

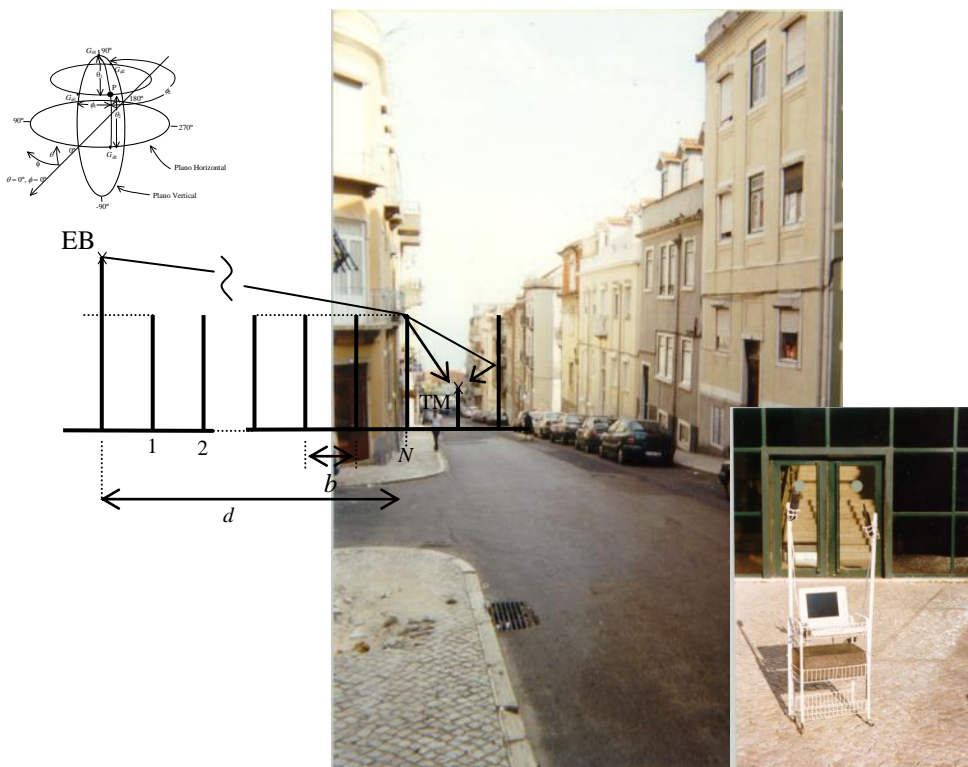


INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Departamento
de Engenharia
Electrotécnica e
de Computadores

TRABALHO FINAL DE CURSO

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE PROPAGAÇÃO PARA MICROCÉLULAS URBANAS NÃO REGULARES EM GSM 900



ANA ROSA CLARO

JOSÉ MIGUEL FERREIRA

Lisboa, Setembro de 1998

Trabalho realizado sob a orientação do
Prof. Luís M. Correia
da Secção de Propagação e Radiação

“Hoje compreendemos melhor que o que conta são as próprias equações, e não o modelo usado para as obter. Podemos apenas perguntar se as equações são verdadeiras ou falsas. A isto responde-se fazendo experiências, e um número incalculável de experiências confirmaram as equações de Maxwell. Se eliminarmos os andaimes que ele usou para o construir, descobrimos que o belo edifício de Maxwell se mantém de pé por si só.”

RICHARD FEYNMAN, citado por CARL SAGAN em
Um Mundo Infestado de Demónios (GRADIVA 1995)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaríamos de agradecer ao Prof. Luís Correia pela oportunidade que nos deu de realizar este trabalho, e por todo o seu apoio e disponibilidade sempre demonstrados.

Ao Eng. Nuno Gonçalves pelos esclarecimentos prestados e pela disponibilização do código fonte que desenvolveu no âmbito da sua tese de Mestrado.

À Telecel, nas pessoas do Eng^o. José Mata, Sr. Domingos Morgado, Eng^a. Diana Caiado e Eng. Carlos Caseiro, pela colaboração na campanha de medidas e pelas informações complementares necessárias para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Carlos Fernandes pelos esclarecimentos sobre difracção no início do nosso trabalho.

Ao fabricante Kathrein na pessoa de Anton Huber pelos diagramas de radiação enviados por E-mail.

Aos colegas do Grupo Móvel 98, Ana Domingues, Carlos Pardelinha, Chiara Bedini, Francisco Gil, José Queijo, Juan Carlos, Mayte Rodrigo, Sandra Almeida, pelo convívio e camaradagem, e pelas sugestões que nos deram no decurso deste trabalho. Um agradecimento adicional ao Francisco pelas dicas sobre o modelo para o diagrama de radiação das antenas.

Agradecemos à Sr^a Isabel Rocha e D. Olívia pelo apoio prestado.

Aos nossos pais e irmão (do Zé) pela paciência e incentivo (“*Já acabaram!?*”) que sempre demonstraram.

RESUMO

Neste trabalho pretende-se testar o desempenho de modelos de propagação existentes para microcélulas urbanas em cenários que apresentem uma estrutura diferente da assumida na dedução dos mesmos. Para tal, foi efectuado um conjunto de medidas na cidade de Lisboa com a colaboração do operador de GSM Telecel.

Foram aplicadas as formulações de Xia e Bertoni e de Ikegami para o cálculo da atenuação por difracção múltipla pelo topo dos edifícios até ao móvel. De modo a prever a influência dos cruzamentos na potência recebida no móvel testou-se o modelo de Gonçalves.

Para obter as previsões dos modelos foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo em C++. Para a implementação do modelo de Xia e Bertoni no programa estudou-se a convergência da série de funções de Boersma da expressão da atenuação, tendo-se chegado a um critério de aplicação da mesma e de expressões aproximadas em função dos parâmetros geométricos do modelo. Para contabilizar a variação do ganho da estação de base aplicou-se um modelo de extrapolação do ganho da antena, a partir dos diagramas de radiação nos planos horizontal e vertical.

Obtiveram-se bons resultados para a zona regular das Avenidas Novas para ângulos de rua superiores a 20°. O modelo dos cruzamentos provou conseguir prever a localização e amplitude da influência dos mesmos. Para ângulos de rua inferiores a 20°, os erros foram elevados e díspares entre conjuntos de medidas, não se conseguindo estabelecer um valor previsível para o erro associado aos modelos para este cenário.

Quanto às zonas irregulares da área dos Sapadores foi possível distinguir, em termos de resultados, os cenários em que a estação de base se encontra acima ou abaixo da linha de topo dos edifícios para toda a rua percorrida ou, ainda, acima numa porção da rua e abaixo noutra. Os resultados obtidos foram razoáveis para os cenários em que, embora irregulares, a estação de base se encontrava acima do topo dos edifícios, sendo possível prever a localização dos cruzamentos, mas não a amplitude da sua influência. Quando a estação de base se encontra abaixo da linha de topo dos edifícios em qualquer porção considerável da rua medida, os resultados previstos teoricamente pelos modelos diferem consideravelmente dos experimentais, produzindo uma sobreestimação da atenuação de propagação da ordem das dezenas de dB.

PALAVRAS CHAVE:

Sistema Celular, GSM, Modelos de Propagação, Microcélulas Urbanas, Cenários Irregulares

ABSTRACT

The purpose of this work is to test the performance of existing propagation models for urban microcells when applied to propagation scenarios different from those assumed in the models' deduction. With this objective in mind, field measurements were carried out in Lisbon, in cooperation with the Portuguese GSM operator Telecel.

To evaluate the attenuation between base station and mobile terminal due to multiscreen diffraction, Xia and Bertoni's and Ikegami's formulations were used. In order to account for the influence of crossroads in the mobile received power, Gonçalves' model was tested. To obtain the above models' predictions, a software tool was developed using the C++ programming language. In the implementation of Xia and Bertoni's model on the software tool, the convergence of the series of Boersma functions in the model's exact formulation was studied, and an application criterion for the model's equations (exact and approximated) was derived based on its geometric parameters. The antenna gain variation was also accounted for, and an extrapolation model was applied to calculate the antenna gain in a given direction based on the radiation patterns on the horizontal and vertical planes.

Good agreement between theoretical predictions and measurements was achieved in the regular area of Avenidas Novas in Lisbon, for street angles larger than 20° . For a regular scenario the crossroads' model was able to produce good agreement with measurements, as well as to predict the location and amplitude of the crossroads' influence on the mobile received power. For street angles bellow 20° the obtained errors were high and varied from one set of measurements to another, making it impossible to establish a predictable error for models in this kind of scenario. For the irregular scenarios of Sapadores (in Lisbon) it was possible to separate the obtained results according to the base station height relative to the average roof top. Thus, different kind of agreement between measurements and predictions was obtained for the cases in which the base station was above or bellow roof tops in all the measured street, or above in a portion of the street and bellow on the other. For those scenarios in which the base station was above roof tops, fair performance from models was obtained, and the crossroads' influence was well predicted in terms of location on the street, but not in magnitude. When the base station is bellow roof tops for a considerable part of the street the obtained results show a great discrepancy between measured and predicted values, and the calculated attenuation by the models is much higher than the one observed on the measurements.

KEYWORDS:

Celular System, GSM, Propagation Models, Urban Microcells, Irregular Scenarios

ÍNDICE

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
ÍNDICE	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SIGLAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. MODELOS DE PROPAGAÇÃO	7
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
2.2. MODELO DE XIA E BERTONI.....	11
2.3. MODELO DE IKEGAMI <i>et al.</i>	16
2.4. INFLUÊNCIA DOS CRUZAMENTOS	18
3. IMPLEMENTAÇÃO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO.....	23
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
3.2. GANHO DA ESTAÇÃO DE BASE.....	26
3.3. INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	30
3.4. IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO	32
3.4.1. MODELO DE XIA E BERTONI.....	32
3.4.2. MODELO DE IKEGAMI <i>et al.</i>	36
3.4.3. MODELO DOS CRUZAMENTOS	38
4. CAMPANHA DE MEDIDAS E ANÁLISE DE RESULTADOS	39
4.1. DESCRIÇÃO DA CAMPANHA DE MEDIDAS	41
4.1.1. ESCOLHA DAS ZONAS A ANALISAR	41
4.1.2. EQUIPAMENTO E PROGRAMA DE AQUISIÇÃO UTILIZADOS	42
4.1.3. PROCEDIMENTOS DE MEDIDA	44
4.1.4. TRATAMENTO DAS MEDIDAS	45
4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
4.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	47
4.2.2. RESULTADOS GERAIS.....	50
4.2.3. ZONAS REGULARES.....	54

4.2.3.1. CENÁRIOS COM ÂNGULO DE RUA ELEVADO	54
4.2.3.2. CENÁRIOS COM ÂNGULO DE RUA REDUZIDO	56
4.2.4. ZONAS IRREGULARES	59
4.2.4.1. ESTAÇÃO DE BASE ACIMA DO TOPO DOS EDIFÍCIOS	60
4.2.4.2. ESTAÇÃO DE BASE ABAIXO DO TOPO DOS EDIFÍCIOS	62
4.2.4.3. ESTAÇÃO DE BASE ACIMA E ABAIXO DO TOPO DOS EDIFÍCIOS	62
5. CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS	71
ANEXO A - CONVERGÊNCIA DO MODELO DE XIA E BERTONI	A-1
ANEXO B - VARIAÇÃO DE ΔL_{int} , Δd_{int} , Δd_{ext} COM OS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	B-1
ANEXO C - VARIAÇÃO DE L_{cruz} COM OS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	C-1
ANEXO D - CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES DE BASE	D-1
ANEXO E - DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO DAS ANTENAS DAS ESTAÇÕES DE BASE	E-1
ANEXO F - MAPAS DAS ZONAS MEDIDAS	F-1
ANEXO G - FOTOGRAFIAS	G-1
ANEXO H - MEDIDAS E PREVISÕES DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA A ZONA DAS AVENIDAS NOVAS	H-1
ANEXO I - MEDIDAS E PREVISÕES DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA A ZONA DOS SAPADORES	I-1

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Cenário de aplicação do Modelo de Xia e Bertoni.	12
Fig. 2.2 - Variação de $Q(g_p)$ para a expressão aproximada para antenas da EB acima dos edifícios.....	14
Fig. 2.3 - Cenário de aplicação do Modelo de Ikegami.	16
Fig. 2.4 - Geometria de um cruzamento considerada no Modelo de Gonçalves.....	19
Fig. 2.5 - Redução na atenuação de propagação devida à influência do cruzamento, para $\varphi_c = 90^\circ$, $d_c = 500$ m, $w_c = 25$ m e $\Delta h_{base} = 3$ m.	20
Fig. 3.1 - Geometria para o cálculo de θ e ϕ no diagrama de radiação.	26
Fig. 3.2 - Esquema de aplicação do método de extrapolação do diagrama de radiação tridimensional.	29
Fig. 3.3 - Geometria associada ao cálculo do ângulo de rua, φ	36
Fig. 4.1 - Interface com o utilizador do programa TEMS [®]	43
Fig. 4.2 - Ficheiro de saída do programa TEMS [®]	45
Fig. 4.3 - Influência do método de cálculo de N na potência recebida.	50
Fig. 4.4 - Influência dos métodos de contabilização do ganho na potência recebida.	52
Fig. 4.5 - Influência dos cruzamentos na potência recebida.	53

LISTA DE TABELAS

Tab. 4.1 - Comparação dos dois métodos de cálculo de N	51
Tab. 4.2 - Comparação dos métodos de contabilização do ganho.	52
Tab. 4.3 - Influência dos cruzamentos.	54

LISTA DE SIGLAS

ARFCN	Absolute Radio Frequency Channel Number
BSIC	Base Transceiver Station Identity Code
EB	Estação de Base
ERP	Potência Aparente Radiada
GSM	Global System for Mobile Communications
PH	Plano Horizontal
PV	Plano Vertical
RXLEV	Received Signal Level
TEMS	TEst Mobile System
TM	Terminal Móvel
TUE	Topo do Último Edifício
UE	Último Edifício

LISTA DE SÍMBOLOS

α	- Ângulo de incidência no TUE
α_{3dB}^V	- Largura de feixe a meia potência no PV
Δd_{ext}	- Parâmetro característico da curva de atenuação suplementar nos cruzamentos
Δd_{int}	- Parâmetro característico da curva de atenuação suplementar nos cruzamentos
Δh_{base}	- Diferença entre h_{EB} e h_{ED}
ΔL_{int}	- Parâmetro característico da curva de atenuação suplementar nos cruzamentos
ΔP	- Diferença entre a potência estimada e a medida
$\Delta x, \Delta y$	- Parâmetros auxiliares no cálculo de Ψ_N
ϕ, θ	- Coordenadas esféricas no referencial do diagrama de radiação da antena
Φ	- Ângulo de incidência no 1º edifício no modelo de , Xia e Bertoni
Γ	- Factor de reflexão
φ	- Ângulo de rua
φ_c	- Ângulo de rua no centro do cruzamento
λ	- Comprimento de onda de trabalho
μ	- Média do erro
μ_{abs}	- Média do erro absoluto
θ_{dt}	- Ângulo de inclinação vertical da antena (<i>down-tilt</i>)
$\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2$	- Diferenças angulares auxiliares no modelo de extrapolação do ganho
ρ	- Distância entre a EB e o topo do 1º edifício no modelo de Xia e Bertoni
σ	- Desvio padrão do erro
Ψ_{EB_N}	- Azimute da antena da EB
Ψ_N	- Ângulo com o Norte da direcção onde se quer calcular G_{EB}
A_E	- Atenuação devida à difracção por um obstáculo no modelo de Ikegami
b	- Espaçamento médio entre fileiras de edifícios entre a EB e o TM
c	- Velocidade de propagação da luz no vácuo
$C(.)$	- Coseno integral de Fresnel
d	- Distância entre a EB e o TUE
$d_{0_A}, d_{0_B}, d_{0_EB}, d_{0_N}, d_{EB_A}, d_{EB_B}, d_{EB_N}$	- Distâncias auxiliares no cálculo do ângulo de rua
d_c	- Distância da EB ao centro do cruzamento
d_{EB_TM}	- Distância entre a EB e o TM

d_{EB_P}	- Distância entre a EB e o ponto na direcção do qual se quer calcular G_{EB}
$dist_via$	- Distância do TM ao início da via percorrida
d_perfil	- Distância à EB de cada ponto do perfil entre a EB e o TM
d_{UE_TM}	- Distância entre o UE e o TM
d_{via}	- Distância do TM ao centro do cruzamento
\bar{E}	- Campo médio incidente no móvel no modelo de Ikegami
E_1	- Campo directo difractado na formulação de Ikegami
E_2	- Campo difractado reflectido na formulação de Ikegami
f	- Frequência de trabalho
F_B	- Relação entre b e W_B para o modelo de Xia e Bertoni
G	- Ganho dado pelo modelo de extrapolação
G_0	- Ganho da antena na direcção de máximo
g_θ, g_ϕ	- Ganhos generalizados nas direcções horizontal e vertical, respectivamente
$G_{\theta 1}, G_{\theta 2}, G_{\phi 1}, G_{\phi 2}$	- Ganhos auxiliares no modelo de extrapolação do ganho
g_c	- Parâmetro adimensional do modelo de Xia e Bertoni
G_{EB}	- Ganho da antena da EB
g_p	- Parâmetro adimensional do modelo de Xia e Bertoni
G_{TM}	- Ganho da antena do TM
h_e	- Altura equivalente adimensional do modelo de Ikegami
h_{EB}	- Altura da antena da EB
h_{ED}	- Altura média dos edifícios entre a EB e o TM
h_{TM}	- Altura do TM
$I_{N,q}$	- Funções de Boersma
k	- Constante de propagação
L_0	- Atenuação em espaço livre
L_{cruz}	- Atenuação suplementar dos cruzamentos
L_{msd}	- Atenuação adicional devida à difracção múltipla sobre o topo dos edifícios
L_p	- Atenuação de propagação
L_{rts}	- Atenuação adicional devida à difracção desde o TUE até ao nível da rua
N	- Número de fileiras de edifícios entre a EB e o TM
N_p	- Número de pontos na comparação entre medidas e previsões
P_e	- Potência de emissão da EB
P^m	- Potência média medida obtida através do método da janela deslizante

P_r	- Potência recebida pelo TM
P^t	- Potência média estimada pelo modelo teórico
Q	- Atenuação adicional prevista pelo modelo de Xia e Bertoni
r	- Coeficiente de decaimento do ganho no plano vertical
$S(.)$	- Seno integral de Fresnel
W	- Largura da percorrida pelo TM
W_B	- Largura dos quarteirões
w_c	- Largura do cruzamento
(x,y)	- Coordenadas cartesianas de um ponto

1. INTRODUÇÃO

As telecomunicações entraram definitivamente no quotidiano da humanidade durante este século. No final deste milénio tem-se assistido a um crescimento explosivo na utilização dos meios de telecomunicação, sendo as comunicações móveis, a par da *Internet*, os domínios em maior expansão.

Os sistemas de rádio móvel baseiam-se na transmissão via rádio entre uma estação de base e um terminal móvel. Actualmente, estes sistemas apoiam-se no conceito celular, que implica a divisão da área de serviço em células, cuja dimensão depende das condições de propagação e tráfego a suportar. Cada célula é coberta por uma estação de base, com uma potência de emissão reduzida, que serve vários terminais móveis no seu interior.

Actualmente, para além do sistema analógico C em franco desuso, o sistema de telefonia móvel celular utilizado em Portugal é o GSM (*Global System for Mobile Communications*), a operar nas bandas dos 900 MHz e 1800 MHz.

Nos principais centros urbanos, devido ao número elevado de utilizadores presente, o raio das células tem vindo a ser progressivamente reduzido de modo a aumentar a capacidade do sistema, sendo em alguns casos não superior a poucas centenas de metros.

Em microcélulas urbanas, quando não existe linha de vista, o principal mecanismo de propagação responsável pela chegada de sinal ao móvel é a difracção pelo topo dos edifícios entre a estação de base e o terminal móvel e a difracção desde o topo do último edifício antes do móvel até o nível da rua. Hoje em dia, existe uma tendência, com a diminuição do raio das células, para colocar as antenas das estações de base abaixo do nível dos telhados dos edifícios, passando o raio directo entre a estação de base e o móvel e os reflectidos no interior da rua a terem o papel principal na chegada do sinal ao receptor. No entanto, o estudo da difracção através do topo dos edifícios continua a ser importante para a previsão da interferência.

Ao longo dos anos, têm sido desenvolvidos vários modelos de propagação com a finalidade de prever o nível médio de sinal recebido em microcélulas urbanas. Um destes modelos é o de Xia e Bertoni, [XiBe92], que contabiliza a atenuação suplementar causada pela difracção múltipla através de edifícios equiespaçados e de altura uniforme, dispostos segundo uma grelha rectangular. O modelo de Ikegami, [IYTU84], permite estimar o sinal que chega ao móvel devido à difracção desde o topo do último edifício antes do móvel até ao nível da rua. Um fenómeno de propagação não estudado por estes modelos é a condução das ondas electromagnéticas no interior da rua. A contabilização deste mecanismo torna-se importante quando o móvel se desloca ao longo de uma via e passa por sucessivos cruzamentos. Nestes cruzamentos existirá uma contribuição adicional para a potência recebida

por parte dos raios conduzidos pela rua transversal. Foi desenvolvido por Gonçalves, [Gonç98], um modelo que estima a influência dos cruzamentos num ambiente caracterizado por uma estrutura urbana regular, isto é, com espaçamento entre edifícios e altura dos mesmos uniforme, dispostos segundo uma rede rectangular.

Neste trabalho pretende-se estudar o desempenho, para o sistema GSM a 900 MHz, dos modelos de propagação anteriormente referidos em microcélulas urbanas, cujas características difiram das assumidas na dedução dos modelos teóricos. Para tal, foi efectuado um conjunto de medidas na cidade de Lisboa em microcélulas, com o objectivo de recolher dados para teste dos modelos. Realizaram-se medidas na zona dos Sapadores, por esta apresentar uma estrutura não regular a nível da disposição e largura das ruas, e cota do terreno.

Para a comparação das medidas experimentais com as previsões teóricas foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo onde se implementaram os modelos. Este programa baseia-se numa carta digitalizada, com uma resolução de 50 m, contendo informação sobre as coordenadas cartesianas de cada ponto, tipo de ocupação (edifícios, árvores e água) e respectiva altura.

Com o intuito de aferir a ferramenta de cálculo e os modelos nela implementados, efectuaram-se medidas numa área com estrutura urbana regular, satisfazendo os cenários de validade dos modelos, tendo sido escolhida a zona das Avenidas Novas em Lisboa.

Os modelos de propagação em estudo e implementados na ferramenta de cálculo são introduzidos no Capítulo 2. É apresentado o modelo de Xia e Bertoni que permite calcular a atenuação por difracção múltipla pelo topo dos edifícios desde a estação de base até ao topo do último edifício antes do terminal móvel, e o modelo de Ikegami que contabiliza a atenuação sofrida pelo sinal deste o topo do último edifício até ao nível da rua. É ainda descrito neste capítulo o modelo desenvolvido por Gonçalves que permite contabilizar a influência dos cruzamentos no nível de sinal recebido pelo móvel.

No Capítulo 3 descreve-se a implementação na ferramenta de cálculo dos modelos descritos no capítulo anterior. Referem-se as diversas parcelas que contribuem para a determinação da potência recebida e os possíveis métodos para o seu cálculo, nomeadamente, a estimação do ganho da estação de base numa dada direcção através de um método de extrapolação a partir dos diagramas de radiação nos planos horizontal e vertical. É também apresentado, neste capítulo, um estudo sobre a convergência da expressão exacta do modelo

de Xia e Bertoni, e derivado um critério de aplicação das expressões exacta e aproximadas do modelo em função dos parâmetros geométricos do mesmo.

No Capítulo 4 descreve-se a campanha de medidas efectuada em colaboração com o operador de GSM Telecel, focando a escolha das zonas a analisar, o equipamento e programa de aquisição utilizados, os procedimentos e posterior tratamento das medidas. Em seguida, apresenta-se a análise de resultados feita com base na comparação entre os dados experimentais e as previsões teóricas. São comentados resultados gerais obtidos, que ilustram as consequências da tomada de certas opções na implementação dos modelos, nomeadamente, no cálculo da variação do ganho da antena da estação de base, do número de edifícios contabilizados no modelo de Xia e Bertoni e da influência dos cruzamentos. Em seguida apresentam-se os resultados das comparações efectuadas entre valores experimentais e teóricos por zona medida, tendo-se verificado que para as zonas regulares se podiam separar os resultados dos cenários com ângulo de rua elevado dos com ângulo de rua reduzido. Para as zonas irregulares, agruparam-se os resultados em cenários em que as estações de base, relativamente ao nível médio do topo dos edifícios, estão acima, abaixo, e parcialmente abaixo e acima em diferentes troços das ruas medidas.

As conclusões deste estudo e perspectivas de trabalho futuro estão sistematizadas no Capítulo 5.

Adicionalmente, apresenta-se no Anexo A o estudo sobre a convergência do modelo de Xia e Bertoni. Nos Anexos B e C, ilustra-se a dependência do termo que contabiliza a influência dos cruzamentos na propagação do sinal com os vários parâmetros geométricos que descrevem o cenário de aplicação deste modelo. As características das estações de base estudadas e os diagramas de radiação das suas antenas encontram-se nos Anexos D e E, respectivamente. No Anexo F, assinala-se a localização das ruas medidas e estações de base seleccionadas para o presente estudo. Fotografias do equipamento e cenários de teste encontram-se no Anexo G. Finalmente, são apresentados gráficos com as curvas de potência recebida medida e teórica para as zonas das Avenidas Novas e Sapadores no Anexo H e Anexo I, respectivamente. Destes Anexos fazem ainda parte gráficos com a representação do perfil entre a estação de base e o terminal móvel para o início e fim das ruas medidas, bem como tabelas com os parâmetros utilizados pelos modelos teóricos.

2. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Inicia-se este capítulo com algumas considerações gerais sobre modelos de propagação e sobre as diferentes parcelas que contribuem para a atenuação de propagação de um sinal desde a estação de base (EB) até ao terminal móvel (TM). Em seguida, apresentam-se as formulações de alguns modelos de propagação que permitem estimar o nível médio da intensidade do sinal recebido em microcélulas urbanas. Inicia-se a descrição com o modelo de Xia e Bertoni que contabiliza a atenuação originada pela difracção do sinal por fileiras de edifícios equiespaçadas e de altura uniforme, seguido do modelo de Ikegami *et al.* que prevê a atenuação devida à difracção do sinal desde o topo do último edifício (TUE) antes do móvel até ao nível da rua. Por fim, introduz-se um modelo que permite contabilizar a influência dos cruzamentos no nível de sinal recebido no TM para cenários regulares.

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos sistemas de comunicações celulares é de vital importância a determinação do nível de sinal recebido por um TM para efeitos de planeamento celular, pretendendo-se garantir um certo grau de cobertura numa determinada região (célula). Como tal têm sido desenvolvidos vários modelos, [Pars92], adequados a diferentes cenários de propagação, que permitem estimar o nível de sinal recebido, sendo a sua escolha muitas vezes dependente do rigor com que se conhece o trajecto do sinal desde a EB ao móvel, bem como da sensibilidade do projectista.

Basicamente os modelos existentes podem ser classificados como empíricos ou teóricos. Os modelos empíricos são baseados em medidas de sinal efectuadas em cenários de propagação padrão, sendo obtidas dessas medidas curvas ou expressões que melhor se ajustam às mesmas, com base num tratamento estatístico das medidas. Estes modelos têm como vantagem o facto de contabilizarem todos os factores que influenciam a propagação, mas apresentam a desvantagem de não se adequarem a cenários, frequências e condições diferentes das associadas às medidas efectuadas. Sendo assim, torna-se necessário, para outros casos, ajustar posteriormente este tipo de modelos através de medidas adicionais efectuadas em cada cenário, frequência e condições. Os modelos teóricos, embora determinísticos, não são capazes de descrever todos os fenómenos associados à propagação do sinal, uma vez que estes são inúmeros e complexos. Deste modo, os modelos teóricos são deduzidos com base num cenário simplificado da realidade, onde muitos factores que influenciam a propagação

não são contabilizados ou são desprezados. A sua principal vantagem reside no facto de permitirem diferentes valores dos parâmetros de entrada e não estarem restritos a nenhum local em particular, dependendo a sua precisão de quão fiel é a representação da realidade a que têm acesso, tais como, a definição de bases de dados geográficos.

É ainda de salientar que numa ligação estabelecida num ambiente de características variáveis no tempo, o nível de sinal recebido varia de instante para instante, ainda que a potência de emissão se mantenha constante. Este fenómeno é denominado de desvanecimento e pode provocar a recepção de sinal abaixo do limiar de sensibilidade do TM. As variações da potência recebida podem ser lentas ou rápidas. O desvanecimento lento está associado a alterações em larga escala do cenário de propagação à medida que o móvel se desloca (por exemplo, diferenças nas alturas dos edifícios do cenário, e assim do grau de obstrução do sinal), sendo o comprimento característico das flutuações do sinal da ordem das muitas dezenas de comprimento de onda. O desvanecimento lento é normalmente caracterizado por uma distribuição log-normal. O desvanecimento rápido resulta da existência de vários percursos possíveis para o sinal, ou seja, da interferência entre contribuições do sinal provenientes de trajectos diferentes, com amplitudes que podem ser da mesma ordem de grandeza e fases que se distribuem equiprovavelmente no intervalo $[-\pi, 2\pi]$, seguindo assim uma distribuição de Rayleigh. O comprimento característico destas flutuações é da ordem de meio comprimento de onda.

Neste trabalho faz-se apenas o estudo, através de modelos teóricos, do andamento médio do sinal recebido, não se tendo em conta o efeito do desvanecimento rápido. Um modelo que permitisse estimar o valor da potência instantânea recebida no móvel seria muito complicado de desenvolver e implementar, uma vez que teria que contabilizar todos os parâmetros que influenciam a propagação. Exigiria assim informação de entrada detalhada e muito difícil ou impossível de obter em tempo útil sobre o cenário de propagação, tal como, valores exactos da altura de cada edifício, largura de ruas e passeios, altura dos passeios, etc.

Para o cálculo da atenuação de propagação considera-se a contribuição de três termos distintos:

$$L_p \text{ dB} = L_{msd} \text{ dB} + L_{rts} \text{ dB} + L_0 \text{ dB} \quad (2.1)$$

onde:

- L_{msd} contabiliza a difracção múltipla sobre o topo dos edifícios;
- L_{rts} tem em conta a difracção desde o topo do último edifício até ao móvel;
- L_0 é a atenuação em espaço livre sofrida pelo sinal desde a EB até ao TM, sendo dada pela expressão:

$$L_0 [dB] = 32.44 + 20 \log d_{EB-TM} [m] + 20 \log f [MHz] \quad (2.2)$$

onde d_{EB-TM} é a distância do percurso entre a EB e o TM e f a frequência de trabalho.

Os modelos utilizados para o cálculo das parcelas L_{msd} e L_{rts} serão descritos nas secções seguintes.

2.2. MODELO DE XIA E BERTONI

O Modelo de Xia e Bertoni, [XiBe92], permite prever a atenuação sofrida pelo sinal na propagação entre a EB e o TM, devida à difracção através de múltiplas fileiras de edifícios.

O modelo surgiu na sequência do trabalho desenvolvido por Walfish e Bertoni [WaBe88], tendo sido deduzido com o intuito de ultrapassar as limitações da sua formulação, nomeadamente, o elevado tempo de cálculo, convergência do método apenas para um número elevado de obstáculos para incidências rasantes, e aplicação válida só para antenas da EB acima da linha de topo dos edifícios.

A formulação deduzida por Xia e Bertoni destina-se a ser aplicado a um cenário onde a linha de vista entre a estação de base e o terminal móvel se encontra interrompida por edifícios dispostos segundo filas paralelas e equiespaçadas, de altura uniforme e sobre terreno plano, como representado na Fig. 2.1, onde b é a distância entre centros de edifícios adjacentes, e N é o número de fileiras de edifícios entre a EB e o TM.

O modelo recorre à aproximação da Física Óptica, mais concretamente à formulação de Helmholtz-Kirchhoff, sendo os edifícios modelados por planos opacos semi-infinitos coincidentes com o centro dos edifícios, sendo o método baseado no cálculo numérico dos integrais múltiplos de Kirchhoff-Huygens para analisar a difracção de uma onda cilíndrica por um conjunto de lâminas opacas de altura uniforme. Assim, através do conhecimento da

distribuição de campo no primeiro obstáculo, é calculado o campo no obstáculo seguinte, e assim sucessivamente, até se obter o campo no topo do último obstáculo antes do móvel.

Xia e Bertoni exprimiram os integrais múltiplos da difracção numa série onde intervêm as funções de Boersma, [Boer78], sendo o método de mais fácil implementação computacional do que o de Walfisch e Bertoni, tendo ainda como vantagem o facto de poder ser aplicado para alturas da antena da EB acima e abaixo da linha de topo dos edifícios.

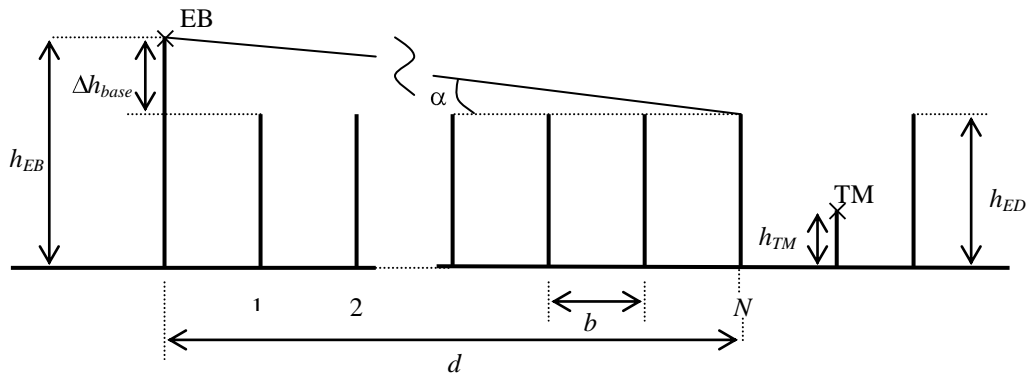


Fig. 2.1 - Cenário de aplicação do Modelo de Xia e Bertoni.

Embora o cenário de aplicação do modelo de Xia e Bertoni exija espaçamento entre edifícios e altura dos mesmos uniforme, este pode ser aplicado a cenários com edifícios de alturas e espaçamentos arbitrários desde que se tomem como parâmetros de entrada a média das alturas e espaçamentos verificados no cenário real. Muitas vezes é esta informação média que se tem quando se quer fazer uma previsão do sinal recebido, pelo que esta limitação do modelo poderá ser ou não importante, dependendo de cada caso.

A redução suplementar do campo, Q , sofrida pelo sinal desde a EB até ao TUE devida à difracção através dos $N-1$ edifícios, é dada na formulação de Xia e Bertoni por:

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

em que o parâmetro adimensional g_c dá conta da dependência da atenuação suplementar com a frequência e com a geometria do cenário de aplicação, sendo calculado através de:

$$g_c = \Delta h_{base} \frac{1}{\sqrt{\lambda d}} \quad (2.4)$$

em que λ é o comprimento de onda de trabalho dado por $\lambda=c/f$, sendo c a velocidade de propagação da luz no vácuo.

O termo $I_{N-1,q}$ é referente às funções de Boersma que podem ser calculadas por recorrência através das expressões seguintes:

$$I_{N,0} = \frac{1}{(N+1)^{3/2}} \quad (2.5)$$

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

onde:

$$(q-1)I_{N,q-2} = 0, \quad q = 1 \quad (2.7)$$

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

Em 1993, Maciel, Bertoni e Xia [MaBX93] reviram os conceitos introduzidos em [WaBe88] e [XiBe92], e apresentaram fórmulas simples aproximadas para a atenuação sofrida por difracção nos múltiplos obstáculos, obtidas por regressão de curvas calculadas através do modelo apresentado anteriormente por Xia e Bertoni. Verificou-se então que a expressão exacta do modelo de Xia e Bertoni dada por (2.3) podia ser aproximada, tanto para o caso da antena da EB acima dos edifícios como para o caso de se encontrar abaixo da linha de topo dos edifícios, com erros reduzidos para $|\Delta h_{base}| > \sqrt{\lambda b}$.

Para antenas da EB acima da linha de topo dos edifícios, e quando o sinal atravessa muitos obstáculos até chegar ao móvel, verifica-se que Q depende do parâmetro adimensional:

$$g_p = \alpha \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad (2.8)$$

podendo a atenuação adicional ser expressa pela seguinte expressão aproximada, com um erro máximo de 0.5 dB em relação à expressão exacta do modelo de Xia e Bertoni (2.3):

$$Q(g_p) = 3.502g_p - 3.327g_p^2 + 0.962g_p^3, \quad 0.01 < g_p < 1 \quad (2.9)$$

A variação do polinómio de (2.9) em função de g_p encontra-se representada na Fig. 2.2.

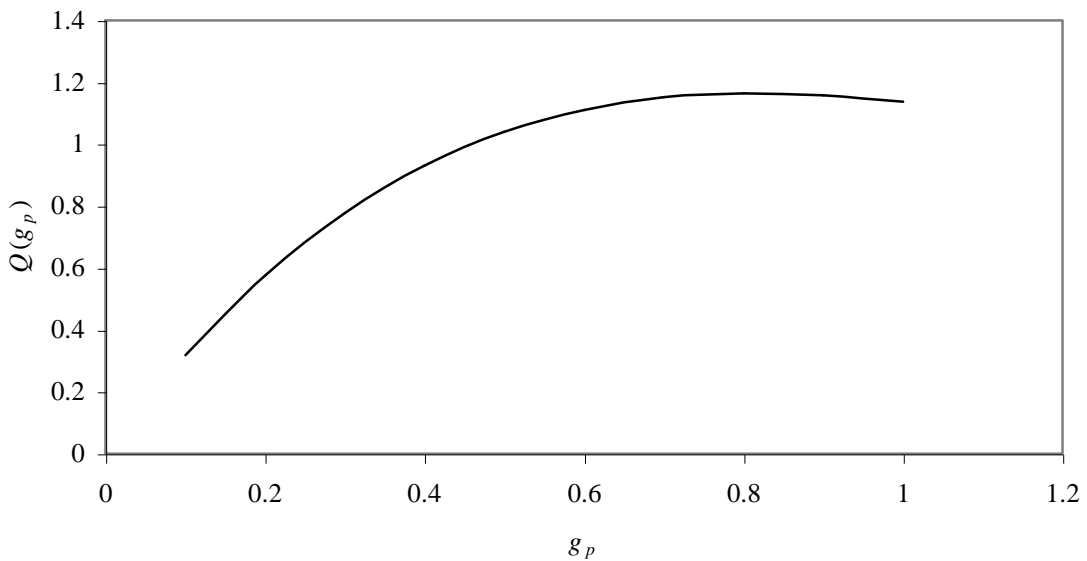


Fig. 2.2 - Variação de $Q(g_p)$ para a expressão aproximada para antenas da EB acima dos edifícios.

Como se pode verificar por observação da Fig. 2.2, o polinómio aproximado de (2.9) torna-se superior à unidade para $g_p \geq 0.459$, ou seja, a expressão prevê um ganho do sinal em vez de uma atenuação na sua propagação. Uma vez que esse resultado não faz sentido do ponto de vista da aplicação em engenharia, limitou-se neste trabalho a utilização de (2.9) a valores de g_p inferiores a 0.459, apesar desse limite ser menor do que o previsto pelos autores do modelo, considerando-se uma atenuação nula para valores de g_p superiores.

Para antenas da EB colocadas abaixo da linha de topo dos edifícios, existe uma expressão alternativa para Q dada por, [MaBX93]:

$$Q = \left(\frac{b}{d-b} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi k\rho}} \left(\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{2\pi + \Phi} \right) \right] \quad (2.10)$$

onde $k=2\pi/\lambda$ e:

$$\rho = \sqrt{(\Delta h_{EB} - h_{ED})^2 + b^2} \quad (2.11)$$

$$\Phi = -\tan^{-1}\left(\frac{\Delta h_{base}}{b}\right) \quad (2.12)$$

Foi também proposta por Xia, [Xia96], uma expressão para Q válida para alturas da EB abaixo da altura média dos obstáculos:

$$Q = \left[\frac{b}{2\pi(\rho - b)} \right]^2 \frac{\lambda}{\sqrt{\Delta h_{base}^2 + b^2}} \left(\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{2\pi + \Phi} \right)^2 \quad (2.13)$$

Esta expressão difere no entanto muito da expressão exacta do modelo dada por (2.3) para Δh_{base} negativo pelo que a ser implementada conduziria a uma descontinuidade do valor de Q ao passar-se de uma expressão para a outra, como se pode verificar por observação da Fig. A.1 no Anexo A onde se representa o andamento de Q para as quatro expressões do modelo apresentadas anteriormente.

Por inspecção da Fig. A.1 conclui-se ainda que existe uma boa concordância entre as expressões aproximadas dadas por (2.9) e (2.10) e a expressão exacta do modelo dada por (2.3), para Δh_{base} suficientemente afastado da origem. Pode-se também observar nesta figura que a expressão exacta dada por (2.3) deixa de convergir a partir de um certo valor de $|\Delta h_{base}|$.

Consideram-se, assim, três expressões para o cálculo da atenuação suplementar Q : a expressão dada por (2.3) é geral, válida para qualquer número de obstáculos e para qualquer altura da antena da estação de base, a expressão (2.9) a utilizar apenas para antenas acima da linha de topo dos edifícios e para um número elevado de obstáculos, enquanto que a expressão (2.10) é válida para antenas da EB colocadas abaixo da linha de telhados. Na Secção 3.4.1. faz-se um estudo da convergência da expressão exacta dada por (2.3) e desenvolve-se um critério de aplicação das expressões aproximadas para Q .

A atenuação por difracção múltipla entre a EB e o TUE, normalizada à atenuação em espaço livre é dada por:

$$L_{msd} [dB] = -20 \log Q \quad (2.14)$$

2.3. MODELO DE IKEGAMI *et al.*

O modelo de Ikegami, [IYTU84], considera um cenário de propagação em que a linha de vista entre a estação de base e o terminal móvel está interrompida apenas por um obstáculo (edifício) que se encontra muito perto do móvel. Assim, o modelo assume que a propagação entre a estação de base e o TUE se encontra desimpedida e, por isso, processa-se como em espaço livre, considerando que o campo incidente no topo do edifício é uma onda plana que se difracta até ao nível da rua e, portanto, até ao terminal móvel.

No presente trabalho vai-se utilizar o modelo de Ikegami para determinar qual a atenuação sofrida pelo sinal, proveniente da EB, desde o TUE até ao móvel, não sendo assim o modelo utilizado isoladamente, mas antes em conjunto com o de Xia e Bertoni descrito na Secção 2.2. O cenário de aplicação do modelo e os parâmetros geométricos envolvidos encontram-se representados na Fig 2.3:

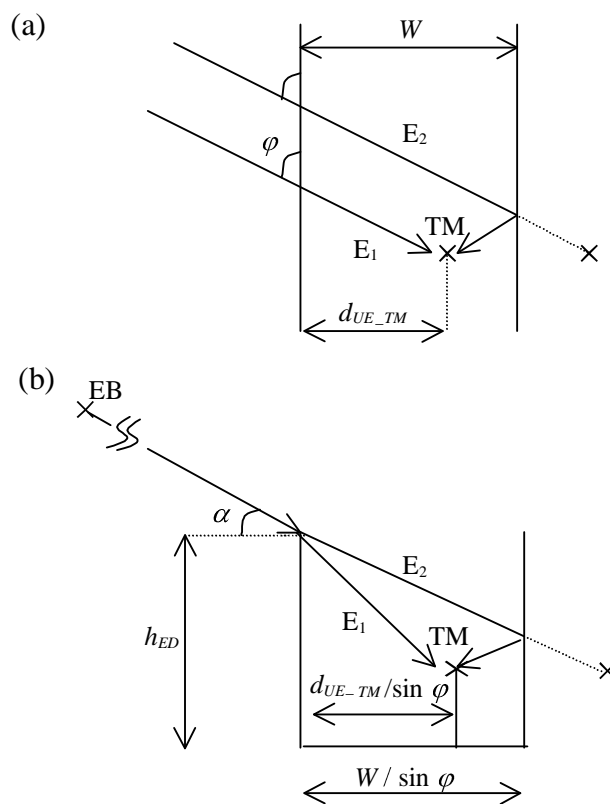


Fig. 2.3 - Cenário de aplicação do Modelo de Ikegami: (a) vista em planta; (b) vista em perfil.

O nível médio de sinal que atinge o móvel é determinado somando em potência o raio difractado no topo do edifício com o raio também difractado no topo do edifício e que é seguidamente reflectido na parede do edifício em frente ao móvel, antes de atingir este último.

Este modelo não exige que a propagação seja perpendicular à rua onde se encontra o móvel, podendo ser oblíqua à mesma, sendo assim contabilizado um ângulo de rua, φ , definido entre a direcção de propagação e a orientação da rua.

O efeito da difracção é calculado utilizando a formulação de Helmholtz-Kirchhoff para a zona de Fresnel, sendo substituído o edifício por um écran semi-infinito opaco (*knife-edge*) perpendicular à direcção de propagação do sinal.

Através da formulação de Kirchhoff-Huygens, [Figa91], a atenuação, A_E , sofrida pelo campo na difracção no topo do edifício é dada por:

$$|A_E(h_e)| = \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} + C(h_e) \right]^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} + S(h_e) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.15)$$

em que $C(\cdot)$ e $S(\cdot)$ são as funções coseno e seno integrais de Fresnel, e h_e é uma altura equivalente (adimensional) definida como:

$$h_{e1} = \sqrt{\frac{2 \sin \varphi}{\lambda d_{UE_TM}}} \left[(h_{TM} - h_{ED}) + 2 d_{UE_TM} \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} \right] \quad (2.16)$$

para a onda difractada directa, e como:

$$h_{e2} = \sqrt{\frac{2 \sin \varphi}{\lambda (2W - d_{UE_TM})}} \left[(h_{TM} - h_{ED}) + 2 (2W - d_{UE_TM}) \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} \right] \quad (2.17)$$

no caso da onda que é reflectida no edifício da frente.

O campo total recebido pelo móvel é a soma vectorial dos campos correspondentes às trajetórias 1 e 2 assinaladas na Fig. 2.3, que se obtém multiplicando o campo incidente no topo do obstáculo pelas correspondentes funções de atenuação dadas por (2.15) e (2.16) ou (2.17). No caso da onda reflectida no edifício oposto ao obstáculo é também necessário contabilizar as perdas por reflexão na parede do edifício.

A intensidade média do campo devida às duas ondas, difractada e reflectida, é dada pela expressão:

$$\bar{E} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2.18)$$

em que:

$$E_1^2 = E_0^2 |A_E \cos \theta_{e1}|^2 \quad (2.19)$$

$$E_2^2 = E_0^2 |A_E \cos \theta_{e2}|^2 |\Gamma|^2 \quad (2.20)$$

sendo E_0 a amplitude do campo que incide no topo do obstáculo, e Γ o factor de reflexão no edifício oposto ao obstáculo.

Assim, a atenuação do sinal devida à difracção desde o TUE até ao nível da rua, normalizada à atenuação em espaço livre, é dada na formulação de Ikegami por:

$$L_{rts} [dB] = -20 \log \left(\sqrt{|A_E \cos \theta_{e1}|^2 + |A_E \cos \theta_{e2}|^2 |\Gamma|^2} \right) \quad (2.21)$$

2.4. INFLUÊNCIA DOS CRUZAMENTOS

Os modelos de propagação anteriormente descritos não contabilizam todos os fenómenos envolvidos no percurso do sinal desde a EB até ao TM, nomeadamente, a influência dos cruzamentos no nível de sinal recebido. Os modelos apresentados anteriormente consideram que os principais mecanismos de propagação que fazem chegar sinal ao móvel são a difracção pelo topo das múltiplas fileiras de edifícios e difracção desde o topo do último edifício até ao móvel, desprezando fenómenos de propagação guiada do sinal no interior das ruas laterais. A propagação do sinal no interior das ruas laterais tem influência no nível de potência recebida quando o móvel se encontra num cruzamento, existindo a possibilidade do nível médio de sinal recebido ser maior devido a contribuições dos raios provenientes da rua lateral que cruza o trajecto do móvel.

Foi desenvolvida por Gonçalves, [Gonç98], uma expressão matemática que procura contabilizar a influência dos cruzamentos. Este modelo resultou do ajuste de curvas aos resultados obtidos a partir da aplicação de um programa de lançamento de raios a um cruzamento entre duas vias, com a geometria da Fig. 2.4, onde se encontram definidos os vários parâmetros geométricos do modelo, com exceção de Δh_{base} definido anteriormente (ver Fig. 2.1). Para simplificar o estudo considerou-se a largura da rua principal onde se desloca o móvel, w_p , igual à largura da rua transversal, w_t .

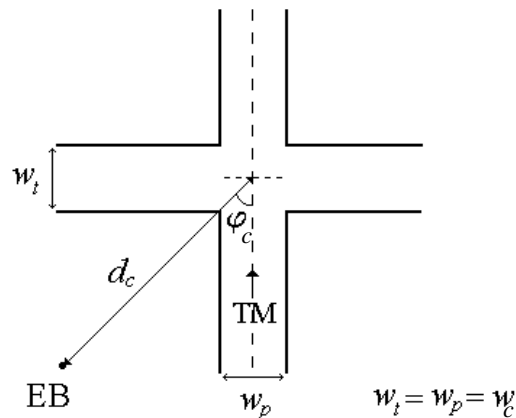


Fig. 2.4 - Geometria de um cruzamento considerada no Modelo de Gonçalves.

O modelo que traduz a influência dos cruzamentos desenvolvido por [Gonç98], permite obter o valor da redução, L_{cruz} , da atenuação de propagação para cenários regulares em função dos parâmetros geométricos que definem o problema, e que deverá ser adicionada à atenuação de propagação.

Verifica-se que a curva que dá a redução do sinal em função de d_{via} (distância do móvel ao centro do cruzamento) apresenta sempre a mesma forma, independentemente dos parâmetros geométricos. O andamento de L_{cruz} com d_{via} está ilustrado na Fig. 2.5, onde se definem as grandezas caracterizadoras de L_{cruz} .

Como se pode observar da Fig. 2.5, para valores de $|d_{via}|$ inferiores a $\Delta d_{int}/2$, a redução da atenuação, L_{cruz} , apresenta um valor médio ΔL_{int} ; para $|d_{via}|$ entre $\Delta d_{int}/2$ e $\Delta d_{ext}/2$, ocorre um decréscimo exponencial do módulo de L_{cruz} , enquanto que para $|d_{via}|$ superior a $\Delta d_{ext}/2$ deixa de se fazer sentir a influência dos cruzamentos, tendo-se L_{cruz} nulo.

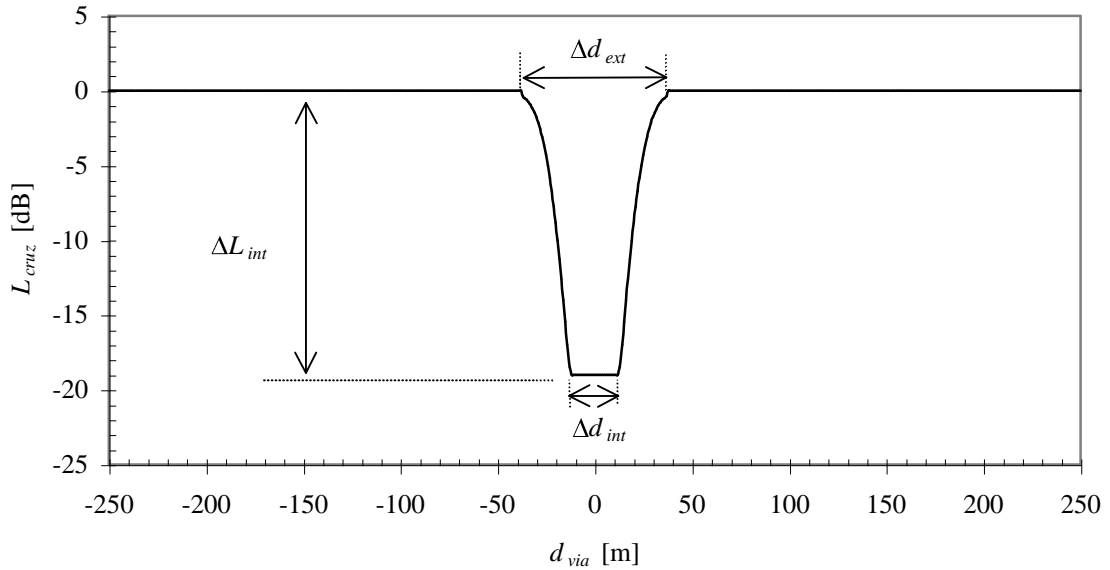


Fig. 2.5 - Redução na atenuação de propagação devida à influência do cruzamento, para

$$\varphi_c = 90^\circ, d_c = 500 \text{ m}, w_c = 25 \text{ m e } \Delta h_{base} = 3 \text{ m}.$$

Nas expressões apresentadas em seguida, as atenuações são expressas em dB, as distâncias em metros e os ângulos em graus. Conhecidos os valores de ΔL_{int} , Δd_{int} e Δd_{ext} pode-se calcular L_{cruz} através de:

$$L_{cruz} \text{ [dB]} = \begin{cases} 0 & , |d_{via}| \geq \Delta d_{ext}/2 \\ -A_M \exp \left[-18 \left(|d_{via}| / \Delta d_{ext} \right)^2 \right] & , \Delta d_{int}/2 < |d_{via}| < \Delta d_{ext}/2 \\ \Delta L_{int} & , |d_{via}| \leq \Delta d_{int}/2 \end{cases} \quad (2.22)$$

com:

$$A_M = -\Delta L_{int} \exp \left[-5 \left(\Delta d_{int} / \Delta d_{ext} \right)^2 \right] \quad (2.23)$$

Para determinar expressões para o cálculo de ΔL_{int} , Δd_{int} e Δd_{ext} , Gonçalves estudou a sua variação com os parâmetros geométricos φ_c , d_c , w_c e Δh_{base} , assumindo a existência de um ambiente padrão caracterizado por $d_c=500$ m, $w_c=25$ m e $\Delta h_{base}=3$ m. Para simplificar o estudo, assumiu-se que a dependência de L_{cruz} com cada um dos parâmetros geométricos é independente. A variação das grandezas ΔL_{int} , Δd_{int} e Δd_{ext} com os parâmetros geométricos encontra-se no Anexo B, onde se apresentam as expressões matemáticas que descrevem essas

variações, bem como a forma das curvas das mesmas. As expressões de ΔL_{int} , Δd_{int} e Δd_{ext} são válidas para $200 \leq d_c \leq 2000$ m, $12.5 \leq w_c \leq 50$ m e $-7 \leq \Delta h_{base} \leq 11$ m.

A variação de L_{cruz} com os diferentes parâmetros geométricos está ilustrada no Anexo C. Através da observação da Fig. C.1, conclui-se que a influência do cruzamento só se começa a fazer sentir a partir de ângulos superiores a cerca de 60° , sendo máxima para $\varphi_c=90^\circ$, caso em que a EB está alinhada com a rua transversal àquela onde se desloca o móvel. Na situação em que $\varphi_c=0^\circ$, isto é, a EB está localizada na rua em que se desloca o móvel, a sua influência é nula. Das curvas representadas na Fig. C.2, verifica-se que o modelo prevê um decréscimo da influência do cruzamento com o aumento da distância deste à EB, enquanto que existe um aumento da influência do cruzamento quanto maior for a largura da rua, ver Fig. C.3. Conclui-se ainda que quanto maior for a diferença de alturas entre a antena da EB e o nível médio dos telhados dos prédios vizinhos se torna cada vez mais visível a influência do cruzamento, o que se traduz numa maior redução da atenuação de propagação. Para EBs localizadas abaixo do nível dos telhados, o modelo prevê a mesma contribuição para diferentes valores de Δh_{base} , como se observa na Fig. C.4.

3. IMPLEMENTAÇÃO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO

De modo a poder estimar a potência recebida no terminal móvel e testar, assim, os modelos de propagação em estudo, foi desenvolvido um programa de cálculo em C++. Neste capítulo descreve-se o desenvolvimento desse programa, bem como as opções tomadas na implementação dos vários termos que determinam a potência recebida.

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O cálculo da potência recebida no terminal móvel, P_r , é efectuado através da seguinte expressão:

$$P_r \text{ [dBm]} = P_e \text{ [dBm]} + G_{TM} \text{ [dBi]} + G_{EB} \text{ [dBi]} - L_p \text{ [dB]} \quad (3.1)$$

onde:

- P_e é a potência de emissão da EB;
- $G_{TM,EB}$ são os ganhos do TM e da EB, respectivamente;
- L_p é a atenuação de propagação, descrita anteriormente.

A potência de emissão, P_e , é calculada a partir da Potência Aparente Radiada (ERP) da EB, sabido o ganho máximo da antena. Estes dois dados fazem parte do conjunto de informação disponibilizado pela Telecel e apresentado no Anexo D.

Assumiui-se que o ganho da antena do terminal móvel é de 0 dBd, à falta de mais informação sobre a mesma, uma vez que esse é o caso típico nos telefones móveis actuais. Para a altura do TM nas simulações efectuadas considerou-se a altura a que se fizeram as medidas, aproximadamente 1.5 m.

A determinação dos restantes termos que intervêm em (3.1) para a implementação do programa de cálculo é desenvolvida nas secções seguintes, nomeadamente, ganho da EB, G_{EB} , na Secção 3.2. e atenuação de propagação, L_p , na Secção 3.4.

3.2. GANHO DA ESTAÇÃO DE BASE

As células nos centros urbanos são geralmente sectorizadas, pelo que as antenas utilizadas nas EBs tendem a ser bastante directivas. Torna-se, assim, necessário contabilizar a variação do ganho da EB no cálculo da potência recebida no móvel.

De modo a poder-se calcular o ganho da EB numa dada direcção é necessário determinar qual a diferença angular nos planos horizontal (PH) e vertical (PV) entre a direcção pretendida e a direcção do máximo de radiação da antena.

Na Fig. 3.1 representa-se a geometria do problema, sendo apresentada uma vista em perfil e uma em planta da EB e do ponto na direcção do qual se quer calcular o ganho da mesma.

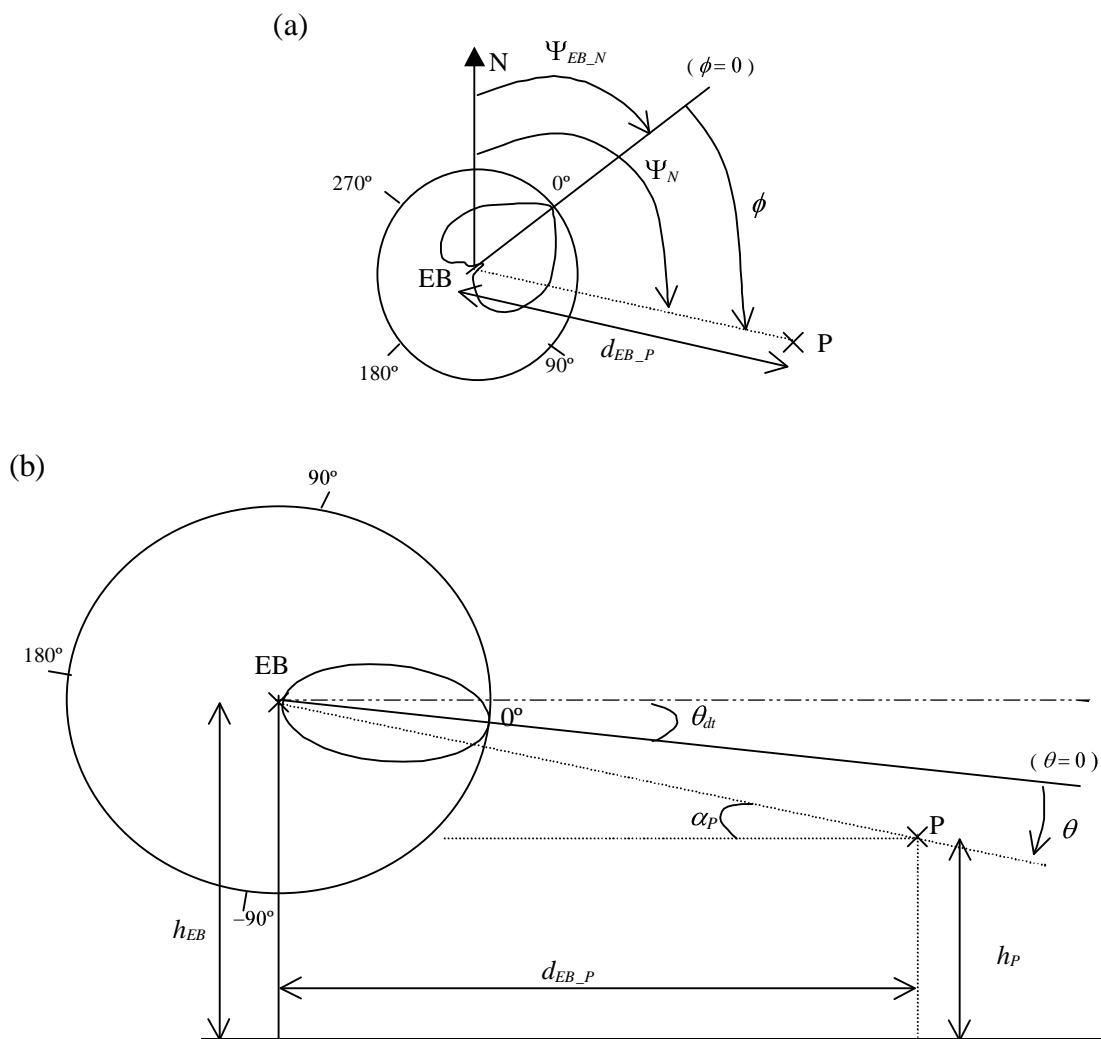


Fig. 3.1 - Geometria para o cálculo de θ e ϕ no diagrama de radiação:

(a) vista de planta; (b) vista de perfil.

Para calcular o ganho na direcção do ponto P é necessário saber o valor de θ e ϕ no diagrama de radiação tridimensional. O valor de ϕ é determinado pela diferença entre o azimute da antena, $\Psi_{EB,N}$, e o ângulo entre a direcção em que se quer calcular o ganho e o Norte, Ψ_N . O azimute da antena é sabido à partida, sendo um dos dados fornecidos pelo operador Telecel sobre as EBs medidas (Anexo D). O ângulo Ψ_N é determinado a partir das coordenadas da EB, do ponto P e da sua localização relativa:

$$\Psi_N \text{ [}^\circ\text{]} = \begin{cases} \text{atan}\left(\left|\frac{\Delta x}{\Delta y}\right|\right) & , \Delta x > 0 \wedge \Delta y > 0 \\ 90 + \text{atan}\left(\left|\frac{\Delta x}{\Delta y}\right|\right) & , \Delta x > 0 \wedge \Delta y < 0 \\ 180 + \text{atan}\left(\left|\frac{\Delta x}{\Delta y}\right|\right) & , \Delta x < 0 \wedge \Delta y < 0 \\ 270 + \text{atan}\left(\left|\frac{\Delta x}{\Delta y}\right|\right) & , \Delta x < 0 \wedge \Delta y > 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

em que $\Delta x = x_P - x_{EB}$ e $\Delta y = y_P - y_{EB}$, sendo x e y coordenadas cartesianas da EB e do ponto P. O valor de ϕ é então dado por:

$$\phi \text{ [}^\circ\text{]} = \begin{cases} \Psi_N - \Psi_{EB,N} & , \Psi_N \geq \Psi_{EB,N} \\ 360 - (\Psi_N - \Psi_{EB,N}) & , \Psi_N < \Psi_{EB,N} \end{cases} \quad (3.3)$$

O ângulo θ no referencial do diagrama de radiação da antena é determinado pela diferença entre o ângulo de incidência, α_P , no ponto P e a inclinação da direcção de radiação máxima da antena no PV (*down-tilt*), ou seja:

$$\theta = - \left[\text{atan}\left(\frac{h_{EB} - h_P}{d_{EB,P}}\right) - \theta_{dt} \right] \quad (3.4)$$

onde h_{EB} e h_P são as alturas da EB e do ponto P, e θ_{dt} é o *down-tilt* da antena. Note-se que $\theta \in \text{[-}180^\circ, 180^\circ\text{]}$ e $\phi \in \text{[}0^\circ, 360^\circ\text{]}$, variando θ e ϕ como ilustrado na Fig. 3.1. A definição

destes ângulos foi escolhida por coincidir com a que é normalmente utilizada pelos fabricantes de antenas nos diagramas de radiação que fornecem.

Na ferramenta de *software* desenvolvida neste trabalho contabiliza-se a variação do ganho da antena da EB, tendo em conta o diagrama de radiação da respectiva antena.

Os fabricantes de antenas fornecem normalmente apenas o diagrama de radiação no plano horizontal e respectivas larguras de feixe de meia potência e, em alguns casos, também o diagrama de radiação no plano vertical. Foram desenvolvidos, assim, dois métodos para determinar o ganho da EB conforme o caso de estar disponível o diagrama de radiação nos planos horizontal e vertical ou apenas no plano horizontal.

MÉTODO 1 – Apenas Disponível o Diagrama de Radiação no Plano Horizontal

No caso de se ter acesso apenas ao diagrama no PH, calcula-se o ganho da antena numa determinada direcção através do conhecimento dos ganhos generalizados nos planos horizontal e vertical:

$$G_{EB}(\theta, \phi) = g_{\phi}(\phi)g_{\theta}(\theta)G_0 \quad (3.5)$$

onde G_0 é o ganho da antena na direcção de máximo.

O ganho normalizado ao seu valor máximo no PH é obtido directamente a partir de um ficheiro com o diagrama de radiação nesse plano. O ganho normalizado no PV é estimado a partir da seguinte expressão aproximada onde se limita o nível de lobos secundários a -35 dB:

$$g_{\theta}(\theta) = \begin{cases} \cos^r(\theta) & , \cos^r(\theta) \geq 10^{-3.5} \\ 10^{-3.5} & , \cos^r(\theta) < 10^{-3.5} \end{cases} \quad (3.6)$$

O coeficiente de decaimento, r , é estimado com base na largura de feixe no PV a meia potência, $\alpha_{3\text{dB}}^v$, sendo dado pela seguinte expressão:

$$\cos^r\left(\frac{\alpha_{3\text{dB}}^v}{2}\right) = \frac{1}{2} \quad (3.7)$$

Este método para o cálculo do ganho da EB em qualquer direcção é aproximado e, como tal, poderá conduzir a erros elevados para pontos no diagrama tridimensional da antena que se afastem muito dos planos PH e PV. A aproximação feita no cálculo do ganho normalizado no PV poderá ser muito grosseira para antenas que tenham um diagrama de radiação nesse plano com uma variação muito diferente da assumida, ou seja, de $\cos^r(\theta)$.

MÉTODO 2 – Disponível o Diagrama de Radiação nos Planos Horizontal e Vertical

Para quando está disponível em ficheiro o diagrama de radiação tanto no PH como no PV, desenvolveu-se um outro método que permite extrapolar o ganho da antena da EB em qualquer direcção a partir dos diagramas reais da antena, tanto no PH como PV.

Na Fig. 3.2 esquematiza-se a aplicação do presente método:

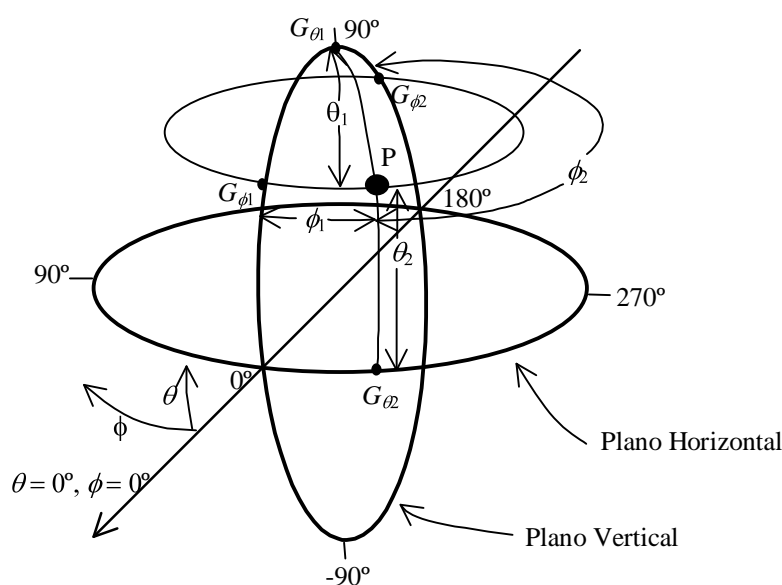


Fig. 3.2 - Esquema de aplicação do método de extrapolação do diagrama de radiação tridimensional.

O ganho em cada ponto do diagrama tridimensional é extrapolado a partir dos pontos que lhe estão mais próximos, cujo ganho é conhecido. Para cada ponto P do diagrama de radiação tridimensional, três dos quatro pontos mais próximos estão sobre o PV, sendo os seus ganhos G_{ϕ_1} , G_{ϕ_2} e G_{θ_1} , e ϕ_1 , ϕ_2 e θ_1 as distâncias angulares desses pontos a P, respectivamente. No PH é contabilizado ainda o ponto que dista θ_2 de P, com ganho G_{θ_2} .

O ganho no ponto P é dado pelo modelo de extrapolação:

$$G = \frac{\left[G_{\phi_2} + \phi_2 G_{\phi_1} \frac{-\theta_1 \theta_2}{(\theta_1 + \theta_2)^2} + G_{\theta_2} + \theta_2 G_{\theta_1} \frac{-\phi_1 \phi_2}{(\phi_1 + \phi_2)^2} \right]}{\left[\phi_1 + \phi_2 \frac{-\theta_1 \theta_2}{(\theta_1 + \theta_2)^2} + \theta_1 + \theta_2 \frac{-\phi_1 \phi_2}{(\phi_1 + \phi_2)^2} \right]} \quad (3.8)$$

Note-se que, através da expressão (3.8) que extrapola o ganho em qualquer direcção a partir do diagrama de radiação no PH e PV, se recuperam os ganhos no plano horizontal para $\theta_2 = 0^\circ$ ($G = G_{\theta_2}$), e no plano vertical para $\phi_1 = 0^\circ$ ($G = G_{\phi_1}$) e $\phi_2 = 0^\circ$ ($G = G_{\phi_2}$).

Segundo a definição dos ângulos ϕ_i e θ_i ($i=1,2$) da Fig. 3.2, ϕ_1 e ϕ_2 não são nulos simultaneamente, o mesmo acontecendo para θ_1 e θ_2 . No entanto, ainda ocorrem descontinuidades na expressão (3.8) para os casos em que um dos ângulos ϕ_i e θ_i são nulos simultaneamente. Na implementação do programa de cálculo teve-se o cuidado de garantir que quando um dos ângulos ϕ_i ou θ_i era zero, o ganho G era dado por G_{ϕ_i} ou G_{θ_i} , respectivamente.

O cálculo do ganho da EB é feito na direcção do edifício mais alto visto da EB, uma vez que é nessa direcção que parte o sinal que se difracta ao longo dos edifícios antes de chegar ao móvel.

No Anexo E encontram-se os diagramas de radiação das antenas das EBs medidas, e portanto, utilizados na ferramenta de cálculo.

3.3. INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Para calcular todos os parâmetros geométricos dos modelos de propagação para cada cenário de aplicação é necessário ter acesso a informação geográfica sobre esses mesmos cenários.

A estimação do perfil entre a EB e o TM é baseada no método utilizado no RMOVEL, uma ferramenta de cálculo desenvolvida no IST no âmbito de Trabalhos Finais de Curso em anos anteriores, [DoCG95], [RMOV95].

O perfil entre a EB e o TM é estimado a partir de uma carta topográfica digitalizada, em formato cartesiano, com uma definição de 50 m, que cobre a região de Lisboa (Carta 431, [RMOV95]). Para cada ponto desta carta, para além das coordenadas cartesianas, dispõe-se ainda de informação acerca do tipo de ocupação do terreno (edifícios, árvores ou água) e da respectiva altura. É de salientar que esta carta continha originalmente apenas informação referente às coordenadas cartesianas, tendo a informação adicional sobre o tipo de ocupação e sua altura sido inserida posteriormente, através da observação das características médias de cada zona a estudar, na sequência de trabalhos finais de curso.

A estimação das características dos pontos do perfil que não coincidem com os da carta é feita a partir dos quatro pontos mais próximos na grelha da carta, como indicado em [RMOV95]. A precisão na determinação do perfil depende, assim, da definição da carta digital e da exactidão da informação nela contida.

O modelo de Xia e Bertoni, uma vez que toma a altura média dos edifícios e é sensível ao número dos mesmos e não à sua localização, poderá não ser afectado pela baixa resolução da carta digitalizada, desde que a altura dos edifícios não varie muito no quadrado de 50 m de lado onde se encontra o TM.

As coordenadas de cada EB incluída no presente estudo fazem parte da informação fornecida pela Telecel e encontram-se no Anexo D. Dada a localização da EB, basta determinar qual a posição do TM e estimar o perfil entre a EB e o TM para se poderem calcular os parâmetros geométricos necessários para a implementação dos modelos.

A ferramenta de cálculo desenvolvida permite obter a potência recebida pelo TM ao longo de uma via, podendo esta estar definida por troços caso se justifique devido à variação das características geométricas ao longo da rua. Para cada troço são calculadas as sucessivas posições do móvel ao longo do mesmo, de acordo com a resolução requerida. No presente trabalho, pretende-se também estudar a influência dos cruzamentos pelo que nas simulações se escolheu uma resolução que permitisse serem calculados pelo menos dez pontos dentro do cruzamento de menores dimensões na via percorrida.

3.4. IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO

3.4.1. MODELO DE XIA E BERTONI

O modelo de Xia e Bertoni tem como parâmetros de entrada a altura média dos edifícios, h_{ED} , o espaçamento médio entre os mesmos, b , e o número de obstáculos, N . Todos estes parâmetros são calculados através do perfil estimado entre a EB e o TM.

A altura h_{ED} é obtida através das médias das alturas dos edifícios que interrompem o primeiro elipsóide de Fresnel do raio directo entre a EB e o TM, uma vez que são estes que contribuem para a obstrução do sinal e que, por isso, serão responsáveis pela atenuação de propagação. Seguindo o mesmo princípio determina-se qual o segmento do perfil em que os pontos do mesmo interrompem o primeiro elipsóide. É mais uma vez sobre estes pontos que se calcula o valor de b , fazendo uma média dos valores das larguras das ruas que interceptam este segmento do perfil. Foi elaborado para o efeito um ficheiro com informação sobre as coordenadas cartesianas e largura de inúmeras vias nas regiões em estudo, dados obtidos de cartas topográficas da cidade de Lisboa.

Conhecida a distância d entre a EB e o UE, é possível determinar o número de obstáculos, N , através do valor da largura média das ruas, b . A forma utilizada por Gonçalves, [Gonç98], para a determinação de N é:

$$N = \left\lceil \frac{d}{b} \right\rceil \quad (3.9)$$

em que $\lceil x \rceil$ designa o menor inteiro superior a x .

A expressão (3.9) conduz a resultados simulados com boa concordância com as medidas experimentais, [Gonç98], para zonas regulares como a Baixa Lisboa ou a região de Campo de Ourique, onde a largura dos blocos de edifícios é aproximadamente igual à largura das ruas. Para zonas onde as dimensões dos quarteirões são muito maiores do que largura das ruas, a expressão (3.9) conduz a uma sobreestimação do número de obstáculos, N , e consequentemente à sobreestimação do valor da parcela da atenuação de propagação calculada pelo modelo de Xia e Bertoni.

Desenvolveu-se, então, uma nova expressão para o cálculo de N :

$$N = \left\lceil \frac{d}{(F_B + 1)b} \right\rceil \quad (3.10)$$

em que F_B exprime a relação entre a largura dos blocos de edifícios, W_B , e a largura das ruas, b , na área em estudo:

$$F_B = \frac{W_B}{b} \quad (3.11)$$

Note-se que a expressão (3.9) despreza a largura dos edifícios no cálculo de N , enquanto que (3.10) assume que as lâminas opacas para o cálculo da difracção múltipla são colocados nos centros dos quarteirões de edifícios que interrompem o sinal na sua propagação, ou seja, os obstáculos estão distanciados de um quarteirão e uma rua.

O valor atribuído a F_B para cada área foi obtido por inspecção de cartas topográficas da cidade de Lisboa e introduzido na ferramenta de cálculo como parâmetro de entrada. Como se verá mais adiante na Secção 4.2.2., os dois métodos para a determinação de N conduzem a resultados bastante díspares para as zonas analisadas.

ESTUDO DA CONVERGÊNCIA DAS SÉRIES DE BOERSMA

A convergência das séries de Boersma depende do número de obstáculos que se considera (N), da distância entre os mesmos (b), e da diferença entre a altura das antenas da EB e o topo dos obstáculos (Δh_{base}). Assim, dados N e b , a expressão da redução do campo devida à difracção pelo topo dos edifícios convergirá apenas para certos valores de Δh_{base} , limitados quase simetricamente em relação à origem, ou seja, para:

$$|\Delta h_{base}| \leq \Delta h_{baseMAX} \quad (3.12)$$

Em regiões onde o módulo de Δh_{base} tome valores superiores a este valor máximo não ocorrerá a convergência das séries de Boersma, e conseqüentemente da expressão da atenuação L_{msd} . A não convergência da expressão de L_{msd} fará com que o seu valor oscile e se

torne negativo (expresso em dB) tendendo para $-\infty$, ou seja, o modelo prevê erradamente não uma atenuação do sinal, mas sim uma amplificação, crescente com $|\Delta h_{base}|$, durante a sua propagação. Na implementação do programa de cálculo limita-se sempre a atenuação ao valor mínimo de 0 dB, atenuação nula, no caso dos seus valores serem negativos. Surge assim o problema de escolher qual o melhor valor de Δh_{base} para fazer a transição entre a expressão exacta do modelo de Xia e Bertoni e as expressões aproximadas, sendo desejável que se aplique a expressão exacta para uma gama de valores o maior possível, utilizando-se então as expressões aproximadas para a atenuação a partir dos valores de Δh_{base} que não permitem a convergência das séries de Boersma. A escolha de um tal limite é muito dificultada pelo facto da expressão exacta da atenuação L_{msd} do modelo não convergir para diferentes valores de Δh_{base} dependentes do valor que tomam N e b . Escolhendo um limite fixo de Δh_{base} para se fazer a transição entre a expressão exacta e as aproximadas, pode acontecer que se os valores do par N e b levarem à não convergência das séries de Boersma, o valor da atenuação calculada pela expressão exacta seja 0 dB (depois de limitada pelo programa), ocorrendo uma descontinuidade no valor da atenuação quando Δh_{base} variar o suficiente para se fazer a transição entre expressões, uma vez que a expressão aproximada não apresentará um valor nulo.

Impôs-se, assim, que se fizesse um estudo da convergência da expressão exacta da atenuação com a variação de Δh_{base} para diferentes N e b , de modo a que se possa tentar chegar a um algoritmo para a escolha da expressão a utilizar para o cálculo da atenuação a implementar no programa de cálculo.

Fizeram-se assim diversas simulações de Q calculado através de (2.3) para estudar o comportamento da convergência da expressão com Δh_{base} para diferentes N e b . Obtiveram-se assim curvas de $Q(\Delta h_{base})$ para N variável entre 2 e 20, e b fixo igual a 7 m, 34 m e 60 m. Na Fig. A.2 do Anexo A está representado uma série destas curvas para b fixo e igual a 60 m. Nesta figura observa-se para Δh_{base} positivo e para valores pequenos de N a oscilação em Q conhecida para a difracção por um obstáculo, resultante da interrupção por parte dos obstáculos de sucessivos elipsóides de Fresnel.

Obtiveram-se ainda curvas de $Q(\Delta h_{base})$ para b variável entre 7 m e 60 m, e N fixo igual a 2, 10 e 20. Estas curvas encontram-se representadas na Fig. A.3 do Anexo A para N igual a 20. Verifica-se que todas elas se cruzam para Δh_{base} nulo, uma vez que para incidência rasante

Q é dado por $\frac{1}{N}$ [MaBX93].

Através dos gráficos de Q obtiveram-se os valores de Δh_{base} limites para os quais a expressão (2.3) ainda convergia, tanto para Δh_{base} negativo, $\Delta h_{baseMIN}$, como positivo, $\Delta h_{baseMAX}$. O valor de Δh_{base} limite, $\Delta h_{baseLIM}$, é obtido a partir do caso mais desfavorável dos dois anteriores, ou seja, o menor em módulo. Na Fig. A.4 ilustra-se o andamento de $\Delta h_{baseMIN}$, $\Delta h_{baseMAX}$ e $\Delta h_{baseLIM}$ com b para os vários valores de N fixo. Na Fig. A.5 encontram-se representadas as mesmas curvas, mas agora para N variável e b fixo.

Por observação dos gráficos das Figs. A.4 e A.5 verifica-se que a variação de $\Delta h_{baseLIM}$ com b é aproximadamente linear, enquanto que a variação de $\Delta h_{baseLIM}$ com N é aproximadamente exponencial. Procurou-se então exprimir separadamente a dependência de $\Delta h_{baseLIM}$ com cada uma destas variáveis de modo a que se possa combinar facilmente as duas e obter uma expressão para $\Delta h_{baseLIM}$ que contabilize a variação com N e com b .

Uma forma simples de obter essa expressão seria assumindo as aproximações linear e exponencial atrás referidas:

$$f(b)|_{N \text{ fixo}} = f_0 + f_1 b \quad (3.13)$$

$$g(N)|_{b \text{ fixo}} = g_0 + g_1 e^{-N} \quad (3.14)$$

Deste modo poder-se-ia combinar facilmente (3.13) e (3.14) na forma:

$$\Delta h_{base}(N, b) = g(N)|_{b \text{ fixo}} + f_1(b - b_{fixo}) \quad (3.15)$$

Para que esta expressão seja válida é necessário que f_1 seja constante para diferentes valores de N fixo, e portanto que $g(N)$ seja uma boa aproximação para todos os b fixos. Obtendo os coeficientes f_0 e f_1 por regressão linear, e g_0 e g_1 por meio do método dos mínimos quadrados verifica-se que o declive f_1 não se mantém constante para os vários N , pelo que (3.15) não é válida. Isto fica a dever-se ao facto de $f(b)$ ser melhor aproximada por uma parábola do que por uma recta.

Uma vez que o que se pretende é uma expressão simples que permita calcular qual o valor máximo de $|\Delta h_{base}|$ que permite a convergência da expressão (2.3) para cada N e b ,

utiliza-se (3.15) para o caso mais restrictivo no valor de Δh_{base} tanto para a variação com N como com b , ou seja, faz-se $N_{fixo} = 20$ e $b_{fixo} = 7$ m, obtendo-se:

$$\Delta h_{base}(N, b) = 5.056 + 15.152 e^{-N} + 0.165 (b-7) \quad (3.16)$$

Assim, o valor de $\Delta h_{baseLIM}$ estimado será bastante aproximado para esses valores de N e b , e subestimado para valores inferiores de N e superiores de b , garantindo-se no entanto que a utilização da expressão (2.3) é sempre feita para valores de N , b , e Δh_{base} para os quais converge. Note-se que os valores de N e b para os quais a expressão (3.16) foi deduzida estão compreendidos dentro dos limites máximos de variação dos cenários em estudo.

3.4.2. MODELO DE IKEGAMI *et al.*

O modelo de Ikegami tem como parâmetros de entrada a largura da rua onde se desloca o móvel, W , a distância do móvel ao UE, d_{UE_TM} , a altura da EB, do UE e do TM, h_{EB} , h_{UE} , h_{TM} , respectivamente, a distância entre a EB e o UE, d , e o ângulo de rua, φ . Todos eles, com excepção do ângulo de rua, são parâmetros de entrada da ferramenta de cálculo ou são obtidos directamente do perfil entre a EB e o TM.

O valor do ângulo de rua é obtido através das coordenadas cartesianas dos pontos extremos da via e do ponto da via onde se quer determiná-lo. Na Fig. 3.3 ilustra-se a geometria associada ao cálculo do ângulo de rua em cada ponto da via percorrida:

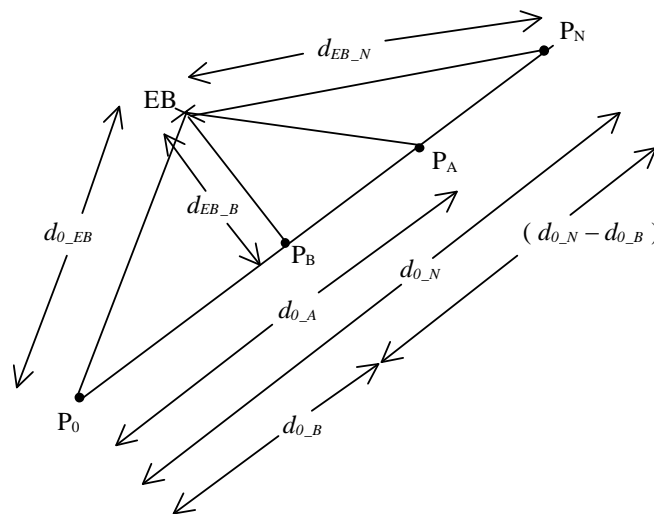


Fig. 3.3 - Geometria associada ao cálculo do ângulo de rua, φ .

Na Fig. 3.3, P_0 e P_N são os pontos extremos da via, e P_A o ponto onde se quer calcular φ . As distâncias d_{0_EB} , d_{EB_N} , d_{0_N} e d_{0_A} ilustradas são obtidas por meio das coordenadas da EB, pontos extremos da rua e ponto actual do móvel na via. As distâncias d_{0_B} e d_{EB_B} são calculadas através do seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} d_{0_B}^2 + d_{EB_B}^2 = d_{0_EB}^2 \\ (d_{0_N}^2 - d_{0_B}^2) + d_{EB_B}^2 = d_{EB_N}^2 \end{cases} \quad (3.17)$$

que conduz a:

$$d_{0_B} = \frac{d_{0_EB}^2 - d_{EB_N}^2 + d_{0_N}^2}{2d_{0_N}} \quad (3.18)$$

$$d_{EB_B} = \sqrt{d_{0_EB}^2 - d_{0_B}^2} \quad (3.19)$$

O ângulo de rua, φ , é então dado por:

$$\varphi = \text{atan} \left(\frac{d_{EB_B}}{d_{B_A}} \right) \quad (3.20)$$

com:

$$d_{B_A} = |d_{0_A} - d_{0_B}| \quad (3.21)$$

Outro parâmetro de entrada do modelo de Ikegami é o módulo do factor de reflexão, $|I|$, na parede do edifício depois do móvel. Este valor é um parâmetro de entrada da ferramenta de cálculo, tendo sido escolhido o valor típico de $|I|=0.5$. O valor de $|I|$ poderia ser determinado exactamente através da combinação dos coeficientes de reflexão de Fresnel, sabidas as características electromagnéticas dos materiais de construção das paredes dos edifícios e do ângulo de incidência na parede. A determinação exacta do ângulo de incidência complicaria o modelo, uma vez que o raio reflectido que atinge o móvel não resulta, na realidade, da difracção do raio directo entre a EB e o UE no topo deste último.

O modelo de Ikegami na sua dedução substitui não só o obstáculo constituído pelo UE por uma lâmina perpendicular à direcção de propagação, mas também a parede do edifício oposto ao UE onde ocorre a reflexão, assumindo que tanto o raio directo desde o TUE ao móvel, como o reflectido resultam do raio directo entre a EB e o TM no plano vertical definido pela EB e TM. A imprecisão assim associada à determinação do ângulo de incidência na parede, bem como das características electromagnéticas da mesma, levou a que se optasse pela solução mais simples de se considerar um valor típico para $|I|$.

3.4.3. MODELO DOS CRUZAMENTOS

O modelo que descreve a influência dos cruzamentos na propagação do sinal tem como parâmetros geométricos de entrada a distância da EB ao centro do cruzamento, d_c , a largura da rua que cruza a rua percorrida pelo TM, w_c , a diferença de alturas entre a EB e altura média dos edifícios no perfil EB-TM, Δh_{base} , e o ângulo φ_c definido pela via onde se encontra o TM e a linha que une a EB ao centro do cruzamento, ver Fig. 2.4. Estes parâmetros são passados como entrada à ferramenta de cálculo, sendo lidos de um ficheiro que contém para cada via em estudo informação sobre cada cruzamento que se encontra do lado da EB, nomeadamente, a localização ao longo da via dos cruzamentos e os seus parâmetros geométricos característicos, obtidos por inspecção de cartas topográficas.

Os parâmetros de entrada d_c , w_c e Δh_{base} são limitados aos seus intervalos de validade para o modelo dos cruzamentos (ver Secção 2.4), antes de se calcular o decréscimo na atenuação de propagação, L_{cruz} , devido à existência de cruzamentos. Note-se ainda que a condição de aplicação do modelo que exige que a largura das ruas que se cruzam seja igual não se verifica na realidade dos casos analisados, podendo isso ser uma fonte de erro na previsão da influência dos cruzamentos.

Para cada cruzamento estima-se qual o alcance da sua influência, determinado pelo valor de Δd_{ext} ; a zona de influência de cada ponto na via percorrida pelo móvel tem dimensão Δd_{ext} , centrada no cruzamento. Para cada ponto percorrido determina-se, através da informação da localização dos cruzamentos e dos respectivos valores de Δd_{ext} , se o ponto se encontra dentro da zona de influência de um ou mais cruzamentos. Para cada cruzamento sob a influência do qual o ponto se encontra, calcula-se L_{cruz} , sendo o valor final para aquele ponto a soma das contribuições dos vários cruzamentos.

4. CAMPANHA DE MEDIDAS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo inicia-se com a escolha das zonas de teste e descrição das condições em que foram efectuadas as medições de sinal, bem como dos procedimentos seguidos para o tratamento dos dados obtidos. Segue-se a comparação das medidas com a previsão teórica do sinal recebido, sendo apresentados resultados gerais que justificam algumas das opções tomadas na implementação da ferramenta de cálculo, nomeadamente, em relação ao cálculo do ganho da estação de base, à determinação do número de obstáculos N , e à influência dos cruzamentos. Por fim, é analisada em pormenor a comparação entre o sinal recebido medido e o previsto teoricamente para as diferentes ruas e EBs em estudo.

4.1. DESCRIÇÃO DA CAMPANHA DE MEDIDAS

A campanha de medidas foi realizada com a colaboração do operador de comunicações móveis Telecel, sendo disponibilizado equipamento de medida para o sistema GSM 900, que permitiu obter o nível de potência recebida num terminal móvel proveniente das EBs em funcionamento numa dada área de Lisboa.

Nesta secção descreve-se a escolha das zonas de teste, o equipamento e *software* de aquisição utilizados, bem como os procedimentos de medida e o processamento dos dados obtidos.

4.1.1. ESCOLHA DAS ZONAS A ANALISAR

Os estudos de aplicação de modelos de propagação efectuados na sequência de Trabalhos Finais de Curso no IST, sob a orientação do Prof. Luís Correia, foram no sentido de validar a aplicação desses modelos para a cidade de Lisboa. Naturalmente foram escolhidos cenários de propagação que satisfizessem as condições de validade dos modelos. Por exemplo, para o estudo do modelo COST 231 ou Xia e Bertoni, [AIRi98] e [Gonç98], foram escolhidas as zonas regulares da Baixa Pombalina e Campo de Ourique para testar os modelos. No presente trabalho o objectivo é diferente. Pretende-se testar a aplicabilidade dos modelos em zonas cujas características geométricas se afastem muito do cenário de propagação assumido na dedução dos vários modelos de propagação descritos no Capítulo 2.

Sendo assim, escolheu-se para zona de teste dos modelos a região dos Sapadores, onde a cota do terreno e altura dos edifícios é muito irregular, e a disposição geométrica das ruas difere muito da rede rectangular exigida pelo modelo de Xia e Bertoni e pelo modelo dos cruzamentos, como se pode observar nos mapas do Anexo F.

De modo a fazer-se um estudo dos modelos de propagação desenvolveu-se, como já referido, uma ferramenta de cálculo para a aplicação dos mesmos. A sua implementação numa tal ferramenta é um processo delicado e exigente, uma vez que existe uma série de problemas não triviais a resolver na determinação dos parâmetros de entrada das expressões matemáticas dos modelos. Não é difícil que no desenvolvimento da ferramenta a falha num pequeno pormenor conduza a uma imprecisão importante na determinação da potência recebida no TM. Tornou-se, então, necessário verificar a validade das previsões da ferramenta de cálculo para uma zona mais ou menos regular, onde se esperam resultados em bom acordo com as medidas, nomeadamente para os modelos de Xia e Bertoni e para o modelo dos cruzamentos. Para tal, foi escolhida a zona das Avenidas Novas, que embora tenha uma estrutura urbana diversa por exemplo da Baixa Pombalina, ainda apresenta um carácter relativamente regular, nomeadamente, cota e altura de edifícios aproximadamente uniformes, estando estes dispostos segundo uma grelha rectangular, muito embora a largura das ruas não seja constante.

Na zona dos Sapadores foram analisadas as ruas Afonso Domingues, Diogo do Couto, do Mato Grosso e Fernão de Magalhães. Para a região das Avenidas Novas foram analisadas as avenidas João Crisóstomo e Duque D'Ávila. No Anexo F estão assinaladas as ruas medidas e o sentido em que foram percorridas na aquisição das medidas. No Anexo G apresentam-se fotografias das ruas em estudo.

4.1.2. EQUIPAMENTO E PROGRAMA DE AQUISIÇÃO UTILIZADOS

As medidas foram efectuadas com o equipamento cedido pela Telecel, sendo constituído por um telefone móvel *Ericsson* ligado a um PC portátil *Compaq* através da porta série, ver Anexo G.

O PC estava equipado com o programa TEMS[®], [Tems96], desenvolvido pela *Erisoft* e que permite a aquisição do nível de sinal proveniente de várias EBs.

O programa amostra temporalmente, em modo de chamada, o sinal recebido a um ritmo mais ou menos uniforme de cerca de 8 amostras por segundo, ou seja, a amostragem do sinal recebido é feita a intervalos de aproximadamente 125 ms, permitindo a monitorização de

vários parâmetros associados à comunicação entre o TM e a EB. Em resumo, o programa permite:

- identificação da célula de serviço, isto é, da célula com que o móvel comunica para efectuar a chamada, e das seis células vizinhas com sinal mais forte, indicando o respectivo nível de sinal;
- visualização de gráficos da potência recebida para a célula de serviço;
- registo da informação medida num ficheiro interno, sendo possível exportá-lo para um ficheiro de texto;
- identificação das EBs medidas, sequência de mensagens de sinalização e controlo trocadas entre a EB e o TM durante uma chamada;
- introdução de uma pausa na aquisição das medidas durante um tempo arbitrário, podendo-se recomeçar a aquisição a qualquer instante (esta característica é muito útil quando é necessário interromper as medidas temporariamente, por exemplo, numa paragem num sinal vermelho);
- inserção de marcas no ficheiro de medida para separar diferentes zonas medidas, por exemplo, a localização de cruzamentos, para posterior análise dos dados obtidos;
- identificação da ocorrência de *handovers* entre células do sistema.

Na Fig. 4.1, apresenta-se a interface com o utilizador do programa TEMS[®].

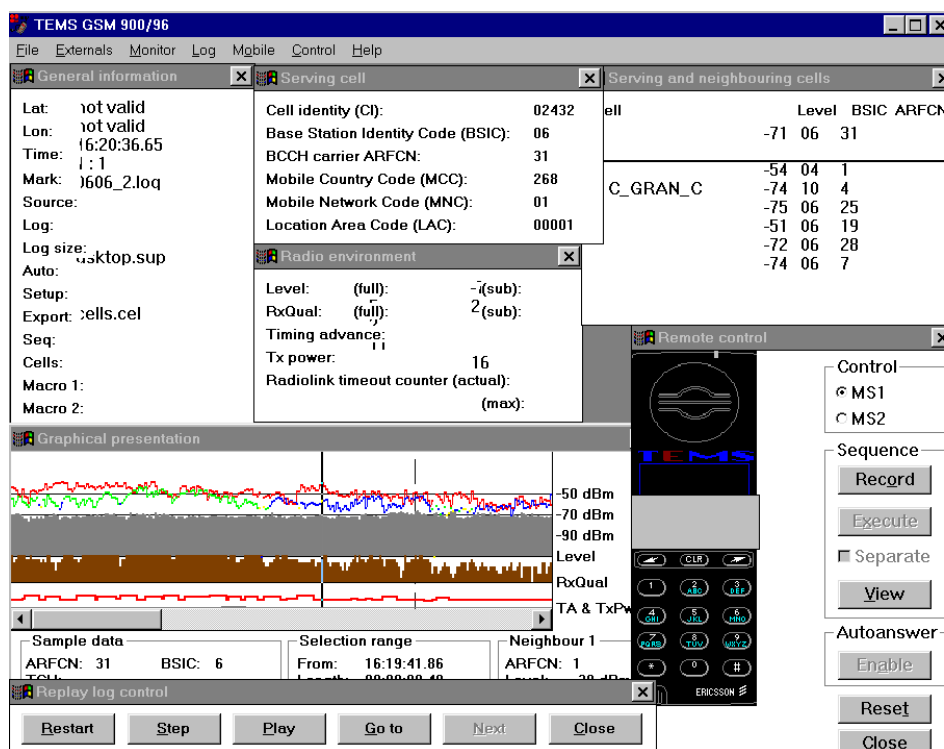


Fig. 4.1 - Interface com o utilizador do programa TEMS[®].

4.1.3. PROCEDIMENTOS DE MEDIDA

Em cada campanha de medidas foi escolhida para célula de serviço aquela cujo sinal era mais forte, sendo eliminada a possibilidade de *handover*, para que as medidas obtidas fossem referidas sempre à mesma estação de base.

Durante as medidas, o TM foi colocado em modo contínuo de chamada para que o ritmo de aquisição das amostras fosse mais rápido. Para tal, foi efectuada uma chamada para um número fornecido pela Telecel para uma gravação com duração de aproximadamente cinco minutos, sendo reestabelecida a chamada automaticamente pelo programa sempre que caísse ou fossem ultrapassados os cinco minutos de duração da mesma.

As medidas foram obtidas deslocando o terminal móvel e equipamento de medida associado ao longo das vias escolhidas para o estudo. Nas medidas efectuadas de carro, o equipamento foi transportado no interior do mesmo, enquanto que nas medidas a pé o equipamento foi transportado num carrinho, como ilustrado na Fig. G.1(b) do Anexo G.

Inicialmente foram realizadas medidas de carro utilizando uma antena colocada no tejadilho do veículo a uma altura de cerca de 1.5 m. Este procedimento foi efectuado nas medidas das avenidas da República, Fontes Pereira de Melo e Liberdade.

É de salientar que no decorrer das medidas nem sempre é possível manter a velocidade constante, tanto nos percursos efectuados a pé como de carro, devido a condicionamentos de trânsito. Este problema é pouco significativo nas medidas a pé, uma vez que a velocidade a que são feitas é reduzida e, portanto, as variações de velocidade quando se tem que efectuar uma pausa nas medidas e retomá-las não são significativas, implicando um erro na determinação da posição ao longo da rua da ordem de alguns centímetros, sendo tanto mais importante quanto maior for o número de paragens. Nas medidas efectuadas de carro este problema já não é desprezável, visto que na travagem do carro e no arranque do mesmo, a variação da velocidade em relação ao seu valor médio pode implicar um erro na determinação da posição do móvel da ordem das dezenas de metros.

As ruas que foram medidas de carro são muito movimentadas e, mesmo tendo sido percorridas de noite, encontraram-se dificuldades para manter a velocidade constante. Para além disso, a velocidade a que nos era permitido circular era demasiado elevada para permitir obter um número suficiente de pontos nos cruzamentos, principalmente nas ruas com cruzamentos estreitos. É ainda de salientar que para além dos problemas associados às medidas feitas de carro, as avenidas da República, Liberdade e Fontes Pereira de Melo têm as

EBs com sinal recebido mais forte muito próximo, inclusive em edifícios da própria avenida, pelo que os modelos de propagação em estudo claramente não se aplicam a esses cenários onde existirá uma forte componente de raio directo entre a EB e o TM, devido à existência de linha de vista entre os dois. Optou-se, assim, por não se considerar para o estudo desenvolvido neste trabalho os resultados obtidos para as três avenidas, analisando-se apenas as medidas realizadas na zona dos Sapadores e avenidas Novas que foram efectuadas a pé, estando o TM colocado a uma altura de aproximadamente 1.5 m do solo.

Foi gravado um ficheiro por cada rua medida, sendo nele inseridas marcas de identificação do início e fim dos cruzamentos.

4.1.4. TRATAMENTO DAS MEDIDAS

Os ficheiros em formato ASCII exportados através do programa TEMS[®], foram processados utilizando o programa de folha de cálculo *Microsoft Excel*[®], [Exce97]. Na Fig. 4.2 apresenta-se um desses ficheiros de saída.

1	TIME	MESSAGE TYPE	SERVING CELL	RADIO ENVIRONMENT												NEIGHBOURING CELL:					
2				RXLE	RXQI	RXLE	RXQUAL	TX	PLIN	RLIN	CELL	LUMIAR	E	CELL							
3			CELL CI	BSIC	ARFI	MCC	MNC	LAC	FULL	FULL	SUB	SUB	TA	POW	ACT	MAX	ARFI	RXLE	BSIC	ARFI	
4	08:28.8	DEDICATED REF	C_GRAN_C	10	4				36	0	33	0	2	11	16	16	23	44	6	38	
5	08:28.8	SYNC REPORT	C_GRAN_C	10	4				36	0	33	0	2	11	16	16	23	44	6	38	
6	08:29.0	SYNCH CHANNEL	C_GRAN_C	10	4				36	0	33	0	2	11	16	16	23	44	6	38	
7	08:32.4	SYNC REPORT	C_GRAN_C	10	4				36	0	33	0	2	11	16	16	23	44	6	38	
8	08:32.5	SYNC REPORT	C_GRAN_C	10	4				36	0	33	0	2	11	16	16	23	44	6	38	
9	08:32.6	SYSTEM INFORM	C_GRAN_C	10	4				36	0	33	0	2	11	16	16	23	44	6	38	
10	08:32.6	MEASUREMENT	C_GRAN_C	10	4				36	0	33	0	2	11	16	16	23	44	6	38	
11	08:32.6	DEDICATED REF	C_GRAN_C	10	4				35	0	34	0	2	11	16	16	23	43	6	38	
12	08:32.7	SYNC REPORT	C_GRAN_C	10	4				35	0	34	0	2	11	16	16	23	43	6	38	
13	08:32.8	SYNC REPORT	C_GRAN_C	10	4				35	0	34	0	2	11	16	16	23	43	6	38	
14	08:33.1	SYSTEM INFORM	C_GRAN_C	10	4				35	0	34	0	2	11	16	16	23	43	6	38	
15	08:33.1	MEASUREMENT	C_GRAN_C	10	4				35	0	34	0	2	11	16	16	23	43	6	38	
16	08:33.1	DEDICATED REF	C_GRAN_C	10	4				34	0	34	0	2	11	16	16	23	43	6	38	
17	08:33.2	SYNC REPORT	C_GRAN_C	10	4				34	0	34	0	2	11	16	16	23	43	6	38	
18	08:33.5	SYSTEM INFORM	C_GR	765	10	4	268	1	1	34	0	34	0	2	11	16	16	23	43	6	38
19	08:33.6	MEASUREMENT	C_GR	765	10	4	268	1	1	34	0	34	0	2	11	16	16	23	43	6	38
20	08:33.6	DEDICATED REF	C_GR	765	10	4	268	1	1	31	0	29	0	2	11	16	16	23	42	6	38
21	08:34.0	SYSTEM INFORM	C_GR	765	10	4	268	1	1	31	0	29	0	2	11	16	16	23	42	6	38
22	08:34.1	MEASUREMENT	C_GR	765	10	4	268	1	1	31	0	29	0	2	11	16	16	23	42	6	38
23	08:34.1	DEDICATED REF	C_GR	765	10	4	268	1	1	34	0	34	0	2	11	16	16	23	41	6	38
24	08:34.4	SYNCH CHANNEL	C_GR	765	10	4	268	1	1	34	0	34	0	2	11	16	16	23	41	6	38
25	08:34.5	SYSTEM INFORM	C_GR	765	10	4	268	1	1	34	0	34	0	2	11	16	16	23	41	6	38
26	08:34.6	MEASUREMENT	C_GR	765	10	4	268	1	1	34	0	34	0	2	11	16	16	23	41	6	38
27	08:34.6	DEDICATED REF	C_GR	765	10	4	268	1	1	31	0	31	0	2	11	16	16	23	34	6	38
28	08:34.7	SYNCH CHANNEL	C_GR	765	10	4	268	1	1	31	0	31	0	2	11	16	16	23	34	6	38
29	08:34.8	SYNCH CHANNEL	C_GR	765	10	4	268	1	1	31	0	31	0	2	11	16	16	23	34	6	38

Fig. 4.2 - Ficheiro de saída do programa TEMS[®].

Cada linha de texto do ficheiro corresponde a uma amostra de sinal onde está registado o instante de amostragem e informação sobre as acções ocorridas durante a chamada, incluindo as marcas inseridas durante as medidas. Inclui, ainda, informação sobre a célula de serviço e suas vizinhas, sendo o dado mais importante o valor da potência recebida pelo móvel.

O ficheiro de saída permite ainda a identificação das células, através do par BSIC (*Base Transceiver Station Identity Code*) e ARFCN (*Absolute Radio Frequency Channel Number*).

A unidade de potência usada pelo TEMS[®] é o *RXLEV* que indica quanto o nível de potência recebida está acima de -110 dBm. Como tal, obtém-se a potência recebida a partir de:

$$P_r \text{ [dBm]} = \text{RXLEV} - 110 \quad (4.1)$$

Como já referido anteriormente, o programa TEMS[®] monitoriza a célula de serviço e as seis células vizinhas com sinal mais forte. Assim, durante uma campanha de medidas são registadas mais do que seis células, uma vez que durante uma medida as células com sinal mais forte podem não se manter desde o início até ao fim da rua. Consequentemente, o número de amostras não é uniforme para todas as EBs. Como tal, foram eliminadas as estações de base, cujo número de pontos amostrados fosse insuficiente para realizar este estudo. Nos casos em que o número de pontos registado de uma determinada EB era inferior a cerca de 75 % do valor máximo de pontos, coincidente com o número de amostras de sinal proveniente da célula de serviço, decidiu-se que a respectiva EB não iria ser contabilizada na análise de resultados.

Assim, as EBs analisadas para a zona das avenidas novas foram *Republ_B* e *PcaEsp_B* para as avenidas João Crisóstomo e Duque D'Ávila, e ainda *S_Seb_B* e *Tecnic_C* para a Av. Duque D'Ávila. Para a zona dos Sapadores as EBs analisadas foram, *Graca_A*, *Xabreg_C* para todas as ruas medidas, e ainda *Apolon_A* para as ruas Diogo do Couto, do Mato Grosso e Fernão de Magalhães. No Anexo D encontra-se a informação fornecida pela Telecel, referente às EBs que foram analisadas, nomeadamente, localização, cota, altura acima do solo, ERP, modelo da antena, *down-tilt* e azimute e nos mapas do Anexo F assinalam-se as suas localizações.

Depois de seleccionadas as EBs com base no critério do número de pontos, foi usada uma *macro* em *Visual Basic for Applications*, desenvolvida para este trabalho para determinar

a localização do móvel ao longo da rua medida, uma vez que as medidas são feitas com amostragem temporal e não espacial. A partir do conhecimento das distâncias, obtido por inspecção de uma carta topográfica, entre os troços medidos e individualizados no ficheiro de medidas e do tempo gasto a percorrê-los, foi determinada a velocidade média a que foi percorrida essa distância. Este valor permitiu atribuir a cada amostra temporal a respectiva posição do móvel e obter-se, assim, a potência recebida para um determinado ponto da rua. É de salientar que observando o andamento do sinal previsto teoricamente ao longo de uma via em que se faz sentir a influência dos cruzamentos, verifica-se que as distâncias para as quais estes ocorrem coincidem com o esperado, o que permite validar este método, indicando que se conseguiu manter uma velocidade praticamente constante ao longo da via. A velocidade das medidas efectuadas a pé foi de aproximadamente 4 km/h.

Com as medidas efectuadas pretende-se apenas determinar o andamento médio do sinal, uma vez que é essa a grandeza estimada pelos modelos teóricos. Assim, para eliminar os efeitos do desvanecimento rápido nas medidas experimentais, que traduz a existência de multipercurso, aplicou-se o método da janela deslizante que consiste em atribuir a cada ponto do espaço a média da potência dos pontos vizinhos, compreendidos entre os limites da janela centrada no ponto em que se quer calcular a potência média recebida. A dimensão da janela, ou seja, o comprimento do percurso em que é feita a média das medidas, utilizado no presente estudo é de 30λ , isto é, cerca de 10 m para a banda dos 900 MHz.

4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objectivo deste trabalho é comparar a potência recebida pelo móvel, obtida na campanha de medidas, com a prevista teoricamente, aplicando os modelos de propagação anteriormente descritos. Para tal foi efectuado um processamento estatístico da diferença (erro) entre a curva do sinal médio das medidas, obtido depois de filtrado o desvanecimento rápido através do método da janela deslizante, e o nível de potência previsto pelo modelo teórico.

Assim sendo, foram calculados os seguintes parâmetros:

- Média do erro (μ):

$$\mu_{\text{B}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \Delta P_i}{N_p} \quad (4.2)$$

$$\Delta P_{\text{B}} = P^t - P^m \quad (4.3)$$

em que:

P^t é a potência recebida estimada pelos modelos teóricos;

P^m é a potência média das medidas;

N_p é o número de pontos em que se comparam as previsões teóricas com as experimentais.

- Média do módulo do erro (μ_{abs}):

$$\mu_{abs \text{ B}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} |\Delta P_i|}{N_p} \quad (4.4)$$





- Desvio padrão do erro (σ):

$$\sigma_{\text{B}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (P_i - \mu)^2}{N_p}} \quad (4.5)$$

A média do erro, μ , traduz o grau de sub ou sobreestimação da atenuação por parte do modelo teórico, no entanto, este parâmetro pode ser nulo mesmo que as curvas teórica e experimental se afastem muito uma da outra, bastando para tal que, por exemplo, uma das curvas seja simétrica em relação à outra. A média do erro absoluto, μ_{abs} , é um parâmetro








muito mais exigente, uma vez que só é nulo quando as duas curvas coincidem. O desvio padrão do erro indica se a curva teórica acompanha ou não a curva experimental.

Nos Anexos H e I são apresentados os resultados das medidas efectuadas e das previsões a partir dos modelos de propagação para as zonas das Avenidas Novas e Sapadores, respectivamente. Os gráficos representam o andamento da potência recebida ao longo da rua onde se desloca o TM, sendo apresentadas as curvas com as medidas instantâneas adquiridas com o equipamento de medida, a média das medidas obtida por meio do método da janela deslizante com uma dimensão da janela de 30λ , a potência teórica recebida estimada a partir da ferramenta de cálculo, e a atenuação devida aos cruzamentos no caso em que esta não seja nula. As curvas representadas podem ser identificadas a partir da seguinte legenda:

	Medidas Instantâneas
	Média das Medidas
	Previsão do Modelo
	Atenuação dos Cruzamentos

A comparação entre as previsões teóricas e a média das medidas é quantificada pelos parâmetros estatísticos anteriormente descritos, μ , μ_{abs} e σ , indicados em cada gráfico para cada rua medida e para cada EB.

Apresenta-se, também, nos Anexos H e I o perfil entre a EB e o TM para cada rua medida e para cada EB, indicando-se nesses gráficos a cota do terreno, a altura da EB, dos edifícios, do TM e a altura média dos edifícios, acima do nível médio das águas do mar. São representados dois perfis, um para a posição inicial do TM na via percorrida e outro para a posição final na mesma via. A legenda destes gráficos é seguinte:

	Perfil no Início da Via		Cota do Terreno
	Perfil no Fim da Via		Altura dos Edifícios
			Altura Média dos Edifícios
			Altura do Terminal Móvel
			Altura da Estação de Base

Ainda nos mesmos anexos, e para cada via estudada e para cada EB, encontram-se tabelas com a indicação dos parâmetros associados às ruas, cruzamentos e EBs analisadas, necessários para a determinação do andamento teórico do sinal.

4.2.2. RESULTADOS GERAIS

Nesta secção é analisada a influência de algumas opções nas previsões obtidas para a potência recebida, tomadas no desenvolvimento da ferramenta de cálculo. Assim, analisa-se a adequação dos métodos de cálculo do número de obstáculos, N , para o Modelo de Xia e Bertoni, a influência da variação do ganho da EB e dos cruzamentos.

INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE CÁLCULO DE N

Na Fig. 4.3 está representado o andamento da potência recebida no TM ao longo da Av. João Crisóstomo, para a EB Republ_B. As curvas representadas são a média das medidas, obtida através do método da janela deslizante, e as previsões teóricas obtidas com o modelo de Xia e Bertoni (na determinação de L_{msd}) para os dois métodos de cálculo de N : expressão (3.9) e (3.10), descritos em 3.4.1. O valor de F_B utilizado no cálculo de N através de (3.10) foi obtido por inspeção de cartas topográficas militares da região da Av. João Crisóstomo, tendo-se obtido um valor de $F_B = 5$.

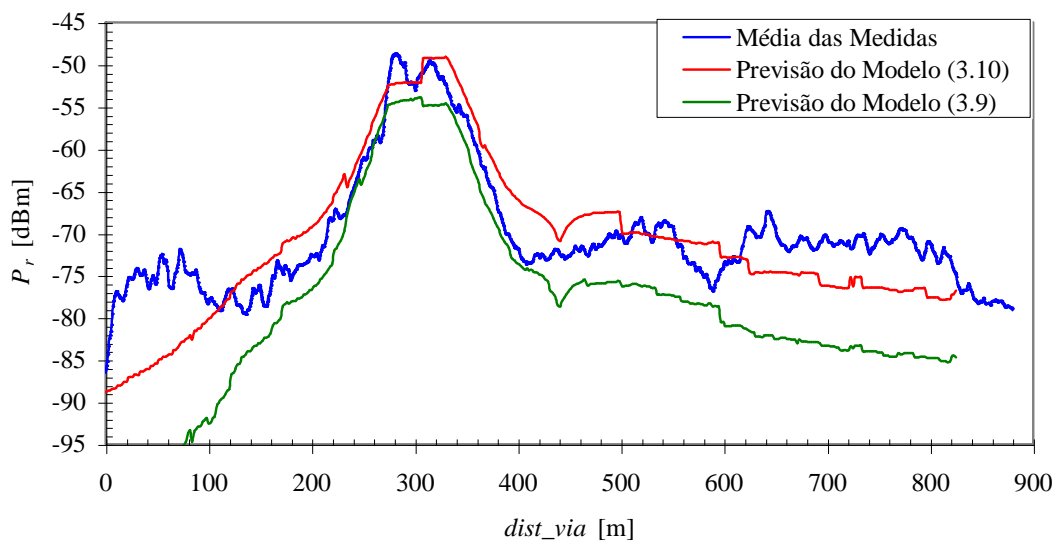


Fig. 4.3 - Influência do método de cálculo de N na potência recebida.

Na Tab. 4.1 indicam-se os parâmetros estatísticos obtidos para os dois métodos de cálculo de N , bem como o intervalo de variação deste parâmetro.

Tab. 4.1- Comparação dos dois métodos de cálculo de N .

	μ [dB]	μ_{abs} [dB]	σ [dB]	N
Expressão (3.9) – $F_B = 1$	-8.7	8.7	6.8	6 – 34
Expressão (3.10) – $F_B = 5$	-0.9	4.0	4.8	1 – 7

Como se verifica do gráfico e da tabela anteriores, o método da expressão (3.10) é o que conduz a melhores resultados, como seria esperado, uma vez que entra em conta com o facto dos quarteirões de edifícios terem uma dimensão diferente da largura das ruas e não desprezar a largura dos edifícios. Por observação nas cartas topográficas da região entre a EB Republ_B e a Av. João Crisóstomo, chega-se à conclusão que o resultado obtido para N através de (3.10) é concordante com o observado na carta, sendo o valor de N dado por (3.9) claramente excessivo.

Conclui-se assim da importância de contabilizar o factor F_B , relacionando as dimensões dos quarteirões e a largura da rua, no cálculo do número de obstáculos entre a EB e o TM para o modelo de Xia e Bertoni. Nas simulações para a obtenção dos andamentos teóricos da potência recebida foi considerado F_B igual a 5 e 6 para as zonas das Avenidas Novas e Sapadores, respectivamente, tendo sido estes valores obtidos por inspecção de cartas topográficas.

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO GANHO DA EB

No gráfico da Fig. 4.4 representam-se mais uma vez as curvas referentes ao andamento da potência recebida no móvel ao longo da Av. João Crisóstomo, para a média das medidas, e para as previsões teóricas para três modos diferentes de estimação do ganho da EB. Para a antena da EB escolhida, Republ_B, encontram-se disponíveis os diagramas de radiação horizontal e vertical, o que permite fazer o estudo da influência da contabilização correcta do ganho da EB. Assim, nas três curvas teóricas apresentadas no gráfico da Fig. 4.4, calculou-se o ganho da EB através do método de extrapolação do ganho por meio dos diagramas horizontal e vertical (situação (a)), através do método aproximado baseado apenas no

diagrama horizontal (situação (b)), e finalmente considerou-se o ganho da EB igual ao seu ganho máximo para qualquer direcção (situação (c)).

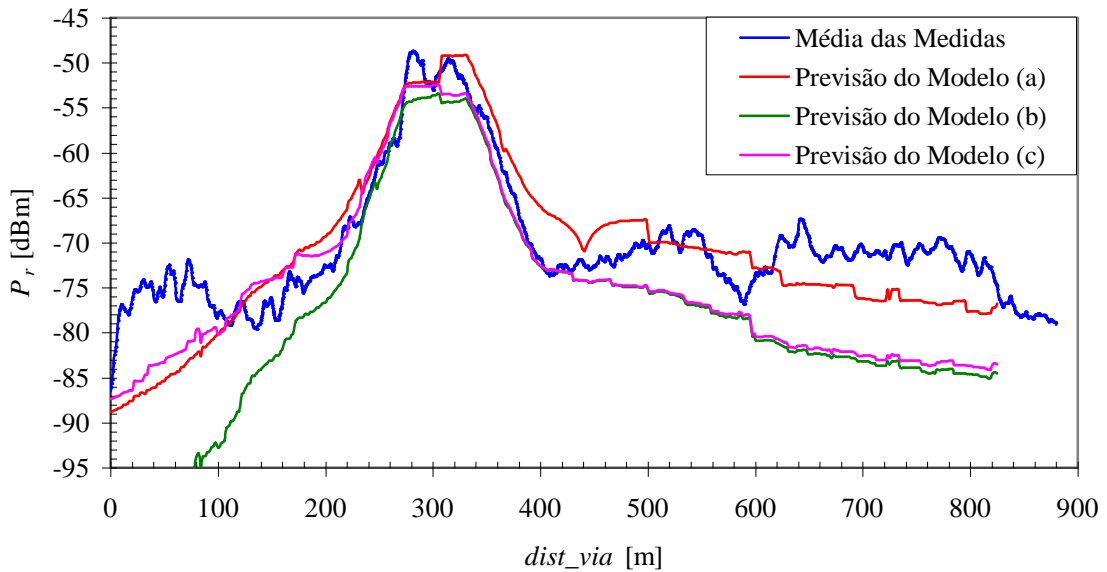


Fig. 4.4 - Influência dos métodos de contabilização do ganho na potência recebida.

Na Tab. 4.2 apresentam-se os parâmetros estatísticos para as diferentes situações em análise.

Tab. 4.2 - Comparação dos métodos de contabilização do ganho.

	μ [dB]	μ_{abs} [dB]	σ [dB]
Situação (a)	-0.9	4.0	4.8
Situação (b)	-8.4	8.4	7.1
Situação (c)	-4.7	5.6	5.2

Verifica-se por observação do gráfico da Fig. 4.4 e da Tab. 4.2 que o método de estimação do ganho da EB que conduz a melhores resultados é o da extrapolação do ganho com base nos diagramas de radiação horizontal e vertical. Neste caso, a situação em que se considera o ganho da EB igual ao ganho máximo da antena produz melhores resultados do que o método aproximado de estimação do ganho com base apenas no diagrama de radiação horizontal, devendo-se isto ao facto da antena da EB Republ_B ter um diagrama no plano vertical muito afastado da variação em \cos^r assumida por este último método, como se pode verificar por observação da Fig. E.4 do Anexo E. Para antenas com diagramas no plano

vertical mais próximas da variação assumida por este método os resultados produzidos serão melhores do que se se considerar apenas o ganho máximo da EB.

Verifica-se assim a importância de contabilizar a variação do ganho da EB não só para minimizar os erros, como também aproximar o andamento da curva teórica ao da curva experimental. Este resultado indica que parte dos erros na comparação entre modelos e medidas se deve à imprecisão com que se conhece o ganho das antenas e não só aos modelos de propagação.

INFLUÊNCIA DOS CRUZAMENTOS

De modo a evidenciar a importância da contabilização da redução na atenuação de propagação devida à influência dos cruzamentos, encontra-se representado no gráfico da Fig. 4.5 o andamento da potência recebida no TM ao longo da Av. João Crisóstomo, para a EB Republ_B. Apresentam-se, para além da curva da média das medidas, a curva teórica contabilizando a atenuação dos cruzamentos, L_{cruz} , e a curva teórica sem contabilização do modelo dos cruzamentos, bem como o andamento da atenuação dos cruzamentos.

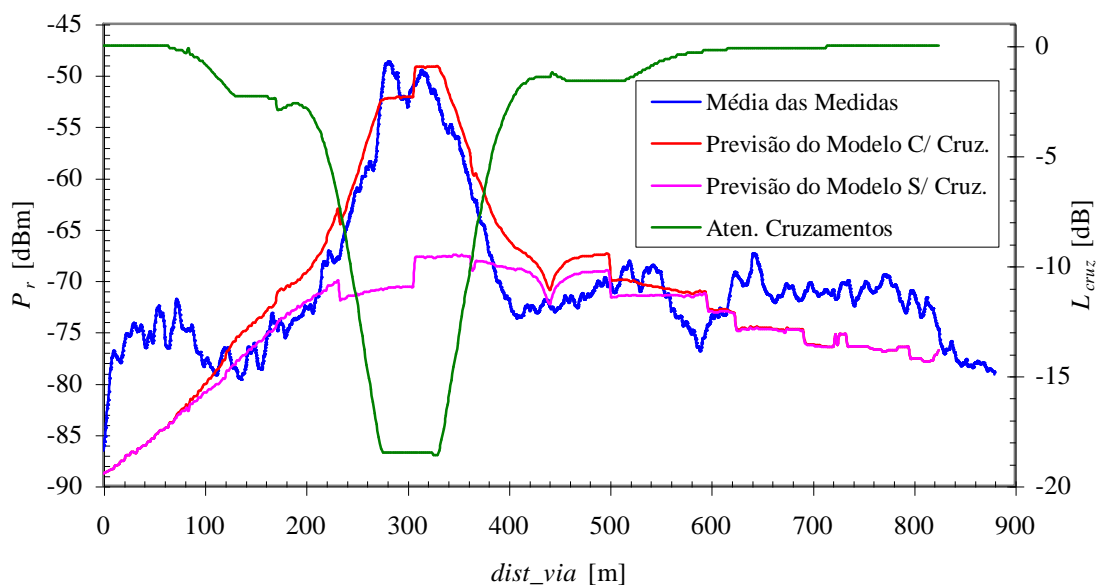


Fig. 4.5 - Influência dos cruzamentos na potência recebida.

Na Tab. 4.3 apresentam-se os parâmetros estatísticos para as duas situações em estudo.

Os resultados expressos no gráfico da Fig. 4.5 e na Tab. 4.3 confirmam que a influência dos cruzamentos não é desprezável no andamento da potência recebida, sendo assim

importante contabilizar o termo de redução da atenuação de propagação previsto pelo modelo dos cruzamentos para diminuir o erro entre valores teóricos e experimentais, e para fazer aproximar o andamento da curva teórica com o dos resultados experimentais, como se depende dos valores de μ_{abs} e σ .

Tab. 4.3 - Influência dos cruzamentos.

	μ [dB]	μ_{abs} [dB]	σ [dB]
$L_{cruz} \neq 0$	-0.9	4.0	4.8
$L_{cruz} = 0$	-4.4	5.5	6.0

4.2.3. ZONAS REGULARES

Nesta secção analisam-se os resultados obtidos para a zona regular das Avenidas Novas, nomeadamente, para as avenidas João Crisóstomo e Duque D'Ávila, tendo sido medidas as EBs Republ_B, PcaEsp_B para as duas avenidas, e as EBs S_Seb_B e Tecnic_C para a Av. Duque D'Ávila.

Da observação dos resultados obtidos para o andamento da potência recebida no TM ao longo das vias (Anexo H), concluiu-se que estes podiam ser separados em dois casos: o caso em que a posição relativa entre a EB e a via percorrida origina um ângulo de rua, φ , elevado, tratado na Secção 4.2.3.1., e o caso em que esse ângulo de rua é muito reduzido, tratado na Secção 4.2.3.2. Verificou-se que a concordância entre os resultados teóricos e experimentais depende do ângulo de rua, distinguindo-se dois comportamentos entre cenários onde na maior parte da rua percorrida o ângulo de rua é superior a cerca de 20°, daqueles onde é inferior a esse valor.

4.2.3.1. CENÁRIOS COM ÂNGULO DE RUA ELEVADO

Na zona das Avenidas Novas ocorrem dois casos onde o ângulo de rua é superior a 20°: em todos os pontos da Av. Duque D'Ávila, e na maior parte do percurso na Av. João Crisóstomo, ambos para as medidas da EB Republ_B.

Os gráficos com o andamento da potência recebida ao longo da Av. João Crisóstomo e Av. Duque D'Ávila encontram-se representados na Fig. H.1 e Fig. H.5, respectivamente.

Por observação dos gráficos da potência recebida e dos respectivos parâmetros estatísticos que caracterizam o erro entre os resultados teóricos e experimentais, verifica-se que existe uma boa concordância entre ambos para qualquer uma das avenidas. A média do erro absoluto, μ_{abs} , entre os valores teóricos e experimentais é de 4 dB e o desvio padrão do erro, σ , é de 4.8 dB e 3.6 dB para as avenidas João Crisóstomo e Duque D'Ávila, respectivamente, valores que indicam não só um erro não elevado entre valores teóricos e experimentais, mas também que a curva teórica acompanha o andamento da curva experimental.

Nos gráficos da Fig. H.1 e da Fig. H.5, pode-se ainda observar que o modelo dos cruzamentos (curva de L_{cruz} a verde), prevê com boa concordância a influência do cruzamento com a Av. da República, com largura w_c igual a 55 m e φ_c igual a 84° e 85° , respectivamente para a Av. João Crisóstomo e Av. Duque D'Ávila. Note-se que na implementação do modelo o valor de w_c é limitado a 50 m, o que parece não ter prejudicado a previsão da influência do cruzamento. Verifica-se, também, que a influência dos outros cruzamentos na potência recebida é muito reduzida ou nula, em ambas as avenidas, ficando isto a dever-se ao facto do ângulo φ_c para os restantes cruzamentos se afastar muito dos 90° , como indicado na Tab. H.2 e Tab. H.6.

A boa concordância entre os resultados teóricos e experimentais para estas avenidas fica a dever-se ao facto dos modelos de Xia e Bertoni e dos cruzamentos serem aplicados em cenários onde são satisfeitas as suas condições de validade, nomeadamente, espaçamento e altura de fileiras de edifícios uniformes, como se pode observar no mapa do Anexo F, e nos perfis entre a EB e o TM da Fig. H.2 e Fig. H.6 do Anexo H. Nestas duas últimas figuras, verifica-se que no final da rua para a Av. João Crisóstomo e no início para a Av. Duque D'Ávila a incidência no TUE é rasante, condição para a qual o modelo de Xia e Bertoni conduz a bons resultados, e que se verifica para a maior parte do percurso em ambas as avenidas.

Ainda por observação dos gráficos com o andamento da potência, chega-se à conclusão que a curva teórica se afasta da curva experimental no início da Av. João Crisóstomo, e no final da Av. Duque D'Ávila. Note-se que as avenidas foram medidas em sentidos contrários como indicado no mapa do Anexo F, sentido Este-Oeste para a Av. João Crisóstomo e Oeste-Este para a Av. Duque D'Ávila. O desvio entre curvas teóricas e experimentais deve-se ao

facto de nas zonas referidas, para ambas as avenidas, a EB ficar abaixo do nível médio dos topos dos edifícios, como se pode observar nos perfis entre EB e TM. Estes resultados indicam que o modelo de Xia e Bertoni não produz boas previsões para o caso em que a EB se encontra abaixo do topo dos edifícios. O modelo sobreestima a atenuação nessa situação, devendo-se isso ao facto de não contabilizar fenómenos de propagação que se tornam importantes para fazer chegar sinal ao TM, tais como, condução do sinal através das ruas por meio de reflexões nas paredes dos edifícios e difracção através das arestas verticais dos edifícios.

4.2.3.2. CENÁRIOS COM ÂNGULO DE RUA REDUZIDO

As restantes EBs medidas, PcaEsp_B tanto na Av. João Crisóstomo como na Av. Duque D'Ávila, e S_Seb_B e Tecnic_C apenas na Av. Duque D'Ávila, foram efectuadas em cenários de propagação em que o ângulo de rua é sempre inferior a 20° como se pode observar nas Tabs. H.3, H.7, H.9 e H.11, respectivamente. Os gráficos com o andamento da potência recebida para estas 4 situações encontram-se representados nas Figs. H.3, H.7, H.9 e H.11 do Anexo H.

As medidas da EB PcaEsp_B para a Av. João Crisóstomo e para a Av. Duque D'Ávila, apresentam andamentos da curva teórica semelhantes, ou seja, a potência recebida varia muito pouco ao longo da rua, quase se podendo aproximar essa variação por uma recta com declive praticamente nulo. Este comportamento do sinal previsto pelos modelos deve-se ao facto de para as duas avenidas a EB estar muito acima da altura média dos edifícios e a uma distância elevada do TM, como se pode observar pelos perfis entre EB e TM para estes casos no Anexo H. A atenuação sofrida pelo sinal devida à múltipla difracção através dos obstáculos prevista pelo modelo de Xia e Bertoni depende apenas dos obstáculos que interrompem o 1° elipsóide de Fresnel, o que nas condições dos presentes perfis leva à contabilização de um número aproximadamente fixo de edifícios antes do móvel devido à distância elevada entre este e a EB. Deste modo, o andamento da curva teórica da potência recebida para estes dois casos parece seguir o andamento médio das curvas experimentais, sem conseguir no entanto prever as variações que ocorrem nestas, como é explicitado pelo valor da média do erro absoluto e do desvio padrão do erro. Para a Av. João Crisóstomo e para a EB em estudo obtemos $\mu_{abs} = 7.4$ dB e $\sigma = 14.7$ dB, enquanto que para a Av. Duque D'Ávila se tem $\mu_{abs} = 17.6$ dB e $\sigma = 22.4$ dB. Como se verifica pelos valores de σ as curvas teóricas não tendem a acompanhar

o andamento das curvas experimentais. As oscilações observadas no andamento das curvas experimentais dever-se-ão a variações locais na altura de edifícios não contabilizadas na carta digital nem no modelo de Xia e Bertoni. Note-se que devido à forma como foi inserida a informação sobre a altura dos edifícios na carta digital, os edifícios de uma zona da carta apresentam todos a mesma altura, não existindo diferenciação na altura de edifício para edifício da mesma área. No terreno entre a EB PcaEsp_B e qualquer das avenidas medidas existem bastantes espaços abertos sem edifícios ou com jardins, sendo assim a ocupação do terreno bastante irregular, o que associado à baixa resolução da carta (50 m) conduz a um mau desempenho do modelo de Xia e Bertoni e de Ikegami para prever o sinal recebido no TM. É possível que para esta zona os resultados fossem melhores se a informação geográfica fosse mais precisa, nomeadamente em termos de alturas de edifícios, largura de ruas e quarteirões.

Para ângulos de rua reduzidos algumas aproximações tomadas na dedução do modelo de propagação de Ikegami tornam-se grosseiras, nomeadamente a substituição do último edifício por uma lâmina (*knife-edge*). O modelo de Ikegami considera que a difracção desde o TUE até ao nível da rua se dá na aresta duma lâmina colocada perpendicularmente à direcção de propagação, e que o raio reflectido na parede do edifício oposto é originado no mesmo raio que atingindo o TUE se difracta directamente até ao móvel, ou seja, o modelo assume que a parede do edifício oposto ao UE é também perpendicular à direcção de propagação. Para ângulos de rua reduzidos isto constitui uma aproximação grosseira, não só porque o raio reflectido na parede do edifício oposto ao UE entra na rua muito antes do ponto onde entra o raio difractado directo, como também para a difracção no UE deveria ser contabilizada uma parcela da atenuação de obstáculo que dá conta da forma e dimensões do último obstáculo.

Verifica-se ainda que no andamento da potência recebida para a Av. Duque D'Ávila ocorrem nos pontos indicados com uma circunferência na Fig. H.7 saltos bruscos no valor da potência recebida prevista teoricamente. Verificou-se que estes saltos se devem a uma diminuição brusca da atenuação dada pelo modelo de Ikegami originada por uma diminuição brusca na altura do último edifício antes do móvel. Esta variação na altura do último edifício deve-se ao facto de ao longo da rua a localização do UE passar de uma das zonas da carta com uma determinada altura para os edifícios, para outra onde se assumiu uma altura média dos edifícios mais baixa na construção da carta. Daqui se depreende a importância de se ter informação digital sobre o cenário de propagação o mais exacta possível para aplicação dos modelos de propagação, sendo desejável uma carta digital com uma resolução superior a 50 m.

Note-se que nas Figs. H.3 e H.7 ocorrem interrupções nas curvas experimentais, que traduzem o facto da EB PcaEsp_B ter deixado de estar momentaneamente entre as 6 células vizinhas da célula de serviço (Republ_B) com melhor sinal e durante esse tempo não ter sido medida.

Como seria de esperar dado o reduzido valor do ângulo de rua, a influência dos cruzamentos é nula para os dois casos analisados.

Para a EB S_Seb_B medida na Av. Duque D'Ávila o andamento da potência encontra-se representado na Fig. H.9, tanto para as medidas experimentais como para as previsões teóricas. Mais uma vez o andamento da curva teórica indica uma variação muito lenta e reduzida do sinal recebido pelo TM. Isto fica a dever-se às mesmas razões aplicadas ao caso da EB PcaEsp_B, uma vez que embora no princípio da rua a distância entre a EB e o TM seja reduzida, a altura da EB está muito acima do topo dos edifícios, sendo por isso a atenuação de propagação essencialmente devida aos edifícios mais junto ao móvel.

Embora a curva teórica não apresente as mesmas oscilações que a curva experimental, a média do erro absoluto, μ_{abs} , é de 7.9 dB, sendo o valor do desvio padrão, σ , de 9.0 dB, o que indica mais uma vez que a curva teórica não acompanha a curva experimental. Os valores destes parâmetros estatísticos seriam mais baixos se não ocorresse para este caso, à semelhança do que acontece para a EB PcaEsp_B na Av. Duque D'Ávila, os saltos na potência recebida prevista teoricamente, devidos à diminuição brusca da atenuação L_{rts} calculada pelo modelo de Ikegami, provocada novamente pela variação da altura atribuída pela carta digital ao UE.

Os resultados teóricos não são mais uma vez tão bons como os obtidos em 4.2.3.1, ficando novamente patente a quebra de desempenho dos modelos de Xia e Bertoni e de Ikegami para prever a atenuação suplementar de propagação para ângulos de rua reduzidos.

Devido ao valor reduzido do ângulo de rua a influência dos cruzamentos na potência recebida é nula.

Na Fig. H.11 encontra-se representado o andamento da potência recebida ao longo da Av. Duque D'Ávila para a EB Tecnic_C. Verifica-se que a curva teórica se afasta muito da curva experimental, existindo uma clara subestimação da atenuação de propagação pelos modelos teóricos, sendo a média do erro absoluto, μ_{abs} , de 24.2 dB. No entanto, o desvio padrão do erro, σ , é de apenas 4.1 dB, o que significa que a curva teórica acompanha com boa

concordância o andamento da curva experimental, parecendo assim indicar que existe um erro sistemático no cálculo da atenuação de propagação.

Uma das causas para a subestimação da atenuação de propagação neste caso é o facto da ferramenta de cálculo desenvolvida não dar conta da atenuação no sinal provocada pela vegetação, bastante abundante na Av. Duque D'Ávila no troço junto à EB em estudo. A EB Tecnic_C está quase alinhada com a Av. Duque D'Ávila como provam os valores do ângulo de rua que variam entre 12° e 1.5° para o princípio e fim da rua, respectivamente. Assim, a propagação do sinal na rua deverá, em princípio, atravessar uma extensão considerável de vegetação não contabilizada pelos modelos. A atenuação adicional devida à vegetação não deverá ser no entanto o termo mais importante da atenuação de propagação não contabilizado pela ferramenta de cálculo, uma vez que esta subestimação da atenuação não ocorre também para a EB S_Seb_B, embora esta também esteja praticamente alinhada com a Av. Duque D'Ávila e, portanto, nas mesmas condições relativamente à rua que a Tecnic_C.

Pensa-se que o factor não contabilizado no cálculo da atenuação de propagação se deva ao facto de, na direcção da Av. Duque D'Ávila, a EB Tecnic_C se encontrar abaixo dos edifícios mais próximos, que provocam assim uma obstrução considerável ao sinal. A carta digital não permite contabilizar esta obstrução, uma vez que para a zona próxima da EB mais uma vez apresenta para a altura de todos os edifícios o valor médio da zona, não permitindo assim contabilizar a influência de edifícios que se destaquem em altura dos circundantes.

Novamente, não existe influência no nível de potência recebida por parte dos cruzamentos devido ao reduzido valor do ângulo de rua.

4.2.4. ZONAS IRREGULARES

Nesta secção analisam-se os resultados obtidos para a zona irregular dos Sapadores, para as ruas Afonso Domingues, Diogo do Couto, do Mato Grosso e Fernão de Magalhães, tendo sido medidas as EBs Graca_A, Xabreg_C e Apolon_A, excepto para a Rua Afonso Domingues onde a EB Apolon_A não foi medida. A localização das EBs medidas está indicada no mapa do Anexo F.

Através da observação dos andamentos obtidos para a potência recebida, para as medidas experimentais e para as previsões teóricas (Anexo I), e da observação dos perfis entre EB e TM para cada caso, chegou-se à conclusão que faz sentido separar os resultados em três casos: o caso em que a EB se encontra acima da altura média dos edifícios, h_{ED} , o caso em

que a EB se encontra abaixo da altura média dos edifícios, e o caso em que parte da rua se encontra abaixo de h_{ED} e a outra parte acima de h_{ED} . Estas situações são analisadas nas subsecções seguintes.

4.2.4.1. ESTAÇÃO DE BASE ACIMA DO TOPO DOS EDIFÍCIOS

Como se pode observar a partir dos perfis entre a EB e o TM apresentados no Anexo I, os cenários em que a EB se encontra sempre acima da altura média dos edifícios para toda a rua ocorrem para as medidas da EB Graca_A para todas as ruas percorridas, e ainda para a EB Xabreg_C para a Rua Fernão de Magalhães.

Dentro destas medidas efectuadas podem-se ainda distinguir os casos em que a orientação das ruas conduz a ângulos de rua elevados ou reduzidos. Como é natural, quando o ângulo de rua é reduzido não se verifica a influência dos cruzamentos, enquanto que para as situações em que o ângulo de rua é elevado é notória nas medidas experimentais e nas previsões teóricas a influência dos cruzamentos.

Os casos em que o ângulo de rua é elevado, e portanto se faz sentir a influência dos cruzamentos, são os das medidas para a EB Graca_A para as ruas Afonso Domingues e Diogo do Couto. Como se pode verificar através dos gráficos do Anexo I com o andamento da potência ao longo destas duas ruas, as curvas teórica da atenuação dos cruzamentos prevêem com exactidão a localização dos cruzamentos, embora em termos de amplitude da contribuição do cruzamento não haja boa concordância, sendo em alguns casos subestimada e noutros sobreestimada, sem que se consiga estabelecer uma relação causa-efeito com os parâmetros geométricos do cenário de propagação. É de notar que esta discrepância na amplitude da influência dos cruzamentos pode dever-se ao facto da ferramenta de cálculo limitar a largura das ruas que cruzam a rua percorrida ao mínimo de 12.5 m, tendo a maior parte dessas ruas 10 m de largura. Para além disso, alguns destes cruzamentos ocorrem para perfis entre a EB e o TM onde a diferença de alturas entre a EB e os edifícios é superior ao limite máximo de validade do modelo dos cruzamentos, sendo assim o valor de Δh_{base} limitado a 11 m.

Quanto aos parâmetros estatísticos que caracterizam o erro absoluto obtiveram-se valores de μ_{abs} de 5.8 dB e 9.7 dB para as ruas Afonso Domingues e Diogo do Couto, o que parece indicar que para zonas irregulares onde a altura total dos edifícios (cota mais altura acima do solo) varia muito ao longo da rua medida o modelo de Xia e Bertoni não consegue

prever bem a atenuação do sinal baseando-se apenas no valor médio da altura dos obstáculos. No entanto, os valores de σ são de apenas 5.3 dB para a Rua Afonso Domingues e 6.8 dB para a Rua Diogo do Couto, o que indica que existe uma tendência das curvas teóricas para acompanhar as curvas experimentais. Quanto ao modelo dos cruzamentos, o facto de ter sido deduzido assumindo cenários onde a altura e espaçamento entre edifícios é uniforme faz com que quando aplicado a zonas irregulares consiga prever com exactidão a influência espacial ao longo da rua dos cruzamentos, embora não consiga prever com bons resultados a amplitude dessa influência, ocorrendo por vezes subestimação ou sobreestimação da mesma.

Para os casos em que as ruas se encontram orientadas de modo a que ocorram ângulos de rua reduzidos, surpreendentemente, face aos resultados obtidos para as zonas regulares em 4.2.3.2, os resultados da previsão do sinal recebido no móvel estão em boa concordância com os experimentais para qualquer dos casos da EB Graca_A nas ruas Fernão de Magalhães e do Mato Grosso, e da EB Xabreg_C na Rua Fernão de Magalhães.

Os parâmetros estatísticos que caracterizam o erro absoluto têm os valores de 2.4 dB, 3.9 dB e 2.7 dB para μ_{abs} , e 2.7 dB, 4.5 dB e 3.3 dB para σ para os casos da EB Graca_A na Rua do Mato Grosso e Fernão de Magalhães e da EB Xabreg_C na Rua Fernão de Magalhães, respectivamente. Ou seja não só a média do erro absoluto é reduzido em qualquer um dos casos, como também o andamento das curvas teóricas acompanha com relativa precisão os andamentos das curvas experimentais.

Esta concordância entre resultados teóricos e experimentais ficar-se-à a dever ao facto de em qualquer destas ruas a cota do terreno não variar significativamente ao contrário do caso das ruas Afonso Domingues ou Diogo do Couto. Devido à configuração do perfil, ocorre uma depressão do terreno entre a EB e o TM (ver Anexo I), os edifícios que aparentemente contribuem mais para a atenuação L_{msd} (interrompem o 1º elipsóide de Fresnel) são os mais próximos do móvel, tendo assim alturas aproximadas entre si. O modelo de Xia e Bertoni consegue neste caso prever bem a atenuação L_{msd} tomando a média das alturas desses edifícios. Este resultado parece indicar que a aproximação mais importante de verificar no modelo de Xia e Bertoni para o seu bom desempenho é a uniformidade de alturas dos edifícios que interrompem o 1º elipsóide de Fresnel, desde que se tome para h_{ED} a média das alturas de apenas estes edifícios, não parecendo ser tão importante o facto das ruas não estarem dispostas segundo um grelha rectangular e, assim, o espaçamento entre edifícios não ser uniforme.

Verifica-se, como é natural, que nestes três casos não se faz sentir a influência dos cruzamentos no andamento da potência recebida no móvel ao longo das ruas, uma vez que o ângulo de rua é demasiado reduzido, inferior a 30°.

4.2.4.2. ESTAÇÃO DE BASE ABAIXO DO TOPO DOS EDIFÍCIOS

Como se pode observar a partir dos perfis entre EB e TM apresentados no Anexo I, os cenários em que a EB se encontra sempre abaixo da altura média dos edifícios para toda a rua, ocorrem para as medidas da EB Apolon_A para as ruas Fernão de Magalhães e do Mato Grosso, e, ainda, para a EB Xabreg_C para a rua do Mato Grosso.

Como já tinha ocorrido para as zonas regulares, o modelo de Xia e Bertoni não consegue prever a atenuação adicional de propagação, sobreestimando a mesma. Isto ocorre, como já se referiu anteriormente, porque quando a EB se encontra abaixo dos edifícios não é a difracção múltipla pelos topos dos edifícios que determina a chegada de sinal ao móvel, mas sim outros fenómenos de propagação como a condução de raios através das ruas.

Observam-se assim valores muito elevados para a média do erro absoluto, μ_{abs} , 57.4 dB, 46.7 dB e 32.8 dB para a EB Apolon_A e para as ruas do Mato Grosso e Fernão de Magalhães e EB Xabreg_C na rua do Mato Grosso, respectivamente. Os valores do desvio padrão também são elevados, cerca de 7 a 8 dB, excepto para a EB Xabreg_C na rua do Mato Grosso, onde se tem $\sigma = 3$ dB, o que indica uma boa concordância no andamento da potência recebida entre a curva teórica e a curva experimental, apesar do erro absoluto muito elevado entre cada ponto das duas curvas.

Em qualquer destes casos o ângulo de rua é reduzido ao longo de toda a rua, pelo que não se faz sentir a influência dos cruzamentos no nível de sinal recebido no TM.

4.2.4.3. ESTAÇÃO DE BASE ACIMA E ABAIXO DO TOPO DOS EDIFÍCIOS

Como se pode observar a partir dos perfis entre a EB e o TM apresentados no Anexo I, os cenários em que a EB se encontra em parte do percurso na rua acima da altura média dos edifícios e noutra parte do mesmo percurso abaixo desse nível, ocorrem para as medidas da EB Xabreg_C para as ruas Afonso Domingues e Diogo do Couto, e ainda para a EB Apolon_A para a rua Diogo do Couto.

Como se pode observar através do andamento da potência recebida no móvel e dos perfis entre a EB e o TM para a EB Xabreg_C medida na Rua Afonso Domingues, a previsão teórica do sinal recebido só se aproxima dos resultados experimentais no final da rua quando a EB fica a uma altura superior à altura média dos edifícios. Do gráfico do andamento da potência observa-se bem a discrepância entre as duas curvas no início da rua Afonso Domingues, mais uma vez devido ao facto do modelo de Xia e Bertoni sobreestimar a atenuação de propagação para Δh_{base} negativo. À medida que se aproxima o final da rua regista-se um aumento da potência recebida quando Δh_{base} se torna menos negativo. A média do erro absoluto para este caso é de 26.1 dB, sendo o desvio padrão do erro de 19.2 dB, o que prova o afastamento entre as curvas não só em valor como em andamento.

Neste caso é detectado um cruzamento, sendo o valor da amplitude de L_{cruz} sobrestimada, embora mais uma vez a localização do cruzamento coincida tanto na curva teórica como experimental.

Para a EB Xabreg_C medida agora na R. Diogo do Couto verifica-se novamente uma grande diferença entre a curva teórica e experimental. No início da via existe uma subestimação da atenuação de propagação e são detectados dois cruzamentos na curva teórica que não ocorrem nas medidas. Esta falha do modelo de Xia e Bertoni e dos cruzamentos fica-se a dever a alguma obstrução forte que possa existir entre a EB e o TM que invalida a sua aplicação. Esta forte obstrução poderá dever-se ao facto da linha de vista entre a EB e o TM se encontrar interrompida não só por edifícios, mas também pelo próprio terreno como se pode observar pela Fig. I.8 para o início da rua. No final desta Δh_{base} torna-se negativo, continuando a existir obstrução do próprio terreno, verificando-se o mau desempenho do modelo de Xia e Bertoni, subestimando mais uma vez a atenuação. Os valores obtidos para os parâmetros estatísticos neste caso foram para a média do erro absoluto 22.9 dB, e para o desvio padrão do erro 24.9 dB.

Para a EB Apolon_A medida na R. Diogo do Couto verifica-se que o sinal teórico recebido no TM acompanha aproximadamente as medidas experimentais no início da rua antes de Δh_{base} se tornar negativo, ocorrendo a partir daí um total desacordo entre as duas curvas que conduz a um valor de μ_{abs} de 31.1 dB e de σ de 24.4 dB. Para esta rua, embora existam dois cruzamentos que apresentam um valor de φ_c elevado (ver Tab. I.10), o valor de Δh_{base} é já negativo nos pontos da rua em que esses cruzamentos ocorrem, não existindo assim a sua influência.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram testados modelos de propagação para microcélulas urbanas em cenários que se afastam das suas condições de aplicação. Estudaram-se os modelos de Xia e Bertoni, de Ikegami, e o modelo dos cruzamentos desenvolvido por Gonçalves. Para tal, foram efectuadas medidas de sinal na cidade de Lisboa com a colaboração do operador de GSM Telecel, que cedeu o equipamento de medida para a banda dos 900 MHz e informação relativa às estações de base seleccionadas para o estudo.

As áreas de Lisboa escolhidas para o teste foram a região dos Sapadores, devido à irregularidade associada à cota do terreno, à disposição e largura das ruas, e à altura dos edifícios, e a das Avenidas Novas com o intuito de aferir os modelos nos seus cenários de validade de aplicação, ou seja, estrutura urbana regular, com edifícios equiespaçados e de altura uniforme.

Verificou-se que para se obterem nas medidas experimentais um número suficiente de pontos nos cruzamentos, para comparação com as previsões teóricas, era necessário fazê-las a uma velocidade muito reduzida, tendo sido efectuadas no presente trabalho a uma velocidade de aproximadamente 4 km/h.

De modo a comparar as previsões teóricas com as medidas experimentais, foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo utilizando a linguagem de programação C++, na qual se implementaram os modelos de propagação em estudo.

De forma a implementar o modelo de Xia e Bertoni foi efectuado um estudo sobre a convergência da série de funções de Boersma utilizada na expressão exacta do modelo. Concluiu-se que a expressão exacta converge até um limite máximo de $|\Delta h_{base}|$ (altura da estação de base acima do nível médio do topo dos edifícios), dependente do número de obstáculos considerados e espaçamento entre eles. Verifica-se que a variação do valor máximo de $|\Delta h_{base}|$ com o número de obstáculos considerados é exponencial, enquanto que a dependência com o espaçamento entre edifícios apresenta uma variação quadrática. Aproximando o andamento de $|\Delta h_{base}|$ com o espaçamento entre edifícios a uma variação linear, foi possível obter uma expressão para o valor de $|\Delta h_{base}|$ máximo que permitia a convergência da fórmula exacta do modelo de Xia e Bertoni em função do número de obstáculos e espaçamento entre os mesmos. Esta fórmula foi implementada na ferramenta de cálculo, sendo feita a transição entre as expressões exacta e as aproximadas existentes quando aquela deixava de convergir.

Para distâncias elevadas entre a estação de base e o terminal móvel, observa-se que a redução do campo prevista pelo modelo de Xia e Bertoni se torna independente do número de

obstáculos considerados. No entanto, para distâncias mais curtas, da ordem das centenas de metros, a contabilização do número exacto de edifícios que causam obstrução ao sinal torna-se importante. Utilizou-se, assim, na ferramenta de cálculo uma expressão para determinar o número de obstáculos entre a estação de base e o móvel que entra em conta com a relação entre a largura das ruas e as dimensões dos quarteirões de edifícios, e não despreza a largura destes.

No desenvolvimento do programa de cálculo foi aplicado um novo modelo de extrapolação do ganho através do conhecimento dos diagramas de radiação das antenas das estações de base nos planos horizontal e vertical. Verificou-se, por comparação de simulações com as medidas experimentais, que a contabilização da variação do ganho no diagrama tridimensional, é importante para uma boa previsão do nível de sinal recebido no terminal móvel.

Descreveram-se ainda neste trabalho todas as opções escolhidas na implementação dos modelos em estudo, e no cálculo dos parâmetros geométricos a eles associados. A determinação desses parâmetros é baseada numa carta digitalizada da região de Lisboa com resolução de 50 m, contendo informação sobre as coordenadas cartesianas de cada ponto, tipo de ocupação (edifícios, árvores, água) e altura da mesma, e na inspecção de cartas topográficas da cidade de Lisboa.

Da análise das medidas experimentais e previsões teóricas, chegou-se à conclusão que para as zonas regulares se podiam separar os resultados dos cenários em que o ângulo de rua era superior a 20° daqueles em que o ângulo de rua era inferior a esse valor.

Para os cenários com ângulo de rua elevado houve boa concordância entre os valores experimentais e teóricos, tendo sido obtidos valores para a média do erro absoluto de 4 dB e para o desvio padrão do erro entre 3.6 dB e 4.8 dB, o que demonstra não só um erro aceitável entre as curvas teórica e experimental, como também uma tendência por parte da curva teórica em acompanhar o andamento da experimental. Observou-se para este cenário uma boa previsão da influência dos cruzamentos por parte do modelo de Gonçalves, não só na localização dos cruzamentos ao longo da rua, como também na sua amplitude .

Para as zonas com ângulo de rua reduzido os resultados mostraram uma maior discrepância entre os valores teóricos e experimentais, variando a média do erro obtido entre 7 dB e 24 dB e o desvio padrão do erro entre 4.1 dB e 22.4 dB, o que indica um mau desempenho e impossibilidade de estimar o erro associado às previsões por parte dos modelos de Xia e Bertoni e de Ikegami para cenários regulares com ângulo de rua reduzido.

Para os cenários irregulares chegou-se à conclusão, por observação das previsões teóricas e medidas experimentais, que os resultados podiam ser separados para cenários em que a estação de base se encontra acima ou abaixo do nível médio do topo dos edifícios para toda a rua percorrida, podendo ainda ser distinguido dos anteriores o caso em que a estação de base está acima do topo dos edifícios em parte da rua, encontrando-se abaixo desse nível na outra parte. Para os cenários em que a estação de base se situa acima da média de alturas dos edifícios, podem-se distinguir mais uma vez os casos entre cenários nos quais o ângulo de rua é elevado ($>20^\circ$) daqueles em que o ângulo de rua é reduzido.

Para os cenários em que o ângulo de rua é elevado, verificou-se que as previsões teóricas se afastavam das medidas experimentais, sendo obtidos valores para a média do erro absoluto da ordem dos 5.8 dB e 9.7 dB e para o desvio padrão entre 5.3 dB e 6.8 dB. Para os cenários onde o ângulo de rua é reduzido, contrariamente ao obtido para as zonas regulares, existe uma boa concordância entre valores teóricos e experimentais, variando a média do erro absoluto entre 2.4 dB e 3.9 dB, e o desvio padrão do erro entre 2.7 dB e 4.5 dB. Estes resultados foram obtidos para duas ruas próximas e paralelas, e para duas estações de base opostas em relação às ruas.

Para zonas irregulares, mas para o caso da estação de base se encontrar muito abaixo do topo dos edifícios, verificou-se um total desacordo entre as medidas experimentais e as previsões teóricas, tendo sido obtidos valores para a média do erro absoluto entre 32.8 dB e 57.4 dB, verificando-se sempre uma subestimação do nível de sinal recebido por parte dos modelos utilizados. O desvio padrão do erro varia entre 3 dB e 8 dB, o que indica que num dos casos estudados o andamento da curva experimental é bem reproduzido pela curva teórica, apesar do erro absoluto entre ambas. Da má concordância registada entre medidas e previsões para estes cenário, conclui-se que a formulação de Xia e Bertoni não é capaz de prever a atenuação sofrida pelo sinal para os casos em que a estação de base se encontra muito abaixo do nível médio do topo dos edifícios, sobreestimando sempre a atenuação de propagação.

Finalmente, para os cenários irregulares em que em parte do percurso a estação de base se encontra abaixo do topo dos edifícios e noutra parte acima dos mesmos, verifica-se, mais uma vez, pouca concordância entre resultados experimentais e teóricos, tendo-se obtido valores para o erro absoluto entre 22.9 dB e 31.1 dB, e para o desvio padrão entre 19.2 dB e 24.9 dB.

Como trabalho futuro sugere-se o teste dos modelos apresentados, especialmente o dos cruzamentos de Gonçalves, para a frequência de 1800 MHz, não tendo sido feito um estudo nessa banda devido à inexistência de equipamento de medida disponível para efectuar os testes experimentais, aquando da realização do presente trabalho.

Seria também interessante tentar estender o modelo dos cruzamentos para zonas não regulares, uma vez que os resultados obtidos, embora apresentassem uma boa concordância na localização espacial da influência dos cruzamentos, o mesmo não acontece para a amplitude dessa influência.

Uma vez que actualmente existe uma tendência para diminuir o raio das células no sistema GSM de modo a aumentar a sua capacidade, as estações de base tendem a ser colocadas abaixo do topo dos edifício. Seria útil desenvolver e aferir modelos de propagação para a cidade de Lisboa que contabilizem a propagação em linha de vista e a influência de raios reflectidos no solo e nas paredes dos edifícios.

REFERÊNCIAS

- [AIRi98] Alves,A. B. e Ribeiro,C. M., “*Implementação de Modelos de Propagação para Microcélulas Urbanas em GSM*”, Trabalho Final de Curso, IST, Lisboa, Portugal, Fevereiro de 1998.
- [Boer78] Boersma,J., “On Certain Multiple Integrals occurring in a Waveguide Scattering Problem”, *SIAM J. Math. Anal.*, Vol. 9, No. 2, Apr. 1978, pp. 377-393.
- [DoCG95] Domingues,A., Caiado,D. e Gonçalves,N., “*Adaptação do Modelo de Propagação COST-231-WI à Cidade de Lisboa*”, Trabalho Final de Curso, IST, Lisboa, 1995.
- [Exce97] “Excel”, Microsoft® Excel 97.
- [Figa91] Figanier,J.F., “*Aspectos de Propagação na Atmosfera*”, IST-DEEC, 1991.
- [Gonç98] Gonçalves,N. M., “*Modelo de Propagação para Sistemas Microcelulares Urbanos na Banda de UHF*”, Tese de Mestrado, IST, Lisboa, Portugal, 1998.
- [IYTU84] Ikegami,F., Yoshida,S., Takeuchi,T., and Umehira,M., "Propagation Factors Controlling Mean Field Strenght on Urban Streets", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-32, No. 8, Aug. 1984, pp. 299-302.
- [MaBX93] Maciel,L.R., Bertoni,H.L. and Xia,H.H., "Unified Approach to Prediction of Propagation Over Buildings for All Ranges of Base Station Antenna Height", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 42, No. 1, Feb. 1993, pp.41-45.
- [Pars92] Parsons,J.D., *The Mobile Radio Propagation Channel*, Pentech Press, London, UK, 1992.

- [RMOV95] Manual da Ferramenta de Cálculo RMOVEL, IST, 1995.
- [Tems96] “TEMS GSM 900/96”, Test Mobile System by Erisoft.
- [WaBe88] Walfisch,J. and Bertoni,H. L., "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-36, No. 12, Dec. 1988, pp. 1788-1796.
- [Xia96] Xia,H. H., "An Analytical Model for Predicting Path Loss in Urban and Suburban Environments", *Proc. PIMRC'96*, pp 19-23, Taipei, Taiwan, Oct. 1996.
- [XiBe92] Xia,H. H. and Bertoni,H.L., "Diffraction of Cylindrical and Plane Waves by an Array of Absorbing Half-Screens", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 40, No. 2, Feb 1992, pp 170-177.

ANEXO A

CONVERGÊNCIA DO MODELO DE XIA E BERTONI

Neste anexo apresentam-se as curvas resultantes do estudo da convergência da expressão exacta do modelo de Xia e Bertoni.

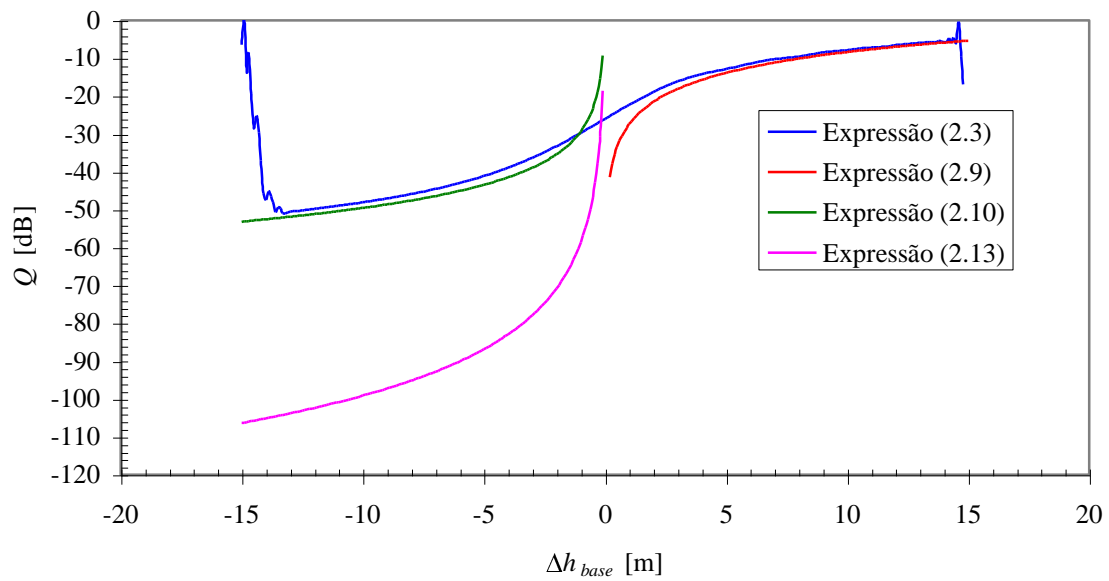


Fig. A.1 - Curvas de $Q(\Delta h_{base})$ obtidas para as diferentes expressões do Modelo de Xia e Bertoni ($N=20$ e $b=50$ m).

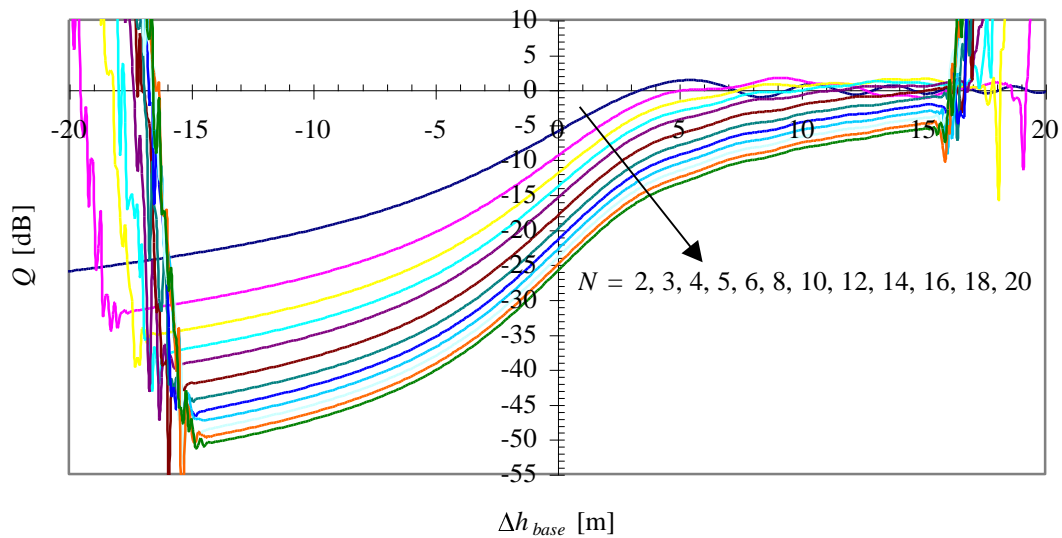


Fig. A.2 - Curvas de $Q(\Delta h_{base})$ obtidas para $b=60$ m e N compreendido entre 2 e 20.

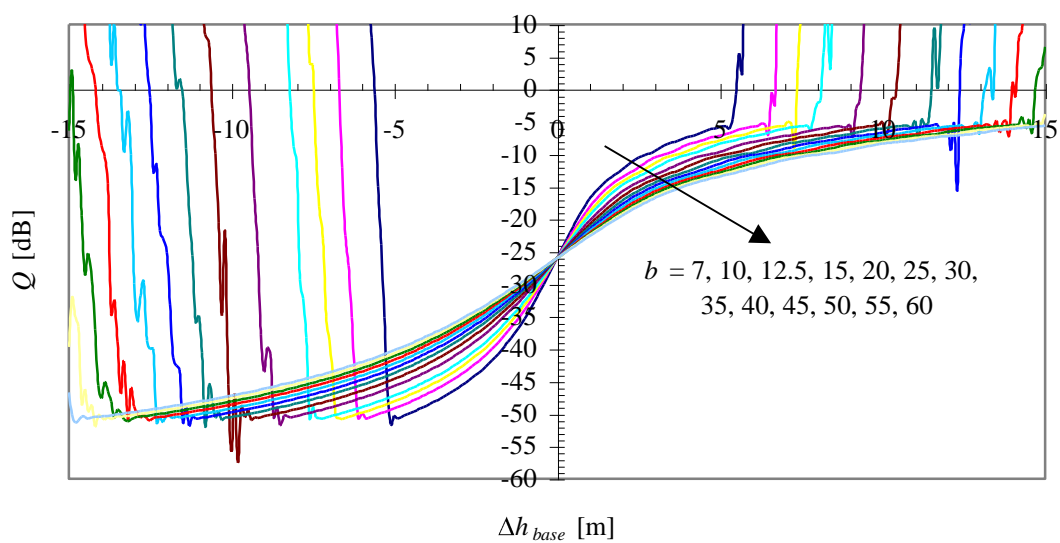


Fig. A.3 - Curvas de $Q(\Delta h_{base})$ obtidas para $N=20$ e b compreendido entre 7 e 60.

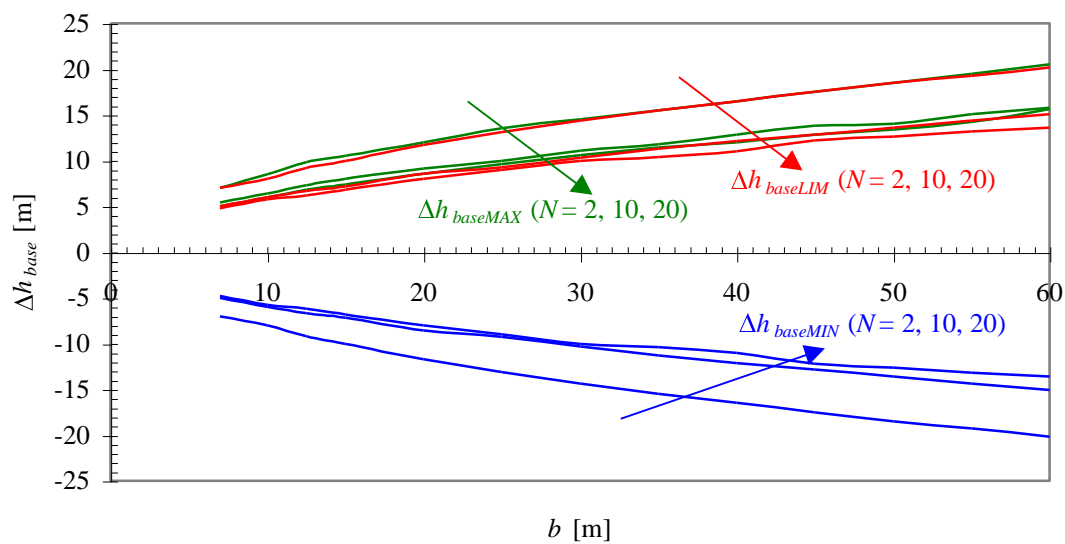


Fig. A.4 - Curvas de $\Delta h_{base}(b)$ obtidas para $N=2, 10$ e 20 .

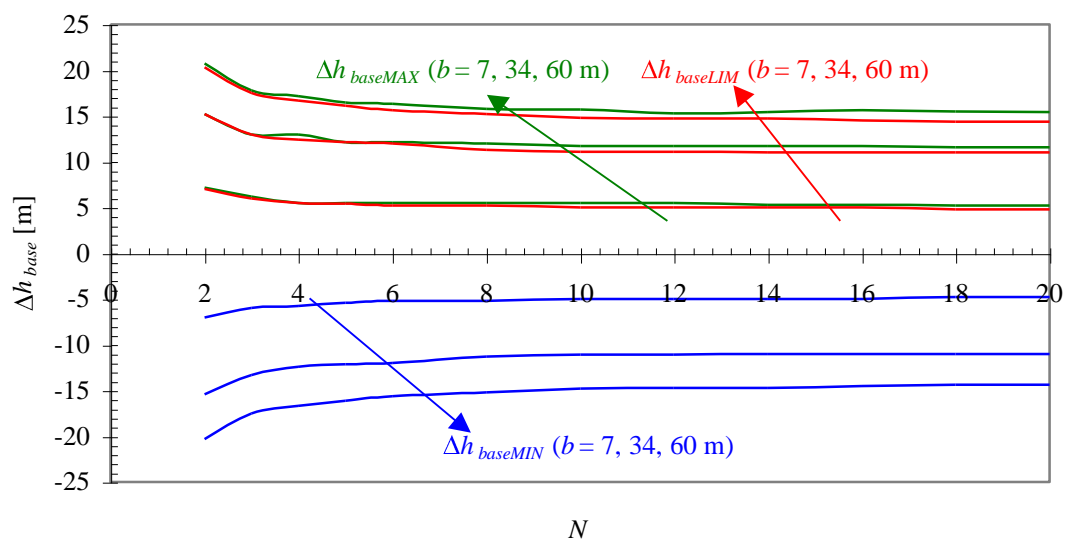


Fig. A.5 - Curvas de $\Delta h_{base}(N)$ obtidas para $b = 7, 34$ e 60 m .

ANEXO B

VARIAÇÃO DE ΔL_{int} , Δd_{int} e Δd_{ext} COM OS
PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Neste anexo estão representadas as curvas que ilustram a variação de ΔL_{int} , Δd_{int} e Δd_{ext} que caracterizam a forma de L_{cruz} , com os parâmetros geométricos φ_c , d_c , w_c e Δh_{base} .

Nas expressões apresentadas, as atenuações são expressas em dB, as distâncias em metros e os ângulos em graus.

PARÂMETRO ΔL_{int}

- Variação com a distância (d_c):

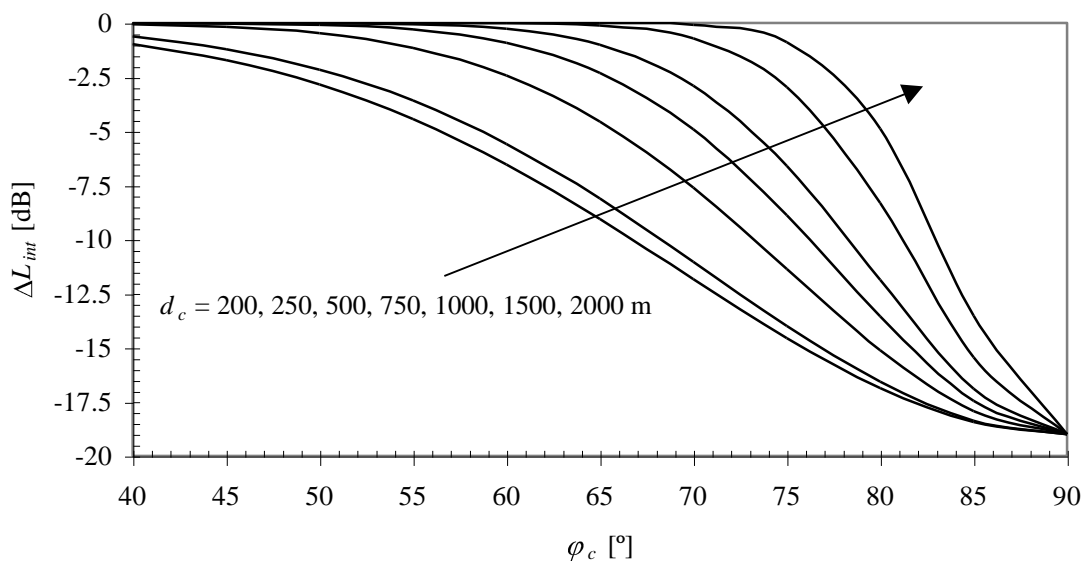


Fig. B.1 - Curvas de $\Delta L_{int}(\varphi_c)$, parametrizadas em d_c .

$$\Delta L_{int}(\varphi_c, d_c) = -A_{Li} \exp \left[-\left(\frac{\varphi_c - 90}{2} \right)^2 / \sigma_{Li}(d_c)^2 \right] \quad (B.1)$$

$$A_{Li} = 19 \text{ dB} \quad (B.2)$$

$$\sigma_{Li}(d_c) = 51.94 - 10.27 d_c^{0.25} + 0.51 d_c^{0.5} \quad (B.3)$$

- Variação com a largura das ruas (w_c):

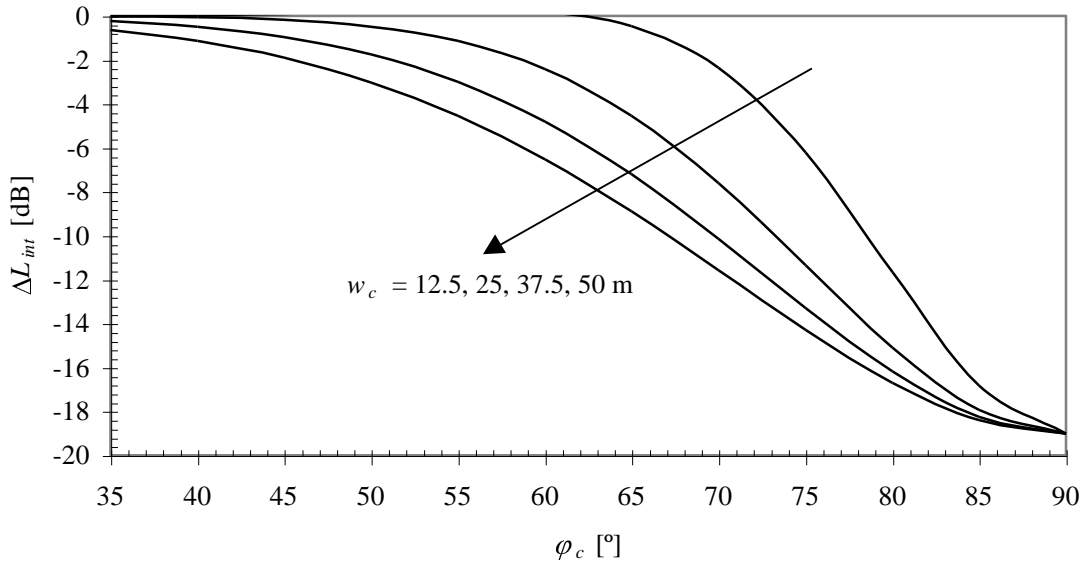


Fig. B.2 - Curvas de $\Delta L_{int}(\varphi_c)$, parametrizadas em w_c .

$$\Delta L_{int}(\varphi_c, w_c) = -A_{Li} \exp \left[-\frac{(\varphi_c - 90)^2}{2 \sigma_{Li}(w_c)^2} \right] \quad (B.4)$$

$$A_{Li} = 19 \text{ dB} \quad (B.5)$$

$$\sigma_{Li}(w_c) = -19.51 + 17.33 w_c^{0.25} - 0.76 w_c^{0.5} \quad (B.6)$$

- Variação com a altura efectiva da estação de base (Δh_{base}):

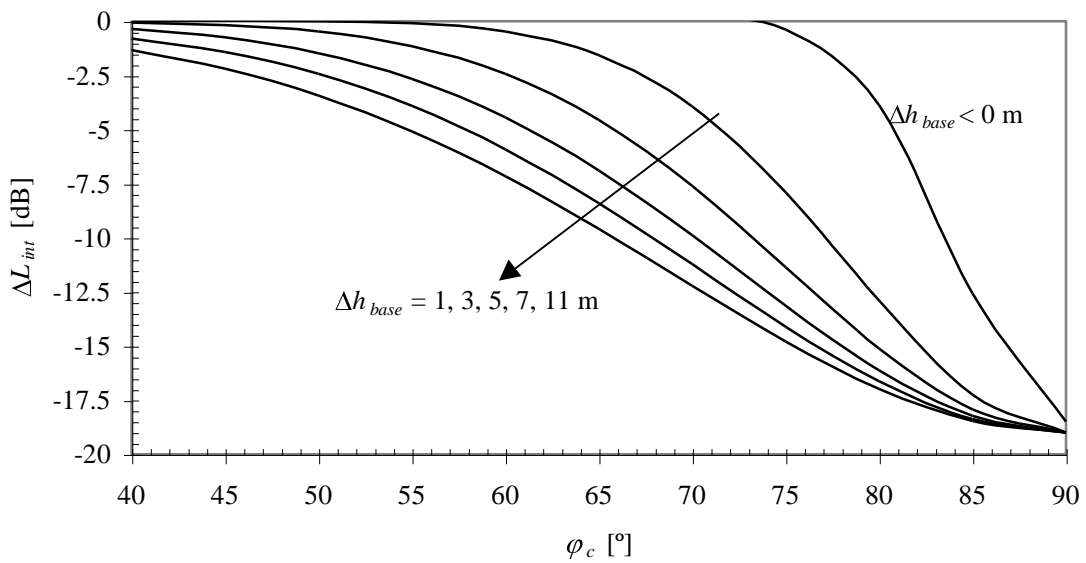


Fig. B.3 - Curvas de $\Delta L_{int}(\varphi_c)$, parametrizadas em Δh_{base} .

$$\Delta L_{int}(\varphi_c, \Delta h_{base}) = -A_{Li}(\Delta h_{base}) \exp \left[-\frac{(\varphi_c - 90)^2}{2 \sigma_{Li}(\Delta h_{base})^2} \right] \quad (B.7)$$

$$A_{Li}(\Delta h_{base}) = \begin{cases} 18.5, & \Delta h_{base} \leq 0 \\ 19, & \Delta h_{base} \geq 1 \end{cases} \quad (B.8)$$

$$\sigma_{Li}(\Delta h_{base}) = \begin{cases} 5.7, & \Delta h_{base} \leq 0 \\ 9.43 + 2.14\Delta h_{base} - 0.093\Delta h_{base}^2, & \Delta h_{base} \geq 1 \end{cases} \quad (B.9)$$

PARÂMETRO Δd_{int}

- Variação com a distância (d_c):

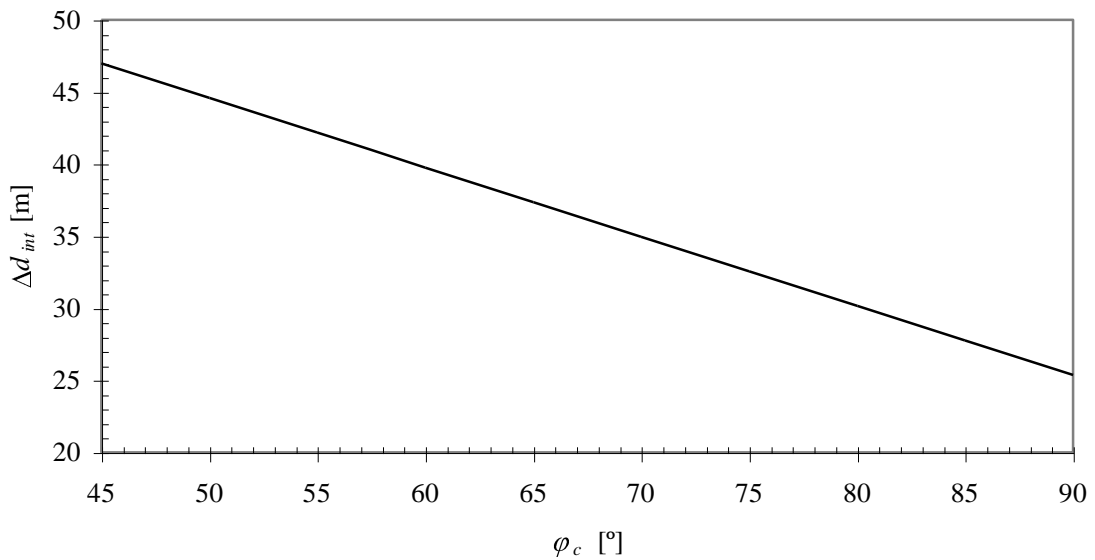


Fig. B.4 - Curva de $\Delta d_{int}(\varphi_c)$.

$$\Delta d_{int}(\varphi_c, d_c) = \Delta d_{int}(\varphi_c) = -0.48 \varphi_c + 68.57 \quad (B.10)$$

- Variação com a largura das ruas (w_c):

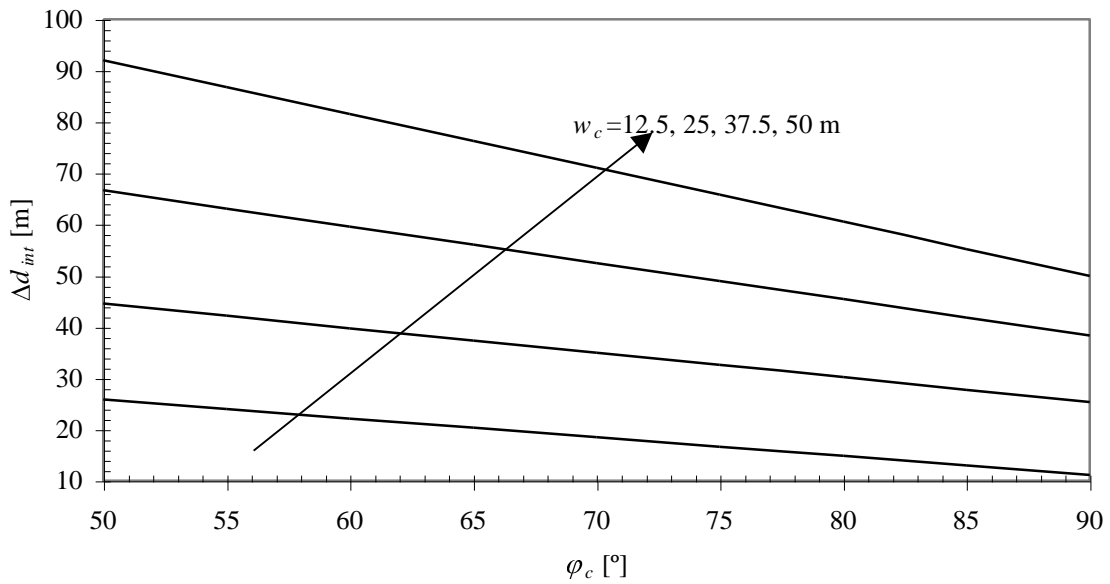


Fig. B.5 - Curvas de $\Delta d_{int}(\varphi_c)$, parametrizadas em w_c .

$$\Delta d_{int}(\varphi_c, w_c) = a(w_c) \varphi_c + b(w_c) \quad (\text{B.11})$$

$$a(w_c) \text{ [m}^\circ\text{]} = -0.38 + 4.43 \cdot 10^{-3} w_c - 3.80 \cdot 10^{-4} w_c^2 \quad (\text{B.12})$$

$$b(w_c) \text{ [m]} = 29.73 + 0.91 w_c + 0.03 w_c^2 \quad (\text{B.13})$$

- Variação com a altura efectiva da estação de base (Δh_{base}):

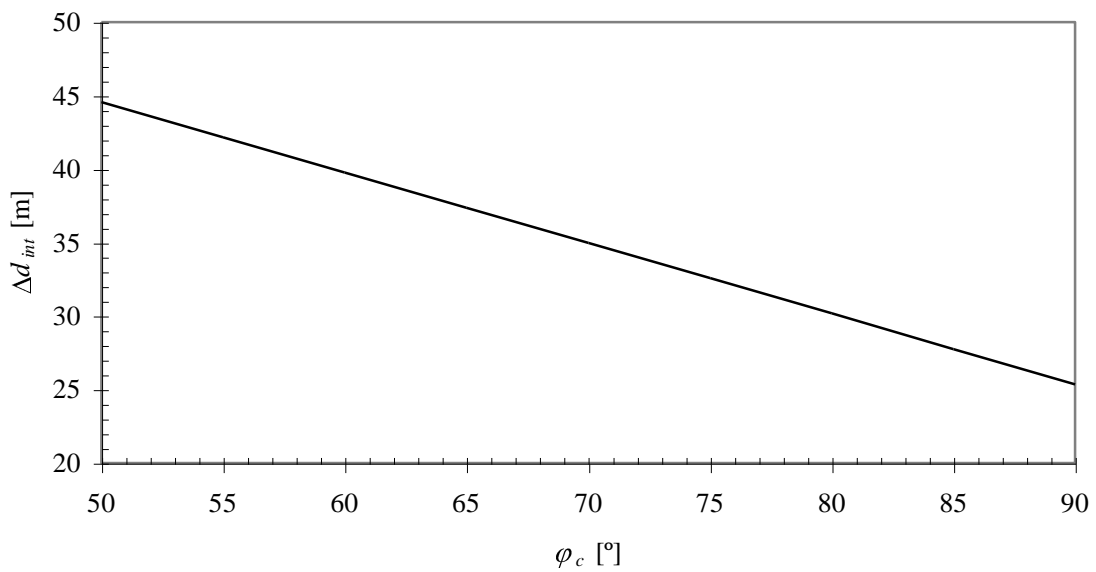


Fig. B.6 - Curva de $\Delta d_{int}(\varphi_c)$.

$$\Delta d_{int}(\varphi_c, \Delta h_{base}) = \Delta d_{int}(\varphi_c) = -0.48 \varphi_c + 68.57 \quad (\text{B.14})$$

PARÂMETRO Δd_{ext}

- Variação com a distância (d_c):

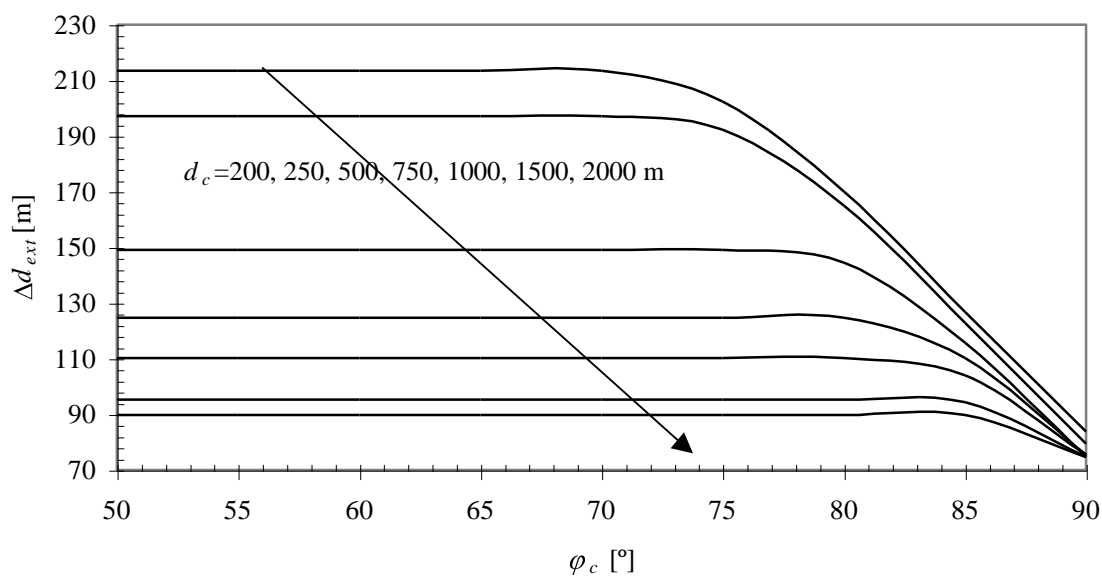


Fig. B.7 - Curvas de $\Delta d_{ext}(\varphi_c)$, parametrizadas em d_c .

$$\Delta d_{ext}(\varphi_c, d_c) = \begin{cases} A_{de}(d_c) & , \varphi_c \leq \varphi_{de}(d_c) \\ A_{de}(d_c) \exp\left[-\frac{(\varphi_c - \varphi_{de}(d_c))^2}{2\sigma_{de}(d_c)^2}\right] & , \varphi_c > \varphi_{de}(d_c) \end{cases} \quad (\text{B.15})$$

$$A_{de}(d_c) [m] = 683.90 - 171.64 d_c^{0.25} + 12.38 d_c^{0.5} \quad (\text{B.16})$$

$$\varphi_{de}(d_c) [^\circ] = 21.97 + 17.28 d_c^{0.25} - 1.18 d_c^{0.5} \quad (\text{B.17})$$

$$\sigma_{de}(d_c) [^\circ] = 7.85 - 58591.8 d_c^{-2} + 1607.1 d_c^{-1} \quad (\text{B.18})$$

- Variação com a largura das ruas (w_c):

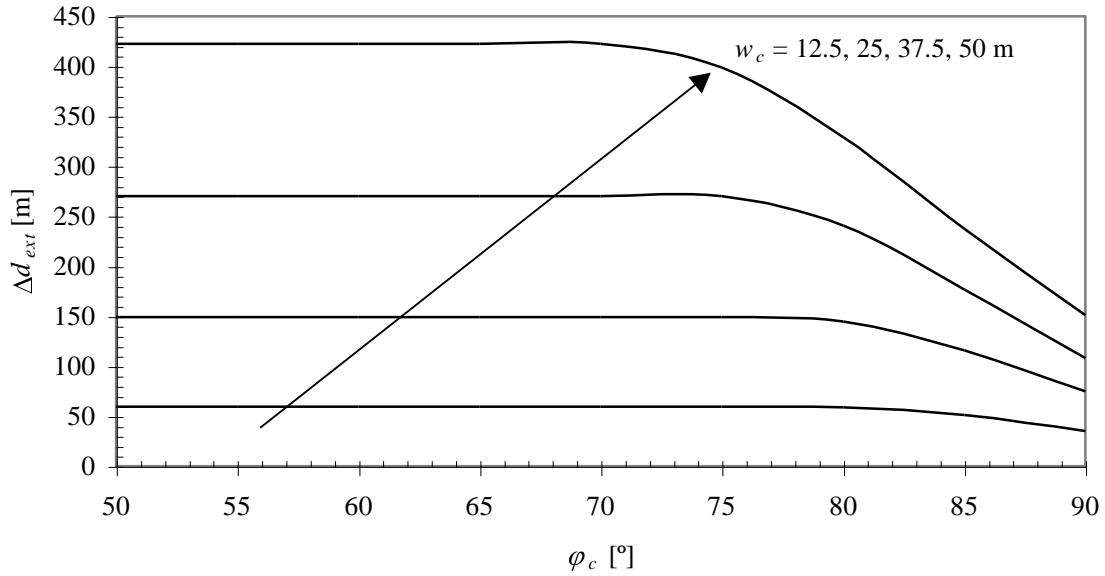


Fig. B.8 - Curvas de $\Delta d_{ext}(\varphi_c)$, parametrizadas em w_c .

$$\Delta d_{ext}(\varphi_c, w_c) = \begin{cases} A_{de}(w_c) & , \varphi_c \leq \varphi_{de}(w_c) \\ A_{de}(w_c) \exp \left[-\frac{(\varphi_c - \varphi_{de}(w_c))^2}{2\sigma_{de}(w_c)^2} \right] & , \varphi_c > \varphi_{de}(w_c) \end{cases} \quad (\text{B.19})$$

$$A_{de}(w_c) \text{ [m]} = 1.25 + 3.38 w_c + 0.10 w_c^2 \quad (\text{B.20})$$

$$\varphi_{de}(w_c) \text{ [°]} = 80.63 - 0.01 w_c - 0.004 w_c^2 \quad (\text{B.21})$$

$$\sigma_{de}(w_c) \text{ [°]} = 10.57 + 1.46 \cdot 10^{-3} w_c + 5.86 \cdot 10^{-7} w_c^4 \quad (\text{B.22})$$

- Variação com a altura efectiva da estação de base (Δh_{base}):

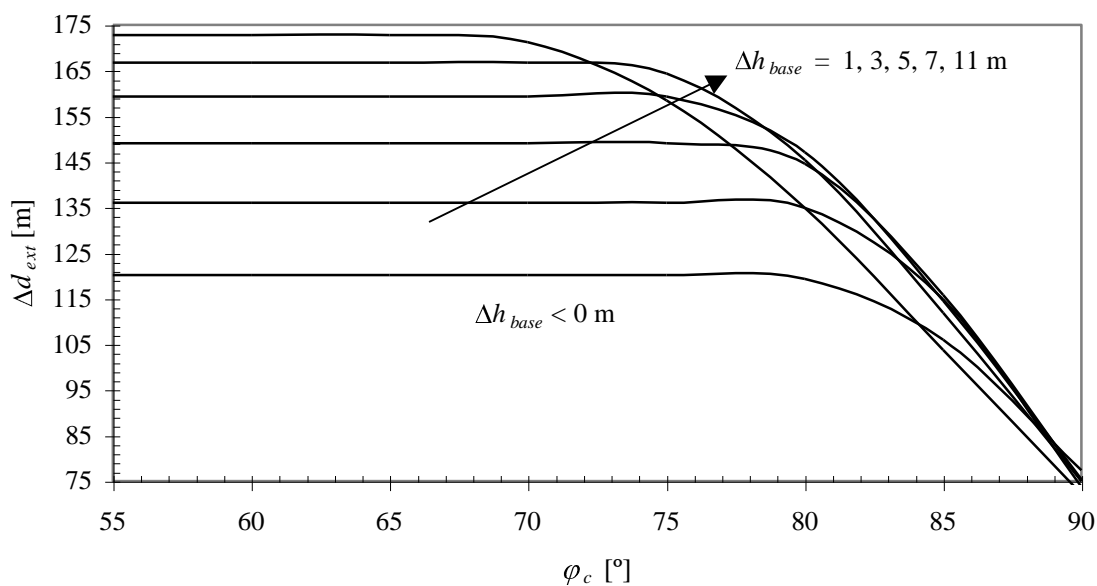


Fig. B.9 - Curvas de $\Delta d_{ext}(\varphi_c)$, parametrizadas em Δh_{base} .

$$\Delta d_{ext}(\varphi_c, \Delta h_{base}) = \begin{cases} A_{de}(\Delta h_{base}) & , \varphi_c \leq \varphi_{de}(\Delta h_{base}) \\ A_{de}(\Delta h_{base}) \exp \left[-\frac{(\varphi_c - \varphi_{de}(\Delta h_{base}))^2}{2\sigma_{de}(\Delta h_{base})^2} \right] & , \varphi_c > \varphi_{de}(\Delta h_{base}) \end{cases} \quad (B.23)$$

$$A_{de}(\Delta h_{base}) = \begin{cases} 120 & , \Delta h_{base} \leq 0 \\ 128.15 + 8.0\Delta h_{base} - 0.36\Delta h_{base}^2 & , \Delta h_{base} \geq 1 \end{cases} \quad (B.24)$$

$$\varphi_{de}(\Delta h_{base}) = \begin{cases} 80 & , \Delta h_{base} \leq 0 \\ 81.25 - 1.25\Delta h_{base} & , \Delta h_{base} \geq 1 \end{cases} \quad (B.25)$$

$$\sigma_{de}(\Delta h_{base}) = \begin{cases} 12 & , \Delta h_{base} \leq 0 \\ 9.0 + 0.82\Delta h_{base} & , \Delta h_{base} \geq 1 \end{cases} \quad (B.26)$$

EXPRESSÕES FINAIS

Admitindo que os parâmetros geométricos φ_c , d_c , w_c e Δh_{base} são independentes entre si e conhecidas as variações de ΔL_{int} , Δd_{int} e Δd_{ext} com cada um desses parâmetros, as expressões finais das grandezas em função de φ_c e parametrizadas em φ_c , d_c , w_c e Δh_{base} , são dadas por:

$$f(\varphi_c, d_c, w_c, \Delta h_{base}) = f_{d_c}(\varphi_c, d_{c0}, w_{c0}, \Delta h_{base0}) + \Delta f_{d_c}(\varphi_c, d_c) + \Delta f_{w_c}(\varphi_c, w_c) + \Delta f_{\Delta h_{base}}(\varphi_c, \Delta h_{base}) \quad (\text{B.27})$$

para ΔL_{int} e

$$f(\varphi_c, d_c, w_c, \Delta h_{base}) = f_{d_c}(\varphi_c, d_{c0}, w_{c0}, \Delta h_{base0}) \cdot \prod f_{d_c}(\varphi_c, d_c) \cdot \prod f_{w_c}(\varphi_c, w_c) \cdot \prod f_{\Delta h_{base}}(\varphi_c, \Delta h_{base}) \quad (\text{B.28})$$

para Δd_{int} e Δd_{ext} , em que:

$$\Delta f_m(\varphi_c, m) = f_m(\varphi_c, m) - f_m(\varphi_c, m_0) \quad (\text{B.29})$$

$$\prod f_m(\varphi_c, m) = f_m(\varphi_c, m) / f_m(\varphi_c, m_0) \quad (\text{B.30})$$

onde $d_{c0}=500$ m, $w_{c0}=25$ m e $\Delta h_{base0}=3$ m são os valores para a situação padrão, e f_{d_c} , f_{w_c} e $f_{\Delta h_{base}}$ traduzem a variação com cada um dos parâmetros separadamente, fixando os restantes no valor padrão. Estas expressões foram obtidas para os seguintes intervalos de validade: $200 \leq d_c \leq 2000$ m, $12.5 \leq w_c \leq 50$ m e $-7 \leq \Delta h_{base} \leq 11$ m.

ANEXO C

VARIAÇÃO DE L_{cruz} COM OS
PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

São apresentados neste anexo gráficos com a variação de L_{cruz} com os parâmetros geométricos φ_c , d_c , w_c e Δh_{base} .

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE φ_c NO ANDAMENTO DE $L_{cruz}(d_{via})$

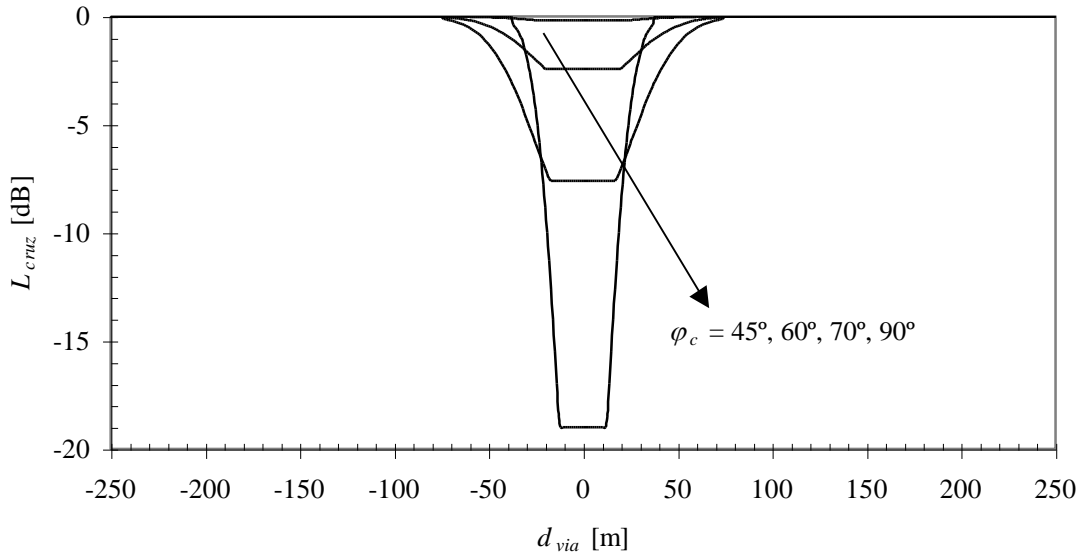


Fig. C.1 - Curvas de $L_{cruz}(d_{via})$ parametrizadas em φ_c , para $d_c=500$ m, $w_c=25$ m e $\Delta h_{base}=3$ m.

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE d_c NO ANDAMENTO DE $L_{cruz}(d_{via})$

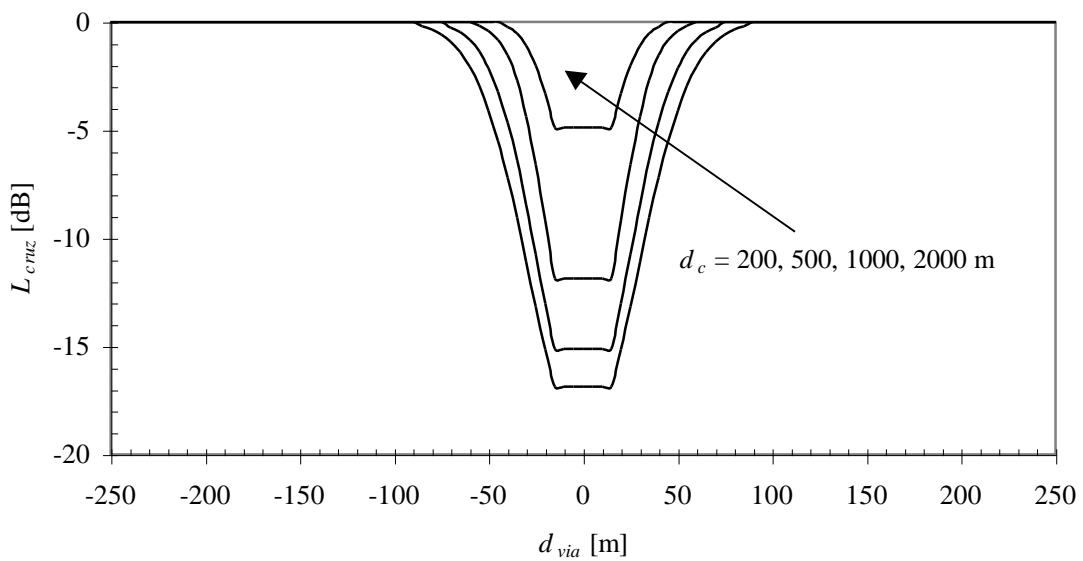


Fig. C.2 - Curvas de $L_{cruz}(d_{via})$ parametrizadas em d_c , para $\varphi_c=80^\circ$, $w_c=25$ m e $\Delta h_{base}=3$ m.

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE w_c NO ANDAMENTO DE $L_{cruz}(d_{via})$

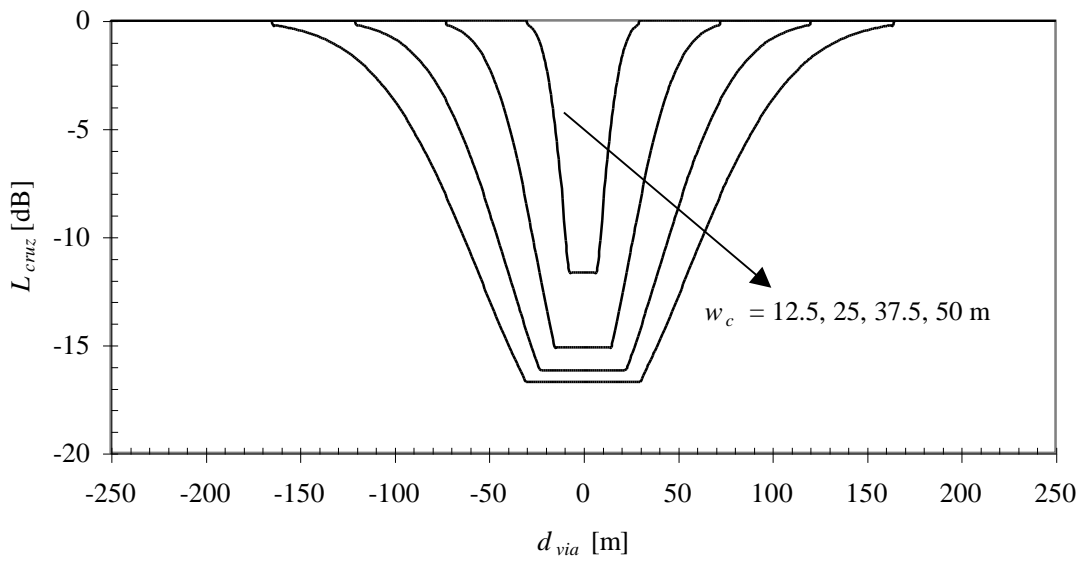


Fig. C.3 - Curvas de $L_{cruz}(d_{via})$ parametrizadas em w_c , para $\varphi_c=80^\circ$, $d_c=500$ m e $\Delta h_{base}=3$ m.

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE Δh_{base} NO ANDAMENTO DE $L_{cruz}(d_{via})$

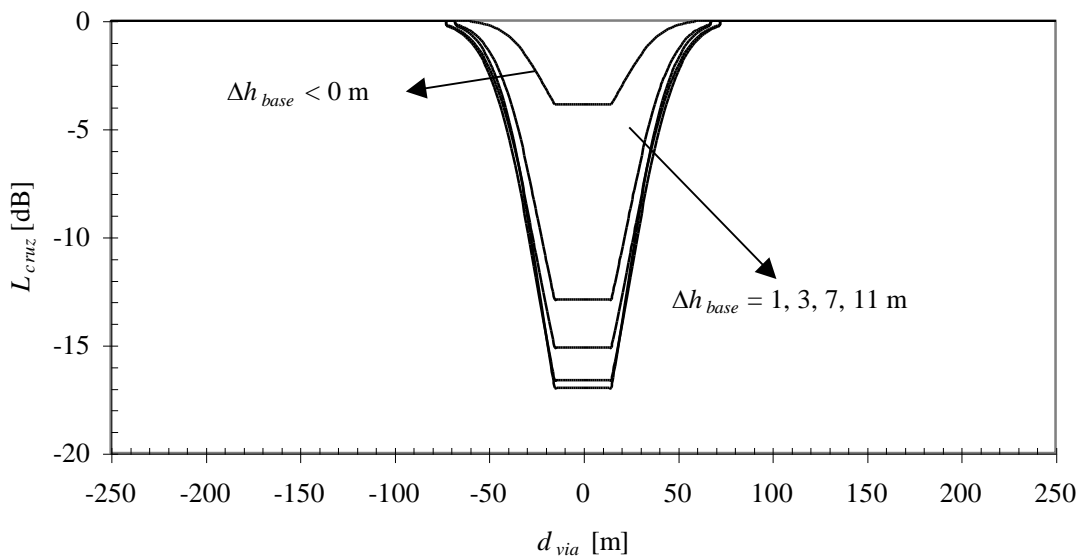


Fig. C.4 - Curvas de $L_{cruz}(d_{via})$ parametrizadas em Δh_{base} , para $\varphi_c=80^\circ$, $d_c=500$ m e $w_c=25$ m.

ANEXO D

CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES DE BASE

Neste anexo é apresentada a informação fornecida pelo operador Telecel referente às estações de base medidas.

ZONA DAS AVENIDAS NOVAS

Tab. D.1 - Características das EBs analisadas para a zona das Avenidas Novas.

Estação de Base	Latitude	Longitude	Cota [m]	Antena	Altura [m]	G _{máx} [dBi]	Azimute [°]	Down-Tilt [°]	ERP [W]
Republ_B	38° 44' 21'' N	9° 8' 34'' W	83.7	SH1309.41.00041	27	10.7	230	0	17.70
PcaEsp_B	38° 44' 08'' N	9° 9' 29'' W	81.7	AP906513	20	12.8	120	7	23.44
S_Seb_B	38° 44' 09'' N	9° 8' 56'' W	80.0	AP906513	36	12.8	120	10	36.14
Tecnic_C	38° 44' 11'' N	9° 8' 18'' W	80.3	SH1309.41.00041	25	10.7	240	0	37.84

ZONA DOS SAPADORES

Tab. D.2 - Características das EBs analisadas para a zona dos Sapadores.

Estação de Base	Latitude	Longitude	Cota [m]	Antena	Altura [m]	G _{máx} [dBi]	Azimute [°]	Down-Tilt [°]	ERP [W]
Graca_A	38° 43' 05'' N	9° 7' 42'' W	80.0	LPD7907/4-N	18	13.0	10	12	24.40
Xabreg_C	38° 43' 25'' N	9° 6' 55'' W	35.0	K730368	29	15.7	270	0	25.12
Apolon_A	38° 42' 55'' N	9° 7' 17'' W	5.0	K728590	26	14.2	10	8	25.94

Nota: Na designação das estações de base as letras A,B,C referem-se aos sectores orientados a Norte, Sudeste e Sudoeste, equiespaçados de 120°.

ANEXO E

DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO DAS ANTENAS DAS ESTAÇÕES DE BASE

CELWAVE – AP906513

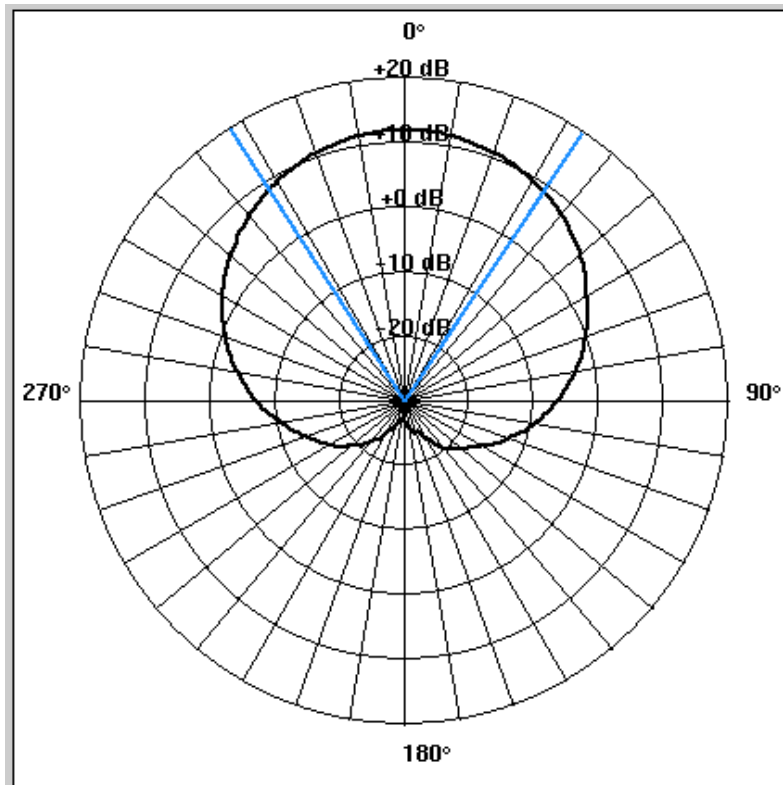


Fig. E.1 - Diagrama de radiação horizontal.

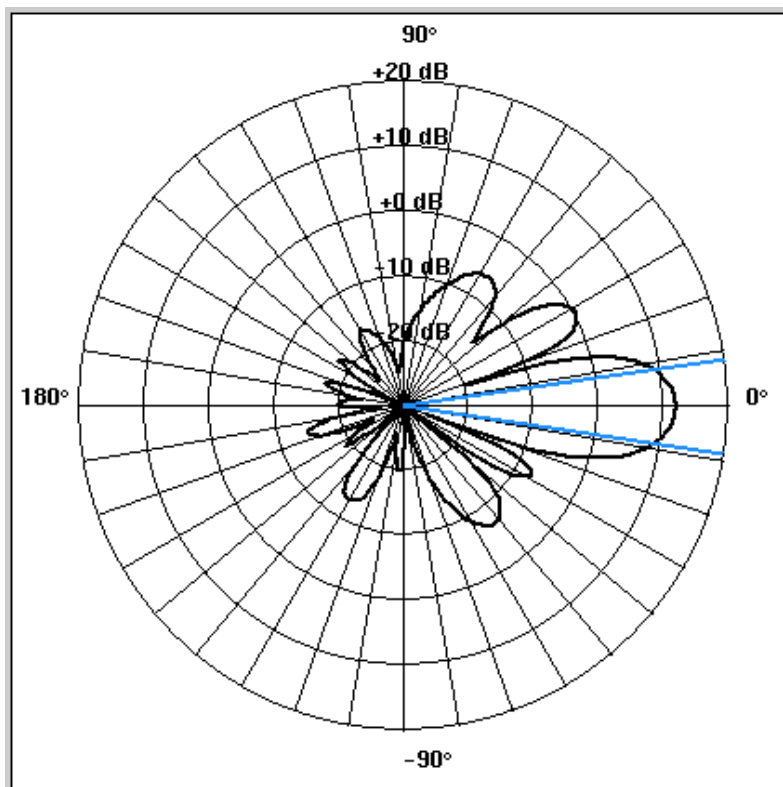


Fig. E.2 - Diagrama de radiação vertical.

SUHNER – SH1309.41.00041

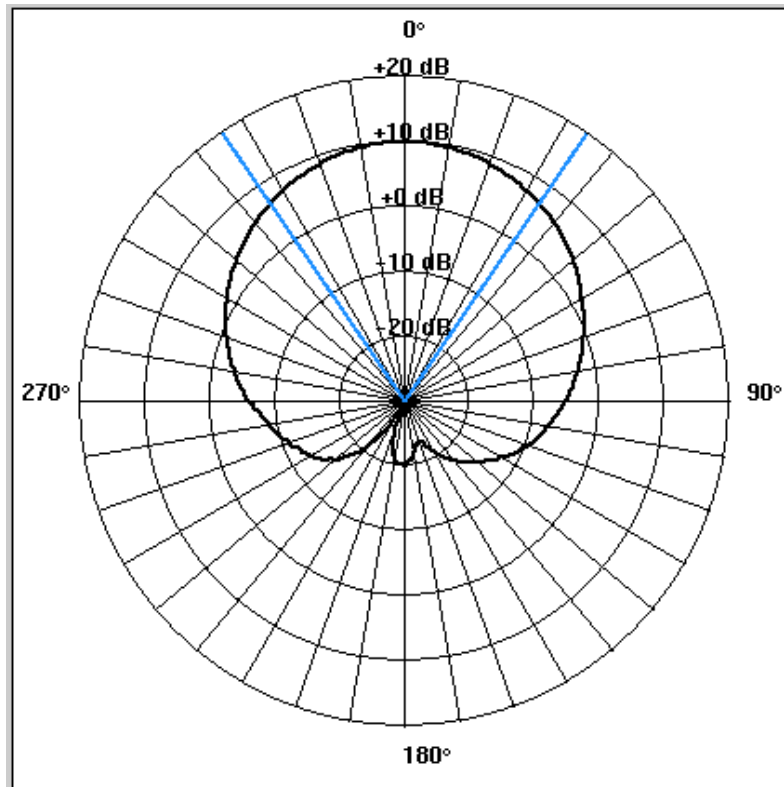


Fig. E.3 - Diagrama de radiação horizontal.

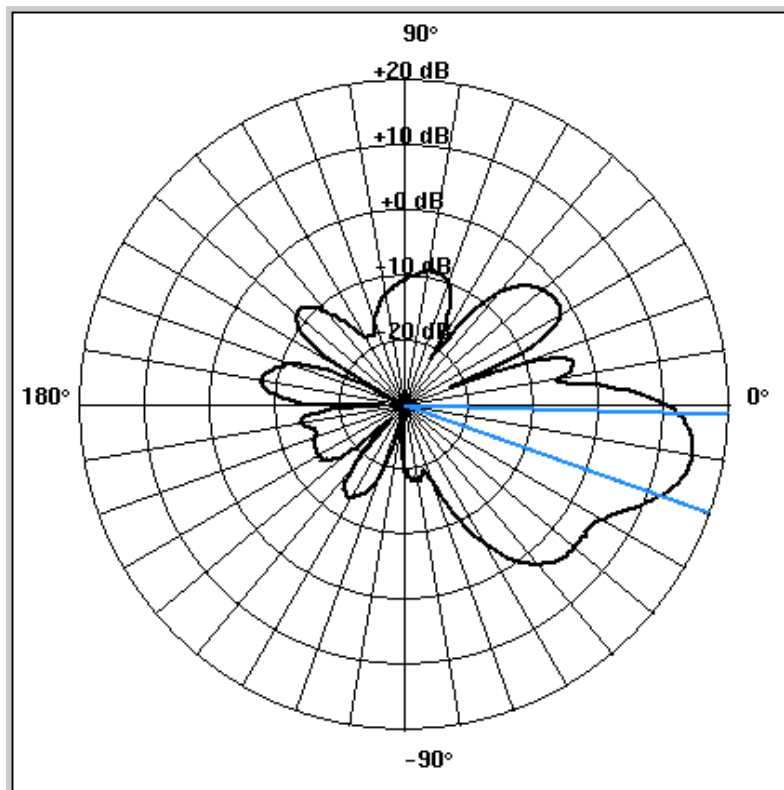


Fig. E.4 - Diagrama de radiação vertical.

ANTEL/SWEDCOM – LPD 7907/4-N

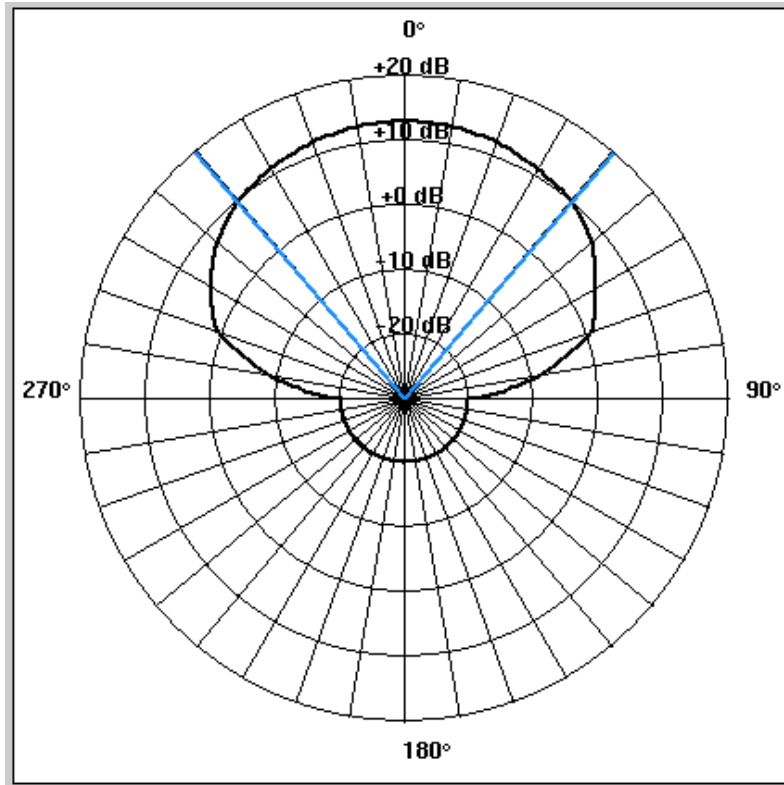


Fig. E.5 - Diagrama de radiação horizontal.

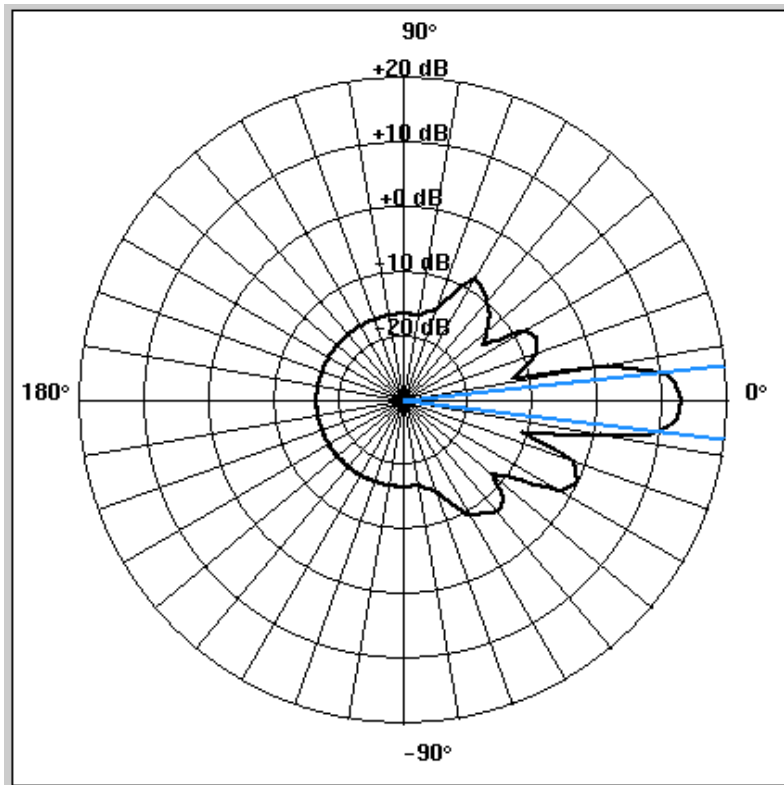


Fig. E.6 - Diagrama de radiação vertical.

KATHREIN – K730368

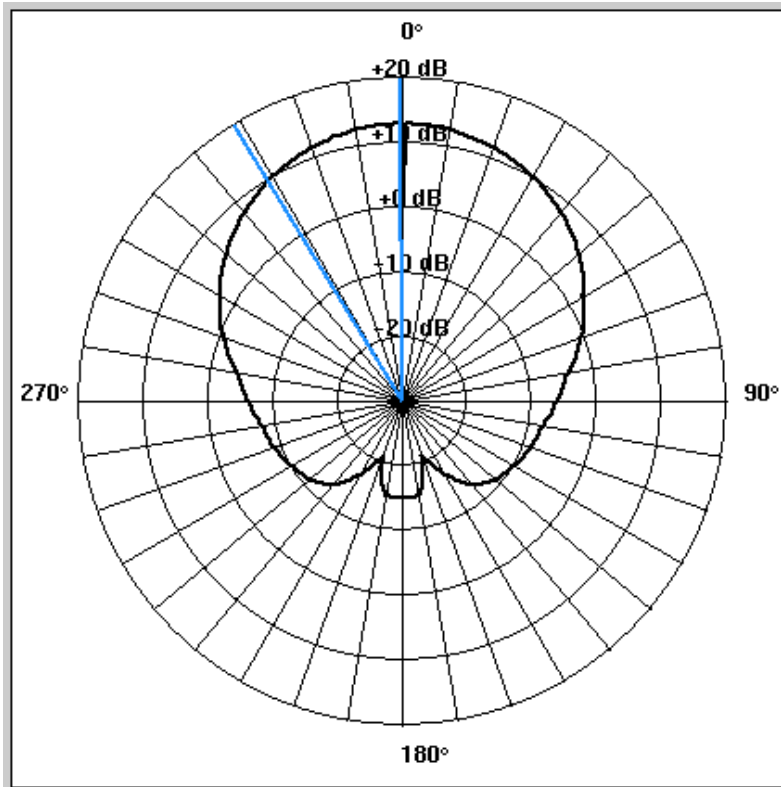


Fig. E.7 - Diagrama de radiação horizontal.

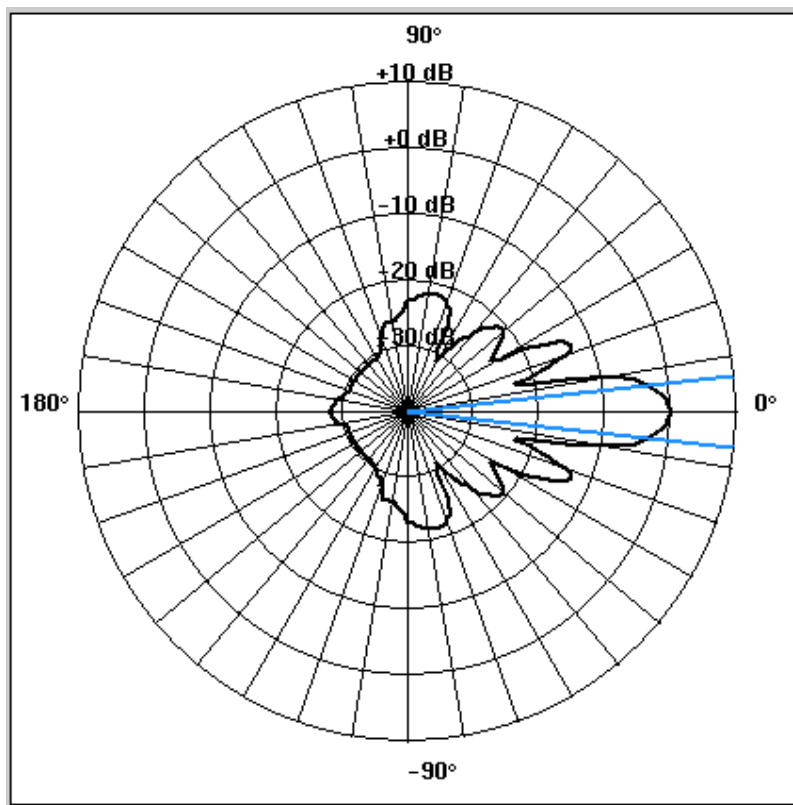


Fig. E.8 - Diagrama de radiação vertical.

KATHREIN – K728590

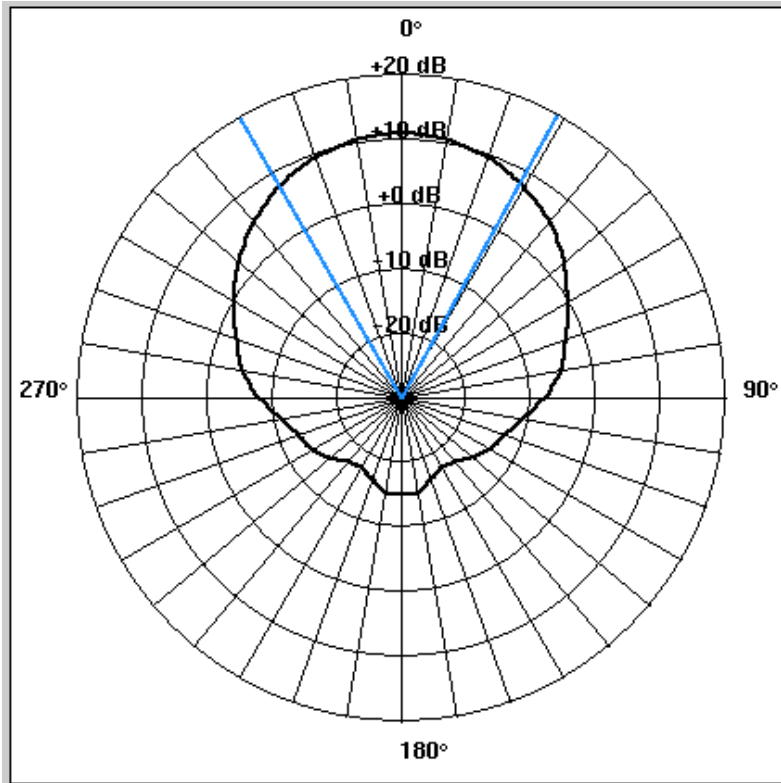


Fig. E.9 - Diagrama de radiação horizontal.

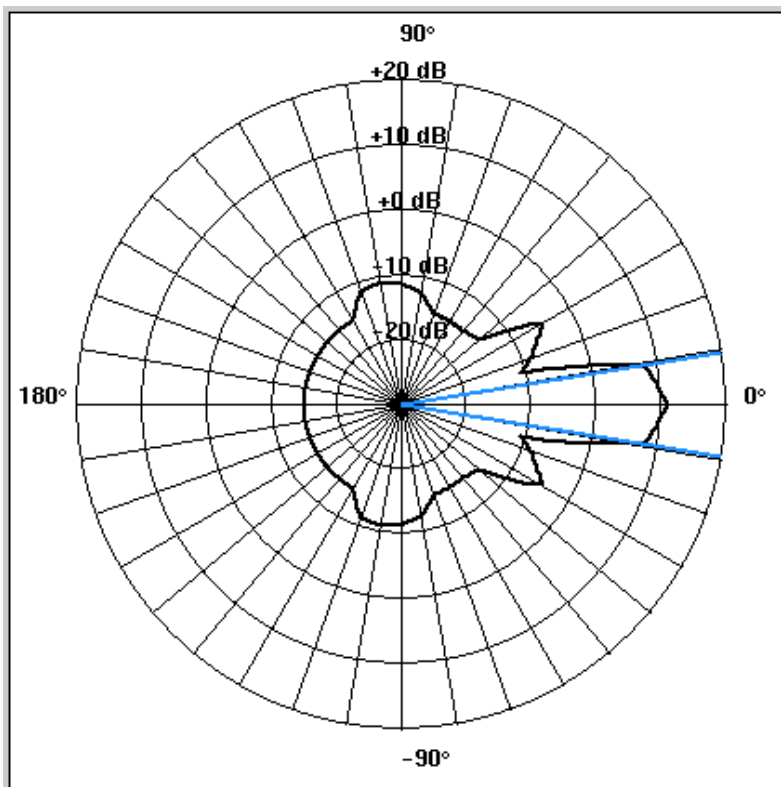


Fig. E.10 - Diagrama de radiação vertical.

ANEXO F

MAPAS DAS ZONAS MEDIDAS

Neste anexo encontram-se assinaladas no mapa das zonas medidas (Avenidas Novas e Sapadores) as EBs analisadas, as ruas medidas, o início e fim do troço percorrido, assim como o sentido em que foram feitas as medidas.

LEGENDA:

RUAS MEDIDAS

ZONA DAS AVENIDAS NOVAS

A	Av. João Crisóstomo
B	Av. Duque D'Ávila

ZONA DOS SAPADORES

C	Rua Afonso Domingues
D	Rua Diogo do Couto
E	Rua do Mato Grosso
F	Rua Fernão de Magalhães

ESTAÇÕES DE BASE ANALISADAS

ZONA DAS AVENIDAS NOVAS

1	Republ_B
2	PcaEsp_B
3	S_Seb_B
4	Tecnic_C

ZONA DOS SAPADORES

4	Graca_A
5	Xabreg_C
6	Apolon_A

→ Sentido em que a via foi percorrida
Delimitador do início e fim da medida

ANEXO G

FOTOGRAFIAS



(a)



(b)

Fig. G.1 - Equipamento de medida (a) com o carrinho de medidas (b).



(a)

Fig. G.2 - Av. João Crisóstomo: (a) Cruzamento ; (b) Edifício típico.



(b)



(a)



(b)

Fig. G.3 - Av. Duque D'Ávila: (a) Vista de um cruzamento; (b) Vista da avenida e vegetação.



(a)

Fig. G.4 - Rua Afonso Domingues: Duas vistas da rua (a) e (b).



(b)



(a)



(b)

Fig. G.5 - Rua Diogo do Couto: (a) Vista da rua; (b) Vista de um cruzamento.



(a)



(b)

Fig. G.6 - (a) Rua do Mato Grosso; (b) Rua Fernão de Magalhães.

Fig. G.7 - Os autores do trabalho.

AVENIDA JOÃO CRISÓSTOMO

EB – Republ_B

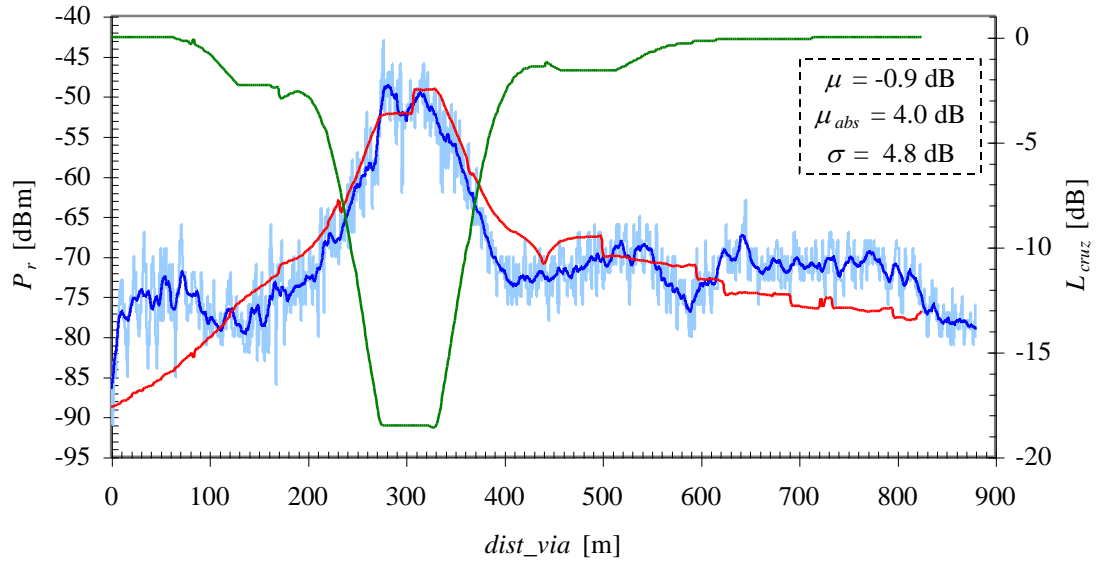


Fig. H.1 - Potência recebida para a Av. João Crisóstomo, EB Republ_B.

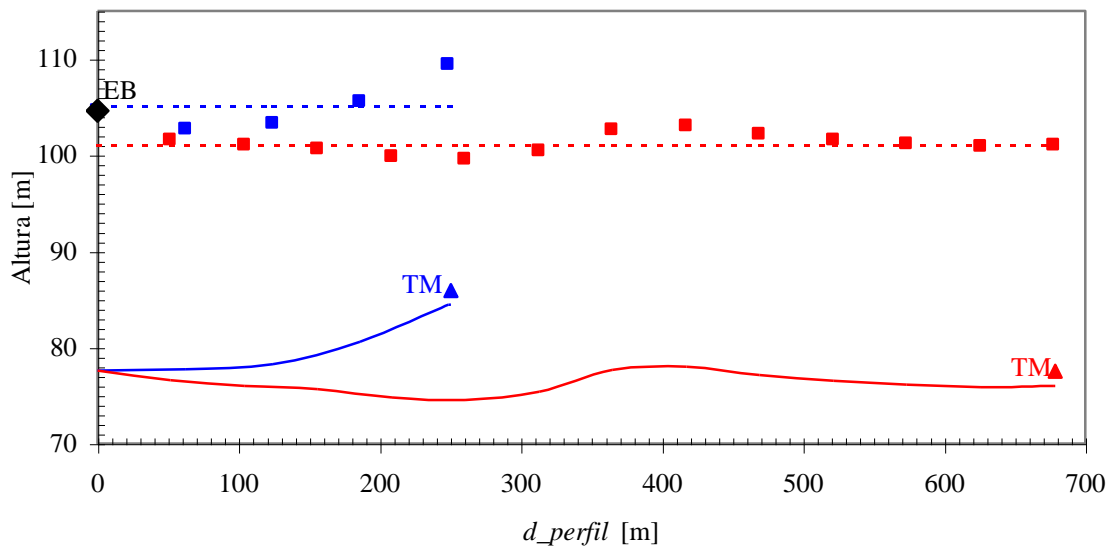


Fig. H.2 - Perfil entre a EB Republ_B e o TM nos pontos extremos da Av. João Crisóstomo.

Tab. H.1 - Parâmetros associados à Av. João Crisóstomo, EB Republ_B.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	112 220	197 040
Fim da Via	111 400	196 950
<i>dist_via</i> Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 825	2	413
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
<i>W</i> [m]		20.0
<i>d_{UE-TM}</i> [m]		10.0
φ [°]	15.4 – 89.9	42.4
<i>b</i> [m]	20.0 – 30.0	25.6
<i>N</i>	1 – 7	3
<i>G_{EB}</i> [dBi]	-7.0 – 10.3	6.7

Tab. H.2 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a Av. João Crisóstomo, EB Republ_B.

<i>dist_via</i> [m]	<i>d_c</i> [m]	<i>w_c</i> [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
140 – 165	240	25	54	1
275 – 330	200	55	84	2
470 – 500	230	30	45	3
605 – 645	400	40	29	3

AVENIDA JOÃO CRISÓSTOMO

EB – PcaEsp_B

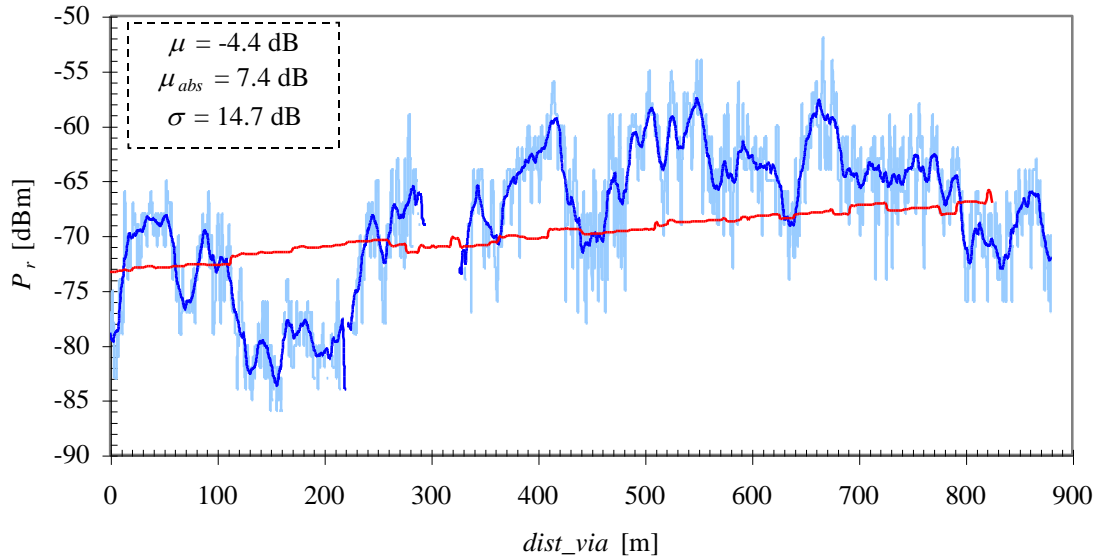


Fig. H.3 - Potência recebida para a Av. João Crisóstomo, EB PcaEsp_B.

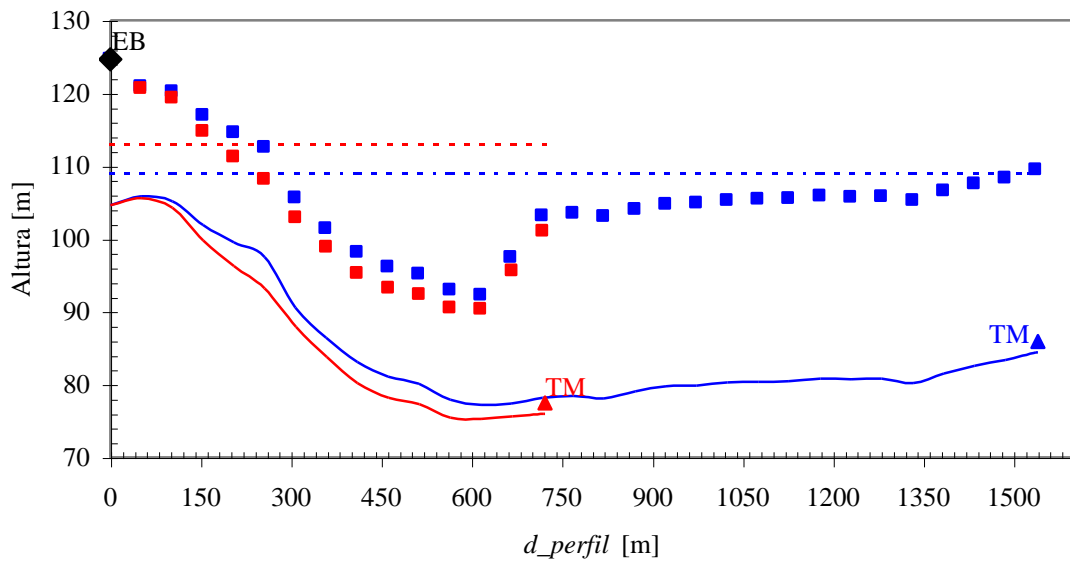


Fig. H.4 - Perfil entre a EB PcaEsp_B e o TM nos pontos extremos da Av. João Crisóstomo.

Tab. H.3 - Parâmetros associados à Av. João Crisóstomo, PcaEsp_B.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	112 220	197 040
Fim da Via	111 400	196 950
<i>dist_via</i> Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 825	2	413
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
<i>W</i> [m]		20.0
<i>d_{UE-TM}</i> [m]		10.0
φ [°]	4.6 – 9.9	6.6
<i>b</i> [m]	20.0 – 30.0	24.0
<i>N</i>	7 – 13	9
<i>G_{EB}</i> [dBi]	8.4 – 8.8	8.7

Tab. H.4 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a Av. João Crisóstomo, EB PcaEsp_B.

<i>dist_via</i> [m]	<i>d_c</i> [m]	<i>w_c</i> [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
140 – 165	1430	25	5	17
275 – 330	1280	55	7	17
470 – 500	1100	30	9	16
605 – 645	960	40	10	16

AVENIDA DUQUE D'ÁVILA

EB – Republ_B

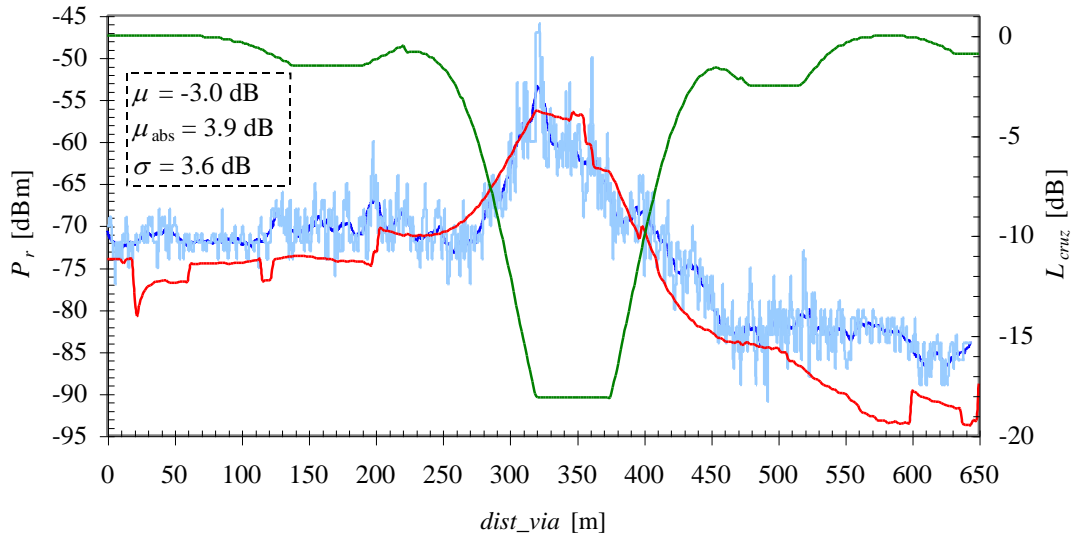


Fig. H.5 - Potência recebida para a Av. Duque D'Ávila, EB Republ_B.

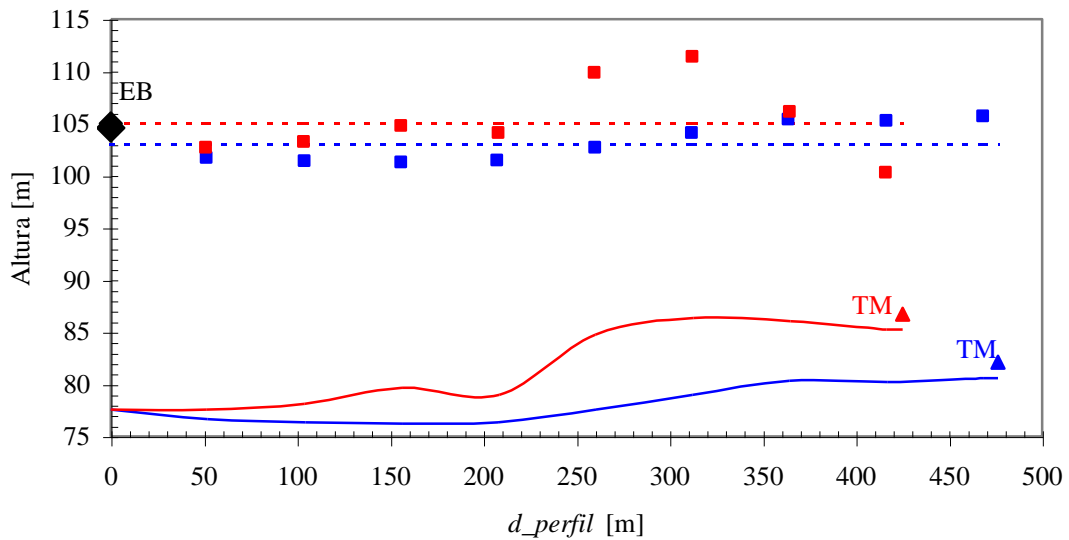


Fig. H.6 - Perfil entre a EB Republ_B e o TM nos pontos extremos da Av. Duque D'Ávila.

Tab. H.5 - Parâmetros associados à Av. Duque D'Ávila, EB Republ_B.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	111 670	196 900
Fim da Via	112 320	196 901
<i>dist_via</i> Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 650	2	326
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
<i>W</i> [m]		25.0
<i>d_{UE-TM}</i> [m]		12.5
φ [°]	39.7 – 89.9	63.0
<i>b</i> [m]	20.0 – 33.0	24.4
<i>N</i>	2 – 4	3
<i>G_{EB}</i> [dBi]	-5.2 – 10.3	4.4

Tab. H.6 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a Av. Duque D'Ávila,
EB Republ_B.

<i>dist_via</i> [m]	<i>d_c</i> [m]	<i>w_c</i> [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
130 – 160	330	30	51	1
300 – 355	250	55	85	1
465 – 490	280	25	60	0
620 – 645	370	25	55	0

AVENIDA DUQUE D'ÁVILA

EB – PcaEsp_B

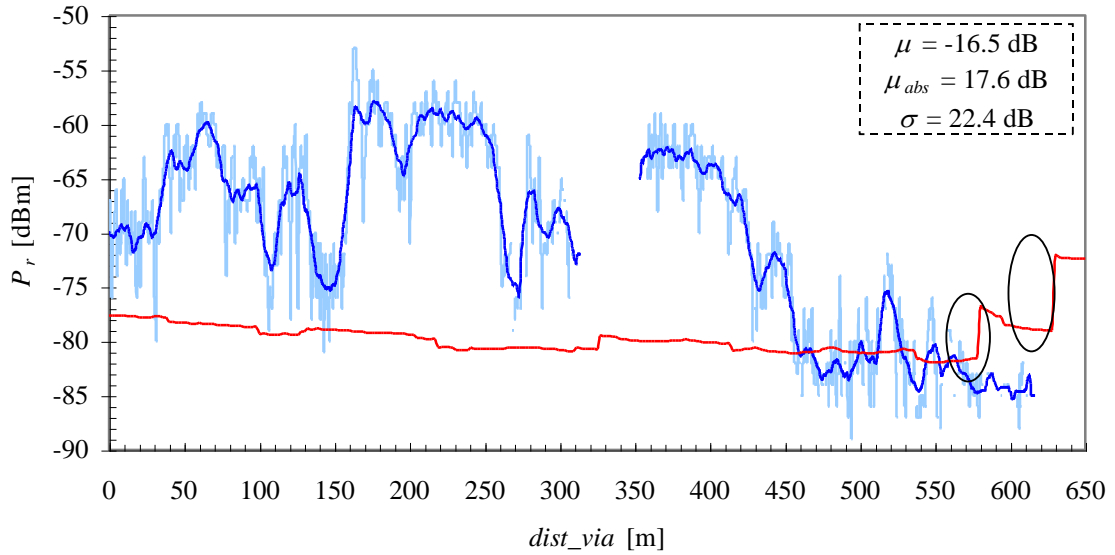


Fig. H.7 - Potência recebida para a Av. Duque D'Ávila, EB PcaEsp_B.

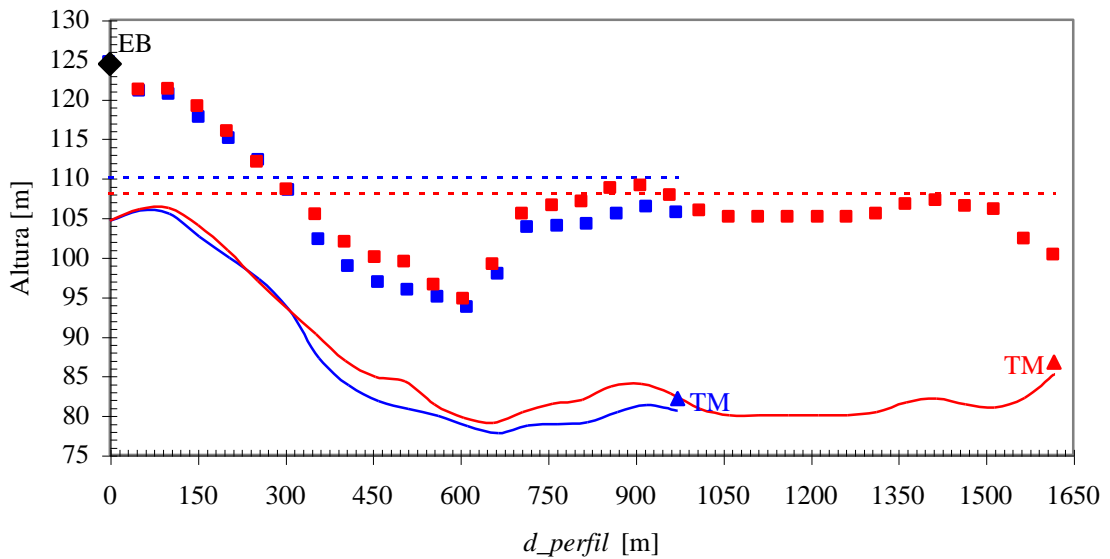


Fig. H.8 - Perfil entre a EB PcaEsp_B e o TM nos pontos extremos da Av. Duque D'Ávila.

Tab. H.7 - Parâmetros associados à Av. Duque D'Ávila, PcaEsp_B.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	111 670	196 900
Fim da Via	112 320	196 901
<i>dist_via</i> Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 650	2	326
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		25.0
d_{UE-TM} [m]		12.5
φ [°]	5.3 – 8.8	6.7
b [m]	22.0 – 32.0	27.4
N	8 – 14	9
G_{EB} [dBi]	9.2 – 9.5	9.4

Tab. H.8 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a Av. Duque D'Ávila, EB PcaEsp_B.

<i>dist_via</i> [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
130 – 160	1100	30	5	15
300 – 355	1230	55	3	15
465 – 490	1440	25	2	16
620 – 645	1590	25	1	17

AVENIDA DUQUE D'ÁVILA

EB – S_Seb_B

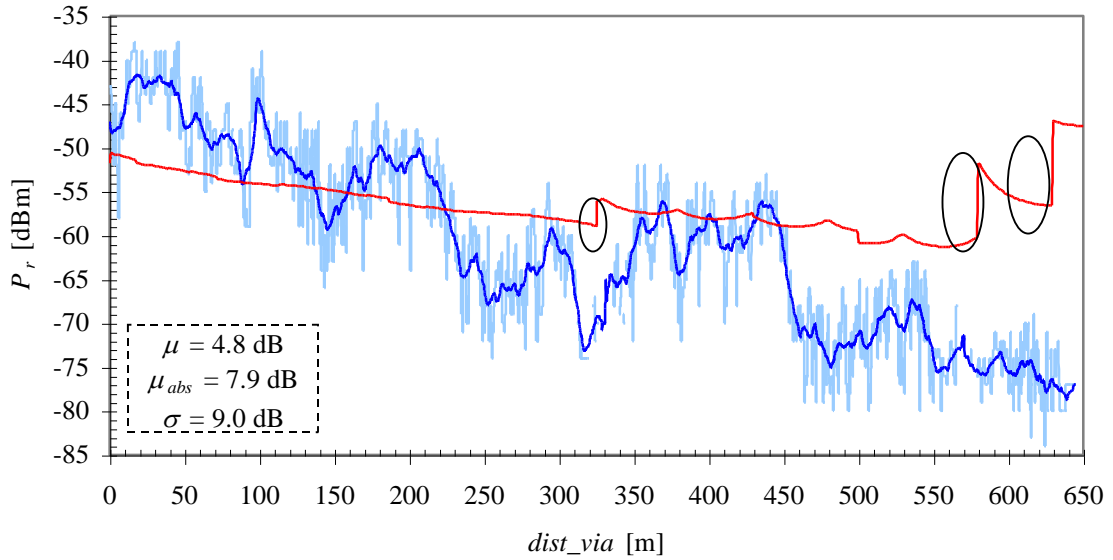


Fig. H.9 - Potência recebida para a Av. Duque D'Ávila, EB S_Seb_B.

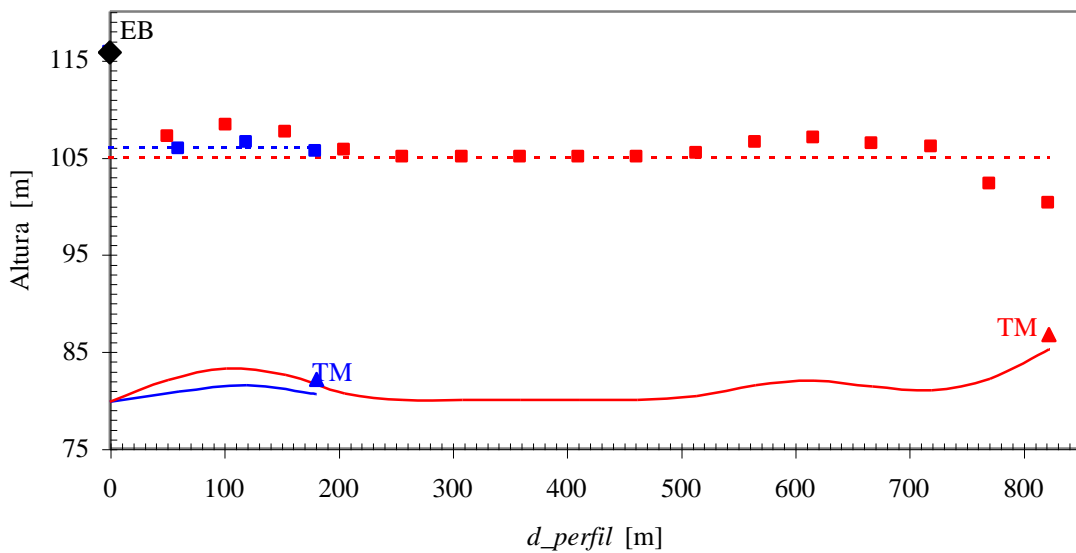


Fig. H.10 - Perfil entre a EB S_Seb_B e o TM nos pontos extremos da Av. Duque D'Ávila.

Tab. H.9 - Parâmetros associados à Av. Duque D'Ávila, S_Seb_B.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	111 670	196 900
Fim da Via	112 320	196 901
$dist_via$ Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 650	2	326
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		25.0
d_{UE-TM} [m]		12.5
φ [°]	4.2 – 19.4	8.2
b [m]	22.0 – 32.0	27.3
N	1 – 6	3
G_{EB} [dBi]	7.8 – 8.7	8.4

Tab. H.10 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a Av. Duque D'Ávila,
EB S_Seb_B.

$dist_via$ [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
130 – 160	330	30	5	10
300 – 355	500	55	3	10
465 – 490	660	25	2	10
620 – 645	810	25	1	11

AVENIDA DUQUE D'ÁVILA

EB – Tecnic_C

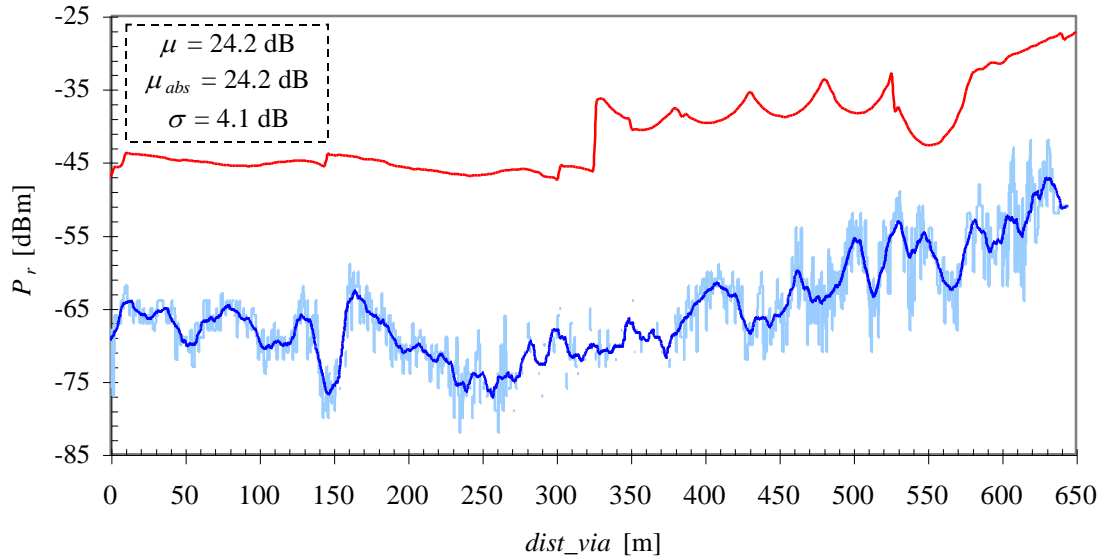


Fig. H.11 - Potência recebida para a Av. Duque D'Ávila, Tecnic_C.

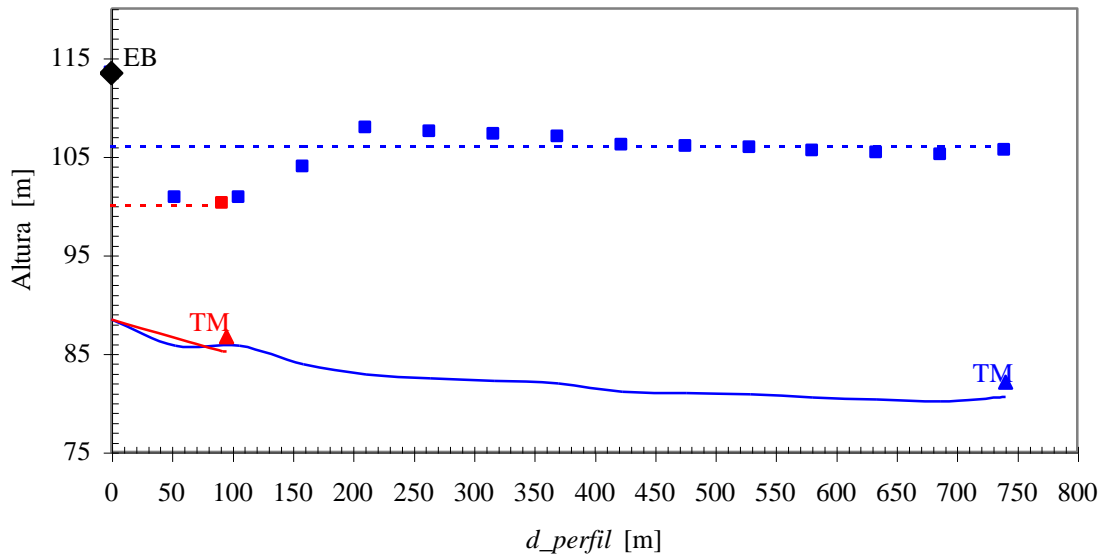


Fig. H.12 - Perfil entre a EB Tecnic_C e o TM nos pontos extremos da Av. Duque D'Ávila.

Tab. H.11 - Parâmetros associados à Av. Duque D'Ávila, Tecnic_C.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	111 670	196 900
Fim da Via	112 320	196 901
<i>dist_via</i> Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 650	2	326
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
<i>W</i> [m]		25.0
<i>d_{UE-TM}</i> [m]		12.5
φ [°]	1.5 – 11.8	3.5
<i>b</i> [m]	25.0 – 40.0	31.5
<i>N</i>	1 – 6	3
<i>G_{EB}</i> [dBi]	8.1 – 9.5	8.4





Tab. H.12 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a Av. Duque D'Ávila,
EB Tecnic_C.

<i>dist_via</i> [m]	<i>d_c</i> [m]	<i>w_c</i> [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
130 – 160	680	30	1	6
300 – 355	500	55	3	6
465 – 490	350	25	4	6
620 – 645	200	25	8	6

ANEXO I








MEDIDAS E PREVISÕES DA POTÊNCIA
RECEBIDA PARA A ZONA DOS SAPADORES

Neste anexo são apresentadas as medidas efectuadas e as previsões obtidas a partir dos modelos de propagação para o andamento da potência recebida ao longo da rua onde se desloca o TM. De acordo com a legenda apresentada em 4.2.1., as curvas representadas são: as medidas instantâneas adquiridas com o equipamento de medida, a média das medidas obtida por meio do método da janela deslizante com uma dimensão da janela de 30λ (10 m), a potência teórica recebida estimada a partir da ferramenta de cálculo, e a atenuação devida aos cruzamentos no caso em que esta não seja nula. As curvas representadas podem ser identificadas a partir da seguinte legenda:

	Medidas Instantâneas
	Média das Medidas
	Previsão do Modelo
	Atenuação dos Cruzamentos

A comparação entre as previsões teóricas e a média das medidas é quantificada pelos parâmetros estatísticos anteriormente descritos, μ , μ_{abs} e σ , indicados em cada gráfico para cada rua medida e para cada EB.

Apresenta-se também o perfil entre a EB e o TM para cada rua medida e para cada EB, indicando-se nesses gráficos a cota do terreno, a altura da EB, dos edifícios, do TM e a altura média dos edifícios, acima do nível médio das águas do mar. São apresentados dois perfis, um para a posição inicial do TM na via percorrida e outro para a posição final na mesma via. A legenda destes gráficos é a já apresentada na secção 4.2.1.:

	Perfil no Início da Via		Cota do Terreno
	Perfil no Fim da Via		Altura dos Edifícios
			Altura Média dos Edifícios
			Altura do Terminal Móvel
			Altura da Estação de Base

Apresentam-se, ainda, para cada via estudada e para cada EB, tabelas com a indicação dos parâmetros associados às ruas, cruzamentos e EBs analisadas, necessários para a determinação do andamento teórico do sinal.

RUA AFONSO DOMINGUES

EB – Graca_A

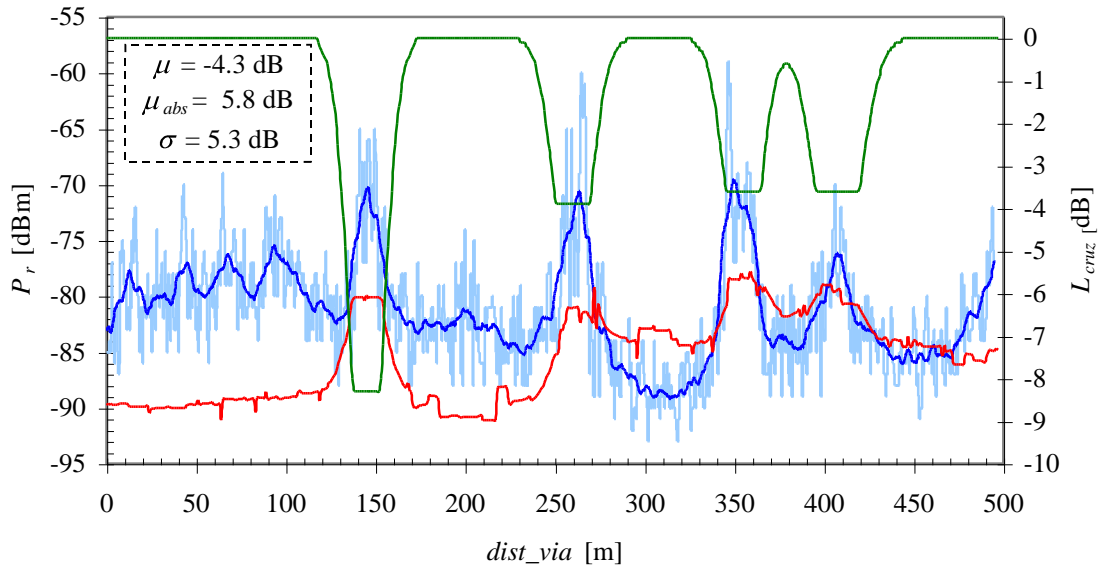


Fig. I.1 - Potência recebida para a R. Afonso Domingues, EB Graca_A.

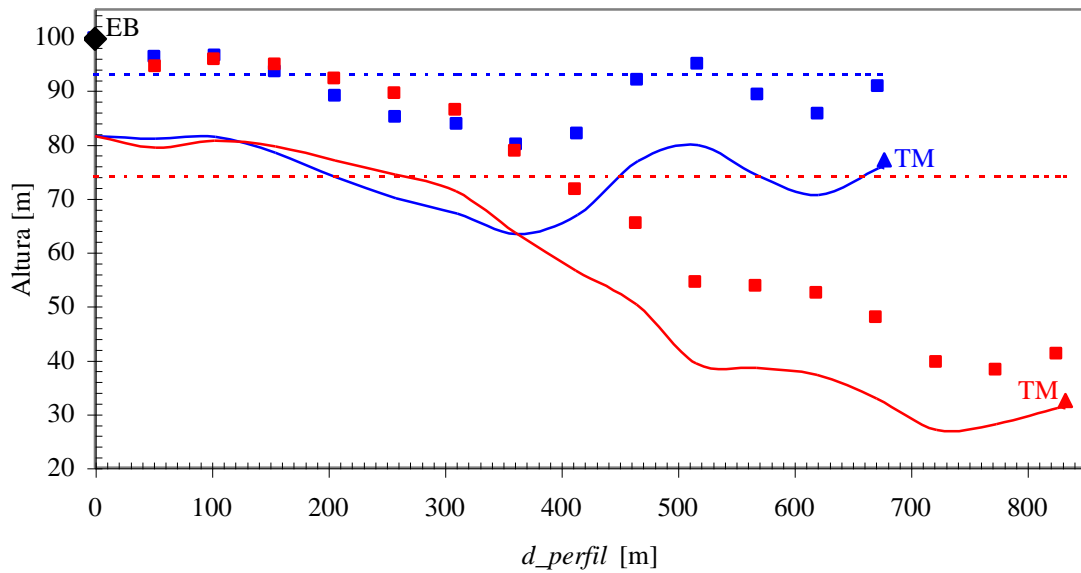


Fig. I.2 - Perfil entre a EB Graca_A e o TM nos pontos extremos da R. Afonso Domingues.

Tab. I.1 - Parâmetros associados à R. Afonso Domingues, EB Graca_A.

Troço 1		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 740	195 290
Fim do Troço	113 940	195 130
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 256	1	257
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		7.0
d_{UE_TM} [m]		5.5
φ [°]	66.3 – 86.7	76.2
b [m]	7.0 – 11.0	7.3
N	10 – 17	15
G_{EB} [dBi]	0.7 – 3.9	2.4

Troço 2		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 940	195 130
Fim do Troço	114 100	194 950
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
256 – 497	1	241
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE_TM} [m]		8.5
φ [°]	59.5 – 76.0	67.4
b [m]	7.0 – 13.0	10.4
N	10 – 19	12
G_{EB} [dBi]	-5.3 – 1.6	-1.9

Tab. I.2 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. Afonso Domingues, EB Graca_A.

<i>dist_via</i> [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
140 – 150	700	10	76	9
255 – 265	730	10	68	13
350 – 360	760	10	68	17
400 – 415	780	15	63	19

RUA AFONSO DOMINGUES

EB – Xabreg_C

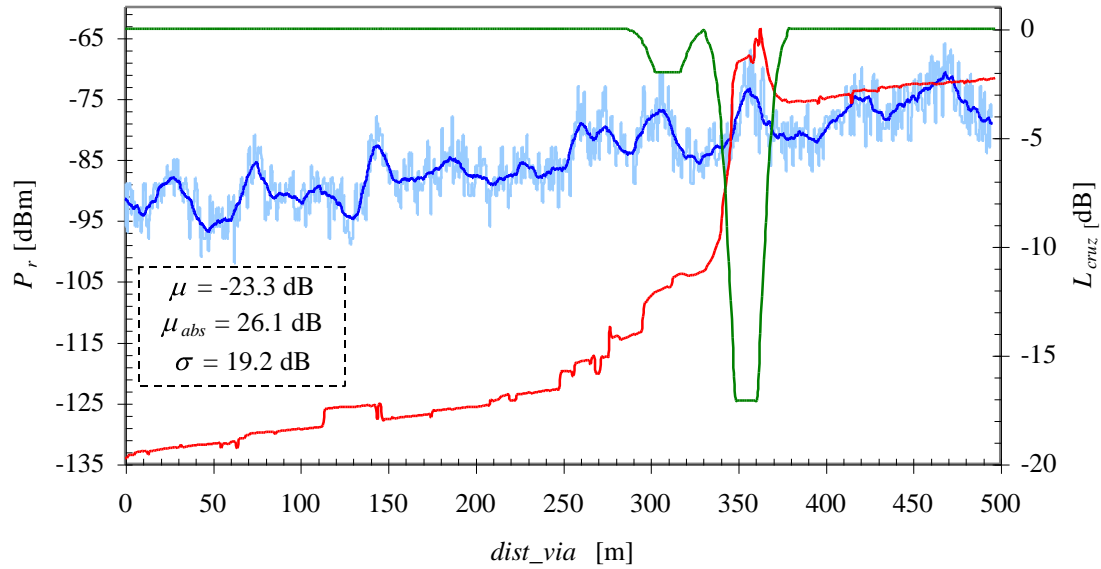


Fig. I.3 - Potência Recebida para a R. Afonso Domingues, EB Xabreg_C.

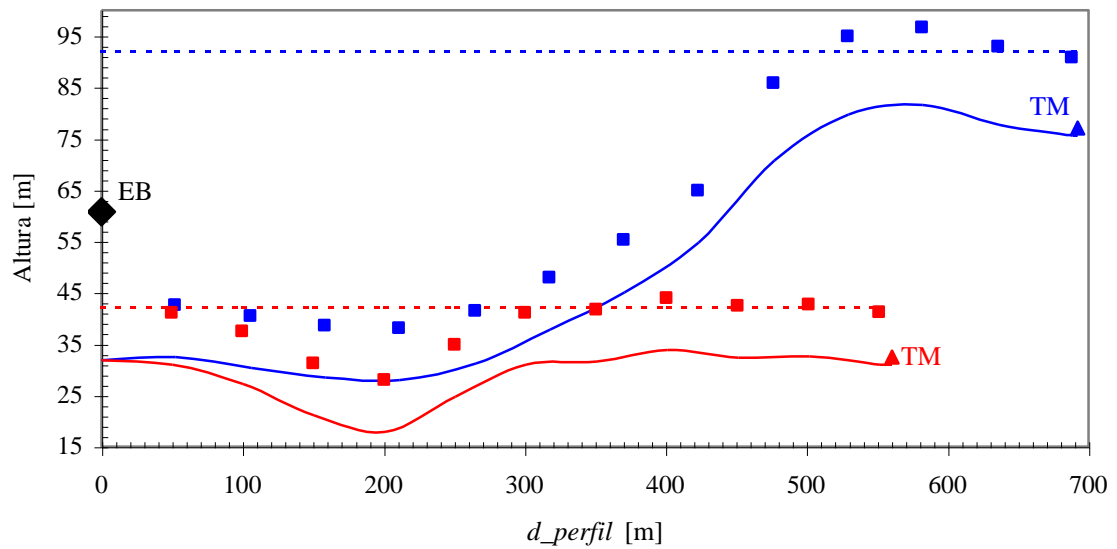


Fig. I.4 - Perfil entre a EB Xabreg_C e o TM nos pontos extremos da R. Afonso Domingues.

Tab. I.3 - Parâmetros associados à R. Afonso Domingues, EB Xabreg_C.

Troço 1		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 740	195 290
Fim do Troço	113 940	195 130
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 256	1	257
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
<i>W</i> [m]		7.0
<i>d_{UE-TM}</i> [m]		5.5
φ [°]	47.8 – 68.0	57.2
<i>b</i> [m]	7.0 – 8.0	7.2
<i>N</i>	11 – 16	14
<i>G_{EB}</i> [dBi]	11.4 – 12.8	12.4

Troço 2		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 940	195 130
Fim do Troço	114 100	194 950
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
256 – 497	1	241
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
<i>W</i> [m]		10.0
<i>d_{UE-TM}</i> [m]		8.5
φ [°]	77.1 – 90.0	83.6
<i>b</i> [m]	7.0 – 8.0	7.1
<i>N</i>	1 – 13	12
<i>G_{EB}</i> [dBi]	8.3 – 12.5	10.7

Tab. I.4 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. Afonso Domingues, EB Xabreg_C.

<i>dist_via</i> [m]	<i>d_c</i> [m]	<i>w_c</i> [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
70 – 80	650	10	54	-24
140 – 150	620	10	59	-22
180 – 190	590	10	63	-19
255 – 265	570	10	68	-13
305 – 315	550	10	81	-5
350 – 360	540	10	86	1

RUA DIOGO DO COUTO

EB – Graca_A

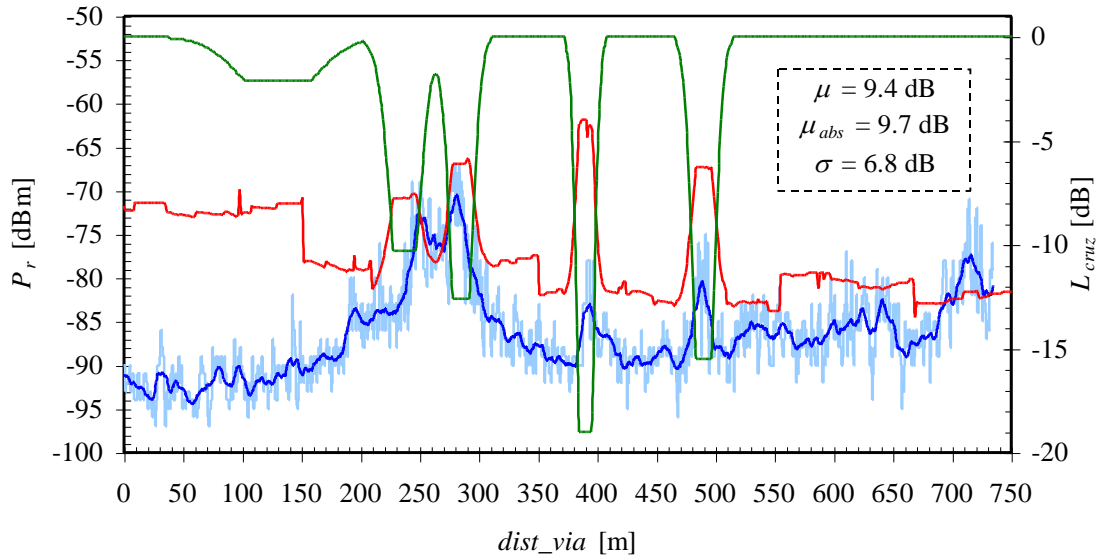


Fig. I.5- Potência recebida para a R. Diogo do Couto, EB Graca_A.

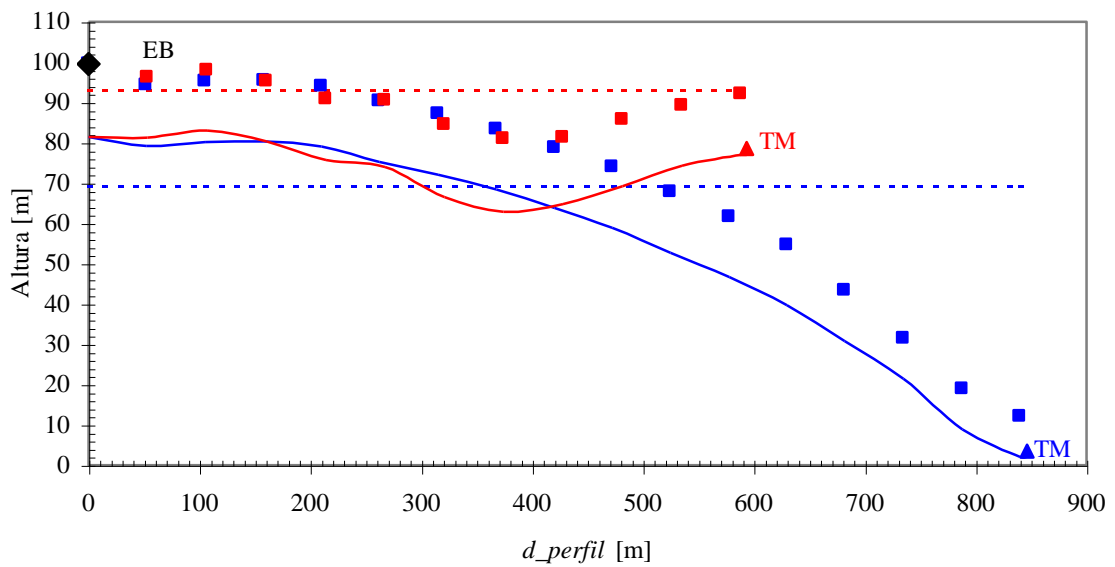


Fig. I.6 - Perfil entre a EB Graca_A e o TM nos pontos extremos da R. Diogo do Couto.

Tab. I.5 - Parâmetros associados à R. Diogo do Couto, EB Graca_A.

Troço 1		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	114 130	194 800
Fim do Troço	113 830	194 980
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 350	1	350
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		15.0
d_{UE_TM} [m]		7.5
φ [°]	31.6 – 50.3	39.8
b [m]	10.0 – 15.0	13.6
N	6 – 14	9
G_{EB} [dBi]	-12.2 – -1.5	-6.9

Troço 2		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 830	194 980
Fim do Troço	113 790	195 180
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
350 – 554	1	204
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE_TM} [m]		5.0
φ [°]	63.4 – 81.9	72.3
b [m]	10.0 – 15.0	10.7
N	6 – 11	9
G_{EB} [dBi]	-1.5 – 2.6	1.0

Troço 3		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 790	195 180
Fim do Troço	113 700	195 250
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
554 – 668	1	115
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		15.0
d_{UE_TM} [m]		7.5
φ [°]	75.8 – 86.2	80.9
b [m]	10.0 – 15.0	15.0
N	7 – 10	7
G_{EB} [dBi]	2.6 – 12.5	3.9

Tab. I.5 - Parâmetros associados à R. Diogo do Couto, EB Graca_A (cont.).

Troço 4		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 700	195 250
Fim do Troço	113 600	195 290
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
668 – 776	1	108
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE_TM} [m]		5.0
φ [°]	70.1 – 80.0	75.0
b [m]	10.0 – 15.0	10.2
N	7 – 10	9
G_{EB} [dBi]	3.9 – 5.4	4.8

Tab. I.6 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. Diogo do Couto, EB Graca_A.

<i>dist_via</i> [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
115 – 145	730	30	44	25
230 – 245	670	15	76	24
280 – 290	650	10	80	24
385 – 395	640	10	90	15
485 – 495	630	10	83	11

RUA DIOGO DO COUTO

EB – Xabreg_C

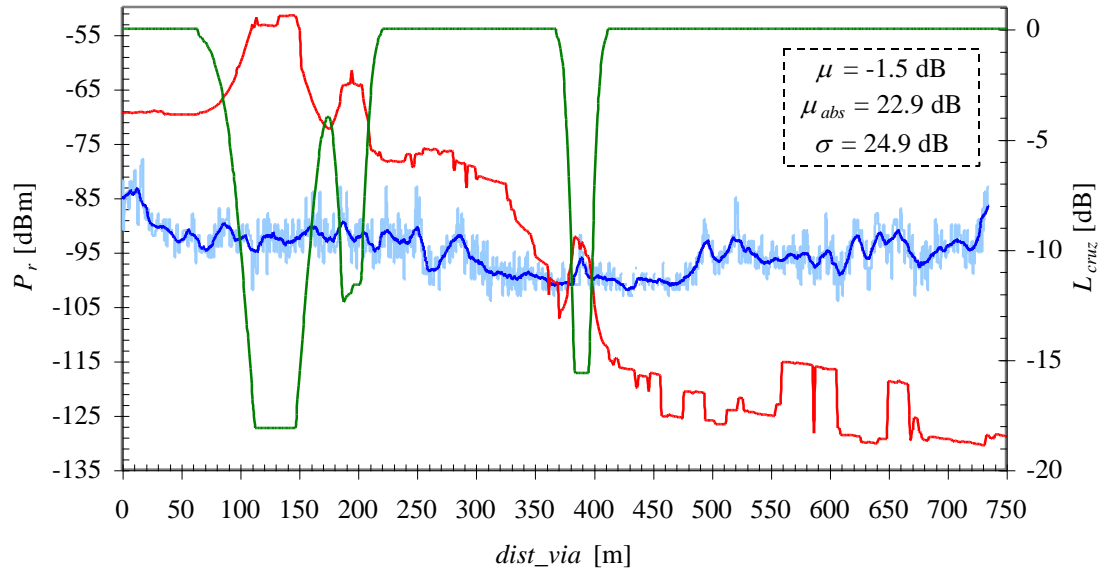


Fig. I.7 - Potência recebida para a R. Diogo do Couto, EB Xabreg_C.

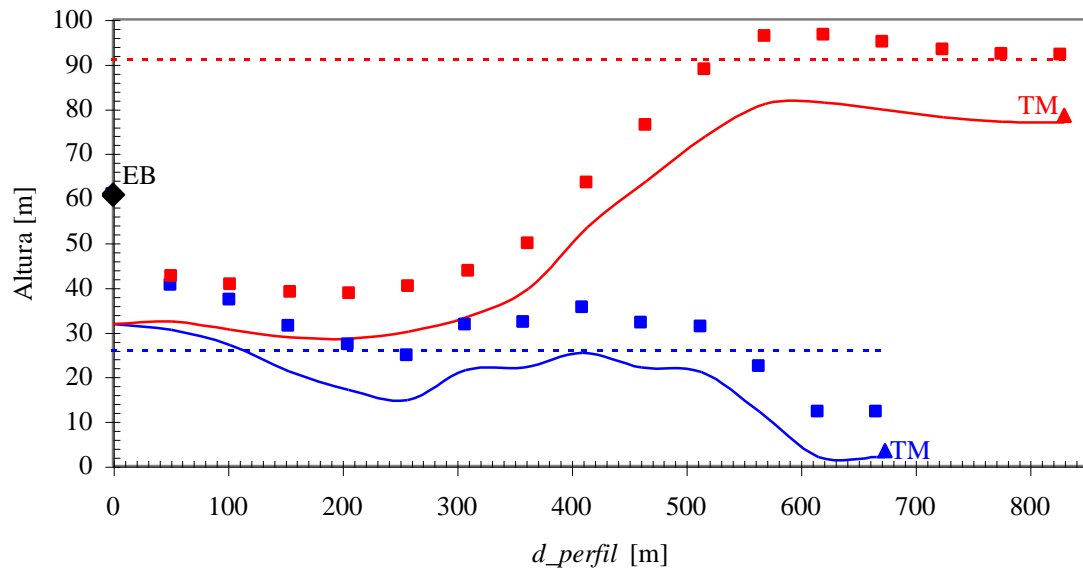


Fig. I.8 - Perfil entre a EB Xabreg_C e o TM nos pontos extremos da R. Diogo do Couto.

Tab. I.7 - Parâmetros associados à R. Diogo do Couto, EB Xabreg_C.

Troço 1		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	114 130	194 800
Fim do Troço	113 830	194 980
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 350	1	350
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		15.0
d_{UE_TM} [m]		7.5
φ [°]	66.4 – 90.0	79.5
b [m]	7.0 – 20.0	11.3
N	6 – 16	10
G_{EB} [dBi]	7.1 – 12.0	9.4

Troço 2		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 830	194 980
Fim do Troço	113 790	195 180
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
350 – 554	1	204
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE_TM} [m]		5.0
φ [°]	65.9 – 82.1	73.4
b [m]	7.0 – 10.0	9.0
N	11 - 16	12
G_{EB} [dBi]	11.9 – 12.7	12.4

Troço 3		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 790	195 180
Fim do Troço	113 700	195 250
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
554 – 668	1	115
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		15.0
d_{UE_TM} [m]		7.5
φ [°]	46.9 – 57.1	53.2
b [m]	7.0 – 15.0	11.6
N	7 – 17	11
G_{EB} [dBi]	11.9 – 12.6	12.3

Tab. I.7 - Parâmetros associados à R. Diogo do Couto, EB Xabreg_C (cont.).

Troço 4		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 700	195 250
Fim do Troço	113 600	195 290
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
668 – 776	1	108
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE-TM} [m]		5.0
φ [°]	29.4 – 33.6	31.4
b [m]	8.0 – 10.0	8.9
N	12 – 15	14
G_{EB} [dBi]	11.1 – 11.9	11.5

Tab. I.8 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. Diogo do Couto, EB Xabreg_C.

<i>dist_via</i> [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
115 – 145	640	30	84	20
190 – 200	650	10	79	16
385 – 395	650	10	87	-5

RUA DIOGO DO COUTO

EB – Apolon_A

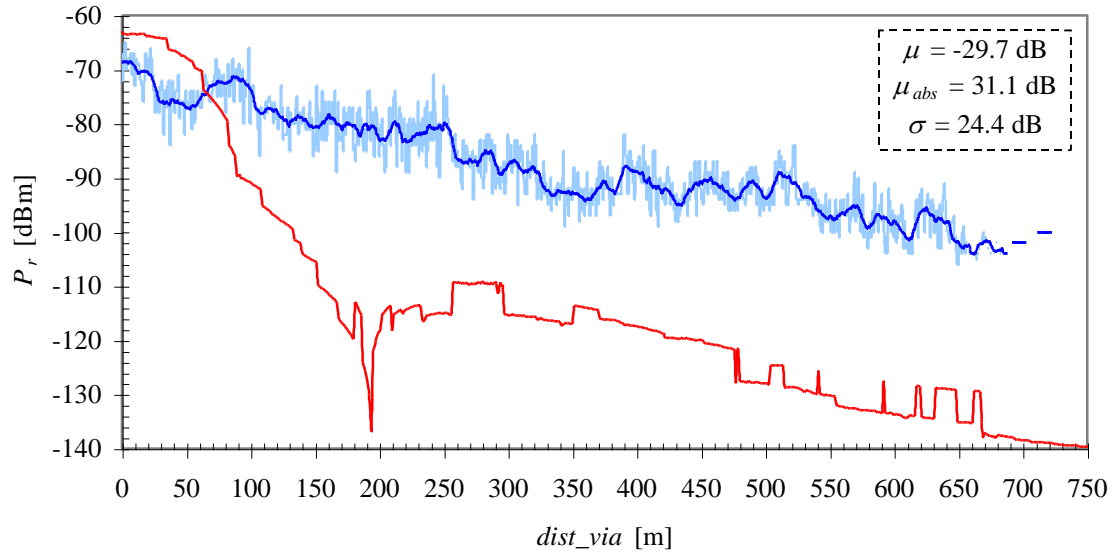


Fig. I.9 - Potência recebida para a R. Diogo do Couto, EB Apolon_A.

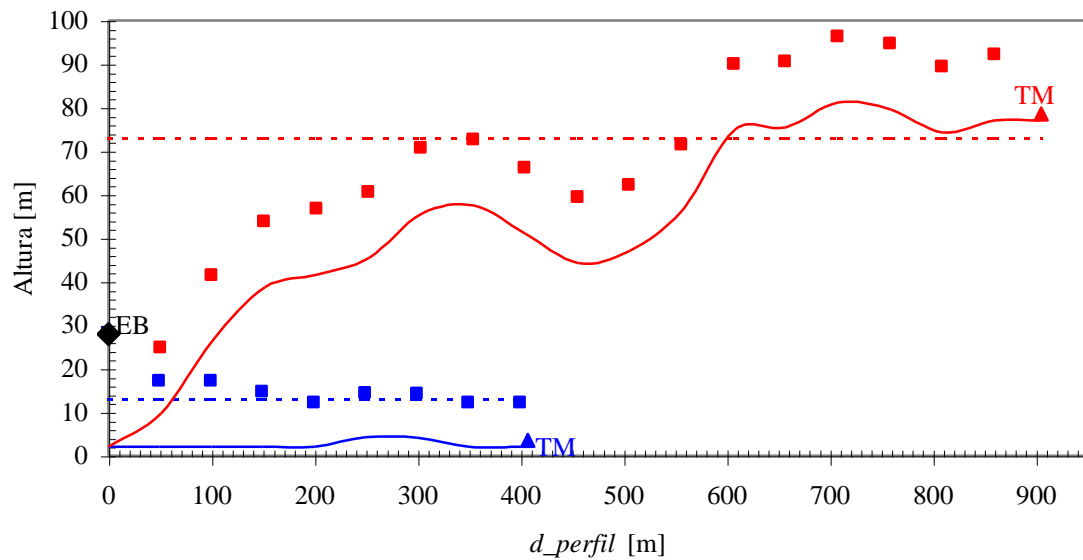


Fig. I.10 - Perfil entre a EB Apolon_A e o TM nos pontos extremos da R. Diogo do Couto.

Tab. I.9 - Parâmetros associados à R. Diogo do Couto, EB Apolon_A.

Troço 1		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	114 130	194 800
Fim do Troço	113 830	194 980
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 350	1	350
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		15.0
d_{UE_TM} [m]		7.5
φ [°]	52.2 – 90.0	71.6
b [m]	10.0 – 20	12.9
N	4 – 7	6
G_{EB} [dBi]	-15.0 – 9.2	5.2

Troço 2		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 830	194 980
Fim do Troço	113 790	195 180
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
350 – 554	1	204
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE_TM} [m]		5.0
φ [°]	3.2 – 4.5	3.8
b [m]	10.0 – 15.0	13.3
N	6 – 12	8
G_{EB} [dBi]	6.1 – 6.3	6.2

Troço 3		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 790	195 180
Fim do Troço	113 700	195 250
<i>dist_via</i> Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
554 – 668	1	115
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		15.0
d_{UE_TM} [m]		7.5
φ [°]	38.3 – 44.0	41.0
b [m]	10.0 – 15.0	11.2
N	8 – 13	11
G_{EB} [dBi]	6.1 – 6.3	6.2

Tab. I.9 - Parâmetros associados à R. Diogo do Couto, EB Apolon_A (cont.).

Troço 4		
Coordenadas	Longitude	Latitude
Início do Troço	113 700	195 250
Fim do Troço	113 600	195 290
$dist_via$ Troço [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
668 – 776	1	108
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE_TM} [m]		5.0
φ [°]	48.5 – 54.3	51.3
b [m]	10.0 – 10.0	10.0
N	13 – 14	13
G_{EB} [dBi]	5.3 – 6.2	5.6

Tab. I.10 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. Diogo do Couto, EB Apolon_A.

$dist_via$ [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
115 – 145	450	30	71	-6
230 – 245	500	15	59	-21
280 – 290	530	10	30	-23
385 – 395	630	10	25	-27
485 – 495	700	10	23	-32

RUA DO MATO GROSSO

EB – Graca_A

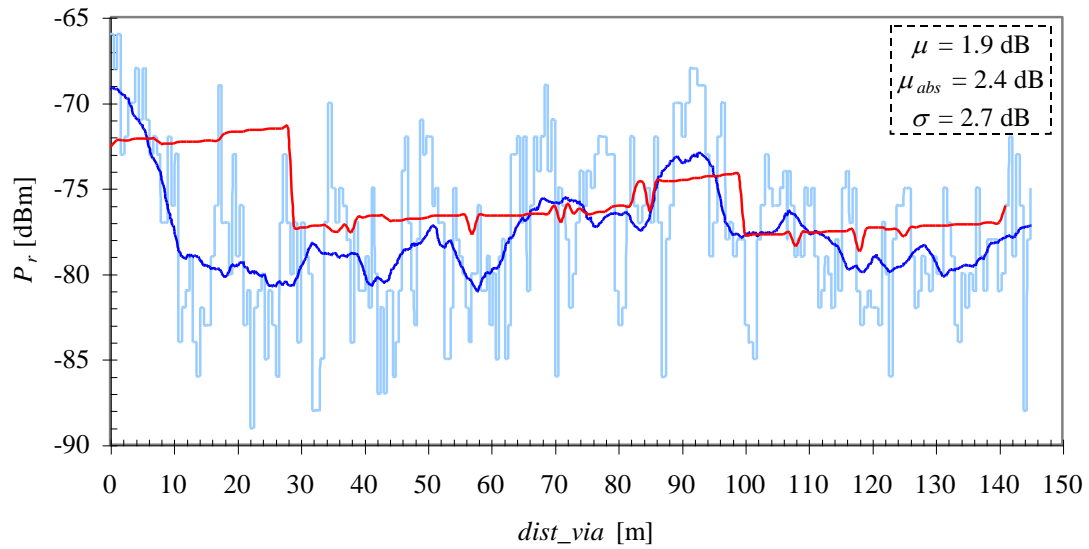


Fig. I.11 - Potência recebida para a R. do Mato Grosso, EB Graca_A.

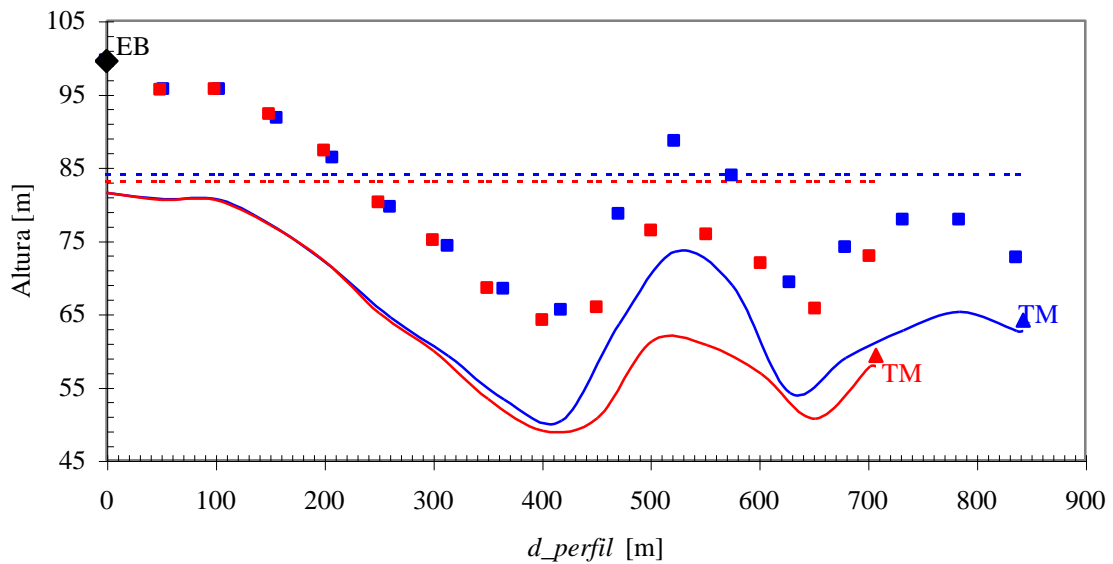


Fig. I.12 - Perfil entre a EB Graca_A e o TM nos pontos extremos da R. do Mato Grosso.

Tab. I.11 - Parâmetros associados à R. do Mato Grosso, EB Graca_A.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	114 020	195 200
Fim da Via	113 920	195 100
<i>dist_via</i> Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 141	1	142
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE-TM} [m]		5.0
φ [°]	15.7 – 18.8	17.1
b [m]	8.0 – 12.0	10.4
N	10 – 16	12
G_{EB} [dBi]	1.9 – 2.5	2.2

Tab. I.12 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. do Mato Grosso,
EB Graca_A.

<i>dist_via</i> [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
30 – 40	800	10	14	14
65 – 75	760	10	15	13
105 – 115	780	15	16	13

RUA DO MATO GROSSO

EB – Xabreg_C

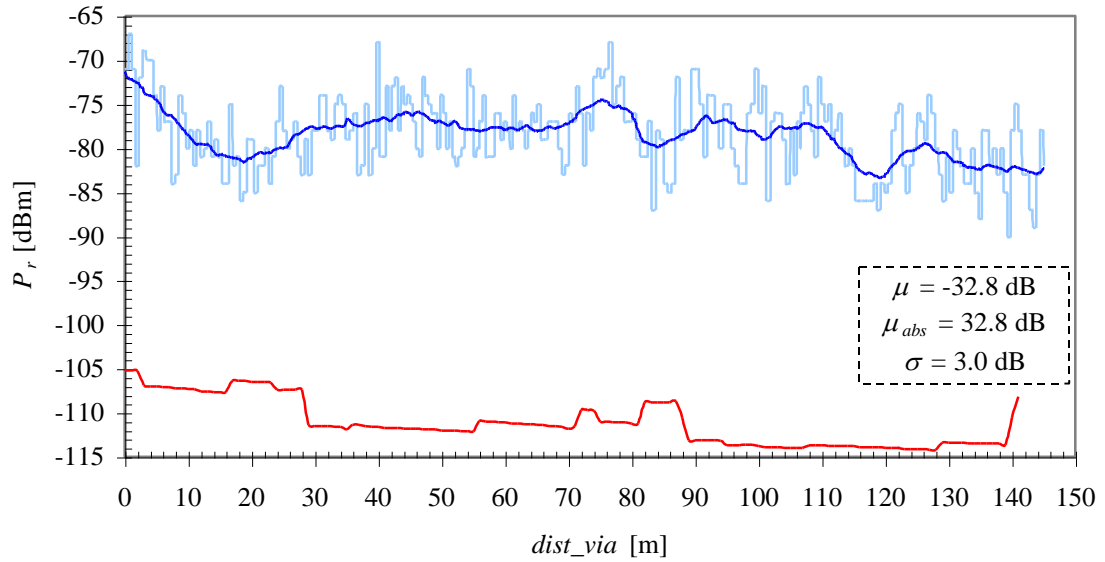


Fig. I.13 - Potência recebida para a R. do Mato Grosso, EB Xabreg_C.

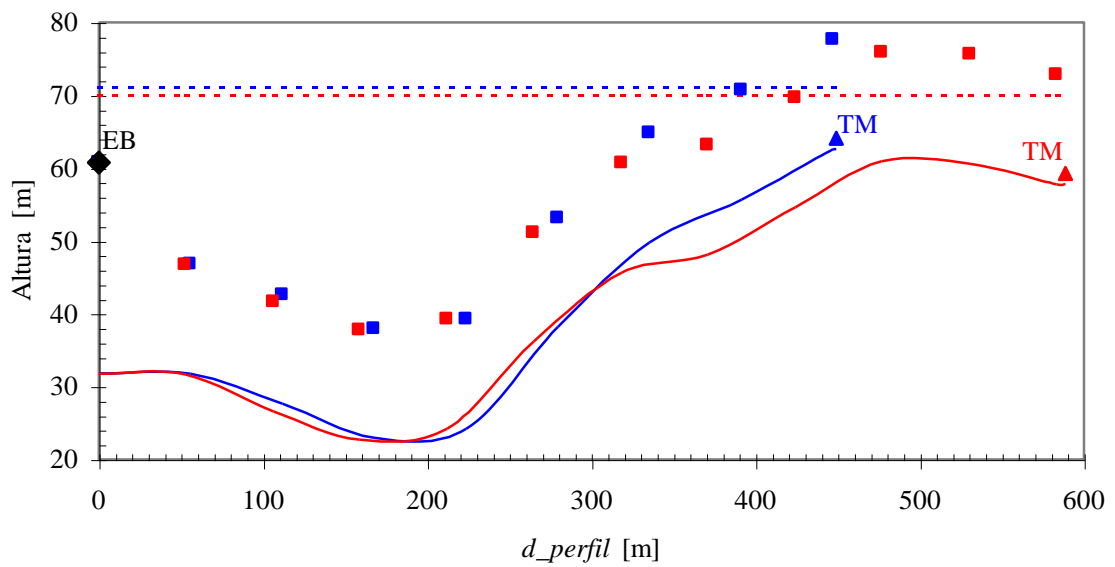


Fig. I.14 - Perfil entre a EB Xabreg_C e o TM nos pontos extremos da R. do Mato Grosso.

Tab. I.13 - Parâmetros associados à R. do Mato Grosso, EB Xabreg_C.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	114 020	195 200
Fim da Via	113 920	195 100
$dist_via$ Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 141	1	142
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE-TM} [m]		5.0
φ [°]	14.0 – 18.4	16.2
b [m]	8.0 – 10.0	9.3
N	7 – 11	9
G_{EB} [dBi]	12.2 – 12.9	12.5

Tab. I.14 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. do Mato Grosso,
EB Xabreg_C.

$dist_via$ [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
105 – 115	520	15	15	-12

RUA DO MATO GROSSO

EB – Apolon_A

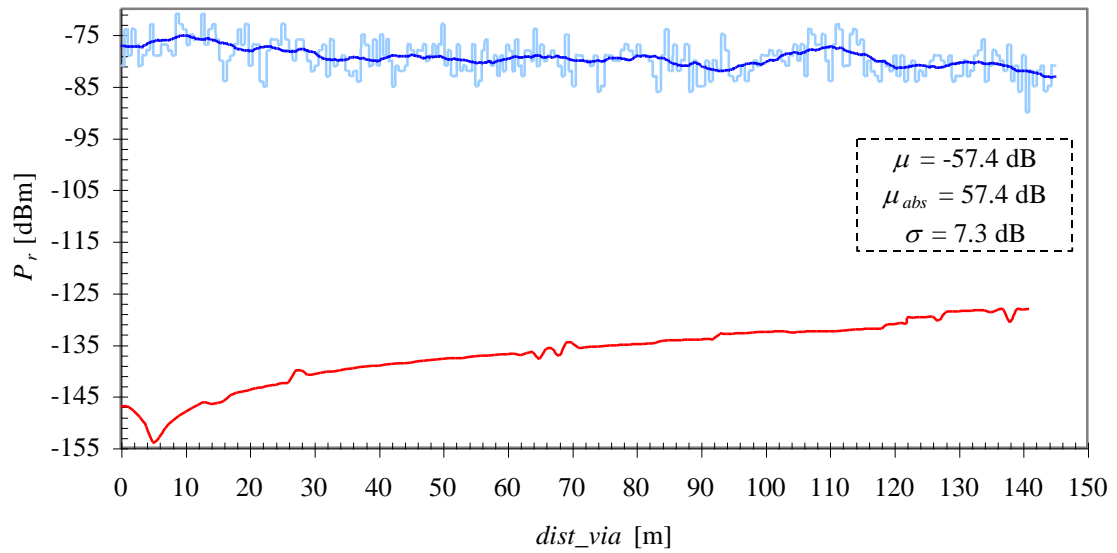


Fig. I.15 - Potência recebida para a R. do Mato Grosso, EB Apolon_A.

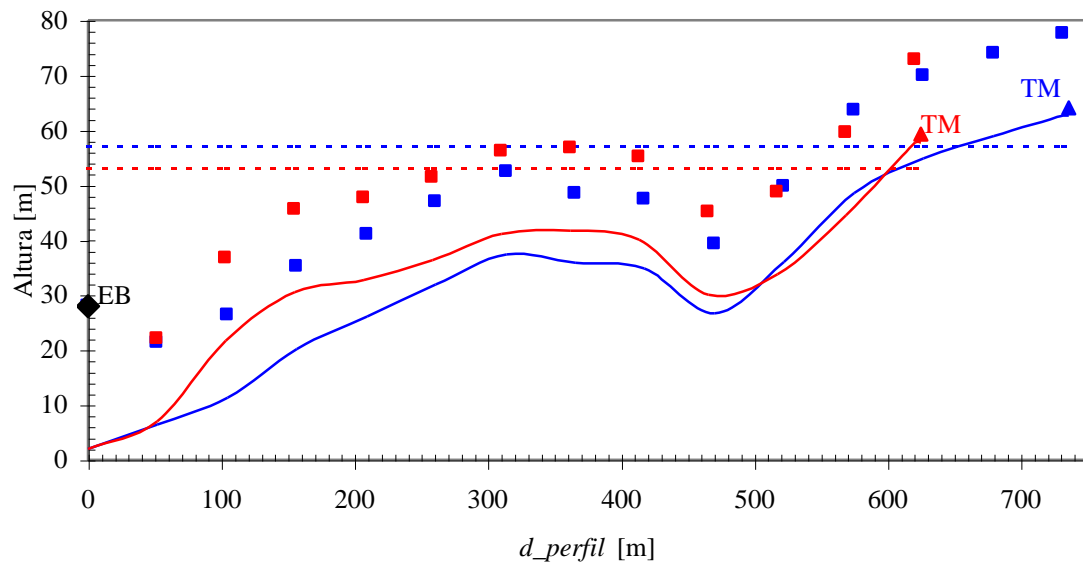


Fig. I.16 - Perfil entre a EB Apolon_A e o TM nos pontos extremos da R. do Mato Grosso.

Tab. I.15 - Parâmetros associados à R. do Mato Grosso, EB Apolon_A.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	114 020	195 200
Fim da Via	113 920	195 100
<i>dist_via</i> Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 141	1	142
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE-TM} [m]		5.0
φ [°]	34.8 – 42.2	38.3
b [m]	8.0 – 11.0	9.4
N	9 – 13	11
G_{EB} [dBi]	-16.3 – 4.3	0.1

Tab. I.16 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. do Mato Grosso,
EB Apolon_A.

<i>dist_via</i> [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
105 – 115	650	15	44	-26

RUA FERNÃO DE MAGALHÃES

EB – Graca_A

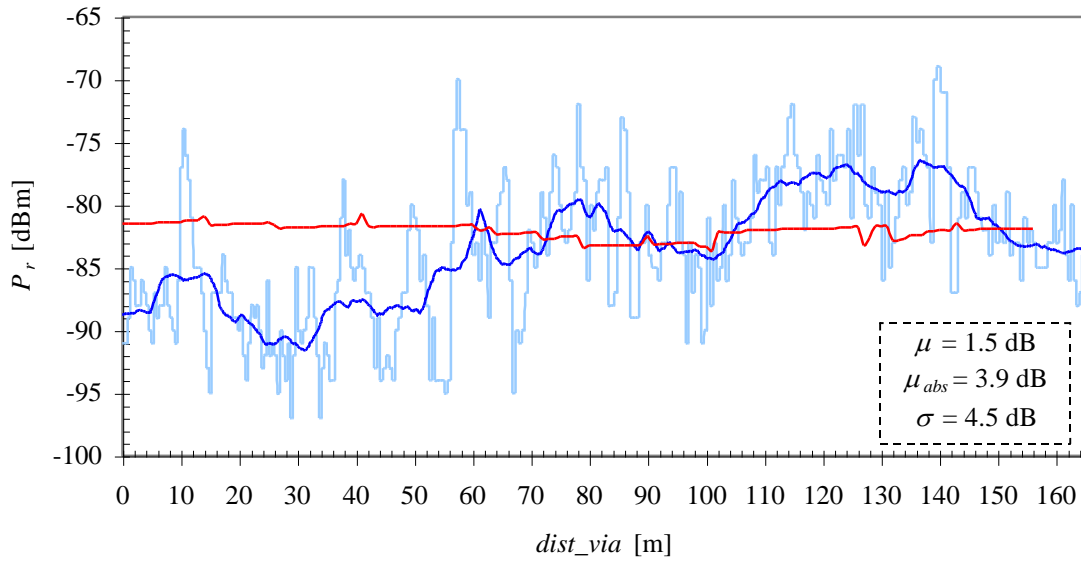


Fig. I.17 - Potência recebida para a R. Fernão de Magalhães, EB Graca_A.

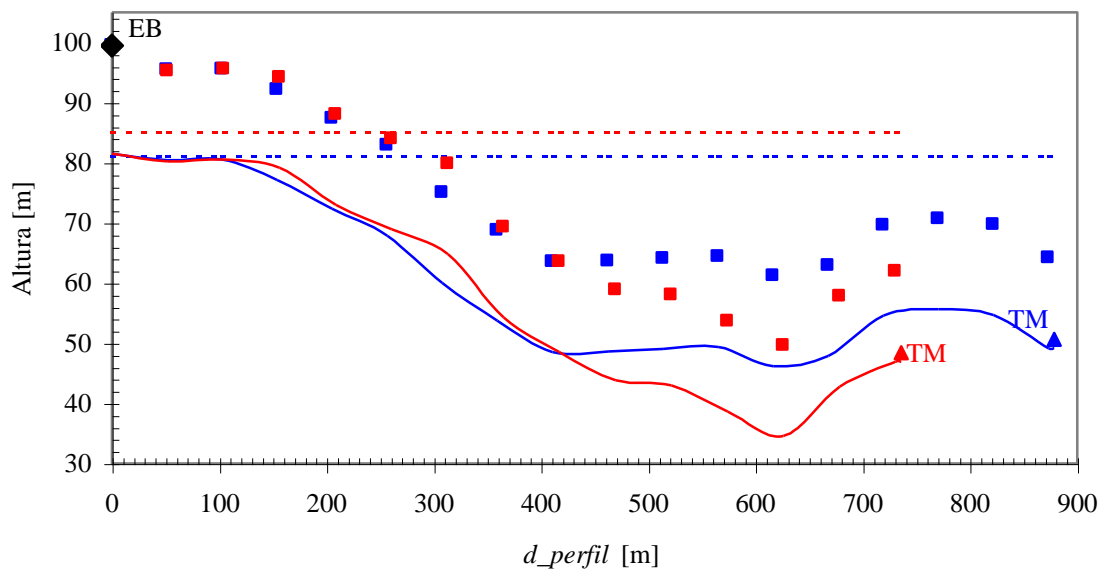


Fig I.18 - Perfil entre a EB Graca_A e o TM nos pontos extremos da R. Fernão de Magalhães.

Tab. I.17 - Parâmetros associados à R. Fernão de Magalhães, EB Graca_A.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	114 090	195 140
Fim da Via	113 980	195 030
<i>dist_via</i> Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 156	1	156
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE-TM} [m]		5.0
φ [°]	21.4 – 25.8	23.5
b [m]	8.0 – 12.0	10.0
N	10 – 17	13
G_{EB} [dBi]	-1.5 – 0.2	-0.8

Tab. I.18 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. Fernão de Magalhães,
EB Graca_A.

<i>dist_via</i> [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
40 – 50	840	10	20	17
110 – 120	770	10	22	16
155 – 165	730	10	23	14

RUA FERNÃO DE MAGALHÃES

EB – Xabreg_C

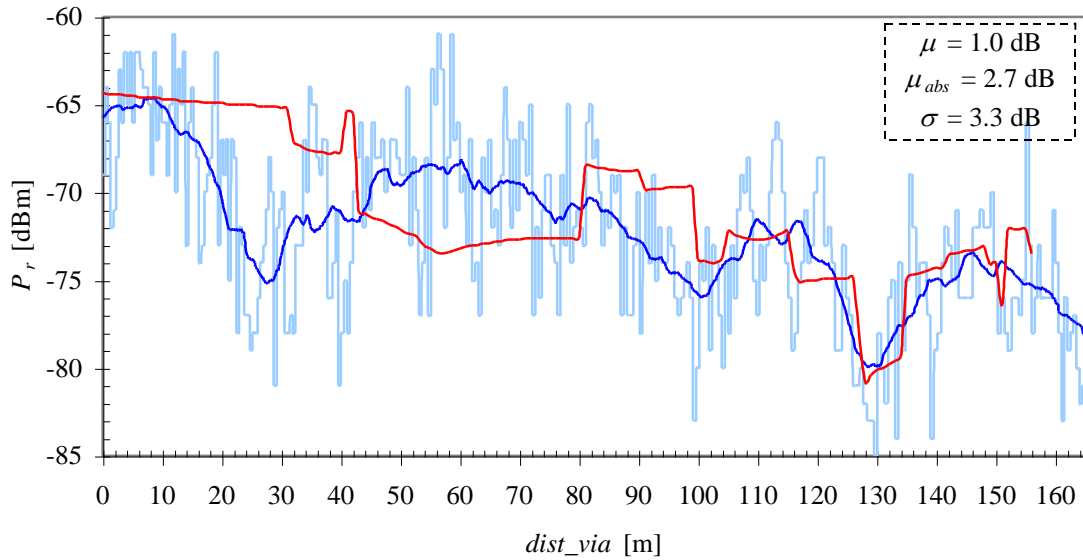


Fig. I.19 - Potência recebida para a R. Fernão de Magalhães, EB Xabreg_C.

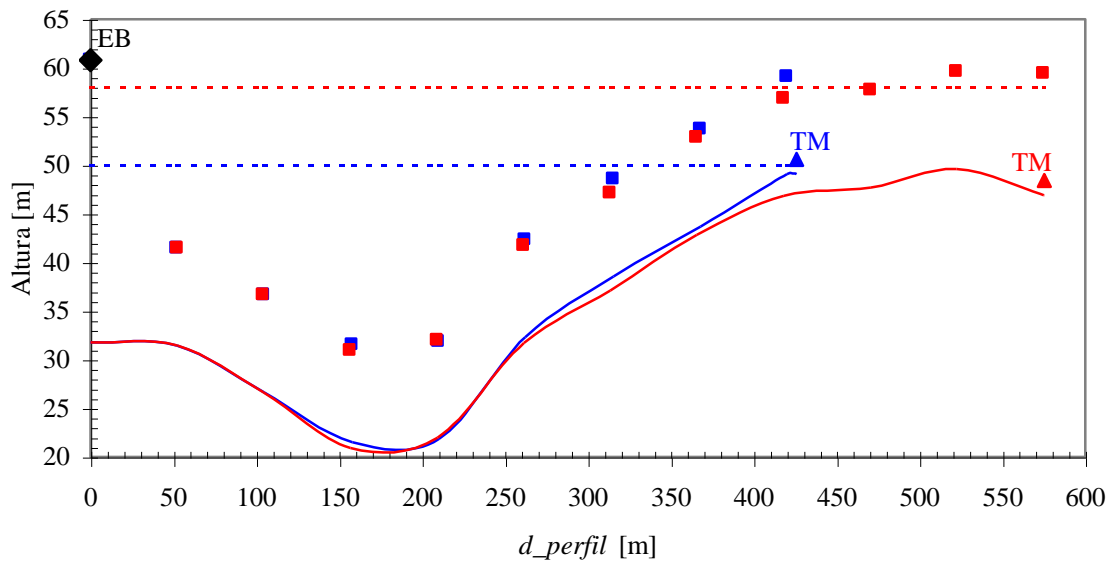


Fig. I.20 - Perfil entre a EB Xabreg_C e o TM nos pontos extremos da R. Fernão de Magalhães.

Tab. I.19 - Parâmetros associados à R. Fernão de Magalhães, EB Xabreg_C.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	114 090	195 140
Fim da Via	113 980	195 030
<i>dist_via</i> Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 156	1	156
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
<i>W</i> [m]		10.0
<i>d_{UE-TM}</i> [m]		5.0
φ [°]	4.9 – 6.8	5.8
<i>b</i> [m]	8.0 – 10.0	7.3
<i>N</i>	1 – 11	7
<i>G_{EB}</i> [dBi]	11.2 – 11.6	11.4

Tab. I.20 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. Fernão de Magalhães,
EB Xabreg_C.

<i>dist_via</i> [m]	<i>d_c</i> [m]	<i>w_c</i> [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
110 – 120	550	10	2	3
155 – 165	600	10	3	3

RUA FERNÃO DE MAGALHÃES

EB – Apolon_A

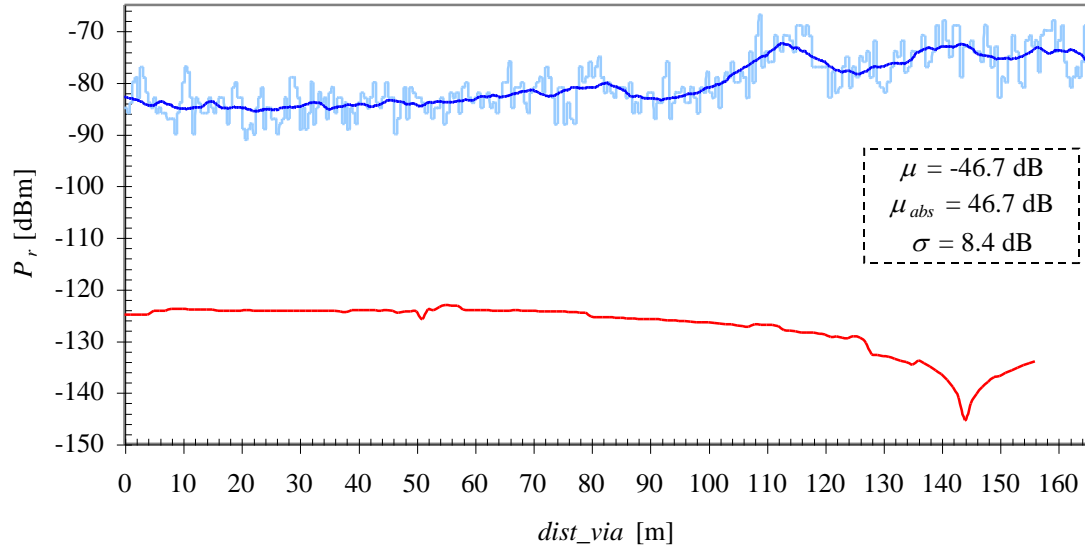


Fig. I.21 - Potência recebida para a R. Fernão de Magalhães, EB Apolon_A.

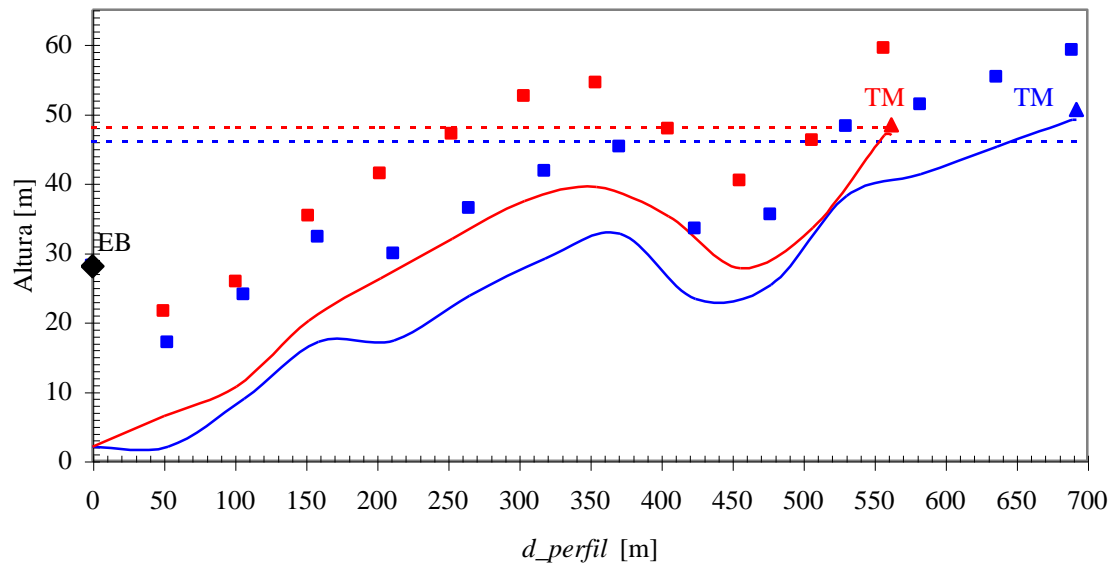


Fig I.22 - Perfil entre a EB Apolon_A e o TM nos pontos extremos da R. Fernão de Magalhães.

Tab. I.21 - Parâmetros associados à R. Fernão de Magalhães, EB Apolon_A.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Início da Via	114 090	195 140
Fim da Via	113 980	195 030
$dist_via$ Total [m]	Resolução [m]	Nº de Pontos
0 – 156	1	156
Parâmetro	Min – Max	Valor Médio
W [m]		10.0
d_{UE-TM} [m]		5.0
φ [°]	28.1 – 35.7	31.7
b [m]	8.0 – 10.0	9.1
N	9 – 14	11
G_{EB} [dBi]	-17.5 – 5.5	0.9

Tab. I.22 - Parâmetros associados aos cruzamentos para a R. Fernão de Magalhães,
EB Apolon_A.

$dist_via$ [m]	d_c [m]	w_c [m]	φ_c [°]	Δh_{base} [m]
110 – 120	120	10	20	-19
155 – 165	165	10	23	-20

Errata

Na pág.	Onde se lê:	Deve ler-se:
27	$90 + \operatorname{atan}\left(\left \frac{\Delta x}{\Delta y}\right \right)$	$90 + \operatorname{atan}\left(\left \frac{\Delta y}{\Delta x}\right \right)$
27	$270 + \operatorname{atan}\left(\left \frac{\Delta x}{\Delta y}\right \right)$	$270 + \operatorname{atan}\left(\left \frac{\Delta y}{\Delta x}\right \right)$
32	... o valor de b o valor de W_s ...
32	... das ruas, b das ruas, W_s ...
32	$N = \left\lceil \frac{d}{b} \right\rceil$	$N = \left\lceil \frac{d}{W_s} \right\rceil$
33	$N = \left\lceil \frac{d}{(F_B + 1)b} \right\rceil$	$N = \left\lceil \frac{d}{(F_B + 1)W_s} \right\rceil$
33	... das ruas, b das ruas, W_s ...
33	$F_B = \frac{W_B}{b}$	$F_B = \frac{W_B}{W_s}$
35	Δh_{basLIM}	$\Delta h_{baseLIM}$
35	$\Delta h_{base} \left(N, b \right) \approx g \left(N \right) \dots$	$\Delta h_{baseLIM} \left(N, b \right) \approx g \left(N \right) \dots$
36	$\Delta h_{base} \left(N, b \right) \approx g \left(N \right) \dots$	$\Delta h_{baseLIM} \left(N, b \right) \approx g \left(N \right) \dots$