MODELO DE PROPAGAÇÃO PARA SISTEMAS MACRO E MICRO CELULARES URBANOS NA BANDA DE UHF

Nuno Manuel Carreira Gonçalves

MODELO DE PROPAGAÇÃO PARA SISTEMAS MACRO E MICRO CELULARES URBANOS NA BANDA DE UHF

ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES

Setembro de 1997

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Luís Correia pelo apoio e orientação académica prestados ao longo do trabalho, bem como pela disponibilidade sempre demonstrada.

Agradeço também à TELECEL, sem a colaboração da qual não teria sido possível realizar as medidas de sinal.

RESUMO

Este trabalho compreende o desenvolvimento e implementação de um modelo de propagação para células urbanas em sistemas de comunicações móveis, a sua aferição na cidade de Lisboa e, por último, a aplicação do modelo ao estudo da variação do sinal em torno de um cruzamento.

O modelo combina, a partir de uma nova expressão baseada num parâmetro de obstrução, as formulações de Vogler e de Xia and Bertoni para estimar a atenuação de propagação sobre os edifícios, o que permite a sua aplicação a perfis com edifícios de altura e espaçamento variáveis, mantendo o tempo de cálculo baixo. A atenuação no interior das ruas, desde o topo do último edifício (no trajecto de propagação) até ao móvel, é determinada por uma ferramenta de traçado de raios, baseada no método das imagens; as reflexões nas paredes dos edifícios são contabilizadas pela formulação de Fresnel e as difracções nas arestas verticais pela Teoria Uniforme da Difracção (UTD). Contabiliza-se, também, a atenuação introduzida pela vegetação no interior das ruas, tendo-se desenvolvido um método para tal.

A aferição do modelo baseou-se nas medidas de sinal realizadas em duas áreas de Lisboa, Baixa Lisboeta e Campo de Ourique, com a colaboração do operador de GSM TELECEL; não foi possível verificar o seu desempenho para a banda do sistema DCS1800 por falta de medidas. Os resultados obtidos permitem estar-se optimista quanto à aplicação do modelo a ambientes urbanos: para a Baixa obtiveram-se valores médios da média do erro, relativo e absoluto, e do desvio padrão do erro de 3.8, 0.2 e 2.8 dB, respectivamente, e para Campo de Ourique, considerando a vegetação, valores de 3.3, -0.35 e 2.4 dB. Verificou-se que o andamento médio do sinal, contabilizando os cruzamentos, é estimado correctamente pelos raios com um máximo de uma difracção e duas reflexões por rua.

Desenvolveu-se ainda uma expressão para descrever o comportamento do sinal nos cruzamentos, em função dos parâmetros geométricos que caracterizam o cenário de propagação. Esta expressão é particularmente útil caso não se disponha de uma ferramenta de traçado de raios. A aplicação da expressão em algumas ruas da Baixa, adicionada a um modelo de 2 raios (raio directo mais raio reflectido no edifício oposto), conduziu a bons resultados.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II

CAPÍTULO III

CAPÍTULO IV

ANEXOS

LISTA DE SIGLAS

COST	–	European COoperation in the field of Scientific and Technical research
COST231	–	Evolution of land mobile radio (including personal) communications
DCS1800	–	Digital Cellular System at 1800 MHz
EB	–	Estação Base
EM	–	Estação Móvel
GPS	–	Global Positioning System
GSM	–	Global System for Mobile communications
GTD	–	Geometrical Theory of Diffraction
LOS	–	Line Of Sight
RAM	–	Random Access Memory
TUE	–	Topo do Último Edifício
UTD	–	Uniform Theory of Diffraction

LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_{h_{ed}}$ - Desvio padrão da altura dos edifícios

$\alpha_{3\mathrm{dB}}^{\mathrm{V}}$ - Largura de feixe vertical a meia potência

$\overline{\beta_e}$ - Parâmetro de obstrução (combinação dos modelos de Vogler e de Xia and Bertoni)

δ - Parâmetro auxiliar de erro (cálculo de D)

ϕ - Ângulo de difracção (cálculo de D)

γ - Ângulo de difracção no TUE

ϕ' - Ângulo de incidência (cálculo de D)

Φ - Ângulo de incidência dos raios no topo do primeiro edifício

α - Ângulo de incidência dos raios no TUE

φ - Ângulo de rua

Ψ - Ângulo de saída dos raios da EB, no plano vertical

λ - Comprimento de onda de trabalho

σ - Desvio padrão do erro

ω - Frequência angular $\omega := 2\pi f$

μ - Média do erro

Σ - Parâmetro auxiliar: $\Sigma = h_{EB} + h_{EM}$

Δ - Parâmetro auxiliar: $\Delta = h_{EB} - h_{EM}$

β - Parâmetro geométrico do modelo de Vogler

$\Delta\phi$ - Parâmetro auxiliar (cálculo de D)

ε_0 - Constante dieléctrica do vácuo

μ_{abs} - Média do erro absoluto

σ_c - Condutividade

Δd_{ext} - Parâmetro característico da curva da atenuação suplementar nos cruzamentos (L_c)

Δd_{int} - Parâmetro característico da curva da atenuação suplementar nos cruzamentos (L_c)

Ψ_{DT} - Inclinação vertical da antena (*Down Tilt*)

Δh_{base} - Diferença entre a altura da antena da EB e o nível médio dos telhados circundantes

ΔL_{ext} - Parâmetro característico da curva da atenuação suplementar nos cruzamentos (L_c)

ΔL_{int} - Parâmetro característico da curva da atenuação suplementar nos cruzamentos (L_c)

ΔP - Erro de previsão do modelo de propagação

ε_r - Constante dieléctrica relativa da superfície reflectora

$A(.)$ - Factor de divergência

$a^{\pm}$ - Parâmetro auxiliar (cálculo de D)

a_m - Amplitude complexa do raio m

b - Espaçamento médio entre edifícios

$C(.)$ - Coseno integral de Fresnel

d - Comprimento do percurso EB-TUE

$D^{\perp//}$ - Coeficiente de difracção, considerando polarização perpendicular ou paralela

d' - Comprimento do percurso EB-EM

d_c - Distância da EB ao centro do cruzamento

d_{perfil} - Distância ao longo do perfil EB-EM

d_{pq} - Distância ao Ponto de Quebra (modelo de 2 raios)

d_{via} - Distância medida ao longo da rua, em relação ao seu início

E - Intensidade do campo eléctrico total

E^d - Intensidade do campo eléctrico difractado

E^I - Intensidade do campo eléctrico incidente

E^r - Intensidade do campo eléctrico reflectido

$erfc(.)$ - Função complementar de erro

f - Frequência de trabalho

$F(.)$ - Integral de Fresnel

g_Ψ - Ganho generalizado segundo a direcção vertical Ψ

g_φ - Ganho generalizado segundo a direcção horizontal φ

G_0 - Ganho da EB na direcção de máximo

g_c - Parâmetro adimensional do modelo de Xia and Bertoni

G_{EB} - Ganho da antena de transmissão

G_{EM} - Ganho da antena de recepção

g_p - Parâmetro adimensional do modelo de Maciel, Bertoni and Xia

h_{2p} - Altura inicial do 2º vértice do raio no interior da rua

h_{2p}' - Altura corrigida do 2º vértice do raio no interior da rua

h_{EB} - Altura da antena da EB

h_{ed} - Altura média dos edifícios

h_{EM} - Altura da antena da EM.

h_i' - Altura do edifício *i*

h_i - Altura do edifício *i* adicionada à cota do local

$I(p,\beta)$ - Integrais múltiplos da função de erro

$I_{N-1,q}$ - Função de Boerma

r - Coeficiente de decaimento do ganho da EB no plano vertical

k - Número de onda: $k = 2\pi / f$

L - Parâmetro auxiliar (cálculo de *D*)

L_0 - Atenuação em espaço livre entre as antenas da estação base e do móvel

L_c - Atenuação suplementar nos cruzamentos

LF_v - Largura de feixe no plano vertical

L_{msd} - Atenuação suplementar por difracção múltipla sobre os edifícios

$L_{msd_{XB}}$ - Atenuação por difracção múltipla sobre os edifícios segundo o modelo de Xia and Bertoni

L_p - Atenuação de propagação

L_{rts} - Atenuação suplementar por difracção e reflexão no interior das ruas

L_{veg2} - Atenuação introduzida pela vegetação densa

L_{veg} - Atenuação total introduzida pela vegetação

L_{veg1} - Atenuação introduzida pela vegetação pouco densa

L_{Vogler} - Atenuação determinada pelo modelo de Vogler

L_{XB} - Atenuação determinada pelo modelo de Xia and Bertoni

n - Define ângulo externo da aresta (cálculo de *D*)

N - Número de obstáculos no percurso EB-TUE

$N^{\pm}$ - Parâmetro auxiliar (cálculo de *D*)

N_{pv} - Número total de previsões ao longo de uma via

N_{veg1} - Número de vezes que um raio intercepta vegetação pouco densa

N_{veg2} - Número de vezes que um raio intercepta vegetação densa

P^m - Média local da potência experimental

P_r - Potência recebida pela EM

P_{raio} - Potência dum raio na EM

P^t - Potência na EM segundo o modelo de previsão

P_t - Potência transmitida pela EB

Q	-	Atenuação suplementar (modelos de Xia and Bertoni e de Vogler)
$R^{\perp //}$	-	Coeficiente de reflexão, considerando polarização perpendicular ou paralela
r_1	-	Comprimento do raios directo (modelo de 2 raios)
r_2	-	Comprimento do raio reflectido (modelo de 2 raios)
r_m	-	Comprimento do percurso do raio m
R_p	-	Número máximo de reflexões na rua em que o móvel se desloca
R_s	-	Número máximo de reflexões nas ruas transversais
s	-	Distância da aresta difractora à EM (cálculo de D)
$S(.)$	-	Seno integral de Fresnel
s'	-	Distância da EB à aresta difractora (cálculo de D)
u^i	-	Função escalão igual a 1 nas zonas iluminadas pelo campo incidente e igual a zero na sua zona de sombra
u^r	-	Função escalão igual a 1 nas zonas iluminadas pelo campo reflectido e igual a zero na sua zona de sombra
w	-	Largura das ruas

I. INTRODUÇÃO

A história do rádio móvel remonta praticamente às origens das comunicações rádio. Na década de 1880 o cientista alemão H. G. Hertz demonstrou ser possível a propagação de ondas electromagnéticas em espaço aberto. Seguindo o trabalho pioneiro de Hertz, as experiências de Marconi no final do século XIX mostraram que as comunicações rádio podiam ter lugar entre um emissor e um receptor móvel bastante distanciados entre si: estabeleceu uma ligação rádio entre uma estação base e um rebocador, num percurso de 18 milhas. Desde então os sistemas móveis têm-se desenvolvido e difundido consideravelmente.

A utilidade dos serviços rádio móvel foi reconhecida inicialmente pelos militares e pelos serviços de segurança pública (departamentos de policia, bombeiros, serviços governamentais locais), seguidos pelo sector privado (serviços de transporte, frotas de táxis). Nestes sistemas iniciais - Sistemas Móveis Convencionais - as estações base são colocadas num ponto alto da área de serviço e possuem um emissor de potência elevada. Pretende-se assim cobrir uma vasta área, à semelhança do que se passa nos serviços de radiodifusão. No que se refere à utilização do espectro, os sistemas convencionais têm uma eficiência baixa, dado que cada canal só pode servir um utilizador de cada vez em toda a área de serviço. Sendo assim, o número de utilizadores activos está limitado pelo número de canais associado ao serviço. A expansão destes sistemas baseia-se largamente no aumento da banda de espectro atribuída, uma solução pouco viável dado que o espectro tem de ser partilhado com outros serviços e outras operadoras.

Uma solução para aumentar a eficiência espectral é reatribuir os canais de um utilizador a outro utilizador numa área geográfica suficientemente afastada, continuando a garantir a qualidade de serviço exigida pelo sistema. Estes sistemas, que se baseiam na reutilização de frequências para alcançar uma eficiência espectral elevada, designam-se por Sistemas Celulares. Num sistema celular a área de cobertura é dividida em células, cuja dimensão está dependente do tráfego e das condições de propagação esperadas. Em cada célula existe uma estação base, com um emissor de potência reduzida, que serve os vários terminais móveis que se encontram no seu interior. O sistema de telefonia celular é o exemplo mais comum de um serviço que utiliza uma estrutura celular.

Os sistemas de telefonia celular, numa primeira fase, caracterizavam-se por um raio da célula elevado (superior a 20 km), razão porque eram denominados de sistemas macrocelulares. O rápido e inesperado aumento do número de utilizadores, em especial nos centros urbanos, conduziu a uma elevada probabilidade de bloqueio das chamadas durante as horas de ponta; embora a qualidade de serviço não fosse a desejável, a procura continuou a

aumentar. Tornou-se, assim, necessária a existência de um sistema de maior capacidade para os telefones móveis, o que levou ao aparecimento dos sistemas microcelulares.

Em sistemas com reutilização de frequências existe sempre a possibilidade de interferência e, por conseguinte, deve ter-se em conta que a recepção adequada requer não só uma relação portadora-ruído adequada mas também, simultaneamente, uma relação portadora--interferência aceitável. Com o aumento do número de utilizadores também a interferência nos sistemas aumentou, pelo que em muitos dos sistemas celulares a interferência tornou-se um problema crítico. A capacidade de prever a potência mínima a radiar pelo emissor, de modo a providenciar uma ligação aceitável, e de estimar os efeitos de tal transmissão em termos de interferência noutros receptores é fundamental para o melhoramento das técnicas de reutilização de frequências, para a distribuição de frequências pelos diferentes serviços e para o sucesso dos sistemas de comunicações móveis. O objectivo deste trabalho é precisamente desenvolver um modelo de propagação que, tendo em conta a influência dos diferentes factores urbanos, permita estimar o sinal rádio de uma forma rápida e precisa, de modo a poder ser utilizado no dimensionamento de sistemas celulares reais.

Nos últimos anos, os estudos de propagação têm sido orientados para o desenvolvimento de modelos de previsão de base teórica, dada a pouca fiabilidade dos modelos empíricos quando aplicados a células de reduzida dimensão (raio inferior a 5 km). Em células desta natureza, o conhecimento dos obstáculos à propagação e dos fenómenos físicos associados é essencial para uma correcta caracterização do canal. No entanto, a contabilização de todos os fenómenos envolvidos torna os modelos teóricos bastante complexos, o que, em geral, se traduz em tempos de cálculo elevados. Além disso, o rigor com que é necessário conhecer o percurso do sinal entre a estação base (EB) e a estação móvel (EM) torna difícil a sua aplicação a ambientes urbanos reais, ou porque a informação disponível é insuficiente ou porque o seu processamento é demasiado complicado.

Face às limitações existentes, grande parte dos autores optou por simplificar os seus modelos teóricos, restringindo a sua aplicação. Assim, é frequente encontrarem-se dois tipos de modelos de propagação para ambientes urbanos: modelos para ambientes macrocelulares e modelos de aplicação microcelular. Os primeiros são adequados para células com raio de alguns quilómetros, em que a EB se situa nitidamente acima do nível dos telhados adjacentes [WaB88], [Cos91], [SaB91]. Nestas condições, é válido considerar que o sinal se propaga apenas sobre os edifícios, no plano vertical, podendo desprezar-se a propagação no interior

das ruas. Além disso, face à extensão do percurso rádio, o número de interacções entre as ondas electromagnéticas e os obstáculos é elevado, pelo que se pode considerar uma contribuição média de cada obstáculo. No segundo caso, modelos microcelulares, considera-se que as células têm um raio máximo de l km e que a EB se encontra alguns metros abaixo do nível dos telhados, de tal forma que se pode desprezar a propagação sobre os edifícios face à propagação no interior das ruas [LaM94], [TaT96].

No presente estudo, o caso que se analisa corresponde a uma situação intermédia das duas acima descritas, ou seja, o modelo a desenvolver deverá ser aplicável a células com raio da ordem de 1 km, com a EB situada ao nível dos telhados. Esta é a situação para que tendem actualmente as operadoras celulares nas grandes cidades, e em particular em Lisboa, onde o aumento do tráfego levou à diminuição da dimensão das células. A actualidade deste assunto justifica, em parte, o interesse pelo seu estudo.

Este trabalho vem na sequência do Trabalho Final de Curso, em que se tratou da adaptação do modelo de propagação COST231-WI à cidade de Lisboa [DCG95]. Na altura concluiu-se que o modelo possuía algumas limitações, nomeadamente, a restrição a ambientes regulares (terreno e edifícios) e a não contabilização dos cruzamentos e da atenuação introduzida pela vegetação. Tendo-se verificado a importância destes fenómenos no comportamento do sinal, decidiu-se que seria importante incluí-los no modelo. Contudo, o facto das expressões apresentadas pelo COST231 resultarem de aferições prévias em algumas cidades Europeias limita a sua aplicação a outras cidades, em particular Lisboa. Por esta razão, achou-se preferível desenvolver um novo modelo.

No âmbito do trabalho efectuado durante a tese de mestrado, foram já apresentadas duas comunicações, uma descrevendo o modelo de propagação desenvolvido [GoC97a] e a outra sobre a influência dos cruzamentos no andamento do sinal [GoC97b].

No Capítulo seguinte, Capítulo II, apresenta-se o modelo de propagação, desenvolvido para estimar o andamento médio do sinal em ambientes urbanos, considerando o perfil do terreno e a estrutura dos edifícios. O modelo contabiliza o multipercurso, sendo, para cada raio, composto por dois termos de atenuação, que se adicionam à respectiva atenuação em espaço livre: um primeiro termo que contabiliza a atenuação por difracção múltipla sobre os edifícios e um segundo termo que dá conta da atenuação por difracção e reflexão múltipla no interior das ruas. O primeiro termo baseia-se nos modelos de Xia and Bertoni [XiB92] e de

Vogler [Vog82], tendo-se desenvolvido uma nova expressão, em função de um parâmetro de obstrução, que permite combinar os dois modelos de forma adequada, atendendo às condições de aplicação de cada um. Para o segundo termo, por sua vez, desenvolveu-se uma ferramenta de traçado de raios, segundo o método das imagens, em que as reflexões são determinadas pela formulação de Fresnel e as difracções pela Teoria Uniforme da Difracção (UTD). Neste segundo termo inclui-se, também, a atenuação introduzida pela vegetação, tendo-se desenvolvido um método para a estimar.

No terceiro Capítulo refere-se o processo de aferição do modelo, desenvolvido a partir da comparação entre as previsões e as medidas, estas realizadas na banda de GSM em colaboração com o operador TELECEL. O capítulo inicia-se com a descrição das condições em que as medidas de sinal foram efectuadas; as áreas seleccionadas para o estudo foram a Baixa Lisboeta e Campo de Ourique, dada a sua regularidade e também, no caso de Campo de Ourique, por existirem árvores em algumas ruas, permitindo assim aferir o respectivo termo de atenuação. Em seguida referem-se as opções tomadas na implementação dos modelos de Vogler e de Xia and Bertoni, com destaque para o cálculo dos seus parâmetros de entrada. Após a aferição individual dos modelos, analisam-se alguns métodos para os combinar, tendo em conta as condições de aplicação de cada um; analisa-se a expressão apresentada por Saunders and Bonar [SaB94] e desenvolvem-se dois novos métodos, um com base no desvio padrão da altura dos edifícios e outro em função dum parâmetro de obstrução. Por último, com base nas medidas de Campo de Ourique, analisa-se o desempenho do método para contabilizar a atenuação introduzida pelas árvores.

No quarto Capítulo desenvolve-se uma expressão para descrever o andamento do sinal em torno de um cruzamento. Começa-se por descrever o cenário urbano em que a expressão é obtida, o qual deve ser tido em conta na sua aplicação. Em seguida, analisa-se a contribuição individual dos diferentes raios quando se variam as características do cenário de propagação, de modo a concluir qual a ordem dos raios que deve ser considerada. Com base nesta informação, desenvolve-se a expressão da atenuação suplementar com os cruzamentos, em função do ângulo de rua (definido pelo centro do cruzamento e pelas estações base e móvel), da distância da EB ao cruzamento, da largura das ruas e da altura da antena da EB em relação ao nível dos telhados. Termina-se com a aplicação da expressão deduzida a algumas ruas da Baixa Lisboeta.

No quinto Capítulo sistematizam-se as principais conclusões do trabalho e as perspectivas de trabalho futuro.

II. Modelo de propagação

Neste Capítulo começa por se descrever o ambiente de aplicação do modelo de propagação desenvolvido. Em seguida, apresentam-se as formulações utilizadas para o cálculo da atenuação sobre os edifícios, por difracção múltipla, e no interior das ruas, por difracção e reflexão nas paredes dos edifícios. Neste segundo termo inclui-se ainda a atenuação introduzida pela vegetação. Por último, refere-se a forma como são combinados os vários raios que alcançam o móvel.

II.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como foi dito na Introdução, pretende-se que o modelo seja aplicável ao caso em que a antena da EB está instalada ao nível dos telhados. Nesta situação, os resultados obtidos em vários testes, [KCW93], [XBM94], mostram que não se pode seguir nenhuma das simplificações usadas em ambientes macrocelulares ou microcelulares: por um lado, a EB não está suficientemente acima dos telhados e distante da EM para se poderem desprezar os raios que se propagam no interior das ruas e considerar apenas os raios que se difractam no topo dos edifícios, entre a EB e a EM; por outro lado, a altura da EB não é suficientemente baixa para que seja válido desprezar a propagação sobre os edifícios. Este caso acaba por ser o mais difícil de simular dada a diversidade de fenómenos físicos envolvidos.

Para determinar a potência recebida pela EM, tem-se em conta o multipercurso. Assim, para uma dada posição do móvel estudam-se todos os raios com possibilidade de aí chegar após difracção múltipla sobre os edifícios e/ou reflexão e difracção no interior da rua, isto é, reflexão e difracção nas paredes e arestas verticais dos edifícios. Na Fig. 2.1 apresenta-se um cenário de propagação urbano, onde se indicam alguns dos possíveis raios. Os raios conduzidos por ruas paralelas àquela em que a EM se encontra, rua B por exemplo, são desprezados dado que a sua contribuição só é significativa em ambientes microcelulares (onde se considera apenas a propagação no interior das ruas, sendo a distância entre a EB e a EM pequena e estando a antena da EB abaixo do nível dos telhados). Sendo assim, no modelo desenvolvido consideram-se os raios conduzidos na rua do móvel, rua A, e os raios conduzidos pelas ruas transversais a esta, ruas C e D. A contabilização destes raios permite estudar a influência dos cruzamentos no sinal recebido, à medida que o móvel se desloca na rua.

A atenuação de propagação associada a cada um dos raios é composta por três termos distintos: um primeiro termo, L_{msd}, que tem em conta a difracção múltipla sobre os edifícios, um segundo termo, L_{rts}, que contabiliza as difracções e/ou reflexões no interior das ruas e um terceiro termo, L_0, que diz respeito à atenuação em espaço livre desde a EB até ao topo do último edifício, TUE:

$$L_p = L_{msd} + L_{rts} + L_0 \quad [\mathrm{dB}] \tag{2.1}$$

com:

$$L_0\,[\mathrm{dB}] = 32.5 + 20\log f\,[\mathrm{MHz}] + 20\log d\,[\mathrm{km}] \tag{2.2}$$

em que f é a frequência de trabalho e d o comprimento do percurso EB-TUE.

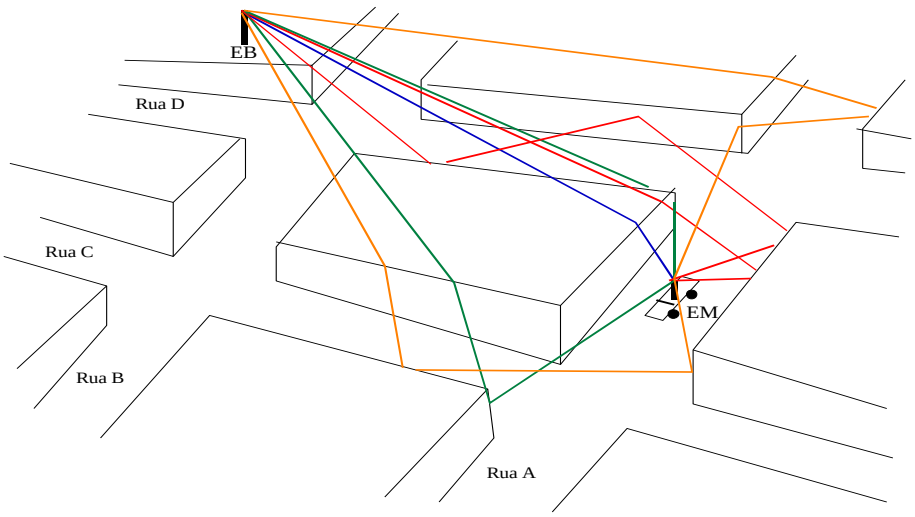


Fig. 2.1 - Cenário de propagação urbano.

Como se verá adiante, a formulação utilizada em L_{msd} resultou da junção de dois modelos existentes, tendo-se obtido um novo modelo que permite contabilizar obstáculos de diferentes alturas e espaçamentos. Para o cálculo da atenuação L_{rts}, desenvolveu-se uma ferramenta de traçado de raios, com base na teoria das imagens. O desenvolvimento do modelo esteve sempre associado à necessidade de se obter uma formulação com tempos de cálculo aceitáveis, de modo a ser aplicável na prática.

Nas secções seguintes descreve-se o modelo com maior detalhe, referindo as opções tomadas nas várias fases do seu desenvolvimento.

II.2. ATENUAÇÃO SOBRE OS EDIFÍCIOS

Nesta Secção descrevem-se os dois modelos de propagação utilizados no cálculo da atenuação sobre os edifícios: o modelo de Xia and Bertoni [XiB92] e o modelo de Vogler [Vog82]. Na Secção III.3 será apresentado um método para conjugar os dois modelos, que assegura que cada um é aplicado nas condições de propagação mais favoráveis.

Nos dois modelos descritos, e por consequência no modelo final, não se contabiliza directamente a atenuação introduzida pelo terreno; para o cálculo da atenuação L_{msd} só se considera a obstrução pelos edifícios. Contudo, a altura utilizada nos cálculos não corresponde apenas à altura dos edifícios, mas sim à sua soma com a cota no terreno. Na Fig. 2.2 apresenta- -se o exemplo de um perfil, em que h_i' é a altura do edifício i e h_i é a altura que intervém nos cálculos.

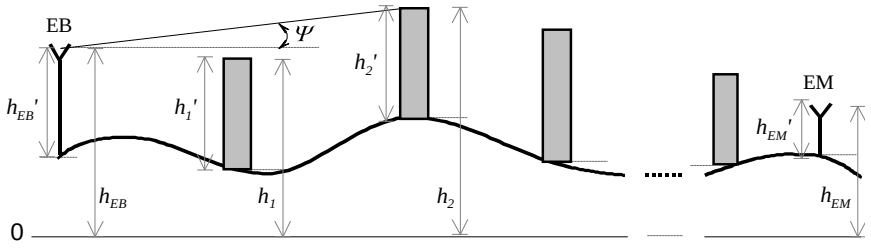


Fig. 2.2 - Exemplo de um perfil entre a EB e o TUE.

II.2.1 MODELO DE XIA AND BERTONI

Na sequência dos resultados apresentados por Walfish and Bertoni [WaB88], Xia and Bertoni desenvolveram um novo modelo de propagação, com o qual se pretendeu ultrapassar algumas das limitações do primeiro, nomeadamente, o tempo de cálculo e a restrição a ângulos de incidência positivos.

Para o cálculo da atenuação de propagação por difracção múltipla sobre os edifícios, desde a EB até ao TUE, Xia and Bertoni utilizaram o ambiente padrão definido por Walfish and Bertoni, em que os edifícios se encontram dispostos segundo filas paralelas e equiespaçadas, de igual altura, sobre terreno plano. As filas de edifícios são aproximadas por

semi-planos infinitos, o que permite tratar o problema da propagação como um processo de múltiplas difracções sobre lâminas (*knife-edges*), Fig. 2.3.

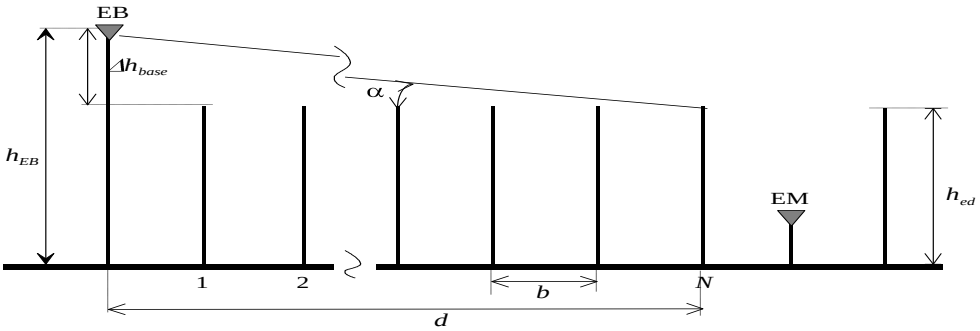


Fig. 2.3 - Percurso EB-TUE, onde os edifícios foram substituídos por lâminas.

Para ângulos de incidência pequenos este problema de difracção múltipla é complicado pelo facto de a aresta de uma lâmina se encontrar na região de transição da aresta anterior. Como resultado, a Teoria Geométrica da Difracção (GTD) não pode ser utilizada e a Teoria Uniforme de Difracção (UTD) torna-se demasiado complexa para implementar. Recorre-se, então, à aproximação da Física Óptica. Xia and Bertoni resolveram este problema por intermédio da formulação de Helmholtz-Kirchhoff, obtendo uma solução em que se faz uso das integrais múltiplos de Kirchhoff-Huygens, para cada lâmina. Exprimindo esses integrais numa série em que intervêm as funções de Boersma [Boe78], Xia and Bertoni conseguiram ultrapassar as limitações do modelo de Walfish and Bertoni. Desenvolveram assim uma formulação mais geral, válida para as situações de EB acima e abaixo do topo dos telhados, embora a separação entre a EB e o obstáculo mais próximo esteja restringida a *b* (distância entre obstáculos).

A atenuação suplementar, *Q*, resultante da difracção sobre os (*N*-1) edifícios, é dada na formulação de Xia and Bertoni por:

$$Q = \sqrt{N}\left|\sum_{q=0}^{\infty}\frac{1}{q!}\left(g_c\sqrt{j\pi}\right)^q I_{N-1,q}\right| \tag{2.3}$$

em que g_c é um parâmetro adimensional que dá conta da dependência com a frequência e com a geometria do percurso (ver Fig. 2.3 para definição dos parâmetros geométricos)

$$g_c = \frac{1}{\sqrt{\lambda b}}\Delta h_{base} \tag{2.4}$$

e $I_{N-1,q}$ são as funções de Boersma, que podem ser calculadas por recorrência através das seguintes expressões:

$$I_{N,0} = \frac{1}{(N+1)^{1/2}} \tag{2.5}$$

$$I_{N,q} = \frac{N(q-1)}{2(N+1)} I_{N,q-2} + \frac{\pi^{-1/2}}{2(N+1)} \sum_{m=0}^{N-1} \frac{I_{m,q-1}}{(N-m)^{1/2}} \quad ,q \geq 1 \tag{2.6}$$

onde

$$(q-1) I_{n,q-2} = 0 \quad ,q=1$$

$$I_{0,q} = \begin{cases} 1 & ,q=0 \\ 0 & ,q \neq 0 \end{cases} \tag{2.7}$$

Apesar de a formulação anterior ser apresentada como sendo geral, verificou-se que para determinados valores de Δh_{base} a expressão (2.3) não converge, estando a gama de convergência dependente da frequência. Através de simulações, ficou provado que para $|\Delta h_{base}|>11.25$ m em f=900 MHz e $|\Delta h_{base}|>8$ m em f=1800 MHz a convergência não é assegurada (limitou-se o estudo a estas frequências por serem as únicas com interesse para o presente trabalho), Fig. 2.4.

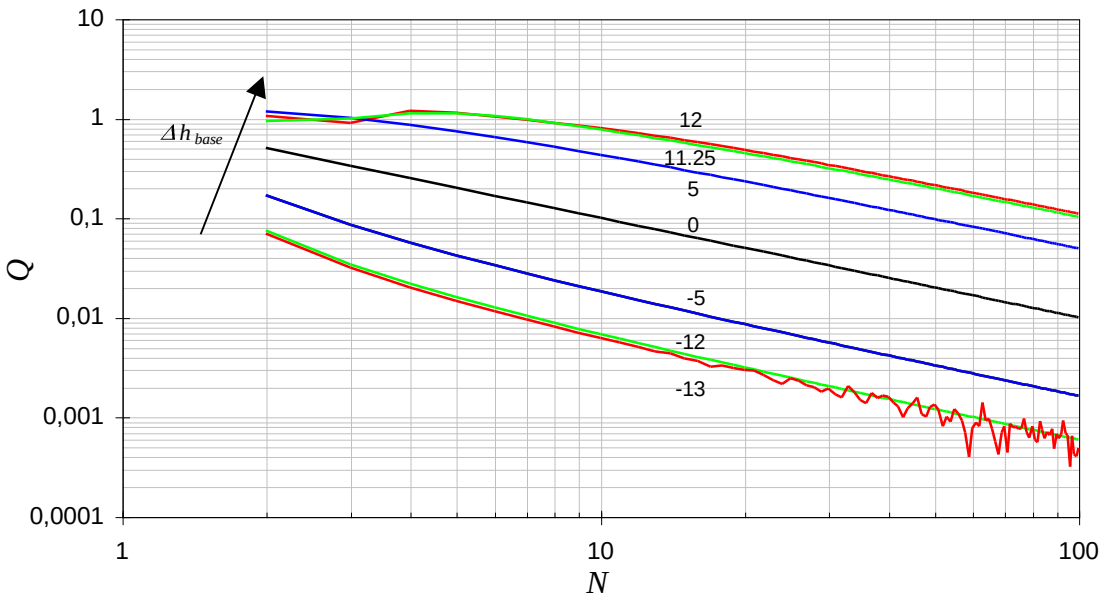


Fig. 2.4 - Convergência de Q (f=900 MHz e b=50 m).

Para ultrapassar esta limitação, no modelo desenvolvido restringe-se a utilização da formulação de Xia and Bertoni a $|\Delta h_{base}|\leq 8$ m e utilizam-se duas expressões aproximadas para as situações extremas. Assim, para $\Delta h_{base}>8$ m recorre-se ao polinómio presente em Maciel, Bertoni and Xia [MBX93], obtido a partir da aproximação do "Campo de Estabelecimento":

$$Q = 3.502 g_p - 3.327 g_p^2 + 0.962 g_p^3 \quad , \; 0.01 < g_p < 1 \tag{2.8}$$

em que g_p é um parâmetro adimensional:

$$g_p = \alpha \sqrt{b/\lambda} \tag{2.9}$$

A utilização deste polinómio em lugar do obtido por Walfish and Bertoni (expressão (14) em [WaB88]) é vantajosa pois permite estender esta teoria a valores inferiores da distância d. Por sua vez, para valores de $\Delta h_{base}<-8$ m faz-se uso da expressão apresentada por Xia em [Xia96]:

$$Q = \left[\frac{b}{2\pi (d - b)} \right]^2 \frac{\lambda}{\sqrt{\Delta h_{base}{}^2 + b^2}} \left(\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{2\pi + \Phi} \right)^2 \tag{2.10}$$

onde se combina o cálculo da difracção no primeiro edifício, segundo o ângulo de incidência Φ, pela GTD com a formulação de Xia and Bertoni aplicada aos restantes edifícios.

Resumindo, a atenuação por difracção múltipla entre a EB e o TUE, normalizada pela atenuação em espaço livre, é dada pela expressão:

$$L_{msd_{XB}}\left|_{IB}\right. = -20 \log (Q) \tag{2.11}$$

em que Q é dada por (2.10) para $\Delta h_{base}<-8$ m, (2.3) para $|\Delta h_{base}|\leq 8$ m e (2.8) para $\Delta h_{base}>8$ m. Os parâmetros de entrada do modelo são a frequência de trabalho, f, o espaçamento médio entre edifícios, b, a altura média dos edifício, h_{ed}, e o número de obstáculos, N.

Ao valor resultante de (2.11) adiciona-se a atenuação por difracção no TUE. Em vários modelos que contabilizam esta difracção, [IYT84], [MBX93], considera-se que a incidência das ondas no TUE é rasante, $\alpha \cong 0$, o que é válido para distâncias d grandes e em que os edifícios têm todos a mesma altura. Dado que na situação em estudo estas condições não são necessariamente verificadas, torna-se necessário entrar em conta com o ângulo de incidência no TUE, α. Este ângulo é determinado pelo edifício mais alto visto do TUE, Fig. 2.5. Caso o

ângulo α seja negativo então assume-se que a incidência é rasante (o valor negativo só é possível porque se considera que o topo do edifício é uma lâmina). Embora na Fig. 2.5 se tenha assumido que o ângulo de difracção, γ, é o ângulo na direcção da EM, ele também pode ser definido por um ponto de reflexão ou difracção no interior da rua (caso em que o sinal é conduzido no interior da rua antes de alcançar o móvel).

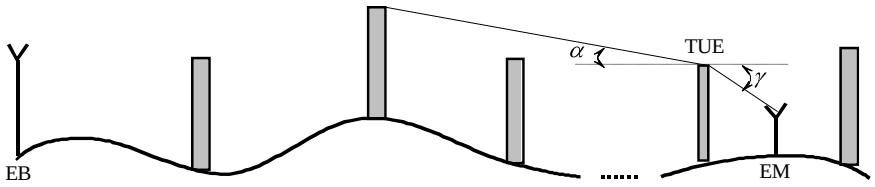


Fig. 2.5 - Difracção no topo do último edifício (TUE).

Para o cálculo da difracção no TUE utiliza-se a Teoria Uniforme da Difracção (UTD). A difracção por uma lâmina (*knife-edge)*, utilizada por Ikegami *et al*. [IYT84], embora tenha a vantagem de ser simples, em alguns casos conduz a resultados menos bons dado desprezar a forma e as características dieléctricas dos obstáculos. A sua utilização para outros obstáculos que não a lâmina e o obstáculo arredondado nunca foi muito divulgada por se tornar demasiado complexa. Por sua vez, a Teoria Geométrica da Difracção (GTD), utilizada em [MBX93], tem problemas caso a fonte e/ou o ponto de observação se situem numa das regiões de transição do vértice. Estas limitações são ultrapassadas pela UTD. Na Secção II.3.2 descreve-se esta teoria.

II.2.2 MODELO DE VOGLER

No seguimento dos trabalhos de Forutsu [Fur63], Vogler [Vog82] desenvolveu uma expressão para a atenuação causada pela difracção sobre múltiplos obstáculos. A equação, na forma de um integral múltiplo, foi posteriormente expandida numa série em que intervêm os integrais múltiplos da função de erro, I(p,β), [AbS64]. Esta passagem constitui um passo importante para a implementação computacional, uma vez que se consegue garantir maior

exactidão no cálculo de uma série do que na integração numérica até infinito de uma função oscilante.

O modelo de Vogler permite estimar a atenuação por difracção sobre obstáculos de altura e espaçamento não uniforme, ao contrário do que se passa no modelo de Xia and Bertoni. Dado que a posição do ponto de observação, bem como da EB, é arbitrária, pode-se determinar directamente o campo no interior da rua. Sendo assim, não é necessário calcular a difracção no TUE separadamente, recorrendo à UTD, como se fez em II.2.1. Na Fig. 2.6 representa-se a geometria associada ao problema da difracção múltipla, onde, uma vez mais, os edifícios foram aproximados por lâminas.

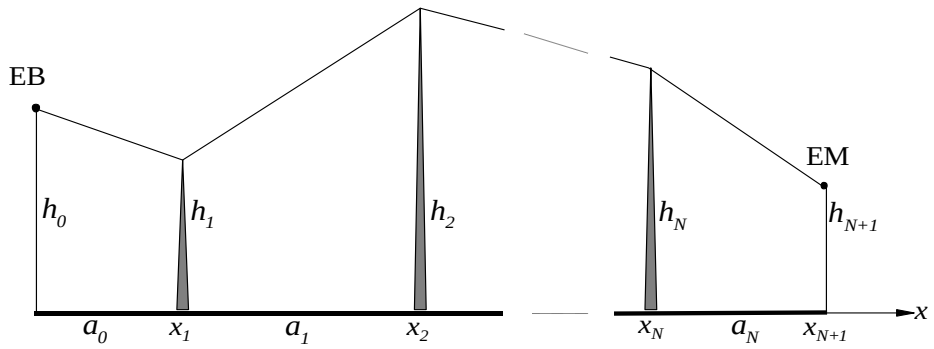


Fig. 2.6 - Geometria de aplicação do modelo de Vogler.

A função de atenuação para *N* lâminas, normalizada pelo campo em espaço livre, é dada pela seguinte expressão:

$$Q = \left(\frac{1}{2}\right)^N C_N e^{\sigma_N} \sum_{p=0}^{\infty} 2^p \sum_{p_2=0}^{p_1} \cdots \sum_{p_{N-1}=0}^{p_{N-2}} \prod_{n=1}^{N} \frac{(p_{n-1} - p_{n+1})!\,\alpha_n^{p_n - p_{n+1}}\, I(p_{n-1} - p_{n+1}, \beta_n)}{(p_n - p_{n+1})!} \tag{2.12}$$

com

$$\begin{aligned} p_0 &\equiv p_1 \equiv p \\ p_N &\equiv p_{N+1} \equiv 0 \\ \alpha_N &\equiv 1 \end{aligned} \tag{2.13}$$

e onde os parâmetros geométricos são dados por:

$$\alpha_n = \left[\frac{a_{n-1} a_{n+1}}{(a_{n-1} + a_n)(a_n + a_{n+1})} \right]^{1/2} \quad , n = 1, 2, ..., N-1 \tag{2.14}$$

$$\beta_n = \left[\frac{jk(a_{n-1} + a_n)}{2 a_{n-1} a_n} \right]^{1/2} \left(h_n - \frac{a_{n-1} h_{n+1} + a_n h_{n-1}}{a_{n-1} + a_n} \right) \quad , n = 1, 2, ..., N \text{ e } k = 2\pi/\lambda \tag{2.15}$$

$$C_N = \left[\frac{a_1 a_2 \ldots a_{N-1} x_{N+1}}{(a_0 + a_1)(a_1 + a_2) \ldots (a_{N-1} + a_N)} \right]^{1/2} \tag{2.16}$$

$$\sigma_N = \sum_{n=1}^{N} \beta_n^{\,2} \tag{2.17}$$

Os integrais múltiplos da função de erro, I(p,β), são definidos pela seguinte expressão:

$$\mathrm{I}(p, \beta) = \frac{2}{\pi^{1/2} p!} \int_{\beta}^{\infty} (x - \beta) \mathrm{e}^{-x^2} \, \mathrm{d}x \tag{2.16}$$

Para p>0, I(p,β) pode ser calculado por recorrência [AbS64]:

$$\mathrm{I}(p, \beta) = -\frac{\beta}{p} \mathrm{I}(p-1, \beta) + \frac{1}{2p} \mathrm{I}(p-2, \beta) \tag{2.17}$$

e como I(-1,β) é conhecido,

$$\mathrm{I}(-1, \beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathrm{e}^{-\beta^2} \tag{2.18}$$

para se obter todos os outros valores, basta determinar I(0,β). Para isso tem-se em conta que este integral coincide com a função complementar de erro, erfc(β) [AbS64]. Assim, uma vez que

$$\mathrm{I}(0, \beta) = \mathrm{erfc}(\beta) = 1 - \mathrm{erf}(\beta) \tag{2.19}$$

e como

$$\mathrm{erf}(\beta) = (1 + j)[\mathrm{C}(x) + j\mathrm{S}(x)] \quad , \beta = \frac{\sqrt{\pi}}{2}(1 + j)x \tag{2.20}$$

verifica-se que se pode obter I(0,β) como função dos integrais de Fresnel, C(x) e S(x). Tal é possível porque β é um complexo com parte real igual à parte imaginária, o que é condição necessária para aplicar (2.20). Obtém-se então:

$$I(0,\beta) = 1 - (1+j)\left[C(x) - jS(x)\right] \tag{2.21}$$

Uma questão que se levanta quando se pretende avaliar uma série é a sua convergência. No caso da série (2.12), verificou-se que para valores de β_n inferiores a -2 a série não converge, Fig. 2.7, o que já havia sido notado por Whitteker [Whi93].

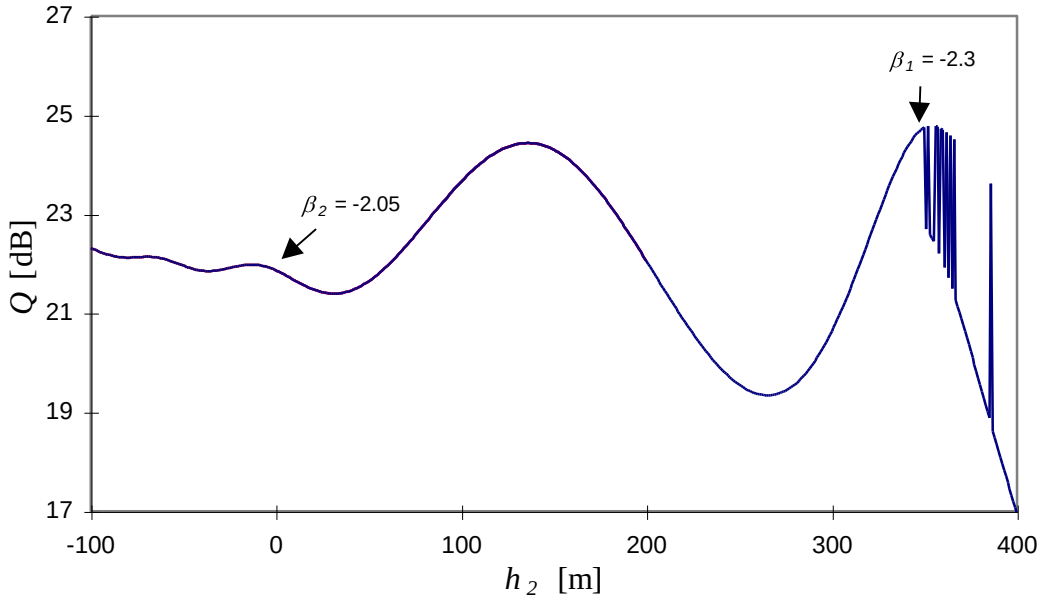


Fig. 2.7 - Convergência da série (2.12); exemplo com 3 obstáculos.

Atendendo à expressão de β_n, (2.15), constata-se que o seu valor é negativo quando o edifício n fica abaixo da linha que une os topos dos edifícios (n-1) e (n+1), Fig. 2.8. Isto significa que a convergência do modelo de Vogler é posta em causa pelos edifícios que contribuem menos para a atenuação do sinal. Face a isto, a solução seguida para ultrapassar o problema foi contabilizar apenas os edifícios com β_n superior a -1.5.

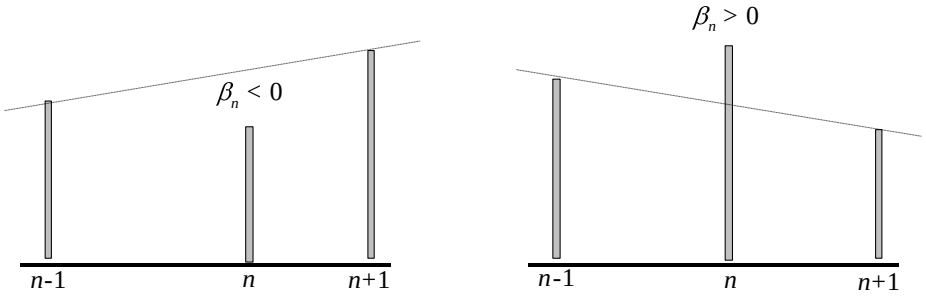


Fig. 2.8 - Interpretação do parâmetro geométrico β_n.

Outra forma de garantir a convergência é aplicar o princípio de Babinet aos edifícios com β_n negativo [Whi93]. O princípio de Babinet consiste, basicamente, em substituir um problema de difracção por 2 problemas mais simples de resolver, Fig. 2.9. Contudo, como se verá mais adiante, o tempo de cálculo do modelo de Vogler cresce consideravelmente com o número de obstáculos, o que limita bastante a sua aplicação prática. Sendo assim, ao substituir um cálculo da atenuação por dois está-se a agravar ainda mais esta situação, razão pela qual não se implementou esta solução.

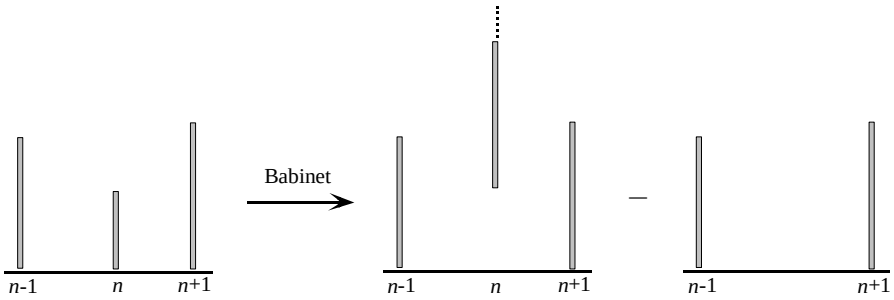


Fig. 2.9 - Aplicação do princípio de Babinet.

II.3. ATENUAÇÃO NO INTERIOR DA RUA

Como foi dito no início, a atenuação suplementar de um raio é composta por dois termos distintos: um primeiro que dá conta da propagação sobre os edifícios, e que foi descrito na secção anterior, e um segundo que contabiliza a atenuação ao longo das ruas, desde que o sinal é difractado no topo do último edifício até chegar ao móvel. Nesta Secção descreve-se este segundo termo.

Para o cálculo da atenuação no interior da rua desenvolveu-se uma ferramenta de traçado de raios. Com base no método das imagens, determinam-se os pontos de reflexão e difracção associados a cada um dos raios que alcançam a EM. Os resultados de alguns estudos, [IkY80], [CTM89], sugerem que os principais fenómenos envolvidos são a difracção pelas arestas e a reflexão pelas paredes dos edifícios, sendo desprezáveis a dispersão pelas irregularidades existentes nas paredes, bem como a transmissão através dessas paredes (raios refractados). A difracção é contabilizada através da Teoria Uniforme da Difracção (UTD) e a reflexão através das fórmulas de Fresnel, admitindo que as paredes são planas. Na situação de linha-de-vista, LOS (*line of sight*), entre a EB e a EM, no interior de uma rua, consideram-se apenas dois raios no cálculo da atenuação: o raio directo e o raio reflectido no chão. Determina-se também a atenuação introduzida pela vegetação existente nas ruas, o que é uma característica inovadora deste modelo.

Na Secção II.3.1 descreve-se o método de traçado de raios utilizado e nas Secções II.3.2 - II.3.5 apresentam-se as formulações utilizadas para o cálculo das várias parcelas da atenuação no interior da rua.

II.3.1 TRAÇADO DE RAIOS

O traçado de raios é um método que permite calcular a progressão de uma onda ao longo de um meio limitado por obstáculos. Quando o comprimento de onda é pequeno, comparado com as dimensões dos obstáculos, é válido considerar que as ondas electromagnéticas se propagam em linha recta, como um raio, excepto em pontos onde são reflectidas, refractadas ou difractadas. Este método é aproximado pois despreza a dispersão da energia, só possível de contabilizar através da resolução das equações de Maxwell.

MÉTODOS DE TRAÇADO DE RAIOS

Existem, basicamente, 2 métodos para o traçado de raios [Hus94]: o método das imagens e o método de lançamento de raios (*ray launching*). O método das imagens [McH91] consiste em determinar, sequencialmente, as imagens virtuais da EB em relação a todas as paredes onde o raio se pode reflectir. Esta sequência é calculada até uma certa ordem,

correspondente ao número máximo de reflexões. Partindo da localização da EM, traça-se uma linha recta na direcção da última imagem virtual, até que o raio intercepte o plano reflector considerado. Em seguida, toma-se esta intercepção como ponto de partida para um novo troço do raio e repete-se o processo até se alcançar a imagem real da EB. A Fig. 2.10 ilustra este método para o caso de uma única reflexão. Do ponto de vista matemático, este método permite determinar rigorosamente os raios entre a EB e a EM. Contudo, a sua complexidade computacional, directamente proporcional ao tempo de cálculo, cresce exponencialmente com o número de obstáculos e com o número máximo de reflexões considerado.

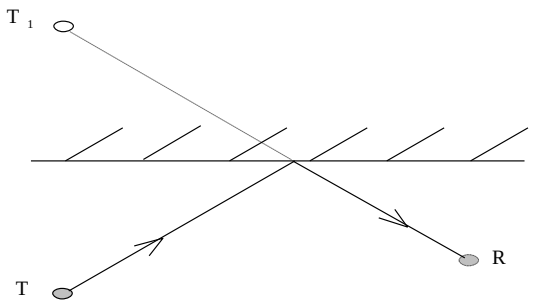


Fig. 2.10 - Princípio da imagem virtual.

O método de lançamento de raios [SeR92], por sua vez, consiste em lançar da EB um determinado número de raios, cuja direcção se distribui uniformemente em torno da EB. Para cada raio determina-se o ponto de intercepção com um obstáculo, onde tem origem um raio reflectido. Em seguida, determina-se o novo ponto de intercepção deste raio reflectido e repete-se o processo. Um raio termina quando a sua amplitude desce além de um certo limiar ou quando é atingido o número máximo de intercepções. Se durante este processo o raio interceptar uma esfera centrada no receptor, Fig.2.11, ele é considerado no cálculo da potência recebida, caso contrário não o é. O raio da esfera de recepção depende do comprimento do percurso, para uma dada precisão. Este método tem uma resolução espacial limitada dado que o número de raios lançados é discreto. Quando a distância EB-EM aumenta a resolução espacial piora, o que pode conduzir a um cálculo incorrecto do sinal recebido. Uma solução é aumentar o número de raios, o que, no entanto, vai aumentar o tempo de cálculo. O facto de se estar a utilizar uma esfera de recepção também contribui para o carácter aproximado deste método. Apesar de aproximado, este método é atractivo porque o tempo de cálculo não aumenta excessivamente com o número de reflexões.

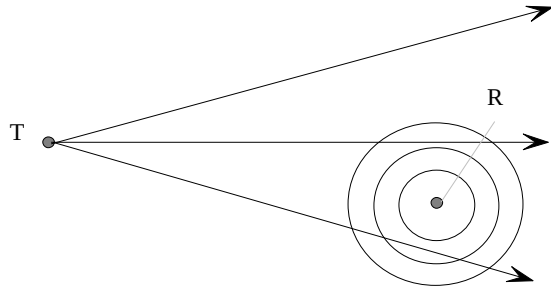


Fig. 2.11 - Detecção de raios no receptor.

Para a situação em estudo, em que se contabilizam apenas os raios na rua em que o móvel se encontra e nas ruas transversais, o número de obstáculos é pequeno, pelo que o método das imagens é o mais apropriado.

BASE DE DADOS

Outra questão importante para o traçado de raios, além da escolha do método, é a obtenção de informação sobre os obstáculos. Para calcular os factores de reflexão, por exemplo, é necessário conhecer a orientação das paredes dos edifícios, o que não se consegue através de uma base de dados em formato cartesiano. Em geral recorre-se a uma base de dados vectorial para guardar a informação sobre os edifícios [RWK95]. Aqui, a cada edifício faz-se corresponder um bloco de informação com as coordenadas do polígono que define esse edifício, a sua altura e as características dieléctricas das paredes. Esta base de dados tem a vantagem de ser facilmente actualizada, pois cada edifício está perfeitamente identificado. No entanto, a sua obtenção torna-se difícil uma vez que é necessário conhecer a localização de todos os edifícios nas ruas em estudo. No modelo desenvolvido optou-se por organizar a informação de uma forma mais simples, embora menos completa. Começa-se por considerar que a altura dos edifícios é sempre suficiente para interceptar o raio, o que permite limitar o traçado de raios ao plano horizontal. Em segundo lugar, assume-se que os edifícios têm todos as mesmas características dieléctricas. Assim, e uma vez que se desprezam os raios refractados, a única informação que é necessário reter é a localização das paredes que delimitam as ruas em estudo. Para guardar esta informação construiu-se uma base de dados com a rede de ruas. Esta tem a vantagem de ser fácil de construir e de rápido acesso; para cada

rua determinam-se facilmente as ruas transversais e as paredes que as delimitam. No Anexo A descreve-se o formato desta base de dados e a sua construção.

Ao limitar-se o traçado de raios ao plano horizontal introduz-se um erro, tanto no cálculo dos ângulos (de difracção e reflexão) como no cálculo das distâncias. Este erro, que em geral é pequeno, justifica-se pela simplificação que é introduzida no modelo.

Em qualquer geometria urbana o número de raios que alcançam a EM é elevado. Para tornar o modelo rápido torna-se necessário pre-seleccionar os raios que se espera terem maior contribuição para o sinal recebido. Por esta razão, desprezam-se todos os raios com mais do que uma difracção [XBM94], [DFH96], sendo o número máximo de reflexões, quer na rua em que o móvel se encontra quer nas ruas transversais, imposto pelo utilizador. Os raios com mais de uma difracção assumem maior importância quando se considera apenas propagação no interior das ruas, desprezando-se a propagação sobre os edifícios. Assim, desde que é difractado no topo de um edifício até chegar à EM, o raio pode sofrer várias reflexões numa rua secundária, seguido de difracção numa aresta vertical do cruzamento e, por fim, várias reflexões na rua do móvel (ver Fig. 2.1).

II.3.2 CÁLCULO DA DIFRACÇÃO

Na região em torno de uma aresta, Fig. 2.12, o campo eléctrico total pode ser representado pela seguinte expressão [KST85]:

$$E = E^i u^i + E^r u^r + E^d \tag{2.22}$$

onde E^i é o campo eléctrico na ausência de aresta, E^r é o campo eléctrico reflectido pela superfície iluminada, E^d é o campo eléctrico difractado e u^i e u^r são funções escalão iguais a 1 nas zonas iluminadas pelo campo incidente e pelo campo reflectido, respectivamente, e iguais a zero nas suas zonas de sombra.

Na Fig. 2.12 identificam-se duas fronteiras: a fronteira do campo incidente - fronteira de sombra - e a fronteira do campo reflectido - fronteira de reflexão. Estas fronteiras dividem o

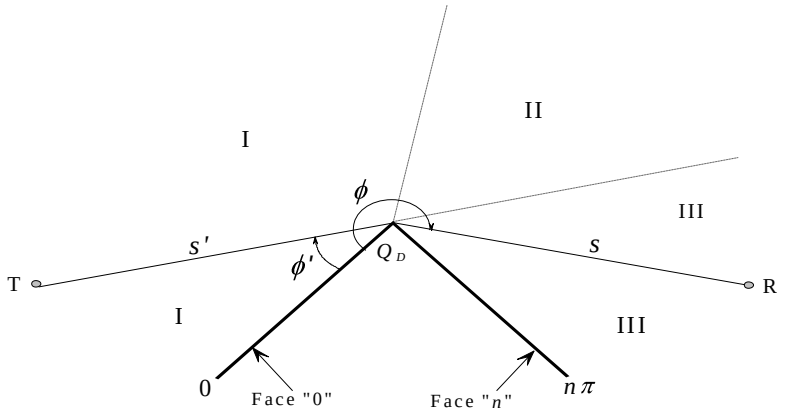


Fig. 2.12 - Geometria para a difracção por uma aresta.

espaço em três regiões distintas: a região I, que contém raios directos, reflectidos e difractados; a região II, que contém raios directos e difractados mas não raios reflectidos; e a região III, onde apenas existem raios difractados. As funções u^i e u^r presentes em (2.22) traduzem esta situação. As regiões em torno das fronteiras de sombra e de reflexão são designadas por regiões de transição. Nestas regiões o campo incidente ou o campo reflectido é descontínuo. Como o campo total deve ser contínuo, resulta que nas regiões de transição o campo difractado é descontínuo e a sua amplitude é comparável ao campo incidente ou ao campo reflectido. Por outras palavras, o campo difractado assegura uma transição correcta entre as regiões iluminadas e as regiões de sombra da aresta.

No ponto de observação, R, o campo eléctrico difractado é dado pela seguinte expressão [StT81]:

$$E^d(s) = E^i(Q_D)\, D(\phi, \phi')\, A(s, s')\, \exp(-jks) \tag{2.23}$$

onde E^i é o campo incidente em Q_D, $D(\phi, \phi')$ é o coeficiente de difracção e $A(s, s')$ é o factor de divergência, que descreve a variação da amplitude do campo ao longo do raio difractado:

$$A(s, s') = \begin{cases} \dfrac{1}{\sqrt{s}} & \text{, para incidência de ondas planas, cilíndricas ou cónicas} \\[2ex] \sqrt{\dfrac{s'}{s(s'+s)}} & \text{, para incidência de ondas esféricas} \end{cases} \tag{2.24}$$

No modelo desenvolvido utilizou-se o factor para incidência de ondas cilíndricas; a onda esférica emitida pela EB ao difractar-se no topo dos telhados dá origem a uma onda cilíndrica, que se propaga no interior das ruas após difracção no TUE.

Nos últimos 60 anos surgiram na literatura vários métodos para o cálculo do coeficiente de difracção, *D*. Um dos mais conhecidos é o método de Fresnel, para difracção por uma lâmina. Este método foi inicialmente proposto por Schelling *et al*. [SBH33] e é ainda hoje muito utilizado. No entanto, ele ignora alguns parâmetros importantes, como sejam a polarização, as características dieléctricas da aresta e a sua forma. Outra técnica para estimar a difracção, que não sofre destas limitações, é a Teoria Geométrica da Difracção (GTD). Esta técnica foi proposta inicialmente por Keller [Kel62] e, posteriormente, melhorada por Kouyoumjian and Pathak [KoP74], que resolveram as singularidades nas regiões de transição, adjacentes às fronteiras de incidência e de reflexão. A formulação de Kouyoumjian and Pathak, designada por Teoria Uniforme da Difracção (UTD), recupera os resultados de Keller fora das regiões de transição e fornece uma boa aproximação do campo difractado no interior destas. Contudo, apesar de eliminar as singularidades, esta formulação não resolve o problema das cáusticas, o que significa que o coeficiente de difracção nas regiões de transição, apesar de finito, não está limitado a 1, curva 1 da Fig. 2.13. Esta situação conduz a que por vezes se obtenham ganhos em vez de atenuações no cálculo da difracção. Embora estes ganhos sejam pequenos, decidiu-se eliminá-los. Assim, na implementação da UTD o valor do coeficiente de difracção está limitado a 1, curva 2 da Fig. 2.13.

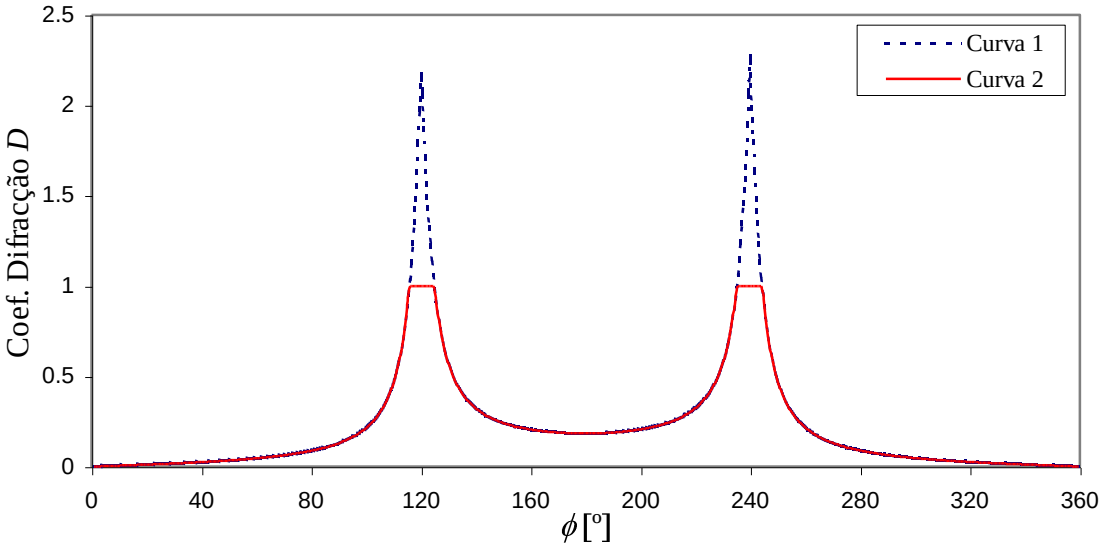


Fig. 2.13 - Coeficiente de difracção (UTD) para incidência numa lâmina segundo ϕ'=60º, com e sem limitação.

Para o cálculo do coeficiente de difracção, *D*, utilizou-se a formulação de Luebbers [Lue84], que é idêntica à de Kouyoumjian and Pathak com a diferença de não estar limitada a arestas de material condutor perfeito. Assim, para uma aresta de ângulo externo $n\pi$ ($n \in (0,2)$), considerando os casos de polarização paralela, //, e perpendicular, ⊥, tem-se:

$$\begin{aligned} D^{||\perp} = \frac{-\mathrm{e}^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}} \Bigg\{ & \cot\left(\frac{\pi+(\phi-\phi')}{2n}\right) \mathrm{F}\left(kLa^{+}(\phi-\phi')\right) + \\ & + \cot\left(\frac{\pi-(\phi-\phi')}{2n}\right) \mathrm{F}\left(kLa^{-}(\phi-\phi')\right) + \\ & + R_0^{\perp||} \cot\left(\frac{\pi-(\phi+\phi')}{2n}\right) \mathrm{F}\left(kLa^{-}(\phi+\phi')\right) + \\ & + R_n^{\perp||} \cot\left(\frac{\pi+(\phi+\phi')}{2n}\right) \mathrm{F}\left(kLa^{+}(\phi+\phi')\right) \Bigg\} \end{aligned} \tag{2.25}$$

onde ϕ' e ϕ são os ângulos de incidência e difracção (Fig.2.12), F(x) é um integral de Fresnel,

$$\mathrm{F}(x) = 2j\sqrt{x}\,\mathrm{e}^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} \mathrm{e}^{-j\tau^2}\,\mathrm{d}\tau \tag{2.26}$$

e

$$L = \frac{ss'}{s+s'} \tag{2.27}$$

$$a^{\pm}(\Delta\phi) = 2\cos^2\left(\frac{2n\pi N^{\pm} - \Delta\phi}{2}\right) \qquad , \Delta\phi = \phi \pm \phi' \tag{2.28}$$

em que $N^{\pm}$ são os inteiros que melhor satisfazem as equações

$$2\pi n N^{\pm} - \Delta\phi = \pm\pi \tag{2.29}$$

$R_0^{\perp||}$ e $R_n^{\perp||}$ são os coeficientes de reflexão para a face 0 (ângulo de incidência ϕ') e para a face *n* (ângulo de reflexão $n\pi$-ϕ), considerando polarização perpendicular ou paralela. O cálculo destes coeficientes será descrito na Secção II.3.3. Se $R_0^{\perp||}$ e $R_n^{\perp||}$ forem substituídos por (-1) e (+1), respectivamente, obtém-se a formulação para condutores perfeitos de Kouyoumjian and Pathak.

Nas fronteiras de sombra e de reflexão uma das funções co-tangente torna-se singular. Contudo, o produto cot(.)F(.) que contém a singularidade mantém-se finito e, para valores de δ pequenos, pode ser aproximado por [KoP74]:

$$\cot\left(\frac{\pi \pm \Delta\phi}{2n}\right) F\left(kL\, a^{\pm}(\Delta\phi)\right) \cong n\sqrt{2\pi kL}\,\mathrm{sgn}(\delta) - 2kl\delta\, \mathrm{e}^{j\pi/4}\, \mathrm{e}^{j\pi/4} \tag{2.30}$$

com δ definido por:

$$\Delta\phi = 2\pi n N^{\pm} \mp (\tau - \delta) \tag{2.31}$$

II.3.3 CÁLCULO DA REFLEXÃO

Para o cálculo da atenuação por reflexão, admite-se que a onda reflectida pela parede de um edifício tem um máximo segundo a direcção especular. Os efeitos dispersivos, devidos essencialmente às varandas e às janelas, são desprezados.

O fenómeno de reflexão especular é o mecanismo pelo qual um raio é reflectido segundo um ângulo igual ao ângulo de incidência, Fig. 2.14.

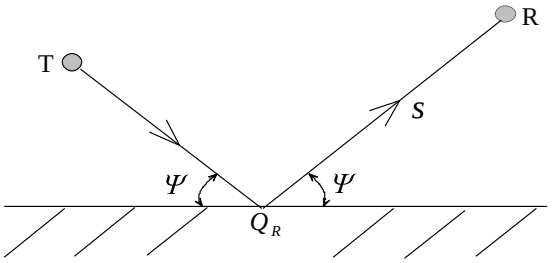


Fig. 2.14 - Reflexão especular.

O campo reflectido, E^r, relaciona-se com o campo incidente, E^i, através da seguinte expressão:

$$E^r(s) = E^i(Q_R) \cdot R \cdot A(s) \cdot \mathrm{e}^{-jks} \tag{2.32}$$

onde R é o coeficiente de reflexão e $A(s)$ é o factor de divergência:

$$A(s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \tag{2.33}$$

Em (2.33) assume-se incidência de ondas cilíndricas pelo motivo já referido em II.3.2.

A expressão mais utilizada para o cálculo da reflexão é o coeficiente de reflexão de Fresnel. Este coeficiente depende da polarização e da frequência do campo incidente, bem como das características electromagnéticas de cada meio. Desprezando a rugosidade da superfície reflectora, o coeficiente de reflexão é dado por [StT81]:

$$R^{\perp} = \frac{\sin\psi - \sqrt{\overline{\varepsilon_r} - \cos^2\psi}}{\sin\psi + \sqrt{\overline{\varepsilon_r} - \cos^2\psi}} \tag{2.34a}$$

$$R^{||} = \frac{\overline{\varepsilon_r}\sin\psi - \sqrt{\overline{\varepsilon_r} - \cos^2\psi}}{\overline{\varepsilon_r}\sin\psi + \sqrt{\overline{\varepsilon_r} - \cos^2\psi}} \tag{2.34b}$$

para polarização perpendicular e paralela, respectivamente, com

$$\overline{\varepsilon_r} = \varepsilon_r - j\frac{\sigma_c}{\omega\,\varepsilon_0} \tag{2.35}$$

onde ε_r é a constante dieléctrica relativa da superfície reflectora, ε_0 a constante dieléctrica do vácuo, σ_c a condutividade e $\omega=2\pi f$.

A aplicação dos coeficientes de reflexão de Fresnel é bastante frequente em programas de traçado de raios para modelar a reflexão pela superfície do chão e a reflexão pelas paredes dos edifícios. Alguns autores [RoL92], [WaR94], consideram coeficientes de reflexão constantes para simplificar os cálculos computacionais, embora a validade desta aproximação não seja, em geral, investigada. No modelo desenvolvido utilizaram-se as expressões (2.34) para o cálculo da reflexão. Estas traduzem melhor a realidade, pois dependem do ângulo de incidência, e a sua implementação computacional é simples (não têm significado em termos de tempo de cálculo).

II.3.4 LINHA DE VISTA ENTRE ESTAÇÃO BASE E MÓVEL

A situação de linha de vista entre as antenas da EB e da EM, no interior de uma rua, ocorre quando o móvel se desloca na rua em que a EB está localizada, ou quando o móvel percorre uma rua concorrente à da EB e se encontra no cruzamento das duas. Considera-se que no interior das ruas não há interrupção dos raios.

Nesta situação, a expressão utilizada para o cálculo da atenuação é a do modelo de 2 raios: o raio directo EB-EM e o raio reflectido no chão. Em ambientes urbanos, onde as ruas são limitadas lateralmente por edifícios, também podem ocorrer reflexões nas fachadas desses edifícios e difracções nas suas esquinas. No entanto, através de medidas realizadas em ruas de algumas cidades, [RAO91], verifica-se que os raios reflectidos e/ou difractados nas paredes apenas contribuem para a variação (desvanecimento) rápida do sinal em torno do valor médio dado pelo modelo de 2 raios. Ou seja, o raio directo e o raio reflectido no chão são suficientes para estimar o valor médio do sinal ao longo de uma rua.

O modelo de 2 raios encontra-se representado na Fig. 2.15, para uma altura h_{EB} da antena da EB e h_{EM} da antena da EM.

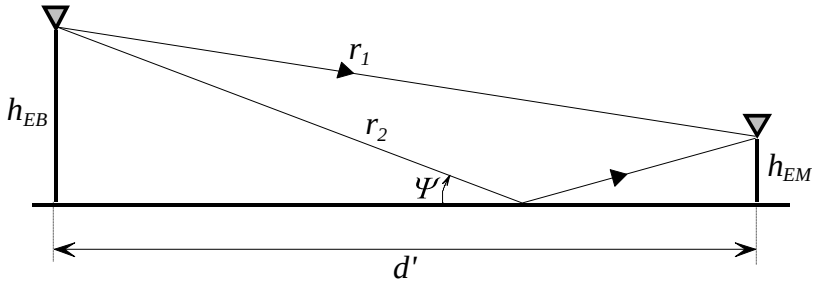


Fig. 2.15 - Representação do modelo de 2 raios.

Somando a contribuição de cada raio, pelo método das imagens, obtém-se a seguinte expressão para a atenuação de propagação:

$$L_p = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left| \frac{1}{r_1}\exp(-jkr_1) + R(\Psi)\frac{1}{r_2}\exp(-jkr_2) \right|^2 \qquad (2.36)$$

onde r_1 e r_2 são os comprimentos dos raios directo e reflectido, respectivamente, e $R(\Psi)$ é o factor de reflexão, dado por (2.34).

Na Fig. 2.16 representa-se a atenuação de propagação em função da distância *d'*, para os casos de polarização vertical e horizontal, bem como para o caso $R(\Psi)=-1$. Para distâncias elevadas (Ψ próximo de 0, incidência rasante), os três casos coincidem pois $R(\Psi)\cong-1$. Para distâncias inferiores o valor do factor de reflexão diminui. Como $|R(\Psi)|$ é maior para polarização horizontal do que para polarização vertical, resulta que as oscilações do sinal para o caso de polarização horizontal são mais acentuadas. Para o estudo do andamento médio do sinal não interessa considerar estas oscilações. Assim, no modelo desenvolvido utilizam-se antes curvas médias, obtidas por aplicação do método da janela deslizante.

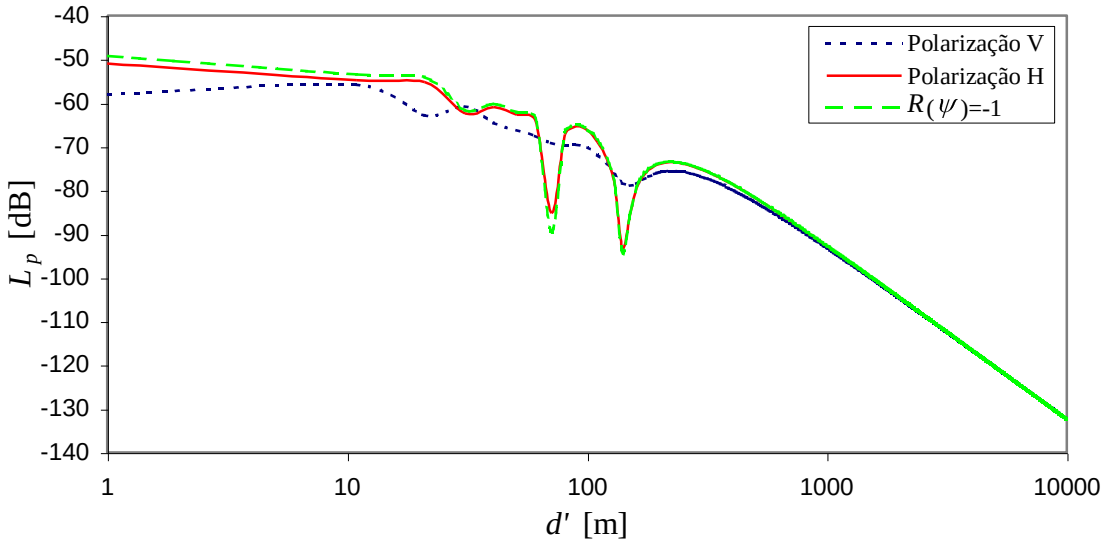


Fig. 2.16 - Atenuação de propagação em função da distância no modelo de 2 raios (f=900 MHz, h_{EB}=15 m, h_{EM}=1.6 m).

Através da Fig. 2.16 verifica-se, também, que a atenuação apresenta dois andamentos distintos, separados por um ponto de quebra (*break point*): antes do ponto de quebra oscila acentuadamente devido à alternância da interferência construtiva e destrutiva dos 2 raios, sendo o seu declive aproximadamente 2; após o ponto de quebra deixa de oscilar e passa a decrescer mais rapidamente com a distância, com um declive próximo de 4. O ponto de quebra pode relacionar-se com a teoria dos elipsóides de Fresnel: quando o 1º elipsóide de Fresnel está desobstruído, a atenuação do sinal com a distância deve-se, essencialmente, ao alargamento da frente de onda; contudo, quando este elipsóide (onde a maior parte da energia está concentrada) passa a estar obstruído, a atenuação ultrapassa o valor da atenuação em espaço livre. Assim, é habitual considerar o ponto de quebra como a distância *d'* para a qual o 1º elipsóide de Fresnel toca o chão.

O ponto de quebra, d_{pq}, é dado pela seguinte expressão [XBM93]:

$$d_{pq} = \frac{1}{\lambda}\sqrt{\left(\Sigma^2 - \Delta^2\right) - 2\left(\Sigma^2 + \Delta^2\right)\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^4} \tag{2.37}$$

onde $\Sigma = h_{EB}+h_{EM}$ e $\Delta = h_{EB}-h_{EM}$. Para frequências elevadas, esta expressão pode ser aproximada por:

$$d_{pq} = \frac{4h_{EB}h_{EM}}{\lambda} \tag{2.38}$$

II.3.5. ATENUAÇÃO INTRODUZIDA PELA VEGETAÇÃO

Uma característica inovadora do modelo proposto neste trabalho é a inclusão da atenuação devida à vegetação. Numa área urbana, o ambiente é composto não só por edifícios mas também por árvores, que se dispõem ao longo das ruas e contribuem para a atenuação do campo. Em medidas efectuadas anteriormente em Lisboa [DCG95], verificou-se que esta atenuação pode atingir valores significativos, da ordem dos 10 a 15 dB. A importância de se contabilizar esta atenuação já havia sido referida [TBL96]. No entanto, a dificuldade de obtenção de informação sobre a localização da vegetação, bem como o (quase) desconhecimento da atenuação associada a cada tipo de árvore presente nas cidades torna difícil a sua inclusão nos modelos. No modelo em estudo esta questão é tratada de uma forma simples, empírica, que no entanto permite obter uma boa estimativa para o valor da atenuação introduzida pela vegetação.

Em [VoG86] e [GoV87] apresentam-se os resultados de medições efectuadas em Maryland, onde se verificou qual a degradação do sinal recebido devido às árvores existentes na rua. Embora o estudo estivesse relacionado com os sistemas via satélite, em que, em geral, os ângulos de incidência são maiores, constata-se que os valores da atenuação estão de acordo com os obtidos em Lisboa: atenuações entre os 10 e os 16 dB, com um valor médio de 12 dB. Como se disse, uma questão importante no cálculo da atenuação pela vegetação é a obtenção de informação referente à localização das árvores. À partida, quanto maior o rigor na localização, mais correcto será o valor estimado. Acontece que, na prática, este aumento de detalhe implica não só maior complexidade do algoritmo que determina a obstrução pelas

árvores, mas também maior dificuldade para recolher a informação e mantê-la actualizada. Por esta razão, no algoritmo desenvolvido optou-se por considerar não a contribuição individual de cada árvore, mas sim a contribuição média de um conjunto de árvores, alinhadas ao longo da rua e que se admite obstruírem uniformemente o raio. Na Fig. 2.17 ilustra-se esta simplificação. As circunferências representam as árvores, que em geral se encontram dispostas em filas, quer no centro quer nos lados da rua. O traço a cheio corresponde à informação que é inserida na base de dados para identificar a existência de árvores. Assume-se que a densidade da vegetação ao longo de um mesmo troço é constante, o que significa que pequenos espaços que possam existir entre as árvores são desprezados.

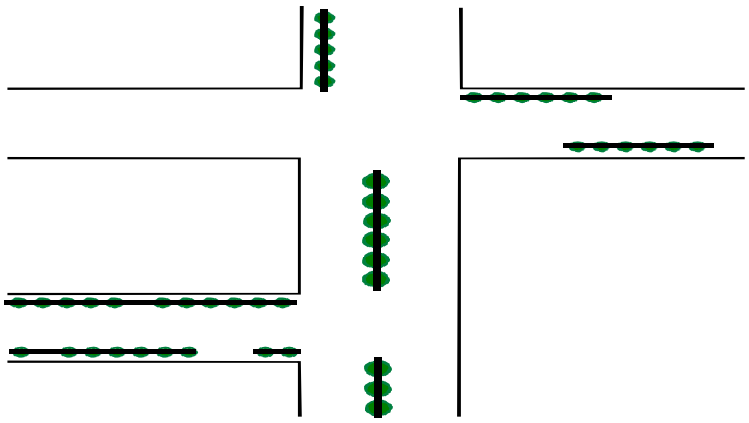


Fig. 2.17 - Planta de uma área urbana, com a localização das árvores e identificação da informação inserida na base de dados.

Para calcular a obstrução de um raio verifica-se o número de vezes que esse raio intercepta os troços de vegetação, quer na rua da EM quer nas ruas transversais. Admite-se que a altura das árvores é sempre suficiente para interceptar o raio, o que permite restringir o estudo ao plano horizontal. Esta simplificação é válida para a generalidade das situações, havendo apenas que ter em atenção o caso em que se verifica a obstrução logo após a difracção do raio no TUE. Pode acontecer que o raio passe sobre as árvores sem as interceptar. No entanto, esta situação é pouco frequente, pois é necessário que o último edifício seja alto e a rua estreita. Outra aproximação, também feita para simplificar o programa, consiste em desprezar os raios reflectidos nas árvores.

Conhecido o grau de obstrução do raio, a atenuação introduzida pela vegetação, L_{veg}, é calculada através da seguinte expressão:

$$L_{veg}\,[dB] = N_{veg1} \cdot L_{veg1}\,[dB] + N_{veg2} \cdot L_{veg2}\,[dB] \tag{2.39}$$

em que N_{veg1} e N_{veg2} são o número de vezes que o raio intercepta vegetação pouco densa e muito densa, respectivamente, e L_{veg1} e L_{veg2} são as atenuações sofridas pelo raio cada vez que intercepta os respectivos tipos de vegetação. Os valores de L_{veg1} e L_{veg2} são ajustados em III.4, com base nas medidas realizadas em Campo de Ourique. O facto de se poderem atribuir diferentes valores de densidade a cada troço de vegetação permite, não só, ter em conta o tipo de árvore (tamanho e densidade), mas também a época do ano, que tem alguma influência nas espécies de folha caduca. No entanto, o tipo de árvore é o factor mais relevante, uma vez que a obstrução dos ramos representa 75% do valor da atenuação [GoV87].

II.4. CÁLCULO DO SINAL RECEBIDO

II.4.1 POTÊNCIA DE UM RAIO

A potência com que um raio chega à EM, P_{raio}, é dada pela seguinte expressão:

$$P_{raio}\,[dBm] = P_t\,[dBm] + G_{EB}\,[dBi] + G_{EM}\,[dBi] - L_p\,[dB] \tag{2.40}$$

em que P_t é a potência transmitida pela EB, G_{EB} e G_{EM} são os ganhos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, e L_p é a atenuação de propagação, descrita anteriormente.

GANHO DA EB

Com a sectorização das células as antenas tendem a ser bastante directivas, pelo que se torna importante contabilizar correctamente a variação do seu ganho. O ganho da EB é determinado a partir do diagrama de radiação da respectiva antena. É frequente os fabricantes fornecerem apenas o diagrama no plano horizontal e as respectivas larguras de feixe. Por esta razão, optou-se, no modelo desenvolvido, por calcular o ganho generalizado na direcção

horizontal φ, g_{φ}, a partir de um ficheiro (conhecido o azimute da antena), sendo o ganho generalizado segundo a direcção vertical Ψ, g_{Ψ}, determinado através da seguinte expressão aproximada:

$$g_{\Psi}(\Psi) = \begin{cases} \cos^{r}(\Psi - \Psi_{DT}) & , \cos^{r}(\Psi - \Psi_{DT}) \geq 10^{-3.5} \\ 10^{-3.5} & , \cos^{r}(\Psi - \Psi_{DT}) < 10^{-3.5} \end{cases} \tag{2.41}$$

onde Ψ_{DT} é a inclinação vertical da antena (*Down Tilt*) e r é o coeficiente de decaimento, tal que o ganho da EB segundo a direcção (φ, Ψ) é dado por:

$$G_{EB}(\varphi, \Psi) = g_{\varphi}(\varphi) \cdot g_{\Psi}(\Psi) \cdot G_0 \tag{2.42}$$

sendo G_0 o ganho na direcção de máximo. Em (2.41) limita-se o nível de lobos secundários a 35 dB. O coeficiente de decaimento é estimado a partir da largura de feixe vertical a meia potência, $\alpha_{3\mathrm{dB}}^{\mathrm{V}}$:

$$\cos^{r}\left(\alpha_{3\mathrm{dB}}^{\mathrm{V}} / 2\right) = 1/2 \tag{2.43}$$

Como de pode observar na Fig. 2.2, assume-se que o ângulo Ψ é determinado pelo edifício mais alto visto da EB.

GANHO DA EM

Assume-se que o ganho da EM é constante e igual a 0 dBd (dipolo de meia onda), por ser este o caso geral nos telefones móveis pessoais actuais.

II.4.2 COMBINAÇÃO DOS RAIOS

Os principais problemas em áreas urbanas são causados pelo facto de a antena da EM se encontrar bastante abaixo dos edifícios circundantes, de tal modo que, em geral, não existe linha de vista com a EB. A propagação faz-se, então, principalmente por reflexão nas paredes

dos edifícios e difracção sobre e/ou em torno deles. Na prática, a energia é recebida através de vários percursos, multipercurso, sendo o ângulo de chegada e o tempo de atraso (proporcional ao comprimento do percurso) diferentes para todos eles. As diferentes ondas combinam-se vectorialmente na antena do receptor, sendo a amplitude do sinal resultante maior ou menor consoante a distribuição de fases por entre as várias componentes. Pequenas deslocações do móvel podem provocar variações acentuadas na amplitude do sinal, devido a diferentes relações de fases. Estas flutuações do sinal são designadas por desvanecimento. Em ambientes urbanos, o desvanecimento é composto por dois termos: desvanecimento lento, em que as variações da amplitude são à escala da dimensão dos edifícios, e desvanecimento rápido, em que as oscilações se efectuam com um período da ordem do comprimento de onda. O desvanecimento lento resulta da alteração do ambiente em torno do móvel, à medida em que este se desloca ao longo de uma rua, sendo o desvanecimento rápido provocado pela interferência entre as ondas.

Existem duas abordagens para o cálculo do sinal recebido: uma primeira em que se têm em conta ambos os desvanecimentos (rápido e lento) e uma segunda onde se considera apenas o desvanecimento lento do sinal. Assim, é frequente encontrarem-se modelos que se diz determinarem todas as oscilações do sinal, assim como modelos em que se pretende apenas estimar o seu andamento médio. No modelo desenvolvido optou-se pela segunda abordagem: em primeiro lugar, por questões de simplicidade e tempo de cálculo, como já foi referido, neste modelo consideram-se apenas os raios principais, que segundo Ikegami *et al*. [IYT84] são responsáveis pelo andamento médio do sinal; depois, porque não se pode esperar que algum programa calcule com grande precisão o desvanecimento rápido, uma vez que mesmo as menores incertezas na posição ou dimensão dos edifícios irão conduzir a erros no cálculo das fases, com a consequente deslocação das posições dos máximos e dos mínimos. Convém recordar que se está a trabalhar com comprimentos de onda inferiores a 0.4 m.

Conhecida a contribuição individual de cada raio, a potência média recebida pela EM pode ser calculada por processos distintos: ou aplicando o método da janela deslizante ao sinal resultante da soma vectorial dos vários raios, expressão (2.44), onde a_m é a amplitude complexa do raio m e r_m é o comprimento do percurso m,

$$P_r = \left| \sum_{m=1}^{M} a_m \, \mathrm{e}^{-jkr_m} \right|^2 \tag{2.44}$$

ou somando as potências correspondentes a cada raio,

$$P_r = \sum_{m=1}^{M} \left| a_m \right|^2 \tag{2.45}$$

A expressão (2.44) não pode ser utilizada no presente modelo por não se conhecer a fase com que as várias ondas chegam ao móvel; os modelos descritos em II.2, para contabilizar a propagação sobre os edifícios, só dão informação sobre a atenuação média do sinal. Recorreu--se então à expressão (2.45), onde está implícito que as fases relativas das várias contribuições, além de variarem aleatoriamente, estão uniformemente distribuídas. Esta aproximação pode não ser válida na situação de LOS, em que existem raios dominantes e as fases encontram-se distribuídas de forma não uniforme. No entanto, em sistemas com células de maior dimensão as fases acabam por ser influenciadas uniformemente pela complexa estrutura urbana, tornando a aproximação válida.

III. AFERIÇÃO DO MODELO DE PROPAGAÇÃO

Neste Capítulo começa por se descrever as condições em que as medidas de sinal foram realizadas, justificando-se a escolha das áreas analisadas, bem como a selecção das estações base. Em seguida referem-se as opções tomadas na aplicação dos modelos de Vogler e de Xia and Bertoni, nomeadamente no cálculo dos parâmetros e na definição de quais os raios a contabilizar. Na terceira Secção desenvolve-se uma expressão para calcular a atenuação sobre os edifícios, aferida com base nas medidas realizadas na Baixa Lisboeta. Por último, apresenta- -se um método para contabilizar a atenuação introduzida pelas árvores, aferido a partir das medidas de Campo de Ourique.

III.1. REALIZAÇÃO DAS MEDIDAS

As medidas de sinal foram realizadas em colaboração com a operadora de comunicações móveis TELECEL. Foi disponibilizado um equipamento de medida para o sistema GSM (900 MHz), com o qual se colectou o sinal emitido por algumas das EB em funcionamento na cidade de Lisboa. Isto significa que os cenários de propagação foram impostos pela localização das EB, não havendo liberdade para colocar os emissores nos locais mais apropriados para os estudos pretendidos.

Dado que em Portugal ainda não foram atribuídas licenças para o sistema DCS 1800, não foi possível realizar medidas na frequência de 1800 MHz. Por esta razão, só se aferiu o modelo de propagação para a frequência de 900 MHz.

III.1.1 ESCOLHA DAS ZONAS A ANALISAR

Realizaram-se medidas em duas zonas de Lisboa: Baixa Lisboeta e Campo de Ourique.

BAIXA LISBOETA

A escolha da Baixa Lisboeta para aferir o modelo foi determinada pelo facto desta zona ser bastante regular: terreno plano, construções homogéneas e ruas dispostas segundo uma grelha rectangular. Estas condições tornam-na preferencial para aplicação do modelo de Xia e

Bertoni. Além disso, a regularidade presente nesta zona facilita a identificação dos principais fenómenos de propagação e, consequentemente, a aferição do modelo.

CAMPO DE OURIQUE

A zona de Campo de Ourique, não sendo tão regular como a Baixa Lisboeta, foi escolhida para verificar a adequação do modelo em áreas em que as condições de aplicação são menos satisfeitas. Nesta zona, a construção e a disposição dos edifícios é regular mas a cota do terreno apresenta algumas variações.

Outra razão porque se escolheu esta área é o facto de algumas ruas possuírem árvores, o que permite verificar a influência da vegetação e aferir o respectivo termo de atenuação.

III.1.2 ESCOLHA DAS ESTAÇÕES BASE

A escolha de quais as estações base a analisar, de entre as várias que são captadas em cada uma das zonas estudadas, foi determinada pela sua posição e orientação em azimute. Numa sectorização tripla, o sector orientado a Norte designa-se por A e os restantes (no sentido retrógrado) por B e C.

BAIXA LISBOETA

As estações seleccionadas na Baixa Lisboeta foram a L031B e a L101A, por estarem orientadas directamente para esta área. Verificou-se que o sinal das estações L031A e L101C também é facilmente captado pela EM. Contudo, o facto de as suas antenas não apontarem para as zonas pretendidas significa que uma fracção importante da energia que chega ao móvel poderá ser resultante de fenómenos não contabilizados pelo modelo, tais como a reflexão em edifícios próximos da EB ou a distorção do diagrama de radiação teórico.

No Anexo B pode ser consultado o mapa da Baixa Lisboeta, com a localização das EB. A estação L101A situa-se poucos metros acima do nível médio dos edifícios, estando, por isso, nas condições de aplicação do modelo de Xia e Bertoni. Por sua vez, a estação L031B situa-se a uma cota elevada em relação à Baixa, o que permitirá verificar a adequação do modelo de Vogler em perfis com obstáculos de diferentes alturas.

CAMPO DE OURIQUE

Na zona de Campo de Ourique seleccionou-se apenas a estação L079C. Esta situa-se alguns metros acima do nível dos telhados, em condições de propagação análogas às da estação L101A na Baixa, cobrindo directamente ruas com árvores. Apesar da estação L175A também apontar para a zona em estudo, verificou-se que o seu sinal não era recebido em boas condições pela EM, razão pela qual não se efectuou a sua análise.

No anexo B apresenta-se o mapa de Campo de Ourique com a localização das EB.

Como se referiu, todas as EB seleccionadas encontram-se acima do nível médio dos telhados, sendo a diferença de alturas elevada no caso da estação L031B. Isto significa que não é possível aferir os modelos para $\Delta h_{base}<0$ m, em particular o modelo de Xia [Xia96]. Embora a TELECEL já tenha iniciado a colocação de antenas abaixo do nível dos telhados, na fachada dos edifícios, não possui nenhuma nessas condições nas zonas estudadas. Verificou-se que estas antenas estão a ser utilizadas para cobrir, preferencialmente, as ruas em que são instaladas, o que significa que a propagação sobre os edifícios começa a assumir menor importância. Contudo, em estudos de interferência esta contribuição não deve ser desprezada.

Refira-se, também, que o tipo de medidas realizadas não permite, em geral, evidenciar claramente a influência dos cruzamentos, ou porque a distância da EB à rua é elevada, tornando o sinal pouco sensível a alterações na estrutura dos edifícios, ou porque a EB se encontra bastante alinhada com a rua, sendo a contribuição dos raios conduzidos por ruas transversais pouco significativa. Apesar disto, em algumas ruas mais perpendiculares à direcção de propagação a sua influência é visível, como se verá mais adiante.

III.1.3 OBTENÇÃO DAS MEDIDAS

O percurso em que se efectuaram medidas foi, de certa forma, determinado por condicionamentos de trânsito, uma vez que nos fazíamos deslocar numa carrinha.

O equipamento disponibilizado pela TELECEL, além da carrinha, é composto por: um terminal móvel de GSM, com uma antena exterior colocada sobre o tejadilho, a uma altura de

1.6 m; um sistema de GPS e um computador com o software de medida TEMS, da Erisoft, que combina o sinal recebido pelo terminal com as coordenadas fornecidas pelo GPS.

Uma conclusão a que se chegou foi de que na zona de Lisboa o sistema GPS funciona melhor durante a noite. Uma primeira campanha de medidas, realizadas durante a manhã, não foi posteriormente utilizada pois não se dispunha de coordenadas GPS; além disso, devido ao trânsito, não foi possível efectuar o percurso a uma velocidade constante, pelo que não se dispunha de qualquer informação sobre a localização dessas medidas. Repetiram-se as medidas, mas agora durante a noite, tendo-se verificado que o sistema GPS funciona bem a esta hora. Dado que o erro do sistema GPS utilizado pode ser elevado (erro máximo de 100 m), e tendo em conta que de noite foi possível efectuar as medidas a uma velocidade constante, concluiu-se que a forma mais correcta de localizar as medidas era distribui-las uniformemente ao longo da rua. Apesar de não se dispor de informação sobre o sistema de medida TEMS, através dos ficheiros de saída verificou-se que o sinal é registado a intervalos de tempo praticamente constantes (variação da ordem das centésimas de segundo). Analisando o andamento do sinal em ruas em que a influência dos cruzamentos é visível, constata-se que estes ocorrem para as distâncias esperadas, o que permite validar este tratamento.

Como já foi dito, pretende-se apenas determinar o andamento médio do sinal, imposto pelos raios principais. Para eliminar o desvanecimento rápido presente nas medidas, aplicou-se o método da janela deslizante. A dimensão da janela (comprimento do percurso em que é feita a média das medidas) foi determinada por observação do comportamento do sinal, tendo-se concluído que 30λ (~10 m) é um valor adequado.

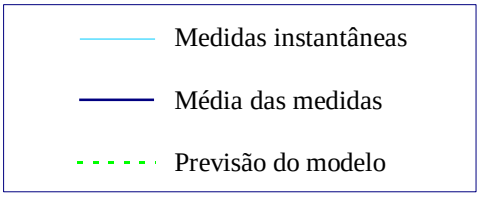
III.2. APLICAÇÃO DOS MODELOS DE VOGLER E DE XIA AND BERTONI

III.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

LEGENDAS DAS FIGURAS

Nas figuras com o andamento da potência recebida pela EM, P_r, apresentadas nesta Secção e nas seguintes, as curvas são traçadas em função da distância ao início da rua, d_{via}. No

Anexo B pode verificar-se o sentido em que essas ruas foram percorridas. A legenda comum aos vários gráficos, quando nada for dito em contrário, é a seguinte:



As previsões são determinadas com um espaçamento de 10 m. Considera-se este valor por ser a dimensão da janela deslizante aplicada às medidas instantâneas, o que significa que num percurso de 10 m o sinal mantém-se praticamente constante.

Nas figuras com o perfil entre a antena da EB e o TUE, o traço contínuo representa a altura dos edifícios, adicionada da respectiva cota do terreno, os traços verticais indicam a localização e altura dos obstáculos principais (modelo de Vogler) e a traço descontínuo apresentam-se linhas auxiliares.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

Os resultados que se apresentam em seguida referem-se ao erro (diferença) entre a curva teórica, P^t, e a curva média das medidas, P^m,

$$\Delta P = P^t - P^m \quad [\text{dB}] \tag{3.1}$$

e são expressos em termos da média do erro, μ, da média do erro absoluto, μ_{abs}, e do desvio padrão do erro, σ, determinados pelas seguintes expressões:

$$\mu_{[dB]} = \left[\sum_{i=1}^{N_{pv}} \Delta P_i \right] \Big/ N_{pv} \tag{3.2}$$

$$\mu_{abs[dB]} = \left[\sum_{i=1}^{N_{pv}} \left| \Delta P_i \right| \right] \Big/ N_{pv} \tag{3.3}$$

$$\sigma_{[dB]} = \left[\frac{\sum_{i=!}^{N_{pv}} \left(\left| \Delta P_i \right| - \mu_{abs} \right)^2}{N_{pv}} \right]^{1/2} \tag{3.4}$$

em que N_{pv} é o número total de previsões ao longo da via.

A média do erro permite estimar a tendência de sub ou sobre estimação da atenuação por parte do modelo. Atendendo às expressões (3.1) e (3.2), conclui-se que o seu valor pode ser 0 dB com um erro elevado. Por esta razão, é preferível utilizar a média do erro absoluto, um parâmetro mais exigente mas que permite uma melhor optimização do modelo (por minimização do parâmetro). No Anexo D apresentam-se, além dos valores de μ_{abs}, os valores de μ para as várias ruas analisadas. O desvio padrão, por sua vez, indica se a curva teórica acompanha ou não a curva experimental.

CONSTANTES ELÉCTRICAS E POLARIZAÇÃO

Para a condutividade e constante dieléctrica relativa das paredes dos edifícios utilizam-se os valores $\sigma_c = 0.045$ S/m e $\varepsilon_r = 9$, respectivamente, indicados em [Dam97] como representativos do betão. Por sua vez, para as características electromagnéticas do chão utilizam-se os valores médios $\sigma_c = 0.005$ S/m e $\varepsilon_r = 15$ [Jak74]. A polarização assume-se ser vertical, pois é esta a utilizada nos sistemas de telefone celular.

No cálculo da difracção, admite-se, ainda, que o ângulo interno das arestas é 90º (n=1.5), por ser o caso mais geral em edifícios.

III.2.2 CÁLCULO DOS PARÂMETROS

Para calcular os parâmetros dos modelos, começa por se determinar o perfil entre a antena da EB e o topo do último edifício. O perfil é estimado a partir de uma carta topográfica digitalizada, em formato cartesiano, com uma definição (espaçamento entre pontos) de 50 m. Para cada ponto da carta dispõe-se de informação sobre as coordenadas cartesianas, o grau de urbanização (urbano, suburbano ou aberto), o tipo de ocupação do terreno (edifícios, árvores ou água) e a altura da ocupação do terreno.

O rigor do perfil depende não só da definição da carta digital, mas também da precisão da informação, ou seja, da forma como a informação foi obtida e posteriormente inserida na carta. À partida, uma definição de 50 m é insuficiente para o estudo que se pretende desenvolver [GBT95]. Modelos como o de Okumura, e até o de Xia and Bertoni, em que se considera uma contribuição média de vários edifícios, acabam por ser pouco sensíveis ao rigor da localização desses edifícios. Contudo, no modelo de Vogler, em que é permitido um espaçamento não uniforme entre edifícios, esta questão já assume maior importância. No que diz respeito à precisão da informação, em particular à altura dos edifícios, o modelo de Vogler é novamente mais sensível, dado que permite contabilizar obstáculos de diferentes alturas. Esta informação foi introduzida na base de dados após observação das áreas em causa (não se tem conhecimento da existência de qualquer registo com a altura dos edifícios na cidade de Lisboa), tendo-se assumido uma altura média de 18 m para os edifícios da Baixa Lisboeta e de 15 m para os de Campo de Ourique. O facto de se desprezarem as variações na altura dos edifícios (o que não significa que o perfil seja plano, dado que a cota do terreno pode variar) também pode introduzir algum erro no cálculo da difracção no TUE pela UTD, uma vez que este termo é bastante sensível à diferença de alturas entre o TUE e a EM. Refira-se que, no entanto, dada a regularidade das áreas em estudo, os erros acabam por ser minimizados.

Outro ponto em que o rigor da localização dos edifícios é bastante importante, é no traçado de raios. Neste caso, devido à limitação na definição da carta topográfica, optou-se, como já se referiu, por construir uma base de dados apenas com as ruas, em que a localização das paredes que delimitam essas ruas é bastante precisa.

Em seguida referem-se quais os parâmetros de entrada do modelo de Vogler e do modelo de Xia and Bertoni e a forma como são calculados.

MODELO DE XIA AND BERTONI

Os parâmetros de entrada do modelo de Xia and Bertoni são o espaçamento médio entre edifícios, b, a altura média dos edifícios, h_{ed}, e o número de obstáculos, N.

Para o cálculo da altura h_{ed}, têm-se em conta todos os edifícios que interrompem o primeiro elipsóide de Fresnel associado ao raio directo entre a antena da EB e o TUE, sendo h_{ed} o valor médio das suas alturas. No caso do espaçamento b, começa por se determinar a distância de estabelecimento, isto é, a distância do receptor ao último edifício (no sentido da

EB) que interrompe o primeiro elipsóide. Em seguida, verifica-se quais as vias interceptadas por este segmento e faz-se a média dos seus *b*s. Conhecida a distância entre a EB e o TUE, *d*, e o espaçamento entre edifícios, *b*, o parâmetro *N* é determinado pela seguinte expressão:

$$N = \lceil d/b + 0.5 \rceil \tag{3.5}$$

em que $\lceil x \rceil$ é o maior inteiro não superior a *x*.

MODELO DE VOGLER

Os parâmetros de entrada do modelo de Vogler são as alturas e os espaçamentos entre obstáculos principais (obstáculos que verificam a condição β >-1.5).

Quando o número de obstáculos *N* aumenta, o tempo de cálculo do método de Vogler torna-se elevado, o que limita a sua aplicação prática. No modelo desenvolvido restringiu-se o número de obstáculos a um valor máximo que, por simulação, se verificou ser 4. Deste modo, para o exemplo de uma rua com 50 pontos de previsão e considerando todos os raios até à 4ª ordem (uma difracção e 4 reflexões no máximo), obtêm-se tempos de cálculo inferiores a 5 min. O computador utilizado é um Pentium a 150 MHz, com 32 MB de memória RAM. A aplicação do modelo de Vogler está, assim, limitada a um máximo de 4 obstáculos.

Para determinar quais os edifícios a considerar no cálculo da atenuação, têm-se em conta as restrições impostas quer pela convergência quer pelo tempo de cálculo. Assim, num primeiro passo eliminam-se todos os edifícios com β inferior a -1.5. Em seguida, se o número de edifícios resultante for superior a 4, eliminam-se um a um os de menor parâmetro β, até restarem apenas 4. Desta forma garante-se que os edifícios contabilizados são os de maior peso na atenuação.

III.2.3 AFERIÇÃO DOS MODELOS

Após se implementarem os modelos de Vogler e de Xia and Bertoni, tal como descritos no Capítulo II, efectuaram-se duas alterações na sua aplicação: na primeira, obrigou-se a que o último edifício do perfil (antes da EM) fosse sempre contabilizado como obstáculo principal

no modelo de Vogler; na segunda, limitou-se, em ambos os modelos, a altura do 2º vértice do raio (vértice do raio após a difracção no TUE, que pode corresponder à EM ou a um ponto de reflexão ou difracção).

CONTABILIZAÇÃO DO ÚLTIMO EDIFÍCIO COMO OBSTÁCULO PRINCIPAL

Na implementação do modelo de Vogler, começou por se admitir que um raio podia entrar directamente numa rua, sem se difractar no topo do último edifício. Deste modo, sempre que o parâmetro β_N (parâmetro β para o último edifício do perfil) fosse inferior a -1.5 considerava-se que o último edifício não perturbava o sinal. Contudo, cedo se verificou que o valor da atenuação prevista por este modelo era baixo, em especial no caso da estação L031B. Na Fig. 3.1 compara-se o sinal medido ao longo da Rua do Ouro, estação L031B, com o sinal previsto pelo modelo de Vogler. Verifica-se que o modelo subestima a atenuação de propagação.

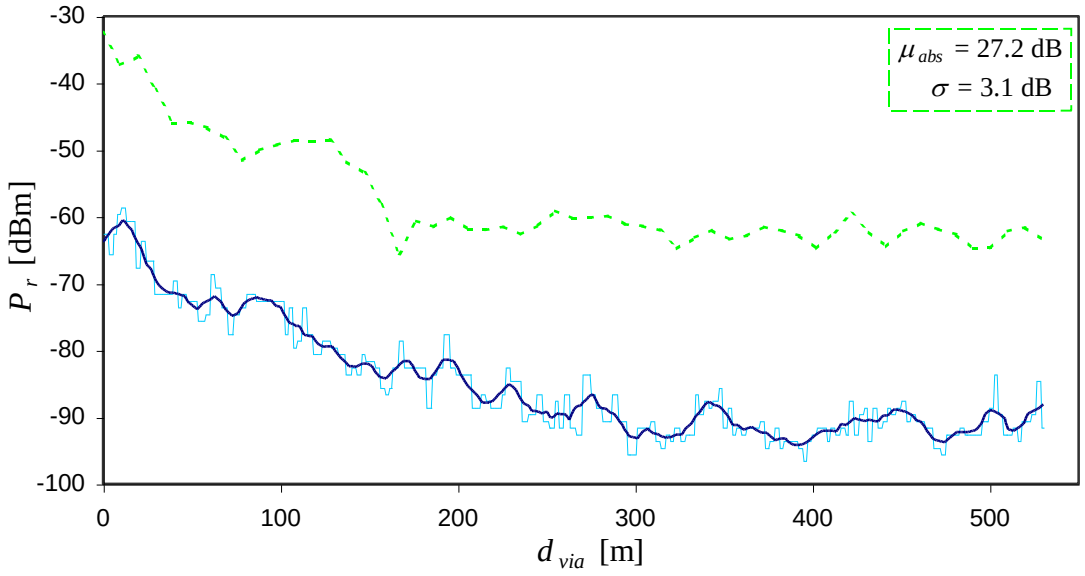


Fig. 3.1 - Rua do Ouro, L031B; sinal previsto pela primeira implementação do modelo de Vogler.

Analisando um perfil entre a estação L031B e o móvel, situado a meio da Rua do Ouro, Fig. 3.2, conclui estar-se na situação descrita anteriormente, ou seja, o sinal entra na rua sem se difractar em TUE. No entanto, esta situação só é possível por se considerar apenas a propagação no plano horizontal; a reflexão no edifício oposto dificilmente será especular caso

se considerem os ângulos no plano vertical. Isto significa que, ao considerar-se a propagação somente a 2 dimensões, se estão a admitir determinadas reflexões especulares que a 3 dimensões não são possíveis. Por este facto, julgou-se ser mais correcto considerar sempre a difracção no último edifício.

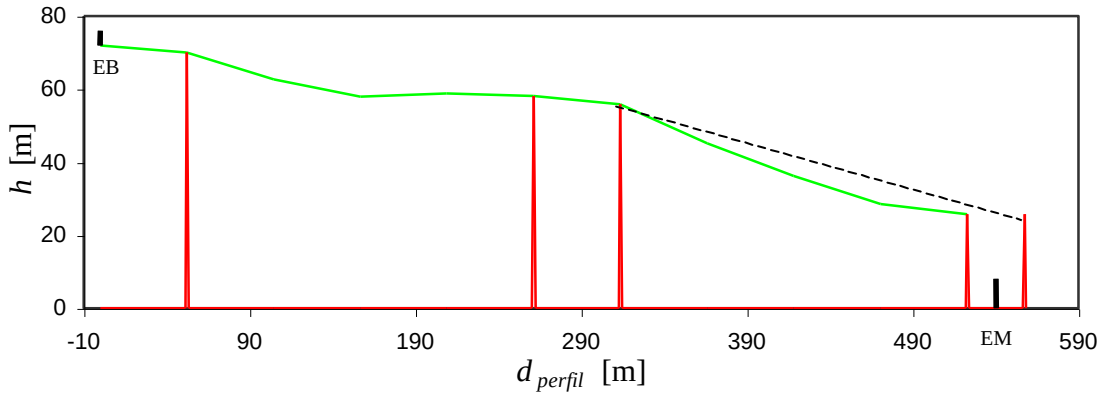


Fig. 3.2 - Rua do Ouro, L031B; perfil entre a EB e a EM, situada a meio da rua.

Na Fig. 3.3 representa-se o sinal estimado pelo modelo de Vogler corrigido. Pode observar-se que a atenuação ao longo da rua aumentou, permitindo uma diminuição do erro.

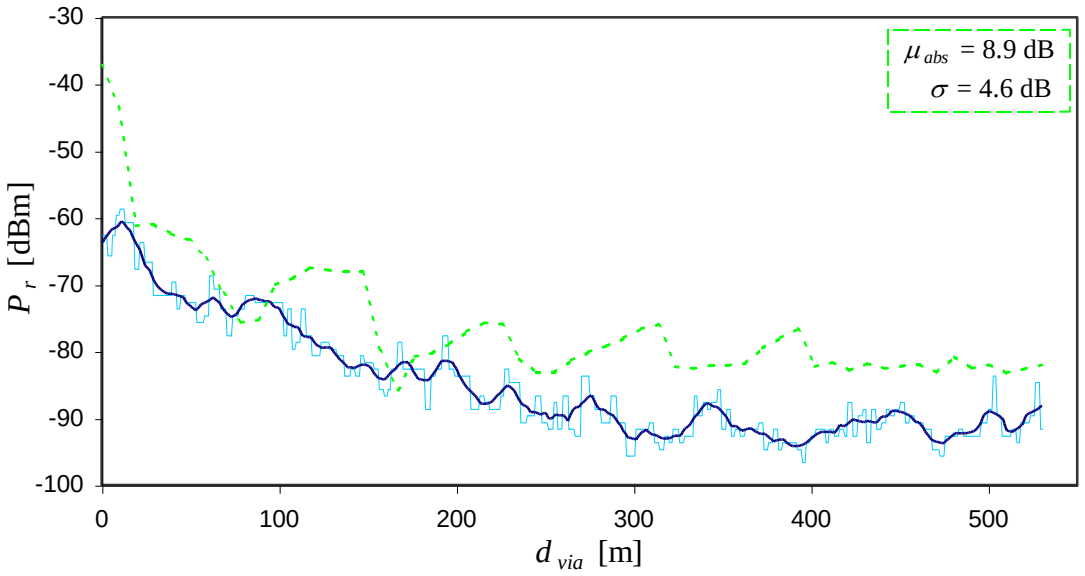


Fig. 3.3 - Rua do Ouro, L031B; sinal previsto pelo modelo de Vogler, contabilizando sempre a difracção em TUE.

Esta alteração não traz problemas de convergência pois, para tal, era necessário que o obstáculo principal anterior ao último edifício e a EM fossem mais altos do que o TUE, o que não se verifica.

LIMITAÇÃO DA ALTURA DO 2º VÉRTICE DO RAIO

Começou por se determinar a altura do 2º vértice do raio admitindo que o raio descia gradualmente desde o TUE até a EM. Assim, quanto maior o percurso do raio no interior da rua, menor o seu ângulo de difracção no último edifício. Dado que a atenuação por difracção, calculada pela UTD, é bastante sensível a este ângulo (aumenta consideravelmente com o ângulo de difracção), o que se verificava era que em pontos afastados dos cruzamentos a contribuição dos raios difractados nas esquinas e/ou conduzidos pelas ruas transversais era excessiva. Como consequência, a influência dos cruzamentos era pouco nítida nas curvas teóricas. Na Fig. 3.4, em que se apresenta o sinal ao longo da Rua da Conceição, para a EB L101A, pode observar-se este efeito.

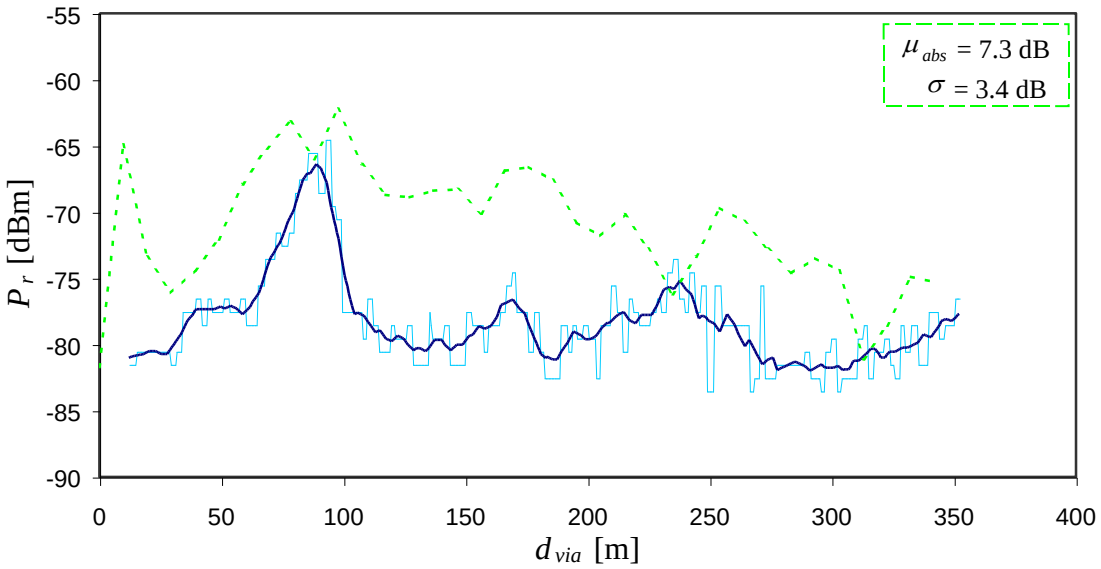


Fig. 3.4 - Rua da Conceição, L101A; previsão sem limitação da altura do 2º vértice do raio (modelo de XB).

Após se estudar a contribuição da difracção em TUE na atenuação total dos vários raios, concluiu-se que uma solução para pesar adequadamente a contribuição individual desses raios era reduzir a altura do 2º vértice. Na Fig. 3.5 exemplifica-se esta solução, para o caso de um

raio com uma única reflexão: h_{2p} é a altura calculada pelo método inicial e h_{2p}' é a altura segundo a solução proposta.

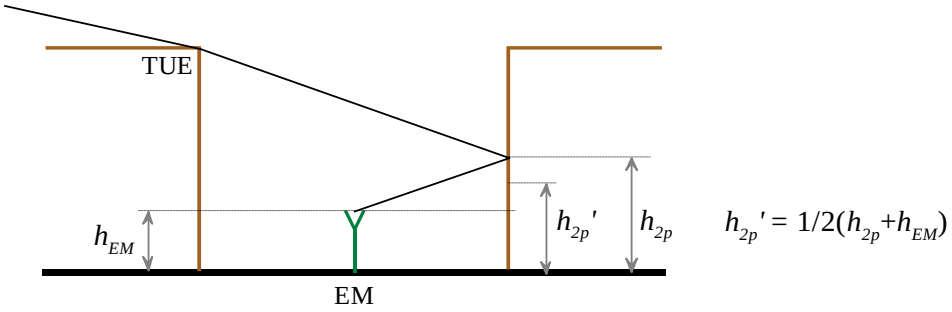


Fig. 3.5 - Estimação da altura do 2º vértice do raio.

Através da Fig. 3.6 pode verificar-se que, com a solução referida, a atenuação entre os cruzamentos aumentou e a influência dos cruzamentos passou a ser mais nítida, ao mesmo tempo que o erro entre as curvas diminuiu.

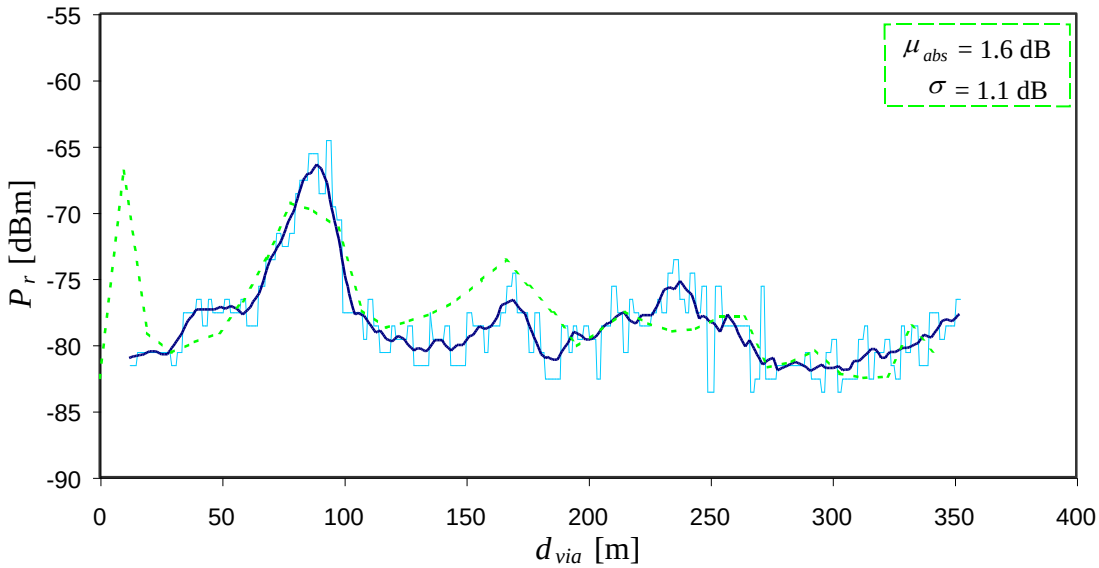


Fig. 3.6 - Rua da Conceição, L101A; previsão com limitação da altura do 2º vértice do raio (modelo de XB).

Em ruas mais alinhadas com a EB, como a Rua do Ouro com a EB L101A, Fig. 3.7, este efeito não é tão visível pois a contribuição dos raios conduzidos pelas ruas transversais e/ou difractados nos cruzamentos é menor.

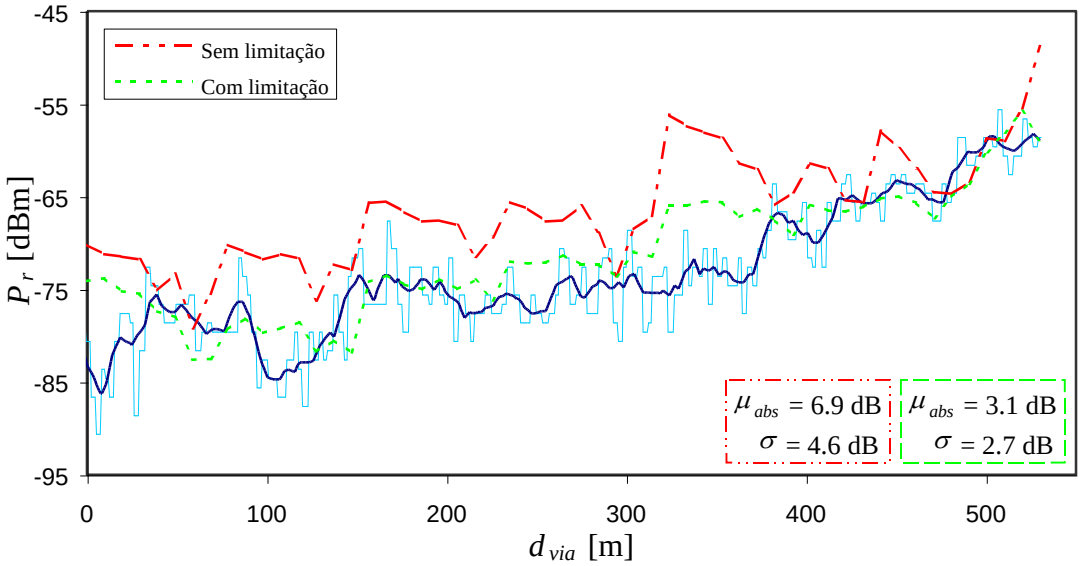


Fig. 3.7 - Rua do Ouro, L101A; previsões sem e com limitação da altura do 2º vértice do raio (modelo de XB).

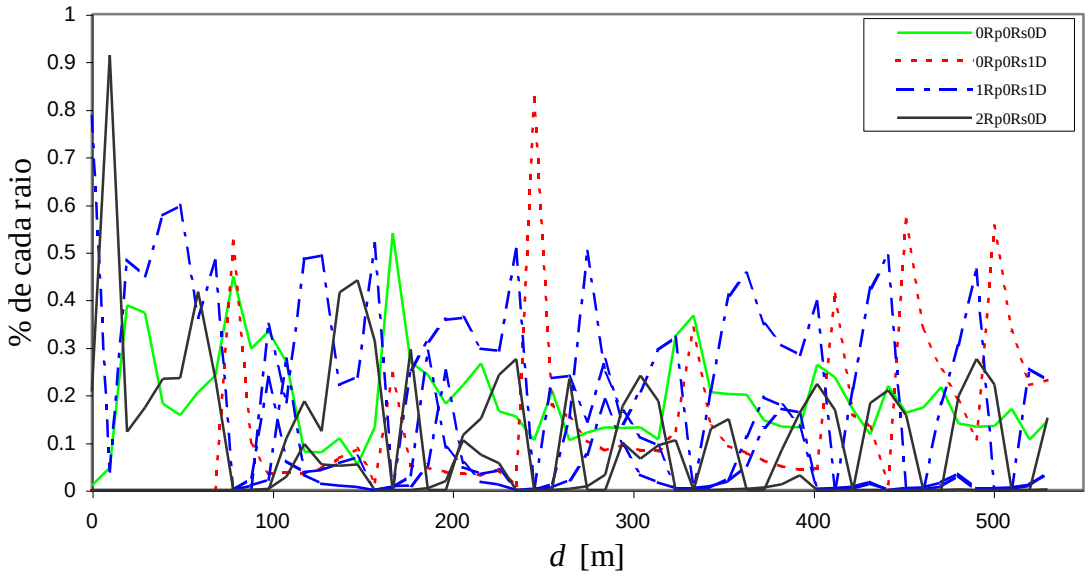
III.2.4 TIPOS DE RAIOS CONTABILIZADOS

Nesta Secção apresenta-se um breve estudo sobre a contribuição relativa dos vários raios, com o objectivo de determinar a ordem dos raios a considerar nas Secções seguintes deste Capítulo. No Capítulo IV será, então, realizado um estudo exaustivo sobre a importância relativa dos raios, em especial na região próxima de um cruzamento.

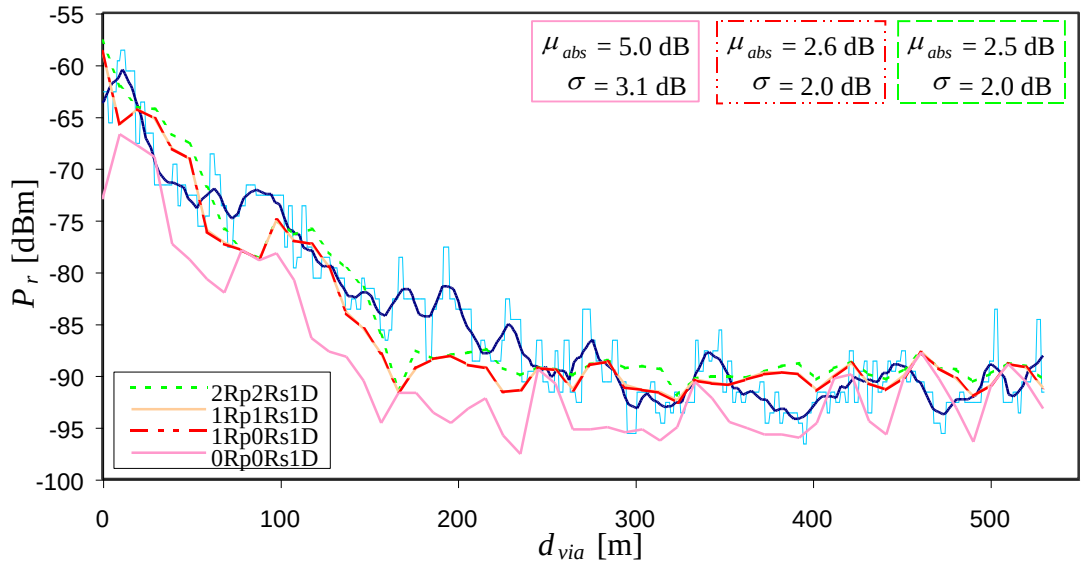
Na implementação do traçado de raios, assumiu-se, de início, que apenas seriam contabilizados os raios com o máximo de uma difracção (1*D*) numa aresta vertical de um cruzamento, independentemente do número de reflexões, o que permitiu reduzir bastante a complexidade do programa e o tempo de cálculo. Esta hipótese é confirmada pelo facto da atenuação por difracção poder assumir valores superiores a 40 dB.

O número máximo de reflexões dos raios contabilizados é um parâmetro de entrada do programa. Na verdade, dispõe-se de dois parâmetros: um que diz respeito ao número máximo de reflexões na rua em que o móvel se desloca, R_p, e um segundo que impõe o número máximo de reflexões nas ruas transversais, R_s. Esta solução, face à de se impor apenas a ordem dos raios (número máximo de reflexões, independentemente da rua em que estas se dão), permite maior controlo do tipo de raios contabilizados.

Após analisar várias ruas, uma primeira conclusão a que se chega é que em ruas (razoavelmente) alinhadas com a EB, a condução dos raios ao longo destas é o principal mecanismo de propagação, sendo a maior contribuição para a potência recebida devida aos raios com um máximo de uma difracção e uma reflexão na rua principal. Este resultado pode ser confirmado através da Fig. 3.8a, em que se apresentam as contribuições individuais dos vários raios (até um máximo de 2 R_p) ao longo da Rua do Ouro, para a EB L031B, e da Fig. 3.8b, em que se representa a potência recebida para vários casos.



a) Contribuição individual dos raios



b) Comparação para diferentes R_p, R_s e D

Fig. 3.8 - Rua do Ouro, L031B (modelo de Vogler).

Na Fig. 3.8b é visível que a contribuição dos raios reflectidos nas ruas transversais é desprezável (as curvas $1R_p0R_s1D$ e $1R_p1R_s1D$ estão sobrepostas) e que a contribuição dos raios com 2 reflexões, quer estas ocorram na rua principal, quer nas ruas transversais, é mínima. A curva correspondente a $3R_p3R_s1D$ não se encontra representada, mas verificou-se que os resultados eram coincidentes com os da curva $2R_p2R_s1D$.

Constatou-se também que, em ruas (razoavelmente) perpendiculares à direcção de propagação, a contribuição dos raios reflectidos nas ruas transversais (que se encontram alinhadas com a EB) é importante, principalmente na região em torno dos cruzamentos. Na Fig. 3.9 apresenta-se o sinal recebido ao longo da Rua da Conceição, para a EB L101A. Verifica-se que próximo dos cruzamentos os raios reflectidos transversalmente são importantes, ao passo que na zona entre cruzamentos a principal contribuição é devida aos raios reflectidos na rua principal. Verifica-se, também, que os resultados para os casos $1R_p1R_s1D$ e $2R_p2R_s1D$ são praticamente iguais, muito embora nos cruzamentos haja alguma diferença entre as respectivas curvas.

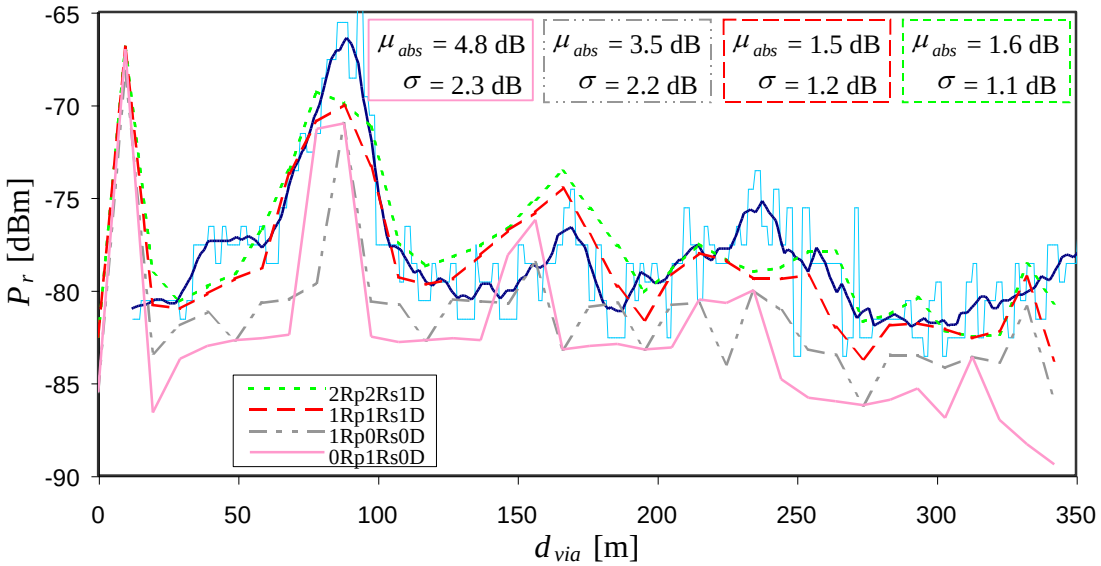


Fig. 3.9 - Rua da Conceição, L101A; comparação para diferentes R_p, R_s e D (modelo de XB).

Como conclusão geral, pode então referir-se que, para a maioria dos casos, é suficiente considerarem-se os raios com um máximo de uma difracção e uma reflexão por rua. No entanto, existem situações em que a contribuição dos raios com 2 reflexões numa rua é importante. É o caso, por exemplo, da Rua dos Fanqueiros com a EB L101A, Fig. 3.10.

Observando o mapa do Anexo B, constata-se que dos 75 até aos 300 m não existem cruzamentos no lado oposto à EB. Não existindo difracções em arestas opostas, cuja contribuição é bastante importante, os raios com duas reflexões na rua principal passam a assumir maior importância. Por esta razão, e tendo em atenção que a diferença entre os tempos de cálculo para os casos $1R_p1R_s1D$ e $2R_p2R_s1D$ é pequena, optou-se por considerar sempre este segundo caso nas simulações que se apresentam nas Secções seguintes deste Capítulo.

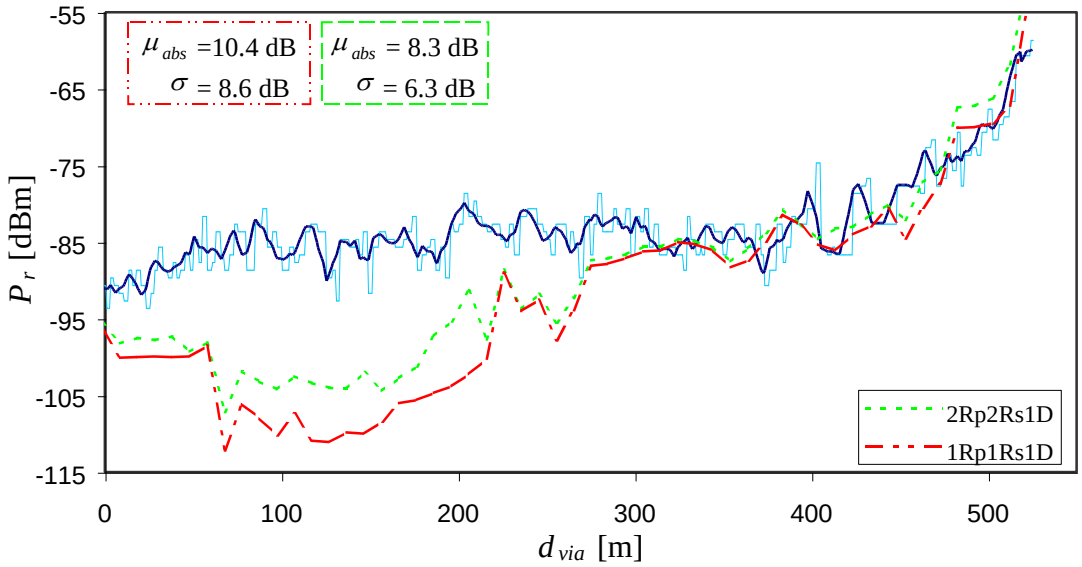


Fig. 3.10 - Rua dos Fanqueiros, L101A (modelo de XB).

III.3. COMBINAÇÃO DOS MODELOS DE VOGLER E DE XIA AND BERTONI

O modelo de Vogler é reconhecido como sendo uma boa solução para o caso da difracção múltipla sobre obstáculos. O facto de acomodar obstáculos de alturas e espaçamentos não uniformes torna-o uma referência para o cálculo da atenuação sobre os edifícios. Contudo, apesar de rigoroso, o tempo de cálculo e a consequente restrição no número de obstáculos limitam a sua aplicação prática. O modelo de Xia and Bertoni, por sua vez, pode ser aplicado em perfis com mais de uma centena de obstáculos. No entanto, tem de se assumir que os obstáculos têm todos o mesmo espaçamento e a mesma altura, o que equivale a desprezar-se as variações na altura dos edifícios e, implicitamente, na cota do

terreno. Tendo em conta as vantagens e desvantagens de cada modelo, a solução encontrada foi conjugar os dois métodos e desenvolver um novo modelo que permita contabilizar as principais variações na estrutura dos edifícios e na cota do terreno, mantendo o tempo de cálculo em valores aceitáveis.

Nesta Secção desenvolve-se uma expressão para a atenuação de propagação sobre os edifícios, a qual combina os modelos de Vogler e de Xia and Bertoni. Começa por se verificar uma equação proposta por Saunders and Bonar [SaB94] e, em seguida, apresenta-se a expressão desenvolvida neste trabalho. Os resultados são aferidos com base nas medidas realizadas na Baixa Lisboeta.

III.3.1 EXPRESSÃO DE SAUNDERS AND BONAR

Para combinar os modelos de Vogler e de Xia and Bertoni, começou por se experimentar uma expressão idêntica à apresentada por Saunders and Bonar (expressão (13) em [SaB94]).

Dado um perfil genérico, Fig. 3.11a, começa por se aplicar o modelo de Xia and Bertoni a todos os edifícios entre a EB e o TUE, a_m, Fig. 3.11b1. Obtém-se desta forma uma primeira estimativa da atenuação, que não tem em conta as variações na estrutura dos edifícios e no terreno. Num segundo passo, determina-se a atenuação pelo método de Vogler, a_p, aplicado aos edifícios principais, Fig. 3.11b2, o que permite contabilizar os desvios do perfil em relação à situação padrão (Fig. 3.11b1). Por último, volta a calcular-se a atenuação para os edifícios principais, a_n, mas agora pelo método de Xia and Bertoni, Fig. 3.11b3, utilizando para a altura média e o espaçamento entre edifícios os valores médios das alturas e dos espaçamentos dos edifícios principais, respectivamente. A função desta atenuação é normalizar a atenuação calculada pelo método de Vogler. A atenuação de propagação sobre os edifícios será, então, dada por:

$$L_{msd[dB]} = 10\log\left(a_m \frac{a_p}{a_n}\right) \tag{3.6}$$

Este método apresenta duas diferenças em relação ao proposto por Saunders and Bonar. Em primeiro lugar, para calcular os termos a_m e a_n utiliza-se o modelo de Xia and Bertoni em vez do modelo desenvolvido por Sauders and Bonar [SaB91]. Em segundo lugar, o parâmetro b utilizado em a_n é o espaçamento médio entre os edifícios principais considerados em a_p, enquanto Saunders and Bonar fazem uso do parâmetro b utilizado no cálculo de a_m; sendo a função de a_n normalizar o termo a_p, considera-se mais correcta a utilização de um parâmetro que dependa da localização dos obstáculos principais.

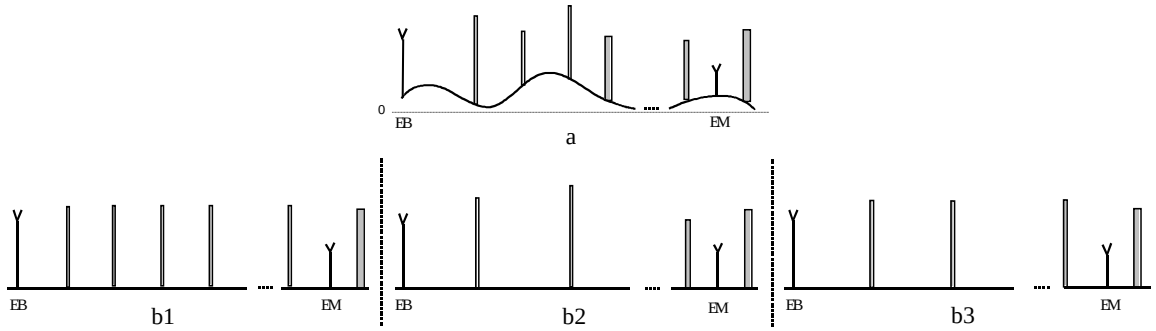


Fig. 3.11 - Cálculo de L_{msd} de acordo com o método de Saunders and Bonar.

Os resultados obtidos com este método não foram satisfatórios. Na Fig. 3.12 apresenta--se o exemplo da Rua de S. Julião, com a EB L101A. Até à distância de 100 m, só o último edifício (antes da EM) foi detectado como obstáculo principal, pelo que se contabiliza apenas o termo a_m (opção de implementação). A partir dos 100 m a atenuação L_{msd} passa a ser calculada pela expressão (3.6), verificando-se uma redução significativa da mesma. Acontece que, ao estar-se a considerar um máximo de 4 obstáculos principais (pela razão já enunciada anteriormente), o parâmetro b utilizado em a_n é elevado, o que conduz a valores da atenuação a_n também elevados. Ao fazer-se a normalização, obtém-se um valor demasiado baixo para L_{msd}. Em principio, seria possível reduzir o valor de a_n utilizando o parâmetro b de a_m, mas, neste caso, a expressão deixa de ter significado pois o termo de normalização não se refere ao mesmo cenário de propagação que a_m e a_p (por exemplo, no caso de um perfil com um total de 20 obstáculos, espaçados em média de 50 m, para os termos a_m e a_p a distância entre a EM e o TUE é 1000 m, enquanto que para a_n é apenas 200 m). Por este motivo, optou-se por desenvolver uma nova expressão para o cálculo de L_{msd}.

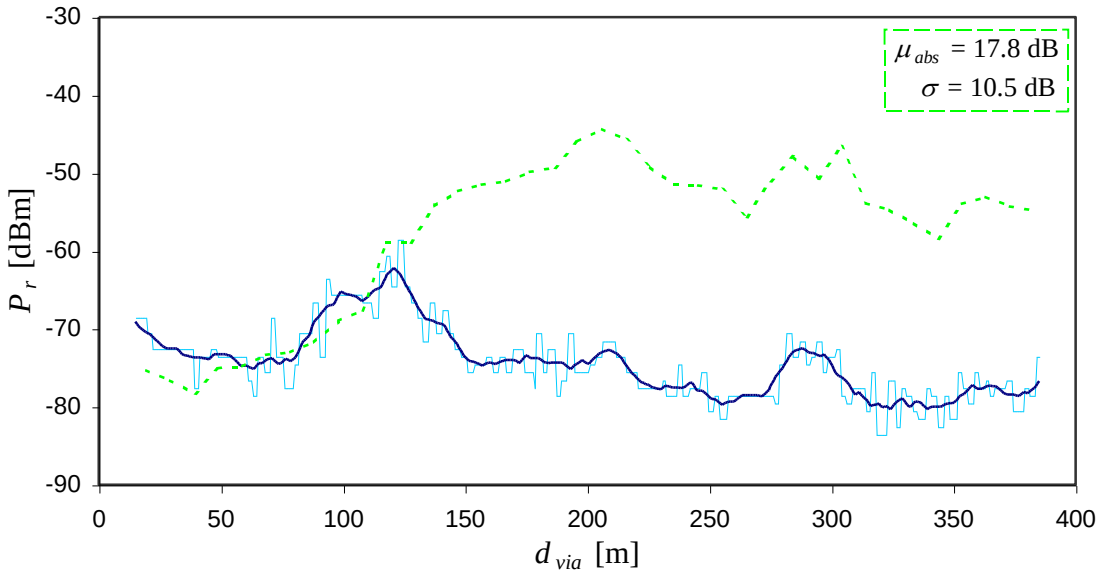


Fig. 3.12 - Rua de S. Julião, L101A; cálculo de L_{msd} de acordo com a equação (3.6).

III.3.2 Expressão em função de um parâmetro de obstrução

Para compreender em que situações é que cada um dos modelos é mais adequado, começaram por se analisar os desempenhos individuais dos modelos de Vogler e de Xia and Bertoni para as ruas da Baixa Lisboeta, com as estações L101A e L031B. Convém recordar que estes modelos dizem respeito, apenas, ao termo da atenuação sobre os edifícios. No percurso desde o TUE até à EM recorre-se ao traçado de raios, igual para os dois modelos.

Estação Base L101A

Verificou-se que o modelo de Xia and Bertoni permite prever correctamente o sinal emitido a partir da estação L101A. Este resultado não surpreende, pois, como já foi referido, esta estação encontra-se nas condições ideais de aplicação do modelo. Constatou-se também que, em regra, os resultados melhoram ligeiramente ao considerar-se uma largura de feixe no plano vertical superior ao valor teórico referido pelo fabricante. Na Fig. 3.13 representa-se a potência recebida ao longo da Rua de S. Julião, podendo confirmar-se os bons resultados. A diferença entre a curva a traço-ponto e a curva a tracejado resulta de no segundo caso se ter considerado uma largura de feixe no plano vertical, LF_v, 6º superior (passou de 14º para 20º).

Pode verificar-se que, à medida que a EM se afasta da EB, e portanto o ângulo de saída dos raios é menor, a diferença entre considerar-se LF_v=14º e LF_v=20º aumenta. Isto compreende-se se se tiver em conta que esta EB tem uma inclinação vertical (para baixo) de 7º.

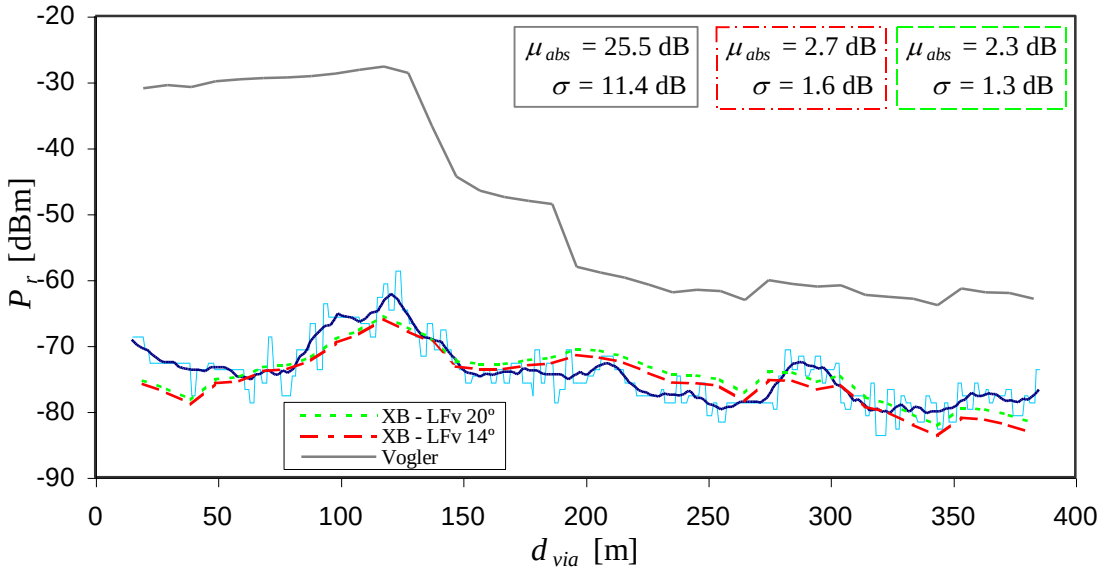


Fig. 3.13 - Rua de S. Julião, L101A; comparação entre as previsões dos modelos de Vogler e de Xia and Bertoni.

Como o diagrama de radiação real (após a montagem da antena) dificilmente apresenta a forma do diagrama teórico, considera-se ser legitima esta correcção da LF_v. Convém salientar, também, que a variação do ganho no plano vertical é determinada por um processo aproximado (expressão 2.41), que poderá não ser o mais correcto

O modelo de Vogler, por sua vez, tende a subestimar demasiado o valor da atenuação. Em princípio, este comportamento resulta de se considerarem poucos edifícios: como a altura dos edifícios é praticamente constante e Δh_{base} é pequeno, os edifícios contribuem todos de igual forma para a atenuação, pelo que, ao contabilizar-se um máximo de 4 obstáculos se despreza uma contribuição importante dos restantes. No Fig. 3.14, Rua da Prata, pode verificar-se esta subestimação da atenuação por parte do modelo de Vogler. Salienta-se, uma vez mais, os bons resultados obtidos com o modelo de Xia and Bertoni, verificando-se que para esta rua, em que a distância à EB é maior, a diferença entre as curvas com LF_v=14º e LF_v=20º se acentua. Nos gráficos seguintes, considera-se que a antena da EB L101A tem uma largura de feixe vertical de 20º.

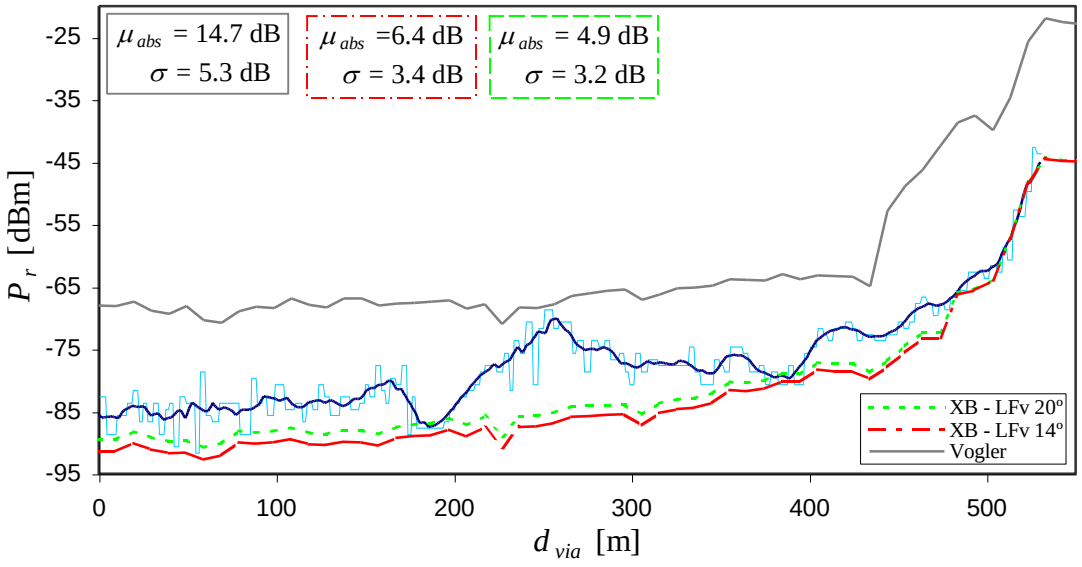


Fig. 3.14 - Rua da Prata, L101A; comparação entre as previsões dos modelos de Vogler e de Xia and Bertoni.

ESTAÇÃO BASE L031B

Para a estação L031B, verificou-se que em algumas situações o modelo de Vogler é o mais adequado, enquanto noutras as previsões do modelo de Xia and Bertoni apresentam menor erro.

Na Fig. 3.15 apresentam-se as curvas para a Rua do Ouro. Observa-se que esta é uma situação em que o modelo de Vogler prevê correctamente o sinal, sendo o modelo de Xia and Bertoni demasiado optimista.

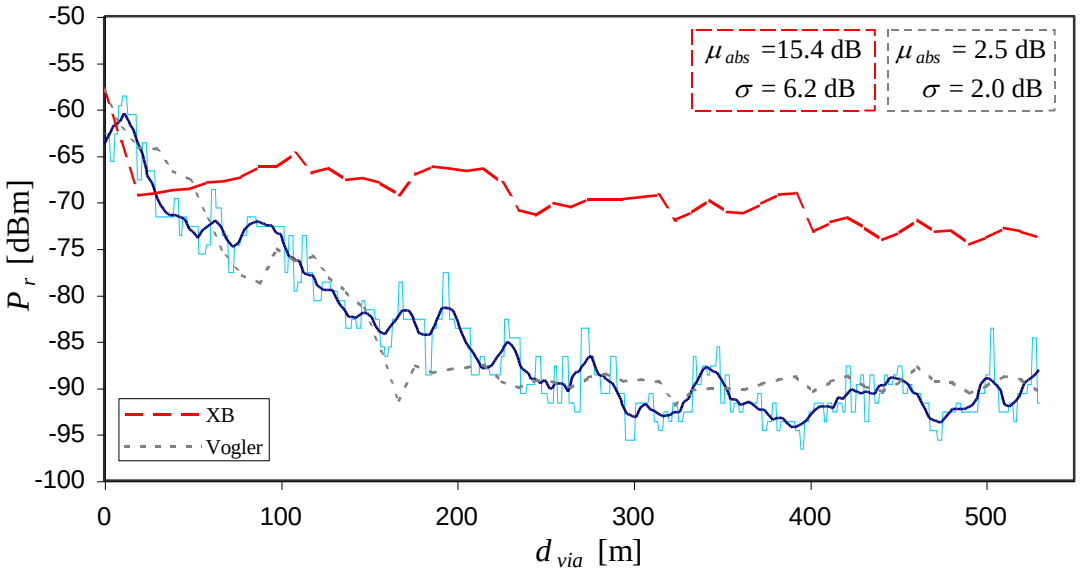


Fig. 3.15 - Rua do Ouro, L031B; comparação entre as previsões dos modelos de Vogler e de Xia and Bertoni.

Constatou-se, também, que numa mesma rua pode ocorrer uma transição do modelo mais adequado. É o que se passa, por exemplo, na Rua da Conceição, Fig. 3.16: o modelo de Vogler começa por ser o mais adequado e a partir dos 175 m o modelo de Xia and Bertoni acompanha melhor as medidas.

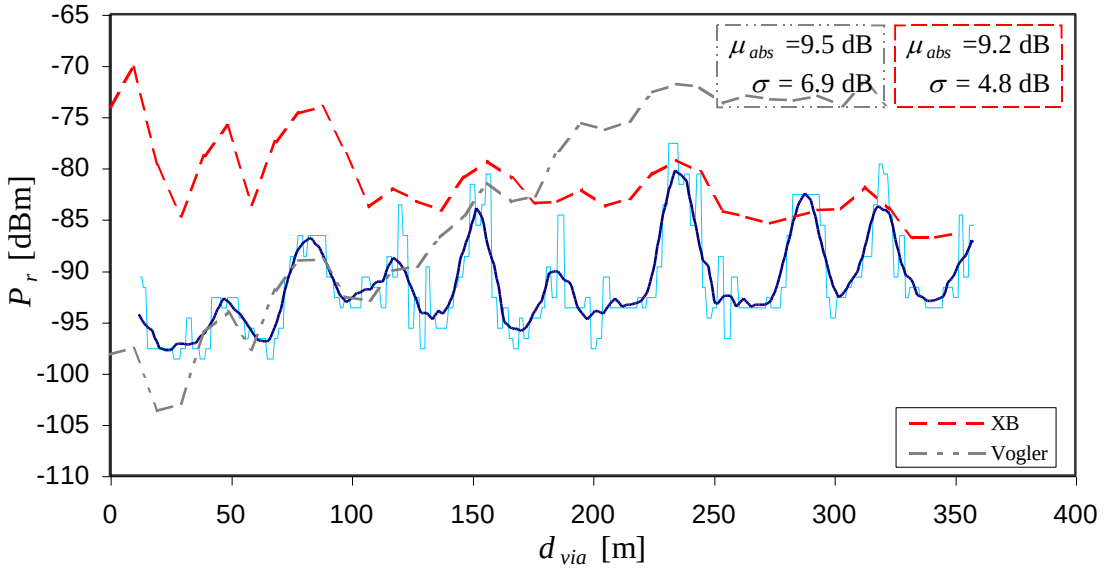
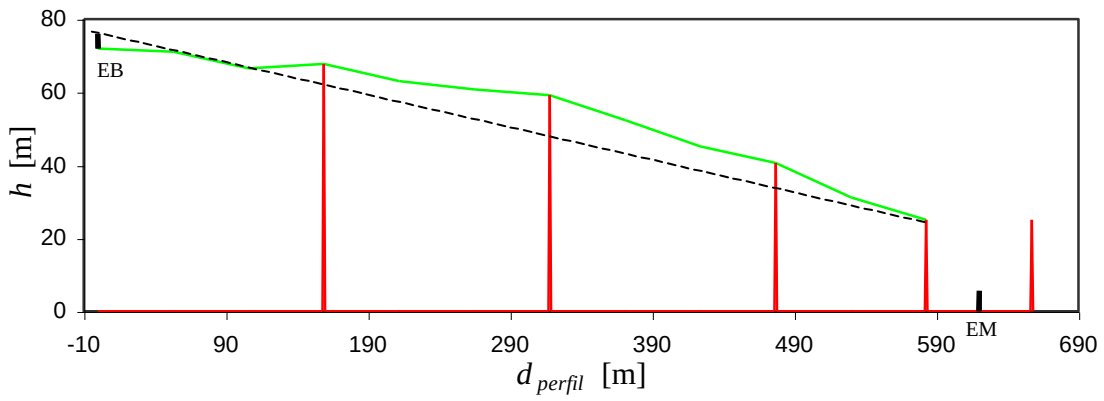
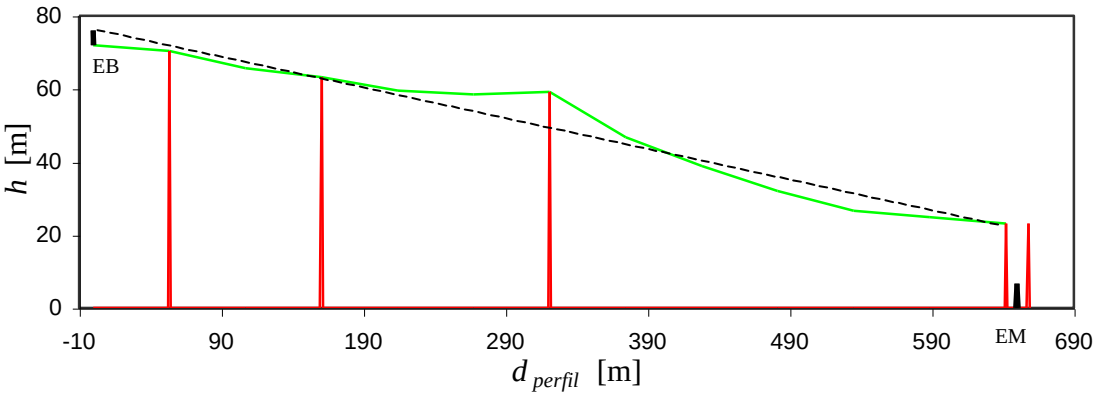


Fig. 3.16 - Rua da Conceição, L031B; comparação entre as previsões dos modelos de Vogler e de Xia and Bertoni.

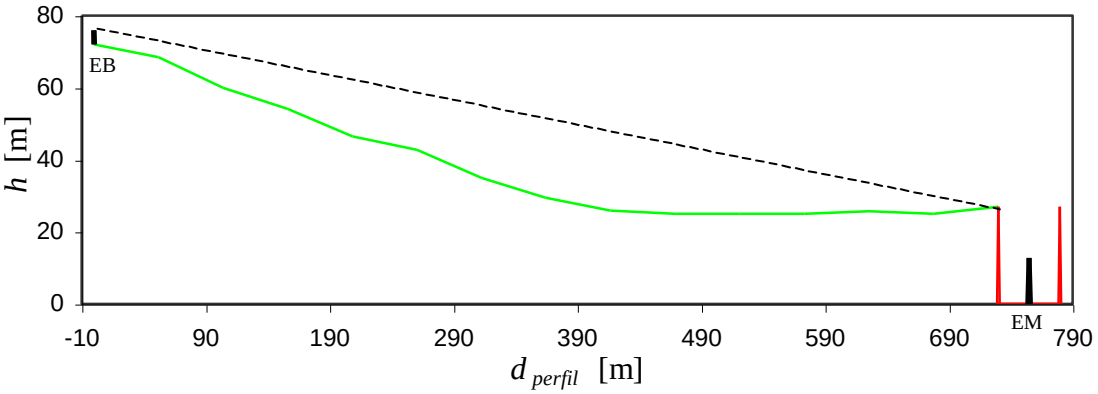
Para justificar o diferente comportamento dos modelos, analisaram-se os perfis para as várias ruas. Na Fig. 3.17 apresentam-se 3 perfis entre a EB e a Rua da Conceição: no início, Fig. 3.17a, para a distância de 100 m, Fig. 3.17b, e no fim, Fig. 3.17c, da rua.



a) Inicio da rua



b) d_{via}=100 m



c) Fim da rua

Fig. 3.17 - Perfis entre a EB L031B e a Rua da Conceição.

Comparando os perfis, constata-se que os cenários de propagação são consideravelmente diferentes: no início da rua, o canal de propagação encontra-se bastante obstruído pelos edifícios ao longo de todo o perfil, ou seja, o número de obstáculos principais é considerável; à medida que o móvel avança na rua, perfil 2, o número de obstáculos principais diminui e passam a localizar-se mais próximos da EB; no final da rua, a propagação faz-se, praticamente, em linha de vista desde a EB até ao TUE. Isto permite concluir que o modelo de Vogler é apropriado para a situação em que existe um pequeno número de edifícios (recordar que se estão a contabilizar, apenas, um máximo de 4 obstáculos) que obstruem consideravelmente o sinal. No final da rua este modelo subestima a atenuação pois só considera o último edifício (consequência de se impor β_n>-1.5 para o edifício n ser contabilizado).

Por sua vez, o modelo de Xia and Bertoni começa por subestimar a atenuação de propagação porque, ao tomar uma altura média para todos os edifícios, reduz a altura dos

obstáculos principais e, desta forma, despreza a sua importante contribuição. No final da rua, ao nivelarem-se os edifícios, reduz-se o parâmetro Δh_{base}, o que não conduz a uma má previsão pois, para valores de Δh_{base} elevados (como neste caso), o modelo é pouco sensível a este parâmetro. Assim, conclui-se que o modelo de Xia and Bertoni pode ser aplicado em perfis com variações da altura do terreno, desde que a contribuição dos vários obstáculos para a atenuação seja semelhante.

COMBINAÇÃO EM FUNÇÃO DE $\sigma_{h_{ed}}$

Começou por se combinar os dois modelos usando o desvio padrão da altura dos edifícios, $\sigma_{h_{ed}}$, através da seguinte expressão:

$$L_{msd[dB]} = \frac{1}{\sigma_{h_{ed}} + 10}\left(\sigma_{h_{ed}} \cdot L_{Vogler[dB]} + 10 \cdot L_{XB[dB]}\right) \tag{3.7}$$

em que L_{Vogler} é a atenuação determinada pelo modelo de Vogler e L_{XB} a atenuação determinada pelo modelo de Xia and Bertoni. Esta expressão está centrada em $\sigma_{h_{ed}} = 10$ m pois para a EB L101A verifica-se $\sigma_{h_{ed}} < 3$ m e para a EB L031B tem-se $\sigma_{h_{ed}} > 17$ m. Assim, quanto maior a diferença entre as alturas dos edifícios, maior será a importância do modelo de Vogler e, quanto mais plano for o perfil, maior a contribuição do modelo de Xia and Bertoni.

No entanto, esta combinação não se mostrou adequada. Na Fig. 3.18 apresenta-se o resultado para a Rua de S. Julião com a EB L031B. Aqui, à semelhança do que se passa na Rua da Conceição (ruas paralelas), os perfis começam por estar bastante obstruídos pelos edifícios, enquanto que no fim da rua a propagação faz-se praticamente em linha de vista até ao TUE. Apesar da obstrução diminuir à medida que o móvel percorre a rua, o desvio da altura dos edifícios mantém-se praticamente constante, cerca de 17 m, pelo que o modelo de Vogler é sempre o mais contabilizado. Pode verificar-se, também, que a transição entre os modelos deve ser rápida.

Conclui-se, portanto, que esta expressão não proporciona a correcta transição entre os modelos. De seguida apresenta-se uma nova expressão, que se mostrou adequada.

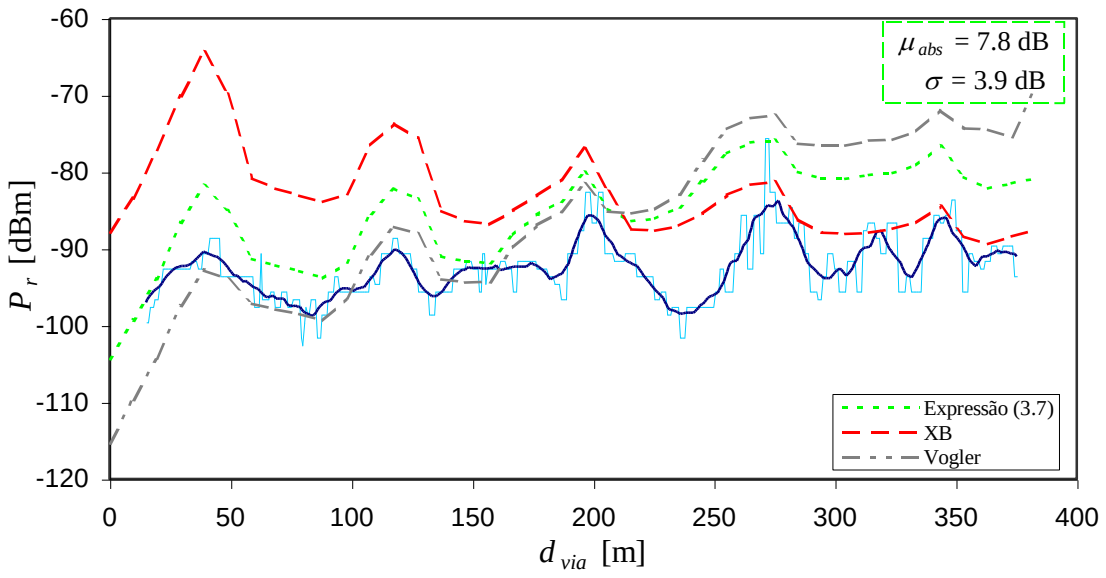


Fig. 3.18 - Rua de S. Julião, L031B; cálculo de L_{msd} através da expressão (3.7).

COMBINAÇÃO EM FUNÇÃO DE $\overline{\beta_e}$

Tendo concluído que a adequação dos dois modelos não depende do desvio da altura dos edifícios, mas sim do grau de obstrução que estes exercem à propagação do sinal entre a antena da EB e o TUE, tratou de se determinar um parâmetro que medisse este grau de obstrução. Com base no parâmetro β utilizado por Vogler (expressão 2.15), definiu-se o seguinte parâmetro adimensional:

$$\overline{\beta_e} = \left[\sum_{n=1}^{N-1} \beta_{e_n}\right] \Big/ N-1 \tag{3.8}$$

em que N é o número de obstáculos e β_{e_n} é calculado através da expressão de Vogler, com a diferença de que os espaçamentos $a_{n\text{-}1}$ e a_n e as alturas $h_{n\text{-}1}$ e h_{n+1} são referidas à antena da EB e ao TUE, respectivamente, ou seja, os parâmetros β_e são determinados em relação aos extremos do perfil. Na Fig.3.19 exemplifica-se o cálculo de β_e para o edifício j.

Deste modo, enquanto o parâmetro β_n de Vogler mede o grau de obstrução do edifício n localmente (desde o edifício imediatamente anterior até ao imediatamente seguinte), o parâmetro β_{e_n} quantifica a influência desse edifício na totalidade do percurso EB-TUE.

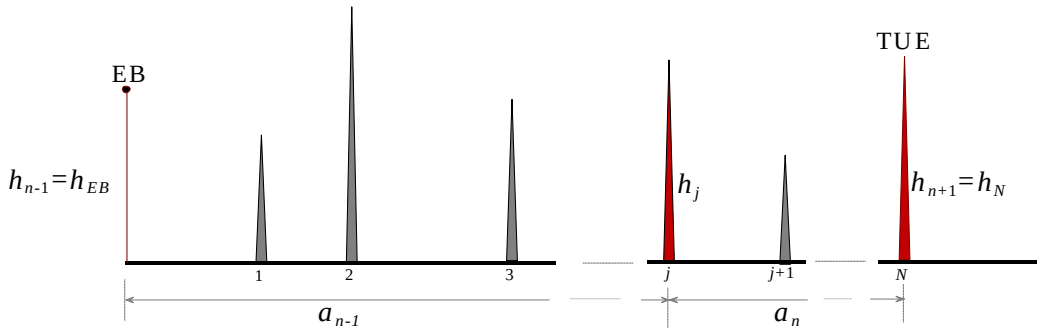


Fig. 3.19 - Determinação do parâmetro β_e para o edifício *j*, β_{ej}.

Na Fig. 3.20 apresentam-se os andamentos de $\overline{\beta_e}$ para os casos referidos nas Figs. 3.15, 3.16 e 3.18. Para cada distância d_{via}, $\overline{\beta_e}$ é determinado a partir do percurso directo entre a EB e a EM. Com base nestes gráficos, bem como nos das restantes ruas, concluiu-se que para $\overline{\beta_e} < -1.6$ o modelo de Xia and Bertoni é o mais adequado, enquanto que para $\overline{\beta_e} > -1.6$ o modelo de Vogler é o que prevê mais correctamente a atenuação. O facto do modelo de Vogler só ser importante para valores da obstrução dos edifícios superiores a um certo limiar reforça a hipótese inicial de só se considerarem os edifícios com β >-1.5 (por questões de convergência do próprio modelo).

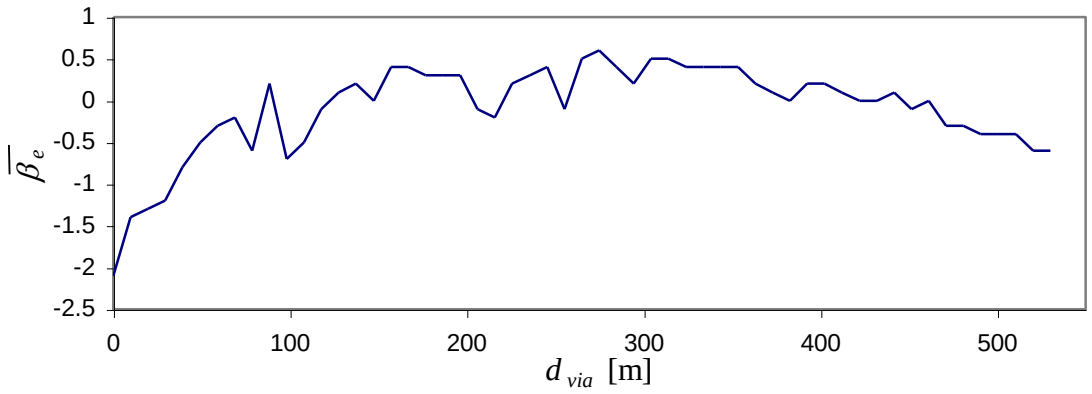
Com base nestes resultados, desenvolveu-se a seguinte expressão para o cálculo da atenuação sobre os edifícios:

$$L_{msd[dB]} = \left[1 - \mathrm{f}\left(\overline{\beta_e}\right)\right] L_{XB[\mathrm{dB}]} + \mathrm{f}\left(\overline{\beta_e}\right) L_{Vogler[\mathrm{dB}]} \tag{3.9}$$

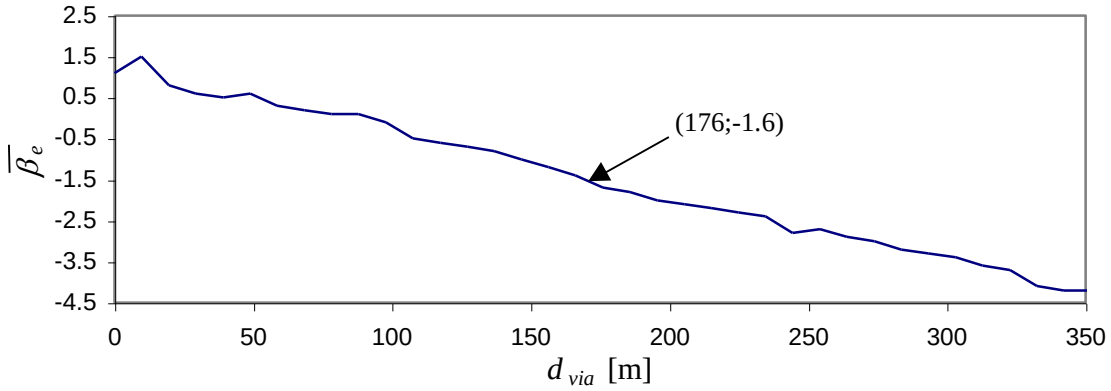
com:

$$\mathrm{f}\left(\overline{\beta_e}\right) = 0.5 + \frac{1}{\pi}\mathrm{arctg}\left(100\left(\overline{\beta_e} + 1.6\right)\right) \tag{3.10}$$

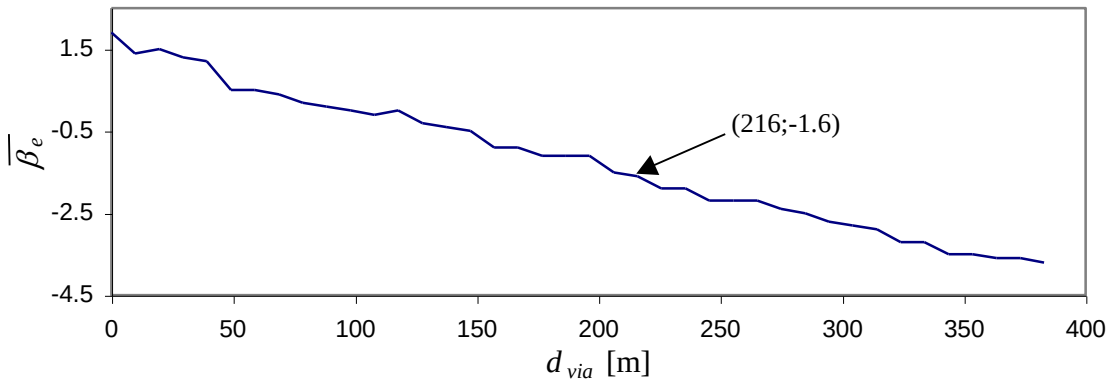
que, como se verifica na Secção seguinte, conduz a bons resultados.



a) Rua do Ouro - L031B



b) Rua da Conceição - L031B



c) Rua de S. Julião - L031B

Fig. 3.20 - Andamento de $\overline{\beta_e}$.

III.3.3 RESULTADOS FINAIS

Nesta Secção apresentam-se alguns dos resultados obtidos com a expressão (3.9). No Anexo D encontram-se os gráficos com a variação do sinal ao longo de todas as ruas

estudadas, estimados a partir da expressão (3.9). Nestas figuras indica-se, também, o valor da média do erro, μ.

Nas Figs. 3.21 e 3.22 podem observar-se os resultados para as ruas da Conceição e de S. Julião, respectivamente. Como se verificou anteriormente (Figs. 3.16 e 3.18, respectivamente), estas são 2 exemplos de ruas em que o modelo mais adequado muda: começa por se contabilizar o modelo de Vogler e após o ponto de transição (na Rua da

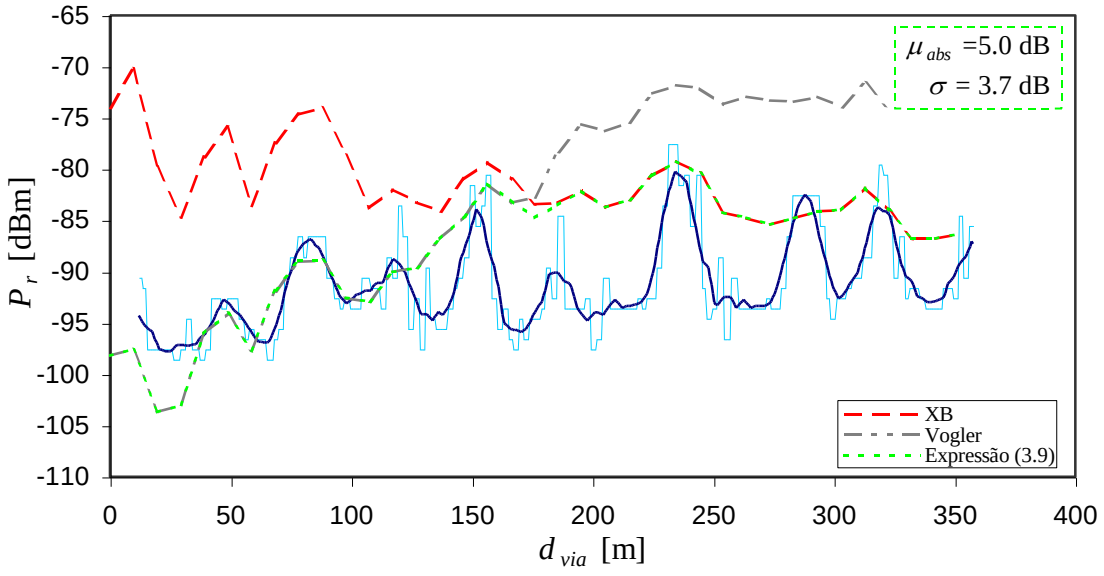


Fig. 3.21 - Rua da Conceição, L031b; cálculo de L_{msd} através da expressão (3.9).

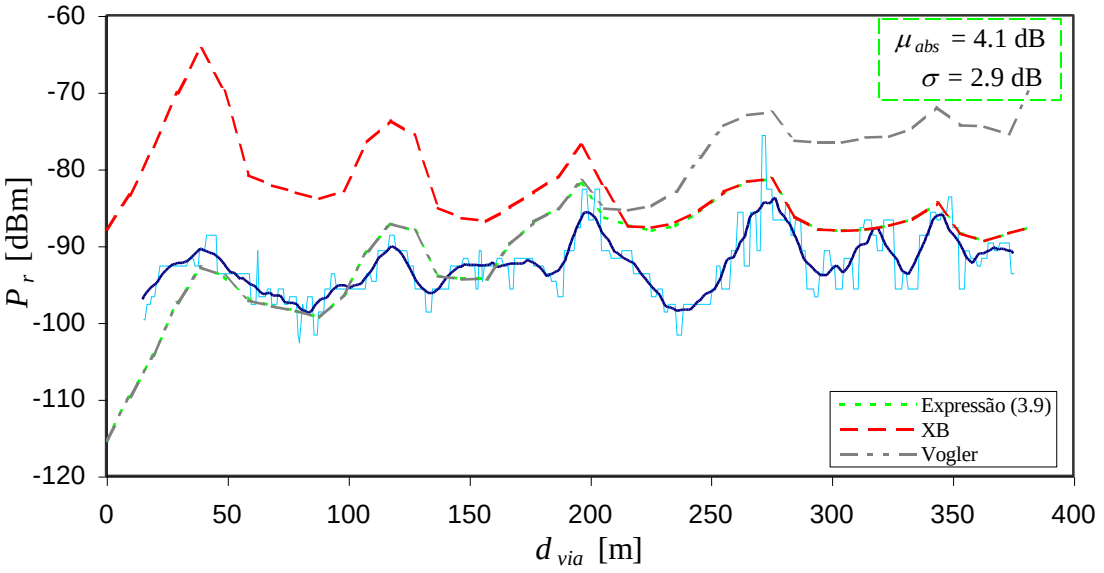


Fig. 3.22 - Rua de S. Julião, L031b; cálculo de L_{msd} através da expressão (3.9).

Conceição em d = 176 m e na Rua de S. Julião em d = 216 m) utiliza-se o modelo de Xia and Bertoni. Constata-se que a influência dos cruzamentos é mais visível nas curvas experimentais do que nas teóricas. Dado que a EB está situada a uma cota bastante mais elevada do que o móvel (diferença de 40 m), não era de esperar que o sinal se atenuasse tanto entre as ruas transversais. Apesar disto, os resultados são bons.

Na Fig. 3.23 representam-se as curvas para a Rua dos Correeiros, com a EB L031B. Este é um exemplo em que, apesar da cota do terreno variar bastante entre a EB e a EM, a obstrução exercida pelos edifícios é pequena. Através da Fig. 3.24 pode verificar-se que o parâmetro $\overline{\beta_e}$ é sempre inferior ao limiar -1.6 e consequentemente considera-se sempre o

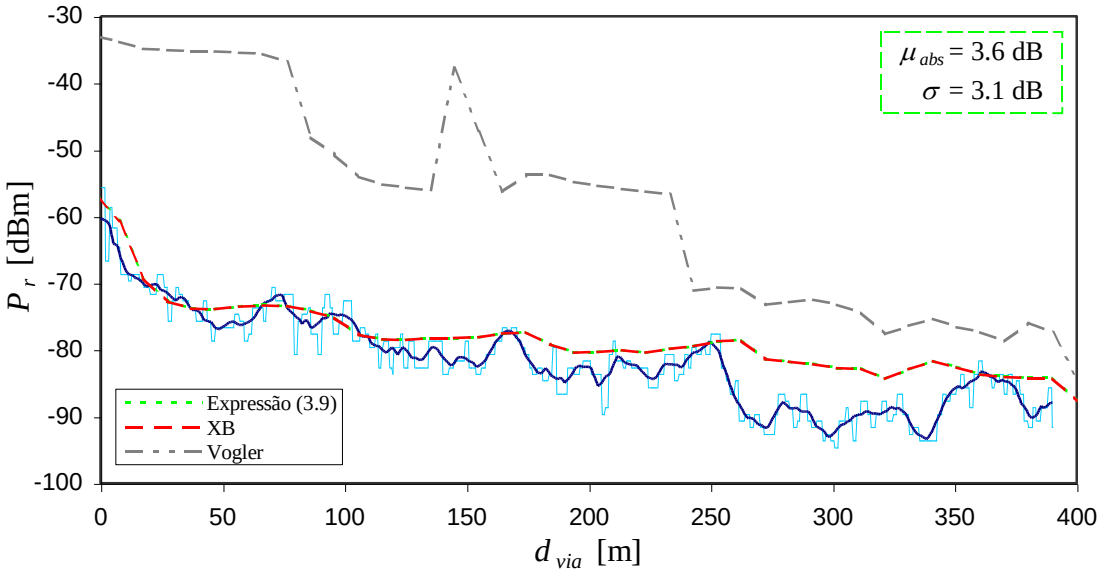


Fig. 3.23 - Rua dos Correeiros, L031B; cálculo de L_{msd} através da expressão (3.9).

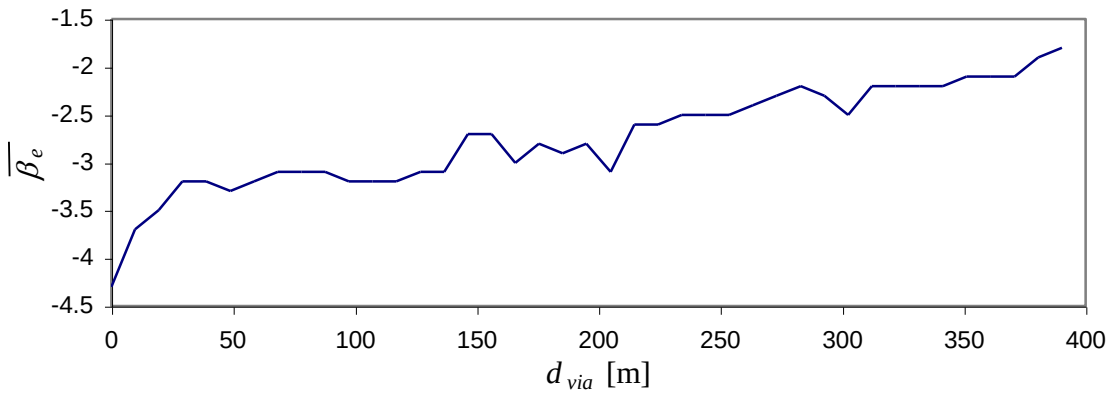


Fig. 3.24 - Rua dos Correeiros, L031B; andamento do parâmetro $\overline{\beta_e}$.

modelo de Xia and Bertoni, sendo os resultados bons. Da mesma forma, nas ruas paralelas a esta e mais afastadas da EB L031B, como a Rua da Prata e a Rua dos Fanqueiros, verifica-se que a obstrução é sempre inferior ao limiar. Por sua vez, nas ruas mais próximas da EB, como a Rua do Ouro, a obstrução é maior (o parâmetro $\overline{\beta_e}$ é superior a -1.6 - Fig. 3.20a) e apenas se contabiliza o modelo de Vogler.

Os valores médios obtidos para a média do erro, absoluto e relativo, e para o desvio padrão do erro, com base em todas as ruas da Baixa Lisboeta, foram de 3.8 dB, 0.2 dB e 2.8 dB, respectivamente. Tendo em conta que foram efectuadas algumas simplificações no modelo (para reduzir o tempo de cálculo) e dado que a informação contida nas bases de dados não tem grande precisão, pode-se afirmar que os resultados são francamente bons.

III.4. INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO

Nesta Secção, com base nas medidas realizadas em Campo de Ourique, desenvolve-se um estudo sobre a influência da vegetação. Começa por se verificar a adequação do modelo desenvolvido em III.3 e, em seguida, é apresentado um método para contabilizar a atenuação introduzida pelas árvores.

III.4.1 ADEQUAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO À ZONA DE CAMPO DE OURIQUE

Como foi referido, na zona de Campo de Ourique o terreno é mais irregular do que na Baixa Lisboeta e existem árvores em algumas ruas. Para verificar a adequação do modelo desenvolvido anteriormente, escolheu-se uma rua sem árvores, a Rua Azedo Gneco. Na Fig.3.25 apresentam-se as curvas da potência recebida. Pode verificar-se que o modelo de Xia and Bertoni prevê bastante bem o sinal (μ_{abs} e σ inferiores aos valores médios obtidos na Baixa), enquanto que o modelo de Vogler subestima a atenuação. Atendendo à Fig. 3.26, em que se representa o andamento do parâmetro $\overline{\beta_e}$, confirma-se a expressão obtida a partir dos resultados na Baixa Lisboeta, ou seja, para valores de $\overline{\beta_e}$ inferiores a -1.6 o modelo de Xia and Bertoni é o mais adequado.

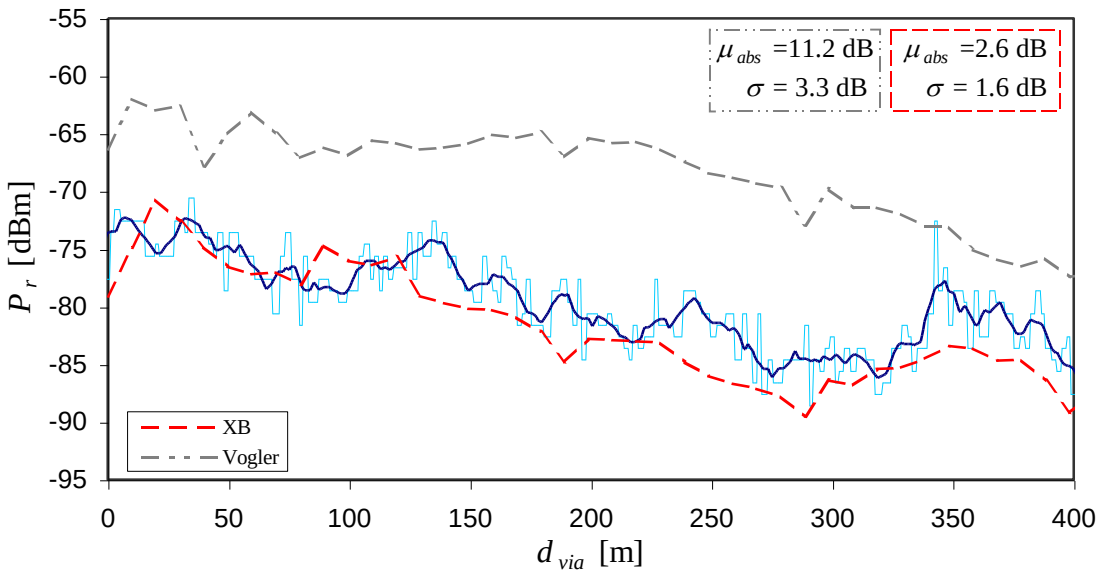


Fig. 3.25 - Rua Azedo Gneco, L079C; comparação entre as previsões dos modelos de Vogler e de Xia and Bertoni.

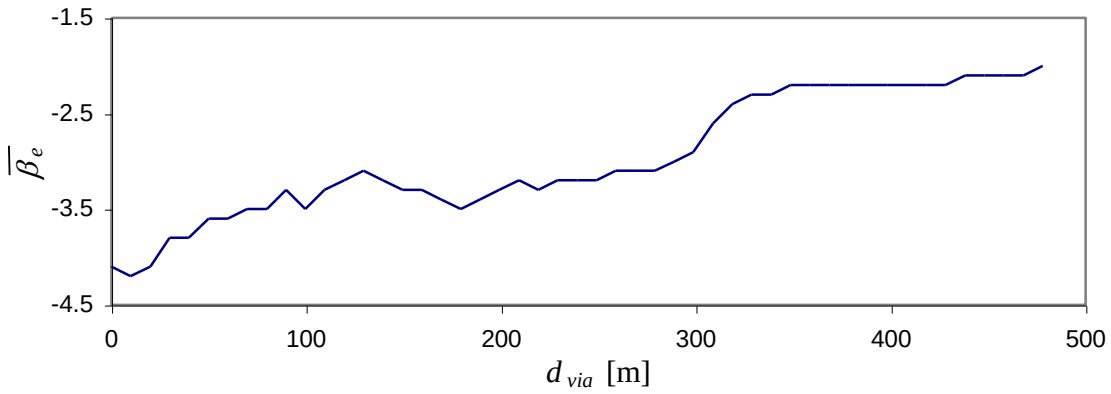


Fig. 3.26 - Rua Azedo Gneco, L079C; andamento do parâmetro $\overline{\beta_e}$.

Verificou-se que nas restantes ruas de Campo de Ourique o parâmetro $\overline{\beta_e}$ é sempre inferior a -1.6, pelo que, de acordo com (3.9), apenas se contabiliza o modelo de Xia and Bertoni. Nos gráficos seguintes apresentam-se somente os resultados para este modelo.

III.4.2 CONTABILIZAÇÃO DA ATENUAÇÃO INTRODUZIDA PELAS ÁRVORES

Começa por se analisar a Rua Ferreira Borges. Na Fig. 3.27 estão representadas as curvas experimental e teórica, sem contabilizar a atenuação introduzida pelas árvores. O sinal

começa por ser mais elevado, dado que no inicio da rua as árvores são raras; após o primeiro cruzamento (d = 50 m), a rua passa a ter árvores bastante densas em ambos os lados, o que provoca uma diminuição do nível médio do sinal. Pode verificar-se que a atenuação introduzida por estas árvores (diferença entre as previsões e as medidas) é de cerca de 10 dB, o que está de acordo com os valores registados em [DCG95].

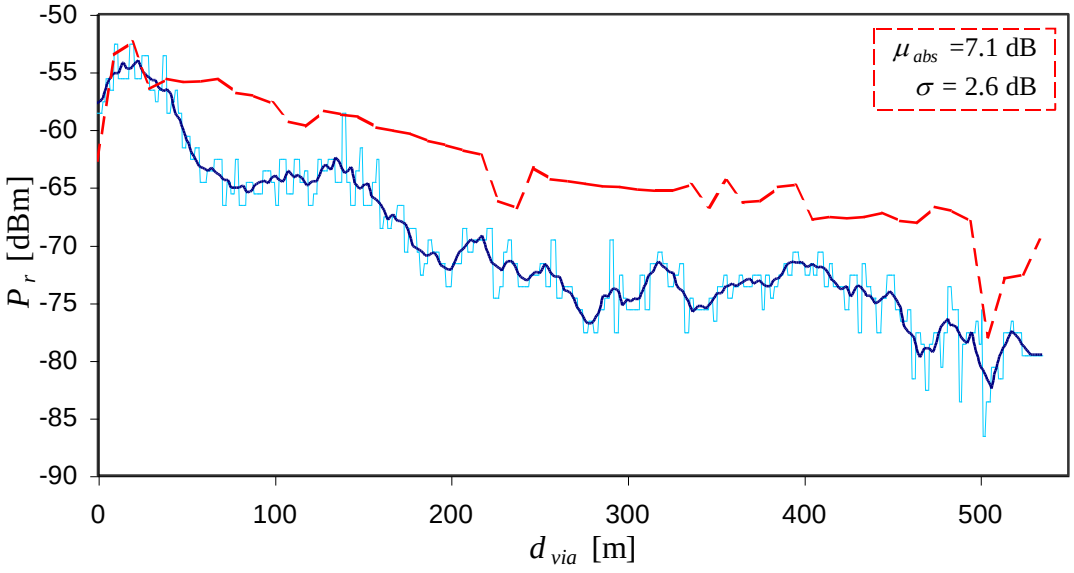


Fig. 3.27 - Rua Ferreira Borges, L079C; previsão sem contabilizar a atenuação introduzida pelas árvores.

De acordo com o método descrito em II.3.5, para calcular a atenuação introduzida pelas árvores determina-se o número de vezes que cada raio atravessa essa árvores e assume-se um valor constante para a atenuação por atravessamento (dependente da densidade da vegetação), expressão (2.39). Nesta expressão, as incógnitas são os valores da atenuação para cada tipo de vegetação. Após várias simulações, verificou-se que os valores de atenuação para vegetação pouco densa e muito densa que conduzem a melhores resultados são 1 e 2 dB, respectivamente. Na Fig. 3.28 comparam-se os resultados com e sem atenuação da vegetação. Pode constatar-se que o método desenvolvido contabiliza correctamente a atenuação da vegetação; a média do erro registou a maior redução, dado que a atenuação da vegetação é praticamente constante ao longo de toda a rua.

Outra rua em que se estudou o efeito das árvores foi a Rua Almeida e Sousa, Fig. 3.29. Nesta rua, em torno de d = 80 m o modelo sobrestima a atenuação porque não estão a ser contabilizadas difracções no lado oposto à EB (não existe cruzamento - ver Anexo B). Como

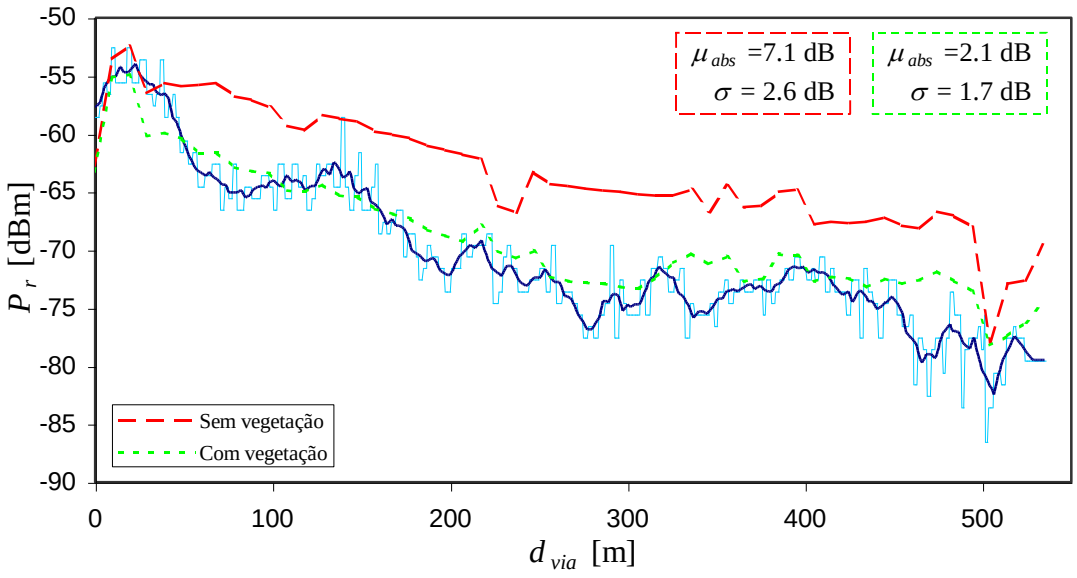


Fig. 3.28 - Rua Ferreira Borges, L079C; comparação entre as previsões sem e com atenuação das árvores.

já foi dito, na prática existem outros fenómenos de propagação, não contabilizados pelo modelo, que compensam a ausência de difracções nas esquinas. É também evidente a importância de se contabilizar a variação do ganho da EB no plano horizontal: apesar de a atenuação em espaço livre diminuir ao longo da rua, por a EM se estar a aproximar da EB, o nível médio da potência mantém-se praticamente constante pois o ganho da EB também diminui (o ganho no plano horizontal tem uma redução de 14.5 dB desde o início da rua até ao fim).

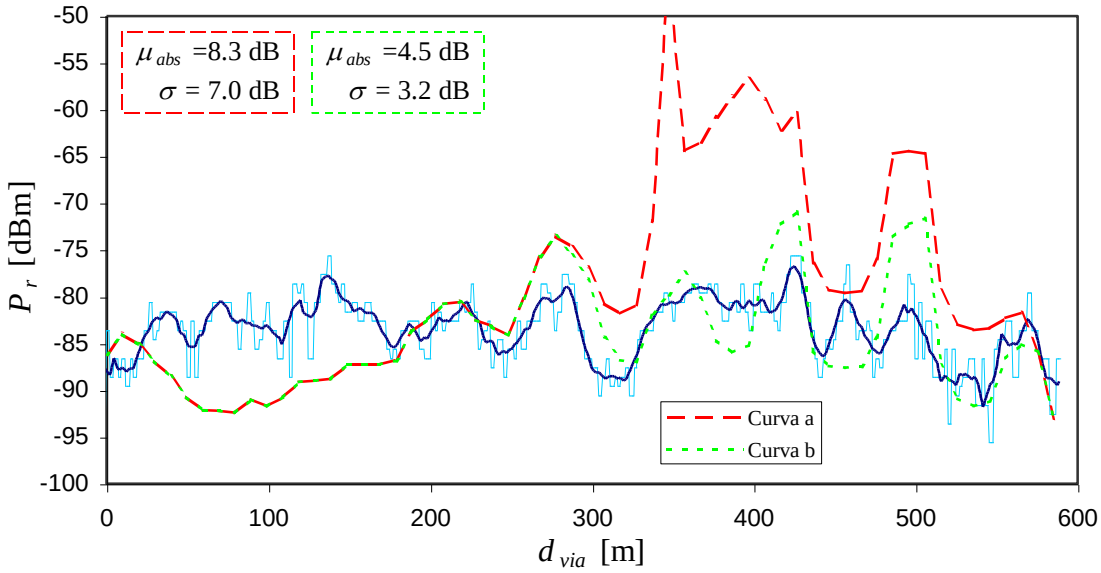


Fig. 3.29 - Rua Almeida e Sousa, L079C; comparação entre as previsões sem (a) e com (b) atenuação das árvores.

Dos 320 aos 420 m esta rua tem um jardim do lado da EB, o qual se encontra praticamente todo preenchido com árvores bastante densas. Começou por se observar o andamento do sinal sem considerar as árvores, Curva a. Verifica-se que, como a difracção no TUE se dá bastante longe da EM, o seu valor é baixo (próximo de 0 dB), daí resultando uma atenuação aparentemente excessiva para a vegetação (cerca de 25 dB). Apesar desta atenuação poder ser contabilizada pelo modelo (bastava considerar uma terceira densidade de vegetação, que atenuasse 25 dB os raios que passam no jardim), julga-se que o principal fenómeno de propagação que está em causa é diferente: como a vegetação é densa em todo o jardim, em principio o sinal propaga-se sobre as árvores e só se difracta próximo da EB (à semelhança da propagação em bosques [Par92]). Dado que o traçado de raios, tal como está implementado, não permite tratar o problema desta forma, experimentou-se a seguinte solução: assume-se que existe um edifício no centro do jardim, sobre o qual as ondas se propagam, e após a difracção no TUE o sinal é atenuado pela fila de árvores existente na periferia do jardim, tendo em atenção que as reflexões nas paredes desse edifício fictício devem ser anuladas. Para as constantes de atenuação utilizaram-se os valores obtidos na Rua Ferreira Borges, 1 e 2 dB. Apesar dos resultados serem satisfatórios, Curva b da Fig. 3.29, considera-se que este modo de propagação necessita de um estudo mais aprofundado (por exemplo, a meio do jardim, d = 390 m, o modelo é pessimista por, possivelmente, desprezar a contribuição dos raios que se propagam através do jardim). No cruzamento com a Rua Ferreira Borges (d = 500 m), o sinal teórico é superior ao experimental mas, no entanto, está de acordo com o sinal medido nessa mesma rua (d = 400 m na Fig.3.28).

Por último, analisou-se a Rua 4 de Infantaria. Na Fig. 3.30 comparam-se as medidas com o sinal estimado sem e com a atenuação da vegetação. Entre os 310 e os 410 m, do lado direito da rua existe um jardim (o mesmo que na Rua Almeida e Sousa). Como neste caso o jardim se encontra do lado oposto à EB, e também porque a EB está bastante alinhada com a Rua 4 de Infantaria, verifica-se que a vegetação tem pouca influência.

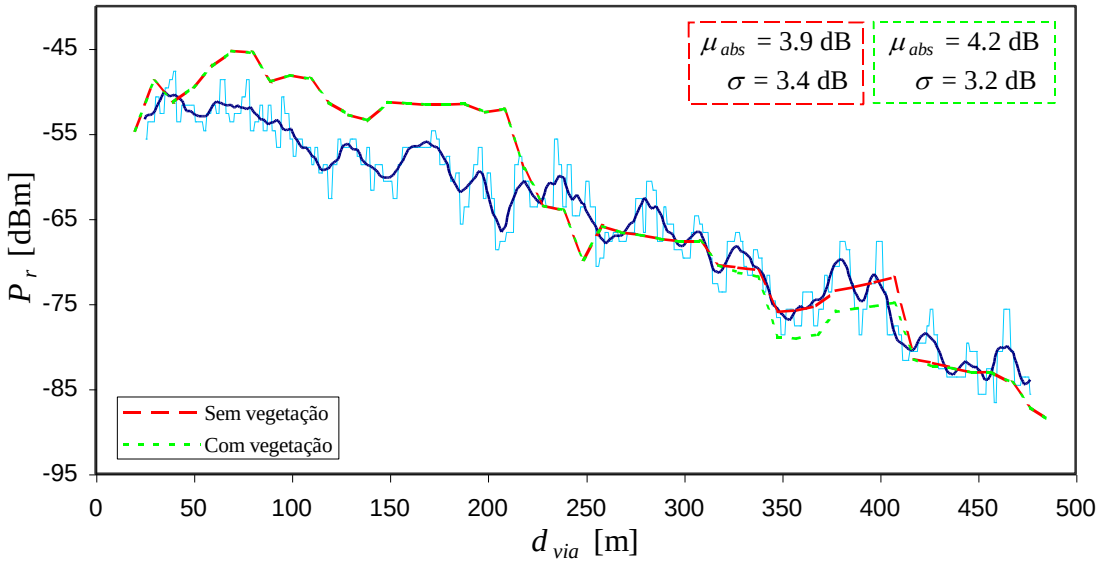


Fig. 3.30 - Rua 4 de Infantaria, L079C; comparação entre as previsões sem e com atenuação das árvores.

Como conclusão geral desta Secção, pode dizer-se que o método desenvolvido para contabilizar a atenuação introduzida pelas árvores é adequado no caso da Rua Ferreira Borges, em que os fenómenos de propagação são bem definidos, sendo necessário um estudo mais aprofundado no caso em que o sinal se propaga através de jardins. No Anexo D apresentam-se os gráficos para todas as ruas analisadas em Campo de Ourique.

IV. Influência dos cruzamentos

Neste capítulo desenvolve-se uma expressão matemática para descrever o andamento do sinal na proximidade de um cruzamento, em função dos parâmetros geométricos que caracterizam o cenário de propagação. Esta expressão é útil no caso em que não se dispõe de uma ferramenta de traçado de raios, a qual contabiliza naturalmente a influência dos cruzamentos, mas apenas de um modelo simplificado para estimar o valor médio do sinal. Embora seja simples de aplicar, esta expressão tem a desvantagem de só ser válida em algumas situações, podendo ser incorrecta caso nos afastemos das condições em que foi deduzida.

Começa por se descrever o cenário em que a expressão é válida. Em seguida, determina--se a dependência da atenuação com os vários parâmetros geométricos e, por último, aplica-se a expressão deduzida em algumas ruas da Baixa Lisboeta.

IV.1. CONDIÇÕES DE DESENVOLVIMENTO

IV.1.1 CENÁRIO ESTUDADO

Na Fig. 4.1 apresenta-se um exemplo do tipo de cruzamento que irá ser estudado. Indicam-se os vários parâmetros geométricos, com excepção da altura efectiva Δh_{base}, que já foi definida anteriormente (Fig.2.3). Para simplificar o estudo, admite-se que as larguras da rua principal, w_p, e da rua transversal, w_t, são iguais.

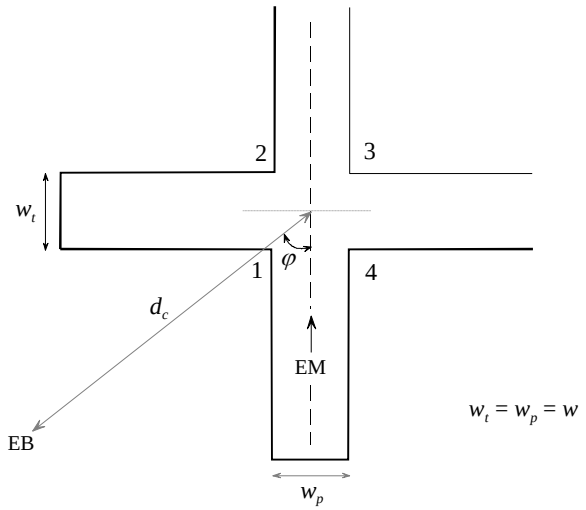


Fig. 4.1 - Exemplo de um cruzamento, com a indicação dos parâmetros geométricos.

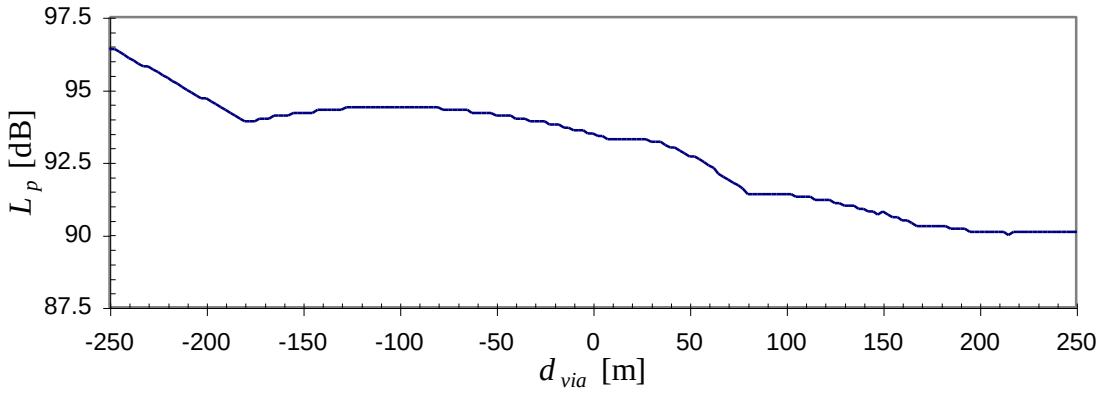
De modo a tornar o estudo independente da variação da cota do terreno e da altura dos edifícios e, assim, isolar melhor a contribuição dos cruzamentos, admite-se um cenário de propagação regular, composto por edifícios de igual altura, dispostos equiespaçadamente sobre terreno plano. Isto significa que apenas o modelo de Xia and Bertoni é contabilizado (o modelo de Vogler é adequado para perfis irregulares). Assume-se, também, que não existe qualquer tipo de vegetação ao longo das ruas. Como consequência, quando se varia, por exemplo, o ângulo de rua φ, as condições de propagação sobre os edifícios mantêm-se praticamente inalteradas, sendo a variação da atenuação resultante da alteração da direcção dos raios face às ruas que definem o cruzamento. Para tornar o estudo independente das antenas de emissão e recepção utilizadas, nas secções seguintes avalia-se a atenuação de propagação (e não a potência recebida, como no capítulo anterior).

Para o cálculo da atenuação por difracção múltipla sobre os edifícios, utilizaram-se os valores de 18 e 50 m para a altura média dos edifícios e para o espaçamento médio entre edifícios, respectivamente, valores típicos para a cidade de Lisboa. O valor utilizado para a altura tem pouco importância, uma vez que o parâmetro que irá ser analisado é a altura efectiva Δh_{base}. Mesmo para as situações de $\varphi = 0$ e $\varphi = 90^o$, assume-se que o sinal se propaga sobre os edifícios antes de entrar numa rua, ou seja, a EB e a EM nunca se encontram na situação de linha de vista.

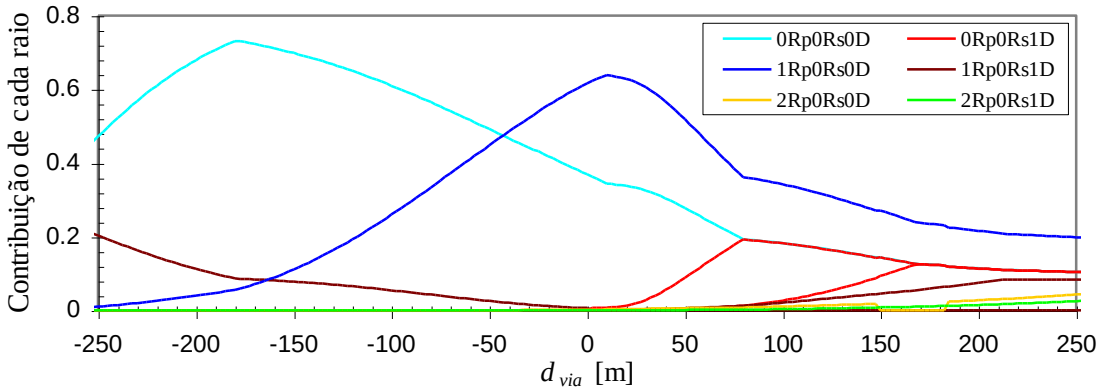
IV.1.2 CONTRIBUIÇÃO DOS VÁRIOS RAIOS

Nesta Secção analisa-se qual o número mínimo de raios que deve ser considerado para se obter uma estimativa correcta da atenuação. Para tal, estudam-se duas situações extremas, no que se refere à influência do cruzamento: o caso em que a EB está alinhada com a rua em que o móvel se desloca, $\varphi = 0^o$, e o caso em que a EB está alinhada com a rua transversal, $\varphi = 90^o$.

Na Fig. 4.2 apresenta-se o andamento da atenuação de propagação, Fig. 4.2a, e a contribuição individual dos vários raios (relativamente à potência total), Fig.4.2b, em função da posição da EM na rua principal (d_{via} = 0 m no centro do cruzamento), para o caso $\varphi = 0^o$. Na segunda figura, apenas os raios com uma contribuição superior a 5% em pelo menos um dos pontos representados são considerados.



a) Atenuação L_p

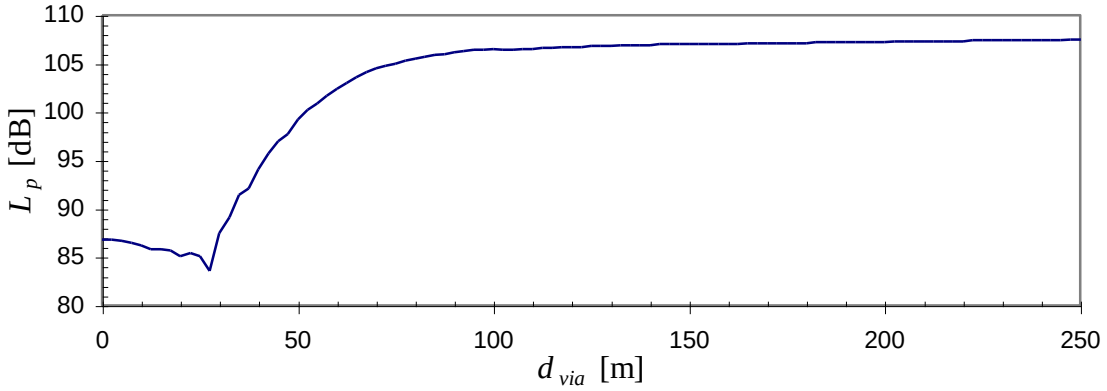


b) Contribuição individual dos principais raios

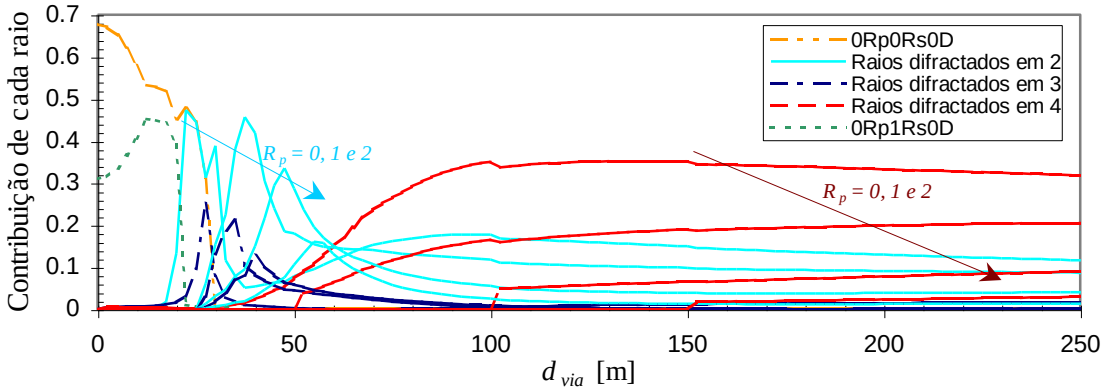
Fig. 4.2 - Análise da atenuação ao longo de uma rua: φ=0º, d_c=500 m, w=25 m e Δh_{base}=3 m.

Como se pode verificar, quando a EB está alinhada com a rua principal, a contribuição dos raios conduzidos pela rua transversal ($R_s \neq 0$) é nula. O raio directo ($0R_p0R_s0D$) começa por ser o mais importante; à medida que o móvel avança, os ângulos de reflexão na rua principal diminuem, o que faz com que a partir de certa distância a contribuição dos 2 raios com uma reflexão ($1R_p0R_s0D$) passe a ser dominante; após o cruzamento, os raios difractados nas arestas verticais passam a assumir alguma importância; para distâncias maiores, os raios com 2 reflexões tornam-se também importantes. Conclui-se assim que, à medida que o móvel se afasta da EB, o número de reflexões dos raios principais aumenta, tendendo-se para uma situação em que devem ser contabilizados todos os raios com um máximo de 1 difracção e 2 reflexões na rua principal. O facto da atenuação diminuir ligeiramente com a distância até estabilizar (a partir dos 200 m) resulta de no início da rua o móvel se encontrar na sombra da parede que define o início da rua (ver Fig. 4.1), sendo, por isso, elevada a atenuação por difracção no TUE.

Na Fig. 4.3 analisa-se, agora, o caso em que a EB está alinhada com a rua transversal, $\varphi = 90^o$. Os parâmetros w e d_c também foram alterados, face à figura anterior, para tornar mais visível a contribuição dos diferentes raios. Dada a simetria, apresentam-se as curvas apenas a partir do centro do cruzamento ($d_{via} = 0$ m).



a) Atenuação L_p



b) Contribuição individual dos principais raios

Fig. 4.3 - Análise da atenuação ao longo de uma rua: φ=90º, d_c=250 m, w=50 m e Δh_{base}=3 m.

Analisando o andamento da atenuação, constata-se que este é composto por 4 troços:

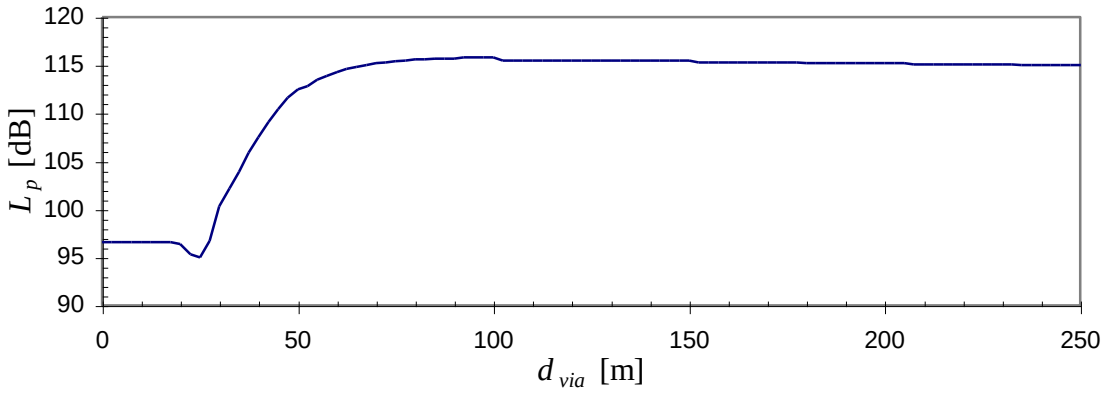
- um 1º troço, até ao final do cruzamento (25-30 m), em que a atenuação é praticamente constante. As principais contribuições são devidas ao raio directo e aos 2 raios com uma reflexão na rua transversal. A contribuição total dos raios com um máximo de uma reflexão é superior a 95%, o que significa que só a sua contabilização é suficiente para obter uma boa estimativa do sinal recebido. A contribuição dos raios difractados é desprezável neste troço;
- um segundo troço, até aos 60 m, em que a atenuação cresce rapidamente. A classe principal é composta pelos raios com uma difracção na aresta interior 2 (ver Fig. 4.1) e um

número de reflexões crescente com a distância; o número de reflexões é tal que o vértice do raio a seguir à aresta encontra-se na fronteira de sombra desta aresta, donde resulta que o coeficiente de difracção é próximo de 1. Verifica-se que os raios difractados na aresta 3 também têm uma contribuição razoável próximo do cruzamento e no final do troço os raios difractados em 4 começam a ser importantes;

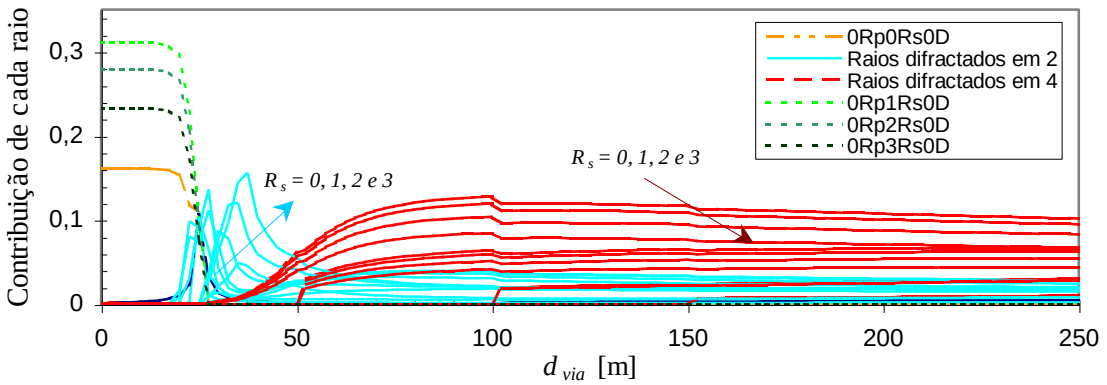
- um terceiro troço, até aos 110 m, em que a atenuação cresce mais lentamente. Através da Fig. 4.3b constata-se que neste troço a contribuição individual dos raios difractados na aresta 4 aumenta até estabilizar num valor máximo. A contribuição total dos raios com uma difracção e uma reflexão (no máximo) não chega a 50%, o que significa que para se estimar correctamente o sinal é necessário contabilizar também os raios com 2 reflexões;
- um quarto e último troço, a partir dos 110 m, em que a atenuação é praticamente constante. Pode verificar-se que, à medida que a distância aumenta, a contribuição dos raios com 1 e 2 reflexões torna-se mais importante, o que resulta de o ângulo de reflexão diminuir.

Caso se aumente a distância d_c na situação $\varphi = 90^o$, a sequência de troços da atenuação mantém-se, mas a contribuição dos raios com maior número de reflexões aumenta. Isto resulta dos ângulos de reflexão e, consequentemente, as atenuações por reflexão diminuírem. Na Fig. 4.4 apresentam-se os gráficos obtidos ao aumentar a distância d_c para 2000 m (distância máxima no estudo da secção seguinte). Pode verificar-se que, no primeiro troço, a contribuição dos raios com 2 e 3 reflexões na rua transversal aumentou consideravelmente, o mesmo se passando, em geral, nos outros troços. Este resultado é semelhante ao que se obtém caso se diminua a largura w das ruas. Aumentando a altura efectiva da EB, Δh_{base}, verifica-se também um aumento da contribuição dos raios com maior número de reflexões na rua transversal, embora a variação seja menos significativa do que a obtida ao aumentar d_c ou diminuir w.

Face aos resultados apresentados, conclui-se que a contabilização dos raios com um máximo de 2 reflexões por rua e uma difracção é suficiente para estimar o sinal na maioria das situações. No entanto, para alguns valores extremos dos parâmetros geométricos que se irão analisar na secção seguinte, a contribuição dos raios com 3 reflexões na rua transversal também é importante. Por esta razão, na secção seguinte contabilizam-se todos os raios com um máximo de 3 reflexões por rua e uma difracção.



a) Atenuação L_p



b) Contribuição individual dos principais raios

Fig. 4.4 - Análise da atenuação ao longo de uma rua: φ=90º, d_c=2000 m, w=50 m e Δh_{base}=3 m.

IV.2. EXPRESSÃO MATEMÁTICA

Para determinar a influência dos cruzamentos, compara-se a atenuação de propagação obtida ao longo de uma rua com cruzamento com a atenuação de propagação registada nessa rua sem cruzamento, mantendo as restantes condições. Na Fig. 4.5 representa-se a diferença entre as duas curvas da atenuação (atenuação com influência do cruzamento menos atenuação sem influência do cruzamento), L_c, para o caso φ=90º, d_c=500 m, w=25 m e Δh_{base}=3 m. A atenuação suplementar L_c deverá ser adicionada à atenuação de propagação L_p (expressão (2.1)).

Nas expressões que se apresentam em seguida, e caso não seja mencionado nada em contrário, as atenuações são expressas em dB, as distâncias em metros e os ângulos em graus.

Verificou-se que, independentemente dos parâmetros geométricos, a curva da diferença de atenuações apresenta sempre a mesma forma, tal como representada na Fig. 4.5: para posições da EM suficientemente afastadas do cruzamento, a diferença de atenuações L_c é aproximadamente constante, ΔL_{ext}; para distâncias d_{via} superiores a $-\Delta d_{ext}/2$ a influência do cruzamento torna-se mais significativa, registando-se um decrescimento exponencial de L_c; por fim, a partir de $-\Delta d_{int}/2$ a diferença de atenuações volta a estabilizar, ΔL_{int}, dado que, como a EM se encontra no interior do cruzamento, as condições de propagação são praticamente constantes. Para d_{via} positivo o comportamento de L_c é idêntico.

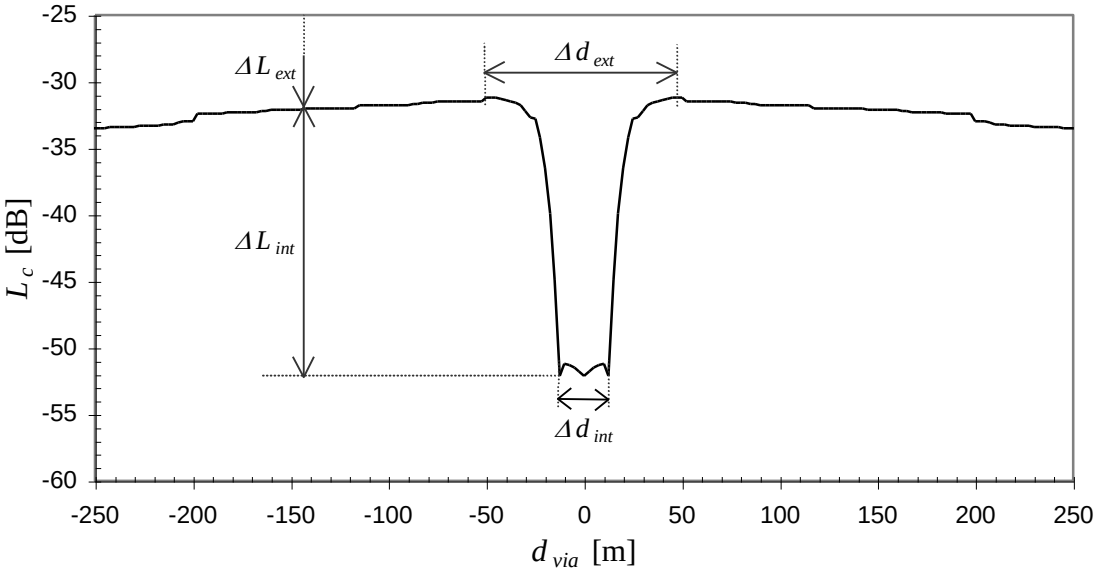


Fig. 4.5 - Diferença entre as atenuações de propagação com e sem influência do cruzamento; φ=90º, d_c=500 m, w=25 m e Δh_{base}=3 m.

Assim, conhecidos os valores de ΔL_{ext}, ΔL_{int}, Δd_{ext} e Δd_{int}, dependentes dos parâmetros geométricos, é possível reproduzir a curva de L_c. Para $-\Delta d_{ext}/2<d_{via}<-\Delta d_{int}/2$ aproxima-se a curva por uma exponencial quadrática negativa:

$$L_c = \Delta L_{ext} + \begin{cases} 0 & , |d_{via}| \geq \Delta d_{ext}/2 \\ -A_M \exp\left(-18\left(d_{via}/\Delta d_{ext}\right)^2\right) & , \Delta d_{int}/2 < |d_{via}| < \Delta d_{ext}/2 \\ \Delta L_{int} & , |d_{via}| \leq \Delta d_{\text{int}}/2 \end{cases} \tag{4.1}$$

em que a constante 18 resulta de se impor que o respectivo termo seja, praticamente, nulo para $d_{via}=\pm\Delta d_{ext}/2$ e A_M é determinada impondo a continuidade de L_c em $d_{via}=\pm\Delta d_{int}/2$:

$$\begin{aligned} & -A_M \exp\left(-18\left(d_{via}/\Delta d_{ext}\right)^2\right)\Big|_{d_{via}=\pm\Delta d_{int}/2} = \Delta L_{\text{int}} \quad \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \; A_M = -\Delta L_{int} \exp\left(4.5\left(\Delta d_{int}/\Delta d_{ext}\right)^2\right) \end{aligned} \tag{4.2}$$

Nas secções seguintes determinam-se as expressões de ΔL_{ext}, ΔL_{int}, Δd_{ext} e Δd_{int} em função dos parâmetros geométricos φ, d_c, w e Δh_{base}. Os gráficos são representados em função do ângulo da rua φ pois é este parâmetro que impõe, em primeiro lugar, a existência ou não de influência do cruzamento. Para determinar as expressões finais, Secção IV.2.4, assume-se que os parâmetros d_c, w e Δh_{base} são independentes entre si, isto é, a variação de L_c com um destes parâmetros é independente do valor dos outros. Isto porque, caso contrário o estudo tornava- -se demasiado complicado. Assume-se, também, a existência de um ambiente padrão, caracterizado por d_c=500 m, w=25 m e Δh_{base}=3 m. A dependência com os parâmetros geométricos é determinada fazendo variar cada um isoladamente, mantendo os restantes dois nos valores padrão.

IV.2.1 VARIAÇÃO COM A DISTÂNCIA

Para determinar a dependência com a distância, variou-se o parâmetro d_c entre os 200 e os 2000 m, o que permite abranger a generalidade dos casos no tipo de cenário estudado. Os parâmetros w e Δh_{base} têm os valores de 25 e 3 m, respectivamente (definem o ambiente padrão).

VARIÁVEL $\Delta L_{ext}(\varphi,d_c)$

Na Fig. 4.6 apresentam-se, a traço continuo, as curvas simuladas de ΔL_{ext} para vários valores de d_c, em função de φ. Pode verificar-se que, para φ próximo de 86º as curvas de ΔL_{ext} cruzam-se; a partir deste ângulo o móvel fica alinhado com a rua transversal, daí que, quanto

maior a distância, menores os ângulos de reflexão e consequentemente maior a influência dos raios conduzidos por essa rua.

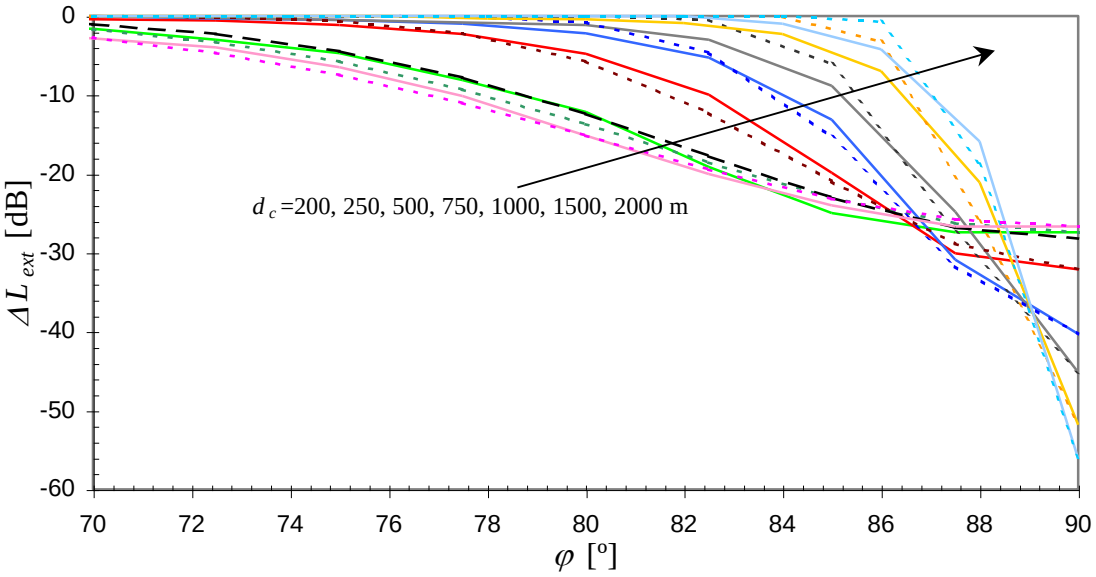


Fig. 4.6 - Curvas de $\Delta L_{ext}(\varphi)$, parametrizadas em d_c.

Atendendo ao andamento das curvas de ΔL_{ext}, decidiu-se aproximar este parâmetro pela seguinte expressão:

$$\Delta L_{ext}(\varphi, d_c) = -A_{Le}(d_c) \cdot \exp\left(-\frac{(\varphi - 90)^2}{2 \cdot \sigma_{Le}(d_c)^2} \right) \tag{4.3}$$

que se encontra representada na Fig 4.6, a tracejado, para os valores de $A_{Le}(d_c)$ e $\sigma_{Le}(d_c)$ que melhor aproximam as curvas simuladas. Recorrendo ao programa de cálculo MATEMÁTICA®, obtiveram-se então, com base no método dos mínimos quadrados, as seguintes expressões aproximadas para $A_{Le}(d_c)$ e $\sigma_{Le}(d_c)$:

$$A_{Le}(d_c)_{[dB]} = 12.52 - 0.02\, d_c^{\;0.25} + d_c^{\;0.5} \tag{4.4}$$

$$\sigma_{Le}(d_c)_{[º]} = 40.72 - 11.40\, d_c^{\;0.25} + 0.82 d_c^{\;0.5} \tag{4.5}$$

Na Fig. 4.7 comparam-se as distribuições de $A_{Le}(d_c)$ e $\sigma_{Le}(d_c)$ com as curvas que interpolam os seus valores (expressões (4.4) e (4.5)).

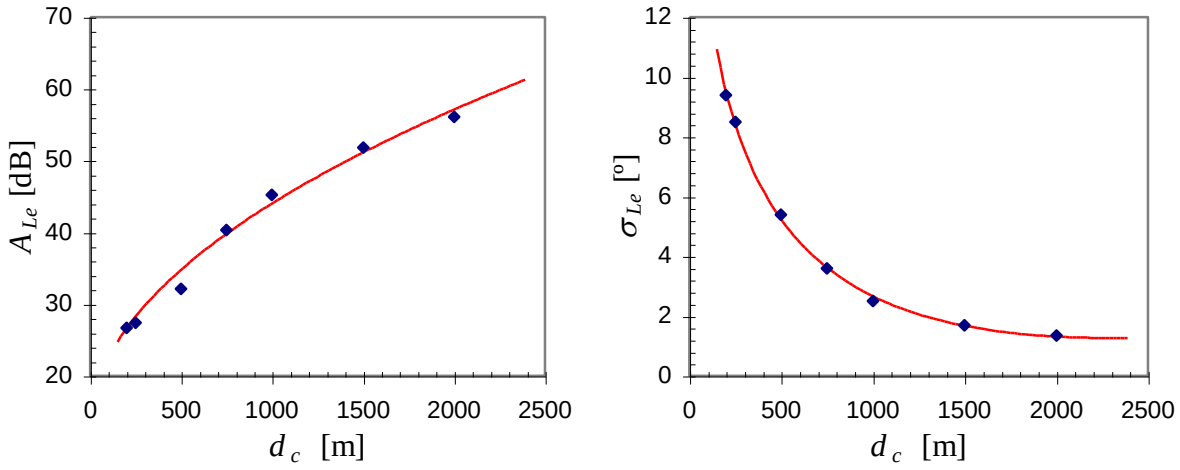


Fig. 4.7 – Interpolação de $A_{Le}(d_c)$ e $\sigma_{Le}(d_c)$.

Resumindo, através das expressões (4.3) - (4.5) pode determinar-se o valor de $\Delta L_{ext}(\varphi,d_c)$, válido para $200 \leq d_c \leq 2000$ m. As expressões de $A_{Le}(d_c)$ e $\sigma_{Le}(d_c)$ foram determinadas de modo a que a tendência das respectivas curvas se mantenha fora dos intervalos de validade; no entanto, a precisão dos resultados não é garantida neste caso.

VARIÁVEL $\Delta L_{int}(\varphi,d_c)$

Na Fig. 4.8 comparam-se as curvas de $\Delta L_{int}(\varphi)$ obtidas por simulação (a traço continuo) com as curvas aproximadas (a tracejado), para diferentes valores de d_c.

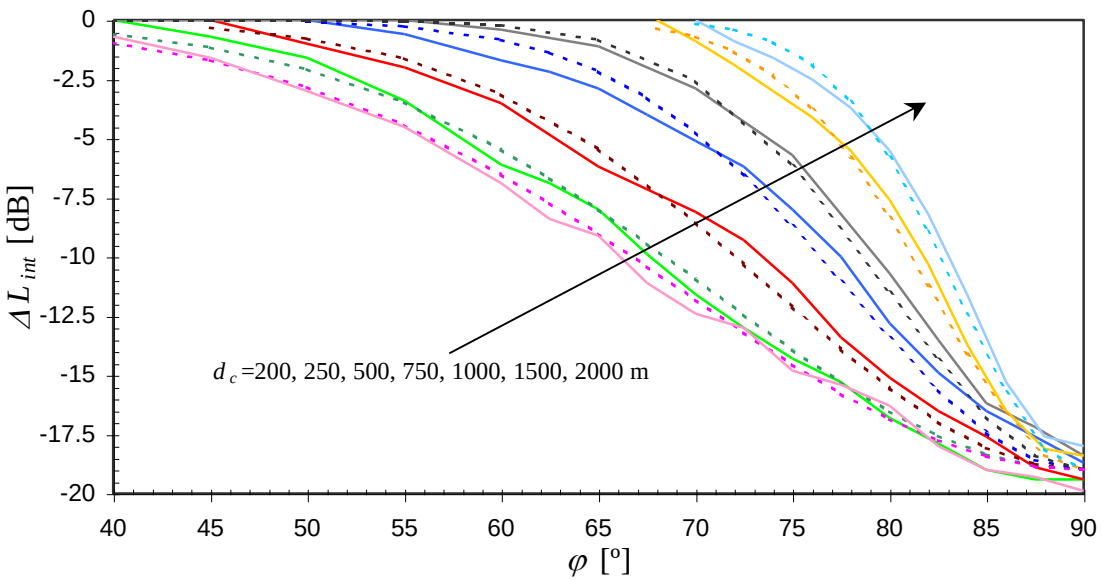


Fig. 4.8 - Curvas de $\Delta L_{int}(\varphi)$, parametrizadas em d_c.

As curvas aproximadas são traduzidas pela seguinte expressão:

$$\Delta L_{int}(\varphi, d_c) = -A_{Li} \cdot \exp\left(-\frac{(\varphi - 90)^2}{2 \cdot \sigma_{Li}(d_c)^2} \right) \tag{4.6}$$

em que a amplitude A_{Li} é constante e igual a 19 dB e $\sigma_{Li}(d_c)$ é calculado através da seguinte expressão interpolada:

$$\sigma_{Li}(d_c)_{[°]} = 51.94 - 10.27\, d_c^{\,0.25} + 0.51\, d_c^{\,0.5} \tag{4.7}$$

Na Fig. 4.9 representam-se, simultaneamente, os valores de $\sigma_{Li}(d_c)$ e o andamento da expressão (4.7).

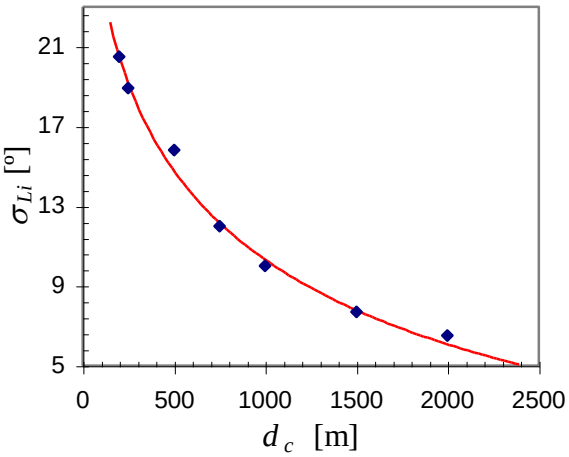


Fig. 4.9 - Interpolação de $\sigma_{Li}(d_c)$.

VARIÁVEL $\Delta d_{ext}(\varphi, d_c)$

Na Fig.4.10 apresentam-se as curvas de $\Delta d_{ext}(\varphi)$ obtidas por simulação e as curvas utilizadas para sua aproximação. As curvas aproximadas são definidas pela seguinte expressão:

$$\Delta d_{ext}(\varphi, d_c) = \begin{cases} A_{de}(d_c) & , \varphi \le \varphi_{de}(d_c) \\ A_{de}(d_c) \cdot \exp\left(-\frac{(\varphi - \varphi_{de}(d_c))^2}{2 \cdot \sigma_{de}(d_c)^2} \right) & , \varphi > \varphi_{de}(d_c) \end{cases} \tag{4.8}$$

em que os valores de $A_{de}(d_c)$, $\varphi_{de}(d_c)$ e $\sigma_{de}(d_c)$, para as várias distâncias d_c, são interpolados por:

$$A_{de}(d_c)_{[m]} = 683.90 - 171.64\, d_c^{\;0.25} + 12.38\, d_c^{\;0.5} \tag{4.9}$$

$$\varphi_{de}(d_c)_{[^o]} = 21.97 + 17.28\, d_c^{\;0.25} - 1.18\, d_c^{\;0.5} \tag{4.10}$$

$$\sigma_{de}(d_c)_{[^o]} = 7.85 - 58591.8\, d_c^{\;-2} + 1607.1\, d_c^{\;-1} \tag{4.11}$$

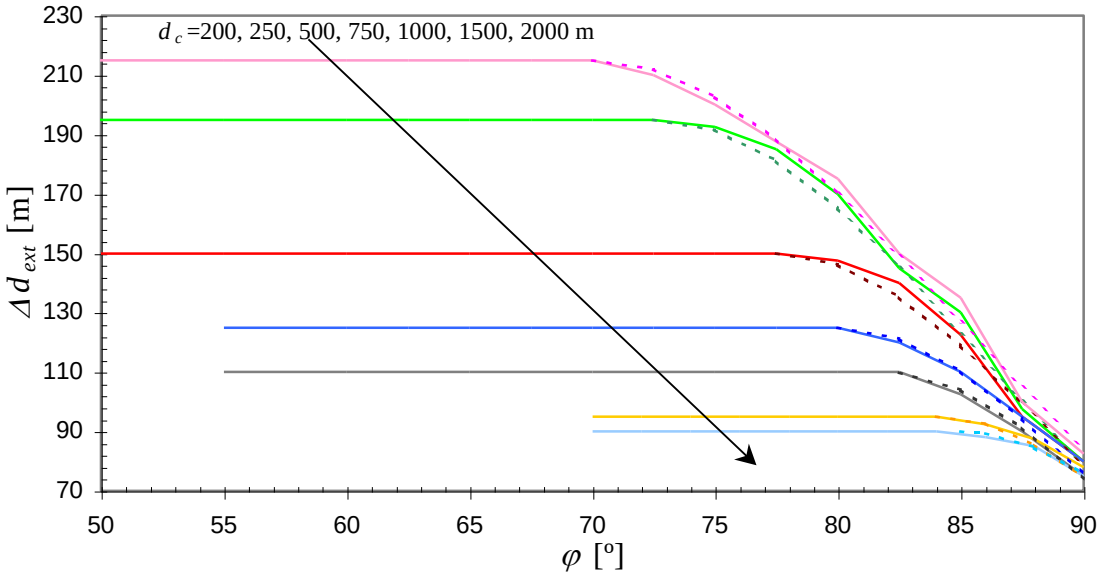
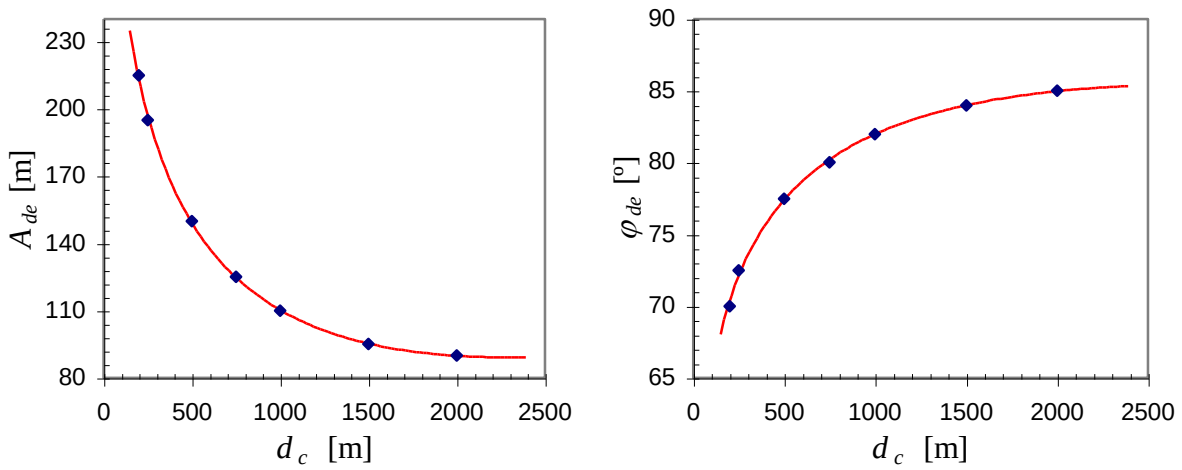


Fig. 4.10 - Curvas de $\Delta d_{ext}(\varphi)$, parametrizadas em d_c.

Não é necessário impor um valor mínimo de φ, abaixo do qual $\Delta d_{ext}(\varphi)$ deixa de ter significado por não haver influência do cruzamento, porque entretanto $\Delta L_{int}(\varphi)$ anula-se.

Na Fig. 4.11 apresentam-se os valores de $A_{de}(d_c)$, $\varphi_{de}(d_c)$ e $\sigma_{de}(d_c)$ e as respectivas interpolações (expressões (4.9) - (4.11)).



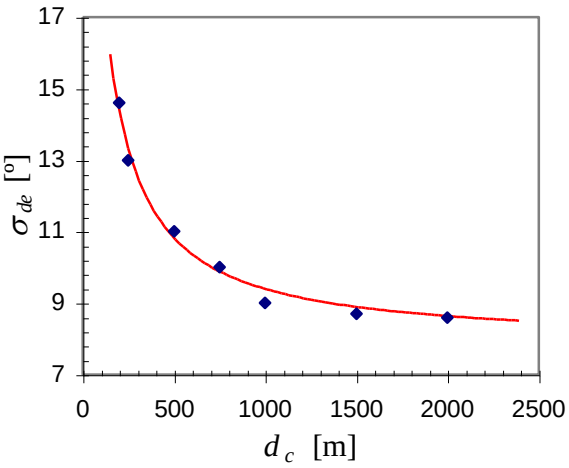


Fig. 4.11 - Interpolação de $A_{de}(d_c)$, $\varphi_{de}(d_c)$ e $\sigma_{de}(d_c)$.

VARIÁVEL $\Delta d_{int}(\varphi,d_c)$

Na Fig. 4.12 representam-se os andamentos de $\Delta d_{int}(\varphi)$ para as várias distâncias d_c. Face aos resultados, decidiu-se aproximar as curvas por uma recta, expressão (4.12).

$$\Delta d_{int}(\varphi, d_c) = \Delta d_{int}(\varphi) = -0.48\,\varphi + 68.57 \tag{4.12}$$

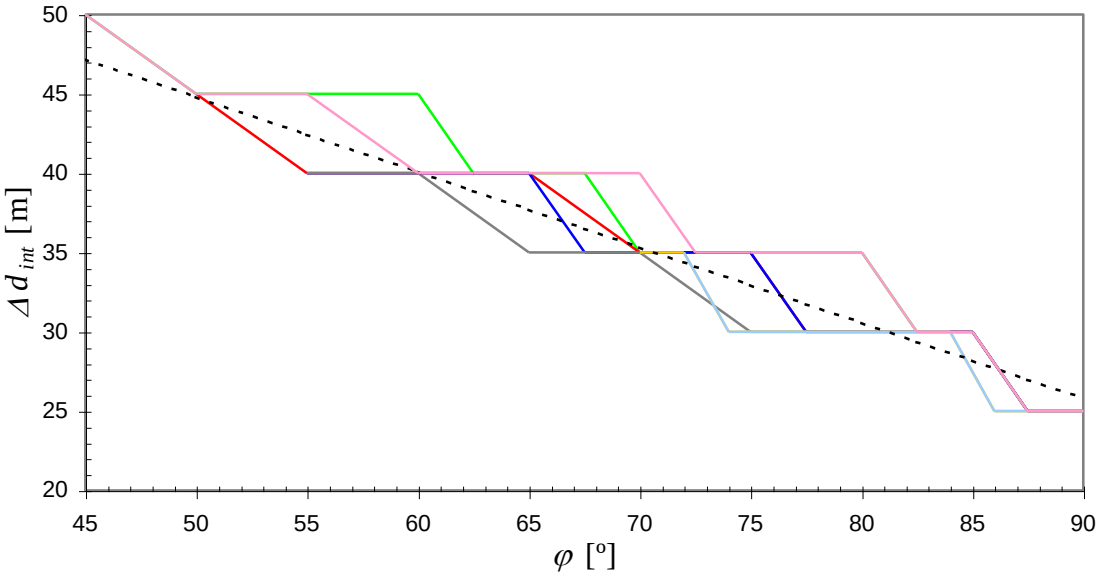


Fig. 4.12 - Curvas de $\Delta d_{int}(\varphi)$, parametrizadas em d_c.

IV.2.2 VARIAÇÃO COM A LARGURA DAS RUAS

A dependência com w foi determinada variando este parâmetro entre os 12.5 e os 50 m, fixando d_c e Δh_{base} em 500 m e 3 m, respectivamente.

O procedimento seguido nesta secção é igual ao utilizado na secção anterior, pelo que se passam a apresentar apenas as figuras e as fórmulas para cada uma das variáveis que definem L_c, mantendo-se os comentários já feitos.

VARIÁVEL $\Delta L_{ext}(\varphi,w)$

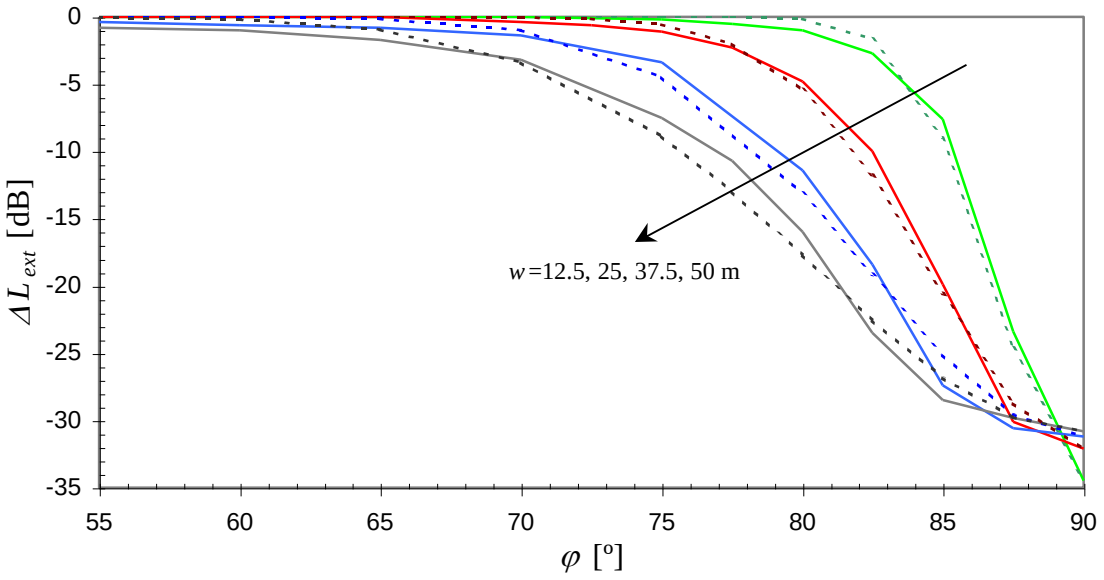


Fig. 4.13 - Curvas de $\Delta L_{ext}(\varphi)$, parametrizadas em w.

$$\Delta L_{ext}(\varphi,w) = -A_{Le}(w)\cdot\exp\left(-\frac{(\varphi-90)^2}{2\cdot\sigma_{Le}(w)^2}\right) \tag{4.13}$$

com :

$$A_{Le}(w)_{[dB]} = 62.10 - 21.63\,w^{0.25} + 3.70\,w^{0.5} \tag{4.14}$$

$$\sigma_{Le}(w)_{[º]} = -0.13 + 0.42\,w^{0.8} \tag{4.15}$$

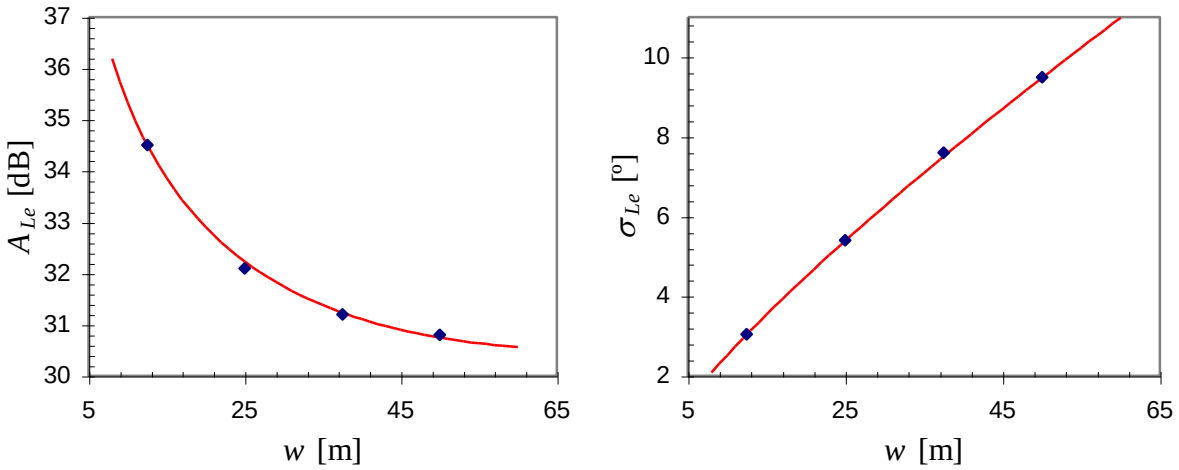


Fig. 4.14 – Interpolação de $A_{Le}(w)$ e $\sigma_{Le}(w)$.

VARIÁVEL $\Delta L_{int}(\varphi,w)$

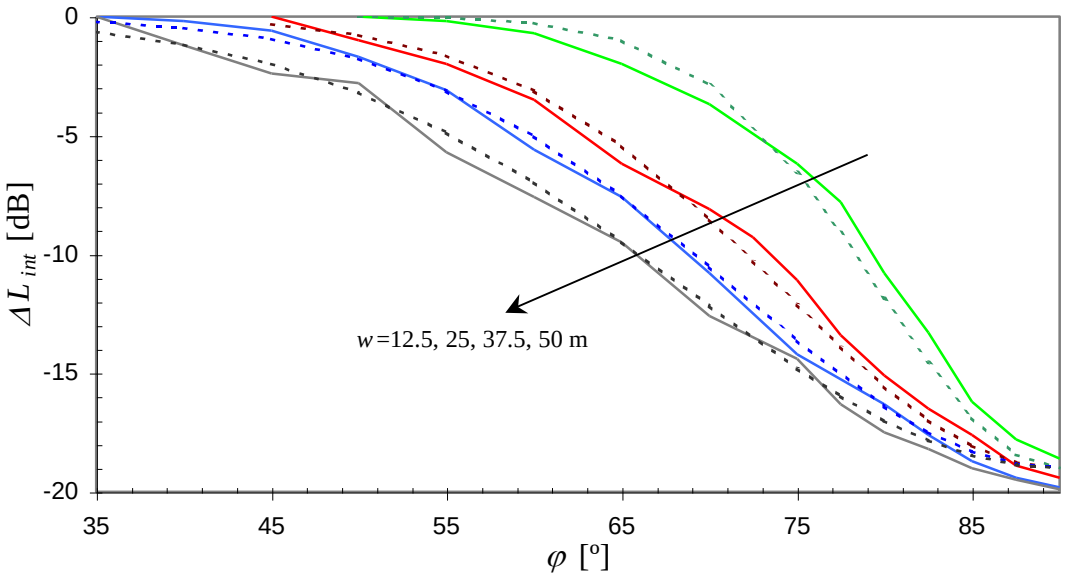


Fig. 4.15 - Curvas de $\Delta L_{int}(\varphi)$, parametrizadas em w.

$$\Delta L_{int}(\varphi,w) = -A_{Li} \cdot \exp\left(-\frac{(\varphi-90)^2}{2\cdot\sigma_{Li}(w)^2} \right) \tag{4.16}$$

em que A_{Li} é igual a 19 dB e $\sigma_{Li}(w)$ é dado por :

$$\sigma_{Li}(w)_{[º]} = -19.51 + 17.33\, w^{0.25} - 0.76\, w^{0.5} \tag{4.17}$$

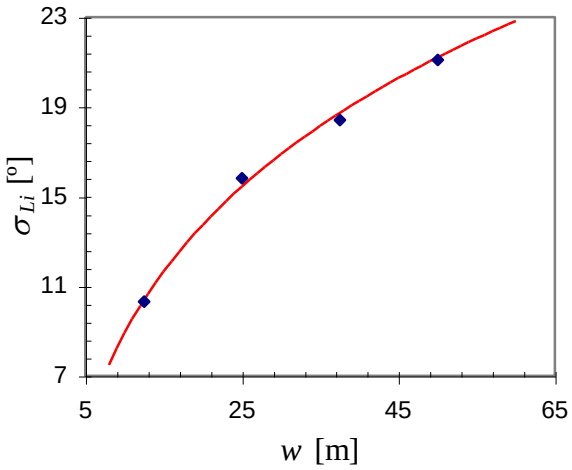


Fig. 4.16 - Interpolação de $\sigma_{Li}(w)$.

VARIÁVEL $\Delta d_{ext}(\varphi,w)$

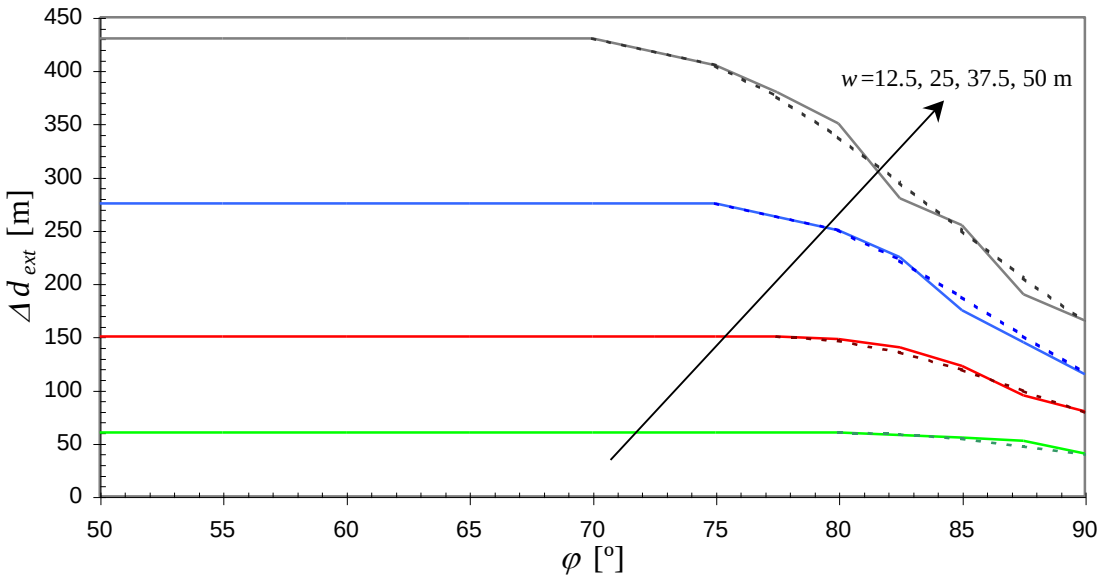


Fig. 4.17 - Curvas de $\Delta d_{ext}(\varphi)$, parametrizadas em w.

$$\Delta d_{ext}(\varphi,w)=\begin{cases} A_{de}(w) & ,\varphi \le \varphi_{de}(w) \\ A_{de}(w)\cdot \exp\left(-\dfrac{(\varphi-\varphi_{de}(w))^2}{2\cdot\sigma_{de}(w)^2}\right) & ,\varphi > \varphi_{de}(w) \end{cases} \tag{4.18}$$

com :

$$A_{de}(w)_{[m]} = 1.25 + 3.38\,w + 0.10\,w^2 \tag{4.19}$$

$$\varphi_{de}(w)_{[°]} = 80.63 - 0.01\,w - 0.004\,w^2 \tag{4.20}$$

$$\sigma_{de}(w)_{[°]} = 10.57 + 1.46 \cdot 10^{-3}\,w + 5.86 \cdot 10^{-7}\,w^4 \tag{4.21}$$

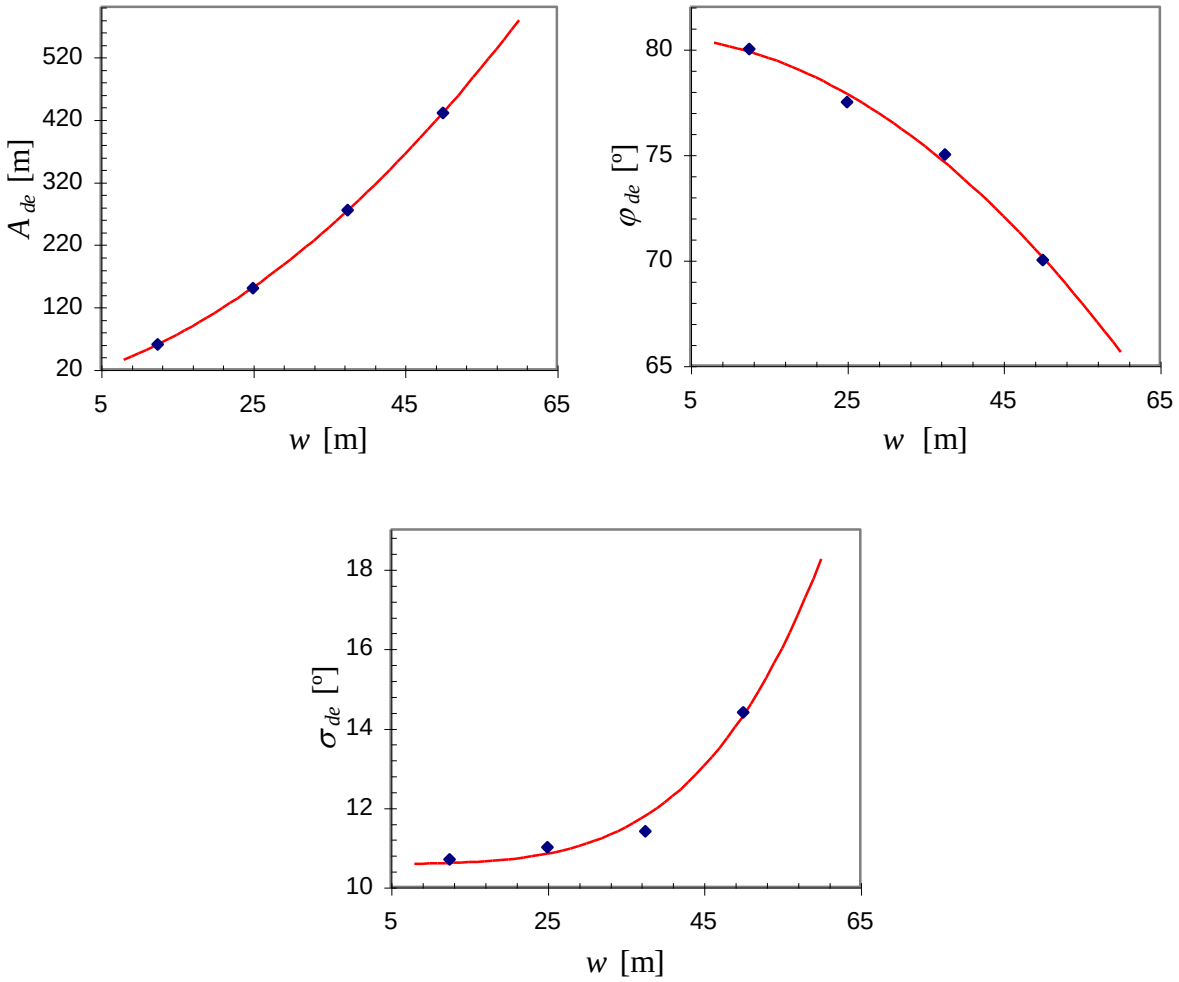


Fig. 4.18 - Interpolação de $A_{de}(w)$, $\varphi_{de}(w)$ e $\sigma_{de}(w)$.

VARIÁVEL $\Delta d_{int}(\varphi,w)$

Pode verificar-se que neste caso, Fig. 4.19, contrariamente ao que se passa com $\Delta d_{int}(\varphi,d_c)$, os coeficientes das rectas interpoladas dependem do parâmetro geométrico.

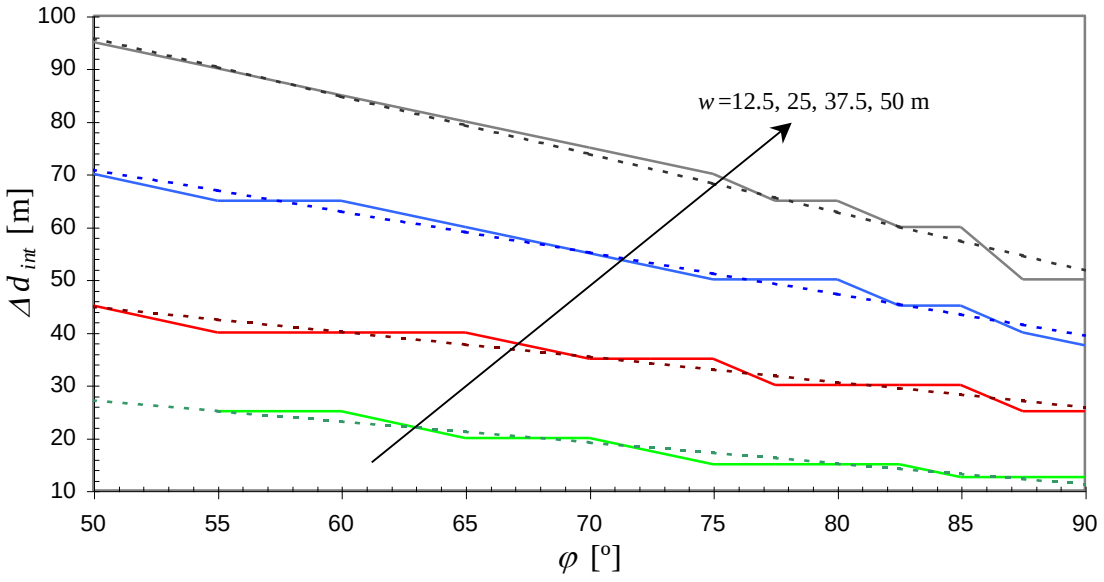


Fig. 4.19 - Curvas de $\Delta d_{int}(\varphi)$, parametrizadas em w.

$$\Delta d_{int}(\varphi, w) = a(w)\varphi + b(w) \tag{4.22}$$

com:

$$a(w)_{[m/^{o}]} = -0.38 + 4.43 \cdot 10^{-3}\, w - 3.80 \cdot 10^{-4}\, w^2 \tag{4.23}$$

$$b(w)_{[m]} = 29.73 + 0.91\, w + 0.03\, w^2 \tag{4.24}$$

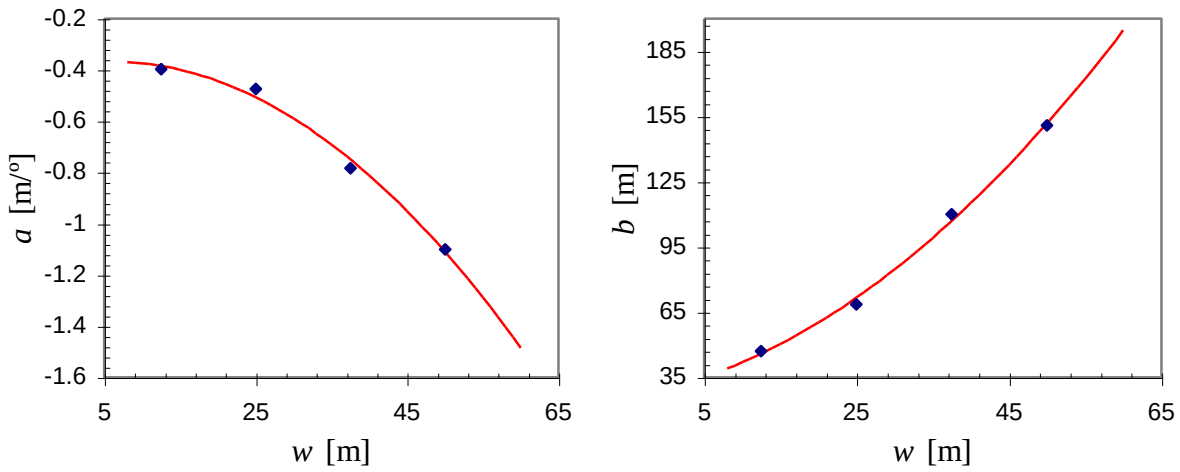


Fig. 4.20 - Interpolação de $a(w)$ e $b(w)$.

IV.2.3 VARIAÇÃO COM A ALTURA EFECTIVA DA ESTAÇÃO BASE

A dependência de L_c com Δh_{base} foi determinada variando este parâmetro entre os -7 e os 11 m, para valores de d_c e w de 500 m e 25 m, respectivamente. A validade da expressão até -7 m permite cobrir a maioria das instalações de antenas (da EB) no cenário estudado; além disso, para $\Delta h_{base} \leq -8$ m aplica-se o modelo de Xia [Xia96], o qual não foi aferido. Para Δh_{base} positivo impõe-se um máximo de 11 m porque, caso contrário, para distâncias pequenas (100 m, por exemplo, no caso da EB L101A) o modelo de Xia and Bertoni sai fora da sua gama de validade.

VARIÁVEL $\Delta L_{ext}(\varphi,\Delta h_{base})$

Na Fig. 4.21 apresentam-se as curvas de $\Delta L_{ext}(\varphi)$ simuladas (traço continuo) a par das curvas aproximadas (tracejado).

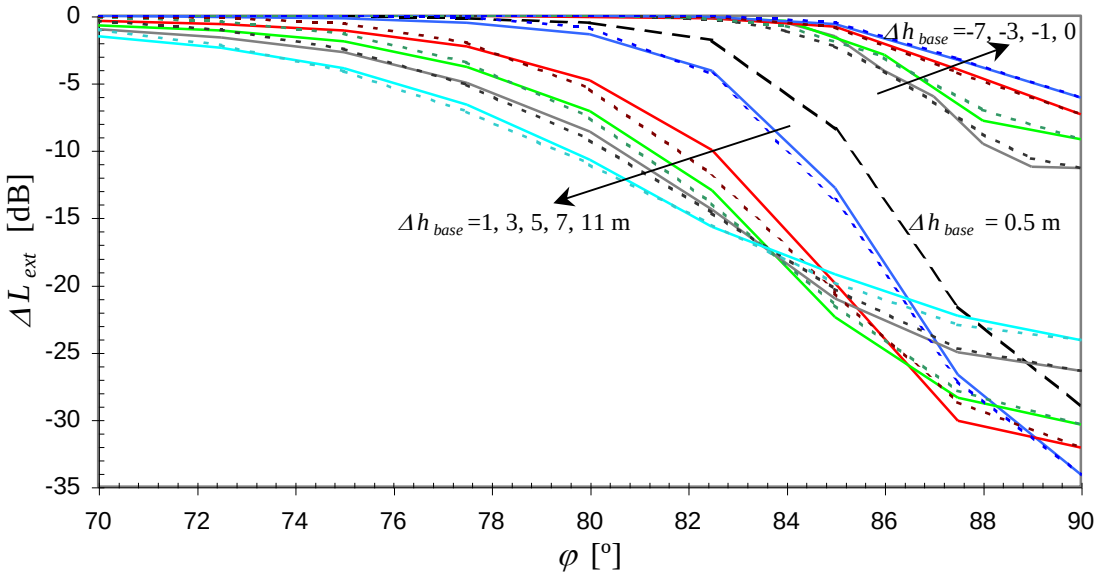


Fig. 4.21 - Curvas de $\Delta L_{ext}(\varphi)$, parametrizadas em Δh_{base}.

Como se pode verificar, estas curvas apresentam uma descontinuidade ao passar de Δh_{base} igual a 0 para 1 m: para Δh_{base} superior a 1m, quanto mais alta estiver a EB maior a diferença entre os valores da difracção em TUEs pertencentes à rua principal e TUEs pertencentes à rua transversal (neste segundo caso, como a distância é menor, o ângulo de

incidência é maior e a atenuação por difracção é menor) e, consequentemente, maior a influência dos cruzamentos; para incidência rasante (Δh_{base}= 0 m), a atenuação por difracção em TUE é independente da localização deste, daí que a influência do cruzamento seja reduzida; para Δh_{base} negativo, a atenuação por difracção múltipla sobre os edifícios aumenta consideravelmente com a diminuição da altura, pelo que a contribuição dos raios conduzidos ao longo da rua transversal (menor percurso sobre os edifícios) torna-se mais importante. Nos estudos apresentados em seguida, subdividem-se as expressões para $\Delta h_{base}\leq 0$ m e $\Delta h_{base}\geq 1$ m.

$$\Delta L_{ext}(\varphi, \Delta h_{base}) = -A_{Le}(\Delta h_{base}) \cdot \exp\left(-\frac{(\varphi - 90)^2}{2 \cdot \sigma_{Le}(\Delta h_{base})^2} \right) \tag{4.25}$$

com :

$$A_{Le}(\Delta h_{base})_{[dB]} = \begin{cases} 6.11 - 1.25\,\Delta h_{base} - 0.073\,\Delta h_{base}^{\;2} & , \Delta h_{base} \leq 0 \\ 35.76 - 1.38\,\Delta h_{base} + 0.028\,\Delta h_{base}^{\;2} & , \Delta h_{base} \geq 1 \end{cases} \tag{4.26}$$

$$\sigma_{Le}(\Delta h_{base})_{[^{\circ}]} = \begin{cases} 2.22 - 0.18\,\Delta h_{base} - 0.014\,\Delta h_{base}^{\;2} & , \Delta h_{base} \leq 0 \\ 3.12 + 0.74\,\Delta h_{base} - 0.027\,\Delta h_{base}^{\;2} & , \Delta h_{base} \geq 1 \end{cases} \tag{4.27}$$

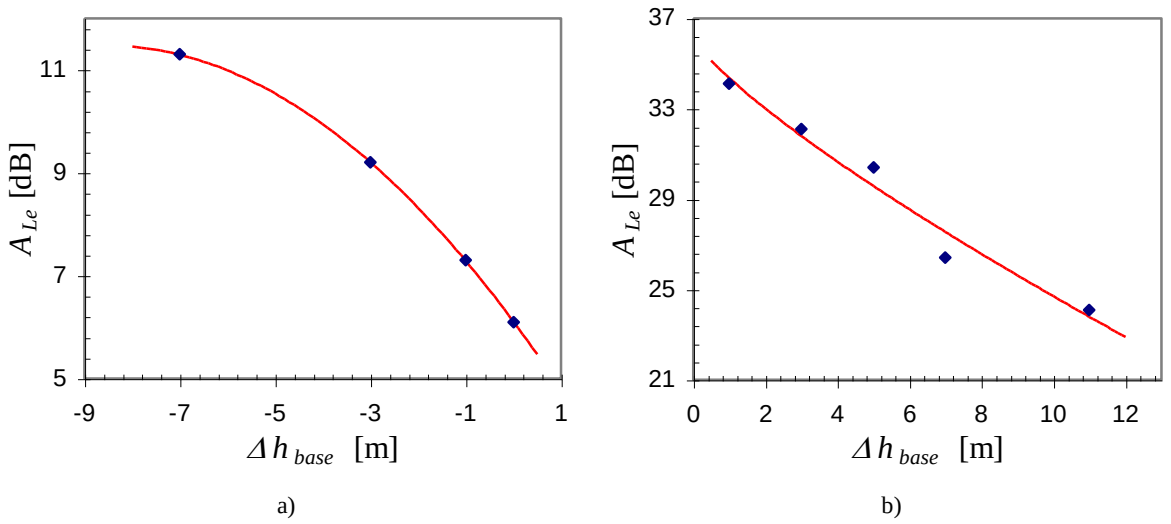


Fig. 4.22a – Interpolação de $A_{Le}(\Delta h_{base})$, para $\Delta h_{base}\leq 0$ m (a) e $\Delta h_{base}\geq 1$ m (b).

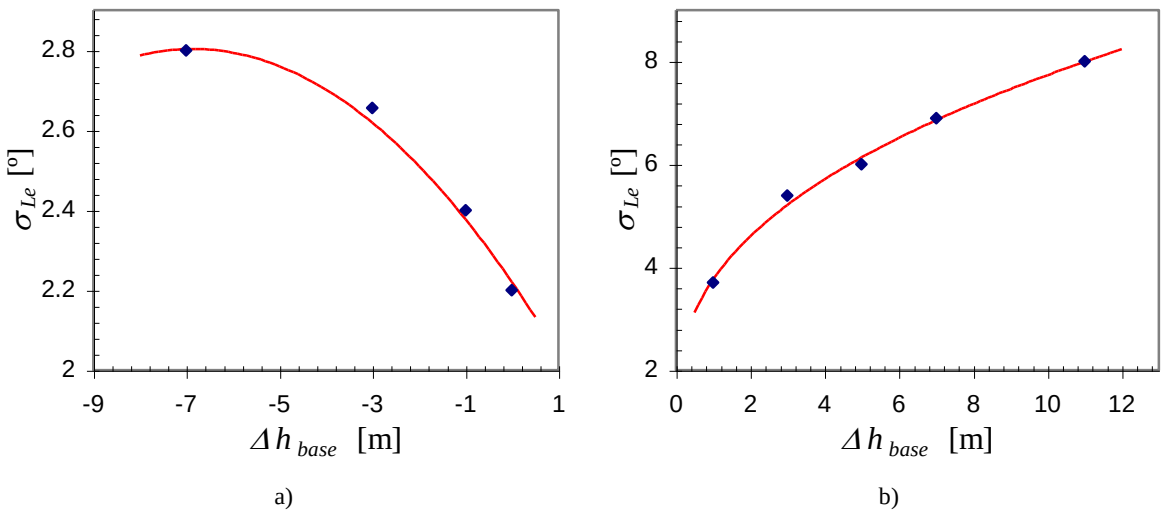


Fig. 4.22b - Interpolação de $\sigma_{Le}(\Delta h_{base})$, para $\Delta h_{base} \leq 0$ m (a) e $\Delta h_{base} \geq 1$ m (b).

VARIÁVEL $\Delta L_{int}(\varphi, \Delta h_{base})$

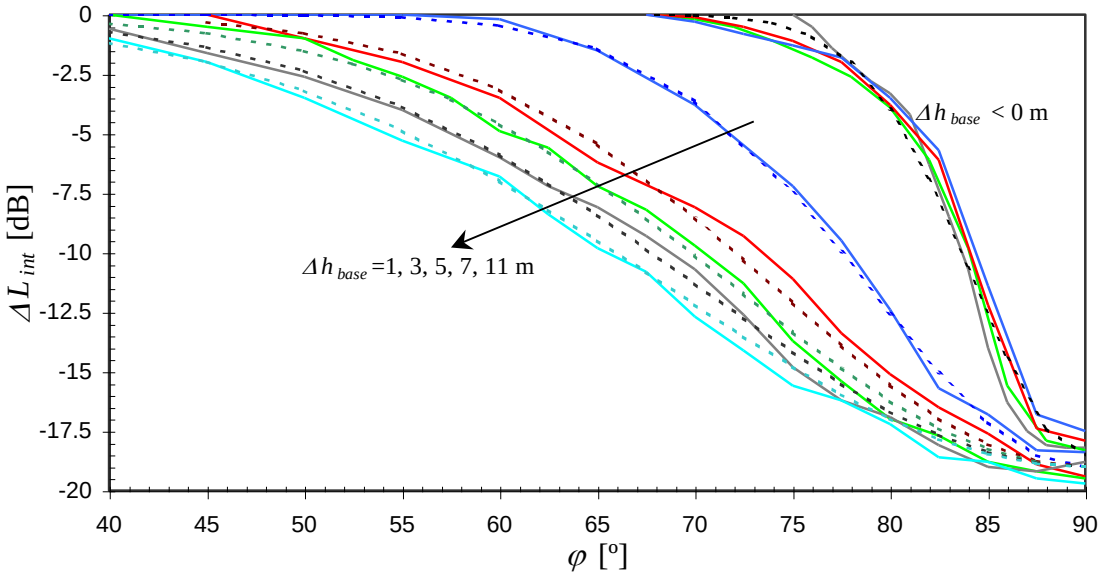


Fig. 4.23 - Curvas de $\Delta L_{int}(\varphi)$, parametrizadas em Δh_{base}.

$$\Delta L_{int}(\varphi, \Delta h_{base}) = -A_{Li}(\Delta h_{base}) \cdot \exp\left(-\frac{(\varphi - 90)^2}{2 \cdot \sigma_{Li}(\Delta h_{base})^2} \right) \tag{4.28}$$

com :

$$A_{Li}\left(\Delta h_{base}\right)_{[dB]} = \begin{cases} 18.5 & , \Delta h_{base} \leq 0 \\ 19 & , \Delta h_{base} \geq 1 \end{cases} \tag{4.29}$$

$$\sigma_{Li}\left(\Delta h_{base}\right)_{[°]} = \begin{cases} 5.7 & , \Delta h_{base} \leq 0 \\ 9.43 + 2.14\,\Delta h_{base} - 0.093\,\Delta h_{base}{}^{2} & , \Delta h_{base} \geq 1 \end{cases} \tag{4.30}$$

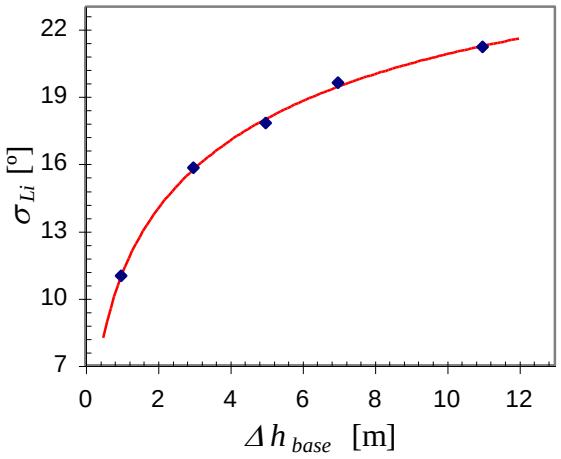


Fig. 4.24 - Interpolação de $\sigma_{Li}(\Delta h_{base})$ para $\Delta h_{base} \geq 1$ m.

VARIÁVEL $\Delta d_{ext}(\varphi, \Delta h_{base})$

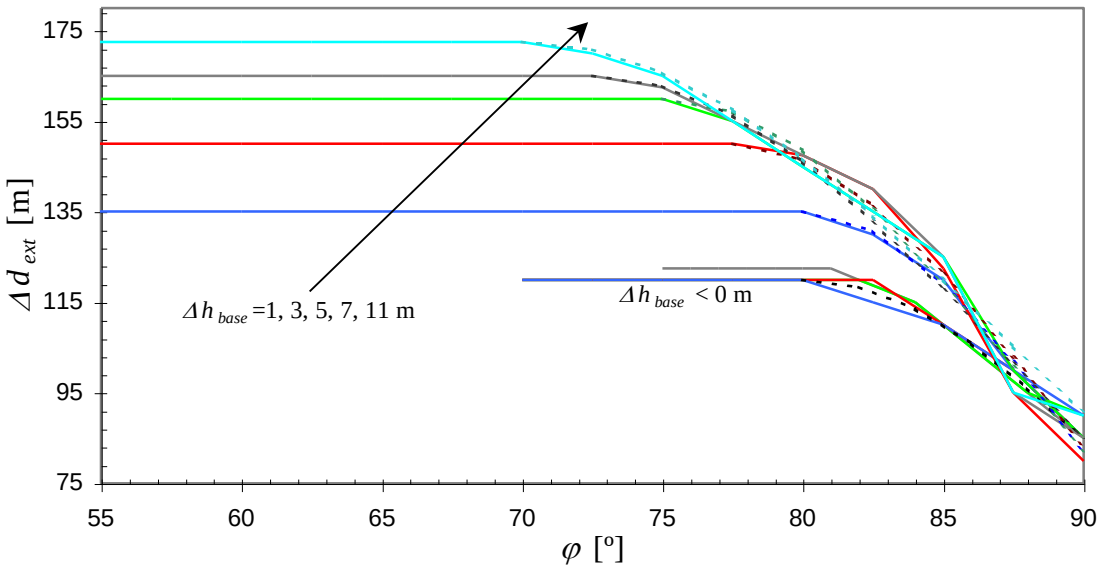


Fig. 4.25 - Curvas de $\Delta d_{ext}(\varphi)$, parametrizadas em Δh_{base}.

$$\Delta d_{ext}(\varphi, \Delta h_{base}) = \begin{cases} A_{de}(\Delta h_{base}) & , \varphi \le \varphi_{de}(\Delta h_{base}) \\ A_{de}(\Delta h_{base}) \cdot \exp\left(- \left(\varphi - \varphi_{de}(\Delta h_{base})\right)^2 \Big/ 2 \cdot \sigma_{de}(\Delta h_{base})^2 \right) & , \varphi > \varphi_{de}(\Delta h_{base}) \end{cases} \quad (4.31)$$

com :

$$A_{de}(\Delta h_{base})_{[m]} = \begin{cases} 120 & , \Delta h_{base} \le 0 \\ 128.15 + 8.0\,\Delta h_{base} - 0.36\,\Delta h_{base}{}^2 & , \Delta h_{base} \ge 1 \end{cases} \quad (4.32)$$

$$\varphi_{de}(\Delta h_{base})_{[^o]} = \begin{cases} 80 & , \Delta h_{base} \le 0 \\ 81.25 - 1.25\,\Delta h_{base} & , \Delta h_{base} \ge 1 \end{cases} \quad (4.33)$$

$$\sigma_{de}(\Delta h_{base})_{[^o]} = \begin{cases} 12 & , \Delta h_{base} \le 0 \\ 9.0 + 0.82\,\Delta h_{base} & , \Delta h_{base} \ge 1 \end{cases} \quad (4.34)$$

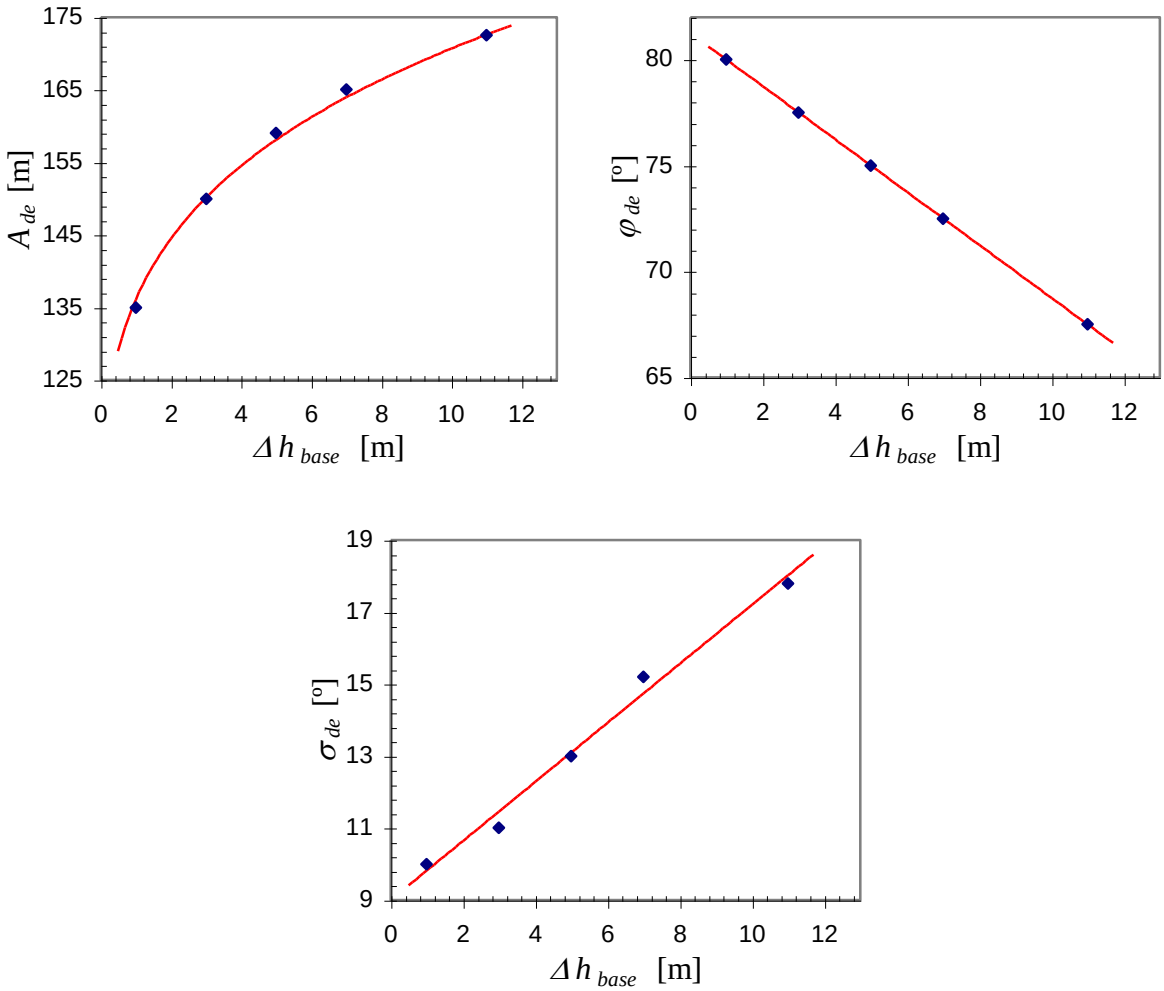


Fig. 4.26 - Interpolação de $A_{de}(\Delta h_{base})$, $\varphi_{de}(\Delta h_{base})$ e $\sigma_{de}(\Delta h_{base})$.

VARIÁVEL $\Delta d_{int}(\varphi,\Delta h_{base})$

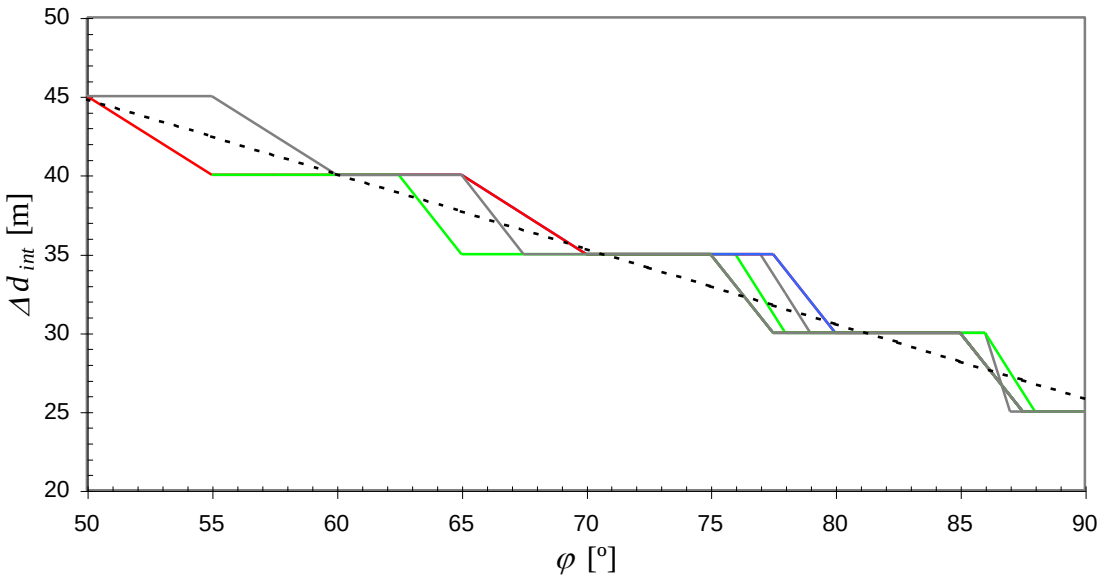


Fig. 4.27 - Curvas de $\Delta d_{int}(\varphi)$, parametrizadas em Δh_{base}.

$$\Delta d_{int}(\varphi,\Delta h_{base}) = \Delta d_{int}(\varphi) = -0.48\,\varphi + 68.57 \tag{4.35}$$

IV.2.4 EXPRESSÕES FINAIS

Como já foi referido, assume-se que os parâmetros geométricos d_c, w e Δh_{base} são independentes entre si. Deste modo, conhecidas as variações de ΔL_{ext}, ΔL_{int}, Δd_{ext} e Δd_{int} com cada um destes parâmetros (Secções IV.2.1 - IV.2.3), as suas expressões finais, f, em função de φ e parametrizadas em d_c, w e Δh_{base}, são determinadas da seguinte forma:

$$f(\varphi, d_c, w, \Delta h_{base}) = f_{d_c}(\varphi, d_{c0}, w_0, \Delta h_{base0}) + \Delta f_{d_c}(\varphi, d_c) + \Delta f_w(\varphi, w) + \Delta f_{\Delta h_{base}}(\varphi, \Delta h_{base}) \tag{4.36a}$$

para as variáveis ΔL_{ext} e ΔL_{int} e

$$f(\varphi, d_c, w, \Delta h_{base}) = f_{d_c}(\varphi, d_{c0}, w_0, \Delta h_{base0}) \cdot \Pi f_{d_c}(\varphi, d_c) \cdot \Pi f_w(\varphi, w) \cdot \Pi f_{\Delta h_{base}}(\varphi, \Delta h_{base}) \tag{4.36b}$$

para as variáveis Δd_{ext} e Δd_{int}, com :

$$\Delta f_m(\varphi, m) = f_m(\varphi, m) - f_m(\varphi, m_0)$$
$$\Pi f_m(\varphi, m) = f_m(\varphi, m) / f_m(\varphi, m_0) \tag{4.37}$$

em que d_{c0}, w_0 e Δh_{base0} são os valores para a situação padrão e f_{d_c}, f_w e $f_{\Delta h_{base}}$ as funções intermédias que traduzem a variação com cada um dos parâmetros separadamente, fixando os restantes 2 nos valores padrão (no primeiro termo de (4.36) pode substituir-se f_{d_c} por f_w ou $f_{\Delta h_{base}}$, uma vez que estas expressões coincidem para a situação padrão). As expressões de f_{d_c}, f_w e $f_{\Delta h_{base}}$, correspondentes às variáveis ΔL_{ext}, ΔL_{int}, Δd_{ext} e Δd_{int}, foram determinadas anteriormente para os intervalos de validade $200 \leq d_c \leq 2000$ m, $12.5 \leq w \leq 50$ m e $-7 \leq \Delta h_{base} \leq 11$m.

IV.3. COMPARAÇÃO COM MEDIDAS

Nesta secção aplica-se a expressão de L_c anteriormente deduzida nalguns cruzamentos da Baixa Lisboeta. Não se pretende, neste caso, aferir a expressão, mas apenas verificar a sua aplicação a cenários de propagação abrangidos pelos intervalos de validade. É esperado que os resultados tenham algum erro pois, como já foi salientado, o tipo de medidas realizadas não permite analisar isoladamente a contribuição dos cruzamentos.

Para verificar a validade do factor correctivo para os cruzamentos, L_c , comparam-se as medidas efectuadas em 2 ruas da Baixa com o sinal resultante da adição do raio directo e do raio reflectido na parede oposta da rua principal com o termo L_c apropriado, centrado no cruzamento; à semelhança de vários autores, considera-se que o modelo de 2 raios é suficiente para descrever o andamento médio do sinal ao longo da rua. Analisa-se, também, a forma de contabilizar a influência de vários cruzamentos, combinando os vários termos L_c.

As ruas seleccionadas para o estudo são a Rua da Conceição e a Rua de S. Julião, com a EB L101A, por serem aquelas em que a influência dos cruzamentos é mais visível. Não se analisam os resultados para a EB L031B pois o parâmetro Δh_{base} sai fora da sua gama de validade (a expressão de L_c foi deduzida para cenários regulares).

RUA DA CONCEIÇÃO

Na Fig. 4.28 apresentam-se os resultados para o cruzamento entre a Rua da Conceição e a Rua do Ouro, com a EB L101A (ver mapa do Anexo B). Para o cálculo do parâmetro Δh_{base}, determinou-se o valor médio dos Δh_{base} (um por posição da EM) numa distância de 60 m, em torno do cruzamento, para o raio directo EB-EM. O parâmetro *w* corresponde à largura da rua transversal; considera-se que a largura desta rua tem mais significado no cálculo de L_c do que a largura da rua principal (na dedução da expressão de L_c admitiu-se que as duas ruas tinham a mesma largura).

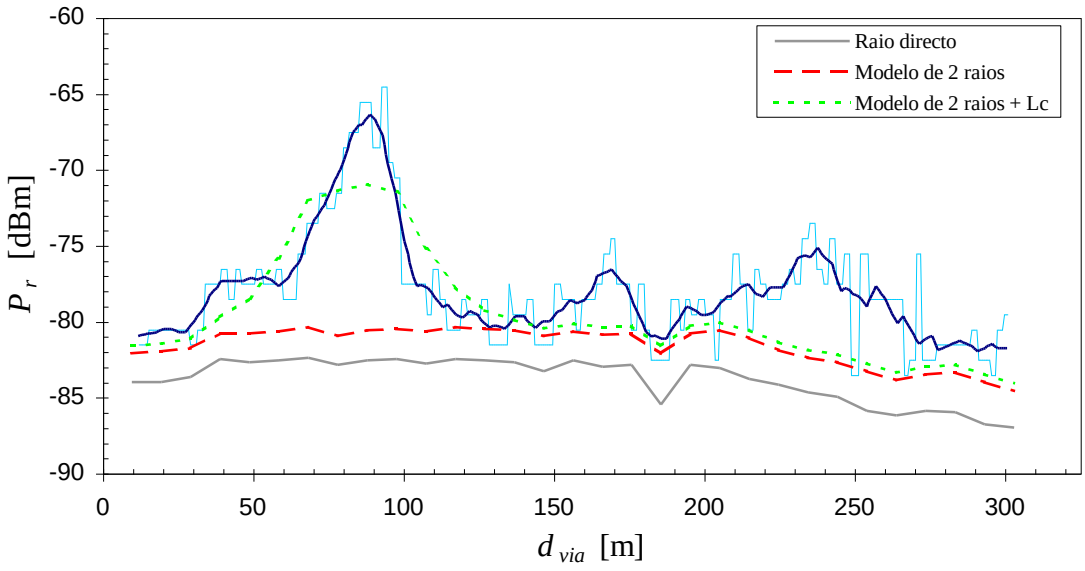


Fig. 4.28 - Rua da Conceição, EB L101A; aplicação de L_c ao cruzamento com a Rua do Ouro.

Através da Fig. 4.28, pode verificar-se que o termo L_c acompanha bastante bem a variação do sinal devido ao cruzamento. No centro do cruzamento o erro é maior, o que, no entanto, também já se verificava com o sinal previsto pelo modelo de traçado de raios (Fig. 3.6). Verifica-se, também, que a potência do raio directo é insuficiente para estimar o nível médio das medidas, enquanto que o modelo de 2 raios já permite uma boa aproximação.

Para contabilizar a existência de vários cruzamentos ao longo de uma mesma rua, assume-se que a influência de um cruzamento se faz sentir, no máximo, até ao centro dos cruzamentos anterior e posterior, tal como se assumiu no modelo de traçado de raios. Na Fig. 4.29 analisa-se a influência dos três principais cruzamentos na Rua da Conceição: Rua do Ouro, Rua Augusta e Rua da Prata. Despreza-se a contribuição dos cruzamentos com ruas opostas à EB por se constatar que a sua influência é pouco significativa, face à dos outros

cruzamentos. Verifica-se que, à medida que a distância aumenta, o erro entre as medidas e os resultados obtidos com a aplicação de L_c também aumenta, possivelmente porque a condição do cenário ser regular é menos satisfeita. A influência dos cruzamentos prevista por L_c diminui significativamente com a diminuição do ângulo de rua φ (os restantes parâmetros geométricos mantêm-se praticamente constantes), ao passo que nas medidas essa dependência não é tão evidente.

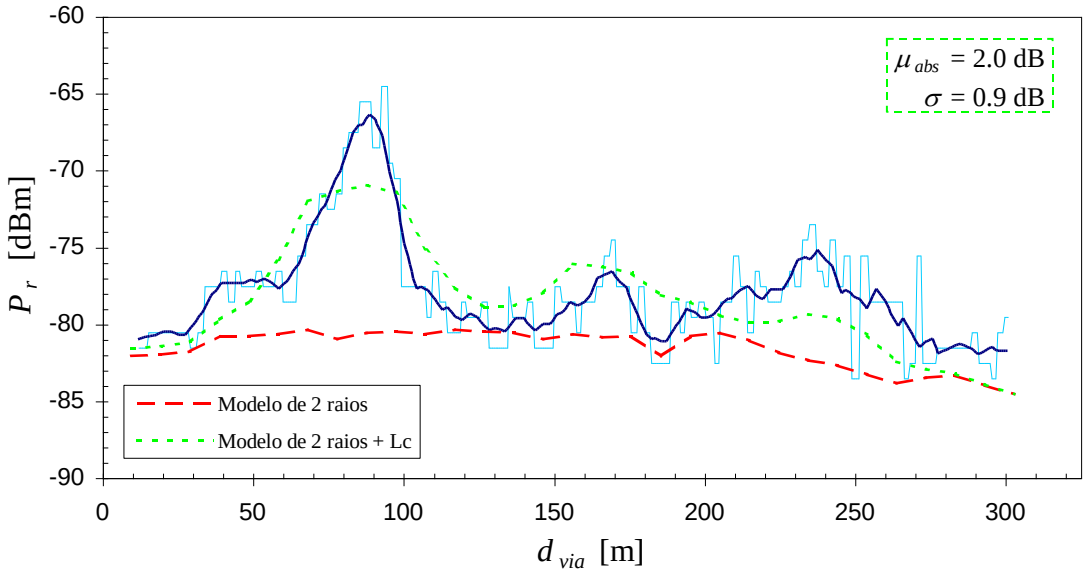


Fig. 4.29 - Rua da Conceição, EB L101A; aplicação de L_c aos cruzamento com a Rua do Ouro, Rua Augusta e Rua da Prata.

Através da Fig. 4.29 constata-se, também, que o erro entre o nível médio das medidas e o modelo de 2 raios aumenta com d_{via}: à medida que o móvel avança na rua, o ângulo φ diminui, de tal modo que a contribuição dos raios com mais de uma reflexão na rua principal torna-se mais importante. Nos modelos do COST231-WI e de Ikegami esta alteração da inclinação dos raios, em relação à rua principal, é contabilizada através de um termo que depende do ângulo de rua φ, L_{ori}; no modelo de traçado de raios isto é contabilizado naturalmente pelos raios de ordem superior a 1. Na Fig. 4.30 repete-se a análise da Fig. 4.29 mas sobrepondo os termos L_c ao sinal obtido considerando os raios até à 2ª ordem. Pode verificar-se que o erro diminui no fim da rua. No entanto, os parâmetros μ e σ mantiveram-se praticamente constantes, pelo que se mantém a hipótese inicial de considerar apenas os raios até à primeira ordem (mais fácil de simular).

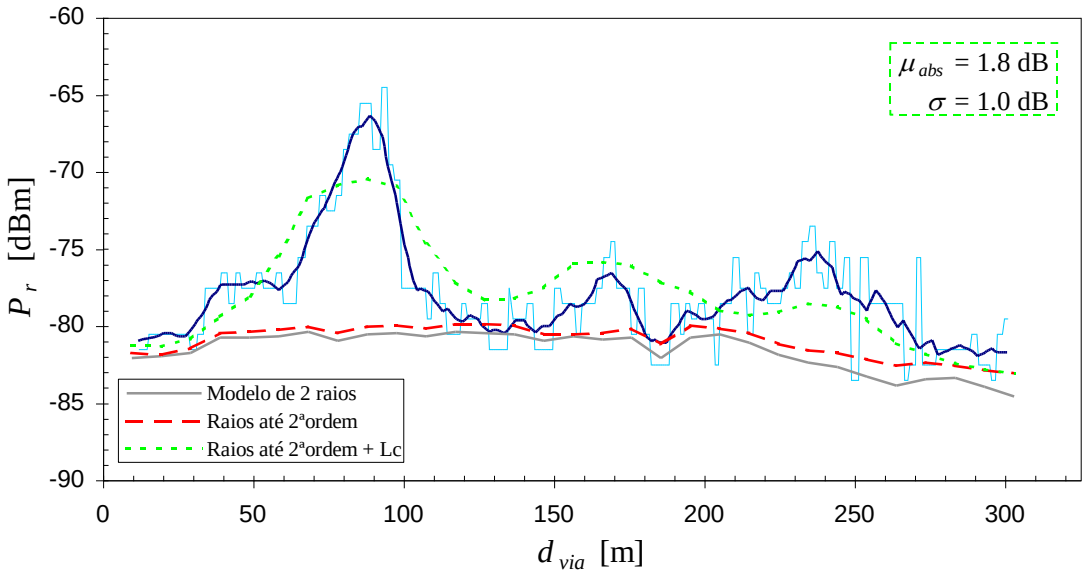


Fig. 4.30 - Rua da Conceição, EB L101A; aplicação de L_c aos cruzamento com a Rua do Ouro, Rua Augusta e Rua da Prata, contabilizando todos os raios até à 2ª ordem.

RUA DE S. JULIÃO

Na Fig. 4.31 apresentam-se os resultados para a Rua de S. Julião. A curva teórica foi obtida adicionando L_c ao modelo de 2 raios. Pode verificar-se que os termos L_c contabilizam perfeitamente a influência do primeiro e do segundo cruzamento; no terceiro cruzamento a variação de L_c é, uma vez mais, inferior à do sinal medido. Da comparação desta figura com a Fig. 4.30 constata-se que os resultados são idênticos; a contribuição dos cruzamentos é, agora, ligeiramente inferior porque o ângulo de rua φ é menor e este efeito sobrepõe-se à diminuição da distância d_c.

Como conclusão geral, pode dizer-se que a expressão deduzida para a variação da atenuação nos cruzamentos (L_c) adequa-se bem aos casos analisados, justificando-se a

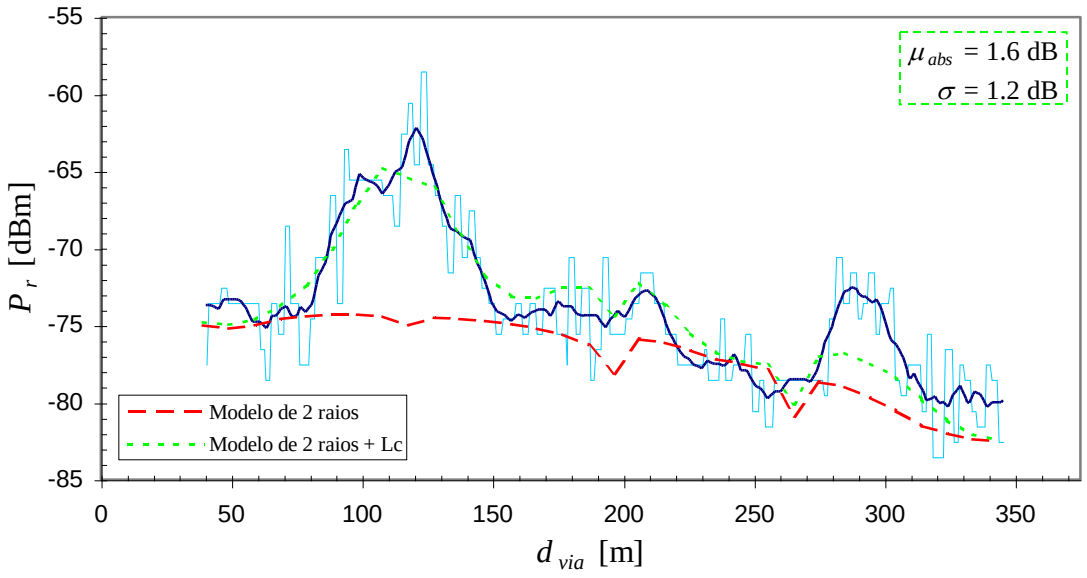


Fig. 4.31 - Rua de S. Julião, EB L101A; aplicação de L_c aos cruzamento com a Rua do Ouro, Rua Augusta e Rua da Prata, contabilizando todos os raios até à 1ª ordem.

realização de medidas noutras ruas, com outro tipo de cruzamentos, se possível, de modo a confirmar a sua aplicação. Os valores obtidos para a média e para o desvio padrão do erro são bastante bons, pelo que se pode aplicar o modelo.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho compreendeu o desenvolvimento e implementação de um modelo de propagação para células urbanas em sistemas de comunicações móveis, a sua aferição na cidade de Lisboa e, por último, a aplicação do modelo ao estudo da variação do sinal em torno de um cruzamento.

O modelo desenvolvido é aplicável em células urbanas com uma dimensão típica de 1000 m, com a antena da EB instalada ao nível dos telhados circundantes. A atenuação sobre os edifícios é determinada por uma nova expressão que combina os modelos de Vogler e de Xia and Bertoni através do parâmetro $\overline{\beta_e}$, o qual depende do grau de obstrução do perfil. Deste modo permite-se a aplicação do modelo em cenários irregulares (terreno ondulado e altura e espaçamento entre edifícios variável), mantendo o tempo de cálculo reduzido. Para calcular a atenuação no interior das ruas, desde o topo do último edifício até à EM, desenvolveu-se uma ferramenta de traçado de raios, baseada no método das imagens (mais adequado, em termos de tempo de cálculo, do que o método de lançamento de raios porque contabilizam-se poucos raios). Os coeficientes de reflexão são determinados pelas fórmulas de Fresnel e os coeficientes de difracção pela Teoria Uniforme de Difracção, limitada a 1 nas fronteiras de sombra e de reflexão (apesar de na UTD estarem eliminadas as singularidades da GTD nas fronteiras, o problema das cáusticas mantém-se). Desenvolveu-se, também, um método para estimar a atenuação introduzida pela vegetação, que contabiliza um valor pré-definido de atenuação, dependente da densidade da vegetação, sempre que o raio intercepta as árvores existentes ao longo das ruas.

A aferição do modelo foi efectuada a partir de medidas de sinal realizadas em Lisboa, com a colaboração do operador de GSM TELECEL. Seleccionaram-se duas zonas: Baixa Lisboeta, que apresenta grande regularidade no nível do terreno e na estrutura dos edifícios, e Campo de Ourique, menos regular e possuindo árvores nalgumas ruas. Comparando as previsões com as medidas, concluiu-se que o modelo de Xia and Bertoni é adequado para perfis em que o grau de obstrução dos vários edifícios é idêntico, quer estes apresentem uma estrutura regular (situação para a qual o modelo foi especificado), quer as suas alturas, e também a altura do terreno, apresentem variações. A estação base L101A (situada no Ministério da Marinha) encontra-se nestas condições, bem como a L031B (Estação do Rossio) para as ruas mais distantes, como a Rua da Prata. No caso de existir um número limitado de edifícios a obstruir consideravelmente o sinal, então deve ser considerado antes o modelo de

Vogler. Este caso verificou-se, por exemplo, na Rua do Ouro com a EB L031B: dada a elevação do terreno, o primeiro elipsóide de Fresnel associado ao raio directo EB-TUE encontra-se bastante obstruído pelos edifícios situados próximo da EB. Por questões de convergência e de tempo de cálculo do método de Vogler, neste modelo consideram-se apenas os edifícios com um coeficiente de obstrução β superior a - 1.5, num máximo de 4. Por esta razão, os resultados obtidos com este modelo são tanto mais correctos quanto menor for o número de obstáculos principais (obstáculos com $\beta \geq$ -1.5).

Para conjugar os Modelos de Xia and Bertoni e de Vogler, começaram por se testar a expressão de Saunders and Bonar e uma nova expressão em função do desvio padrão da altura dos edifícios, as quais no entanto não se mostraram adequadas. Por sua vez, o método desenvolvido com base no parâmetro de obstrução $\overline{\beta_e}$ conduziu a bons resultados, permitindo em cada situação considerar o modelo mais preciso: para $\overline{\beta_e}$ < -1.6 contabiliza-se o modelo de Xia and Bertoni e para $\overline{\beta_e}$ ≥ -1.6 o modelo de Vogler.

Analisando as contribuições dos diferentes raios que alcançam a EM, concluiu-se que os raios difractados nas arestas verticais dos cruzamentos são bastante importantes: quando a EM se encontra próxima do cruzamento, a principal contribuição é devida à "aresta interior", passando a aresta oposta a assumir maior importância à medida que o móvel se afasta do cruzamento. Em geral é suficiente considerar os raios com um máximo de uma difracção e uma reflexão por rua. No entanto, caso não existam cruzamentos e/ou a EB esteja alinhada com a rua em que o móvel se desloca então os resultados melhoram considerando 2 reflexões na rua principal. Esta limitação do número de raios contabilizados no traçado de raios permite reduzir significativamente o tempo de cálculo (para cada raio analisado no interior das ruas é necessário calcular os respectivos termos da atenuação sobre os edifícios).

Os resultados obtidos com aplicação do modelo desenvolvido na cidade de Lisboa foram bons: para a Baixa Lisboeta obtiveram-se valores médios para as médias do erro, absoluto e relativo, e para o desvio padrão do erro de 3.8, 0.2 e 2.8 dB, respectivamente; para a zona de Campo de Ourique, considerando a atenuação introduzida pela vegetação, esses valores foram de 3.3, -0.35 e 2.8 dB. Estes resultados foram obtidos considerando apenas os raios com um máximo de uma difracção e duas reflexões por rua. No caso das medidas em Campo de Ourique, verificou-se que o valor médio para a atenuação devida à vegetação é de 10 dB, o que atesta a importância da sua contabilização. Em relação ao método desenvolvido

para a contabilizar, torna-se necessário efectuar mais medidas em ruas com árvores para aferir melhor a sua expressão, principalmente em zonas com praças.

Dos parâmetros de entrada do modelo, a altura dos edifícios (que não pode ser dissociada da altura do terreno) é o que tem maior influência no resultado final, sendo ao mesmo tempo aquele que está sujeito a maiores erros, por imprecisão da base de dados. Considera-se, assim, ser necessária a utilização de uma base de dados com maior definição (aconselhável uma resolução de 5 m no plano horizontal e 1 m no plano vertical), a qual, no entanto, não se encontra disponível para a cidade de Lisboa. Verificou-se, também, ser importante o rigor no ganho da EB, justificando-se que a variação do ganho no plano vertical seja determinada através de um ficheiro, tal como já é feito para o ganho no plano horizontal. Estas questões são tanto mais importantes quanto menor a dimensão das células e, consequentemente, maior a precisão necessária nos modelos de previsão. Outra limitação do modelo que surge com a redução do tamanho das células, em especial em microcélulas (antena da EB colocada no interior das ruas, ao nível dos postes de iluminação), é a adição dos vários raios em potência. No caso da propagação em linha de vista ao longo de uma rua, por exemplo, existem raios dominantes e por isso deixa de ser válido admitir que as fases dos raios se distribuem uniformemente. Neste caso, torna-se necessário considerar as fases e, mais correctamente, também a polarização e o ângulo de chegada dos raios à EM.

A formulação desenvolvida, teoricamente, para descrever o andamento do sinal nos cruzamentos conduziu a bons resultados, principalmente tendo em conta que o tipo de medidas efectuado não permite analisar isoladamente a contribuição dos cruzamentos; o andamento do sinal está também dependente de outros fenómenos, como seja a variação da altura dos edifícios próximo do cruzamento. Verificou-se que a redução da atenuação nos cruzamentos pode ir até aos 10 dB, dependendo, em primeiro lugar, do ângulo de rua φ (máxima para $\varphi = 90^{o}$). Na aplicação das expressões a ambientes reais, deve atender-se às condições em que as mesmas foram deduzidas (cenário regular) e aos intervalos de validade dos parâmetros geométricos que nelas intervêm. Esta formulação é particularmente útil caso não se disponha de uma ferramenta de traçado de raios.

Como trabalho futuro, será interessante aferir o modelo para os 1800 MHz, o que não foi possível no presente estudo dado que ainda não existe em Portugal um operador do sistema DCS1800. Prevê-se que neste sistema as EBs passem a ser instaladas próximo do solo, pelo que a propagação ao longo das ruas passará a assumir maior importância e, como

consequência, deverão passar-se a contabilizar também os raios com 2 difracções nas arestas verticais. Terá também interesse realizar medidas específicas em cruzamentos e ruas com vegetação, em particular com diferentes tipos de vegetação, de modo a aferir melhor as respectivas expressões de atenuação.

ANEXO A - BASE DE DADOS DAS RUAS

Neste Anexo descreve-se o formato da base de dados das ruas. Esta base de dados contém a informação necessária para estimar as coordenadas do móvel ao longo de uma via pré-defenida. Além disso, como foi referido no Capítulo II, é a partir deste ficheiro que se determinam os vários parâmetros necessários para o traçado de raios. Por esta razão, é essencial que a sua informação seja precisa, em especial no que se refere à localização das paredes dos edifícios que delimitam as ruas.

Para a implementação do método das imagens, admitiu-se que as ruas são rectilíneas. Caso se pretenda estudar o andamento do sinal ao longo de uma rua com uma curva, a solução será definir duas ruas (uma antes da curva e a outra após a curva) e analisá-las separadamente. Uma rua é definida por troços, nos quais os vários parâmetros (definidos em seguida) são constantes, sendo descrita no sentido positivo do eixo dos xx ou, caso a rua seja paralela ao eixo dos yy, no sentido positivo deste eixo.

Cada via constitui um bloco independente dentro do ficheiro, com o nome, número de vértices que a definem (igual ao número de troços mais 1) e, para cada troço, os vários parâmetros. Dado que o programa que efectua a validação dos dados está implementado em Fortran, estes blocos têm de ser preenchidos de acordo com um formato pré-definido, que se apresenta em seguida:

1 ∪_ _ _ _ _ [+ designação completa da via]

2 ∪_ _ _ _ _ _

3 ∪_ _ _ _ _ _ _ _ _∪∪_ _ _ _ _ _ _ _ _∪∪_ _ _ _ _ _∪∪_ _ _ _ _∪∪_ _ _ _ _∪∪
_ _ _ _ _∪∪_ _ _ _ _∪∪_ _ _ _ _∪∪_ _ _ _ _∪∪_∪_ _ _ _ _∪∪_∪_ _ _ _ _ _∪∪
_∪_ _ _ _ _

4 …

A primeira linha deve possuir o código da via de comunicação, até um máximo de 5 caracteres; o resto da linha é utilizado na listagem de vias do programa RMOVEL [DCG95]. A segunda linha indica o número dos vértices. As restantes linhas contêm as coordenadas do inicio de um troço e os seus parâmetros, pela seguinte ordem (entre parênteses indica-se o tipo de variável em Fortran):

a) Coordenada cartesiana *x* [m]	(F9.2)
b) Coordenada cartesiana *y* [m]	(F9.2)
c) Coordenada cartesiana *z* [m]	(I6)
d) Largura total da via, *w* [m]	(F5.1)
e) Espaçamento entre edifícios, *b* [m]	(F5.1)
f) Distância da EM à parede do lado esquerdo [m]	(F5.1)
g) Código da rua que se cruza no lado esquerdo (´*´ caso não exista)	(A5)
h) Código da rua que se cruza no lado direito (´*´ caso não exista)	(A5)
i) Comprimento do prolongamento da rua [m]	(F5.1)
j) Densidade da vegetação no lado esquerdo da rua	(I1)
k) Distância à vegetação no lado esquerdo da rua [m]	(F5.1)
l) Densidade da vegetação no centro da rua	(I1)
m) Distância à vegetação no centro da rua [m]	(F6.1)
n) Densidade da vegetação no lado direito da rua	(I1)
o) Distância à vegetação no lado direito da rua [m]	(F5.1)

Os parâmetros d) e f) permitem, em conjunto, definir a trajectória da EM em qualquer posição transversal da via; permitem, também, contabilizar alterações na largura da rua (devido à existência de um jardim, por exemplo). Conhecida a trajectória do móvel e as distâncias aos edifícios que delimitam a rua, facilmente se determinam as coordenadas dos vértices das paredes, no plano horizontal (admite-se que a altura dos edifícios é sempre suficiente para interceptar os raios, o que permite desprezar a coordenada *z*).

Os parâmetros g) e h) indicam, quando preenchidos, a existência de uma rua transversal que se cruza com a rua da EM (rua principal) no lado respectivo. Caso a rua principal se inicie ou termine num cruzamento, então este também deverá ser especificado como pertencendo à rua, para que a sua influência seja contabilizada no traçado de raios.

O parâmetro i) indica de que forma a rua começa e termina. Se começar (ou terminar) numa parede (beco) o seu valor é zero. Caso não se pretenda estimar o sinal ao longo de toda a rua ou se, por exemplo, após um cruzamento começar outra rua, define-se um prolongamento da rua inicial para que as continuações das paredes também sejam contabilizadas como possíveis pontos de difracção e/ou reflexão; o valor do parâmetro indica o comprimento do prolongamento e é positivo se este começar (ou terminar) numa parede ou negativo se a rua

for aberta no inicio (ou fim). Este parâmetro só é definido para o primeiro e o último vértice, mas o seu espaço terá de ser preenchido nos outros (com 0, por exemplo).

Os parâmetros j) - o) indicam a densidade da vegetação (0 caso não exista) e a sua distância à trajectória da EM; a distância à vegetação central é negativa caso esta se encontre à esquerda da EM e positiva no caso contrário.

Em seguida exemplifica-se a construção do ficheiro para 3 ruas: Rua A, Rua B e Rua C.

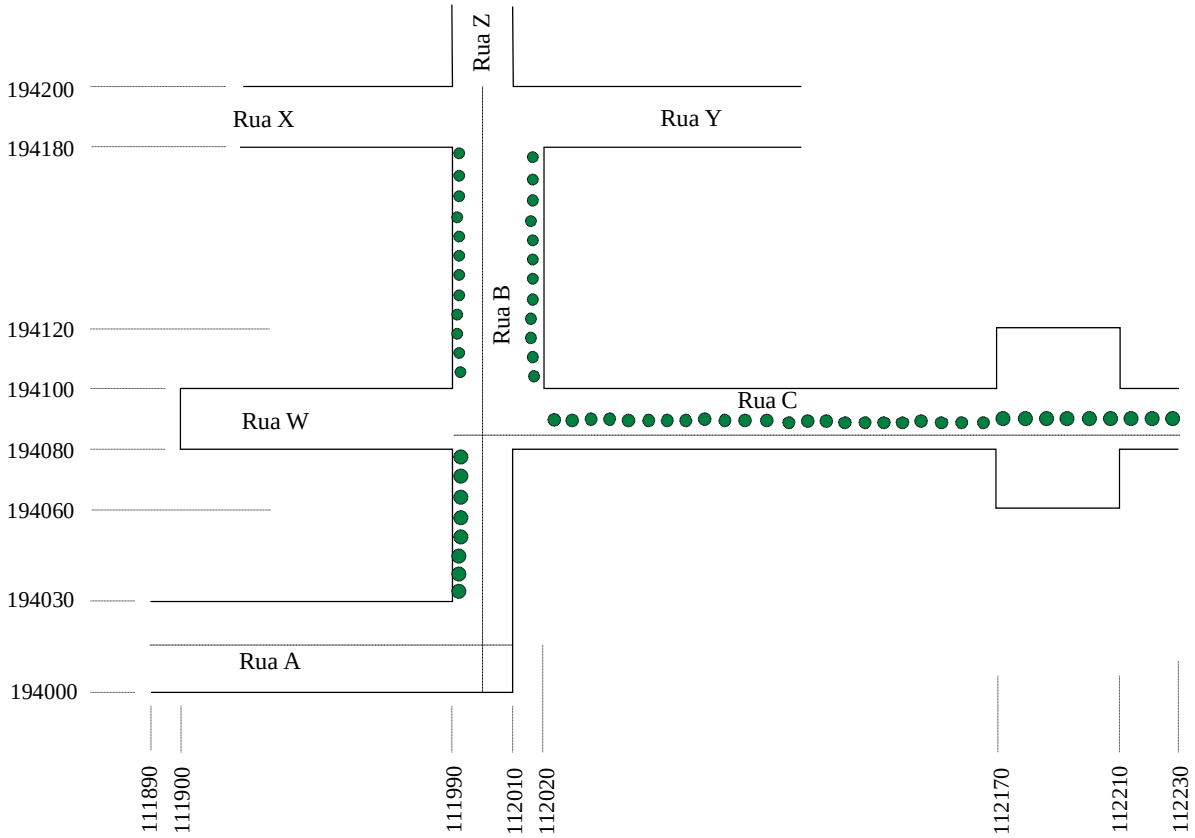


Fig. A1 – Exemplo de uma rede de estradas

FICHEIRO:

```
1-> Rua.A   Rua A (com EM no centro)
2-> 3
3-> 111890.00  194015.00       8   30.0   50.0   15.0
          *      *   -0.1  0   0.0  0    0.0  0   0.0
4-> 111990.00  194015.00      10   30.0   50.0   15.0
      Rua.B      *     .0  0   0.0  0    0.0  0   0.0
5-> 112010.00  194015.00      12   30.0   50.0   15.0
```

```
          *      *    0.0  0   0.0  0    0.0  0   0.0
 6-> Rua.B   RUA B (com EM no centro)
 7-> 6
 8-> 112000.00  194000.00      11   20.0   50.0   10.0
       Rua.A      *    0.0  0   0.0  0    0.0  0   0.0
 9-> 112000.00  194030.00      11   20.0   50.0   10.0
          *      *     .0  2   7.5  0    0.0  0   0.0
10-> 112000.00  194080.00      15   20.0   50.0   10.0
       Rua.W  Rua.C     .0  0   0.0  0    0.0  0   0.0
11-> 112000.00  194100.00      15   30.0   70.0   10.0
          *      *     .0  1   7.5  0    0.0  1  15.0
12-> 112000.00  194180.00      14   30.0   70.0   10.0
       Rua.X  Rua.Y     .0  0   0.0  0    0.0  0   0.0
13-> 112000.00  194200.00      14   20.0   50.0   10.0
          *      *  -90.0  0   0.0  0    0.0  0   0.0
14-> Rua.C   RUA C (com EM na direita)
15-> 6
16-> 111990.00  194085.00      15   20.0   60.0   15.0
       Rua.B  Rua.B   90.0  0   0.0  0    0.0  0   0.0
17-> 112010.00  194085.00      15   20.0   60.0   15.0
       Rua.B      *     .0  0   0.0  0    0.0  0   0.0
18-> 112020.00  194085.00      15   20.0   50.0   15.0
          *      *     .0  0   0.0  1   -5.0  0   0.0
19-> 112170.00  194085.00      10   60.0   70.0   35.0
          *      *     .0  0   0.0  2   -5.0  0   0.0
20-> 112210.00  194085.00       5   20.0   50.0   15.0
          *      *     .0  0   0.0  2   -5.0  0   0.0
21-> 112230.00  194085.00       1   20.0   50.0   15.0
          *      *   -0.1  0   0.0  0    0.0  0   0.0
```

ANEXO B – MAPAS DAS ZONAS ESTUDADAS

ANEXO C - CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES BASE

Estação	Coordenadas		Cota [m]	Antena			Azimute [º]	Down Tilt [º]	ERP [dBm]
	Latitude	Longitude		Modelo	Altura [m]	Ganho [dBd]			
L031B	38º 42' 55" N	9º 08' 27" W	45	K730370	22	11.5	120	10	45
L079C	38º 43' 20" N	9º 09' 46" W	93	AP906513	32	13	240	12	44
L101A	38º 42' 31" N	9º 08' 12" W	4	LPD7907/4-N	30	13	25	7	43

Anexo D- Gráficos com as previsões finais

Neste Anexo apresentam-se as figuras com a comparação entre as previsões finais e as medidas, quantificada pelos parâmetros média do erro absoluto, μ_{abs}, média do erro, μ, e desvio padrão do erro, σ. Apresentam-se os resultados para a Baixa Lisboeta e em seguida para Campo de Ourique.

BAIXA LISBOETA

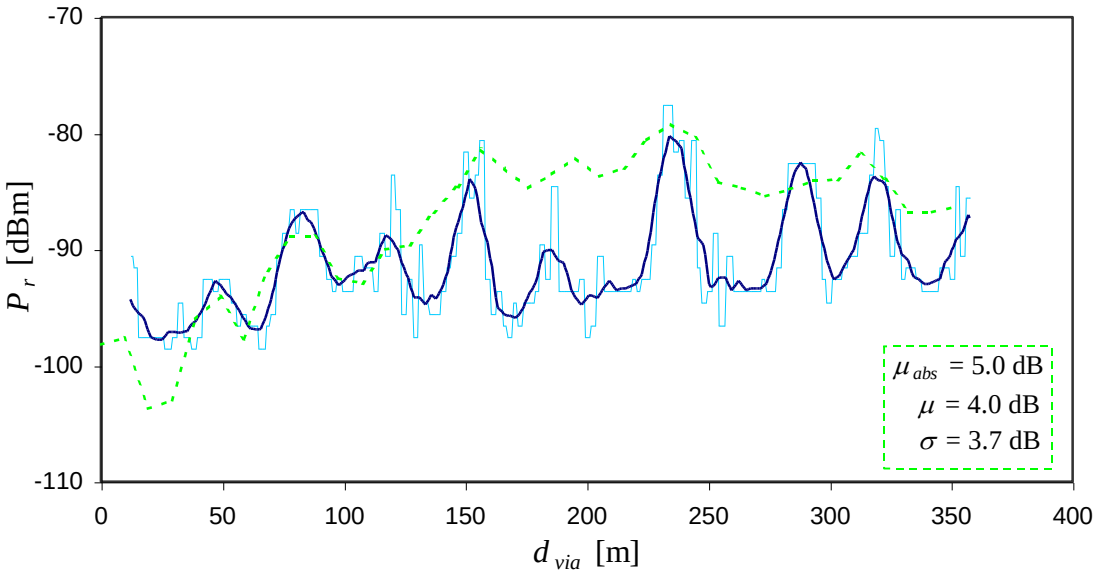


Fig. D1 – Rua da Conceição, L031B.

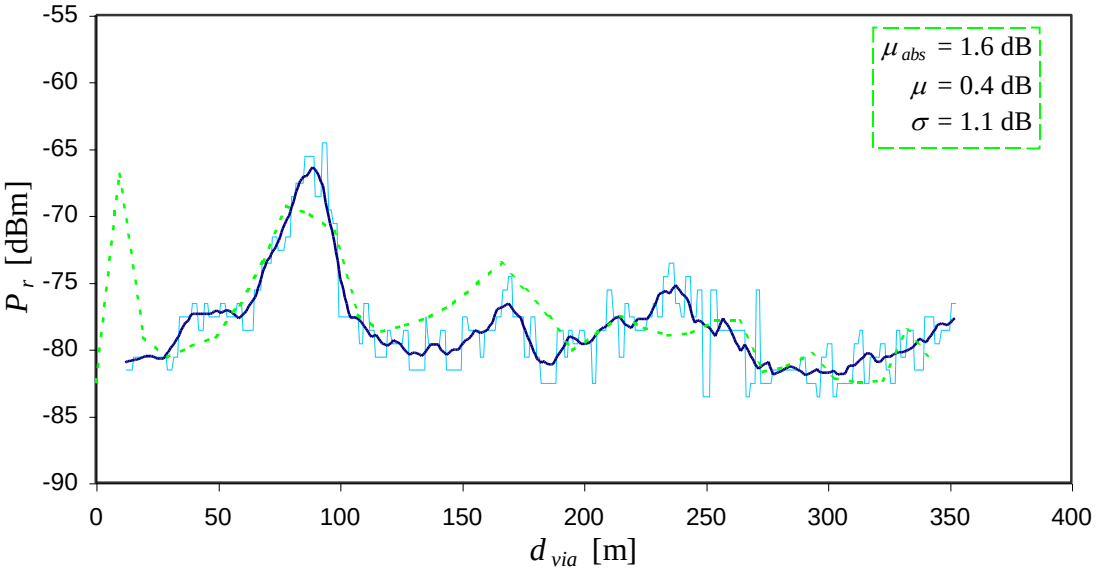


Fig. D2 – Rua da Conceição, L101A.

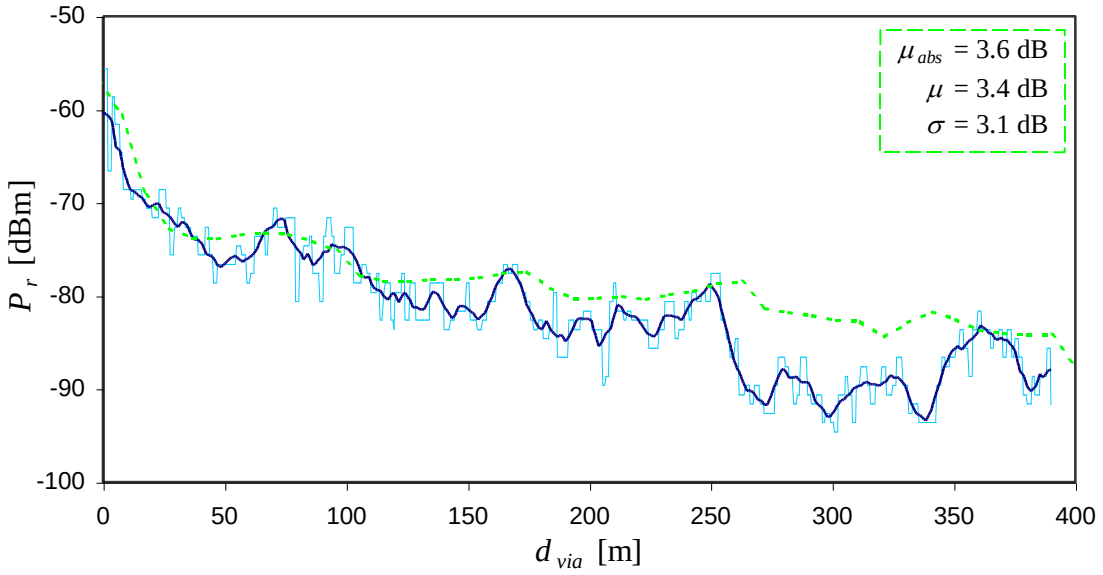


Fig. D3 – Rua dos Correeiros, L031B.

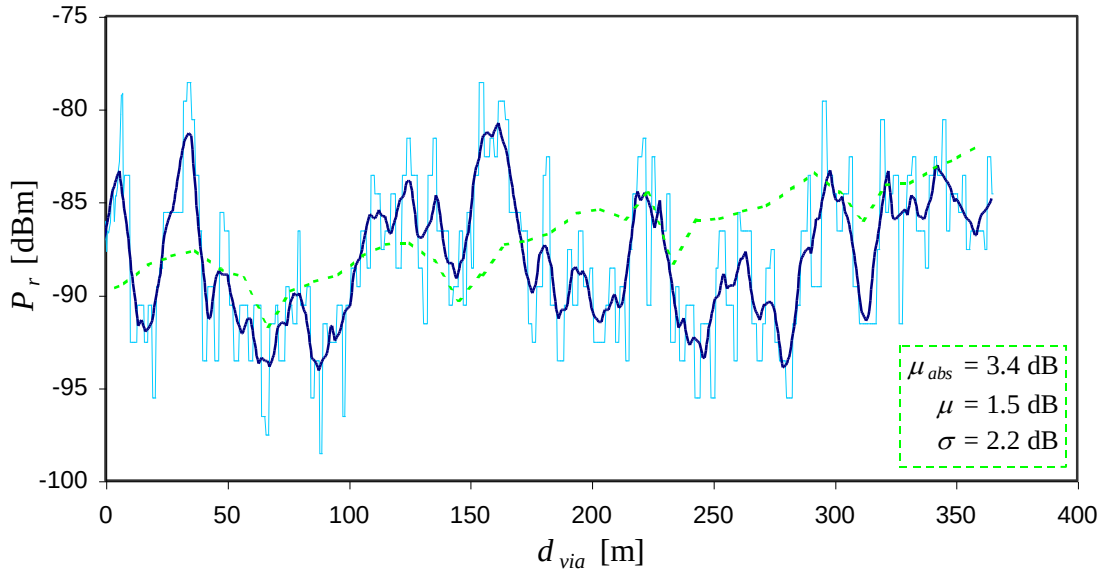


Fig. D4 – Rua dos Correeiros, L101A.

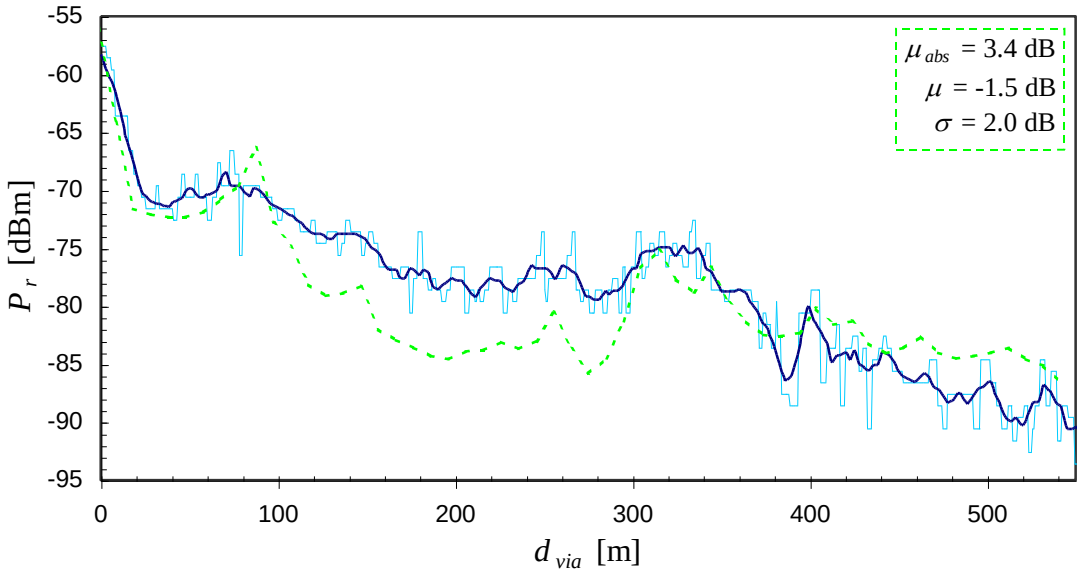


Fig. D5 – Rua dos Fanqueiros, L031B.

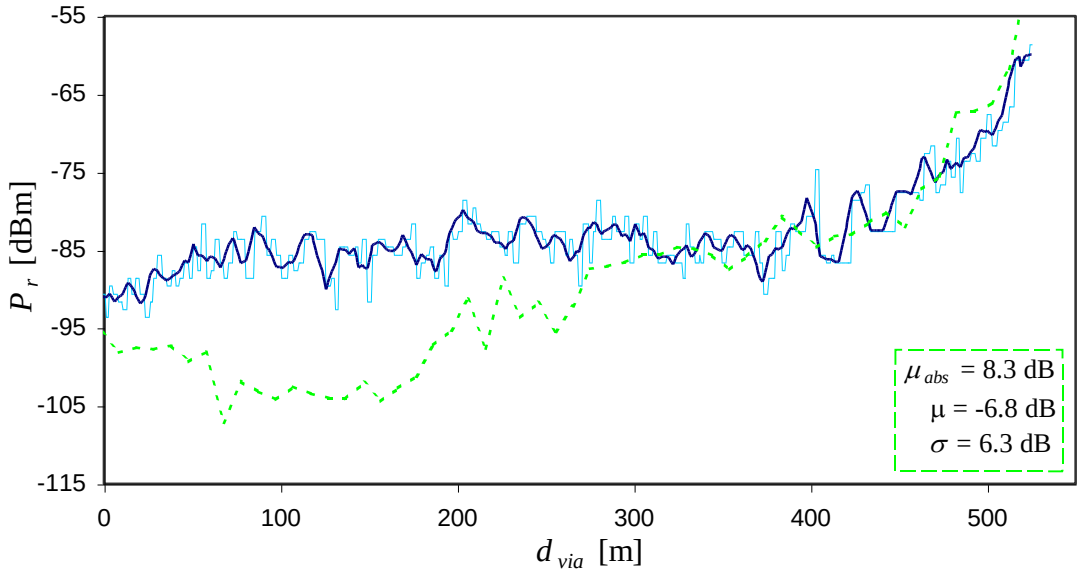


Fig. D6 – Rua dos Fanqueiros, L101A.

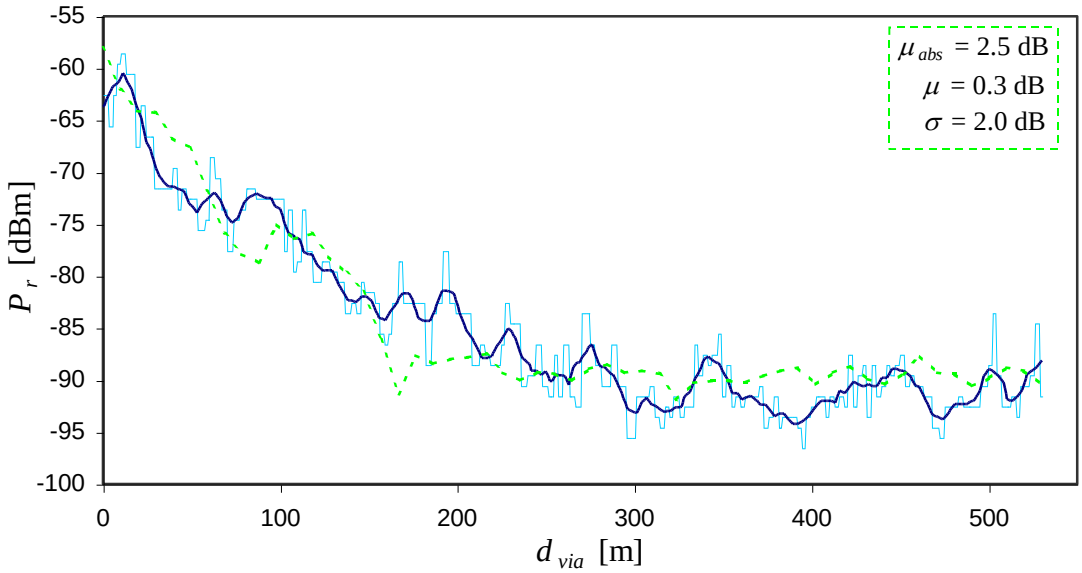


Fig. D7 – Rua do Ouro, L031B.

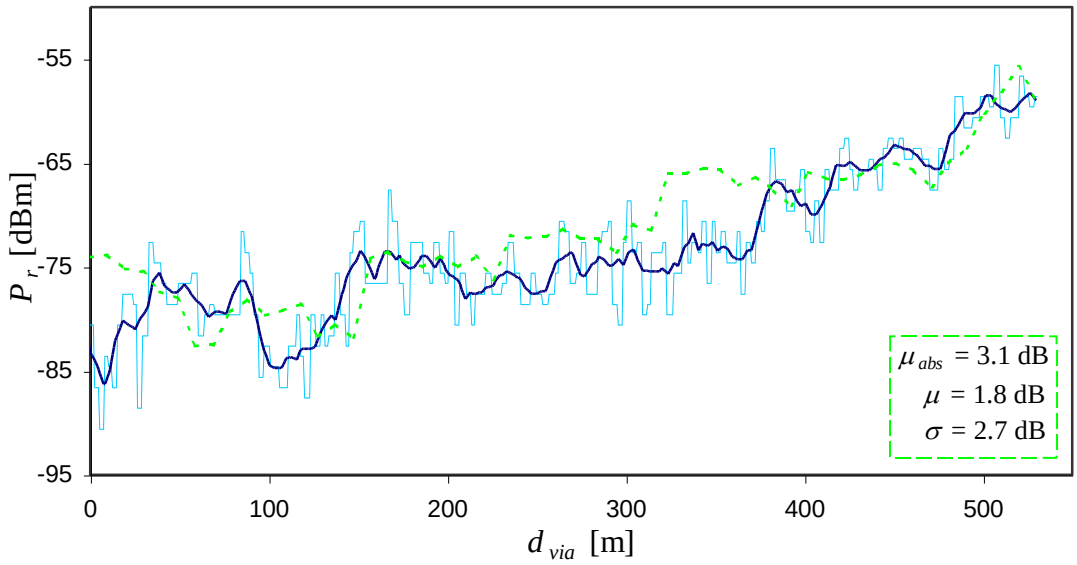


Fig. D8 – Rua do Ouro, L101A.

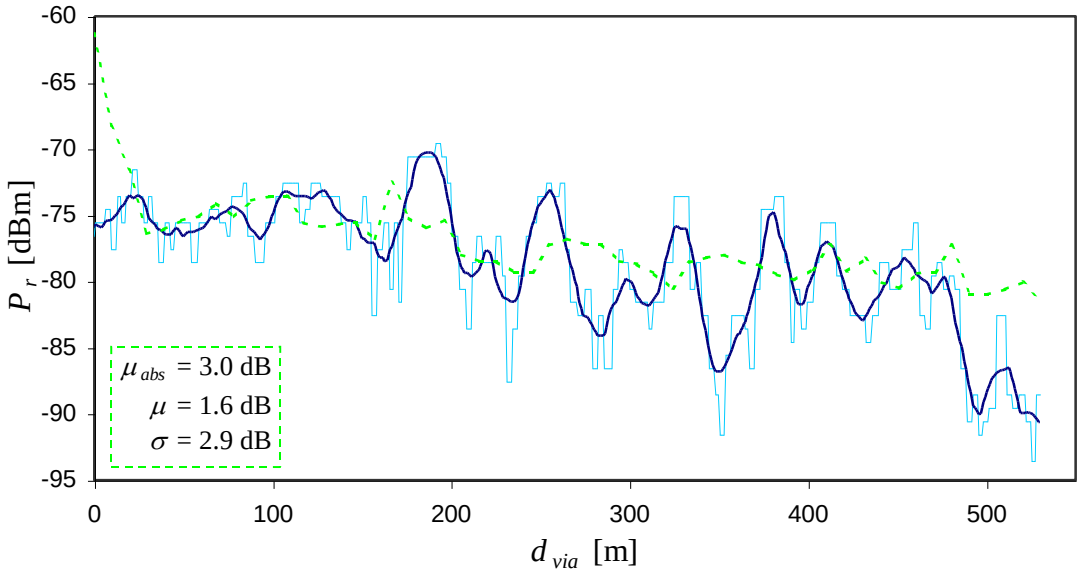


Fig. D9 – Rua da Prata, L031B.

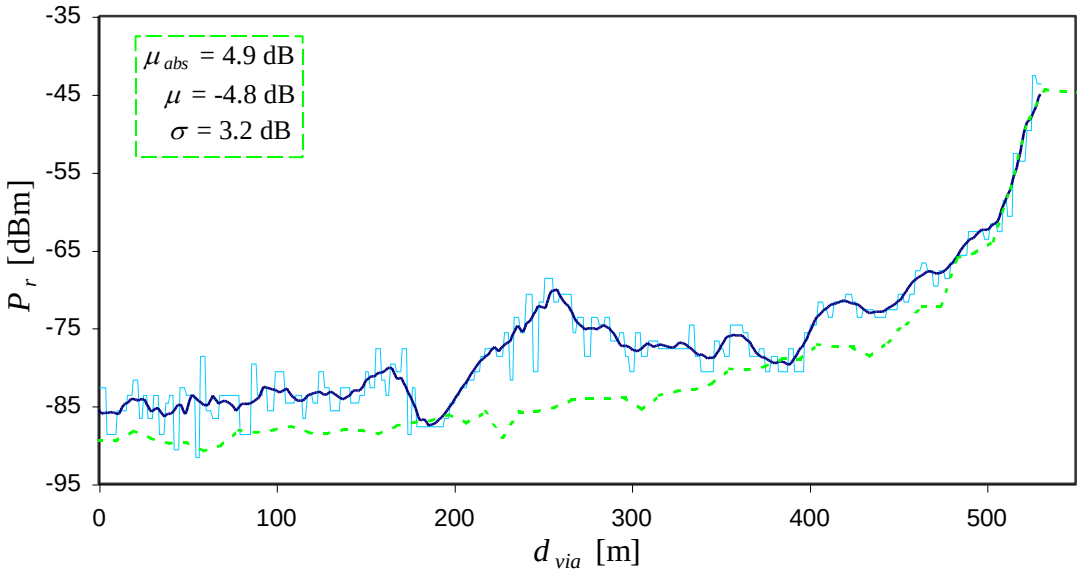


Fig. D10 – Rua da Prata, L101A.

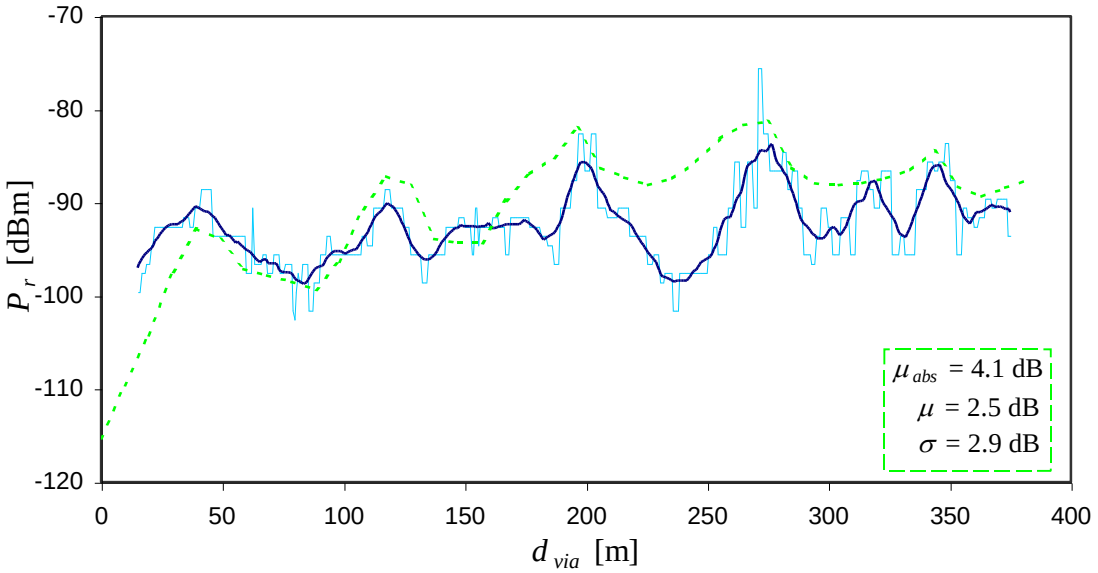


Fig. D11 – Rua de S. Julião, L031B.

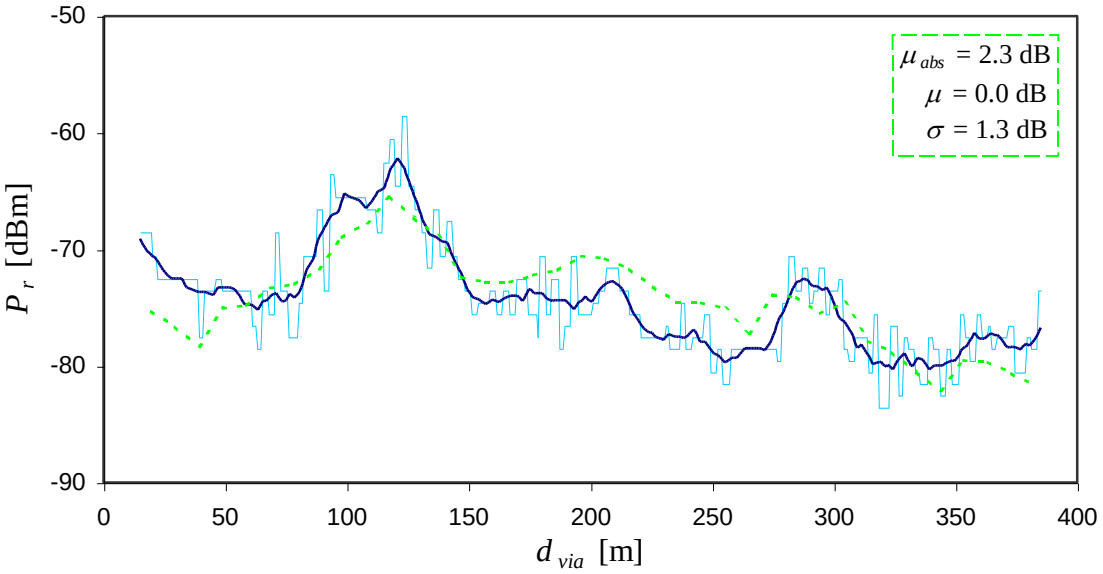


Fig. D12 – Rua de S. Julião, L101A.

CAMPO DE OURIQUE

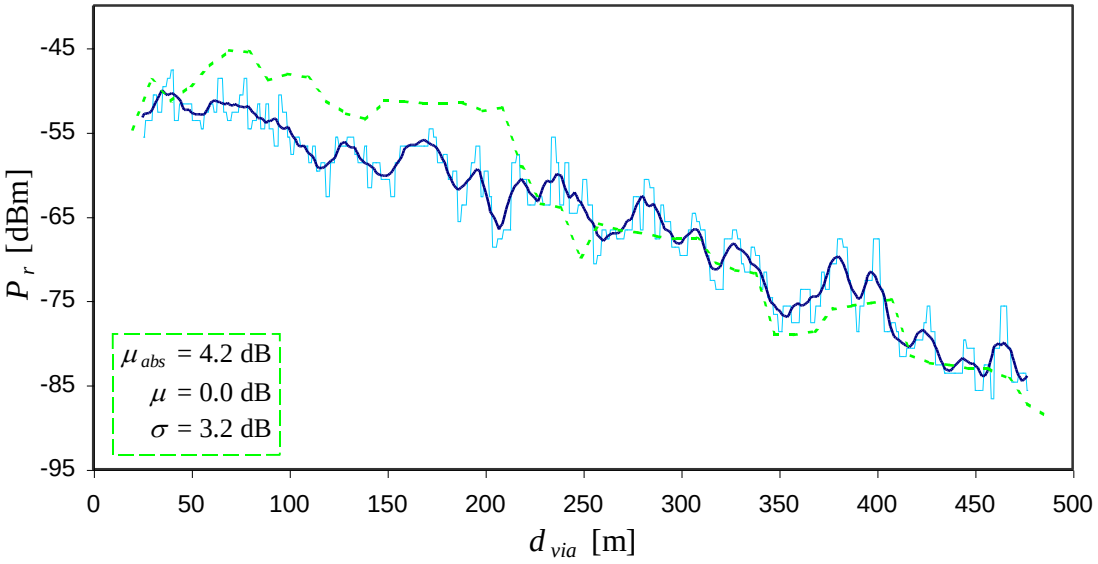


Fig. D13 – Rua 4 de Infantaria, L079C.

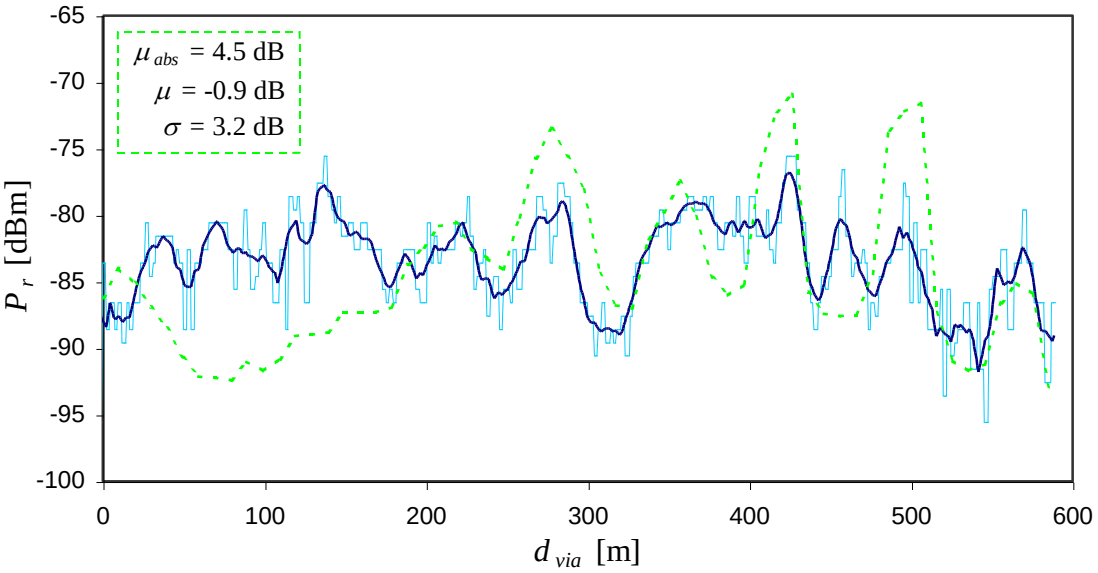


Fig. D14 – Rua Almeida e Sousa, L079C.

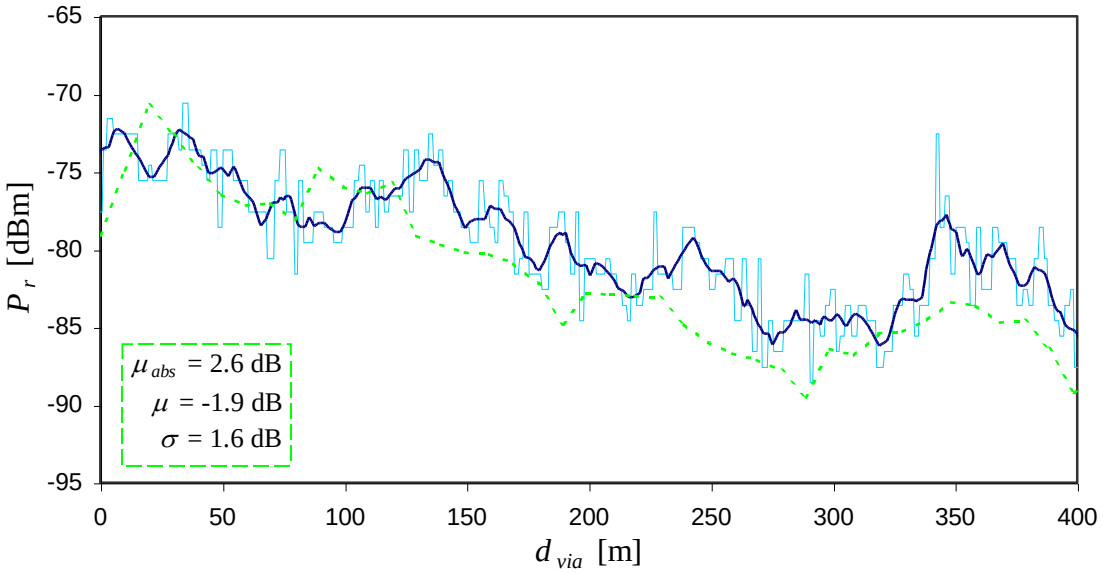


Fig. D15 – Rua Azedo Gneco, L079C.

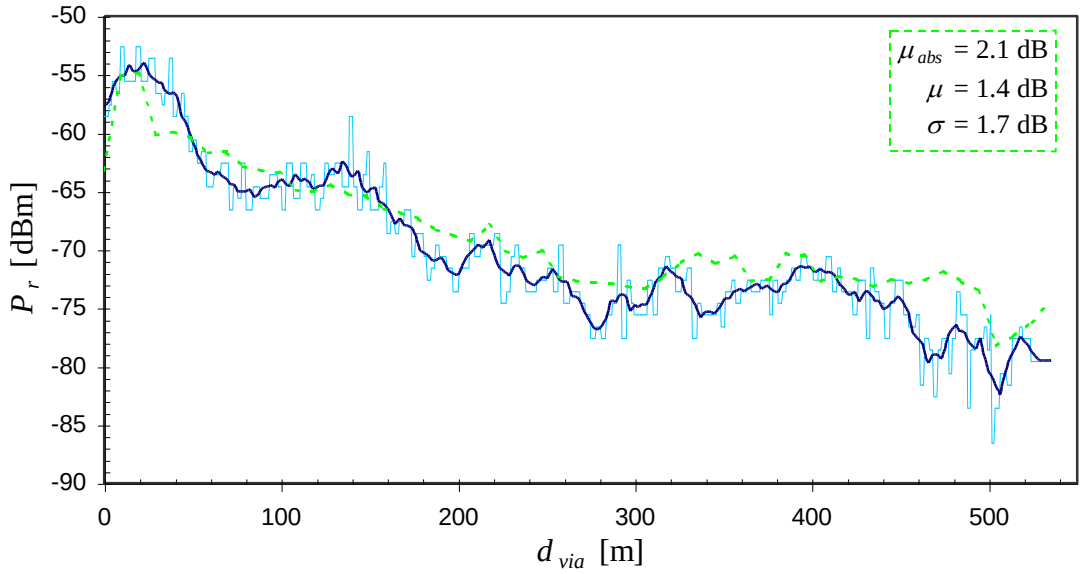


Fig. D16 – Rua Ferreira Borges, L079C.

Anexo E- Mapas de cobertura da Telecel

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[AbS64] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions, Appl. Math. Ser.*, vol. 55, National Bureau of Standards, Washington, D. C., 1964.

[BHM94] H. L. Bertoni, W. Honcharenko, L. R. Maciel and H. H. Xia, "UHF propagation prediction for wireless personal communications", *Proc. IEEE*, vol. 82, no. 9, pp. 1333-1359, Sep. 1994.

[Boe78] J. Boersma, "On certain multiple integrals occurring in a waveguide scattering problem", *SIAM J. Math. Anal.*, vol. 9, no. 2, pp. 377-393, Apr. 1978.

[Cos91] COST231 Working Group on UHF Propagation, "Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1800 MHz bands", *COST 231 TD(91)073*, The Hague, Sep. 1991.

[Cos97] Eraldo Damosso, *Digital Mobile Radio: COST231 view on the evolution towards 3rd generation systems*. Springer-Verlag, Berlin, German, 1997.

[CTM89] D. G. Checketts, D. Thomas, M. J. Melher, J. A. Edwards and D. J. Bagwell, "A theoretical model and experimental measurement of short VHF/UHF propagation in the presence of buildings", in *Proc. ICAP'89*, pp. 345-349, Coventry, Apr. 1989.

[DCG95] A. Domingues, D. Caiado e N. Gonçalves, "Adaptação do Modelo de Propagação COST231-WI à Cidade de Lisboa", Relatório do Trabalho Final de Curso, IST, Lisboa, Set. 1995.

[DFH96] P. Daniele, M. Frullone, K. Heiska, G. Riva and C. Carciofi, "Investigation of adaptative 3D microcellular prediction tools starting from real measurements", in *Proc. ICUPC'96*, pp. 468-472, Cambridge, Massachusetts, Sep. 1996.

[Fur63] K. Furutsu, "On the theory of radio wave propagation over inhomogeneous earth", *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, vol. 67-D, no. 1, pp. 39-62, 1963.

[GBT95] D. Grace, A. G. Burr and T. C. Tozer, "The effects of building position tolerances on ray based urban propagation modelling", *COST 231 TD(95)016*, Bern, Jan. 1995.

[GoV87] J. Goldhirsh and W. J. Vogel, "Roadside tree attenuation measurements at UHF for land mobile satellite systems", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-35, no. 5, pp. 589-596, May 1987.

[Hus94] T. Huschka, "Ray tracing models for indoor environments and their computational complexity", *COST 231 TD(94)022*, Lisbon, Jan. 1994.

[IkY80] F. Ikegami and S.Yoshida, "Analysis of multipath propagation structure in urban mobile ratio environments", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-28, no. 4, pp. 531-537, Jul. 1980.

[IYT84] F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi and M. Umehira, "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-32, no. 8, pp. 822-829, Aug. 1984.

[Jak74] W. C. Jakes, Jr., *Microwave Mobile Communications*. New York: Wiley, 1974.

[JDP92] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*. Pentech Press, London, UK, 1992.

[KCW93] T. Kurner, D. J. Cichon and W. Wiesbeck, "Concepts and results for 3D digital terrain-based wave propagation models: an overview", *IEEE J. Selected Areas Commun.*, vol. 11, no. 7, pp. 1002-1012, Sep. 1993.

[Kel62] J. B. Keller, "Geometrical theory of diffraction", *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 52, no. 2, pp. 116-130, Feb. 1962.

[KoP74] R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface", *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 11, pp. 1448-1461, Nov. 1974.

[KST85] E. F. Knott, J. F. Shaeffer and M. T. Tuley, *Radar Cross Section*. Dedham: Artech House, 1985.

[LaM94] M. C. Lawton and J. P. McGeehan, "The application of a deterministic ray launching algorithm for the prediction of radio channel characteristics in small-cell environments", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 955-969, Nov. 1994.

[Lue84] R. J. Luebbers, "Finite conductivity uniform GTD versus knife-edge diffraction in prediction of propagation path loss", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-32, no. 1, pp. 70-76, Jan. 1984.

[MBX93] L. R. Maciel, H. L. Bertoni and H. H. Xia, "Unified approach to prediction of propagation over building for all ranges of base station antenna height", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 41-45, Feb. 1993.

[McH91] J. W. McKown and R. L. Hamilton, Jr., "Ray tracing as a design tool for radio networks", *IEEE Network Mag.*, vol. 5, no. 6, pp. 27-30, Nov. 1991.

[RAO91] A. J. Rustako, Jr., N. Amitay, G. J. Owens and R. S. Roman, "Radio propagation at microwave frequencies for line-of-sight microcellular mobile and personal communications", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, pp. 203-210, 1991.

[Rat92] R. Rathgeber, "Comments on local mean estimation", *COST 231 TD(92)018*, Vienna, Jan. 1992.

[RoL92] J.-P. Rossi and A. J. Levy, "A ray model for decimetric radiowave propagation in an urban area", *Radio Sci.*, vol. 27, no. 6, pp. 971-979, Nov. - Dec. 1992.

[RWK95] K. Rizk, J.-F. Wagen, S. Khomri and F. Gardio, "Influence of database accuracy on ray tracing based prediction in urban microcells", *COST 231 TD(95)132*, Poznan, Sep. 1995.

[SaB91] S. R. Saunders and F. R. Bonar, "Explicit multiple-building diffraction attenuation function for mobile radio wave propagation", *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 14, pp. 1276-1277, Jul. 1991.

[SaB94] S. R. Saunders and F. R. Bonar, "Prediction of mobile wave propagation over buildings of irregular heights and spacings", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 42, no. 2, pp. 137-144, Feb. 1994..

[SBH33] J. C. Schelling, C. R. Burrows and E. B. Ferrell, "Ultra-short wave propagation", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 12, pp. 125-161, Apr. 1933.

[SeR92] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, “A ray tracing technique to predict path loss and delay spread inside buildings”, in *Proc. GLOBECOM’92*, 1992.

[StT81] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*. New York: Wiley, 1981.

[TaT96] S. Y. Tan and H. S. Tan, “A microcellular communications propagation model based on the uniform theory of diffraction and multiple image theory”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, no. 10, pp. 1317-1326, Oct. 1996.

[TBL96] S. A. Torrico, H. L. Bertoni, R. H. Lang, “Theoretical investigation of foliage effects on path loss for residential environments”, in *Proc. VTC’96*, pp. 854-858, Atlanta, Georgia, Apr. 1996.

[Vog82] L. E. Vogler, “An attenuation function for multiple knife-edge diffraction”, *Radio Sci*., vol. 19, no. 6, pp. 1541-1546, Nov. - Dec. 1982.

[VoG86] W. J. Vogel and J. Goldhirsh, “Tree attenuation at 869 MHz derived from remotely piloted aircraft measurements”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-34, no. 12, pp. 1460-1464, Dec. 1986.

[WaB88] J. Walfisch and H. L. Bertoni, “A theoretical model of UHF propagation in urban environments”, *IEEE Trans. Antennas Propagat*., vol. 36, no. 12, pp. 1788-1796, Dec. 1988.

[WaR94] J.-F. Wagen and K. Rizk, “Ray tracing based prediction of impulse response in urban microcells”, in *Proc. VTC’94*, pp. 210-214, Stockholm, Jun. 1996.

[Whi93] J. H. Whitteker, “A series solution for diffraction over terrain modeled as multiple bridged knife edges”, *Radio Sci*., vol. 28, no. 4, pp. 487-500, Jul. - Aug. 1993.

[XBM93] H. H. Xia, H. L. Bertoni, L. R. Maciel, A. L.-Stewart and R. Rowe, “Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications”, *IEEE Trans. Antennas Propagat*., vol. 41, no. 10, pp. 1439-1447, Oct. 1993.

[XBM94] H. H. Xia, H. L. Bertoni, L. R. Maciel, A. L.-Stewart and R. Rowe, “Microcellular propagation characteristics for personal communications in urban and suburban environments”, *IEEE Trans. Veh. Technol*., vol. 43, no. 3, pp. 743-751, Aug. 1994.

[Xia96] H. H. Xia, “An analytical model for predicting path loss in urban and suburban environments”, in *Proc. PIMRC’96*, pp. 19-23, Taipei, Taiwan, Oct. 1996.

[XiB92] H. H. Xia and H. L. Bertoni, “Diffraction of cylindrical and plane waves by an array of absorving half screens”, *IEEE Trans. Antennas Propagat*., vol. 40, no. 2, pp. 170-177, Feb. 1992.