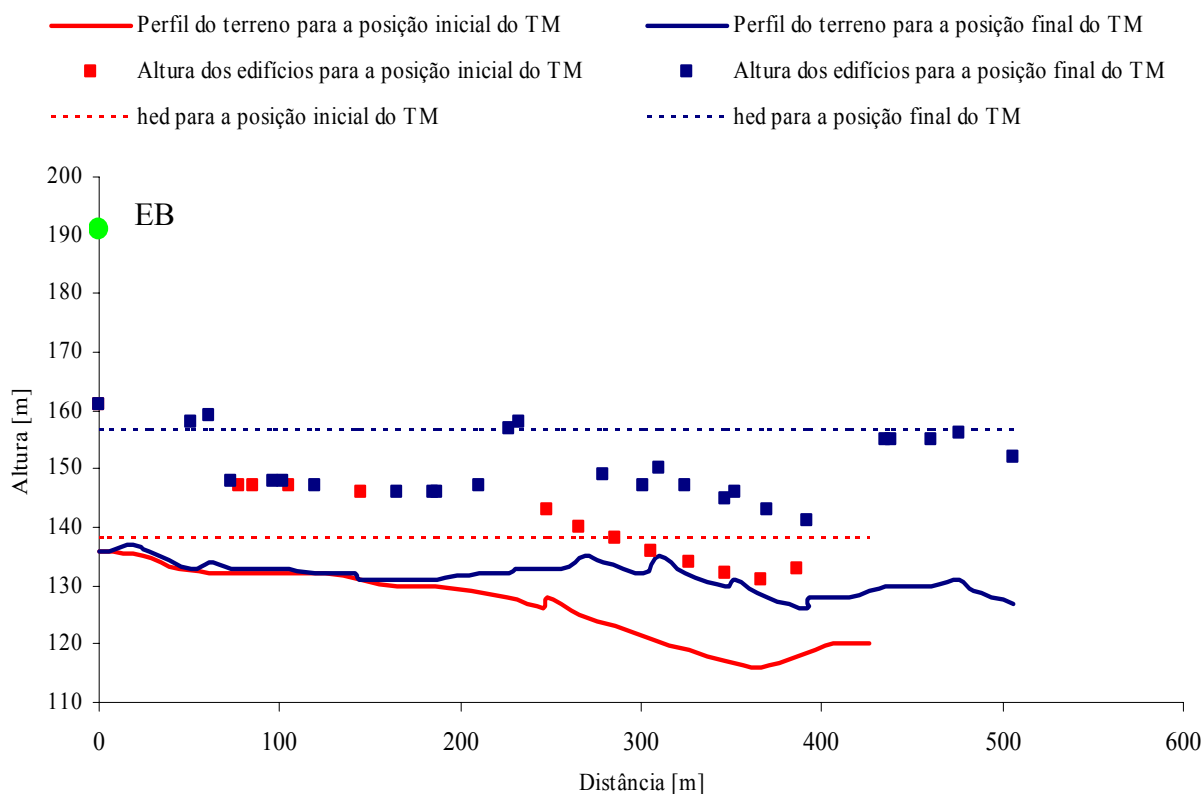


Figura O.5 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Rua Serpa Pinto.

No caso da Rua Dr. R. Jorge, a Figura O.6, Figura O.7, Figura O.8 e a Tabela O.4, para a análise do desempenho dos modelos vêm representados seguidamente:



- posição da EB
- percurso efectuado pelo TM

Figura O.6 - Fotografia aérea da Rua Dr. R. Jorge (extraído de [20]).

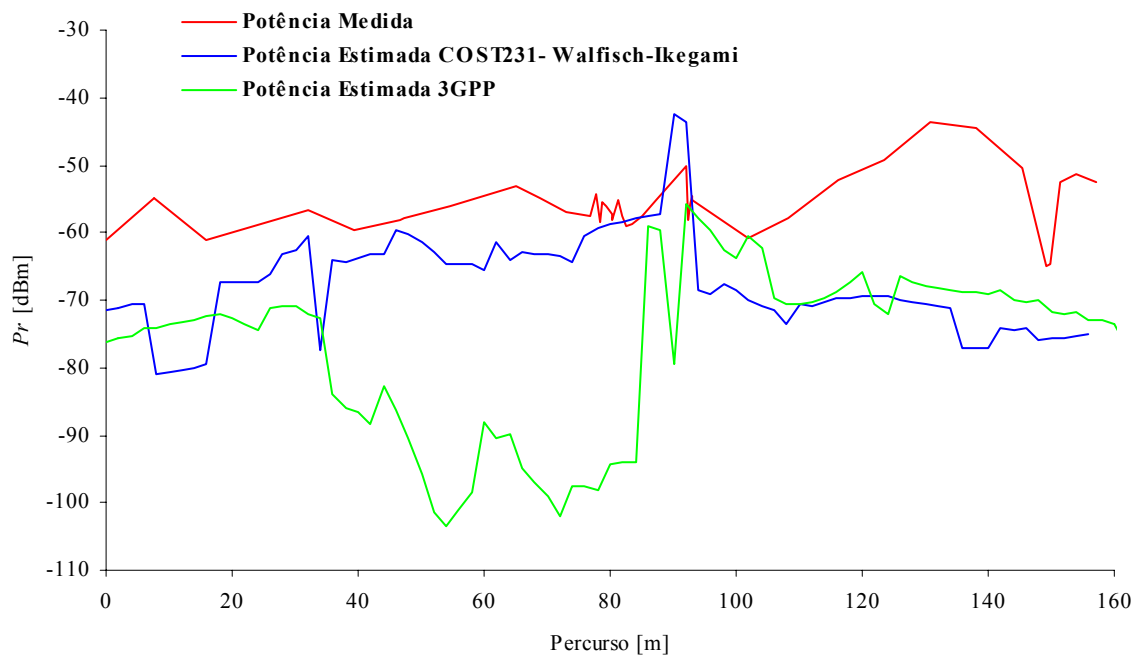


Figura O.7 - Comparação dos modelos com as medidas para a Rua Dr. R. Jorge.

Tabela O.4 - Parâmetros associados à Rua Dr. R. Jorge.

	Coordenadas		Azimute [°]	Downtilt [°]	Altura [m]
	X	Y			
EB	532 676	4 555 676	330	0	25
Ponto inicial	532 596	4 557 706			
Ponto final	532 748	4 557 753			
Parâmetro			Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
w_s [m]			20	80	53.65
Desvio padrão de w_s			0	0	0
h_{ed} [m]			116	115	115.45
Desvio padrão de h_{ed}			0	0	0
φ [°]			26.53	66.61	43.88
G_{EB} [dBi]			-18.49	6.93	-5.53
w_B [m]			3.44	71.86	23.54
Distância entre pontos medidos [m]			0	16.22	3.93

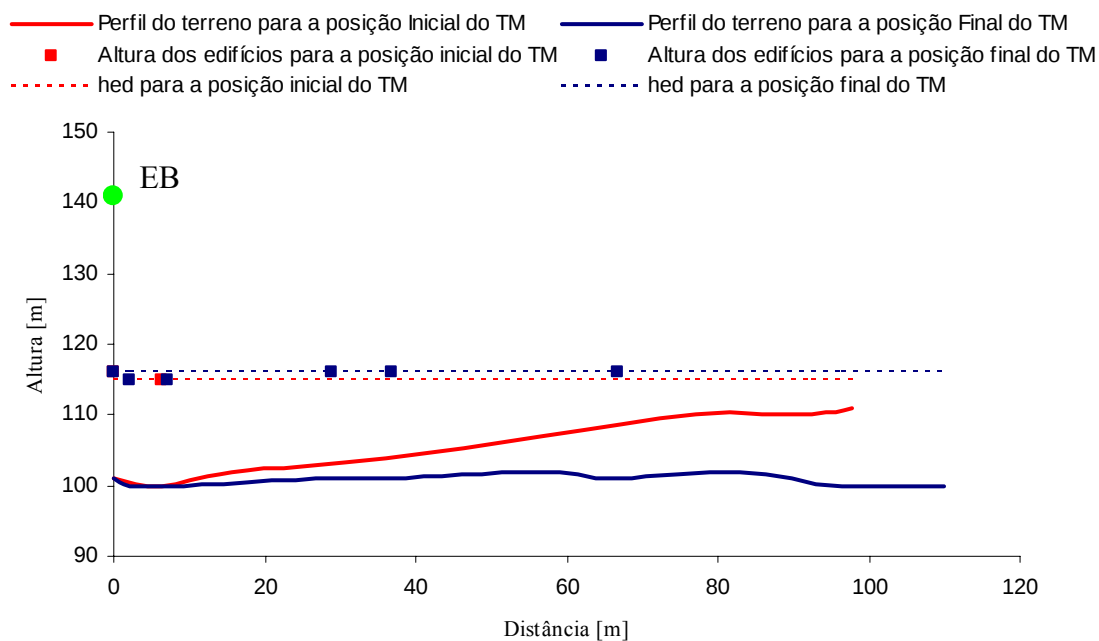


Figura O.8 - Perfil do terreno e altura dos edifícios para a posição inicial e final na Rua Dr. Jorge.

Anexo P – Cobertura para a Cidade do Porto

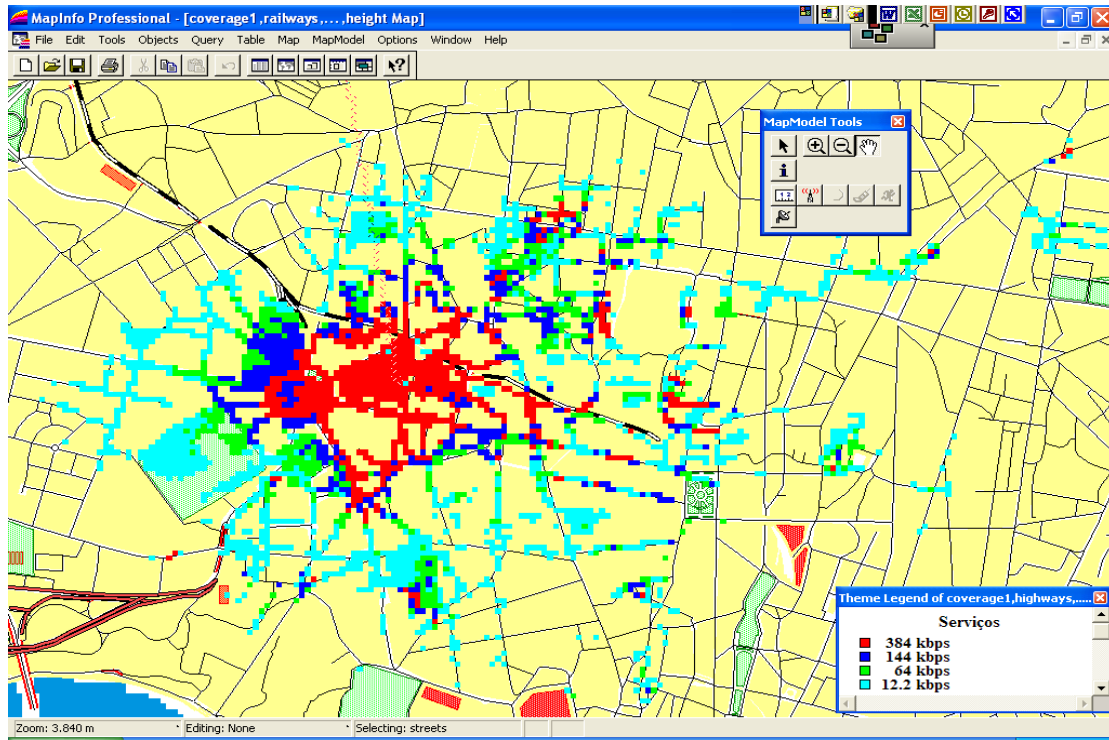


Figura P.1 - Cobertura para a zona da rotunda da Boavista, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 85 %.

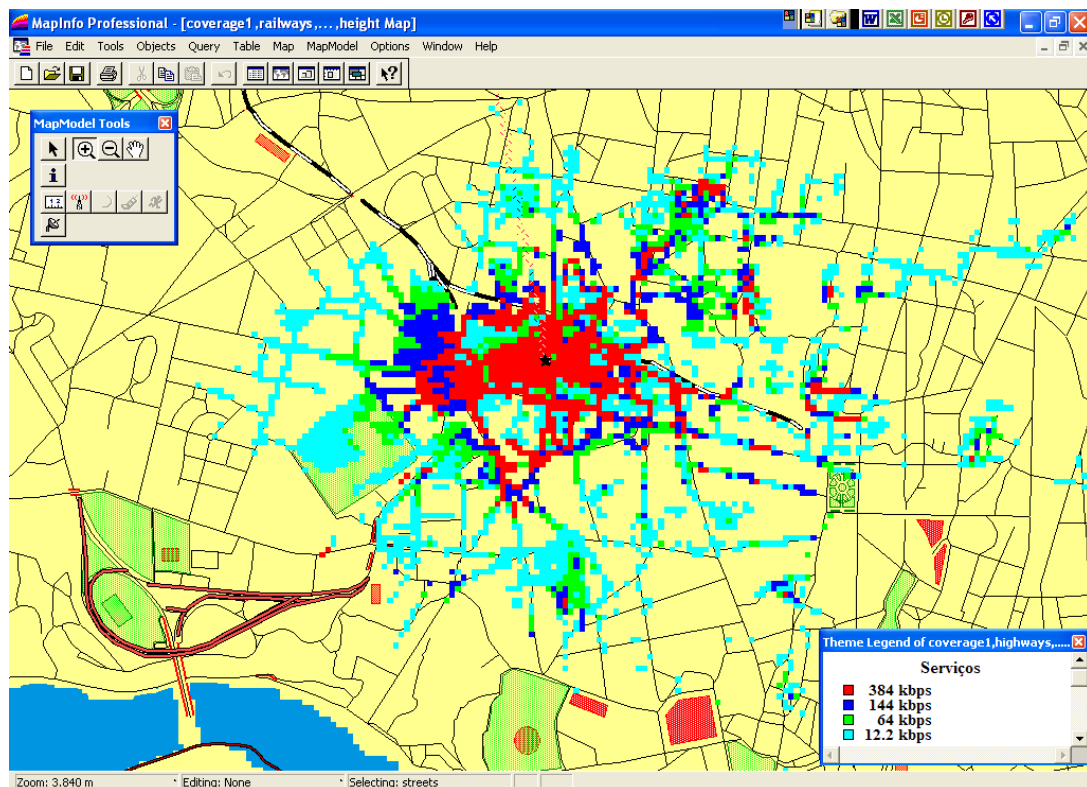


Figura P.2 - Cobertura para a zona da rotunda da Boavista, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 50 %.

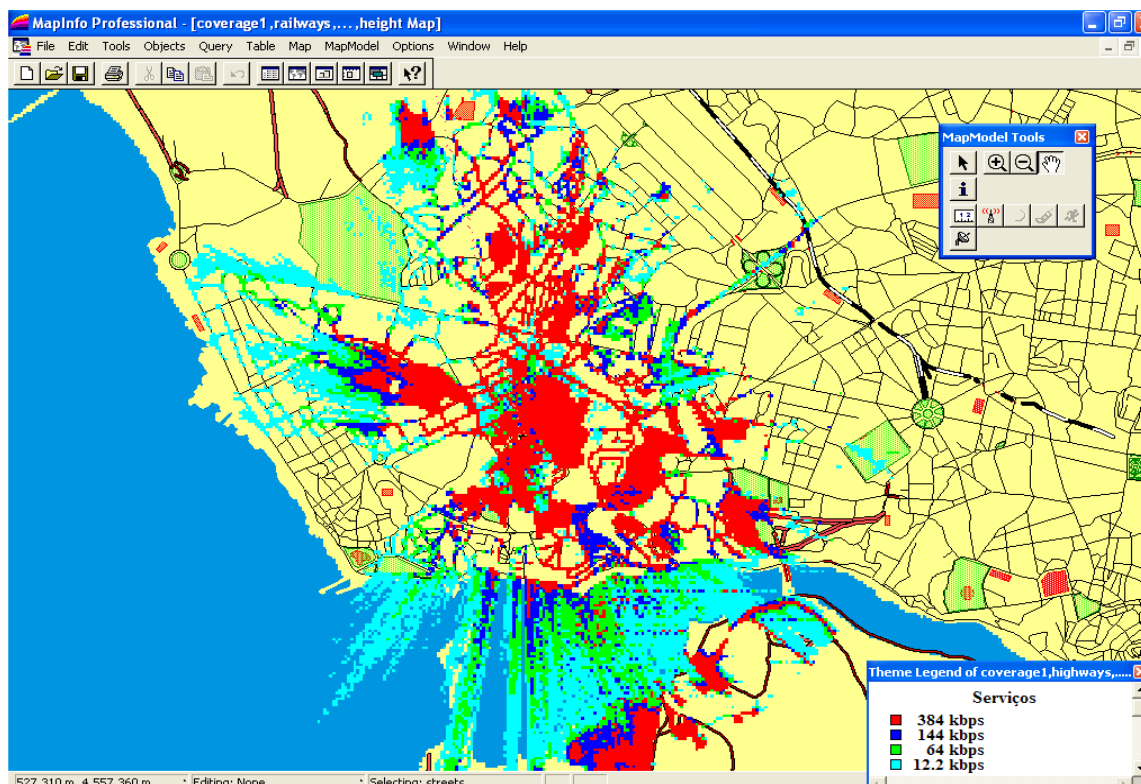


Figura P.3 - Cobertura para a zona de Serralves, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 85 %.

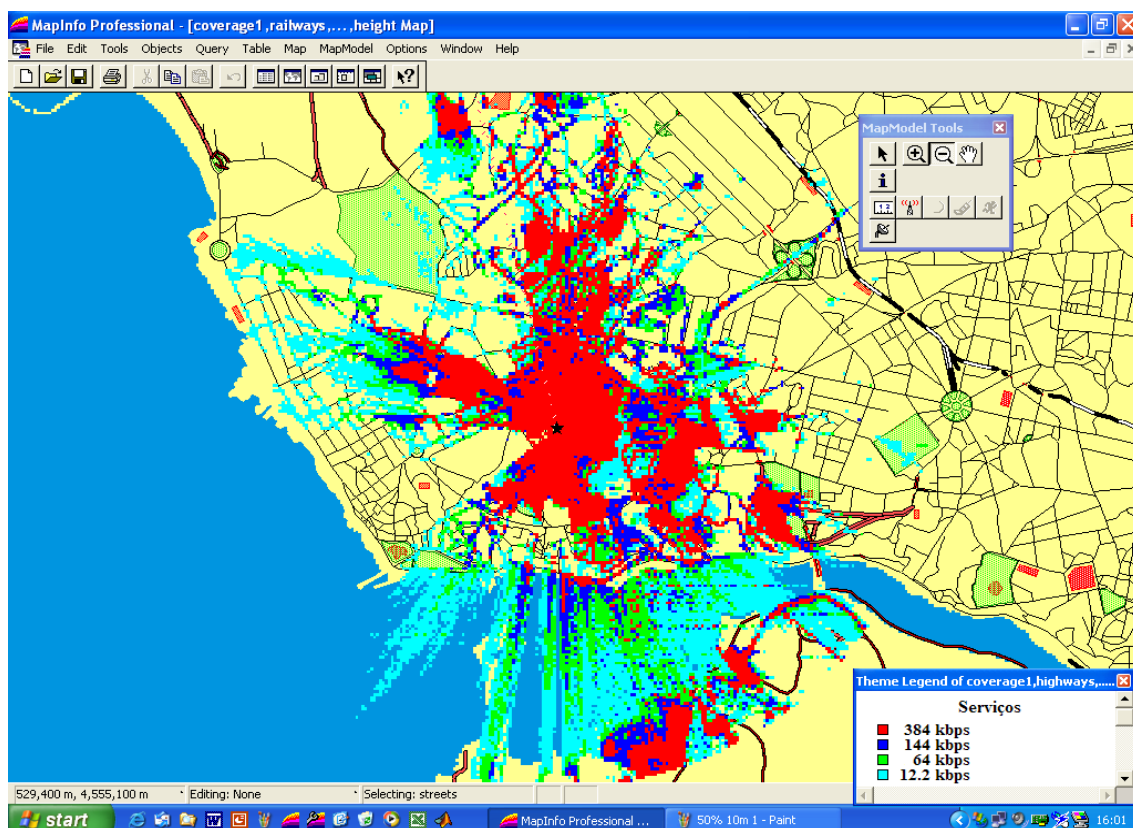


Figura P.4 - Cobertura para a zona de Serralves, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 50 %.

Anexo Q – Cobertura para a Cidade de Lisboa

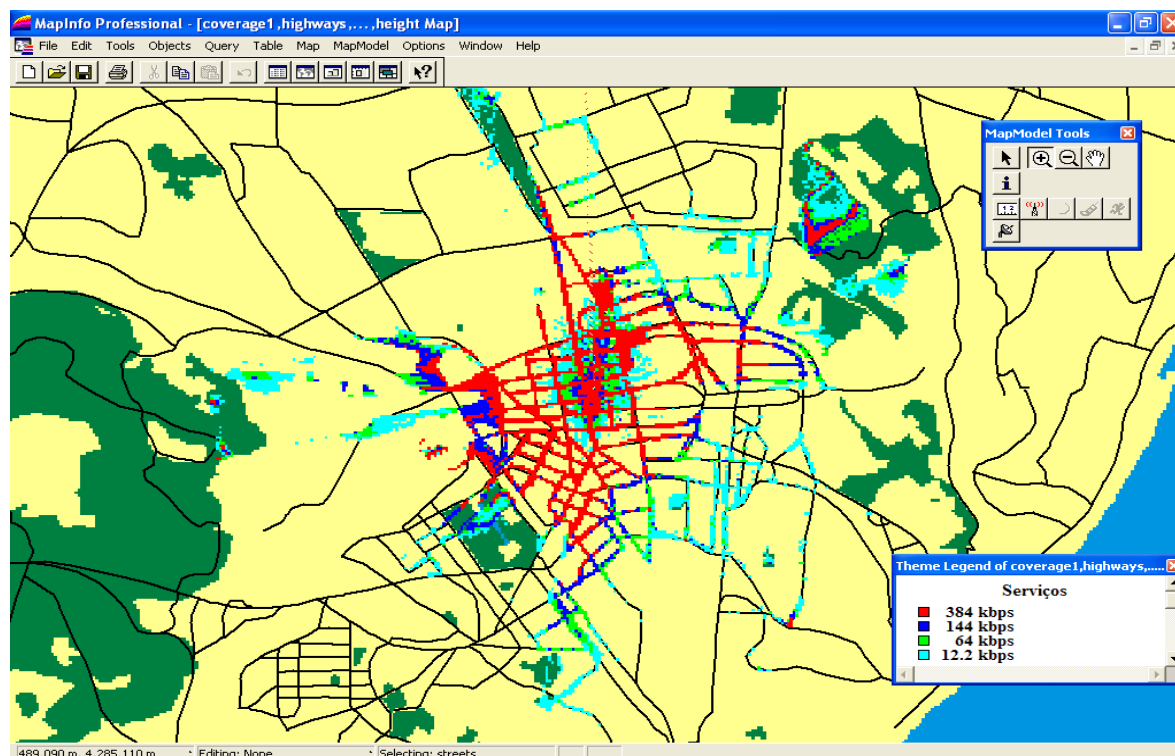


Figura Q.1 - Cobertura para a zona das Avenidas Novas, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 85 %.

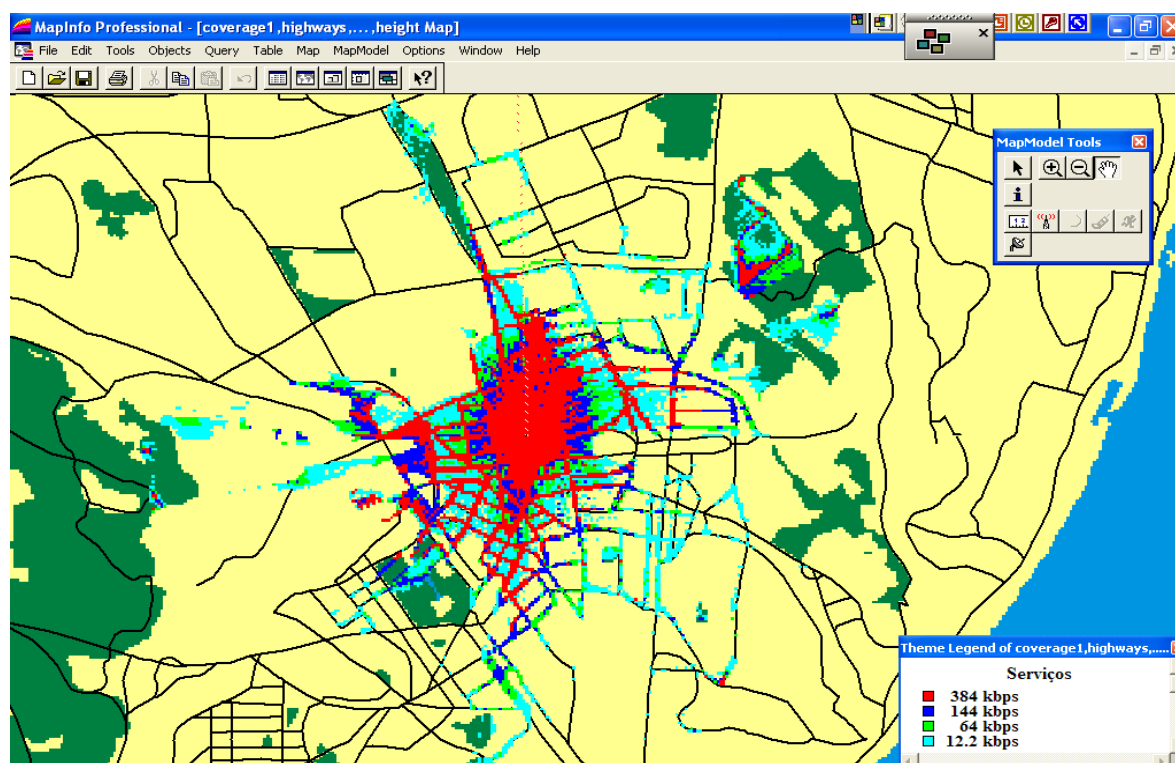


Figura Q.2 - Cobertura para a zona das Avenidas Novas, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 50 %.

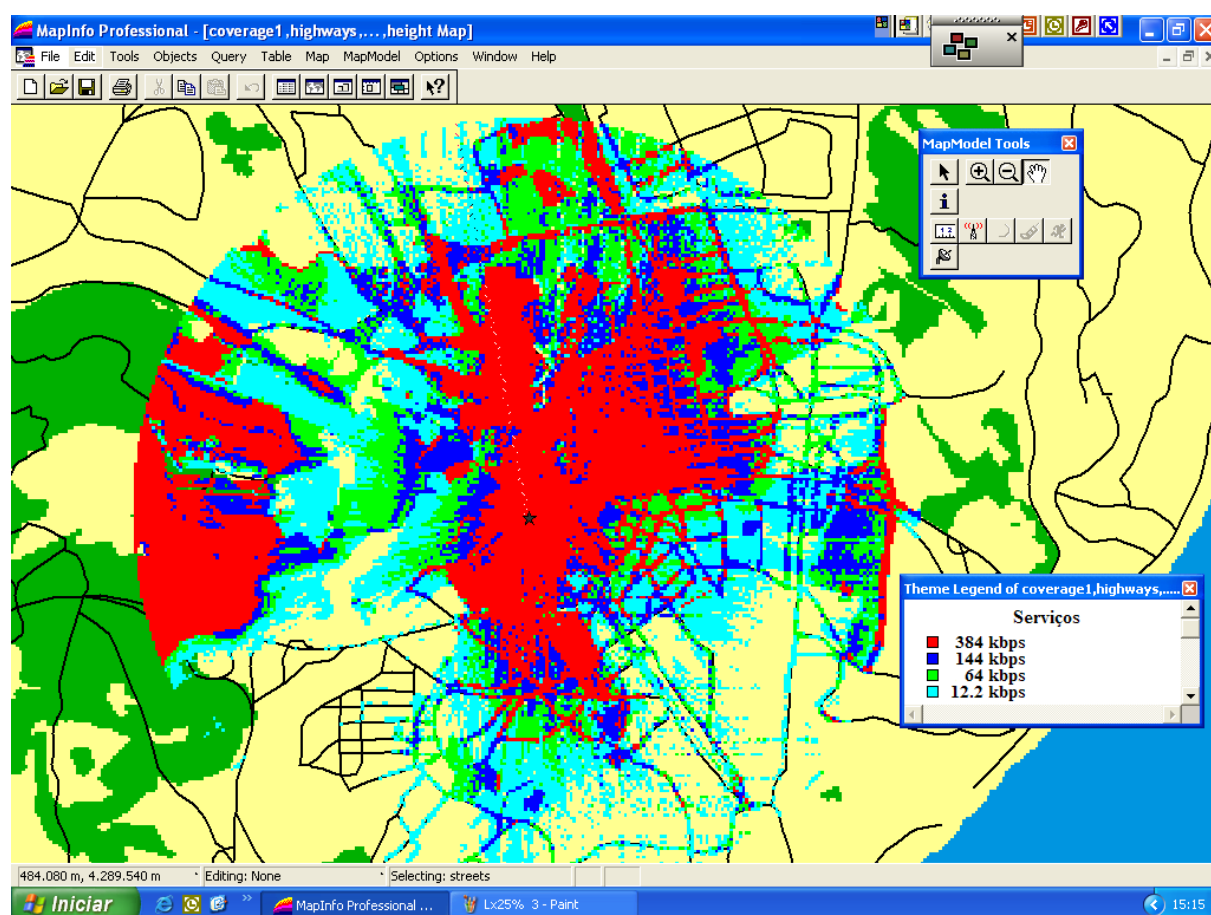


Figura Q.3 - Cobertura para a zona da Avenida António Augusto de Aguiar, com uma percentagem de cobertura para edifícios de 25 %.

Anexo R – Resultados do Modo Contínuo para a Avenida Elias Garcia em Lisboa

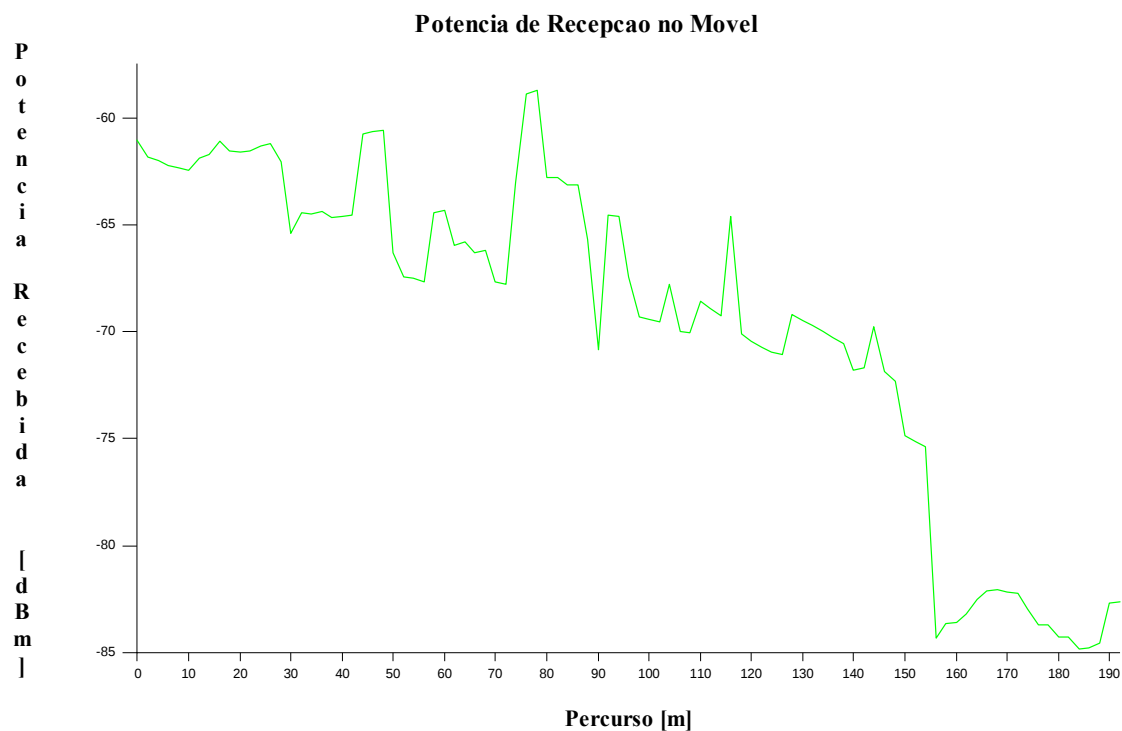


Figura R.1 - Evolução do sinal estimado pelo modelo COST231 – Walfisch – Ikegami ao longo da Avenida Elias Garcia.

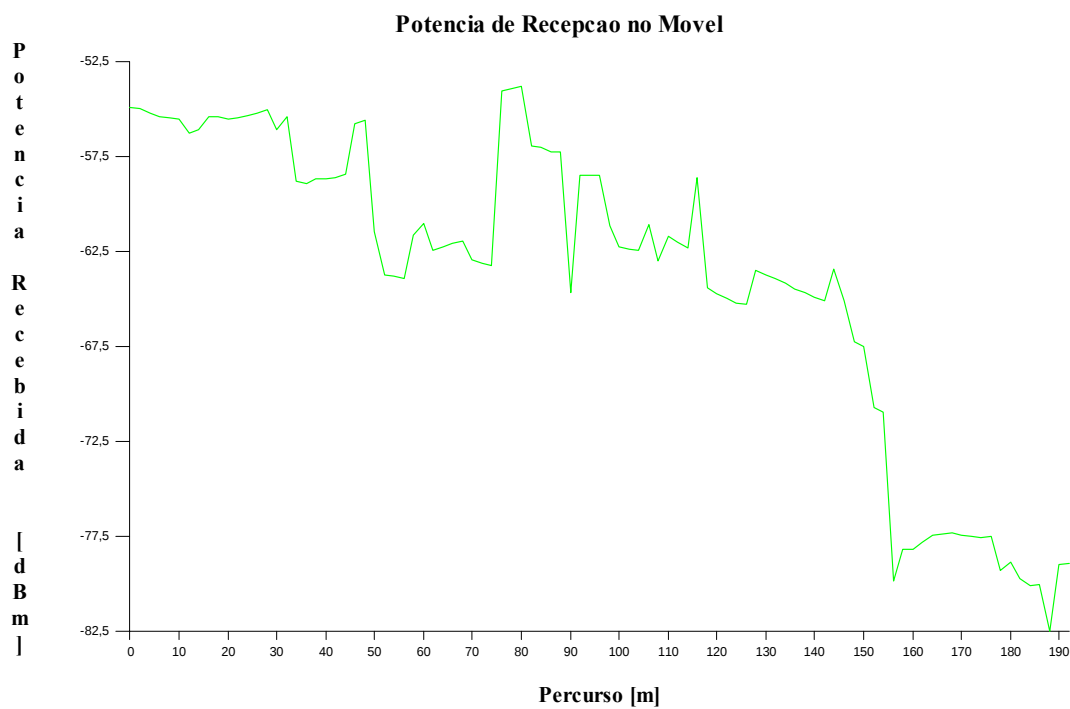


Figura R.2 - Evolução do sinal estimado pelo modelo 3GPP ao longo da Avenida Elias Garcia.

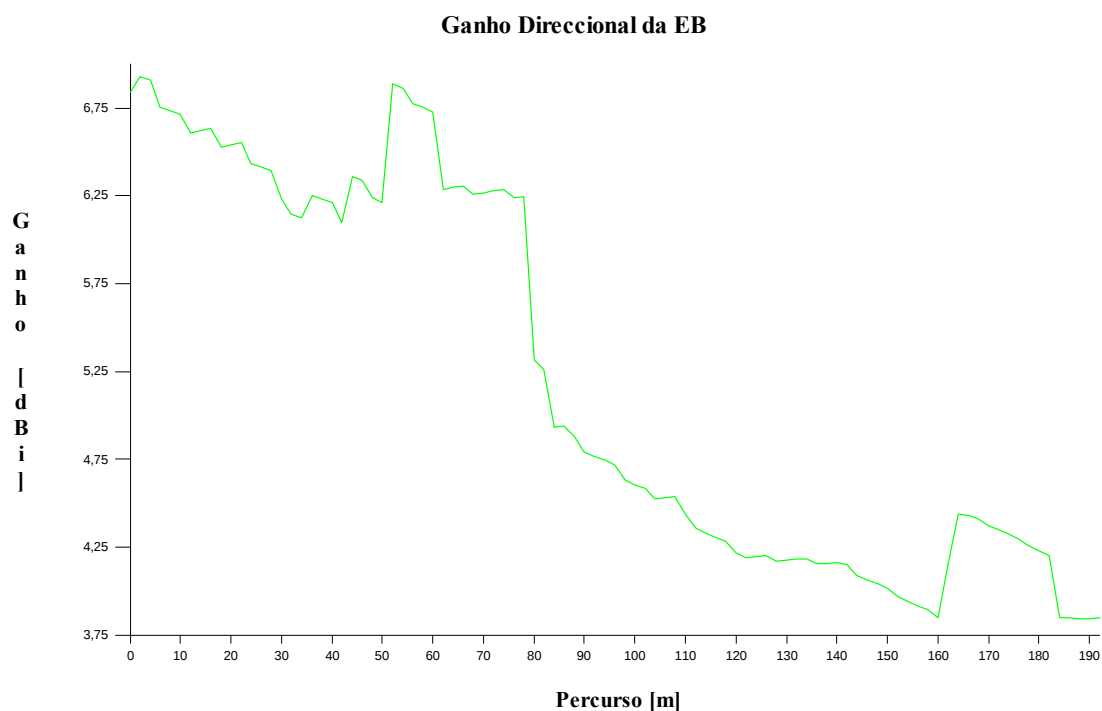


Figura R.3 - Influência do ganho de emissão da EB ao longo do percurso da Avenida Elias Garcia.



Figura R.4 - Redução da atenuação de propagação por influência dos cruzamentos para a Avenida Elias Garcia.

Anexo S – Dados Geográficos de Lisboa.

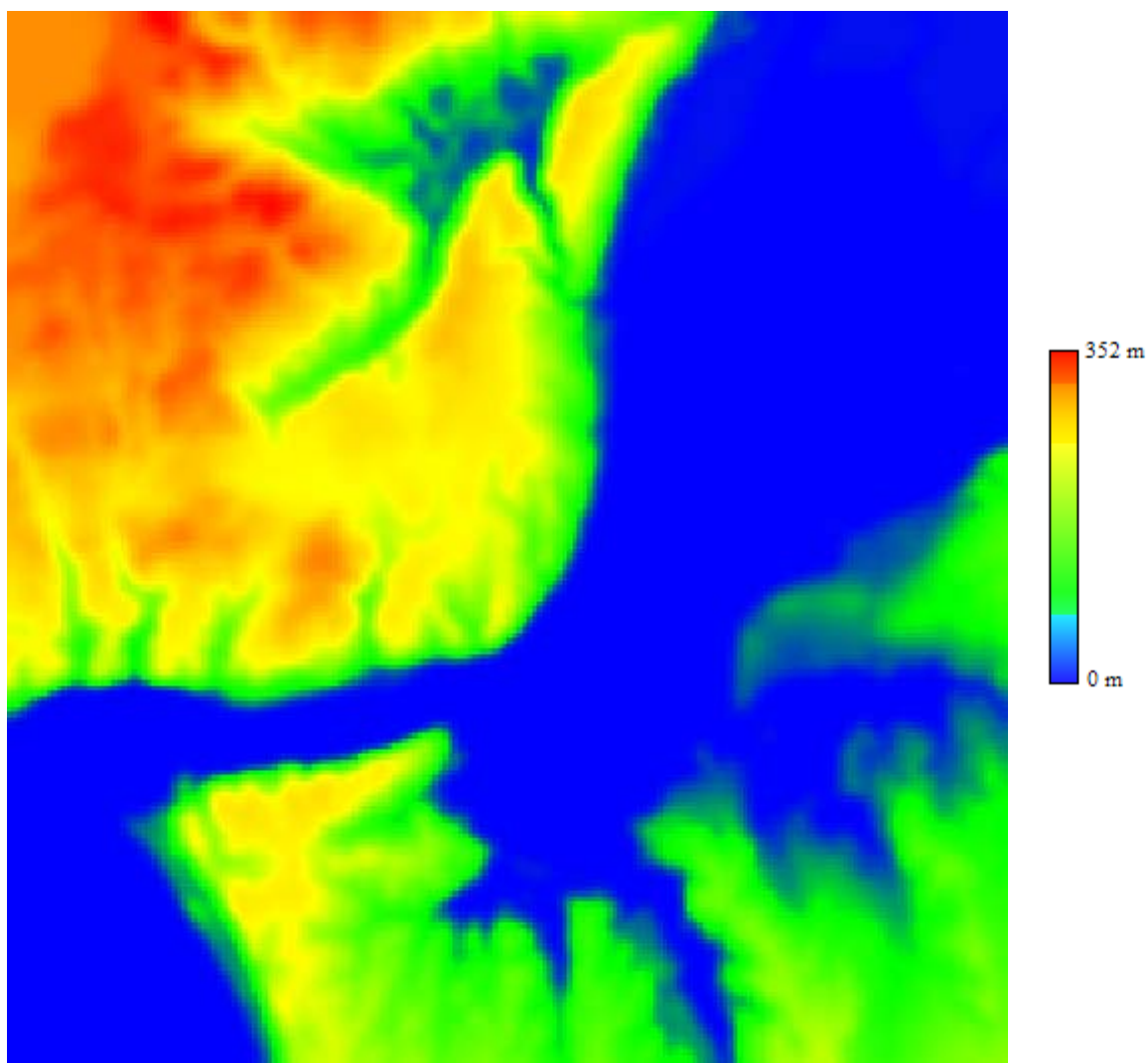


Figura S.1 - Cota do terreno da cidade de Lisboa.

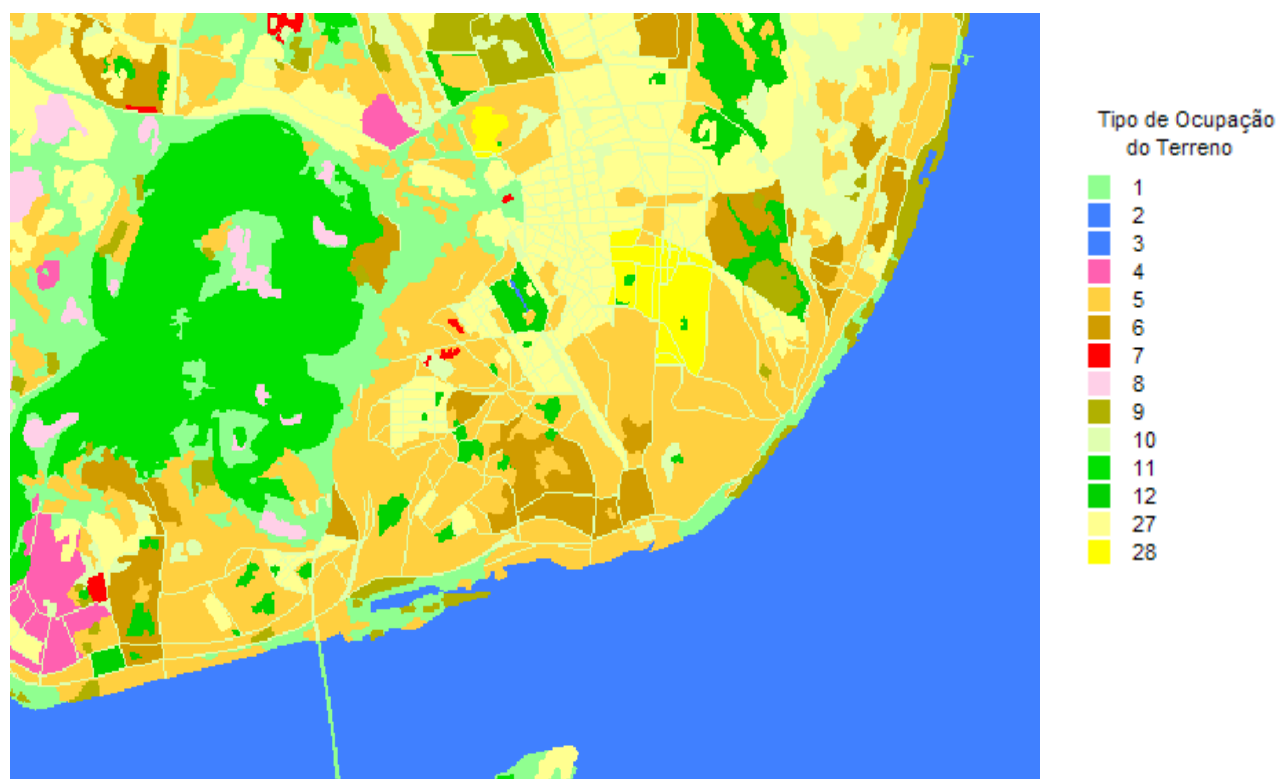
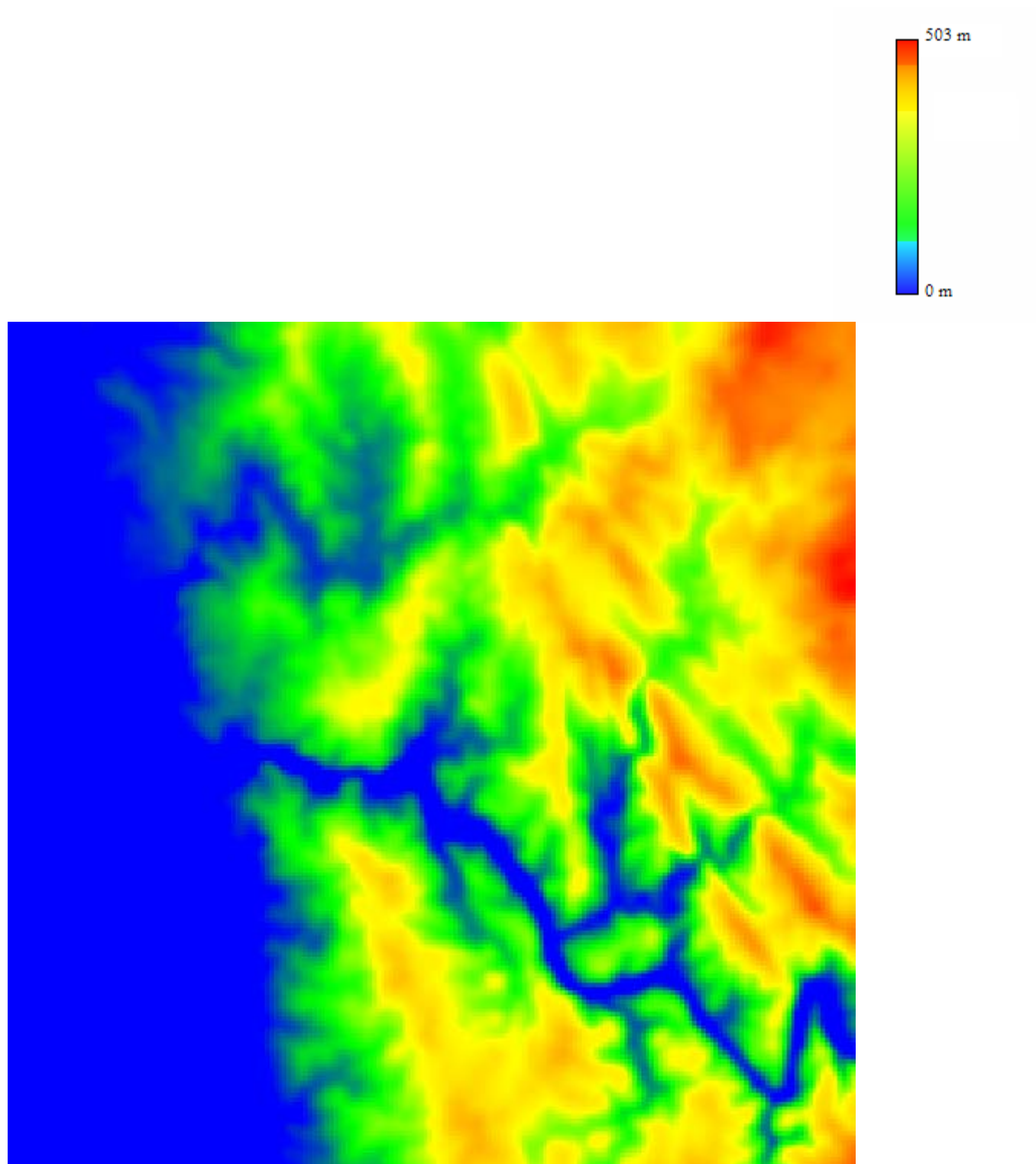


Figura S.2 - Tipo de ocupação do terreno na cidade de Lisboa.



Figura S.3 - Rede Viária da Cidade Lisboa.

Anexo T - Dados Geográficos do Porto



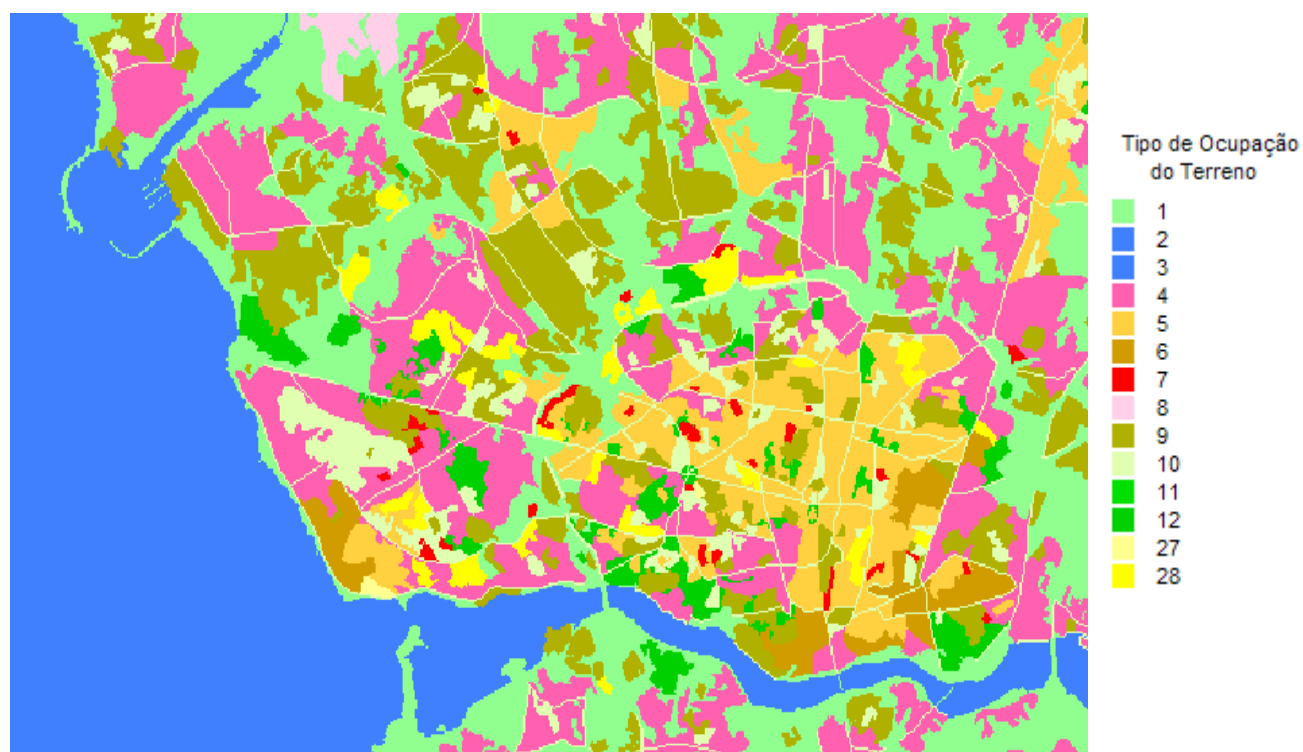


Figura T.2 - Tipo de ocupação do terreno na cidade de Lisboa.



Figura T.3 - Rede viária da cidade do Porto.

Referências

- [1] UMTS Forum, *UMTS/IMT – 2000 Spectrum*, Report No.6, London, UK, Dec. 1998.
- [2] Correia, L.M., *Sistemas de Comunicações Móveis e Pessoais*, I.S.T., Lisboa, Portugal, Mar. 2002.
- [3] Holma, H. and Toskala, A., *WCDMA for UMTS-Radio Access For Third Generation Mobile Communications*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2000.
- [4] 3GPP, *UTRAN Overall Description*, Technical Specification, No.25.401 version 3.0.0, Oct. 1999 (<http://www.3gpp.org>).
- [5] Yacoub, M.D., *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1993.
- [6] Damosso, E. and Correia, L. M., *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems (COST 231 Final Report)*, COST Telecom Secretariat, European Commission, Brussels, Belgium, 1999.
- [7] Hata, M., “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services”, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. VT-29, No. 3, Aug. 1980, pp. 317-325.
- [8] Walfisch, J. and Bertoni, H., “A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Enviroments”, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 36, No. 12, Dec. 1988, pp. 1788-1796.
- [9] Ikegami, F., Yoshida, S., Takeuchi, T. and Umehira, M., “Propagation Factors Controlling Mean Field Strenght on Urban Streets”, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-32, No. 8, Aug. 1984, pp. 882-889.
- [10] 3GPP, *Selection Procedures for the Choice of Radio Transmission Technologies of the UMTS*, Technical Report, No.30.03U version 3.2.0, Apr. 1998 (<http://www.3gpp.org>).
- [11] Xia, H.H., Bertoni, H. L., Maciel, L. R., Stewart, A. L., Rowe, R., “Microcellular Propagation Characteristics for Personal Communications in Urban and Suburban environment”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 43, No. 3, Aug. 1994, pp. 743-752.
- [12] Gonçalves, N., *Modelo de Propagação para Sistemas Macro e Micro Celulares Urbanos na Banda de UHF*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1997.
- [13] Claro, A.R. e Ferreira, J.M., *Avaliação de Modelos de Propagação para Microcélulas Urbanas não Regulares em GSM 900*, Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Set. 1998.

- [14] *MapInfo Professional*, Mapping and Geographic Analysis, MapInfo Corporation, May 2001.
- [15] Sistemas de Informação Geográfica, <http://www.gis.com/>, 2003.
- [16] *Visual C++ 6.0*, Microsoft Visual C++, Microsoft Corporation, 1998.
- [17] Cardoso, F. D. e Correia, L. M., “Fading Depth Evaluation in Mobile Communications – From GSM to Future Mobile Broadband Systems”, in *Proc. of PIMRC’02 – The 13th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Lisboa, Portugal, Sep. 2002.
- [18] Xavier, D. e Venes, J., *Caracterização da penetração de sinal em edifícios para o GSM*, Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Set. 2002.
- [19] *TEMS Scanner WCDMA*, Test Mobile System, Ericsson, 2002.
- [20] Sistema Nacional de Informação Geográfica, <http://ortos.igeo.pt/igeoe>, 2003.
- [21] 3GPP, *QoS Concept*, Technical Report, No.23.907 version 1.2.0, May 1999 (<http://www.3gpp.org>).
- [22] Meel, Ir. J., *Spread Spectrum applications*, De Nayer Instituut, Belgium, Oct. 1999.
- [23] Vasconcelos, A. e Carvalho, P., *Modelos de Tráfego para Estações de Base*, Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Set. 2002.
- [24] Okumura Y., Ohmori E., Kawano T., Fakuda K., “Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service”, *Review of the Electrical Communication Laboratory*, Vol. 16, No. 9-10, 1968, pp.825-873.