Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Trabalho Final de Curso

# Comparação de Modelos de Propagação para Micro-células Urbanas em GSM 900 e 1 800

Pedro Oliveira nº38235

João Chaves nº39852

Lisboa, Maio/1999

# Trabalho realizado sob a orientação do professor: Luís M. Correia

Secção de Propagação e Radiação Departamento de Eng. Electrotécnica e de Computadores Instituto Superior Técnico

### AGRADECIMENTOS

Agradecemos, em primeiro lugar, ao Prof. Luis Correia pelo apoio prestado ao longo destes meses, bem como pela disponibilidade que sempre demonstrou.

Agradecemos à Telecel, sem a colaboração da qual não teria sido possível realizar as medidas de sinal.

Agradecemos à Rita pela indispensável ajuda na realização das medidas.

Agradecemos à D. Isabel e à D. Olívia, as quais estiveram sempre disponíveis para aquilo que precisássemos.

Por último, não podemos deixar de agradecer aos nossos colegas de sala que sempre nos tentavam para o diálogo e com os quais partilhámos excelentes momentos de diversão.

### RESUMO

Pretende-se com este trabalho comparar modelos de propagação para micro-células urbanas em GSM 900 e 1 800, isto é, nas bandas de 900 e 1 800 MHz, com o objectivo de testar o seu comportamento nas duas bandas de frequência. Para tal, realizou-se uma campanha de medidas de sinal, com a colaboração do operador de GSM Telecel, em duas zonas distintas da cidade de Lisboa: Arco Cego e Avenidas Novas.

O estudo incide sobre os modelos de Ikegami, Walfisch *and* Bertoni, Xia *and* Bertoni e COST 231 Walfisch-Ikegami. A influência dos cruzamentos na potência média recebida no terminal móvel é determinada pelo modelo desenvolvido por Gonçalves. Para obter as previsões de sinal fornecidas pelos modelos, usou-se uma ferramenta de cálculo em C++ desenvolvida por Claro e Ferreira.

Comparando os valores teóricos e experimentais, verifica-se que na zona do Arco Cego obtiveram-se valores para a média do erro absoluto entre 3.9 e 35.3 dB a 900 MHz e 3.6 e 39.2 dB para 1 800 MHz; os valores médios globais são iguais para as duas bandas, 15 dB. O desvio padrão varia entre 3.2 e 9.7 dB a 900 MHz, com 6.5 dB de média, e 2.5 e 10.1 dB a 1 800 MHz, com 6.3 dB de média. Nas Avenidas Novas a média do erro absoluto apresenta valores entre 5.8 e 18.0 dB a 900 MHz, com 12.0 dB de valor médio, e 5.1 e 16.7 dB a 1 800 MHz, com valor médio de 9.9 dB. O desvio padrão varia entre 5.6 e 18.5 dB para 900 MHz, em média 9.6 dB, e 4.3 e 17.7 dB para 1 800 MHz, com 8.2 dB de média. Os valores elevados dos erros são devidos à utilização dos modelos fora das sua condições normais de aplicabilidade.

Para a diferença entre resultados experimentais de atenuação de propagação nas duas bandas, obteve-se para o Arco Cego um valor médio absoluto de 7.8 dB e para as Avenidas Novas 9.3 dB, o que está de acordo com o previsto teoricamente. Relativamente ao factor de decaimento médio da potência verificou-se que este pode afastar-se muito do previsto, se as condições não forem as ideais para a sua determinação.

Para além dos erros inerentes às medidas verificou-se que os piores resultados acontecem para ruas com ângulos de rua pequenos, isto é, inferiores a 20°, fracamente iluminadas pela antena da estação base e/ou que apresentam cenários de propagação muito variáveis ao longo do seu comprimento.

#### **PALAVRAS CHAVE:**

Sistemas celulares, GSM, Modelos de Propagação, Micro-células Urbanas, SIG.

### ABSTRACT

The purpose of this work is to compare propagation models for urban microcells in GSM 900 and 1 800, i.e., in the 900 and 1 800 MHz frequency bands, with the aim of testing their behaviour in both. With this objective in mind, a measurement campaign in cooperation with the Portuguese GSM operator Telecel was carried out in two distinct areas of Lisbon : "Arco Cego" and "Avenidas Novas".

The study focus on Ikegami's, Waifisch and Bertoni's, Xia and Bertoni's and COST 231 Walfisch-Ikegami's models. In order to account for the influence of crossroads in the received power, Gonçalves' model was used. To obtain the above models' prediction, a software tool developed in the C++ programming language by Claro and Ferreira was used.

When comparing theoretical with experimental results, values of the mean absolute error for "Arco Cego"'s area between 3.9 and 35.3 dB at 900 MHz and 3.6 and 39.2 dB at 1 800 MHz were achieved; the average global values are equal for both bands, 15 dB. Standard deviation varies between 3.2 and 9.7 dB for 900 MHz, with an average value of 6.5 dB, and 2.5 and 10.1 dB for 1 800 MHz, with an average value of 6.3 dB. In the area of "Avenidas Novas" the mean absolute error takes values between 5.8 and 18.0 dB at 900 MHz, with an average value of 9.9 dB, while the standard deviation ranges between 5.6 and 18.5 dB at 900 MHz, with an average of 9.6 dB, and 4.3 and 17.7 dB at 1 800 MHz, with an average of 8.2 dB. The obtained errors were high due to the use of the propagation models out of the usual applicability conditions.

For the difference between experimental propagation losses in both bands, the obtained mean absolute values were 7.8 and 9.3 dB for "Arco Cego" and "Avenidas Novas", respectively. The results obtained for the mean power coefficient show that they can differ considerably from the expected values, between 2 and 5, if the models applicability conditions are not fulfilled.

Besides the errors concerning the field measurements, the worst results occur for street angles smaller than 20°, streets fairly iluminated by the Base Stations and/or streets with irregular propagation scenarios along their length.

#### **KEYWORDS:**

Celular Systems, GSM, Propagation Models, Urban Microcells, GIS

# ÍNDICE

RE	SUMO		vii
ÍN	DICE		ix
LIS	STA DE FI	GURAS	xi
LIS	STA DE TA	ABELAS	xix
LIS	STA DE SI	GLAS	xxi
LIS	STA DE SI	MBOLOS	xxii
1.	INTRODU	JÇÃO	1
2.	MODELC	OS DE PROPAGAÇÃO	3
	2.1 Consi	derações Iniciais	3
	2.2 Descr	ição de Modelos de Propagação	5
	2.2.1	Considerações Iniciais	5
	2.2.2	Modelo de Ikegami <i>et al</i>	6
	2.2.3	Modelo de Xia and Bertoni	9
	2.2.4	Modelo do COST 231 – Walfisch-Ikegami	13
	2.2.5	Modelo de Gonçalves	
	2.3 Análi	se de Parâmetros de Propagação	
	2.3.1	Decaimento Médio da Potência com a Distância	
	2.3.2	Variação da Atenuação de Propagação com a Frequência	
3.	APLICAÇ	CÃO DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO	
	3.1 Descr	ição da Ferramenta de Cálculo	
	3.1.1	Descrição Geral	29
	3.1.2	Ganho da Estação Base	
	3.1.3	Atenuação de Propagação	
	3.1.4	Estimativa dos Parâmetros de Propagação	
	3.2 Inform	nação Geográfica	
	3.2.1	Ferramentas de Análise e Representação	
	3.2.2	Escolha da Região de Estudo	
	3.2.3	Representação da Região de Estudo	
4.	CAMPAN	NHA DE MEDIDAS E ANÁLISES DE RESULTADOS	39
	4.1 Descr	ição da Campanha de Medidas	39
	411	Ruas Medidas	39

4.1.2 Equipamento e Programa de Aquisição Utilizados	41
4.1.3 Procedimentos de Medida	41
4.1.4 Tratamento das Medidas	42
4.2 Análise de Resultados	43
4.2.1 Considerações Iniciais	43
4.2.2 Comparação entre Valores Teóricos e Experimentais	45
4.2.2.1 Zona do Arco Cego	47
4.2.2.2 Zonas das Avenidas Novas	54
4.2.3 Comparação entre Valores Experimentais nas Duas Bandas	66
4.2.3.1 Zona do Arco Cego	68
4.2.3.2 Zona das Avenidas Novas	70
5. CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS	77
ANEXO A - Determinação de $L_p$ para o modelo de Ikegami <i>et al.</i>	79
ANEXO B - Modelo de Walfisch and Bertoni	83
ANEXO C - Aproximações de Maciel, Bertoni and Xia	89
ANEXO D - Variação de $n \operatorname{com} \Delta h_b$ , $w_B e f$ para o modelo de Xia and Bertoni	95
ANEXO E - Características das estações de base	99
ANEXO F - Diagrama de radiação das antenas das estações de base	103
ANEXO G - Representação de características geográficas com IDRISI	109
ANEXO H - Mapas das ruas estudadas	115
ANEXO I - Fotografias	123
ANEXO J - Parâmetros característicos das ruas estimados pela ferramenta de cálculo	131
ANEXO L - Parâmetros estatísticos para a diferença entre as potências	
recebida teórica e experimental	141
ANEXO M - Medidas e previsões da potência recebida para as zonas estudadas	149
ANEXO N - Representação em MICROSTATION das medidas e previsões	
da potência recebida para as zonas estudadas	179
ANEXO O - Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de	
propagação experimental nas bandas 900 MHz e 1800 MHz	199
ANEXO P - Atenuação de propagação experimental em função da distância	205
ANEXO Q - Representação em MICROSTATION da atenuação de	
propagação experimental para as zonas estudadas	223
ANEXO R - Gráficos auxiliares	235

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Geometria dos dois raios principais considerados no modelo de Ikegami	6
Fig. 2.2 - Perfil do percurso do sinal entre a estação de base e o móvel	7
Fig. 2.3 - Cenário idealizado para propagação em UHF na presença de edifícios	9
Fig. 2.4 - Geometria do cruzamento estudado no Modelo de Gonçalves	16
Fig. 2.5 - Redução da atenuação de propagação devida à influência do cruzamento,	
para $\varphi_c = 90^\circ$ , $d_c = 500$ m, $w_c = 25$ m e $\Delta h_b = 3$ m	17
Fig. 3.1 - Esquema tridimensional de extrapolação do ganho da antena	
na direcção do ponto P	
Fig. 3.2 – Região de Estudo	
Fig. 3.3 - Definição da Região de Estudo	37
Fig. 3.4 - Cota do Topo dos Edifícios na Região de Estudo	
Fig. 4.1 - Ruas medidas com as três EBs	40
Fig. 4.2 - Potência média recebida na Rua Brito Aranha para EB do	
Campo Pequeno, na banda de 900 MHz	49
Fig. 4.3 - Potência média recebida na Rua Brito Aranha para EB do	
Campo Pequeno, na banda de 1 800 MHz	49
Fig. 4.4 - Potência média recebida na Avenida Elias Garcia para a EB do	
Campo Pequeno, na banda de 900 MHz	56
Fig. 4.5 - Potência média recebida na Avenida Elias Garcia para a EB do	
Campo Pequeno, na banda de 1 800 MHz	56
Fig. 4.6 - Potência média recebida na Avenida da República para EB da	
República, na banda de 900 MHz	60
Fig. 4.7 - Potência média recebida na Avenida da República para EB da	
República, na banda de 1 800 MHz	60
Fig. 4.8 - Potência média recebida na Avenida Elias Garcia para EB de São	
Sebastião, a 900 MHz	64
Fig. 4.9 - Potência média recebida na Avenida Elias Garcia para EB de São	
Sebastião, a 1 800 MHz	64
Fig. B.1 - Difracção originada por uma série de semi-planos numa onda plana	85
<b>Fig. C.1</b> - Comparação entre os valores aproximados de $Q_M$ dados por (C.5) e (C.6)	92

<b>Fig. D.1 -</b> Variação do parâmetro $n \operatorname{com} \Delta h_b$ nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz	
para 10 filas de edifícios espaçadas de 50 m	97
<b>Fig. D.2 -</b> Variação do parâmetro $n \operatorname{com} \Delta h_b$ nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz	
para 20 filas de edifícios espaçadas de 25 m	97
Fig. F.1 - Diagrama de radiação no plano horizontal	105
Fig. F.2 - Diagrama de radiação no plano vertical	105
Fig. F.3 - Diagrama de radiação no plano horizontal	106
Fig. F.4 - Diagrama de radiação no plano vertical	106
Fig. F.5 - Diagrama de radiação no plano horizontal	107
Fig. F.6 - Diagrama de radiação no plano vertical	107
Fig. F.7 - Diagrama de radiação no plano horizontal	108
Fig. F.8 - Diagrama de radiação no plano vertical	108
Fig. G.1 - Cota do Terreno na Região de Lisboa (definição antiga)	111
Fig. G.2 - Altura dos edifícios na região de Lisboa (definição antiga)	111
Fig. G.3 - Cota do Terreno na Região de Lisboa	112
Fig. G.4 - Altura dos edifícios na Região de Lisboa	112
Fig. G.5 - Edifícios acima e abaixo da Estação Base Campo Pequeno	113
Fig. G.6 - Edifícios acima e abaixo da Estação Base República	113
Fig. G.7 - Edifícios acima e abaixo da Estação Base São Sebastião	114
Fig. H.1 - Ruas medidas com a EB do Campo Pequeno, para 1 800 MHz	117
Fig. H.2 - Ruas medidas com a EB do Campo Pequeno, para 900 MHz	118
Fig. H.3 - Ruas medidas com a EB da República, para 1 800 MHz	119
Fig. H.4 - Ruas medidas com a EB da República, para 900 MHz	120
Fig. H.5 - Ruas medidas com a EB de São Sebastião, para 1 800 MHz	121
Fig. H.6 - Ruas medidas com a EB de São Sebastião, para 900 MHz	122
Fig. I.1 - Equipamento de medida	125
Fig. I.2 - Exemplo de uma Rua tipo do Arco Cego (Rua Tomás Borba)	126
Fig. I.3 - Exemplo de uma Rua tipo do Arco Cego, onde se observa ao fundo	
o edifício da CGD (Rua Gomes da Silva (d))	127
Fig. I.4 - Exemplo de uma Rua tipo das Avenidas Novas (Av. Elias Garcia)	128
Fig. I.5 - Exemplo de uma Rua tipo das Avenidas Novas (Av. da República)	129
Fig. M.1 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Brito Aranha, EB D_C_PE_B	152
Fig. M.2 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Brito Aranha, EB C_PEQ_B	152
Fig. M.3 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Bacelar e Silva, EB D_C_PE_B	153

Fig. M.4 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Bacelar e Silva, EB C_PEQ_B153
Fig. M.5 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Costa Goodolfim, EB D_C_PE_B154
Fig. M.6 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Costa Goodolfim, EB C_PEQ_B154
Fig. M.7 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Gomes da Silva (d),
EB D_C_PE_B155
Fig. M.8 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Gomes da Silva (d), EB C_PEQ_B155
Fig. M.9 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Gomes da Silva (e),
EB D_C_PE_B <b>156</b>
Fig. M.10 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Gomes da Silva (e), EB C_PEQ_B156
Fig. M.11 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Reis Gomes, EB D_C_PE_B157
Fig. M.12 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Reis Gomes, EB C_PEQ_B157
Fig. M.13 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Vilhena Barbosa,
EB D_C_PE_B <b>158</b>
Fig. M.14 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Vilhena Barbosa, EB C_PEQ_B158
Fig. M.15 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Duque D'Ávila, EB D_C_PE_C159
Fig. M.16 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Duque D'Ávila, EB C_PEQ_C159
Fig. M.17 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Defensores de Chaves,
EB D_ C_PE_C <b>160</b>
Fig. M.18 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Defensores de Chaves,
EB C_PEQ_C <b>160</b>
Fig. M.19 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Elias Garcia, EB D_C_PE_C161
Fig. M.20 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Elias Garcia, EB C_PEQ_C161
Fig. M.21 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Miguel Bombarda,
EB D_C_PE_C <b>162</b>
Fig. M.22 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Miguel Bombarda, EB C_PEQ_C162
Fig. M.23 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. da República, EB D_C_PE_C163
Fig. M.24 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. da República, EB C_PEQ_C163
Fig. M.25 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Brito Aranha, EB DCS_RE_C164
Fig. M.26 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Brito Aranha, EB REPUBL_C164
Fig. M.27 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Cardoso Oliveira,
EB DCS_RE_C165
Fig. M.28 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Cardoso Oliveira, EB REPUBL_C165

Fig. M.29 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Gomes da Silva (d),	
EB DCS_RE_C	166
Fig. M.30 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Gomes da Silva (d),	
EB REPUBL_C	166
Fig. M.31 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Gomes da Silva (e),	
EB DCS_RE_C	167
Fig. M.32 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Gomes da Silva (e),	
EB REPUBL_C	.167
Fig. M.33 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Reis Gomes, EB DCS_RE_C	168
Fig. M.34 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Reis Gomes, EB REPUBL_C	168
Fig. M.35 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Tomás Borba, EB DCS_RE_C	169
Fig. M.36 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Tomás Borba, EB REPUBL_C	169
Fig. M.37 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Vilhena Barbosa,	
EB DCS_RE_C	170
Fig. M.38 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Vilhena Barbosa, EB REPUBL_C	170
Fig. M.39 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Rua Xavier Cordeiro,	
EB DCS_RE_C	171
Fig. M.40 - Potência recebida a 900 MHz para a Rua Xavier Cordeiro, EB REPUBL_C?	171
Fig. M.41 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. 5 de Outubro, EB DCS_RE_B	172
Fig. M.42 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. 5 de Outubro, EB REPUBL_B	172
Fig. M.43 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Elias Garcia, EB DCS_RE_C	173
Fig. M.44 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Elias Garcia, EB REPUBL_C	173
Fig. M.45 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Miguel Bombarda,	
EB DCS_RE_B	174
Fig. M.46 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Miguel Bombarda,	
EB REPUBL_B	.174
Fig. M.47 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. da República, EB DCS_RE_C	175
Fig. M.48 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. da República, EB REPUBL_C	175
Fig. M.49 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. 5 de Outubro, EB DCS_SE_A	176
Fig. M.50 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. 5 de Outubro, EB S_SEB_A	176
Fig. M.51 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Elias Garcia, EB DCS_SE_A	177
Fig. M.52 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Elias Garcia, EB S_SEB_A	177
Fig. M.53 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Marquês de Tomar,	
EB DCS_SE_A	178

Fig. M.54 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Marquês de Tomar,	
EB S_SEB_A	178
Fig. N.1 - Potência recebida experimental para a estação base do Campo Pequeno,	
em 1 800 MHz	181
Fig. N.2 - Potência recebida experimental para a estação base do Campo Pequeno,	
em 900 MHz	182
Fig. N.3 - Potência recebida experimental para a estação base da República,	
em 1 800 MHz	
Fig. N.4 - Potência recebida experimental para a estação base da República,	
em 900 MHz	184
Fig. N.5 - Potência recebida experimental para a estação base de São Sebastião,	
em 1 800 MHz	
Fig. N.6 - Potência recebida experimental para a estação base de São Sebastião,	
em 900 MHz	186
Fig. N.7 - Potência recebida experimental para a estação base do Campo Pequeno,	
em 1 800 MHz (nível de sensibilidade)	187
Fig. N.8 - Potência recebida experimental para a estação base do Campo Pequeno,	
em 900 MHz (nível de sensibilidade)	188
Fig. N.9 - Potência recebida experimental para a estação base da República,	
em 1 800 MHz (nível de sensibilidade)	189
Fig. N.10 - Potência recebida experimental para a estação base da República,	
em 900 MHz (nível de sensibilidade)	190
Fig. N.11 - Potência recebida experimental para a estação base de São Sebastião,	
em 1 800 MHz (nível de sensibilidade)	191
Fig. N.12 - Potência recebida experimental para a estação base de São Sebastião,	
em 900 MHz (nível de sensibilidade)	192
Fig. N.13 - Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebidas	
pelo TM, para a EB do Campo Pequeno, em 1 800 MHz	
Fig. N.14 - Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebidas	
pelo TM, para a EB do Campo Pequeno, em 900 MHz	194
Fig. N.15 - Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebidas	
pelo TM, para a EB da República, em 1 800 MHz	195

Fig. N.16 - Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebidas
pelo TM, para a EB da República, em 900 MHz <b>196</b>
Fig. N.17 - Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebidas
pelo TM, para a EB de São Sebastião, em 1 800 MHz <b>197</b>
Fig. N.18 - Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebidas
pelo TM, para a EB de São Sebastião, em 900 MHz198
Fig. P.1 - Atenuação de propagação para a Rua Brito Aranha, EB Campo Pequeno_B208
Fig. P.2 - Atenuação de propagação para a Rua Bacelar e Silva, EB Campo Pequeno_B208
Fig. P.3 - Atenuação de propagação para a Rua Costa Goodolfim,
EB Campo Pequeno_B <b>209</b>
Fig. P.4 - Atenuação de propagação para a Rua Gomes da Silva (d),
EB Campo Pequeno_B <b>209</b>
Fig. P.5 - Atenuação de propagação para a Rua Gomes da Silva (e),
EB Campo Pequeno_B210
Fig. P.6 - Atenuação de propagação para a Rua Reis Gomes, EB Campo Pequeno_B210
Fig. P.7 - Atenuação de propagação para a Rua Vilhena Barbosa,
EB Campo Pequeno_B211
Fig. P.8 - Atenuação de propagação para a Av. Duque D'Ávila, EB Campo Pequeno_C211
Fig. P.9 - Atenuação de propagação para a Av. Defensores de Chaves,
EB Campo Pequeno_C212
Fig. P.10 - Atenuação de propagação para a Av. Elias Garcia, EB Campo Pequeno_C212
Fig. P.11 - Atenuação de propagação para a Av. Miguel Bombarda,
EB Campo Pequeno_C213
Fig. P.12 - Atenuação de propagação para a Av. da República, EB Campo Pequeno_C213
Fig. P.13 - Atenuação de propagação para a Rua Brito Aranha, EB República_C214
Fig. P.14 - Atenuação de propagação para a Rua Cardoso Oliveira, EB República_C214
Fig. P.15 - Atenuação de propagação para a Rua Gomes da Silva (d), EB República_C215
Fig. P.16 - Atenuação de propagação para a Rua Gomes da Silva (e), EB República_C215
Fig. P.17 - Atenuação de propagação para a Rua Reis Gomes, EB República_C216
Fig. P.18 - Atenuação de propagação para a Rua Tomás Borba, EB República_C216
Fig. P.19 - Atenuação de propagação para a Rua Vilhena Barbosa, EB República_C217
Fig. P.20 - Atenuação de propagação para a Rua Xavier Cordeiro, EB República_C217
Fig. P.21 - Atenuação de propagação para a Av. Elias Garcia, EB República_C218
Fig. P.22 - Atenuação de propagação para a Av. Miguel Bombarda, EB República_B218

Fig. P.23 - Atenuação de propagação para a Av. da República, EB República_C	
Fig. P.24 - Atenuação de propagação para a Av. 5 de Outubro, EB República_C	219
Fig. P.25 – Atenuação de propagação para a Av. 5 de Outubro, EB República_C	
Fig. P.26 - Atenuação de propagação para a Av. Elias Garcia, EB São Sebastião_A	221
Fig. P.27 - Atenuação de propagação para a Av. Marquês e Tomar,	
EB São Sebastião_A	221
Fig. P.28 - Atenuação de propagação para a Av. 5 de Outubro, EB São Sebastião_A	
Fig. Q.1 - Atenuação de propagação experimental, para a EB do Campo Pequeno,	
em 1 800 MHz	
Fig. Q.2 - Atenuação de propagação experimental, para a EB do Campo Pequeno,	
em 900 MHz	
Fig. Q.3 - Atenuação de propagação experimental, para a EB da República,	
em 1 800 MHz	227
Fig. Q.4 - Atenuação de propagação experimental, para a EB da República,	
em 900 MHz	
Fig. Q.5 - Atenuação de propagação experimental, para a EB de São Sebastião,	
em 1 800 MHz	
Fig. Q.6 - Atenuação de propagação experimental, para a EB de São Sebastião,	
em 900 MHz	
Fig. Q.7 – Diferença entre a atenuação de propagação na banda de	
1 800 MHz e 900 MHz, para a EB do Campo Pequeno	231
Fig. Q.8 – Diferença entre a atenuação de propagação na banda de	
1 800 MHz e 900 MHz, para a EB da República	
Fig. Q.9 – Diferença entre a atenuação de propagação na banda de	
1 800 MHz e 900 MHz, para a EB de São Sebastião	233
Fig. R.1 – Perfil estação base – terminal móvel com CGD e sem CGD,	
para $d_via = 56$ m e $d_via = 57$ m	
Fig. R.2 – Perfil para dois pontos consecutivos da Rua Brito Aranha	
Fig. R.3 – Ganho das antenas da estação base do Campo Pequeno ao longo	
da Avenida Elias Garcia para 900 MHz	238
Fig. R.4 – Ganho das antenas da estação base do Campo Pequeno ao longo	
da Avenida Elias Garcia para 1 800 MHz	238

<b>Fig. R.5</b> – Andamentos dos ângulos $\theta \in \phi$ ao longo da Avenida Elias Garcia	
para 900 MHz	239
<b>Fig. R.6</b> – Andamentos dos ângulos $\theta$ e $\phi$ ao longo da Avenida Elias Garcia	
para 1 800 MHz	239
Fig. R.7 – Ganho das antenas da estação base da República ao longo	
da Avenida da República para 900 MHz	240
Fig. R.8 – Ganho das antenas da estação base da República ao longo	
da Avenida da Repúblicapara 1 800 MHz	240
<b>Fig. R.9</b> – Andamentos dos ângulos $\theta \in \phi$ ao longo da Avenida da República	
para 900 MHz	241
<b>Fig. R.10</b> – Andamentos dos ângulos $\theta \in \phi$ ao longo da Avenida da República	
para 1 800 MHz	241
Fig. R.11 – Perfil para dois pontos consecutivos da Av. Elias Garcia	
para a estação base de São Sebastião	237

### LISTA DE TABELAS

Tab. 4.1 - Médias globais para a zona do Arco Cego	53
Tab. 4.2 - Médias globais para a zona das Avenidas Novas	66
<b>Tab. D.1 -</b> Variação do parâmetro <i>n</i> com $\Delta h_b$ nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz	
para 10 filas de edifícios espaçadas de 50 m	98
<b>Tab. D.2 -</b> Variação do parâmetro $n \operatorname{com} \Delta h_b$ nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz	
para 20 filas de edifícios espaçadas de 25 m	98
Tab. E.1 - Características das antenas das estações de base1	.01
Tab. J.1 - Parâmetros característicos das ruas na zona do Arco Cego para a EB do Campo	
Pequeno1	.33
Tab. J.2 - Parâmetros característicos das ruas na zona do Arco Cego para a EB do Campo	
Pequeno1	34
Tab. J.3 - Parâmetros característicos das ruas na zona do Arco Cego para a EB da	
República1	35
Tab. J.4 - Parâmetros característicos das ruas na zona do Arco Cego para a EB da	
República1	36
Tab. J.5 - Parâmetros característicos das ruas na zona das Avenidas Novas para a EB do	
Campo Pequeno1	37
Tab. J.6 - Parâmetros característicos das ruas na zona das Avenidas Novas para a EB da	
República1	38
Tab. J.7 - Parâmetros característicos das ruas na zona das Avenidas Novas para a EB de S.	
Sebastião1	39
Tab. L.1 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre a potência teórica e experimental	
recebida pelo TM na zona do Arco Cego para a EB Campo Pequeno1	43
Tab. L.2 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre a potência teórica e experimental	
recebida pelo TM na zona do Arco Cego para a EB República14	44
Tab. L.3 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre a potência teórica e experimental	
recebida pelo TM na zona das Avenidas Novas para a EB Campo	
Pequeno1	45

Tab. L.4 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre a potência teórica e experimental	
recebida pelo TM na zona das Avenidas Novas para a EB	
República	146
Tab. L.5 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre a potência teórica e experimental	
recebida pelo TM na zona das Avenidas Novas para a EB São	
Sebastião	147
Tab. O.1 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagação	
experimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz na zona do Arco Cego	
para EB Campo Pequeno	201
Tab. 0.2 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagação	
experimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz na zona do Arco Cego	
para EB República	202
Tab. O.3 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagação	
experimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz na zona das Avenidas	
Novas para EB Campo Pequeno	203
Tab. O.4 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagação	
experimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz na zona das Avenidas	
Novas para EB República	203
Tab. O.5 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagação	
experimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz na zona das Avenidas	
Novas para EB São Sebastião	204

### LISTA DE SIGLAS

- ARFCN Absolute Radio Frequency Channel Number
- **BSIC** Base transceiver Station Identity Code
- *CAD* Computer Aided Design
- COST European Cooperation in the field of Scientific and Technical research
- **EB** Estação Base
- *GSM* Global System for Mobile communications
- *OF* Óptica Física
- *SIG* Sistema de Informação Geográfica
- TGD Teoria Geométrica da Difracção
- *TM* Terminal Móvel
- *UHF* Ultra High Frequency
- *VHF* Very High Frequency

# LISTA DE SÍMBOLOS

- *d* Distância entre a estação de base e o móvel.
- $d_1$  Distância entre a estação de base e o último edifício que antecede o móvel.
- *f* Frequência.
- $h_b$  Altura da antena da estação de base em relação ao solo.
- $h_m$  Altura da antena do móvel em relação ao solo.
- $h_{roof}$  Nível médio do topo dos edifícios.
- $L_{msd}$  Atenuação provocada pelas múltiplas e sucessivas difracções nos topos dos edifícios, desde a estação de base até ao último edifício antes do móvel.
- *L<sub>p</sub>* Mediana da atenuação de propagação total.
- $L_{rts}$  Atenuação provocada pela difracção desde o topo do último edifício até ao móvel.
- $L_0$  Atenuação em espaço livre sofrida pelo sinal desde a estação de base até ao móvel.
- *M* Número de edifícios entre a estação de base e o móvel.
- *n* Factor de decaimento médio da potência com a distância.
- $n_f$  Factor de decaimento médio da potência com a frequência.
- $w_B$  Distância entre os centros de dois edifícios.
- *w<sub>m</sub>* Distância entre o edifício e o móvel.
- *w<sub>s</sub>* Largura das ruas.
- $\alpha$  Ângulo entre o raio incidente e a horizontal.
- $\varphi$  Ângulo de incidência na primeira linha de edifícios.
- $\lambda$  Comprimento de onda.
- $\boldsymbol{\theta}$  Ângulo de difracção entre o topo do último edifício e o móvel.
- $\rho$  Distância entre a antena da estação de base e o topo da primeira linha de edifícios.
- $\sigma$  Desvio padrão.
- $\phi$  Ângulo de rua, definido entre a direcção de propagação e a orientação da rua.
- $\Delta h_b$  Diferença de alturas entre a antena da estação de base e o nível médio dos edifícios
- $\Delta h_m$  Diferença de alturas entre o nível médio dos edifícios e a antena do móvel.

# 1. INTRODUÇÃO

"...Noutra cidade afectada por graves danos, Cumana, oito pessoas soterradas nos escombros de um edifício de seis andares pediram socorro usando os seus telefones celulares. As indicações fornecidas pelas vítimas aos bombeiros permitiram introduzir tubos de oxigénio entre os destroços e garantir a sua sobrevivência até ao resgate, que demorou várias horas ...."

#### em "Comunicações"

Esta situação, bem como muitas outras, ilustra a forte presença das comunicações móveis na sociedade contemporânea. Para além da segurança adicional que transmite ao seu utilizador, o telefone móvel é um bem essencial para quem pretende estar contactável em qualquer lugar e em qualquer instante. Não faltam, assim, razões que justifiquem o crescimento explosivo desta área nos últimos anos.

Apesar das limitações dos primeiros sistemas móveis convencionais e do elevado custo dos serviços, o crescimento da sua procura foi notável. No entanto, como estes sistemas serviam uma densidade baixa de utilizadores, possuíam fracos protocolos de sinalização e não permitiam expansão modular, começaram-se a materializar novas ideias conceptuais para o desenvolvimento de um sistema versátil, no qual os utilizadores pudessem utilizar os seus telefones móveis onde quer que estivessem. Os sistemas celulares constituem a concretização deste sonho.

Os sistemas de telefone celular, ao contrário dos sistemas convencionais, caracterizam-se por serem limitados pela interferência e por dividirem a área de serviço em pequenas células, o que permite o uso de estações de base com potências baixas, a reutilização de frequências e, portanto, um melhor aproveitamento do espectro. Para além disto, é agora possível a transferência de chamadas entre estações de base (*handover*) e a expansão do sistema de acordo com as necessidades correntes.

O aumento do número de utilizadores nos centros urbanos tem conduzido a uma diminuição da dimensão das células, evoluindo progressivamente o sistema para estruturas micro-celulares, o que permite o aumento da capacidade do sistema. Neste tipo de células, existe uma tendência cada vez maior para a colocação da antena da estação base abaixo do nível dos edifícios. Torna-se assim necessário o desenvolvimento de modelos teóricos cada vez mais precisos, que incorporem parâmetros descritivos do ambiente urbano em causa.

O desenvolvimento de bons modelos de propagação, com vista à previsão correcta do nível de sinal, é muito importante, pois permite prever as zonas limite onde o nível de sinal é mínimo e as zonas onde pode haver interferências, garantindo-se desta forma uma cobertura fiável e eficiente da área de serviço pretendida.

Actualmente, é utilizada em Portugal a norma de telefones celulares digitais móveis designada por GSM (*Global System for Mobile Communications*), que pode ser aplicada tanto na faixa dos 900 MHz como na dos 1 800 MHz, sendo esta última de aplicação recente e que constitui mais uma solução para o descongestionamento da rede.

Neste trabalho iremos analisar o comportamento de vários parâmetros e modelos existentes para as duas bandas, verificando as diferenças existentes. Este estudo é bastante útil para as operadoras de telefones celulares que se encontram a expandir as suas redes, uma vez que se pode tirar algumas conclusões sobre a possibilidade de aproveitamento do planeamento celular já efectuado para os 900 MHz.

Desta forma, no capítulo 2 é feita uma descrição dos modelos de propagação para micro-células urbanas, válidos nas bandas de 900 e 1 800 MHz, e das suas condições de aplicabilidade. Neste mesmo capítulo estuda-se em pormenor o decaimento médio da potência com a distância e a variação da atenuação de propagação com a frequência.

No terceiro capítulo começa-se por apresentar os modelos de propagação simulados e algumas aproximações usadas na simulação, nomeadamente na determinação do ganho da antena da estação base (EB). A simulação dos modelos de propagação permite prever teoricamente o nível de sinal para as várias ruas que se pretendem estudar, com o objectivo de comparar estes resultados teóricos com os resultados provenientes das medidas efectuadas nessas mesmas ruas. Em seguida referem-se as zonas de Lisboa onde recai o nosso estudo, Avenidas Novas e Arco-Cego, sendo feita uma descrição geográfica pormenorizada destas áreas, utilizando para tal uma ferramenta SIG (Sistema de Informação Geográfica).

O capítulo seguinte, capítulo 4, inicia-se com a descrição da campanha de medidas efectuada, onde se apresentam as EB e ruas estudadas, o equipamento utilizado e a forma como as medidas irão ser tratadas. Posteriormente analisam-se os resultados sob dois pontos de vista distintos: compara-se os resultados teóricos com os resultados experimentais, a nível da potência recebida no terminal móvel (TM), para cada uma das bandas de frequência, 900 e 1 800 MHz, e de seguida faz-se a comparação dos resultados experimentais, a nível da atenuação de propagação, entre as duas bandas.

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

### 2. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

### 2.1. Considerações Iniciais

Um passo importante no planeamento de um sistema de rádio móvel consiste na previsão do nível de sinal, a qual envolve a estimativa do valor mediano e da variação em torno deste. Torna-se assim possível, através desta estimativa, prever as zonas limite onde o nível de sinal é mínimo e as zonas onde pode haver interferências. Procura-se, desta forma, garantir uma cobertura fiável e eficiente da área de serviço pretendida.

A estimação correcta do sinal, e o desenvolvimento de modelos para o efeito, implica o conhecimento de todos os factores que influenciam a propagação do sinal. No entanto, não existe um modelo de aplicação genérico em todos os tipos de ambientes, frequências e parâmetros. Ao contrário, cada modelo possui as suas características e condições de validade, umas mais específicas que outras, resultando daí o seu domínio de aplicabilidade.

Convém referir também que o nível de sinal recebido varia quer no tempo quer com o local, sendo a variação espacial a predominante em comunicações móveis. Este tipo de fenómeno é conhecido por desvanecimento, lento ou rápido [1]. O desvanecimento lento, que corresponde a variações lentas do sinal (na ordem de muitas dezenas de comprimentos de onda) é caracterizado por uma distribuição log-normal e está associado a alterações do ambiente de propagação à medida que o TM se desloca através de grandes distâncias. O desvanecimento rápido, que corresponde a profundas variações do sinal, está associado à existência de múltiplos caminhos de propagação, provocando uma soma construtiva ou destrutiva dos vários sinais recebidos, segue aproximadamente uma distribuição de Rice ou Rayleigh, consoante a existência ou não de raio directo.

Dado que a contabilização de todos os factores que influenciam a propagação é praticamente impossível, iremos apenas estudar modelos de propagação que permitam estimar o andamento médio do sinal recebido, não considerando assim o desvanecimento rápido. Apesar dos operadores estarem mais interessados no valor médio do sinal, o desvanecimento rápido pode sempre ser contabilizado por uma margem de desvanecimento.

Os modelos de propagação dividem-se em duas categorias [2]: empíricos e teóricos. Os modelos empíricos baseiam-se em medidas efectuadas sob determinadas condições, conduzindo a curvas e equações que melhor se ajustam a essas medidas. Têm a vantagem de contabilizar todos os factores que afectam a propagação, mas necessitam de ser sujeitos a validação quando aplicados a locais, frequências e condições diferentes dos ambientes de medida. Os modelos teóricos, apesar de não contabilizarem todos os factores que afectam a propagação e de não terem em consideração o ambiente em que o TM se desloca, permitem uma fácil alteração dos parâmetros que caracterizam a área a servir. Actualmente, os modelos utilizados contemplam as perspectivas empírica e teórica, modelos semi-empíricos, uma vez que utilizam medidas efectuadas em determinados locais e sob determinadas condições de modo a melhorar os resultados dos modelos teóricos.

Futuros modelos de propagação irão considerar caminhos de propagação tridimensionais, utilizando métodos determinísticos como a Teoria Geométrica da Difracção (TGD) [2] e recorrendo a bases de dados geográficas contendo informações relativas a ruas, tamanho e formas dos edifícios. No entanto, estes modelos estão restringidos a áreas onde existam bases de dados muito pormenorizadas, sendo necessário utilizar ferramentas de cálculo bastante eficientes, uma vez que o tempo de processamento de toda esta informação é muito elevado.

No nosso trabalho, iremos considerar apenas modelos de propagação semi-empíricos e teóricos que utilizem percursos rádio bidimensionais (plano vertical que passa pela EB e o TM), válidos nas frequências e distâncias consideradas.

Nestes modelos de propagação a atenuação de propagação é dependente de vários parâmetros, tais como, distância de propagação entre a EB e o TM, frequência de trabalho, largura entre edifícios, altura do TM e da antena da EB, etc. Como pretendemos comparar modelos de propagação para GSM 900 e 1 800, tem interesse analisar o comportamento de vários parâmetros nestas duas bandas de frequências, permitindo verificar quais as diferenças existentes e de que forma o ambiente afecta a propagação do sinal desde a EB até ao TM. Este estudo é bastante importante para as operadoras de telefones celulares que se encontram a expandir as suas redes para a banda dos 1 800 MHz, uma vez que se pode tirar algumas conclusões sobre a viabilidade de se aproveitar o planeamento celular já efectuado para a banda dos 900 MHz.

Assim sendo, na secção 2.2 iremos descrever os modelos de propagação que utilizaremos no nosso estudo. Começamos por descrever o modelo teórico de Ikegami *et al.* [3] [4], que permite estimar o campo nas ruas de áreas urbanas, assumindo que o percurso entre a EB e o TM está obstruído por apenas um único obstáculo, aquele que antecede o TM. De seguida, estudamos o modelo de Xia and Bertoni [5], que já considera a existência de mais obstáculos no caminho de propagação, com alturas e espaçamentos uniformes, contabilizando fundamentalmente a atenuação devida à difracção existente no topo desses obstáculos. Este modelo surgiu na tentativa de ultrapassar algumas das limitações impostas pelo modelo de Walfisch and Bertoni [6], nomeadamente no que diz respeito ao tempo de cálculo e à imposição da colocação da antena da EB acima da linha dos edifícios. O modelo de Walfisch and Bertoni é apresentado no Anexo B. São também apresentadas algumas simplificações do modelo de Xia and Bertoni, propostas por Maciel, Bertoni e Xia [7] [8]. Estudaremos ainda o modelo do COST 231 – Walfisch-Ikegami [9] [10], baseado nos modelos apresentados por estes dois autores e sujeito a algumas correcções, introduzidas através de resultados experimentais. Por fim, analisa-se a influência dos cruzamentos no nível de sinal médio recebido, de acordo com o modelo de Gonçalves [11], a qual não é contabilizada pelos modelos anteriormente mencionados.

Posteriormente, na secção 2.3 será analisado e comparado o comportamento de alguns parâmetros de propagação nas duas bandas de frequência, nomeadamente o parâmetro n, que contabiliza a dependência da atenuação de propagação com a distância, e o parâmetro  $n_{f}$ , associado à dependência da atenuação com a frequência.

### 2.2. Descrição de Modelos de Propagação

#### 2.2.1. Considerações Iniciais

Nos modelos que iremos estudar, considera-se que a expressão da atenuação de propagação média é dependente de três termos distintos,

$$L_p \models L_0 \models L_{rts} \models L_{msd} \models L_$$

em que

- $L_0$  é a atenuação em espaço livre sofrida pelo sinal desde a EB até ao TM,
- *L<sub>rts</sub>* é a atenuação provocada pela difracção desde o topo do último edifício até ao TM, e
- *L<sub>msd</sub>* é a atenuação provocada pelas múltiplas e sucessivas difracções nos topos dos edifícios, desde a EB até ao último edifício antes do TM.

A (2.1) dever-se-á adicionar o termo correspondente ao modelo dos cruzamentos,  $L_{cruz}$ , que contabiliza a redução de atenuação que o sinal sofre quando se passa por um

cruzamento. A atenuação  $L_0$  é função do comprimento de onda,  $\lambda$ , e da distância entre a EB e o TM *d*, sendo dada pela seguinte expressão [1] [2]

$$L_0 \ [B] = 32.44 + 20 \log (I_{m}) + 20 \log (I_{m}) + 20 \log (I_{m})$$
(2.2)

#### 2.2.2. Modelo de Ikegami et al.

Ikegami *et al.* **[3]** desenvolveram um modelo teórico para estimar o campo nas ruas de áreas urbanas, assumindo que o percurso entre a EB e o TM está obstruído por um único obstáculo (edifício), aquele que imediatamente antecede o TM. Desta forma, considera-se propagação em espaço livre entre a EB e o último edifício, e que o campo incidente no topo deste é difractado até ao nível da rua, atingindo assim o TM.

O desenvolvimento do modelo baseia-se na Teoria de Raios da Óptica Geométrica [2], tendo os autores restringido o seu estudo a dois raios principais: um deles é o raio directamente difractado no topo do último edifício entre a EB e o TM e outro é o raio também difractado no topo deste edifício e que é reflectido de seguida no edifício a seguir ao TM, como se apresenta na Fig. 2.1.



Fig. 2.1 – Geometria dos dois raios principais considerados no modelo de Ikegami.

Assim, segundo Ikegami, os dois raios principais são suficientes para descrever a propagação das ondas na zona próxima do TM, com o pressuposto da soma das suas potências ser superior à soma das potências de todos os outros raios. Note-se que o modelo não exige

que a propagação seja perpendicular à rua onde está o TM, o que é contabilizado pelo ângulo de rua,  $\phi$ , definido entre a direcção de propagação e a orientação da rua.

Considerando, então, apenas os dois raios principais, o valor médio do campo eléctrico junto do TM,  $\overline{E}$ , é dado pela expressão:

$$\overline{E} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$
(2.3)

As duas componentes do campo podem ser deduzidas considerando as seguintes simplificações: existência de linha de vista entre a antena da EB e o topo do edifício onde ocorre a difracção (edifício anterior ao TM), condição já referida anteriormente; o edifício onde ocorre a difracção é substituído por uma lâmina infinitamente longa, perpendicular à direcção de propagação da onda.

De acordo com estes pressupostos, o perfil do percurso do sinal entre a EB e o TM pode ser representado como na Fig.2.2.



Fig. 2.2 – Perfil do percurso do sinal entre a EB e o TM.

As variáveis apresentadas na figura definem-se como:

- *d* distância entre a EB e o TM;
- $d_1$  distância entre a EB e o último edifício que antecede o TM;
- $h_m$  altura da antena do TM em relação ao solo;
- *h<sub>roof</sub>* nível médio dos edifícios;
- *w<sub>m</sub>* distância entre o edifício e o TM;

- *w<sub>s</sub>* largura das ruas;
- $\alpha$  ângulo entre o raio incidente e a horizontal.

As simplificações consideradas conduzirão a erros nos resultados: primeiro, porque não são contabilizadas as difracções nos restantes obstáculos que antecedem o TM; segundo, ao modelar o edifício por uma lâmina está a desprezar-se a atenuação introduzida pela geometria do obstáculo, assim como as suas características eléctricas.

Recorrendo ao Modelo do Obstáculo em Lâmina [2] e considerando válida a aproximação do campo médio total ser constante ao longo da secção transversal da rua [3], o que permite representá -lo pelo campo médio no centro da rua, obtém-se:

$$\overline{E} \ \mu_{B\mu V/m} = E_0 \ \mu_{B\mu V/m} + 5.8 + 10 \log \left( 1 + \frac{3}{L_r^2} \right) + 10 \log \langle v_s \rangle + 20 \log \langle v_{roof} - h_m \rangle - 10 \log \langle in \phi \rangle - 10 \log \langle v_{MHz} \rangle$$
(2.4)

sendo f a frequência de trabalho e  $L_r$  o parâmetro que contabiliza as perdas por reflexão, definido como o quociente entre a amplitude da onda incidente e da onda reflectida; tipicamente, toma valores médios entre 4 e 10 dB, de acordo com medidas nas bandas de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*) [3]. Convém ainda referir que, quando não se especifica as unidades das grandezas nas equações é sinal que estas estão nas suas unidades fundamentais.

A partir da expressão do campo é possível obter uma outra para a atenuação de propagação total. A dedução está feita no Anexo A e o resultado obtido é o seguinte:

$$L_{p} = 26.64 + 20 \log \langle l_{km} \rangle + 30 \log \langle l_{mHz} \rangle - 10 \log \left( 1 + \frac{3}{L_{r}^{2}} \right) - 10 \log \langle v_{s} \rangle + 20 \log \langle l_{roof} - h_{m} \rangle + 10 \log \langle in \phi \rangle$$
(2.5)

Note-se que esta expressão pode ser decomposta na soma :

$$L_p = L_0 + L_{rts} \tag{2.6}$$

em que  $L_0$  representa a atenuação de propagação em espaço livre entre a EB e o TM dada por (2.2) e  $L_{rts}$  representa a atenuação sofrida pelo sinal entre o topo daquele edifício e o TM, valendo

$$L_{rts} [B] = -5.8 + 10 \log (f_{HHz}) - 10 \log (1 + \frac{3}{L_r^2}) - 10 \log (v_s) + 20 \log (r_{roof} - h_m) + 10 \log (in \phi)$$

$$(2.7)$$

### 2.2.3. Modelo de Xia and Bertoni

Tal como se referiu anteriormente, o modelo de Xia and Bertoni surgiu na tentativa de resolver algumas da limitações do modelo de Walfisch and Bertoni, tais como: inexistência de expressões válidas para antenas da EB abaixo do nível do topo dos edifícios, situação cada vez mais usual em microcélulas; convergência apenas para um número elevado de obstáculos, quando as incidências são rasantes; e tempo de cálculo elevado.

Xia and Bertoni analisaram o problema e apresentaram um método que permite prever qual a atenuação provocada pelas múltiplas e sucessivas difracções nos topos dos edifícios [5], desde a EB até ao último edifício antes do TM, qualquer que seja a localização da antena da EB, e qualquer que seja o número de fileiras de edifícios. O ambiente considerado para a aplicação deste modelo é o apresentado na Fig. 2.3



Fig. 2.3 – Cenário idealizado para propagação em UHF na presença de edifícios.

Os parâmetros usados no modelo, definem-se da seguinte forma:

- *d* distância entre a EB e o TM;
- $h_b$  altura da antena da EB em relação ao solo;
- $h_m$  altura da antena do TM em relação ao solo;
- *h<sub>roof</sub>* nível médio dos edifícios;
- *M* número de filas de edifícios entre a EB e o TM;
- *w<sub>B</sub>* distância entre os centros de dois edifícios;
- $w_m$  distância entre o edifício M e o TM
- *w<sub>s</sub>* largura das ruas;
- $\Delta h_b$  diferença de alturas entre a antena da EB e o nível médio dos edifícios;
- $\Delta h_m$  diferença de alturas entre o nível médio dos edifícios e a antena do TM;
- $\alpha$  ângulo entre o raio incidente e a horizontal.

Como se verifica, o caminho de propagação entre a EB e o TM está interrompido por um conjunto de edifícios alinhados segundo filas paralelas, equiespaçadas em distância  $w_B$ , de altura uniforme  $h_{roof}$  e sobre terreno plano. Convém referir que estes modelos também podem ser aplicados em cenários onde não se verifique esta uniformidade, bastando para isso considerar como parâmetros as médias dos espaçamentos e das alturas que os edifícios possuem na realidade, dependendo de cada ambiente a qualidade desta aproximação.

Tal como no modelo de Walfisch and Bertoni, estes edifícios são simulados por um conjunto de semi-planos opacos paralelos de espessura desprezável, coincidentes com os centros dos edifícios, com uma altura uniforme, equidistantes e cuja separação é grande comparada com o comprimento de onda, condição esta perfeitamente aceitável dada as frequências de trabalho. Estudos efectuados [12] demostram que a aproximação de considerarmos as filas de edifícios como semi-planos de espessura desprezável conduz-nos a resultados bastante razoáveis quando a antena da EB está acima dos edifícios, sendo menos satisfatórios quando a antena está abaixo. Para incidências rasantes, a difracção no topo dos edifícios deixa de ser sensível às suas formas, sendo estes os casos em que a aproximação conduz a melhores resultados.

Xia and Bertoni utilizam a aproximação da OF (Óptica Física) e aplicam o método baseado nos integrais múltiplos de Kirchhoff-Huygens, exprimindo-os no entanto em termos de uma série onde intervêm as funções de Boersma [13], facilitando assim a implementação computacional do método e permitindo a sua aplicação para ângulos de incidência positivos ou negativos.

Segundo Xia and Bertoni, o factor que traduz a redução suplementar do campo devido ao fenómeno da múltipla difracção referido atrás,  $Q_M$ , pode ser expresso em termos das funções de Boersma  $I_{n,q}$ ,

$$Q_M = \sqrt{M} \left| \sum_{q=0}^{\infty} \frac{1}{q!} \cdot (2g_c \sqrt{j\pi})^q \cdot I_{M-1,q} \mathbf{\Psi}, q \right|$$
(2.8)

para M semi-planos (ou filas de edifícios). O parâmetro adimensional,  $g_c$ , é dado por

$$g_c = \Delta h_b \, \frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot w_B}} \tag{2.9}$$

onde

$$\Delta h_b = h_b - h_{roof} \tag{2.10}$$

traduz a diferença entre a altura da EB,  $h_b$ , e o nível médio do topo dos edifícios,  $h_{roof}$ . Assim, um ângulo de incidência negativo corresponde a  $g_c$  negativo, enquanto que um ângulo de incidência positivo dá origem a um  $g_c$  positivo. O valor de  $g_c$  aumenta com o aumento de  $\Delta h_b$ e da frequência f e com a diminuição de  $w_B$ .

Neste modelo, a atenuação de propagação é calculada através da expressão geral (2.1), onde se considera a existência dos três contribuições distintas para esse cálculo, as atenuações  $L_0$ , dada por (2.2),  $L_{rts}$  e  $L_{msd}$ .

De modo a calcular o termo correspondente à atenuação suplementar devida à difracção existente no último edifício,  $L_{rts}$ , Xia [8], considerando a geometria da Fig. 2.3, utilizou a TGD (Teoria Geométrica da Difracção) e chegou à seguinte expressão

$$L_{rts} [B] = -10 \log \left[ \frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right]$$
(2.11)

em que,

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta h_m}{w_m} \right) \tag{2.12}$$

representa o ângulo de difracção entre o topo do último edifício M e o TM e

$$r = \sqrt{\Delta h_m^2 + w_m^2} \tag{2.13}$$

traduz essa distância. Em (2.12) e (2.13),  $\Delta h_m$  é dado por

$$\Delta h_m = h_{roof} - h_m \tag{2.14}$$

Este valor representa o diferencial entre o nível médio do topo dos edifícios,  $h_{roof}$ , e a altura a que se encontra a antena do TM,  $h_m$ . A distância horizontal entre o edifício M e o TM,  $w_m$ , considera-se usualmente igual a  $w_B/2$ , assumindo que o TM se encontra no meio da rua. Em (2.11) inclui-se um factor de 2, de modo a representar a influência da média dos sinais provenientes dos raios indirectos, bem como do raio directo.

Segundo Xia and Bertoni a atenuação suplementar provocada pelas múltiplas e sucessivas difracções nos topos dos edifícios, desde a EB até ao último edifício M antes do TM,  $L_{msd}$ , é dada por

$$L_{msd} [B] = -10 \log \left( Q_M^2 \right)$$
(2.15)

onde  $Q_M$  é um factor dado por (2.8).

Esta expressão é geral, sendo válida qualquer que seja o número de obstáculos e qualquer altura da antena da EB. No entanto, como envolve cálculos muito complicados não é de fácil e rápida aplicação em ferramentas de planeamento celular. Como tal, foram desenvolvidos estudos de modo a simplificar esta versão. Maciel, Bertoni and Xia [7] e posteriormente Xia [8], apresentaram alguns resultados teóricos para o cálculo do factor  $Q_M$ , obtidos através da regressão de curvas calculadas numericamente através das expressões apresentadas por Xia and Bertoni, simplificando assim a expressão geral dada por (2.8). Estas aproximações consideram 3 localizações possíveis para a antena da EB: ao nível, acima e abaixo do nível de topo dos edifícios, e são apresentadas com detalhe no Anexo C. As expressões correspondentes a estas aproximações são

• Antena da EB ao Nível do Topo dos Edifícios

$$L_{msd} [B] = 60 - 20 \log \langle \psi_B \rangle = 20 \log \langle d [m] \rangle$$

$$(2.16)$$

Antena da EB Acima do Nível do Topo dos Edifícios

$$L_{msd} \quad B = \begin{cases} -20\log \left( .502g_p - 3.327g_p^2 + 0.962g_p^3 \right) & 0.01 < g_p < 0.459 \\ 0 & 0.459 \le g_p < 1 \end{cases}$$
(2.17)

onde  $g_p$  é uma parâmetro adimensional dado por

$$g_p = \tan^{-1} \left( \frac{h_b - h_{roof}}{d} \right) \sqrt{\frac{w_B}{\lambda}}$$
(2.18)

#### • Antena da EB Abaixo do Nível do Topo dos Edifícios

$$L_{msd} [B] = 51.19 - 20 \log \langle w_B \rangle + 20 \log \left(1 - \frac{1}{M}\right) + 20 \log \langle \psi_{[m]} \rangle + 10 \log \langle \psi_{[MHz]} \rangle + 10 \log \langle \phi_{[m]} \rangle - 20 \log \left(\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{2\pi + \varphi}\right)$$

$$(2.19)$$

#### 2.2.4. Modelo do COST 231 – Walfisch-Ikegami

Tal como foi referido, os modelos de Ikegami e de Walfisch-Bertoni estão restringidos, por definição, a percursos rádio obstruídos por edifícios, não sendo, portanto, aplicáveis quando existe linha de vista entre a EB e o TM.

O projecto Europeu COST 231 [9] e [10] desenvolveu um modelo para estimar a atenuação de propagação em ambientes urbanos nas bandas de 900 e 1 800 MHz que conjuga os modelos de Ikegami e de Walfisch and Bertoni com os resultados de medidas realizadas na cidade de Estocolmo. Desta forma, o modelo contabiliza as perdas em espaço livre,  $L_0$ , as

perdas por difracção entre a EB e o topo do último edifício anterior ao TM,  $L_{msd}$ , e as perdas desde o topo deste último edifício até ao TM,  $L_{rts}$ . Para além disso, considera também a hipótese de existência de linha de vista e a colocação da antena da EB abaixo do nível dos edifícios.

Em micro-células urbanas, as ruas formadas por blocos contínuos de edifícios originam aquilo a que se chama um "desfiladeiro dieléctrico". Neste tipo de ambiente, quando a propagação se faz na direcção de uma rua ( $\Phi = 0$ ) e existe linha de vista, vem:

$$L_{p}$$
 [B] = 42.6 + 26 log( $d$  [m] + 20 log( $f$  [Hz]) , d > 0.02 km (2.20)

Nos restantes casos, a atenuação de propagação é composta por três termos e está restringida à atenuação de espaço livre:

$$L_{p} \blacksquare = \begin{cases} L_{0} \blacksquare \dashv L_{rts} \blacksquare \dashv L_{msd} \blacksquare \dashv L_{msd} \blacksquare \dashv L_{msd} \blacksquare \dashv L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{0} \blacksquare \dashv L_{0} \blacksquare \dashv L_{rts} + L_{msd} \le 0 \end{cases}$$

$$(2.21)$$

em que  $L_0$  é dado por (2.2) e  $L_{rts}$ , baseada no modelo de Ikegami, é dada por:

$$L_{rts} \ [B] = -16.9 - 10 \log(w_s) + 10 \log(f \ [MHz]] + 20 \log(\Delta h_m) + L_{ori} \ [B] = (2.22)$$

em que  $L_{ori}$  traduz a dependência da atenuação com o ângulo de incidência relativo à direcção da rua,  $\phi$ :

$$L_{ori} \quad \mathbf{B} = \begin{cases} -10.0 + 0.354 \cdot \phi \mathbf{b} \\ 2.5 + 0.075 \cdot (\phi \mathbf{b} + 35) \\ 4.0 - 0.114 \cdot (\phi \mathbf{b} + 55) \end{cases}, \quad 35^{o} \le \phi \le 90^{o} \end{cases}$$
(2.23)

 $L_{msd}$  é determinada segundo o modelo de Walfisch and Bertoni. No entanto, como este modelo falha quando  $h_b \le h_{roof}$ , o COST 231 introduziu correcções empíricas, vindo:

$$L_{msd} \models L_{bsh} \models L_{bsh} \models k_a + k_d \log(d \models m) + k_f \log(f \models Hz) - 9\log(w_B)$$
(2.24)

onde  $L_{bsh}$  e  $k_a$  são termos que contabilizam a variação da atenuação com a altura da antena da EB

$$L_{bsh} \mathbb{B} = \begin{cases} -18 \cdot \log(1 + \Delta h_b) &, \quad h_b > h_{roof} \\ 0 &, \quad h_b \le h_{roof} \end{cases}$$
(2.25)

$$k_{a} = \begin{cases} 54 & , h_{b} > h_{roof} \\ 54 - 0.8 \cdot (\Delta h_{b}) & , d \ge 0.5 \ km \\ 54 - 1.6 \cdot (\Delta h_{b}) \cdot d \ km \end{bmatrix} , d < 0.5 \ km \end{cases}$$
(2.26)

e  $k_d$  e  $k_f$  controlam a dependência de  $L_{msd}$  com a distância e com a frequência, respectivamente,

$$k_{d} = \begin{cases} 18 , h_{b} > h_{roof} \\ 18 - 15 \cdot \frac{\Delta h_{b}}{h_{roof}} , h_{b} \le h_{roof} \end{cases}$$

$$k_{f} = \begin{cases} -4 + 0.7 \cdot \left(\frac{f \mu_{Hz}}{925} - 1\right) , cidades \ medias \ e \ centros \ suburbanos \\ -4 + 1.5 \cdot \left(\frac{f \mu_{Hz}}{925} - 1\right) , centros \ urbanos \end{cases}$$

$$(2.27)$$

Este modelo é válido para:

- *f* ∈ [800, 2000] MHz.
- $h_b \in [4, 50]$  m.
- $h_m \in [1, 3]$  m.
- $d \in [0.02, 5]$  km.

e na ausência de dados concretos são recomendados os seguintes valores:

- $w_B \in [20, 50]$  m.
- $w_s = w_B/2$
- $h_{roof} = 3 \cdot (n^{\circ} \text{ de pisos}) + H_{\text{telhado}}$

• 
$$H_{telhado} = \begin{cases} 3 & , inclinado \\ 0 & , plano \end{cases}$$

```
• \phi = 90^{\circ}
```

A verificação do modelo para várias frequências e distâncias permitiu concluir que os erros previstos são maiores quando  $h_b \approx h_{roof}$ , em comparação com o caso  $h_b >> h_{roof}$ . O desempenho do modelo é ainda pior para  $h_b << h_{roof}$ .

### 2.2.5. Modelo de Gonçalves

Os modelos de propagação anteriormente descritos não contabilizam uma série de factores que afectam o nível de sinal recebido, nomeadamente a existência de cruzamentos nas diversas ruas. Esses modelos desprezam fenómenos de propagação guiada do sinal no interior de ruas laterais que cruzam o trajecto do TM e que originam um aumento no nível médio da potência recebida quando o TM atravessa o cruzamento.

Para contabilizar tais fenómenos, Gonçalves **[11]** desenvolveu uma expressão matemática para descrever o andamento do sinal na proximidade de um cruzamento, em função dos parâmetros geométricos que caracterizam o cenário de propagação.



Fig. 2.4 – Geometria do cruzamento estudado no Modelo de Gonçalves

Na Fig. 2.4 apresenta-se o cenário considerado com a indicação dos vários parâmetros geométricos, exceptuando a altura efectiva  $\Delta h_b$  que já foi definida anteriormente (ver Fig. 2.3). Para simplificar o estudo, considerou-se que a rua principal (onde se desloca o TM) e a rua transversal possuem a mesma largura, isto é,  $w_p = w_t$ .

O modelo desenvolvido por Gonçalves permite obter o valor da redução da atenuação de propagação,  $L_{cruz}$ , para cenários regulares, a qual deverá ser adicionada à atenuação de propagação  $L_p$ . Verifica-se que, independentemente dos parâmetros geométricos, a curva que traduz a redução do sinal em função da distância do TM ao centro do cruzamento,  $d_{via}$ , apresenta sempre a mesma forma, tal como ilustrada na Fig. 2.5.



Fig. 2.5 – Redução da atenuação de propagação devida à influência do cruzamento, para  $\varphi_c = 90^\circ, d_c = 500 \text{ m}, w_c = 25 \text{ m} \text{ e} \Delta h_b = 3 \text{ m} (\text{extraído de [14]}).$ 

Verifica-se um decrescimento exponencial de  $L_{cruz}$  na zona em que a influência do cruzamento é mais significativa. Conhecidos os valores de  $\Delta L_{int}$ ,  $\Delta d_{int}$  e  $\Delta d_{ext}$  pode-se determinar  $L_{cruz}$  através de:

$$L_{cruz} \blacksquare_{B} = \begin{cases} 0 & |d_{via}| \ge \Delta d_{ext}/2 \\ -A_{M} \exp \left[18 \bigoplus_{via}/\Delta d_{ext}\right]^{2} & |d_{via}| \le \Delta d_{ext}/2 \\ \Delta L_{int} & |d_{via}| \le \Delta d_{int}/2 \end{cases}$$
(2.29)

em que:
$$A_M = -\Delta L_{\text{int}} \exp\left[\frac{1.5 \, \text{(}\Delta d_{\text{int}} \, / \, \Delta d_{\text{ext}} \, \frac{2}{2} \, \right]$$
(2.30)

Gonçalves determinou expressões para o cálculo de  $\Delta L_{int}$ ,  $\Delta d_{int}$  e  $\Delta d_{ext}$  em função dos parâmetros geométricos  $\varphi_c$ ,  $d_c$ ,  $w_c$  e  $\Delta h_b$ , as quais podem ser consultadas em [11].

Da análise feita por Claro e Ferreira **[14]**, verificou-se que a influência dos cruzamentos só se começa a fazer sentir para ângulos superiores a cerca de 60°, sendo máxima para  $\varphi_c = 90^\circ$ , isto é, quando a EB está alinhada com a rua transversal àquela em que o TM se desloca. No caso em que  $\varphi_c = 0^\circ$ , ou seja, a EB está alinhada com a rua onde o TM se desloca, a sua influência é nula.

# 2.3. Análise de Parâmetros de Propagação

### 2.3.1. Decaimento Médio da Potência com a Distância

O parâmetro *n* traduz o decaimento médio da potência com a distância, estando presente, desta forma, no coeficiente que afecta o termo correspondente à variação com a distância. A atenuação de propagação pode ser descrita na forma

$$L_{p} [B] = Const + 10 \cdot n \cdot \log (d)$$
(2.31)

ou seja, a atenuação de propagação aumenta 10.n dB por década com a distância.

Uma vez que o parâmetro *n* difere de modelo para modelo, vamos analisá-lo para cada um dos modelos estudados, verificando qual a contribuição de cada um dos termos da atenuação de propagação para o seu valor, quais as diferenças existentes entre os 900 MHz e 1 800 MHz, qual a sua dependência com os outros parâmetros de propagação e comparando, quando possível, o seu valor com resultados experimentais anteriormente efectuados.

### • Modelo de Ikegami et al.

Neste modelo a atenuação de propagação total,  $L_p$ , é dada por (2.5), em que o único termo dependente da distância, d, é o correspondente à atenuação em espaço livre,  $L_0$ . Isolando a dependência com d, obtém-se:

$$L_0 \models Const + 10 \cdot 2 \cdot \log (d) \implies n = 2$$
(2.32)

o que significa que a atenuação de propagação aumenta 20 dB por década, valor característico da atenuação em espaço livre, sendo esta variação independente da frequência.

De acordo com medidas realizadas na cidade de Kyoto, a uma frequência de 400 MHz, o parâmetro *n* vale 3.4. A diferença entre os resultados teórico e empírico parece estar relacionada com o facto de termos considerado no modelo teórico a existência de difracção apenas no último edifício antes do TM, o que geralmente se afasta da realidade, uma vez que existem outros edifícios que contribuem para a atenuação.

### • Modelo de Xia and Bertoni

Tal como foi referido anteriormente, neste modelo a atenuação de propagação total,  $L_p$ , é dada pela soma de (2.2),(2.11) e (2.15). Xia and Bertoni analisaram os andamentos de  $Q_M$  e chegaram à conclusão que o factor *n* está relacionado com a derivada logarítmica, *s*, dada por

$$s = -\log\left(\frac{Q_{M+1}}{Q_M}\right) / \log\left(\frac{M+1}{M}\right)$$
(2.33)

através de

$$n = 2 \cdot (1+s) = 2 + 2 \cdot s \tag{2.34}$$

em que o primeiro termo de (2.34) é referente  $L_0$ , que como se sabe tem a ela associada um factor de decaimento de potência igual a 2, e o segundo termo provém de  $L_{msd}$ . O termo  $L_{rts}$  não tem dependência com a distância.

Utilizando (2.33) e (2.34) em conjunto com (2.8), chega-se a uma expressão que é geral, válida qualquer que seja a altura da antena da EB e número de obstáculos, sendo interessante analisar qual o comportamento do parâmetro n com a variação da frequência, da altura da antena da EB e da separação entre filas de edifícios.

No Anexo D faz-se esse estudo para dois casos práticos, tendo-se chegado à conclusão que o parâmetro *n* depende da diferença de alturas entre a antena da EB e a linha de topo dos

edifícios,  $\Delta h_b$ , da frequência, *f*, e do espaçamento entre edifícios,  $w_B$ , variando entre 4.3 e 3.6 consoante os valores destes parâmetros. Nas simulações efectuadas, constata-se que existem pequeníssimas diferenças no valor de *n* entre as duas bandas.

Tem também interesse verificar se as expressões simplificadas apresentadas por Maciel *et al.* e Xia confirmam ou não estas conclusões. Analisa-se então de seguida as três localizações possíveis para a antena da EB que estas aproximações consideram.

### i) Antena da EB ao Nível do Topo dos Edifícios

Neste caso concreto temos,

$$L_{msd} \models Const + 10 \cdot 2 \cdot \log d$$
(2.35)

Considerando também o valor proveniente de  $L_0$ , n = 2, verifica-se um factor total de decaimento de potência igual a 4, estando este resultado em conformidade com o obtido através das expressões gerais (2.33), (2.34) e (2.8), não existindo diferenças entre as duas bandas de frequências.

#### ii) Antena da EB Acima do Nível do Topo dos Edifícios

A expressão de  $L_p$  válida para este caso particular é dada pela soma de (2.2), (2.11) e (2.17). A atenuação suplementar  $L_{msd}$  dada por (2.17) depende de  $Q_M$ , dada por (C.6), exibindo uma dependência não linear com  $g_p$ , (e consequentemente com d), não sendo possível extrair qual o valor do parâmetro n a ela associado. No entanto, como se verificou anteriormente através da Fig. C.1, para valores pequenos de  $g_p$  (aproximadamente menor que 0.3) o factor  $Q_M$  aproxima-se bastante da dependência linear dada por (C.5). Considerando esta dependência e tendo em conta que  $g_p$  é dado por (2.18), a atenuação de propagação  $L_p$ pode ser aproximada por

$$L_{p} \quad \text{IB} = -10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d}\right)^{2} - 10 \log \left[\frac{\lambda}{2\pi^{2}r} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta}\right)^{2}\right] - 20 \log \left[2.35 \left(\frac{\Delta h_{b}}{d} \sqrt{\frac{w_{B}}{\lambda}}\right)^{0.9}\right]$$
(2.36)

Considerando os termos dependentes da distância EB-TM, d, ficamos com

$$L_0 [B] = Const + 10 \cdot 2 \cdot \log \ (2.37)$$

$$L_{msd} \models Const + 10 \cdot 1.8 \cdot \log \P d$$
(2.38)

Neste caso, o factor total de decaimento de potência é igual a 3.8, valor este igual ao obtido pelo modelo de Walfisch and Bertoni, tal como já era previsto. Segundo esta aproximação, que é válida para valores pequenos de  $g_p$ , o valor de n é independente da frequência, do ângulo de incidência e da separação entre os edifícios, o que não é inteiramente correcto, como já tínhamos visto anteriormente

Para valores superiores de  $g_p$  a dependência  $Q_M(g_p)$  deixa de ser linear, sendo de esperar que o valor de *n* diminua à medida que o ângulo de incidência aumenta, tal como se pode concluir pelas expressões gerais (2.33), (2.34) e (2.8).

Medidas realizadas em terreno quase plano [6] mostram que a potência média do sinal apresenta a seguinte dependência com a distância:  $P \propto 1/d^n$ , em que 3 < n < 4. Verifica-se assim uma concordância entre o resultado teórico e o obtido empiricamente.

### iii) Antena da EB Abaixo do Nível do Topo dos Edifícios

Quando a incidência é negativa,  $L_p$  é aproximado por (2.19). O termo correspondente a  $L_{msd}$  pode ser apresentado na forma

$$L_{msd} \models Const + 10 \cdot 2 \cdot \log \mathcal{A}$$
(2.39)

o que origina uma dependência total com *d* na forma  $1/d^4$ , ou seja, n=4, devido à contribuição de  $L_0$ . No entanto, resultados experimentais mostram em geral que quando a antena da EB está localizada abaixo da linha dos edifícios, o factor *n* é ligeiramente superior a 4, facto este confirmado pelas Fig. D.1 e D.2.

### Modelo do COST 231 – Walfisch-Ikegami

No caso de existir linha de vista entre a EB e o TM e a propagação se fizer na direcção de uma rua, segundo (2.20) tem-se,

$$L_p [B] = Const + 10 \cdot 2.6 \cdot \log (d) \qquad \Rightarrow \quad n = 2.6 \qquad (2.40)$$

valor este independente da frequência.

Nos restantes casos, se for satisfeita a segunda condição de (2.21), em que a atenuação de propagação corresponde à atenuação em espaço livre, o valor de n é 2. Caso seja a primeira condição de (2.21) a satisfeita, o valor de n obtém-se de (2.2), (2.22) e (2.24). Uma vez que a contribuição de  $L_0$  já é conhecida, n = 2, resta determinar a contribuição de  $L_{msd}$ . Devido ao parâmetro  $k_d$  podemos distinguir duas situações:

### i) Antena da EB Acima do Nível do Topo dos Edifícios

$$L_{msd} \models Const + 10 \cdot 1.8 \cdot \log \checkmark d$$
(2.41)

Como seria de esperar, o valor n = 3.8 é idêntico ao obtido no modelo de Walfisch and Bertoni, verificando-se novamente independência do parâmetro com a frequência.

## ii) Antena da EB Abaixo do Nível do Topo dos Edifícios

$$L_{msd} \blacksquare = Const + 10 \cdot \left( 1.8 - 1.5 \frac{\Delta h_b}{h_{roof}} \right) \cdot \log \P d$$
(2.42)

e logo, o valor total de *n* será:

$$n = 3.8 - 1.5 \cdot \frac{h_b - h_{roof}}{h_{roof}} \tag{2.43}$$

De acordo com (2.43) para um dado valor de  $h_{roof}$ , o parâmetro n varia linearmente com  $h_b$ , o qual aumenta à medida que a altura da antena da EB se torna cada vez mais pequena, valendo 3.8 para  $\Delta h_b = 0$ . Considerando um valor máximo de  $h_{roof}=100$  m e um valor mínimo de  $h_b=4$  m chegamos a n=5.2, valor este que deve ser considerado o máximo. Mais uma vez, o parâmetro é invariante com a frequência. Com o objectivo de testar o modelo, foram realizadas medidas nas cidades de Mannheim, com uma estrutura urbana homogénea, e Darmstadt, que apresenta uma estrutura urbana irregular e pequenas ondulações no terreno.

Para Mannheim verificou-se que para  $h_b = 51.1 \text{ m} (\Delta h_b > 0)$  e  $\phi = 90^\circ$  obteve-se um valor de n = 3.64, próximo do coeficiente do modelo: 38 dB por década (n = 3.8). Para valores baixos de  $h_b$ , o coeficiente medido aumenta quando  $h_b$  diminui. Segundo o modelo, para  $\Delta h_b < 0$  o coeficiente de regressão também aumenta com a diminuição de  $h_b$ .

Na cidade de Darmstadt realizou-se um estudo semelhante ao anterior, mas agora com  $h_b = 19.7$  m (mantendo-se a frequência e o ângulo  $\phi$ ), obteve-se um coeficiente de regressão linear de 49.5 dB por década, ou seja, cerca de 10 dB por década superior ao do modelo e ao obtido com as medidas realizadas em Mannheim. A discrepância de valores está relacionada com a estrutura irregular da cidade de Darmstadt, que origina zonas de sombra devidas às variadas alturas dos edifícios e do próprio terreno, e também com o multipercurso.

### • Modelo de Gonçalves

Analisando as expressões de  $L_{cruz}$  (2.29) e (2.30) do modelo de Gonçalves, verifica-se que estas são independentes da distância entre a EB e o TM, *d*. Note-se que este modelo depende do parâmetro  $d_c$ , distância da EB ao centro do cruzamento, que sendo uma distância válida unicamente dentro do cruzamento, não tem influência no cálculo do parâmetro *n*. Deste modo, podemos concluir que no modelo de Gonçalves o parâmetro *n* vale 0.

### • Conclusões Gerais

Tendo em consideração os resultados obtidos anteriormente, podemos concluir que o parâmetro n varia entre 2.0 e 5.2, dependendo do modelo e condições de aplicabilidade consideradas. Os valores mais pequenos de n obtêm-se para condições favoráveis de propagação, em situações de linha de vista ou quando a antena da EB está muito acima do nível médio do topo dos edifícios. Por outro lado, os valores mais elevados de n são obtidos quando existem condições adversas de propagação, nomeadamente quando a antena da EB está situada abaixo do nível médio do topo dos edifícios.

# 2.3.2. Variação da Atenuação de Propagação com a Frequência

Como se verificou anteriormente aquando do estudo dos modelos de propagação, a atenuação de propagação é dependente da frequência, sendo possível caracterizar esta dependência na forma

$$L_p [B] = 10 \cdot n_f \cdot \log \P + Const$$
(2.44)

o que corresponde a um aumento da atenuação de propagação 10.nf dB por década.

Mais uma vez, iremos analisar a variação para cada um dos modelos estudados, verificando se o valor obtido é ou não dependente dos outros parâmetros de propagação.

### • Modelo de Ikegami et al.

A atenuação de propagação total é dada pela fórmula (2.5). Considerando apenas o termo que depende da frequência, tem-se:

$$L_p \downarrow_B = 30 \log \P + Const \qquad \Rightarrow n_f = 3 \qquad (2.45)$$

Verifica-se que a atenuação de propagação aumenta 30 dB por década com a frequência, o que corresponde a um aumento de 9 dB quando se passa de 900 MHz para 1 800 MHz. Note-se que, segundo o modelo, estes resultados não dependem de quaisquer outros parâmetros que caracterizam a propagação.

### • Modelo de Xia and Bertoni

No modelo de Xia and Bertoni a expressão geral da atenuação de propagação é dada pela soma de (2.2), (2.11) e (2.15). O termo associado à atenuação suplementar,  $L_{msd}$ , é uma série infinita das funções de Boersma, sendo difícil estimar qual a sua dependência com a frequência. Assim sendo, de modo a podermos fazer esta estimativa, iremos considerar as expressões simplificadas deduzidas por Maciel, Bertoni and Xia, dadas por (2.16), (2.17) e (2.19) e válidas nas condições então referidas.

### i) Antena da EB ao Nível do Topo dos Edifícios

Neste caso, em que  $\Delta h_b = 0 m$ , a atenuação de propagação total é dada por (2.16). Os únicos termos que dependem da frequência são os referentes a  $L_0$  e  $L_{rts}$ , sendo a atenuação  $L_{msd}$  independente da frequência. Isolando os termos dependentes da frequência obtém-se

$$L_p [B] = 30 \log (f) + Const \qquad \Rightarrow n_f = 3 \qquad (2.46)$$

Como se constata através de (2.16), a atenuação de propagação aumenta com a frequência 30 dB por década, sendo este valor independente de  $w_B$  e da distância *d*. Esta dependência dá origem a um acréscimo na atenuação de propagação na ordem dos 9 dB, quando se passa dos 900 MHz para os 1800 MHz.

### ii) Antena da EB Acima do Nível do Topo dos Edifícios

Quando a antena da EB se encontra nestas condições, a atenuação suplementar, dada pelo termo  $L_{msd}$ , foi simplificada para (2.17). Tal como se fez anteriormente, para valores pequenos de  $g_p$  ir-se-á considerar a dependência linear  $Q_M(g_p)$  apresentada por Walfisch and Bertoni, (C.5), sendo então a atenuação de propagação dada por (2.36). Isolando as dependências com a frequência ficamos com

$$L_{p} [B] = Const - 20\log\left(\frac{1}{f}\right) - 10\log\left(\frac{1}{f}\right) - 10\log\left(\frac{f}{f}\right) - 10\log\left(\frac{f}{f}\right) = 21\log\left(\frac{f}{f}\right) + Const \qquad \Rightarrow n_{f} = 2.1$$
(2.47)

Neste caso, a atenuação de propagação aumenta com a frequência 21 dB por década. No seu domínio de validade, valores pequenos de  $g_p$ , verifica-se que este valor é independente de  $w_B$ , da distância *d* e de quão positivo é o ângulo de incidência. Constata-se que a atenuação de propagação na frequência de 900 MHz é cerca de 6.3 dB inferior em relação à de 1 800 MHz. Comparando este resultado com o obtido para incidências rasantes, verifica-se que é cerca de 3 dB inferior, não sendo de esperar na prática esta descontinuidade.

# iii) Antena da EB Abaixo do Nível do Topo dos Edifícios

Neste caso particular a atenuação de propagação,  $L_p$ , é aproximada por (2.19), sendo

$$L_p \models 40\log(f) + Const \qquad \Rightarrow n_f = 4 \qquad (2.48)$$

o que traduz uma dependência com *f* na forma  $l/f^4$ , ou seja, a atenuação de propagação na banda dos 1 800 MHz é cerca de 12 dB superior àquela que se verifica nos 900 MHz. Mais uma vez, verifica-se que o valor obtido é independente de  $w_B$ , da distância *d* e de quão negativo é o ângulo de incidência. No entanto, é de notar que a precisão de (2.19) é superior para  $|\Delta h_b| > \sqrt{\lambda \cdot w_B}$ , sendo então de esperar que para ângulos de incidência menores a dependência da atenuação com a frequência seja menor que os 40 dB por década, aproximando-se progressivamente do valor obtido para a incidência rasante, os 30 dB por década.

### Modelo do COST 231 - Walfisch-Ikegami

Segundo o modelo do COST 231 vamos considerar duas situações possíveis.

#### i) Existência de linha de vista

Neste caso a atenuação de propagação é dada pela expressão (2.20). Simplificando:

$$L_p \downarrow_B = 20 \log \P f + Const \qquad \Rightarrow n_f = 2 \qquad (2.49)$$

Desta forma, a atenuação de propagação aumenta com a frequência 20 dB por década, o que significa que em 1 800 MHz é 6 dB superior à verificada nas mesmas condições em 900 MHz, e não depende dos restantes parâmetros.

ii) Restantes casos

Nos restantes casos a atenuação de propagação pode ser calculada recorrendo a (2.21). Quando  $L_{rts} + L_{msd} \leq 0$ ,  $L_p = L_0$  e portanto, tal como na situação anterior:

$$L_p \downarrow B = 20 \log \langle f \rangle + Const \qquad \Rightarrow n_f = 2 \qquad (2.50)$$

Assim, chega-se novamente ao resultado de 20 dB por década.

Quando  $L_{rts} + L_{msd} \ge 0$ , a atenuação de propagação, dada por (2.1) pode ser escrita como:

$$L_p \downarrow_B = 20\log \langle f \rangle + 10\log \langle f \rangle + k_f \log \langle f \rangle$$
(2.51)

O parâmetro  $k_f$ , dado por (2.28), depende do ambiente urbano. Assim, para cidades médias e centros suburbanos, o valor da atenuação de propagação em 1 800 MHz está cerca de 10 dB acima do valor verificado a 900 MHz para o mesmo tipo de ambiente. Para centros urbanos essa diferença sobe para cerca de 12.6 dB.

### • Modelo de Gonçalves

Mais uma vez, o modelo de Gonçalves não tem influência no cálculo do parâmetro  $n_f$ , uma vez que (2.29) e (2.30) são completamente independentes da frequência. Deste modo, temos que para este modelo  $n_f=0$ .

### • Conclusões Gerais

Analisando as expressões obtidas anteriormente, chegamos à conclusão que a gama de variação do parâmetro  $n_f$  é de 2.0 a 4.2, o que significa que a diferença entre atenuação de propagação a 1 800 MHz e 900 MHz está aproximadamente entre 6 dB e 12.6 dB, sendo os valores tanto mais pequenos quanto menos impedido estiver o cenário de propagação entre a EB e o TM.

# 3. APLICAÇÃO DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO

# 3.1. Descrição da Ferramenta de Cálculo

# 3.1.1. Descrição Geral

Os modelos de propagação apresentam características e condições de validade diferentes, dependendo daí o seu domínio de aplicabilidade. A aplicação destes modelos a cenários reais e a sua comparação com resultados experimentais é de vital importância, uma vez que permite retirar algumas conclusões sobre as suas limitações e potencialidades.

Para tal, neste trabalho é utilizada uma ferramenta de cálculo **[14]**, desenvolvida anteriormente no âmbito de trabalhos finais de curso, que permite simular estes modelos de propagação em ambientes reais na cidade de Lisboa. Convém referir que se pretende apenas fazer uso desta ferramenta, não estando no âmbito deste trabalho, melhorar ou reprogramar os modelos de propagação nela utilizados.

Esta ferramenta permite estimar qual a potência média recebida,  $P_r$ , pelo TM que se desloca ao longo de uma rua, utilizando para tal a seguinte expressão:

$$P_r [Bm] = P_e [Bm] + G_m [Bi] + G_b [Bi] - L_p [B]$$

$$(3.1)$$

em que

- $P_e$  é a potência emitida pela EB,
- $G_m \in G_b$  são o ganho do TM e da EB, respectivamente, e
- $L_p$  é a atenuação de propagação dada por (2.1) e descrita anteriormente.

Como dados de entrada para o programa tem-se:

- frequência de trabalho, f,
- coordenadas cartesianas, altura,  $h_b$ , e potência de emissão da EB,  $P_e$ ,
- ganho,  $G_m$ , e altura do TM,  $h_m$ ,
- factor de bloco, F<sub>B</sub>, definido pelo quociente entre a largura da fileira de edifícios e o espaçamento entre eles, L<sub>B</sub>/w<sub>B</sub>, estimado com base na análise das cartas topográficas da região de estudo, tendo-se em consideração o percurso EB-TM,
- resolução com que se pretende executar a simulação,

- módulo do factor de reflexão, / Γ /, utilizado no modelo de Ikegami e para o qual se assume um valor típico de 0.5, e
- largura, coordenadas iniciais e finais de cada troço que definem a rua a simular

O método de cálculo utilizado para a determinação do ganho da EB,  $G_b$ , da atenuação de propagação,  $L_p$ , e o modo como são estimados os diferentes parâmetros de propagação são descritos nas subsecções seguintes.

# 3.1.2. Ganho da EB

Devido a problemas de capacidade, associados ao aumento de tráfego, em centros urbanos a dimensão das células é cada vez mais pequena, estando a sua maioria sectorizadas e sendo as antenas utilizadas muito directivas. Além disso, de modo a minorar a interferência entre células, é usual as antenas possuírem *downtilt*, inclinação para baixo do lobo principal, eléctrico e/ou mecânico. Desta forma, é necessário contabilizar com alguma precisão a variação do ganho da antena à medida que o TM se desloca ao longo ao rua.

Usualmente, é fornecido pelos fabricantes o diagrama de radiação das antenas no plano vertical e no plano horizontal, não se sabendo ao certo qual o ganho da antena num plano tridimensional, segundo um ponto *P* definido pelos ângulos  $\phi \in \theta$ , em que  $\phi \in \phi$  ângulo entre a direcção do azimute e do ponto *P*, enquanto que  $\theta \in \phi$  ângulo entre a direcção do *downtilt* e do ponto *P*.



Fig. 3.1 – Esquema tridimensional de extrapolação do ganho da antena na direcção do ponto *P* (extraído de [12])

O ganho da antena nessa direcção é dado pelo método de extrapolação

$$G_{b} = \frac{\oint_{1} G_{\phi^{2}} + \phi_{2} G_{\phi^{1}} \frac{-\theta_{1} \theta_{2}}{(\theta_{1} + \theta_{2})^{2}} + \oint_{1} G_{\theta^{2}} + \theta_{2} G_{\theta^{1}} \frac{-\phi_{1} \phi_{2}}{(\phi_{1} + \phi_{2})^{2}}}{(\phi_{1} + \phi_{2})^{2} + (\phi_{1} + \theta_{2})^{2} + (\phi_{1} + \phi_{2})^{2}}$$
(3.2)

em que é utilizada a geometria da Fig.3.1, devidamente explicada em [14],

O cálculo do ganho da EB é efectuado a partir dos ficheiros com informação relativa aos diagramas de radiação no plano vertical e horizontal das antenas, e pode ser realizado segundo duas direcções: na direcção do edifício mais alto visto da EB, ou na direcção da rua em que se encontra o TM. A primeira alternativa é a mais utilizada, uma vez que é nessa direcção que tem origem o sinal que se difracta ao longo dos edifícios antes de chegar ao TM. A segunda alternativa só é utilizada quando a rua estudada está em linha de vista com a antena da EB.

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

# 3.1.3. Atenuação de Propagação

Para o cálculo da atenuação de propagação,  $L_p$ , o programa considera a expressão (2.1), adoptando a filosofia utilizada pelo modelo do COST 231, ou seja, utiliza os modelos que se adaptam melhor ao cálculo individual de cada um dos termos  $L_0$ ,  $L_{rts}$ ,  $L_{msd}$  e  $L_{cruz}$ .

Para o cálculo da atenuação em espaço livre,  $L_0$ , há que distinguir duas situações:

- existência de linha de vista, em que é utilizada (2.20) adoptada pelo modelo COST 231 – Walfisch–Bertoni,
- não existência de linha de vista, sendo a expressão geral (2.2) a utilizada.

O termo correspondente à atenuação provocada pela difracção desde o topo do último edifício até ao TM,  $L_{rts}$ , é baseado no modelo de Ikegami *et al.*, em que se utiliza (2.7).

O cálculo do termo  $L_{msd}$ , que contabiliza as difracções ocorridas nas fileiras de edifícios existentes entre a EB e o TM, é baseado no modelo de Xia-Bertoni. Deste modo, a expressão utilizada é a (2.15), onde intervêm as séries de Boersma, através do factor  $Q_M$  dado por (2.8). A convergência destas séries depende da diferença de alturas entre a antena da EB e

o topo dos edifícios,  $\Delta h_b$ , do número de fileiras de edifícios entre a EB e o TM, M, e do espaçamento entre eles,  $w_B$ , ou seja para um dado valor de M e  $w_B$ , (2.8) convergirá apenas para certos valores de  $\Delta h_b$  [14], que obedecem a

$$\left|\Delta h_b\right| \le \Delta h_{b\,\rm lim} \tag{3.3}$$

onde  $\Delta h_{b \ lim}$  obedece a

$$\Delta h_{b \, \text{lim}} \, \mathbf{M}, w_{B} = 5.056 + 15.152 \, e^{-M} + 0.165 \, \mathbf{W}_{B} - 7 ] \tag{3.4}$$

O valor de  $\Delta h_{b \ lim}$  será bastante aproximado valores de M = 20 e  $w_B = 7 \ m$ , sendo subestimado para valores inferiores de M e valores superiores de  $w_B$ , garantindo-se no entanto a convergência da série. Com base neste valor, o programa considera as seguintes situações:

- antena da EB ao nível do topo dos edifícios,  $\Delta h_b = 0 m$ , onde  $Q_M$  é dado por (C.1),
- antena da EB acima da linha de topo dos edifícios e  $\Delta h_b > \Delta h_{b \ lim}$ , com  $Q_M$  obtido através de (C.6), segundo a aproximação de Maciel, Bertoni and Xia,
- antena da EB abaixo do nível de topo dos edifícios e  $\Delta h_b < -\Delta h_b_{lim}$ , utiliza-se novamente a aproximação de Maciel, Bertoni and Xia, com  $Q_M$  dada por (C.8), e
- antena da EB colocada próxima do topo dos edifícios, verificando-se  $\Delta h_{b \ lim} < \Delta h_b < -\Delta h_{b \ lim}$ , sendo neste caso utilizada a expressão exacta (2.8).

Finalmente, para o calculo da atenuação de cruzamentos,  $L_{cruz}$ , o programa utiliza o modelo desenvolvido por Gonçalves através da expressão (2.29).

### 3.1.4. Estimativa dos Parâmetros de Propagação

Como se constata pelas expressões utilizadas para a estimativa da atenuação de propagação, estas utilizam vários parâmetros que caracterizam o ambiente de propagação que envolve o percurso EB – TM. De modo a estimar estes parâmetros, a ferramenta de cálculo utiliza três ficheiros que caracterizam geograficamente a área de estudo, o bloco.dat, o vias.dat e o cruzam.cruz.

O ficheiro bloco.dat é uma carta topográfica digital da região de Lisboa, com uma resolução de 50 m. Deste modo está definida uma grelha com quadrículas de 2 500  $m^2$ ,

contendo cada uma delas informação referente às suas coordenadas cartesianas, média da altura dos edifícios, média de cota do terreno e tipo de ocupação (edifícios, água ou árvores).

O ficheiro vias.dat caracteriza todas as ruas localizadas na região de estudo, contendo informação sobre o número de troços, as coordenadas cartesianas de início e fim de cada um deles, e finalmente as suas larguras.

Com estes ficheiros e com a informação que está disponível sobre a localização da EB e do TM, o programa pode estimar todos os parâmetros geométricos e determinar o perfil entre estes dois pontos. Quando algum dos pontos não coincide com os da grelha que definem a carta digital, as suas características são estimadas através dos quatro pontos que estiverem mais próximos, procurando-se assim aumentar a precisão da estimativa.

A altura média dos edifícios,  $h_{roof}$ , é estimada através da média das alturas dos edifícios que interrompem o primeiro elipsóide de Fresnel do raio directo entre a EB e o TM, procurando-se assim contabilizar apenas os edifícios que realmente interferem na propagação. Caso o programa não encontre nenhum edifício nestas condições considera  $h_{roof}=0$ , contabilizando somente o último edifício antes do TM.

Utilizando a mesma filosofia, para a estimativa do espaçamento entre edifícios,  $w_B$ , considera-se apenas a média da largura das ruas que cruzam os troços do perfil que intersectam o primeiro elipsóide de Fresnel.

O número de fileiras de edifícios, *M*, é estimado através de [14]

$$M = \left[\frac{d}{\langle \mathbf{F}_B + 1 \rangle \mathbf{w}_B}\right] \tag{3.5}$$

em que  $\lceil x \rceil$  significa o menor inteiro superior a x e  $F_B$  é o factor de bloco definido anteriormente. Deste modo procura-se estimar com maior precisão o número de obstáculos que se encontram entre o TM e a EB. No caso de o programa considerar que  $h_{roof}=0$ , assumese que o valor de M é igual a 1, ou seja, existe só uma fileira de edifícios entre a EB e o TM.

Para a estimativa da altura do último edifício antes do TM, considera-se que este se encontra a uma distância  $w_B/2$  do eixo da rua, sendo para esse ponto que se estima a altura.

Finalmente, o ficheiro cruzam.cruz contém toda a informação geográfica relativa aos cruzamentos das ruas a simular, ou seja, largura do cruzamento, w, distância EB – centro cruzamento,  $d_c$ , ângulo de entrada no cruzamento,  $\varphi_c$ , e diferença de alturas entre a EB e a altura média dos edifícios no perfil EB – centro cruzamento,  $\Delta h_b$ . Convém ainda referir que o

modelo de Gonçalves assume que as ruas que definem o cruzamento são perpendiculares e possuem a mesma largura, o que nem sempre se passa na realidade, resultando daqui uma possível fonte de erro no cálculo desta atenuação.

# 3.2. Informação Geográfica

# 3.2.1. Ferramentas de Análise e Representação

Como se verificou, os modelos de propagação dependem fortemente das características urbanas e geográficas dos cenários de propagação entre a EB e o TM, sendo os resultados das simulações afectados pelas precisão com que se modelam estas características. No presente trabalho, é utilizado um Sistema de Informação Geográfica (SIG) *RASTER*, designado *IDRISI* [15], por forma a visualizar, identificar e georeferenciar as características urbanas e geográficas das zonas a analisar.

Os SIGs são bastante poderosos no tipo de análise que permitem efectuar, sendo bastante úteis em projectos de telecomunicações, e em particular nas comunicações móveis. No presente trabalho, o *IDRISI* é utilizado essencialmente para caracterizar as cotas do terreno e altura de edifícios, identificação e localização de edifícios abaixo ou acima da linha de topo da antena da EB e traçado de perfis entre a EB e o TM.

Para além deste *software*, é também utilizada uma ferramenta de CAD (*Computer Aided Design*) denominada *MICROSTATION* [16], que permite representar e identificar algumas das características da nossa zona de estudo, em particular, a largura das ruas e a localização espacial dos eixos de vias dessas mesmas ruas. Este programa será também utilizado para representar os resultados experimentais e teóricos do conjunto de medidas e simulações efectuadas ao longo deste trabalho.

### 3.2.2. Escolha da Região de Estudo

A escolha das zonas em que irão ser testados os modelos de propagação é um passo importante na realização deste projecto, devendo estas satisfazer alguns requisitos:

 têm que estar localizadas próximas de EBs duais, ou seja, que emitam nas duas bandas de frequências, 900 MHz e 1 800 MHz,

- zonas com características distintas, que permitam retirar algumas conclusões sobre os cenários de aplicabilidade dos modelos nas duas bandas, e
- zonas em que o terreno seja aproximadamente plano e com uma estrutura urbana regular, satisfazendo assim as condições de aplicabilidade dos modelos.

Deste modo, considerando o mapa de EBs duais da Telecel, optou-se por escolher as duas zonas de estudo representadas na Fig. 3.2: a zona do Arco Cego (representada a verde), e a zona das Avenidas Novas (representada a azul). Estas duas zonas irão ser testadas utilizando as EBs do Campo Pequeno, da República e de São Sebastião, as quais se encontram devidamente descritas no Anexo E.



Fig. 3.2 – Região de Estudo

Estas duas zonas possuem características bastante distintas: o Arco Cego é caracterizado por apresentar uma estrutura urbana regular com ruas estreitas, pequenas, perpendiculares e com um único sentido. Estas ruas têm aproximadamente 10 m de largura e comprimentos entre 90 m e 300 m. Os edifícios são baixos, na sua maioria blocos de moradias de 2 e 3 andares, de 7 m a 12 m, em média com 11 m de altura; a zona das Avenidas Novas, embora também possua uma estrutura urbana regular, é formada por ruas bastante largas e compridas, com aproximadamente 25 a 60 m de largura e 500 a 1500 m de comprimento, e os seus edifícios são bastante mais altos. Estes apresentam uma gama de alturas muito mais vasta, existindo edifícios com cerca de 10 m e outros com 55 m, apresentando em média cerca de 25 m de altura.

As EBs utilizadas permitem-nos proceder a análises bastante interessantes. O percurso de propagação entre as EBs do Campo Pequeno e República e a zona do Arco Cego é bastante irregular. No primeiro caso, o percurso está obstruído por um edifício bastante largo e alto (40 m de altura e 80 m de largura, a Caixa Geral de Depósitos), muito diferente do écran de espessura desprezável que os modelos consideram. Por outro lado, tal como no segundo caso, as alturas dos edifícios alteram-se bastante no percurso EB-TM, o qual é constituído por edifícios altos junto da EB e edifícios baixos junto do TM, afastando-se mais uma vez da uniformidade considerada nos modelos. Será interessante verificar como os modelos se comportam nas duas bandas de frequência perante estas situações adversas.

Em contraste, o cenário de propagação entre a zona das Avenidas Novas e as três EBs é regular, ideal para estimar o parâmetro de decaimento médio da potência com a distância para as duas bandas em estudo, 900 MHz e 1 800 MHz.

# 3.2.3. Representação da Região de Estudo

Como foi referido anteriormente, os ficheiros utilizados pela ferramenta de cálculo para caracterizar e modelar esta zona de estudo são o bloco.dat e o vias.dat, sendo de todo o interesse que a informação neles contida seja o mais precisa possível.

O bloco.dat já estava implementado, na sequência de trabalhos finais de curso anteriores. No âmbito deste trabalho, o ficheiro foi transformado em formato IDRISI, podendo-se assim visualizar a precisão do levantamento realizado, nomeadamente na definição das cotas do terreno e das alturas dos edifícios. Estas duas figuras representativas de toda a região de Lisboa encontram-se no Anexo G. Como se verifica, a definição das cotas do terreno é bastante razoável, sendo facilmente identificáveis as zonas mais altas de Lisboa, como Monsanto, e as zonas mais baixas, junto ao rio Tejo. No entanto, a definição dos edifícios é bastante grosseira, tendo sido adoptada a mesma altura de edifícios para regiões muito extensas, fugindo à irregularidade de construções que existe na cidade de Lisboa.

Na tentativa de uma maior proximidade do real, redefiniu-se novamente o ficheiro bloco.dat para a zona de estudo agora abordada. Para tal, construiu-se manualmente uma grelha de quadrículas de 2 500 m<sup>2</sup> sobre as cartas topográficas do Exército de 1/10 000 da região de Lisboa, tendo sido calculada a média das alturas dos edifícios e das cotas do terreno que se encontram no interior de cada uma das quadrículas.

O resultado obtido é o apresentado na Fig. 3.3:



Fig. 3.3 – Definição da Região de Estudo.

Como se observa na Fig. 3.3 (a), existem edifícios no meio das ruas, situação que se afasta totalmente da realidade e que é devida à reduzida resolução da carta digital, quadrículas de 50 m de lado. De facto, a média das alturas dos edifícios é independente da área que este ocupam numa determinada quadrícula, não se contabilizando na carta digital se existem ou não ruas a atravessá-las. Uma precisão maior seria conseguida se a resolução da carta digital fosse muito superior. No entanto, a existência de ruas no cenário de propagação é contabilizada no ficheiro vias.dat, que em conjunto com os ficheiros bloco.dat e cruzam.cruz caracterizam com alguma precisão a região de estudo.

Verifica-se através da Fig. 3.3 (a) que na região do Arco Cego os edifícios são maioritariamente baixos, com alturas inferiores a 15 m, enquanto que na zona das Avenidas Novas são em geral muito mais altos, existindo edifícios com alturas de 60 m. Há agora uma maior proximidade com a realidade, sendo a altura dos edifícios muito mais variável. No entanto, nota-se que com esta nova definição existem muito mais descontinuidades de alturas, sendo interessante verificar como se comportam os modelos de propagação com estas situações. Convém ainda referir que a resolução de 50 m utilizada nestas cartas digitais origina alguns erros, sobretudo em zonas onde a altura dos edifícios varie bastante.

Relativamente às cotas do terreno, não foram realizadas grandes alterações, pois aproximavam-se bastante da realidade. Verifica-se na Fig. 3.3 (b) que as cotas do terreno não se alteram muito, sendo o seu valor mínimo de 55 m e o máximo de 100 m. Neste caso, os

erros associados à resolução da carta são mais pequenos, visto que as cotas não se alteram muito no interior de cada quadrícula de 2 500 m<sup>2</sup>. No Anexo G são apresentadas estas mesmas figuras mas relativamente a toda a região de Lisboa.

Apesar destas características serem importantes, o que os modelos de propagação consideram é a soma da altura dos edifícios com a cota do terreno, ou seja, a cota de topo dos edifícios, representada na Fig. 3.4



Cota do Topo dos Edifícios

Fig. 3.4 – Cota do Topo dos Edifícios na Região de Estudo

Verificam-se novamente cotas inferiores na região do Arco Cego e cotas superiores na região das Avenidas Novas. No Anexo G representam-se os edifícios cujo topo estão acima e abaixo do nível de topo das antenas das três EBs estudadas. Observa-se que é para a EB da República que existe um maior número de edifícios acima da antena, sendo para a EB do Campo Pequeno onde se verifica o menor número. Este facto é facilmente justificável pela cota das antenas, 106 m para a República, 115 m para São Sebastião e 126 m para o Campo Pequeno.

Por último, resta referir que foi com base na nova carta topográfica da região de Lisboa e utilizando o programa *MICROSTATION*, que se estimou a largura e coordenadas cartesianas dos troços de ruas que compreendem a região de estudo. Estes valores foram inseridos no ficheiro vias.dat, verificando-se que para a zona do Arco Cego as ruas tem uma largura de aproximadamente 10 m, enquanto que as Avenidas Novas tem 25 a 60 m de largura.

# 4. CAMPANHA DE MEDIDAS E ANÁLISE DE RESULTADOS

# 4.1. Descrição da Campanha de Medidas

A campanha de medidas foi realizada em colaboração com o operador de comunicações celulares Telecel, o qual forneceu o equipamento necessário à realização de medidas de sinal nas duas bandas de frequência.

Descreve-se nesta secção as várias ruas medidas para cada EB, assim como o equipamento usado na campanha de medidas. Retratam-se ainda as condições em que as medidas foram efectuadas e os procedimentos seguidos no tratamento dos dados obtidos.

# 4.1.1. Ruas Medidas

Uma vez que as EBs se encontram sectorizadas, foi escolhido, durante as medições, o sector que melhor cobria cada rua em particular. Os diagramas de radiação das antenas e os parâmetros que as caracterizam são apresentados nos Anexos F e E respectivamente.

Para a EB de São Sebastião as medidas foram todas feitas com o sector A e apenas na zona das Avenidas Novas. As avenidas analisadas foram a Elias Garcia, João Crisóstomo, Marquês de Tomar e 5 de Outubro.

Para a EB do Campo Pequeno, a zona das Avenidas Novas foi medida com o sector C e as avenidas escolhidas foram a Defensores de Chaves, Duque d'Ávila, Elias Garcia, Miguel Bombarda e República. Na zona do Arco Cego foram medidas com o sector B as ruas Bacelar e Silva, Brito Aranha, Costa Goodolfim, Gomes da Silva ((e)-esquerda e (d)-direita), Reis Gomes e Vilhena Barbosa.

Relativamente à EB da República, na zona das Avenidas Novas as avenidas Miguel Bombarda e 5 de Outubro foram medidas com o sector B enquanto que as avenidas Elias Garcia e República foram medidas com o sector C. Na zona do Arco – Cego as ruas Brito Aranha, Cardoso Oliveira, Costa Goodolfim, Gomes da Silva (e) e (d), Reis Gomes, Tomás Borba, Vilhena Barbosa e Xavier Cordeiro foram medidas com o sector C.

Na Fig. 4.1 estão representadas todas as ruas medidas, as EBs e sectores utilizados durante a campanha de medidas.

No Anexo H representa-se em pormenor quais os troços e direcções com que foram percorridas as ruas para cada uma das frequências e EBs utilizadas.

# 4.1.2. Equipamento e Programa de Aquisição utilizados

O equipamento utilizado na realização das medidas foi cedido pela Telecel e dele fazia parte um computador pessoal portátil *Compaq* e dois telefones móveis *Ericsson*, um a funcionar na banda dos 900 MHz e o outro na dos 1 800 MHz.

O PC estava equipado com o *software* de medida *TEMS*, desenvolvido pela *Erisoft*. Este *software* permite a aquisição do nível de sinal proveniente de uma EB e, para tal, amostra temporalmente, em modo de chamada, o sinal recebido a um ritmo de cerca de 8 amostras por segundo. O programa possui uma boa interface com o utilizador, permitindo a este visualizar uma série de parâmetros associados à comunicação entre a EB e o TM. Dos vários tipos de informação fornecida pelo programa destacam-se:

- identificação da célula de serviço, isto é, da célula com que o TM comunica para realizar a chamada, e das seis células vizinhas com sinal mais forte;
- identificação das EBs medidas e das várias mensagens de controlo e sinalização trocadas entre a EB e o TM durante uma chamada;
- representação gráfica da potência recebida;
- indicação da ocorrência de handovers;
- inserção de *filemarks* no ficheiro de medida, útil para a identificação de cruzamentos, paragens nos semáforos ou qualquer outra informação adicional;
- registo dos valores medidos num ficheiro interno que pode ser convertido num ficheiro de texto.

# 4.1.3. Procedimentos de Medida

Uma vez que a zona das Avenidas Novas é formada por ruas muito longas, foi necessário efectuar as medidas de automóvel. Todo o equipamento foi transportado no interior do veículo, tendo-se colocado os TMs a uma altura de cerca de 1.5 m em relação ao solo.

As medidas foram realizadas com o TM em modo contínuo de chamada, pois caso contrário o número de amostras obtidas poderia não ser suficiente para permitir a análise desejada dos resultados, nomeadamente nas ruas mais pequenas. Para tal, foi efectuada uma chamada para um número fornecido pela Telecel correspondente a uma gravação de cerca de 5 minutos. Essa chamada era automaticamente reestabelecida sempre que caísse ou que fossem atingidos os 5 minutos da sua duração. Para cada rua foi escolhida uma EB e um sector, tendo-se eliminado a possibilidade do sistema efectuar *handovers*, de modo a que as medidas obtidas fossem sempre referidas à mesma EB.

Devido a uma limitação do equipamento, não foi possível medir em simultâneo para as duas bandas o nível de sinal ao longo de uma rua. Assim, a rua teve de ser percorrida duas vezes, uma para se obter as medidas a 900 MHz e outra para os 1 800 MHz.

Procurou-se sempre manter a velocidade o mais constante possível, o que nem sempre foi conseguido devido a condicionalismos de trânsito. Tal necessidade fica-se a dever ao erro introduzido na determinação da posição do TM, que pode atingir as dezenas de metros, quando a velocidade varia em relação ao seu valor médio, o que pode ter como causa uma travagem ou um arranque.

Foi gravado um ficheiro, onde se marcaram os cruzamentos e as paragens nos semáforos, para cada uma das ruas medidas.

# 4.1.4. Tratamento das Medidas

Os ficheiros de saída, em formato ASCII, do programa *TEMS* foram processados utilizando o programa *Microsoft Excel*. No ficheiro de saída está registada informação sobre a célula de serviço e suas vizinhas. Cada linha de texto do ficheiro representa uma amostra de sinal. Da informação apresentada para cada amostra, destaca-se o instante de amostragem, o tipo de mensagem trocada entre a EB e o TM, a identificação das células através do par BSIC (*Base Transceiver Station Identity Code*) e ARFCN (*Absolute Radio Frequency Channel Number*), e o valor da potência recebida pelo TM.

A unidade de potência usada pelo *TEMS* é o RXLEV que indica o quanto o nível de potência recebida está acima de –110 dBm. Assim:

$$P_r \models RXLEV - 110 \tag{4.1}$$

Depois de obtidos os ficheiros de saída para cada uma das ruas (e correspondentes EBs), fez-se correr sobre eles uma *macro* em *Visual Basic for Applications*, desenvolvida por

Claro e Ferreira **[14]** para determinar a localização do TM ao longo da rua medida, pois as medidas foram efectuadas com amostragem temporal e não espacial, bem como a velocidade média com que foi percorrido cada um dos troços da rua. Este resultado permitiu associar a cada ponto da rua um valor de potência recebida.

Uma vez que os modelos teóricos fornecem apenas uma estimativa do valor médio do sinal, aplicou-se sobre os valores medidos o método da janela deslizante, o qual permite eliminar os efeitos do desvanecimento rápido nas referidas medidas. Este método 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 pretende calcular a potência média recebida. Para a dimensão da janela (comprimento do percurso em que é feita a média das medidas) utilizou-se o valor  $30\lambda$ , que corresponde a cerca de 10 m para a banda dos 900 MHz e 5 m para a banda dos 1 800 MHz.

Foi utilizada uma ferramenta CAD (*Computer Aided Design*), designada *MICROSTATION*, para apresentar resultados. Nela se representam, para cada EB, a potência recebida teórica, potência recebida experimental, atenuação de propagação a 900 MHz, atenuação de propagação a 1 800 MHz, a diferença entre as potências recebidas teórica e experimental, para 900 MHz e 1 800 MHz, a diferença entre as atenuações de propagação a 1800 MHz e ainda a sensibilidade, isto é, a verificação dos locais em que a potência recebida está acima ou abaixo de determinados limites de qualidade. Estas figuras podem ser observadas nos Anexos N e Q.

# 4.2. Análise de Resultados

# 4.2.1. Considerações Iniciais

Este trabalho tem como objectivo comparar modelos de propagação nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz. Deste modo, depois de se efectuar a campanha de medidas é necessário proceder-se a um conjunto de análises que nos permitam chegar a algumas conclusões sobre as principais diferenças entre as duas bandas.

Para tal, faz-se uma comparação nas duas bandas de frequência entre os valores teóricos estimados pelos modelos de propagação e os valores experimentais obtidos na campanha de medidas, analisando-se a potência média recebida pelo TM ao longo de uma via. Deste modo, pretende-se verificar quais as principais limitações de aplicabilidade dos

modelos e para que tipo de cenários se obtêm os melhores resultados, verificando quais as diferenças entre as duas bandas, 900 MHz e 1 800 MHz. Convém referir que a comparação dos resultados entre as duas bandas não tem como objectivo comparar os valores de potência recebida para os 900 MHz e 1 800 MHz, mas sim verificar se as condições de aplicabilidade dos modelos se modificam significativamente com a frequência.

Em seguida, verifica-se experimentalmente qual a dependência da potência recebida com a distância e com a frequência, os parâmetros  $n e n_f$ . O parâmetro n será estimado para cada rua, EB e frequência, sendo efectuado para tal uma regressão linear sobre a curva experimental da atenuação de propagação em função do logaritmo da distância EB – TM. A dependência com a frequência é calculada com base na diferença entre os valores experimentais da atenuação de propagação para 1 800 MHz e 900 MHz, sendo posteriormente estimado o valor de  $n_f$  através de (2.49). Os valores obtidos serão depois comparados com as previsões fornecidas pelos modelos de propagação e devidamente apresentadas na secção 2.3.

Para a estimativa da diferença entre os valores de *Lp* para as duas bandas e os erros entre as curvas teóricas e experimentais foram calculados alguns parâmetros estatísticos. Estes parâmetros foram calculados com base em

$$\Delta L_p = L_{p1800}^{\exp} - L_{p900}^{\exp}$$
(4.2)

que é a diferença entre a atenuação de propagação experimental nas duas bandas, e

$$\Delta P_r = P_r^{teo} - P_r^{exp} \tag{4.3}$$

que traduz a diferença entre a potência recebida estimada pelos modelos de propagação e a potência medida experimentalmente depois de filtrado o desvanecimento rápido.

Os parâmetros estatísticos utilizados foram:

- Média ( $\mu$ ):

$$\mu_{\mathbf{I}B} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \Delta X_i}{N_p}$$
(4.4)

onde,

 $\Delta X_i$  é dado por (4.2) ou (4.3) conforme a situação,

 $N_p$  é o número de pontos em que se comparam as duas curvas.

- Média do Módulo ( $\mu_{abs}$ ):

$$\mu_{abs} \lim_{[B]} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} |\Delta X_i|}{N_p}$$

$$(4.5)$$

- Desvio Padrão ( $\sigma$ ):

$$\sigma_{[B]} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} \langle X_i - \mu \rangle^2}{N_p}}$$
(4.6)

O parâmetro  $\mu$  traduz a média da diferença entre as duas curvas em análise, representado no caso da expressão (4.2) a média da diferença de atenuações entre as duas bandas, e para (4.3) o grau de sub ou sobreestimação da potência recebida por parte dos modelos teóricos de propagação. No entanto, este parâmetro pode assumir valores muito baixos mesmo quando as duas curvas se afastam muito uma da outra, bastando por exemplo que exista simetria entre as duas curvas. De modo a contornar este problema, utiliza-se o parâmetro $\mu_{abs}$ , que só é nulo quando as duas curvas coincidem exactamente. Por último, o desvio padrão,  $\sigma$ , traduz a diferença no andamento entre as duas curvas (sendo elevado quando as variações nas curvas são diferentes).

# 4.2.2. Comparação Entre Valores Teóricos e Experimentais

Nesta subsecção é efectuada uma comparação entre os valores de potência recebida estimada pelos modelos teóricos e a obtida experimentalmente durante a campanha de medidas. Para tal, utilizando a ferramenta de cálculo descrita na secção 3.1, estimou-se a potência recebida pelo TM ao longo das mesmas ruas, segundo as mesmas direcções e para as mesmas EBs e antenas da campanha de medidas. Estas simulações foram efectuadas com uma resolução de 1 m.

Como as duas áreas em estudo, Arco Cego e Avenidas Novas, apresentam características bastante distintas, optou-se por analisar os resultados separadamente para cada uma das zonas.

No Anexo M são apresentados para cada rua, EB e frequência gráficos da potência média recebida pelo TM (teórica e experimental) em função da distância percorrida ao longo da via. As curvas representadas são: a média das medidas da potência recebida, obtida através do método de janela deslizante com uma dimensão de janela de  $30\lambda$ , a potência teórica recebida estimada a partir da ferramenta de cálculo. Assim, as curvas apresentadas podem ser identificadas a partir das seguintes legendas, consoante se trate da banda de 900 MHz ou da banda de 1 800 MHz, respectivamente:



Além disso, são também apresentadas tabelas com informação detalhada sobre os erros  $\mu$ ,  $\mu_{abs}$  e  $\sigma$ , e parâmetros de propagação associados a cada uma das vias estudadas, nos Anexos L e J, respectivamente.

No Anexo R estão representados alguns gráficos auxiliares, nomeadamente, perfis e ganhos de antenas das EBs.

Os erros pontuais entre as medidas e os valores estimados pelos modelos para cada uma das EBs, nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz, representados em *MICROSTATION* são também apresentados no Anexo N. Convém referir que, como em termos espaciais os valores medidos não coincidem exactamente com os valores simulados pelos modelos, houve a necessidade de se elaborar um pequeno programa que estimasse para cada valor teórico qual o valor o experimental mais próximo, minimizando-se assim os erros associados a esta análise pontual.

#### 4.2.2.1. Zona do Arco Cego

Esta zona apresenta uma estrutura urbana regular com ruas estreitas e edifícios baixos e foi pormenorizadamente caracterizada na secção 3.2. Das três EBs em estudo, apenas a do Campo Pequeno e da República conseguem cobrir esta área, uma vez que São Sebastião está bastante distante, a cerca de 1000 m.

Convém ainda referir que nestas zonas a realização das medidas foi efectuada a uma velocidade aproximadamente constante, entre 10 km/h e 15 km/h, não existindo paragens em nenhuma das ruas. Com esta velocidade e com o ritmo de amostragem do *TEMS* obteve-se cerca de 2 a 3 amostras por cada metro percorrido ao longo da rua.

Analisam-se então de seguida os resultados pormenorizados de cada uma das EB.

### <u>EB Campo Pequeno</u>

Como foi referido anteriormente, para a EB do Campo Pequeno escolheu-se o sector B para a realização das medidas na zona do Arco Cego, visto ser este o sector que radia nessa direcção. As características detalhadas desta EB e das antenas utilizadas para 900 MHz e 1 800 MHz, estão descritas nos Anexos E e F. As ruas medidas foram Bacelar e Silva, Brito Aranha, Costa Goodolfim, Gomes da Silva (d) e (e), Reis Gomes e Vilhena Barbosa, com os sentidos indicados no Anexo H.

Relativamente aos resultados experimentais, observa-se através das Figs. N.1, N.2, N.7 e N.8 que na generalidade das ruas, a potência recebida para 900 MHz é superior à recebida para 1800 MHz, facto facilmente justificável pelos ERP emitidos nas duas bandas, 48.83 dBd para 900 MHz e 47.77 dBd para 1800 MHz, e pela menor atenuação que existe na banda de 900 MHz. Para 1 800 MHz a potência só é superior a –80 dBm para troços da Rua Brito Aranha e Rua Reis Gomes, enquanto que para a outra banda, só na Rua Vilhena Barbosa é que a potência é sempre inferior aos –80 dBm.

Analisando a Tabela L.1 verifica-se que as previsões teóricas feitas pelos modelos na sua generalidade sobrestimam a potência recebida pelo TM, apresentando erros elevados nas duas bandas de frequência. A média global dos parâmetros estatísticos  $\mu_{abs}$  e  $\sigma$  são, respectivamente, 17.3 dB e 6 .2 dB para os 900 MHz, e 15.5 dB e 5.4 dB nos 1 800 MHz. Estes elevados valores podem ser justificados pelo facto de o percurso de propagação entre a EB do Campo Pequeno e o TM afastar-se bastante do idealizado pelo modelos de propagação estudados. Na maioria das ruas, o percurso TM-EB está obstruído por um edifício localizado

perto da EB que é bastante largo e alto (129 m de altura e 80 m de largura, a Caixa Geral de Depósitos (CGD)), muito diferente do écran de espessura desprezável que os modelos consideram. Os modelos não conseguem assim contabilizar a elevada atenuação que este edifício provoca, sobrestimando assim a potência recebida pelo TM. Convém ainda referir que os erros são na sua maioria ligeiramente superiores para 900 MHz, sendo a única excepção os da Rua Costa Goodolfim e Rua Bacelar Silva. Convém ainda referir que para todas as ruas os modelos teóricos foram simulados com um factor de bloco  $F_B = 3$ , sendo a única excepção a Rua Brito Aranha onde se considerou  $F_B = 7$ , tentando assim contabilizar a presença do edifício da CGD.

Os melhores resultados são os da Rua Brito Aranha, onde as médias dos erros absolutos são mais pequenas, com  $\mu_{abs} = 4.6$  dB a 900 MHz e  $\mu_{abs} = 3.6$  dB na banda de 1 800 MHz. Esta rua está localizada logo a seguir ao edifício da CGD, só existindo este edifício entre a EB e o TM nos primeiros 120 m da rua. Ao contrário do que foi feito para as outras ruas, em que se considerou um factor de bloco de 3, na Rua Brito Aranha a simulação teórica foi feita com  $F_B = 7$ , tentando-se assim modelar da melhor maneira a largura do edifício da CGD. Dado os valores baixos dos erros, esta opção parece ter sido a mais acertada.

O andamento da curva teórica e experimental da potência média recebida pelo TM em função da distância percorrida ao longo da via nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz está representada nas Figs. 4.2 e 4.3, respectivamente.

Como se verifica nestas figuras os resultados começam por ser piores no início da rua, onde o edifício da CGD obstrui o percurso, facto que o modelo não consegue contabilizar totalmente, sobrestimando a potência recebida pelo TM. Quando a CGD deixa de ter influência, aproximadamente a 120 m de distância do início da rua, existe uma zona inicial, dos 140 m aos 180 m em que a potência experimental é superior à teórica, o que se julga ser devido ao facto de não existirem edifícios junto à rua nesta zona, situação esta não contabilizada com a precisão suficiente no ficheiro bloco.dat. De modo a uma melhor constatação destes factos, na Fig. R.1 estão traçados os perfis entre a EB e o TM localizado a 50 m e 130 m do inicio da rua, com e sem a influência da CGD, respectivamente.

Para além destes factos, para ambas as frequências verifica-se um salto na potência teórica para uma distância de cerca de 57 m. Este salto fica-se a dever à variação na altura do último edifício anterior ao TM, quando se passa de um ponto para outro na rua, como se pode verificar na Fig. R.2 onde se traçam os perfis para estes dois pontos. Essa diminuição de cerca de 11 m origina um decréscimo de cerca de 6 dB no termo correspondente à atenuação dada pelo modelo de Ikegami *et al.*. Quanto ao modelo dos cruzamentos, verifica-se que este

simula adequadamente o cruzamento existente na rua aos 105 m, tanto em localização como em amplitude, sendo no entanto mais preciso para 900 MHz.



Fig.4.2 – Potência média recebida na Rua Brito Aranha para EB do Campo Pequeno, na banda de 900 MHz.



Fig. 4.3 – Potência média recebida na Rua Brito Aranha para EB do Campo Pequeno, na banda de 1 800 MHz

O desvio padrão apresenta valores aceitáveis, com  $\sigma$  = 4.8 dB para 900 MHz e  $\sigma$  = 3.6 dB para 1800 MHz.

As ruas onde a média dos erros absolutos são maiores são a Bacelar e Silva (Figs. M.3 e M.4) com  $\mu_{abs} = 35.2$  dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 39.2$  dB para 1 800 MHz, e a Costa Goodolfim (Figs. M.5 e M.6) com  $\mu_{abs} = 21.2$  dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 21.1$  dB para 1 800 MHz. O ângulo de rua nestes casos é bastante reduzido, cerca de 3° para a Rua Bacelar e Silva e 8° para a Rua Costa Goodolfim, o que se afasta bastante das condições de aplicação dos modelos, em especial o de Xia and Bertoni que considera a propagação perpendicular às fileiras de edifícios. Nestas duas ruas as curvas apresentam saltos com profundidades elevadas, com cerca de 15 dB, devidos ao modelo de Ikegami *et al.*, resultado da variação na altura do último edifício anterior ao TM, quando se passa de um ponto para outro na rua. Apesar destes saltos, verifica-se que o desvio padrão não é excessivamente elevado, apresentando valores idênticos nas duas bandas, na ordem dos 7 dB, o que indica que as curvas teóricas não se afastam totalmente das variações da curvas experimentais.

Nas ruas Gomes da Silva (d) e (e) os ângulos de rua são mais elevados, na ordem de 15° a 20°, sendo a média dos erros absolutos mais baixa. Na Rua Gomes da Silva (d) (Figs. M.7 e M.8) tem-se  $\mu_{abs} = 15.5$  dB e  $\mu_{abs} = 12.8$  dB para 900 MHz e 1 800 MHz, respectivamente, e  $\mu_{abs} = 13.0$  dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 12.9$  dB para 1 800 MHz na Rua Gomes da Silva (e) (Figs. M.9 e M.10), sendo novamente da mesma ordem de grandeza para as duas bandas. O valor do desvio padrão para a Rua Gomes da Silva (d) apresenta nas duas bandas valores semelhantes, na ordem dos 5 dB, enquanto que para a outra rua tem-se  $\sigma = 6.5$  dB na banda de 900 MHz e um valor bastante bom para 1 800 MHz com  $\sigma = 2.5$  dB, não existindo justificação aparente para esta diferença entre as duas bandas. Convém ainda referir que nestas duas ruas, tal como nas duas anteriores, não se verifica a influência dos cruzamentos, visto os ângulos de cruzamento serem bastante pequenos e inferiores a 60°.

Finalmente, nas ruas Vilhena Barbosa (Figs. M.13 e M.14) e Reis Gomes (Figs. M.11 e M.12) a média dos erros absolutos é bastante superior na banda de 900 MHz do que na banda de 1 800 MHz, com  $\mu_{abs} = 16.0$  dB e  $\mu_{abs} = 8.8$  dB na Vilhena Barbosa e  $\mu_{abs} = 15.8$  dB e  $\mu_{abs} = 9.9$  dB na Reis Gomes. Esta situação deve-se ao facto dos valores experimentais estarem bastante próximos nas duas bandas, o que não está previsto teoricamente. Esta situação, que não tem justificação aparente, será oportunamente abordada na subsecção 4.2.3, aquando da comparação entre valores experimentais da atenuação de propagação nas duas bandas de frequência.

### • EB República

A EB da Av. da República está sectorizada, sendo o sector B de azimute 230° e o sector C de azimute 350°. Nenhum destes sectores serve directamente a zona do Arco Cego, mas dadas as suas orientações, escolheu-se o sector C para a realização do estudo. No entanto, é necessário ter em consideração o facto das antenas estarem a emitir em direcções afastadas do ganho máximo, com valores de  $\theta$  a variar de 60° a 90°, não existindo tanta precisão na estimativa do ganho das antenas nestas direcções. Para esta EB as ruas analisadas foram Brito Aranha, Cardoso Oliveira, Gomes da Silva (d) e (e), Reis Gomes, Tomás Borba, Vilhena Barbosa e Xavier Cordeiro, com as direcções indicadas no Anexo H.

Consultando as Figs. N.9 e N.10 (mapas de sensibilidades) verifica-se que é para as ruas situadas mais a sul que o nível de potência é mais baixo, zonas onde o ângulo  $\theta$  é superior e o ganho das antenas é mais reduzido. Nas ruas Brito Aranha e Reis Gomes o nível de potência nas duas bandas é quase sempre superior a -80 dBm. Nestas ruas esta situação pode ser justificada pelo ganho superior das antenas nesta direcção e também pelo facto de possivelmente existir uma grande reflexão do sinal no edifício da CGD.

Tal como na situação anterior, o cenário de propagação entre a zona do Arco Cego e a EB do Campo Pequeno afasta-se do previsto teoricamente pelos modelos, nomeadamente no que diz respeito à uniformidade da altura dos edifícios e do espaçamento entre eles. Junto à EB existem edifícios altos e ruas largas, enquanto que na proximidade do TM existem edifícios baixos e ruas estreitas, podendo esta situação justificar algumas das más previsões feitas pelos modelos. Convém ainda referir que para estas ruas os modelos teóricos foram simulados com um factor de bloco,  $F_B$ , igual a 3.

A média global do parâmetros estatístico  $\mu_{abs}$  é um pouco inferior à verificada para a EB do Campo Pequeno, 12.9 dB nos 900 MHz e 14.6 dB para os 1 800 MHz, sendo neste caso um pouco inferior nos 900 MHz. Em relação à média global do desvio padrão os valores são mais uma vez ligeiramente superiores, valendo 6.7 dB e 7.1 dB para os 900 MHz e 1 800 MHz, respectivamente.

Verifica-se que para a Rua Cardoso Oliveira (Figs. M.27 e M.28) e Rua Gomes da Silva (e) (Figs. M.31 e M.32) as médias dos erros absolutos são bastante semelhantes. Os valores obtidos para 900 MHz são,  $\mu_{abs} = 8.3$  dB e  $\mu_{abs} = 8.9$  dB para a Cardoso Oliveira e Gomes da Silva (e), respectivamente, e na banda de 1 800 MHz,  $\mu_{abs} = 10.1$  dB na Cardoso Oliveira e  $\mu_{abs} = 10.5$  dB na Gomes da Silva (e). Para estas duas ruas, que estão muito

próximas uma da outra (a cerca de 70 m de distância), o cenário de propagação desde a EB ao TM é o seguinte: as fileiras de edifícios estão dispostas perpendicularmente entre o TM e a EB, no entanto, na primeira parte do percurso os edifícios são bastante altos, as ruas são largas, e o factor de bloco elevado (cerca de 5), enquanto que na segunda parte do percurso, na zona do Arco Cego, existem edifícios mais baixos, ruas mais estreitas e um factor de bloco mais baixo (aproximadamente de 2 a 3). Apesar desta não uniformidade os erros não são muito elevados, parecendo querer indiciar que desde que as fileiras de edifícios estejam correctamente dispostas, e se simulem os modelos com um factor de bloco apropriado, os resultados não são muito maus. Nestas ruas nota-se que a média dos erros absolutos para 900 MHz são 2 dB inferiores em relação aos 1 800 MHz, sendo ligeiramente superiores para a rua mais distante da EB, a Cardoso Oliveira.

Verifica-se que na Rua Brito Aranha (Figs. M.25 e M.26), Reis Gomes (Figs. M.33 e M.34) e Gomes da Silva (d) (Figs. M.29 e M.30) os resultados previstos pelos modelos subestimam bastante a potência que na realidade é recebida pelo TM. Os erros mais elevados acontecem na Rua Gomes da Silva (d) com  $\mu_{abs}$  = 22.5 dB na banda de 900 MHz e  $\mu_{abs}$  = 21.3 dB para 1 800 MHz, e na Rua Reis Gomes que tem  $\mu_{abs}$  = 20.7 dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 21.5 \text{ dB}$  para 1 800 MHz. Na Rua Brito Aranha os erros são um pouco menores, sendo para 900 MHz o erro  $\mu_{abs}$  = 18.9 dB e na banda de 1 800 MHz o valor de  $\mu_{abs}$  = 16.2 dB. Estes valores elevados podem ser justificados pela presença do edifício da CGD, que deve provocar um grande aumento na potência recebida pelo TM devido às múltiplas reflexões que aí existem, não sendo estas contabilizadas pelos modelos. Nestes três casos, verifica-se que a média dos erros absolutos são semelhantes nas duas bandas, não se podendo concluir em qual delas os erros são maiores. Mais uma vez, verifica-se que existem alguns saltos nas curvas teóricas, sendo alguns deles bastante pronunciados. Estas descontinuidades são justificadas pelo modelo de Ikegami, derivadas da variação da altura do último edifício antes do TM. Uma vez que os ângulos de rua são sempre inferiores a 20°, nestas três vias os cruzamentos não têm influência na potência recebida pelo TM.

Nas restantes ruas, é na Tomás Borba (Figs. M.35 e M.36) que os erros são mais elevados, com  $\mu_{abs}$  = 18.0 dB para 900 MHz e  $\mu_{abs}$  = 23.6 dB para 1 800 MHz. Este resultado já era esperado, uma vez que o ângulo de rua neste caso é da ordem dos 3°, situação na qual os modelos de propagação estudados funcionam bastante mal, sobrestimando em demasia os resultados experimentais. Relativamente à diferença entre os erros nas duas bandas, cerca de 5.6 dB superior para 1 800 MHz não se podem retirar muitas conclusões, dado o afastamento

entre o cenário de propagação real e teórico. Justificam-se assim também os valores elevados do desvio padrão nas duas bandas,  $\sigma$  = 7.9 dB para 900 MHz e  $\sigma$  = 7.7 dB para 1 800 MHz.

Nas ruas Vilhena Barbosa (Figs. M.37 e M.38) e Xavier Cordeiro (Figs. M.39 e M.40) os ângulos de rua são também bastante baixos, variando entre 8° e 15° na Xavier Cordeiro e entre 5° e 6° na Vilhena Barbosa. Ao contrário do que era previsto, as médias dos erros absolutos são baixas. Para a Rua Vilhena Barbosa tem-se  $\mu_{abs} = 4.9$  dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 5.1$  dB a 1 800 MHz, enquanto que na Rua Xavier Cordeiro é  $\mu_{abs} = 3.9$  dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 5.4$  dB em 1 800 MHz. Uma explicação possível para esta situação será a existência de algum mecanismo de reflexão que exista nesta zona não contabilizado nos modelos teóricos de propagação. Verifica-se que os valores para as duas bandas são semelhantes, sendo os erros ligeiramente superiores para 1 800 MHz.

Relativamente aos valores dos desvio padrão, estes são na generalidade um pouco elevados, variando entre os 3.9 dB e os 10.3 dB, não se podendo concluir em qual das bandas os valores são superiores.

### <u>Resultados Globais</u>

Considerando os resultados de todas as medidas para a zona do Arco Cego, verificamos que as médias globais dos parâmetros estatísticos são bastante semelhantes para as duas bandas de frequências. Os resultados obtidos são

Zona do Arco Cego			
Frequência [MHz]	$\mathbf{P}_{\mathbf{r} \text{ teo}} - \mathbf{P}_{\mathbf{r} \text{ exp}}$		
	μ [ <b>dB</b> ]	μ <sub>abs</sub> [ <b>dB</b> ]	σ [dB]
900	6.1	15.0	6.5
1 800	5.8	15.0	6.3

Tab. 4.1 – Médias Globais para a Zona do Arco Cego

Esta proximidade de valores entre os 900 MHz e 1 800 MHz indicia um comportamento semelhante dos modelos para estas duas frequências na zona do Arco Cego.
#### 4.2.2.2. Zona das Avenidas Novas

Tal como referido anteriormente no capitulo 3, a zona das Avenidas Novas tem características bastante distintas da zona do Arco Cego, sendo caracterizada por ter ruas largas e edifícios altos.

Para a análise desta área, escolheram-se as três EBs, Campo Pequeno, República e São Sebastião com as características especificadas na Tab. E.1, podendo-se verificar na Fig. N.3 qual a localização e orientação dos sectores de cada uma destas EB.

Devido ao tráfego existente e ao comprimento das ruas estudadas, a realização das medidas neste zona foi efectuada a uma velocidade de aproximadamente 15 km/h a 20 km/h, um pouco superior em relação à utilizada no Arco Cego. O número de amostras por metro é neste caso cerca de 1 a 2. Convém ainda referir que a existência de semáforos obrigou a efectuar paragens ao longo das ruas. Durante estas paragens, contabilizou-se o nível do sinal ao longo do tempo, efectuando-se posteriormente uma média para determinar qual o nível de sinal naquela localização específica. Na zona onde se efectuou a paragem, podem existir alguns erros na localização exacta das medidas, visto que nessa zona a velocidade deixa de ser constante. No entanto, verificou-se, ao representar as medidas em *MICROSTATION*, que estes erros não são elevados, visto que a localização das medidas coincide com as ruas e cruzamentos existentes nos mapas.

#### • EB Campo Pequeno

Para esta EB utilizou-se somente o sector C para realizar o conjunto de medidas na zona das Avenidas Novas. As avenidas medidas foram Defensores de Chaves, Duque d'Ávila, Elias Garcia, Miguel Bombarda e República, e foram percorridas nas duas bandas segundo os sentidos indicados no Anexo H. A Av. Duque d'Ávila, na banda de 1 800 MHz, não foi percorrida até ao seu final, visto que o sinal aí medido era bastante fraco, abaixo do nível de sensibilidade do TM, cerca de -102 dBm.

Analisando as Figs. N.7 e N.8 (mapas de sensibilidade), verifica-se que as zonas onde os níveis de potência apresentam valores mais elevados são as que estão mais próximas da EB, verificando-se um comportamento semelhante para as duas bandas. Na Av. Defensores de Chaves, para 900 MHz e 1 800 MHz, a potência recebida pelo TM só começa a ser inferior a -80 dBm um pouco antes do cruzamento com a Av. Duque d'Ávila. Nas Avenidas da República e Elias Garcia o sinal é quase sempre superior aos -80 dBm, só sendo inferior em

pequenos troços, no fim da Elias Garcia em 900 MHz e 1 800 MHz, e no início da Elias Garcia e no fim da República somente para os 1 800 MHz. Em contrapartida nas Avenidas Miguel Bombarda e Duque d'Ávila a potência recebida pelo TM está quase sempre situada entre os -80 dBm e -100 dBm, facto este justificado pela distância destas avenidas à EB.

Relativamente à simulação dos modelos de propagação, verifica-se que com excepção da Av. da República, a média dos erros absolutos é inferior na banda de 1 800 MHz, variando entre 5.8 dB e 11.6 dB para 900 MHz e entre 5.1 dB e 10.4 dB para 1 800 MHz. A média global de  $\mu_{abs}$  é 9.7 dB e 7.9 dB para os 900 MHz e 1 800 MHz, respectivamente. Os valores de desvio padrão são na sua generalidade um pouco elevados para as duas bandas, sendo que para 900 MHz varia entre 5.9 dB e 12.7 dB, com um valor médio de 8.1 dB, e para 1 800 MHz têm-se valores entre 4.4 dB e 10.1 dB, com 7.6 dB de valor médio.

Nas Figs. 4.4 e 4.5 está representado o andamento das curvas teóricas e experimentais da potência recebida pelo TM ao longo da Av. Elias Garcia, nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz. A média dos erros absolutos associados a estas curvas são  $\mu_{abs} = 5.8$  dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 5.1$  dB para 1 800 MHz. Verifica-se que no início da avenida a curva teórica sobreestima a curva experimental, o que se julga ser devido ao facto dos edifícios, na realidade, serem mais altos do que a média realizado pelo modelo. De facto, verifica-se que na zona próxima deste troço da avenida, junto ao cruzamento com a Av. 5 de Outubro, existem edifícios com cerca de 110 m, um pouco distante da média considerada no ficheiro bloco.dat, cerca de 95 m. Esta sobreestimação é um pouco superior para 900 MHz, onde é aproximadamente 12 dB, enquanto que para 1 800 MHz é cerca de 9 dB. Esta diferença pode ser justificada pelo facto de o modelo considerar que na banda superior a cota média dos edifícios que constituem o perfil é de 100 m, enquanto que para os 900 MHz considerar uma cota de 98 m, o que se afasta mais da realidade.

Relativamente aos cruzamentos, o modelo não consegue contabilizar a influência do cruzamento com a Av. da República, a 235 m do início da avenida, onde o ângulo de rua é de cerca de 40° (ou seja, inferior a 60°, ângulo para o qual a influência dos cruzamentos começa a ser notória), apesar de termos considerado uma largura de cruzamentos de 60 m. O cruzamento com a Av. Defensores de Chaves encontra-se a cerca de 350 m do início da rua, sendo o ângulo de rua de 60°. Este cruzamento é contabilizado teoricamente para os 900 MHz, não o sendo estranhamente para os 1 800 MHz. O pico verificado a cerca de 430 m deve-se a uma diminuição de 9 m na altura do último edifício antes do TM que origina um decréscimo de  $L_{rts}$  de cerca de 5 dB e um correspondente aumento da potência.









Verifica-se também que no final da avenida a curva teórica está mais afastada da curva experimental a 1 800 MHz que a 900 MHz, o que talvez se possa explicar através das Figs. R.3 a R.6, onde se representam os andamentos dos ganhos das antenas na direcção do topo do

edifício mais alto e dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$  ao longo da via, para 900 MHz e 1 800 MHz. Como se verifica, os ganhos das antenas nas duas bandas apresentam um andamento diferente, justificado pelo facto de a 1 800 MHz a antena não ter downtilt, enquanto que para 900 MHz este vale 13°. A diferença registada entre os valores teóricos e experimentais em 1 800 MHz no final da avenida, parece querer indicar que o ganho da antena nesta zona é inferior ao previsto teoricamente na direcção do topo do último edifício. Apesar destas diferenças, os valores de desvio padrão associados à Av. Elias Garcia não são muito elevados,  $\sigma = 5.9$  dB para 900 MHz e  $\sigma = 4.4$  dB na banda de 1 800 MHz.

Na Av. da República (Figs. M.23 e M.24) a média dos erros absolutos é  $\mu_{abs} = 7.0$  dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 8.1$  dB a 1 800 MHz, um pouco superiores às médias registadas na Av. Elias Garcia. No início da avenida a curva teórica subestima a curva experimental para as duas bandas, o que se justifica pela existência duma zona aberta (junto à Praça de Touros do Campo Pequeno) não completamente especificada no ficheiro bloco.dat. Os saltos verificados na potência teórica são mais uma vez devidos à variação da altura do último edifício anterior ao TM que provoca uma variação brusca em  $L_{rts}$  e portanto uma variação brusca na potência. Em relação ao modelo dos cruzamentos, este contabiliza adequadamente as suas localizações, não o fazendo correctamente para a amplitude de alguns deles. A razão para tal julga-se que seja devida ao facto dos edifícios que se encontram na zona próxima dos cruzamentos possuírem uma altura muito elevada, superior à média considerada no programa teórico. À medida que nos afastamos da EB, o ângulo de rua começa a diminuir e portanto a influência dos cruzamentos deixa de ser notória. Os valores do desvio padrão são aproximados nas duas bandas,  $\sigma = 6.7$  dB a 900 MHz e  $\sigma = 7.5$  dB para 1 800 MHz, sendo um pouco elevados devido aos vários saltos que existem nas curvas teóricas.

A Av. Defensores de Chaves (Figs. M.17 e M.18), paralela à Av. da República, está mais próxima da EB e é um pouco mais estreita, com 30 m de largura. A média dos erros absolutos é um pouco superior para 900 MHz, sendo  $\mu_{abs} = 11.2$  dB nessa banda e  $\mu_{abs} = 8.0$  dB para 1 800 MHz. Estes valores são facilmente justificados pelos andamentos das curvas teóricas e experimentais. Na banda de 900 MHz no início da avenida a potência experimental está muito acima da estimativa teórica, sendo esta situação devido ao facto de incorrectamente termos iniciado as medidas ainda dentro do cruzamento com a Av. do Campo Grande, justificando-se assim os erros mais elevados nesta banda. À parte desta situação, nas duas bandas as curvas teóricas aproximam-se dos resultados experimentais até aos 620 m, altura em que começam a existir saltos bastante profundos nas curvas teóricas, novamente

relacionados com a variação da altura do último edifício antes do TM. A partir dos 820 m, começa a existir uma grande sobrestimarão do sinal teórico em relação ao experimental, quer para 900 MHz quer para 1 800 MHz. Esta situação talvez se deva ao facto de a CGD nesta zona estar a afectar o percurso de propagação, provocando uma atenuação não contabilizada nos modelos teóricos. Além disso, nesta zona a distância EB – TM é elevada, cerca de 870 m, e o ângulo de rua bastante reduzido, menor que 15°, condições não ideais de aplicabilidade dos modelos de propagação. Todas estas situações justificam os valores elevados de desvio padrão que se registam nas duas banda,  $\sigma = 12.7$  dB em 900 MHz e  $\sigma = 10.1$  dB para 1 800 MHz.

A Av. Duque d'Àvila (Figs. M.15 e M.16) é a que está mais afastada da EB, não tendo sido possível por esta razão medir o sinal na banda de 1 800 MHz em toda a avenida. A média dos erros absolutos neste caso é  $\mu_{abs}$  = 11.6 dB e  $\mu_{abs}$  = 10.4 dB, para 900 MHz e 1 800 MHz, respectivamente, verificando-se quase sempre uma sobrestimação da potência experimental recebida pelo TM. Observa-se que em 900 MHz o andamento das duas curvas é mais aproximado que em 1 800 MHz, frequência para a qual o sinal experimental apresenta menores variações, talvez devido à maior atenuação de propagação a si associada. O modelo dos cruzamentos modela bem as suas localizações, sobrestimando no entanto o aumento da potência recebida pelo TM, em especial a 1 800 MHz, onde não se verifica uma grande variação do sinal ao passar-se num cruzamento. Estes andamentos justificam o menor valor de desvio padrão associado à frequência de 900 MHz,  $\sigma = 6.4$  dB, em comparação com os  $\sigma = 9.2$  dB em 1 800 MHz. Estes valores elevados são também justificados pelas descontinuidades ocorridas nas curvas teóricas, associadas ao modelo de Ikegami *et al.*.

Na Av. Miguel bombarda (Figs. M.21 e M.22) verifica-se que no seu início, para 900 MHz e 1 800 MHz, a curva teórica subestima bastante a curva experimental, justificandose esta diferença pela influência que o cruzamento com a Av. da República ainda tem no sinal nesta zona, facto não contabilizado nas simulações teóricas. Verifica-se também que a média dos erros absolutos é superior 5.3 dB para 900 MHz, onde se tem  $\mu_{abs} = 13.1$  dB, em contrapartida com  $\mu_{abs} = 7.8$  dB a 1 800 MHz. Esta situação é devida à grande proximidade das atenuações de propagação medidas nas duas bandas, o que teoricamente não é previsto. O desvio padrão apresenta valores relativamente elevados, sendo um pouco superior para 900 MHz onde  $\sigma = 8.7$  dB, enquanto que na banda de 1 800 MHz vale  $\sigma = 6.6$  dB.

#### • EB República

Esta EB tem 2 sectores, B e C, com azimutes de 230° e 350° respectivamente. Sendo assim, optou-se por utilizar os sectores que melhor cobriam a maior parte da rua a medir, tendo resultado: Av. 5 de Outubro e Miguel Bombarda, sector B, e Av. Elias Garcia e República com o sector C. Os sentidos e troços onde se efectuaram as medidas nas duas bandas estão no Anexo H.

Analisando as Figs. N.4 e N.10 para 900 MHz e as Figs. N.3 e N.9 para 1 800 MHz, verifica-se que à parte do final da Av. Elias Garcia, onde houve problemas a medir o sinal na banda de 1 800 MHz, os valores de potência recebida pelo TM são relativamente elevados nas duas bandas, sendo quase sempre superiores aos –80 dBm.

Relativamente às estimativas teóricas, verifica-se que os erros em relação aos resultados experimentais são relativamente elevados, na ordem da dezena de dB, sendo sempre superiores para 900 MHz, à excepção da Av. da República onde se passa exactamente o contrário. As médias globais são  $\mu_{abs} = 13.2$  dB e  $\sigma = 13.4$  dB para os 900 MHz, e  $\mu_{abs} = 12.7$  dB e  $\sigma = 11.1$  dB na banda de 1 800 MHz.

O andamento das curvas teóricas e experimentais da potência média recebida pelo TM, ao longo da Av. da República, nas duas bandas é o apresentado nas Figs. 4.6 e 4.7. Como seria de esperar, os resultados para esta avenida são relativamente maus,  $\mu_{abs} = 12.8$  dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 16.7$  dB na banda de 1 800 MHz, pois praticamente ao longo de toda a rua existe linha de vista entre a EB e o TM, situação não ideal para a aplicação do modelo teórico implementado. Por esta razão, as curvas teóricas são bastante irregulares, visto o programa de cálculo ter bastante dificuldade em determinar qual o último edifício antes do TM (que na realidade não existe), o que provoca bastantes oscilações no termo da atenuação de propagação do modelo de Ikegami,  $L_{rts}$ .

Nesta avenida o cálculo do ganho da antena da EB foi feito na direcção do TM, tentando-se assim melhorar o resultado das simulações. Nas Figs. R.7 a R.10 representa-se a variação do ganho da antena da EB,  $G_{eb}$ , e dos ângulos  $\theta \in \phi$  em função da distância percorrida ao longo da avenida. Como se verifica, os ganhos das antenas nas duas bandas apresentam um andamento aproximado, atingindo valores muito baixos junto da EB, zona onde o ângulo  $\theta$  é bastante elevado. Nota-se também que a 900 MHz, pelo facto de antena utilizada ter um *downtilt* de 9°, o seu ganho vai aumentando até aos 1 000 m, distância para a

qual o valor absoluto do ângulo  $\theta$  começa a ser superior aos 9°. Este facto justifica o facto de a potência recebida a 900 MHz ter um aumento mais progressivo até essa distância.



Fig. 4.6 – Potência média recebida na Av. da República para EB da República, na banda de 900 MHz



Fig. 4.7 – Potência média recebida na Av. da República para EB da República, na banda de 1 800 MHz

Na Av. Miguel Bombarda (Figs. M.45 e M.46) a média dos erros absolutos também é elevada,  $\mu_{abs}$  = 15.7 dB para 900 MHz e  $\mu_{abs}$  = 12.5 dB em 1 800 MHz. Na banda de 900 MHz até ao cruzamento com a Av. 5 de Outubro a previsão teórica subestima a potência medida experimentalmente, não conseguindo contabilizar com perfeição a amplitude da potência no cruzamento com a Av. da República. Depois deste cruzamento a curva teórica mantém-se aproximadamente na mesma gama de valores, não acompanhando o decréscimo da potência verificado experimentalmente nesta zona, a partir dos 600 m. Para os 1 800 MHz, a curva teórica está quase sempre acima da experimental, sendo os valores aproximados até aos 600 m, altura em que as duas curvas se começam a afastar. Este afastamento, que se verifica nas duas bandas, poderá ser devido aos valores reduzidos dos ângulos de rua nesta zona, inferiores a 20°. No entanto, no início da avenida, zona onde a antena está a radiar na direcção de lobos secundários e o ângulo de rua é pequeno (na ordem dos 15°) as diferenças entre os valores experimentais e teóricos não são tão elevadas como se esperava. O valor do desvio padrão é bastante superior na banda de 900 MHz, onde  $\sigma$  = 18.5 dB, enquanto que na banda de 1 800 MHz  $\sigma$  = 10.4 dB. O valor mais pequeno registado em 1 800 MHz justifica-se pela maior proximidade entre a curva teórica e experimental nesta banda, principalmente até ao cruzamento com a Av. 5 de Outubro.

Na Av. Elias Garcia (Figs. M.43 e M.44), considerando somente o troço da avenida que foi simultaneamente medido nas duas bandas, a média dos erros absolutos é  $\mu_{abs} = 11.7$  dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 9.4$  dB para 1 800 MHz, verificando-se que a previsão teórica sobrestima quase sempre os resultados experimentais. O modelo dos cruzamentos prevê razoavelmente a influência do cruzamento com a Av. da República, fazendo-o no entanto melhor para 1 800 MHz. No início da avenida, para as duas bandas de frequência, as curvas teóricas e experimentais estão muito próximas, existindo no entanto um afastamento maior para 900 MHz quando se passa nesse cruzamento, onde a curva experimental apresenta uma queda muito mais abrupta que em 1 800 MHz. Na parte final do troço medido, existe nas duas bandas uma grande sobrestimação do sinal teórico em relação ao experimental, talvez devido a uma subestimação da altura dos edifícios nessa zona da avenida. Como é natural, o desvio padrão para 1 800 MHz é  $\sigma = 5.8$  dB, enquanto que a 900 MHz é bastante superior,  $\sigma = 10.8$  dB.

Na Av. 5 de Outubro (Figs. M.41 e M.42) a média dos erros absolutos é praticamente igual nas duas bandas,  $\mu_{abs} = 12.5$  dB a 900 MHz e  $\mu_{abs} = 12.1$  dB para 1 800 MHz, existindo quase sempre uma sobreestimação da potência experimental recebida pelo TM. O modelo dos

cruzamentos não funciona bem pois não acompanha correctamente as flutuações que o sinal sofre ao entrar e sair dos cruzamentos (situados a 110 m, 225 m, 320 m e 425 m do inicio da avenida) limitando-se simplesmente a adicionar uma quantidade de potência à previsão teórica, não distinguindo quando o cruzamento acaba ou não. No entanto, verifica-se que a curva teórica acompanha a diminuição de potência observado no final da avenida, associado ao decréscimo dos ganhos das antenas nesta direcção, indicando que os modelos teóricos simulam relativamente bem esse ganho. Os valores do desvio padrão não são muito elevados, sendo  $\sigma$  = 7.5 dB para 900 MHz e  $\sigma$  = 6.3 dB para 1 800 MHz, o que sugere que se não fosse o mau comportamento do modelo dos cruzamentos os resultados seriam bem melhores.

Mais uma vez, os saltos verificados nos modelos teóricos em cada uma das avenidas simuladas são devidos às irregularidades nas alturas do último edifício antes do TM, e a correspondente variação do termo da atenuação de propagação,  $L_{rts}$ .

#### • EB São Sebastião

Neste caso utilizou-se o único sector que tem a direcção das Avenidas Novas, o sector A com azimute de 0°. As avenidas medidas foram 5 de Outubro, Elias Garcia e Marquês de Tomar, com os sentidos indicados no Anexo H.

Relativamente aos resultados experimentais, verifica-se através das Figs. N.11 e N.12 que a potência recebida nas duas bandas é similar, existindo no entanto algumas diferenças. Na Av. Marquês de Tomar, na banda de 900 MHz, a potência recebida pelo TM está sempre acima dos –80 dBm, enquanto que para 1 800 MHz, na parte norte da avenida (a que está mais longe da EB) existem zonas onde o nível de sinal é um pouco inferior aos –80 dBm. Na Av. Elias Garcia à medida que nos vamos afastando da EB, o nível de sinal vai baixando, sendo que depois do cruzamento com a Av. Marquês de Tomar a potência recebida nas duas bandas é quase sempre inferior aos –80 dBm. Em 1 800 MHz, no final da rua, a potência recebida pelo TM está muito próxima do nível de sensibilidade do TM, sendo inferior a –100 dBm. Na Av. 5 de Outubro, o nível de sinal nas duas bandas é mais ou menos semelhante. No último troço da avenida, entre a Av. Elias Garcia e Av. de Berna, o nível de sinal em 1 800 MHz é quase sempre superior a –80 dBm, enquanto que em 900 MHz, a potência recebida é praticamente sempre inferior a esse nível. Este facto não é facilmente justificável, dado que se esperava que a potência recebida a 900 MHz fosse superior à de 1 800 MHz.

Relativamente às previsões feitas pelos modelos teóricos, verifica-se que tanto os erros como o desvio padrão são inferiores na banda de 1 800 MHz, existindo quase sempre uma

sobreestimação da potência recebida pelo TM, sobretudo nas avenidas Elias Garcia e 5 de Outubro. Este facto pode talvez ser explicado pela presença de árvores ao longo destas duas avenidas, o que não é contabilizado pelos modelos teóricos. As médias globais para esta EB são  $\mu_{abs} = 14.1$  dB e  $\mu_{abs} = 9.6$  dB, e  $\sigma = 6.9$  dB e  $\sigma = 5.4$  dB, para os 900 MHz e 1 800 MHz, respectivamente. A diferença de cerca de 4.5 dB entre as duas bandas para a média dos erros absolutos é inesperada, sendo provocada principalmente pelas diferenças existentes na Av. 5 de Outubro.

Nas Figs. 4.8 e 4.9 apresentam-se as curvas teóricas e experimentais da potência média recebida pelo TM ao longo da Av. Elias Garcia nas duas bandas de frequência, 900 MHz e 1 800 MHz.

Como se verifica, nas duas frequências, a estimativa teórica sobrestima os resultados experimentais, sendo a média dos erros absolutos em 900 MHz e 1 800 MHz,  $\mu_{abs} = 15.9$  dB e  $\mu_{abs} = 12.5$  dB, respectivamente. Constata-se também que é na banda de 1 800 MHz que a curva teórica acompanha melhor os valores experimentais, facto este justificado pela menor variação da curva experimental nesta banda. Os valores do desvio padrão são  $\sigma = 5.6$  dB para 900 MHz e  $\sigma = 4.3$  dB para 1 800 MHz. Para as duas frequências, as duas curvas teóricas apresentam dois saltos significativos de aproximadamente 15 dB, a 50 m e 270 m do inicio da via. Mais uma vez, estas descontinuidades são justificadas pela variação brusca na altura do último edifício anterior ao TM, originando um salto no valor da atenuação de Ikegami. Na Fig. R.11 está representado o perfil EB – TM para uma distância de 50 m e 51 m do início da avenida. Verifica-se que para uma distância de 50 m, o último edifício antes do TM tem uma cota de 77.8 m, enquanto que para uma distância de 51 m, a altura do último edifício é 89.8 m. Este aumento brusco de 21.8 m origina um aumento do termo da atenuação de Ikegami *et al.* de cerca de 16.2 dB, justificando-se assim o salto na potência recebida pelo TM.

Relativamente aos cruzamentos existentes ao longo da avenida, verifica-se que o modelo simula adequadamente o 1º cruzamento (com a Av. Marquês de Tomar) em localização mas sobrestima-o em amplitude, sendo os resultados ligeiramente melhores na banda de 1 800 MHz. A influência dos restantes cruzamentos já não é notória teoricamente, pois o ângulo de rua é inferior a 60º. No entanto, apesar do ângulo, verifica-se que experimentalmente os cruzamentos com a Av. 5 de Outubro e com a Av. República têm influência na potência recebida pelo TM, fazendo com que esta aumente. Este facto pode ser justificado pela largura das ruas que constituem estes cruzamentos.







Fig.4.9 – Potência média recebida na Av. Elias Garcia para EB de São Sebastião, a 1 800 MHz

Na Av. Marquês de Tomar (Figs. M.53 e M.54) as médias dos erros absolutos são  $\mu_{abs} = 8.3 \text{ dB}$  para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 5.9 \text{ dB}$  na banda de 1 800 MHz. No início da avenida verifica-se experimentalmente que a potência recebida pelo TM é superior na banda de 1 800 MHz, facto que não é previsto teoricamente. Esta situação acontece devido a um possível erro no procedimento na campanha de medidas, pois as medidas na banda de 1 800 MHz devem-se ter iniciado ainda dentro do cruzamento com a Av. de Berna, enquanto que a 900 MHz só se começou a medir o sinal já dentro da avenida. A partir dos 40 m verifica-se que nas duas bandas existe uma sobrestimativa teórica de cerca de 15 dB da potência recebida pelo TM. À medida que o TM vai avançando ao longo da avenida, o ângulo de rua começa a aumentar, verificando-se que a partir dos 275 m (onde temos um ângulo de rua de 30°) a curva teórica e experimental começam-se a aproximar bastante, existindo por vezes subestimação dos valores experimentais. Na banda de 1 800 MHz verifica-se que a uma distância de 480 m a 490 m do início da avenida existe uma grande oscilação da previsão teórica da potência recebida pelo TM, sendo esta devida ao termo da atenuação de propagação do modelo de Xia and Bertoni, e em particular à convergência das séries de Boersma. Como se referiu anteriormente, o programa de cálculo limita a utilização da expressão exacta das séries de Boersma (2.8) para valores onde se verifique a sua convergência, utilizando as expressões aproximadas (C.1) a (C.6) e (C.8) caso não se verifique, podendo em situações de transição ocorrer estas descontinuidades e oscilações. Mais uma vez, os saltos que existem nas curvas teóricas são essencialmente devidos ao modelo de Ikegami et al., associados à variação brusca na altura do último edifício antes do TM. Os desvios padrão são ligeiramente elevados,  $\sigma$  = 7.7 dB a 900 MHz e  $\sigma$  = 5.5 dB a 1 800 MHz.

Para a Av. 5 de Outubro (Figs. M.49 e M.50) a média dos erros absolutos é a seguinte para as duas bandas:  $\mu_{abs} = 18.0$  dB para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 10.3$  dB na banda de 1 800 MHz, sendo esta diferença de valores entre as duas bandas, cerca de 8 dB, inesperada. Esta facto acontece porque experimentalmente a atenuação de propagação a 900 MHz a partir dos 460 m aumenta tornando-se superior à verificada para 1 800 MHz, originando assim uma sobrestimação bastante grande do modelo teórico em relação ao resultado experimental. Esta situação será novamente analisada na secção seguinte, aquando da comparação entre as atenuações de propagação nas duas bandas, 900 MHz e 1 800 MHz. Relativamente aos cruzamentos verifica-se que o modelo teórico localiza correctamente o primeiro e o segundo cruzamento (com a Av. João Crisóstomo e com a Av. Miguel Bombarda), não o fazendo no entanto em termos de amplitude, sobrestimando em demasia a potência recebida pelo TM. Os outros cruzamentos não têm grande influência no andamento das curvas teóricas e experimentais, o que já era esperado visto que os ângulos de rua são inferiores a 53°. O salto existente nas duas curvas teóricas, a 900 MHz e 1 800 MHz, a 212 m do início da avenida, é novamente devido à variação brusca da altura do último edifício e origina um aumento de cerca de 12 dB na previsão teórica da potência. Nesta avenida os desvios padrão são um pouco elevados,  $\sigma$  = 7.4 dB para 900 MHz  $\sigma$  = 6.4 dB para 1 800 MHz.

#### <u>Resultados Globais</u>

Considerando os resultados de todas as medidas para a zona das Avenidas Novas, chegamos às seguintes médias globais para as duas bandas de frequências.

Zona das Avenidas Novas			
Frequência [MHz]	$\mathbf{P}_{r \text{ teo}} - \mathbf{P}_{r \exp}$		
	μ [dB]	μ <sub>abs</sub> [ <b>dB</b> ]	σ [dB]
900	8.6	12.0	9.6
1 800	8.2	9.9	8.2

Tab. 4.2 – Médias Globais para a Zona das Avenidas Novas

Verifica-se através da Tab. 4.2 que os valores obtidos para a média dos erros absolutos é inferior à verificada para a zona do Arco Cego, tal como seria de esperar. A diferença de cerca de 2.1 dB entre as duas bandas deve-se essencialmente aos resultados obtidos para a EB de São Sebastião, onde os valores de  $\mu_{abs}$  são um pouco elevados para os 900 MHz. Relativamente ao desvio padrão constata-se que os valores são mais elevados do que os obtidos para a zona do Arco Cego, o que se julga ser devido ao facto de o comprimento das ruas existentes na zona das Avenidas Novas ser maior, existindo assim uma maior variação do sinal medido nestas situações.

#### 4.2.3. Comparação entre valores experimentais nas duas bandas

Nesta secção comparam-se os resultados experimentais obtidos para 900 MHz e para 1800 MHz, através do estudo da dependência da potência recebida com a frequência (análise do parâmetro  $n_f$ ) e com a distância (análise do parâmetro n). De modo a tornar a análise independente das antenas da EB e do TM, a comparação é efectuada através do parâmetro  $L_p$ , isto é, a atenuação de propagação entre a EB e o TM a que o sinal está sujeito. Uma vez que o

*software* utilizado apenas fornece valores de potência, aquele parâmetro é obtido através da potência experimental recebida no TM da seguinte forma:

$$L_{p} \models P_{E} \models P_{E} \models B_{B} \models G_{E} \models B_{B} \models G_{R} \models B_{B} \models G_{R} \models B_{B} \models G_{R} \models B_{E} \models G_{R} \models G_{R} \models B_{E} \models G_{R} \models G_{R$$

O valor da potência de emissão  $P_E$ , para cada EB, foi um dos dados fornecidos pela TELECEL, ver Anexo E. Para o ganho do TM,  $G_R$ , considerou-se 2 dBi e o ganho da EB,  $G_E$ , foi obtido através do modelo utilizado na previsão teórica, o qual fornece um valor de ganho para cada ponto da rua. No entanto, uma vez que, em termos de localização na rua, os valores experimentais não coincidem exactamente com os valores teóricos, desenvolveu-se um programa que estima para cada valor experimental o valor teórico mais próximo deste. Desta forma, o valor de ganho associado a esse ponto é atribuído ao ponto experimental. Apesar do erro associado a este método, ele conduz a melhores resultados do que aqueles que se teriam obtido se se tivesse considerado o ganho da EB igual ao seu ganho máximo para qualquer direcção.

Para além desta fonte de erro, outras existem que afectam os resultados apresentados:

- as medidas nas duas bandas e numa mesma rua não foram efectuadas em simultâneo, o que conduz a diferenças pontuais no cenário de propagação e a uma diferença na velocidade média a que as medidas foram realizadas;
- existência de controle de potência de emissão na banda de 900 MHz;
- existência de fenómenos de difracção e reflexão diferentes para as duas bandas, não possíveis de contabilizar;
- antenas para 900 MHz e 1 800 MHz não localizadas no mesmo ponto do edifício, como à partida se assume, o que poderá afectar os resultados, nomeadamente nos pontos mais próximos da EB;
- para certas ruas ou troços de ruas, o ganho da EB é calculado na direcção oposta ao máximo de radiação, o que faz com que algumas dessas ruas sejam iluminadas por lobos secundários de radiação.

Devido à diferença existente a nível da estrutura urbana, faz sentido separar a análise em dois grupos: o primeiro, correspondente à zona do Arco Cego e que é tratado na secção 4.2.3.1, e o segundo, correspondente à zona das Avenidas Novas e tratado na secção 4.2.3.2. Em cada um destes grupos distinguem-se ainda três casos distintos, correspondentes a cada uma das EBs medidas: Campo Pequeno, República e São Sebastião. Os resultados gráficos para cada EB e para cada rua são apresentados no Anexo P. Nestas figuras representa-se, para cada uma das bandas de frequência, a atenuação de propagação em função do logaritmo da distância entre a EB e o TM, a curva de regressão linear que permite estimar o parâmetro *n*, e o valor deste parâmetro. São ainda apresentados os valores de  $\mu$ ,  $\mu_{abs}$  e  $\sigma$  no Anexo O. Apresentam-se também em *MICROSTATION* os valores da atenuação de propagação para cada uma das bandas assim como a diferença entre as duas bandas, no Anexo Q.

#### 4.2.3.1 Zona do Arco Cego

#### • <u>EB Campo Pequeno</u>

Distinguem-se dois intervalos de variação para a diferença absoluta entre os valores de  $L_p$ : 1.1 <  $\mu_{abs}$  < 2.2 [dB] e 6.0 <  $\mu_{abs}$  < 8.9 [dB].

A segunda gama de valores, que corresponde às ruas Brito Aranha, Costa Goodolfim, Bacelar e Silva e Gomes da Silva, está dentro do previsto teoricamente. O primeiro intervalo, que abrange as ruas Vilhena Barbosa e Reis Gomes, indica que a atenuação de propagação a 900 MHz está muito próxima da verificada a 1800 MHz, o que pode ser justificado pelas fontes de erro inerentes às medidas, nomeadamente o facto das medidas nas duas bandas não terem sido realizadas em simultâneo. O desvio padrão varia entre 1.3 dB e 4.3 dB, significando que, para estas ruas, as duas curvas apresentam um andamento muito semelhante.

Da análise do factor de decaimento médio da potência com a distância, verifica-se existirem essencialmente três intervalos de variação:

-20.9 < n < -3, 2.5 < n < 3.7 e 12.3 < n < 21.3

O primeiro intervalo abrange as ruas Brito Aranha e Gomes da Silva (e), afastando-se os valores daquilo que seria esperado. Para a Rua Brito Aranha, este facto deve-se à influência no percurso de propagação do edifício da CGD: no início da rua, em que o perfil EB-TM está obstruído por este edifício,  $L_p$  diminui com a distância EB-TM (Fig. P.1), pois o edifício começa a ter cada vez menos influência no percurso de propagação; quando deixa de obstruir o perfil,  $L_p$  começa a aumentar com a distância, tal como esperado. Na Rua Gomes da Silva (e) verifica-se pela Fig. P.5 que  $L_p$  diminui com a distância, para o início da rua, devido à existência duma área aberta junto deste troço da rua. Para além disso, a diferença entre o valor máximo da distância EB-TM e o valor mínimo dessa mesma distância é muito pequena, não permitindo retirar conclusões.

A segunda gama de valores corresponde às ruas Costa Goodolfim (Fig. P.3) e Bacelar e Silva (Fig. P.2) e está dentro dos resultados previstos. Os valores para estas duas ruas são semelhantes, pois o ambiente de propagação não difere muito de uma rua para outra. Para além disso, é nestas ruas que o intervalo de variação da distância EB-TM é maior, apresentando um valor de cerca de 166 m. Verifica-se que o valor de n é ligeiramente superior para 900 MHz, encontrando-se no entanto os valores para as duas bandas muito próximos.

O terceiro intervalo diz respeito às ruas Vilhena Barbosa e Gomes da Silva (d) e constata-se que os valores de *n* são exageradamente elevados. Na Rua Vilhena Barbosa (Fig. P.7) observa-se um aumento de 10 dB em  $L_p$  a partir de uma distância EB-TM de cerca de 30 m, o que se deve à influência do edifício do Liceu D. Filipa de Lencastre que se começa a fazer sentir, afectando deste modo o valor de *n*. Quanto à Rua Gomes da Silva (d), o facto de ser extremamente pequena torna impossível retirar conclusões (Fig. P.4). Nesta gama, os valores de *n* são sempre superiores para 900 MHz.

#### • EB República

Mais uma vez se observam dois intervalos de variação para a diferença absoluta entre os valores de  $L_p$  para as duas bandas:  $5.9 < \mu_{abs} < 9.0$  [dB] e  $11.5 < \mu_{abs} < 14.6$  [dB]. O primeiro intervalo corresponde às ruas Vilhena Barbosa, Xavier Cordeiro, Reis Gomes e Brito Aranha, e o segundo intervalo às ruas Tomás Borba, Gomes da Silva e Cardoso Oliveira.

De uma maneira geral, os valores correspondem ao que era previsto. As ruas onde  $\mu_{abs}$ é mais baixo são aquelas que estão orientadas na direcção da EB e que, teoricamente, deveriam estar sujeitas a uma menor obstrução e portanto conduzir a valores mais baixos daquele parâmetro estatístico. Os valores do desvio padrão são bastante aceitáveis, variando entre 1.3 dB e 4.6 dB.

Quanto ao parâmetro n, de uma maneira geral os valores obtidos afastam-se bastante daquilo que seria expectável, variando entre -188.1 e 31.2. Para as ruas Cardoso Oliveira e Gomes da Silva (d) nada se pode concluir pelo facto da distância EB-TM apresentar valores muito pequenos, entre 9 m e 22 m. Para a maioria das ruas verifica-se que o valor de n é sempre superior, em valor absoluto, para 900 MHz.

A principal fonte de erros que pode justificar estes resultados é o facto desta zona não estar a ser iluminada pelo máximo de radiação das antenas e portanto a cobertura não corresponde ao desejável.

#### 4.2.3.2 Zona das Avenidas Novas

#### • EB Campo Pequeno

De uma maneira geral verifica-se que a diferença absoluta entre os valores de  $L_p$  varia entre 5.9 dB e 9.9 dB. Apenas para a Av. Miguel Bombarda se regista um valor mais baixo, 2.4 dB. Pormenorizando, observa-se que as avenidas Duque d'Ávila e Defensores de Chaves apresentam o mesmo valor de  $\mu_{abs}$ , 5.9 dB, o que significa que não existem diferenças significativas nas condições de propagação para estas duas ruas. O mesmo acontece para as avenidas Elias Garcia e República, com  $\mu_{abs}$  igual a 9.8 dB e 9.9 dB respectivamente. Verifica-se existirem diferenças mais pequenas entre as duas bandas em troços de rua junto dos quais existem áreas abertas (como no caso do início da Av. da República) ou edifícios mais baixos (como no troço da Av. Defensores de Chaves, junto ao cruzamento com a João Crisóstomo).

Relativamente ao factor de decaimento médio da potência, obteve-se para a Av. da República n = 3.7 para as duas bandas (Fig. P.12), o que está de acordo com o previsto (o cenário de propagação é semelhante para os vários pontos da via). Para a Av. Defensores de Chaves obteve-se n = 3.3 para 900 MHz e n = 2.8 para 1800 MHz (Fig. P.9). Este parâmetro foi obtido não considerando o troço inicial da rua (cerca de 100 m) na realização da regressão linear, visto que a 900 MHz  $L_p$  começa num valor muito baixo, saltando depois bruscamente para valores mais altos, o que iria viciar o cálculo de n. Na Av. Elias Garcia, em que n = 2.6para 900 MHz e n = -0.4 para 1 800 MHz (Fig. P.10), o cenário de propagação difere ao longo da rua, pois no fim desta já se começa a fazer sentir influência da CGD, o que não acontecia para o início da rua. Quanto à diferença entre as duas bandas, ela pode estar relacionada com as fontes de erro inerentes às medidas. Para a Av. Miguel Bombarda obteve-se um valor de nde cerca de 5.8 para as duas bandas (Fig. P.11). Este valor foi obtido retirando um troço inicial da rua que ainda estava sob influência do cruzamento com a Av. da República. O valor é superior ao esperado, o que é justificado pelas fontes de erro inerentes às medidas. Na Av. Duque d'Ávila o valor de n a 900 MHz, 12.7, é muito superior ao obtido para 1 800 MHz, 1.5 (Fig. P.8), o que se fica a dever ao facto da atenuação de propagação variar bastante no cruzamento com a Av. da República.

#### • EB República

Para as avenidas Elias Garcia e 5 de Outubro obteve-se, respectivamente,  $\mu_{abs} = 10.4$ dB e  $\mu_{abs} = 8.7$  dB, o que está dentro daquilo que era previsto. No entanto, o desvio padrão para a Av. Elias Garcia é elevado, 11.7 dB, o que pode ter sido devido ao facto de, no processo de localização das amostras ao longo da rua, ter havido um erro, por exemplo, por a velocidade não ter sido constante ou por termos indicado incorrectamente a localização do cruzamento. Para a Av. da República a diferença absoluta entre os valores de  $L_p$  para as duas bandas é bastante elevada, 22.9 dB, o que também acontece na Av. Miguel Bombarda, com  $\mu_{abs} = 18.1$  dB, verificando-se ainda nesta avenida que o valor da atenuação de propagação no cruzamento com a Av. da República é muito inferior para 900 MHz. Note-se que nestas duas avenidas existe quase sempre linha de vista entre a EB e o TM. Os resultados obtidos explicam-se pelas variadas fontes de erro associadas ao processo de medição. Para além disso, para a Av. Miguel Bombarda o ganho da EB foi determinado na direcção do último edifício anterior ao TM, o que também por si constitui uma fonte de erro, nomeadamente na zona próxima do cruzamento com a Av. da República.

Na Av. 5 de Outubro observa-se um fenómeno de histerese derivado do facto da EB se encontrar na direcção do meio da rua e verifica-se que o parâmetro n apresenta um valor superior para 1 800 MHz. O facto das curvas se afastarem no fim da rua, originando uma diferença entre os valores de n para as duas bandas, pode ser devida ao facto das antenas não estarem a radiar na direcção de máximo para esta zona. Apresenta-se na Fig. P.25 os valores de n para os dois troços da rua, aquele em que nos aproximamos da EB e aquele em que nos afastamos. O facto dos valores serem diferentes para cada troço traduz a diferença existente no cenário de propagação ao longo da rua. Para a Av. Elias Garcia, onde também se observa um fenómeno de histerese (Fig. P.21), os valores de n são relativamente elevados, sendo superior para 900 MHz: n = 11.9 para 900 MHz e n = 8.4 para 1 800 MHz. Uma razão para estes resultados é o facto do cenário se alterar ao longo da rua, nomeadamente ao nível do cruzamento com a Av. da República que origina um decréscimo abrupto da atenuação de propagação e um respectivo aumento do parâmetro n. Os resultados para a Av. Miguel Bombarda são n = 6.7 para 900 MHz e n = 3.3 para 1 800 MHz (Fig. P22), encontrando-se este último dentro do previsto. A diferença de valores pode ser justificada mais uma vez pela diferença de cenários de propagação ao longo da rua e pelas fontes de erro anteriormente mencionadas. Da mesma forma se justificam os resultados obtidos para a Av. da República, n = 3.2 para 900 MHz e n = 2.3 para 1 800 MHz (Fig. P.23).

#### • EB São Sebastião

Para a Av. Marquês de Tomar,  $\mu_{abs} = 7.3$  dB, ou seja, a diferença entre as atenuações de propagação para as duas bandas está dentro do previsto, o que significa que o cenário de propagação é mais ou menos semelhante ao longo da rua. O valor do desvio padrão,  $\sigma = 3.8$ dB, é bastante aceitável. Para as avenidas Elias Garcia e 5 de Outubro obteve-se, respectivamente,  $\mu_{abs} = 5.1$  e 4.7 dB. Estes valores são um pouco baixos, sendo justificados pelas fontes de erro inerentes às medidas, nomeadamente o facto dos fenómenos de difracção e reflexão serem diferentes para as duas bandas e não poderem ser contabilizados.

Relativamente ao parâmetro *n* obteve-se para a Av. Marquês de Tomar um valor de 5.2 para 900 MHz e 3.6 para 1 800 MHz (Fig. P.27). Este segundo valor corresponde ao previsto enquanto que o primeiro é um pouco elevado, o que mais uma vez se justifica pelas fontes de erro inerentes às medidas. Na Av. Elias Garcia passa-se o inverso, isto é, o valor obtido para 900 MHz está dentro do previsto, n = 3.7, só que o valor para 1 800 MHz é mais elevado, n = 5.0 (Fig. P.26). Para a Av. 5 de Outubro, n = 4.6 para 900 MHz e n = 1.9 para 1 800 MHz (Fig. P.28). A discrepância entre estes resultados pode ser devida ao facto de, para uma distância de cerca de 450 m do início da rua (depois do cruzamento com a Av. Elias Garcia) a curva a 1 800 MHz começar a descer (o que não seria de esperar) e a curva a 900 MHz apresentar uma subida maior do que aquela que se verifica no resto do percurso. O valor elevado de *n* para 900 MHz é também devido ao facto de termos uma grande variação de  $L_p$  com log(d) no início da rua, que faz inclinar mais um pouco a recta de regressão.

### 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho estudaram-se os modelos de Ikegami, Walfisch-Bertoni, Xia-Bertoni, COST 231 – Walfisch-Ikegami e o modelo de cruzamentos desenvolvido por Gonçalves, válidos para micro-células urbanas em GSM 900 e 1 800. Para tal, foi realizado um conjunto de medidas na cidade de Lisboa com a colaboração do operador de GSM Telecel, o qual forneceu o equipamento de medida necessário para as bandas de 900 e 1 800 MHz.

As áreas escolhidas para a aferição dos modelos foram a zona do Arco Cego, caracterizada por uma estrutura urbana regular com ruas estreitas e edifícios baixos, e a das Avenidas Novas, também ela com uma estrutura urbana regular mas com ruas largas e edifícios altos.

Verificou-se que para se obter um número suficiente de pontos nos cruzamentos e nas ruas mais pequenas, aquando da realização das medidas do nível de sinal ao longo de uma rua, era necessário efectuá-las a uma velocidade muito reduzida, o que nem sempre foi conseguido devido a condicionantes de trânsito. Assim, as medidas foram realizadas a uma velocidade média de aproximadamente 20 km/h, conseguindo-se deste modo aproximadamente 1.5 amostras/m. Para além disso, as medidas para as duas bandas de frequência não foram realizadas em simultâneo, o que se aconselha que seja alterado futuramente.

De modo a comparar as previsões teóricas com os resultados experimentais, foi utilizada uma ferramenta de cálculo desenvolvida em C++ por Claro e Ferreira, onde se encontram implementados os modelos de Ikegami, Xia *and* Bertoni e o modelo dos cruzamentos de Gonçalves.

A estimativa dos parâmetros geométricos associados aos modelos é baseada numa carta topográfica digital da região de Lisboa, com uma resolução de 50 m, contendo informação referente às coordenadas cartesianas de cada ponto, média da altura dos edifícios, média de cota do terreno e tipo de ocupação (edifícios, água ou árvores).

No presente trabalho foi utilizado um Sistema de Informação Geográfica (*SIG*) *RASTER*, designado *IDRISI*, que permite visualizar, identificar e georeferenciar as características urbanas e geográficas das zonas a analisar. Foi também utilizada uma ferramenta de *CAD* (*Computer Aided Design*), denominada *MICROSTATION*, extremamente útil na representação e identificação das características da zona de estudo, em particular, a largura das ruas e a localização espacial dos eixos de vias dessas mesmas ruas. Este programa

foi também utilizado para representar os resultados experimentais e teóricos do conjunto de medidas e simulações efectuadas.

Na comparação entre valores teóricos e experimentais, para cada uma das zonas de teste, Arco Cego e Avenidas Novas, os resultados foram separados por EB: Campo Pequeno, República e São Sebastião.

Para o Arco Cego obtiveram-se valores elevados para a média do erro absoluto, que variam entre 4.6 <  $\mu_{abs}$  < 35.3 dB a 900 MHz e 3.6 <  $\mu_{abs}$  < 39.2 dB a 1 800 MHz, e  $3.9 < \mu_{abs} < 22.5$  dB a 900 MHz e 5.1 <  $\mu_{abs} < 23.6$  dB a 1 800 MHz, respectivamente para as EBs do Campo Pequeno e da República. O desvio padrão apresenta valores entre  $3.2 < \sigma < 9.7$  dB para 900 MHz e 2.5 <  $\sigma < 9.2$  dB para 1 800 MHz, e 3.9 <  $\sigma < 9.1$  dB para 900 MHz e 5.4 <  $\sigma < 10.3$  dB para 1 800 MHz, respectivamente para as mesmas EBs.

Relativamente às médias globais dos erros na zona do Arco Cego, verifica-se que estas são bastante semelhantes nas duas bandas de frequência, sendo  $\mu_{abs} = 15.0 \text{ dB e } \sigma = 6.5 \text{ dB}$  para 900 MHz, e  $\mu_{abs} = 15.0 \text{ dB e } \sigma = 6.3 \text{ dB}$  em 1 800 MHz. Para a EB do Campo Pequeno as médias globais de  $\mu_{abs}$  e  $\sigma$  são, respectivamente, 17.3 dB e 6.2 dB para 900 MHz, e 15.5 dB e 5.4 dB nos 1 800 MHz. Na EB da República estes valores são  $\mu_{abs} = 12.9 \text{ dB e } \sigma = 6.7 \text{ dB}$  para 900 MHz e  $\mu_{abs} = 14.6 \text{ dB e } \sigma = 7.1 \text{ dB para 1 800 MHz}$ .

A pouca concordância entre resultados teóricos e experimentais é justificada essencialmente, para a EB do Campo Pequeno, pela existência do edifício da Caixa Geral de Depósitos, de enorme volumetria, no cenário de propagação das diversas ruas e que não é contabilizado adequadamente pelo modelo teórico. Para a EB da República a justificação reside essencialmente na diferença de cenários de propagação existentes para cada rua.

Para as Avenidas Novas verificou-se que as médias globais de  $\mu_{abs}$  são inferiores às verificadas para a zona do Arco Cego, tal como seria de esperar, sendo 12.0 dB na banda de 900 MHz e 9.9 dB para 1 800 MHz. Relativamente ao desvio padrão os valores globais são superiores, e valem 9.6 dB para 900 MHz e 8.2 dB na banda de 1 800 MHz

A média do erro absoluto apresenta valores entre  $5.8 < \mu_{abs} < 13.1$  dB a 900 MHz e  $5.1 < \mu_{abs} < 10.4$  dB a 1 800 MHz, para a EB do Campo Pequeno. O desvio padrão varia entre  $5.9 < \sigma < 12.7$  dB para 900 MHz e  $4.4 < \sigma < 10.1$  dB para 1 800 MHz. Para esta EB as médias globais são  $\mu_{abs} = 9.7$  dB e  $\sigma = 8.1$  dB, e  $\mu_{abs} = 7.9$  dB e  $\sigma = 7.6$  dB para 900 MHz e 1 800 MHz, respectivamente. Na EB da República tem-se  $11.7 < \mu_{abs} < 15.7$  dB e  $7.5 < \sigma < 18.5$  dB a 900 MHz, e  $9.4 < \mu_{abs} < 16.7$  dB e  $5.8 < \sigma < 17.7$  dB para 1 800 MHz. As médias globais nesta EB são  $\mu_{abs} = 13.2$  dB e  $\sigma = 13.4$  dB a 900 MHz, e  $\mu_{abs} = 12.7$  dB e

 $\sigma$  = 11.1 dB para 1 800 MHz. Finalmente, na EB de São Sebastião tem-se 8.3 <  $\mu_{abs}$  < 18.0 dB a 900 MHz e 5.9 <  $\mu_{abs}$  < 12.5 dB a 1 800 MHz, e para o desvio padrão 5.6 <  $\sigma$  < 7.7 dB para 900 MHz e 4.3 <  $\sigma$  < 6.4 dB para 1 800 MHz. No global as médias são  $\mu_{abs}$  = 14.1 dB e  $\sigma$  = 6.9 dB, e  $\mu_{abs}$  = 9.6 dB  $\sigma$  = 5.4 dB a 900 MHz e 1 800 MHz, respectivamente.

O facto de a discrepância entre os valores teóricos e experimentais ser inferior à verificada para a zona do Arco Cego, deve-se a uma maior variação do cenário de propagação na zona das Avenidas Novas. As maiores diferenças entre os resultados teóricos e experimentais verificam-se nas ruas em que praticamente existe linha de vista entre a EB e o TM, o que se afasta das condições de aplicação dos modelos.

Relativamente ao modelo de Gonçalves, verifica-se que nem sempre a previsão da influência dos cruzamentos está correcta, principalmente ao nível da amplitude do sinal. De uma forma geral, verificou-se que o modelo dos cruzamentos fornece uma melhor previsão da sua influência na banda de 1 800 MHz.

Globalmente, verificou-se que os piores resultados correspondem a ruas com ângulos de rua pequenos, geralmente inferiores a 20°, afastando-se das condições de aplicabilidade dos modelos. A maior parte das discrepâncias entre valores experimentais e teóricos deve-se aos saltos verificados na potência teórica, devidos à variação na altura dos edifícios. Este facto parece indiciar que os modelos em causa não funcionam tão bem quando os edifícios são definidos com uma elevada resolução, funcionando melhor quando estes são vistos como um único numa área de grandes dimensões.

Na análise da diferença entre resultados experimentais de atenuação de propagação nas duas bandas de frequência, para cada uma das zonas de teste os resultados foram novamente separados por EB.

Para o Arco Cego verificou-se que o valor absoluto da diferença de atenuações de propagação para as duas bandas varia entre 1.1 e 13.2 dB, sendo o valor médio de 7.8 dB, o que está próximo do previsto (cerca de 6 a 12 dB). Quanto ao factor de decaimento médio da potência este assume valores entre -188.1 e 31.2 a 900 MHz e -95.5 e 25.1 a 1 800 MHz, longe da gama de variação esperada teoricamente (valores entre 2 e 5). Esta disparidade de valores é justificada pelas fontes de erro inerentes às medidas e, nomeadamente, pela diferença de cenários de propagação ao longo de uma rua.

Para as Avenidas Novas o valor absoluto da diferença de atenuações de propagação para as duas bandas está compreendido entre 2.4 e 22.9 dB, obtendo-se um valor médio de

9.3 dB, mais uma vez dentro das previsões. O factor de decaimento médio da potência varia entre 1.9 e 12.7 para 900 MHz e -0.4 e 8.4 para 1 800 MHz, existindo uma dispersão de valores muito menor do que a obtida na zona do Arco Cego, o que é facilmente justificável pela maior uniformidade de cenários que existe ao longo das Avenidas Novas.

Como trabalho futuro sugere-se o estudo da atenuação por penetração em edifícios para as duas bandas de frequência, uma vez que o sistema GSM é cada vez mais utilizado no interior de edifícios.

Teria também interesse estudar e/ou desenvolver modelos de propagação para a cidade de Lisboa que contabilizassem a influência de raios reflectidos no solo e nas paredes dos edifícios.

### REFERÊNCIAS

[1] Rappaport,T.S., *Wireless Communications: Principles and Practice*, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, 1996.

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

[3] Ikegami, F., Yoshida, S., Takeuchi, T. and Umehira, M., "Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-32, No. 8, Aug. 1984, pp. 822-829.

[4] Ikegami, F. and Yoshida, S., "Analysis of Multipath Propagation Structure in Urban Mobile Radio Environments", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-28, No. 4, July 1980, pp. 531-537.

[5] 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 Propagations*, Vol. 40, No. 2, Feb. 1992, pp. 170-177.

[6] Walfisch, J. and Bertoni, H.L., "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 36, No. 12, Dec. 1988, pp. 1788-1796.

[7] 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.

[8] Xia, H.H., "A Simplified Analytical Model for Predicting Path Loss in Urban and Suburban Environments", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 46, No. 4, Nov. 1997, pp. 1040-1045.

[9] COST 231 Subgroup on Propagation Models, "Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1 800 MHz bands", *COST 231* TD (91) 73, The Hague, The Netherlands, Sep. 1991.

[10] COST 231, "Comparison of Urban Propagation Models with CW Measurements", *COST 231* TD (92) 44, Leeds, UK, Apr. 1992.

[11] Gonçalves. N.M., *Modelo de Propagação para Sistemas Microcelulares Urbanos na Banda de UHF*, Tese de Mestrado, IST, Lisboa, Portugal, Outubro 1997.

[12] Wagen, J.F., "Modeling of the Propagation over a Double-Wedge Rooftop", *COST 231* TD(92), Helsinki, Finland, Sep. 1992.

[13] Boersma, J., "On certain multiple integrals occurring in a waveguide scattering problem", *SIA J. Math. Anal.*, Vol. 9, No. 2, 1978, pp. 377-393.

[14] Claro, A.R. e Ferreira, J.M., *Avaliação de Modelos de Propagação para Microcélulas Urbanas não Regulares em GSM 900*, Trabalho Final de Curso, IST, Lisboa, Portugal, Setembro 1998.

[15] Eastman, J.R., "IDRISI for Windows", User's Guide, Version 1.0, May 1995.

[16] "MICROSTATION", Bentley Systems, 1998.

## ANEXO A

# Determinação de $L_p$ para o modelo de Ikegami *et al*.

A atenuação de propagação é dada por [3]:

$$L_p \downarrow_B = P_E \downarrow_{Bm} + G_E \downarrow_{Bi} + P_R \downarrow_{Bm} + G_R \downarrow_{Bi}$$
(A.1)

e o campo eléctrico em espaço livre [3]

$$P_E \downarrow_{BW} \rightarrow G_E \downarrow_{Bi} \rightarrow E_0 \downarrow_{B\mu V/m} \rightarrow 74.77 + 20 \log ( \downarrow_{Em} )$$
(A.3)

Substituindo este último resultado em (A.1) obtém-se:

$$L_p \downarrow_B \equiv E_0 \downarrow_{B\mu V/m} - 74.77 + 20 \log (\downarrow_{m} ] P_R \downarrow_{BW} + G_R \downarrow_{Bi} ]$$
(A.4)

Uma vez que a potência disponível aos terminais da antena receptora pode ser expressa em função do campo eléctrico por [3]:

$$-P_{R} \downarrow_{BW} + G_{R} \downarrow_{Bi} = 107.21 - \overline{E} \downarrow_{B\mu V/m} + 20 \log \left( \downarrow_{HHz} \right)$$
(A.6)

a substituição de (A.6) em (A.4) conduz à expressão:

$$L_p \downarrow_B \doteq E_0 \downarrow_{B\mu V/m} \doteq E \downarrow_{B\mu V/m} \doteq 32.44 \pm 20 \log ( \downarrow_m ] \pm 20 \log ( \downarrow_{Hz} ]$$
(A.7)

Por fim, usando a expressão do campo obtida pelo modelo de Ikegami chega-se ao resultado pretendido:

$$L_{p} = 26.65 + 20 \log \left( \frac{1}{m} \right) + 30 \log \left( \frac{1}{m} \right) - 10 \log \left( 1 + \frac{3}{L_{r}^{2}} \right)$$

$$-10 \log \left( w_{s} \right) + 20 \log \left( \frac{1}{moof} - h_{m} \right) + 10 \log \left( \sin \phi \right)$$
(A.8)

## ANEXO B

### Modelo de Walfisch and Bertoni

O modelo teórico apresentado por Walfisch and Bertoni [6] permite estimar a atenuação de propagação em ambientes urbanos na banda de UHF, quando o TM se encontra numa zona de sombra geométrica relativamente à EB. Esta atenuação tem a sua principal origem nas sucessivas difracções sofridas pelo campo no topo dos edifícios que existem entre a EB e o TM, constituindo um factor dominante em relação às perdas resultantes da propagação entre edifícios e/ou através deles.

Segundo o modelo, o terreno é considerado plano, os edifícios são considerados obstáculos cilíndricos de altura uniforme, dispostos em filas paralelas igualmente espaçadas umas das outras (estrutura urbana regular), sendo a dimensão dos cilindros grande quando comparada com o comprimento de onda. O cenário de propagação considerado é igual ao utilizado pelo modelo de Xia and Bertoni, representado na Fig. 2.3, sendo válidas as variáveis então definidas. Tal como no modelo de Xia, o modelo assume, ainda, que:

- é válida a aproximação de onda plana local, utilizada para determinar a influência dos edifícios na onda esférica radiada pela antena elevada da estação base;
- as filas de edifícios são substituídas por ecrãs opacos absorventes de espessura desprezável, os quais se considera serem semi-infinitos por se ignorarem as reflexões no solo;
- a propagação faz-se perpendicularmente às filas de edifícios, com o campo magnético polarizado paralelamente ao chão.

Assim, de acordo com o que foi referido, a estimativa do valor médio do campo reduz--se à análise da difracção sofrida por uma onda plana sobre uma série de semi-planos de altura uniforme, como se mostra na Fig. B.1.



Fig. B.1 – Difracção originada por uma série de semi-planos numa onda plana.

Desta figura destacam-se os seguintes parâmetros:

- m índice do edifício (0...M);
- s distância genérica, marcada sobre o raio directo, entre a estação de base e o último edifício antes do móvel;
- $\varepsilon$  erro fraccional.

Estudos anteriores permitiram estabelecer a relação entre a perturbação dos campos associados ao raio e a zona de Fresnel. De acordo com a Fig. B.1, para um valor genérico de *s* e para  $\varepsilon \ll 1$  os campos são perturbados a menos de  $\varepsilon$  se a zona de Fresnel de largura  $\sqrt{\lambda \cdot s/(2 \cdot \pi \cdot \varepsilon)}$  estiver desimpedida, ou seja, só os obstáculos que interferem com o primeiro elipsóide de Fresnel associado ao raio directo perturbam significativamente o campo, pelo que apenas estes são contabilizados. Desta forma, quando a antena está mais elevada os obstáculos que interferem maioritariamente são aqueles que se encontram junto ao móvel, sendo portanto a regularidade da estrutura urbana mais importante nesta zona.

O campo difractado numa série de semi-planos pode ser avaliado utilizando um método recursivo baseado no integral de Kirchhoff-Huygens. Os resultados derivados dos cálculos do campo incidente no topo do semi-plano *m* para uma onda plana incidente de amplitude unitária permitem concluir que, para  $\alpha \neq 0$  e para um valor de *m* suficientemente elevado, a amplitude do campo tende para um valor constante, acabando por se tornar independente deste parâmetro. Para além disso, a influência do primeiro ecrã diminui à medida que *m* aumenta. Interessa, pois, determinar o número mínimo de obstáculos a considerar para se poder determinar com boa aproximação o valor do campo estabilizado no último obstáculo. Os valores obtidos por Walfisch and Bertoni para este parâmetro são bastante elevados, o que conduz a dois problemas: tempos de computação muito elevados; em micro-células urbanas o número de ecrãs a considerar não é muito grande, pois entre a estação de base e o móvel nunca existe geralmente mais do que 10 edifícios.

O factor normalizado  $Q_M \left( \sqrt{w_B / \lambda} \right)$ , correspondente à razão entre a amplitude do campo constante (atrás referido) e a amplitude do campo incidente, traduz a influência dos edifícios no campo que neles incide. Depois de alguns cálculos efectuados, baseados na variação do campo final com o parâmetro  $\alpha \sqrt{w_B / \lambda}$ , Walfisch and Bertoni chegaram à seguinte expressão para o factor normalizado:

$$Q_M \langle p \rangle = 2.35 g_p^{0.9} \tag{B.1}$$

com  $g_p$  (parâmetro adicional que traduz a dependência com a geometria e com a frequência) definido da seguinte forma:

$$g_p = \alpha \sqrt{\frac{w_B}{\lambda}}$$
(B.2)

e

$$\alpha \cong \frac{h_b - h_{roof}}{d} \tag{B.3}$$

dado em radianos e válida para ângulos pequenos.

O modelo descrito anteriormente pode ser usado para prever a atenuação de propagação média entre a base e o móvel, a qual consiste essencialmente em três factores:

- 1) atenuação em espaço livre entre antenas,  $L_0$ ;
- 2) atenuação devida às difracções múltiplas que ocorrem no topo dos semi-planos aquando da propagação entre a estação de base e o último edifício que antecede o móvel,  $L_{msd}$ , contabilizadas pelo factor  $Q(g_p)$ ;
- atenuação entre o móvel e o último edifício que o antecede, causada pela difracção no topo deste edifício, L<sub>rts</sub>.

Assim, a atenuação total  $L_p$  pode ser obtida somando a atenuação em espaço livre  $L_0$ , (2.2), com um factor  $L_{ex}$  que contabiliza os termos mencionados em 2) e 3):

$$L_p [\mathbf{B}] = L_0 [\mathbf{B}] + L_{ex} [\mathbf{B}]$$
(B.4)

em que

$$L_{ex} = 57.1 + A + \log \P_{\text{MHz}} + 18 \log \P_{\text{km}} - 18 \log \P_{b}$$
(B.5)

O parâmetro A traduz a influência da geometria dos edifícios e é dado por:

$$A = 5 \log \left[ \left( \frac{w_B}{2} \right)^2 + \left( h_m \right)^2 \right] - 9 \log \left( w_B \right) + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[ 2 \frac{\Delta h_m}{w_B} \right] \right\}$$
(B.6)

Na expressão (B.5) não se contabilizou o termo referente à curvatura da terra uma vez que estamos interessados na propagação em micro-células, onde a distância d é muito pequena. Esta expressão pode ainda ser apresentada como a composição dos termos referidos anteriormente:

$$L_{ex} = L_{msd} + L_{rts} \tag{B.7}$$

sendo

$$L_{msd} = -20 \log \mathcal{Q}_M =$$
  
= 68.87 - 9 log  $\mathcal{Q}_M = 18 \log \mathcal{Q}_{m} = 18 \log \mathcal{Q}_{b} = 9 \log \mathcal{Q}_B = (B.8)$ 

e

$$L_{rts} = -11.82 + 10 \log \left( \frac{W_B}{1} + 5 \log \left[ \left( \frac{W_B}{2} \right)^2 + \left( h_m \right)^2 \right] + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[ 2 \frac{\Delta h_m}{W_B} \right] \right\}$$
(B.9)

## ANEXO C

## Aproximações de Maciel, Bertoni and Xia
Maciel, Bertoni and Xia [7] e posteriormente Xia [8], apresentaram alguns resultados teóricos para o cálculo do factor  $Q_M$ , obtidos através da regressão de curvas calculadas numericamente através das expressões apresentadas por Xia and Bertoni, simplificando assim a expressão geral dada por (2.8). Os resultados aproximados que se obtiveram consideram 3 localizações possíveis para a antena da estação base: ao nível do topo dos edifícios, acima do nível do topo dos edifícios e abaixo do nível do topo dos edifícios.

#### Antena da Estação Base ao Nível do Topo dos Edifícios

Neste caso particular, Xia [8] considerou simplesmente que  $\Delta h_b=0$  e que  $d=M w_B$ , simplificando a expressão de  $Q_M$  para

$$Q_M = \frac{1}{M} = \frac{w_B}{d} \tag{C.1}$$

que só depende de M, tal como tínhamos referido anteriormente.

Com esta nova expressão para  $Q_M$  e aplicando (2.15), a atenuação suplementar devida às múltiplas difracções,  $L_{msd}$ , pode ser aproximada por

$$L_{msd} \models 60 - 20 \log \langle \psi_B \rangle = 20 \log \langle d \mid _{fm} \rceil$$
(C.2)

#### Antena da Estação Base Acima do Nível do Topo dos Edifícios

Para ângulos de incidência  $\alpha$  positivos e quando o sinal atravessa muitas linhas de edifícios, Maciel, Bertoni and Xia [7] e [8] verificaram que a dependência do factor  $Q_M$  com a altura da estação base,  $h_b$ , e com o espaçamento entre edifícios,  $w_B$ , pode ser contabilizada através do parâmetro adimensional  $g_p$ 

$$g_p = \alpha \sqrt{\frac{w_B}{\lambda}}$$
(C.3)

em que

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{h_b - h_{roof}}{d} \right) \approx \frac{h_b - h_{roof}}{d} = \frac{\Delta h_b}{d}$$
(C.4)

é o ângulo de incidência no último edifício antes do móvel, representado na Fig. 2.3.

A dependência  $Q_M(g_p)$  foi avaliada numericamente e chegou-se a um resultado que é válido no intervalo  $0.01 < g_p < 0.4$  com uma precisão de pelo menos 0.8 dB,

$$Q_M (g_p) = 2.35 g_p^{0.9}$$
 (C.5)

expressão esta igual à obtida por Walfisch and Bertoni.

De modo a estender o intervalo de validade desta expressão, Maciel, Bertoni and Xia [7] conseguiram ajustar os resultados numéricos a um novo polinómio

$$Q_M$$
  $g_p = 3.502 g_p - 3.327 g_p^2 + 0.962 g_p^3$  (C.6)

Este polinómio de 3° grau é válido no intervalo  $0.01 < g_p < 1$  e possui uma precisão superior a 0.5 dB. Comparando as duas curvas dadas por (C.5) e (C.6) obtemos



Fig. C.1 – Comparação entre os valores aproximados de  $Q_M$  dados por (C.5) e (C.6)

Analisando as duas curvas verificamos que quer (C.5) quer (C.6) são bastante aproximadas para valores de  $g_p$  menores que 0.3, apresentando resultados ligeiramente diferentes para valores superiores de  $g_p$ , situação em que (C.6) se afasta do comportamento linear. É de salientar ainda que em (C.5) para  $g_p>0.387$  e em (C.6) para  $g_p>0.459$  o valor de  $Q_M$  fica superior à unidade, ou seja, estas expressões dariam origem a um ganho do sinal em vez de uma atenuação, situação esta irreal em engenharia. Assim sendo, iremos limitar o uso de (C.5) para  $0.01 < g_p < 0.387$  e (C.6) para  $0.01 < g_p < 0.459$ , considerando-se  $Q_M$  unitário para valores superiores de  $g_p$ .

Dado que (C.5) possui uma precisão superior a (C.6) iremos considerar que a atenuação suplementar,  $L_{msd}$ , é dada por

$$L_{msd} \quad B = \begin{cases} -20 \log \left( .502g_p - 3.327g_p^2 + 0.962g_p^3 \right) & 0.01 < g_p < 0.459 \\ 0 & 0.459 \le g_p < 1 \end{cases}$$
(C.7)

#### Antena da Estação Base Abaixo do Nível do Topo dos Edifícios

Este caso é muito usual em microcélulas, sendo o processo de reflexões e difracções um pouco mais complexo. Maciel, Bertoni and Xia [7] e [8] apresentaram uma expressão alternativa para  $Q_M$ , válida quando  $|\Delta h_b| > \sqrt{\lambda w_B}$ , ou seja, quando as antenas estão colocadas suficientemente abaixo do nível dos telhados dos edifícios,

$$Q_M = \left(\frac{w_B}{d - w_B}\right) \cdot \left[\sqrt{\frac{\lambda}{4\pi^2 \rho}} \cdot \left(\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{2\pi + \varphi}\right)\right]$$
(C.8)

em que,  $\phi$  e  $\rho$  são definidos por

$$\varphi = -\tan^{-1} \left( \frac{h_b - h_{roof}}{w_B} \right) \tag{C.9}$$

$$\rho = \sqrt{\Phi_b - h_{roof}^2 + w_B^2} \tag{C.10}$$

e representam o ângulo de incidência na primeira linha de edifícios e a distância entre a antena da estação base e o topo da primeira linha de edifícios, respectivamente.

A atenuação  $L_{msd}$  é então dada por

$$L_{msd} \quad \text{I}_{B} = -20 \log \left[ \left( \frac{w_{B}}{d - w_{B}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{4\pi^{2}\rho}} \cdot \left( \frac{1}{\varphi} - \frac{1}{2\pi + \varphi} \right) \right]$$
$$= 51.19 - 20 \log \langle w_{B} \rangle + 20 \log \left( 1 - \frac{1}{M} \right) + 20 \log \langle \psi_{B} \rangle + 10 \log \langle \psi_{B}$$

em que se utilizou o resultado  $d = M w_B$ .

### ANEXO D

# Variação de *n* em função de ∠*h<sub>b</sub>*, *w<sub>B</sub>* e *f* para o modelo de Xia and Bertoni

Neste anexo iremos estudar os casos ilustrados nas Fig. D.1 e D.2. Na Fig. D.1 estudase a variação do parâmetro  $n \mod \Delta h_b$  nas duas bandas em estudo, 900 MHz e 1 800 MHz, e considerando a existência de 10 filas de edifícios com uma separação média entre elas de 50 m, a que corresponde uma distância EB-TM, d, de aproximadamente 500 m ( $d \cong M w_B$ ). Na Fig. D.2 é efectuado o mesmo estudo, considerando, no entanto, a existência de 20 filas de edifícios com um espaçamento de 25 m, ou seja, a distância EB-TM, d, é novamente 500 m, mas o espaçamento entre filas de edifícios é menor.



**Fig. D.1** – Variação do parâmetro  $n \operatorname{com} \Delta h_b$  nas bandas de 900 MHz e 1800 MHz para 10 filas de edifícios espaçadas de 50 m.



**Fig. D.2** – Variação do parâmetro  $n \operatorname{com} \Delta h_b$  nas bandas de 900 MHz e 1800 MHz para 20 filas de edifícios espaçadas de 25 m.

Como se verifica, o parâmetro *n* depende da diferença de alturas entre a antena da EB e a linha de topo dos edifícios,  $\Delta h_b$ , da frequência, *f*, e do espaçamento entre edifícios,  $w_B$ , variando entre 4.25 e 3.70 consoante os valores destes parâmetros. Nas simulações efectuadas, constata-se que existem pequeníssimas diferenças no valor de n entre as duas bandas.

Os valores que se obtiveram são os seguintes:

$w_{\rm p} = 50  {\rm m}$	<i>M</i> – 10	Frequência [MHz]			
<i>wB</i> = 50 m	<i>m</i> – 10	900	1 800		
Ah	-4	4.24	4.25		
<u> </u>	4	3.76	3.70		

**Tab. D.1** – Variação do parâmetro  $n \operatorname{com} \Delta h_b$  nas bandas de 900 MHz e 1800 MHz para 10filas de edifícios espaçadas de 50 m.

$w_{P} = 25 \text{ m}$	M = 20	Frequência [MHz]			
<i>w<sub>B</sub></i> = <b>=</b> <i>c</i> m	- <b>-</b>	900	1 800		
Ab	-4	4.22	4.23		
	4	3.78	3.72		

**Tab. D.2** – Variação do parâmetro  $n \operatorname{com} \Delta h_b$  nas bandas de 900 MHz e 1800 MHz para 20filas de edifícios espaçadas de 25 m.

# ANEXO E

# Características das estações de base

Estações de base	X [m]	Y [m]	Cota [m]	Antena	Altura [m]	Azimute [°]	<i>Down-Tilt</i> (ELE./MEC.) [°]	G [dBi]	EIRP [dBm]
C_PEQ_B	112 220	197 666	86	K730362	41	100	0/0	11.2	50.98
C_PEQ_C	112 220	197 666	86	SH1309.41.00041	39	240	9/4	10.7	50.08
REPUBL_B	111 981	197 195	79	SH1309.41.0025	27	230	9/0	14.5	50.36
REPUBL_C	111 981	197 195	79	SH1309.41.00041	27	350	9/0	10.7	50.46
S_SEB_A	111 460	196 869	80	SH1309.41.00041	34	0	9/0	10.7	49.08
D_C_PE_B	112 220	197 666	86	K734322	41	100	0/0	12.5	50.13
D_C_PE_C	112 220	197 666	86	K734322	39	240	0/0	12.5	49.92
DCS_RE_B	111 981	197 195	79	K734322	27	230	0/0	12.5	50.13
DCS_RE_C	111 981	197 195	79	K734322	27	350	0/0	12.5	50.34
DCS_SE_A	111 460	196 869	80	K734322	34	0	0/0	12.5	49.92

Tab. E.1 - Características das antenas das estações de base.

Notas: 1) A nomenclatura utilizada nas antenas é fabricante – referência em que SH = Suhner e K = Kathrein.

2) Na designação das estações de base, as letras A, B e C referem-se à orientação dos sectores.

## ANEXO F

# Diagramas de radiação das antenas das estações de base

#### KATHREIN – K730362



Fig. F.1 – Diagrama de radiação no plano horizontal.



Fig. F.2 – Diagrama de radiação no plano vertical.





Fig. F.3 – Diagrama de radiação no plano horizontal.



Fig. F.4 – Diagrama de radiação no plano vertical.

#### SUHNER - SH1309.41.00041



Fig. F.5 – Diagrama de radiação no plano horizontal.



**Fig. F.6** – Diagrama de radiação no plano vertical.



SUHNER - SH1309.41.0025

Fig. F.7 – Diagrama de radiação no plano horizontal.



Fig. F.8 – Diagrama de radiação no plano vertical.

## ANEXO G

# Representação de características geográficas com IDRISI



#### Cota do Terreno (definição antiga)

Fig. G.1 – Cota do Terreno na Região de Lisboa (definição antiga)



#### Altura dos Edifícios (definição antiga)

Fig. G.2 – Altura dos Edifícios na Região de Lisboa (definição antiga)



Cota do Terreno

Fig. G.3 – Cota do Terreno na Região de Lisboa



Altura dos Edifícios

Fig. G.4 – Altura dos Edifícios na Região de Lisboa



Estação Base Campo Pequeno

Fig. G.5 – Edifícios acima e abaixo da Estação Base Campo Pequeno



Fig. G.6 – Edifícios acima e abaixo da Estação Base República



Estação Base São Sebastião

Fig. G.7 – Edifícios acima e abaixo da Estação Base São Sebastião

## ANEXO H

# Mapas das ruas estudadas



**Fig. H.1** – Ruas medidas com a EB do Campo Pequeno, para 1 800 MHz.



**Fig. H.2** – Ruas medidas com a EB do Campo Pequeno, para 900 MHz.



**Fig. H.3** – Ruas medidas com a EB da República, para 1 800 MHz.



**Fig. H.4** – Ruas medidas com a EB da República, para 900 MHz.



Fig. H.5 – Ruas medidas com a EB de S. Sebastião, para 1 800 MHz.



Fig. H.6 – Ruas medidas com a EB de S. Sebastião, para 900 MHz.

# ANEXO I

# **Fotografias**


**Fig. I.1** – Equipamento de medida.



Fig. I.2 – Exemplo de uma rua tipo do Arco Cego (Rua Tomás Borba).



Fig. I.3 – Exemplo de uma rua tipo do Arco Cego, onde se observa ao fundo o edifício da CGD (Rua Gomes da Silva (d)).



Fig. I.4 – Exemplo de uma rua tipo das Avenidas Novas (Av. Elias Garcia).



Fig. I.5 – Exemplo de uma rua tipo das Avenidas Novas (Av. da República).

### ANEXO J

# Parâmetros característicos das ruas estimados pelo ferramenta de cálculo

				E	stação Base C	ampo Pequer	10						
		Gomes da	u Silva (e)	Costa Go	oodolfim	Brito A	Aranha	Bacelar	e Silva				
Parâm	netros	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz				
Coordenada	Latitude	112	461	112	264	112	346	112	348				
Inicio via	Longitude	197	268	197 408		197 503		197	261				
Coordenada	Latitude	112	430	112 321		112 321 112		112 554		112 554		112	292
Fim via	Longitude	197	354	197 252		197 577		197 577		197	419		
d <sub>via</sub> [m]	Min-Máx	0 -	91	0 – 166		0-221		0-221		0 - 221		0	167
d_ <sub>EB_TM</sub> [m]	Min-Máx	375 -	- 464	261 -	- 426	211 - 349		258 -	- 425				
w- [m]	Min-Máx	10-14	10 - 14	0-18	10 - 20	10-20	0-20	10-14	10-14				
wB [III]	Média	13	13	13	14	19	11	13	12				
φ [°]	Min-Máx	11 -	- 14	6 -	10	35 - 72		2 -	- 3				
М	Min-Máx	9 - 14	9 - 14	1 – 16	5 - 6	1-5	1-5	1 - 13	1 – 13				
141	Média	11	11	12	6	2	1	9	8				
h [m]	Min-Máx	105 - 110	106 - 110	0 - 105	0 – 106	0-104	0 - 101	0-108	0 - 110				
m <sup>LOOL</sup> [111]	Média	107	107	97	98	76	35	103	90				
G. [dBi]	Min-Máx	8-8	9 – 9	7 – 8	8 – 9	9 - 11	9 - 12	6-7	7 – 8				
	Média	8	9	7	8	10	11	6	8				

**Tab. J.1** – Parâmetros característicos das ruas na zona do Arco Cego para a EB do Campo Pequeno

			E	stação Base Ca	mpo Pequeno	)	
		Vilhena B	arbosa	Reis G	omes	Gomes d	a Silva (d)
Par	âmetros	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz
Coordenada	Latitude	112 5	11	112 401		112 374	
Inicio via	Longitude	197 318		197 490		197	7 512
Coordenada	Latitude	112 631		112	112 286		2 404
Fim via	Longitude	197 360		197 -	436	197	7 426
d <sub>via</sub> [m]	Min-Máx	0 – 127		0 - 137		0 -	- 91
d_ <sub>EB_TM</sub> [m]	Min-Máx	458 - 517		223 -	223 - 248		- 304
W <sub>p</sub> [m]	Min-Máx	10 - 13	10 – 13	10 – 17	10 - 10	0 – 14	0 – 14
44 B [111]	Média	12	12	11	10	4	4
φ [°]	Min-Máx	56 - 0	59	18 –	90	18	- 26
м	Min-Máx	19 – 25	1 – 25	1 – 8	1 – 8	1 – 15	1 – 15
111	Média	21	20	2	1	4	4
h [m]	Min-Máx	104 - 109	0 - 109	0 - 105	0 – 99	0 - 108	0 - 108
<sup>II</sup> roof [III]	Média	106	104	12	1	26	26
G. [dBi]	Min-Máx	9 - 10	10 - 11	7 – 10	8-11	9 – 9	9 – 11
	Média	10	11	8	9	9	10

**Tab. J.2** – Parâmetros característicos das ruas na zona do Arco Cego para a EB do Campo Pequeno

					Estação Bas	e República			
		Gomes da	Silva (d)	Gomes da	u Silva (e)	Cardoso	Oliveira	Brito A	Aranha
Parâm	netros	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz
Coordenada	Latitude	112	374	112	112 461		112 507		346
Inicio via	Longitude	197	197 512		197 268		381	197	503
Coordenada	Latitude	112	404	112	112 430 112 539		112 539		554
Fim via	Longitude	197 426		197	354	197	295	197	577
d <sub>via</sub> [m]	Min-Máx	0-91		0 – 91		0 – 91		0	221
d_ <sub>EB_TM</sub> [m]	Min-Máx	487 - 510	487 - 510	471 - 481	471 - 481	562 - 572 562 - 572		476 - 687	476 – 687
w <sub>p</sub> [m]	Min-Máx	11 – 12	11 – 12	11 – 12	11 – 12	10 - 12	10 – 12	10 - 12	10 – 12
w B [111]	Média	11	11	12	12	11	11	11	11
φ [°]	Min-Máx	71 -	- 81	79 -	- 90	80-89		14 -	- 21
М	Min-Máx	10 - 11	10 – 11	19 – 21	19 – 21	12 – 14	12 – 14	10 – 17	10 – 17
141	Média	11	11	20	20	12	12	14	14
h [m]	Min-Máx	104 - 109	104 - 110	100 - 103	102 - 103	99 - 104	101 – 105	102 - 107	102 - 108
11 <sup>LOOL</sup> [111]	Média	107	108	101	102	102	103	104	105
G. [dBi]	Min-Máx	0-2	6 – 8	-42	3 – 5	-42	4 - 10	1-3	7 – 8
	Média	1	7	-3	4	-3	7	2	7

Tab. J.3 – Parâmetros característicos das ruas na zona do Arco Cego para a EB da República

					Estação Bas	e República					
		Vilhena	Barbosa	Xavier (	Cordeiro	Tomás	Borba	Reis C	Gomes		
Parân	netros	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz		
Coordenada	Latitude	112	511	112	641	112	457	112	401		
Inicio via	Longitude	197	318	197 332		197 331		197	490		
Coordenada	Latitude	112	631	112	112 359 112 310		112 310		286		
Fim via	Longitude	197	360	197 228 197 280		197	436				
d <sub>via</sub> [m]	Min-Máx	0	127	0-301		0 - 155		0 - 155		0	137
d_EB_TM [m]	Min-Máx	545 -	- 671	378 -	- 673	339 - 494		390 -	- 515		
w <sub>p</sub> [m]	Min-Máx	11 – 11	11 – 11	10 - 12	10 - 12	12 – 12	12 – 12	11 - 15	11 – 15		
wB [111]	Média	11	11	11	11	12	12	13	13		
φ [°]	Min-Máx	5 -	- 6	9 -	15	3 -	- 5	16 -	- 60		
М	Min-Máx	12 - 15	12 – 15	16 – 31	1 – 31	14 – 21	14 – 21	1 – 11	1 – 11		
111	Média	14	13	24	24	18	18	8	7		
h [m]	Min-Máx	102 - 107	102 - 107	99 - 107	0 - 107	98 - 104	98 - 104	0 - 111	0 – 111		
IIIII	Média	103	104	102	102	100	101	89	78		
G⊾[dBi]	Min-Máx	-33	4-4	-43	3-4	-31	4-5	1-2	7 – 8		
	Média	-3	4	-4	3	-2	5	1	7		

Tab. J.4 – Parâmetros característicos das ruas na zona do Arco Cego para a EB da República

			Estação Base Campo Pequeno								
		Defensor	es Chaves	Duque 1	D'Avila	Elias Garcia		Miguel B	Sombarda	Repú	blica
Parâm	etros	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz
Coordenada	Latitude	112	0 26	112	308	111	738	111	959	111	839
Inicio via	Longitude	197	611	196	900	197	322	197	127	197	799
Coordenada	Latitude	112	219	111 389	111 660	112	241	111	379	112	015
Fim via	Longitude	196	584	196 882	196 888	197	414	197	042	196	798
d <sub>via</sub> [m]	Min-Máx	0 – 1	1045	0-919	0-648	0 -	511	0 –	586	0 – 1	1016
d_ <sub>EB_TM</sub> [m]	Min-Máx	189 – 1079	189 – 1079	755 – 1134	755 – 949	265 - 598	265 - 598	589 - 1052	589 - 1052	322 - 880	322 - 880
w <sub>p</sub> [m]	Min-Máx	0 - 30	0 - 30	20-42	20-42	25 - 42	25 - 42	25 - 30	25 - 30	0 - 60	0 - 60
wB [111]	Média	25	25	26	26	27	27	28	28	43	43
φ [°]	Min-Máx	11 -	- 85	42 - 90	53 - 90	25 -	- 84	27 -	- 54	23 -	- 90
М	Min-Máx	1 – 9	1 - 9	1 – 10	1 – 8	1 – 5	1 – 5	4-8	4 - 8	1 – 5	1 – 5
111	Média	4	4	7	6	2	2	6	6	3	3
h [m]	Min-Máx	0 – 115	0-118	0 - 110	0 – 112	0 - 104	0 - 104	97 – 107	96 - 108	0 – 115	0 – 115
IITOOI [III]	Média	77	74	92	89	65	65	101	101	96	93
G <sub>b</sub> [dBi]	Min-Máx	0 – 10	8 – 12	0-8	7 – 12	2-8	8 - 12	6 - 8	11 – 12	4-9	9 – 12
	Média	5	10	5	10	7	11	7	12	7	11

Tab. J.5 – Parâmetros característicos das ruas na zona das Avenidas Novas para a EB do Campo Pequeno

					Estação Bas	e República							
		5 de O	utubro	Elias (	Elias Garcia		Bombarda	Repú	blica				
Parân	netros	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz				
Coordenada	Latitude	111	812	112	112 241		263	111	737				
Inicio via	Longitude	196	890	197	414	197	181	198	333				
Coordenada	Latitude	111	698	111 350	111 587	111 379		112	015				
Fim via	Longitude	197	548	197 252	197 295	197 024		196	798				
d <sub>via</sub> [m]	Min-Máx	0	668	0 - 906	0 - 665	0 - 898		0 - 898		0 - 898		0 – 1	1560
d_ <sub>EB_TM</sub> [m]	Min-Máx	234 -	- 460	182 - 637	181 - 412	51 - 625		7 – 1	1163				
w <sub>p</sub> [m]	Min-Máx	25 - 39	25 - 39	22 - 42	22 - 42	14 – 28	14 - 28	30 - 60	30 - 60				
wB [111]	Média	31	30	28	29	25	25	45	45				
φ [°]	Min-Máx	29 -	- 90	16 - 90	25 - 90	6 -	- 90	2 -	90				
М	Min-Máx	1 – 3	1 – 3	1 – 5	1 – 3	1-5	1-5	1 – 12	1 – 12				
111	Média	2	2	2	2	2	2	5	5				
h [m]	Min-Máx	96 - 108	0 - 109	0 - 106	0 – 106	0 - 108	0 - 108	0-116	0 – 116				
III00I [III]	Média	101	92	92	71	79	75	81	73				
G. [dBi]	Min-Máx	0 - 14	4 - 12	-1 - 9	8 - 12	-9 - 13	-3 - 12	-21 - 10	-19 - 12				
	Média	8	9	5	10	9	9	3	6				

**Tab. J.6** – Parâmetros característicos das ruas na zona das Avenidas Novas para a EB da República

		Estação Base São Sebastião							
		5 de O	utubro	Elias	Garcia	Marquês	de Tomar		
Parân	netros	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz	900 MHz	1 800 MHz		
Coordenada	Latitude	112	461	112	264	112 346			
Inicio via	Longitude	197 268		197 408		197	503		
Coordenada	Latitude	112 430		112	321	112	554		
Fim via	Longitude	197	354	197	252	197	577		
d <sub>via</sub> [m]	Min-Máx	0 - 668		0 - 905		0 - 590			
$d_{EB_TM}[m]$	Min-Máx	335 - 713	335 - 713	384 - 947	384 - 947	213 - 611	213 - 611		
w <sub>p</sub> [m]	Min-Máx	24 - 31	24 - 31	22 - 42	22 - 42	23 – 25	23 – 25		
w B [111]	Média	27	27	26	26	24	24		
φ [°]	Min-Máx	29 -	- 90	25 -	- 90	19 – 90			
М	Min-Máx	1 – 7	1 – 7	1 – 11	1 – 11	1 – 8	1 – 8		
141	Média	5	4	5	5	5	4		
h [m]	Min-Máx	0 - 110	0 - 110	0 - 105	0 - 105	0 - 101	0 - 101		
IILOOI [III]	Média	97	91	91	87	73	53		
G. [dBi]	Min-Máx	-3 - 9	4 - 12	3 – 10	8 - 12	2-9	6 – 12		
	Média	5	10	7	11	7	11		

Tab. J.7 – Parâmetros característicos das ruas na zona das Avenidas Novas para a EB de São Sebastião

### ANEXO L

# Parâmetros estatísticos para a diferença entre as potências recebidas teórica e experimental

Nas tabelas seguintes apresentamos os valores da média, média do módulo e desvio padrão, obtidos através de (4.4) a (4.6), para a diferença entre a potência teórica e experimental recebida pelo terminal móvel, dada por (4.3). Os resultados serão apresentados individualmente para cada uma das bandas (900 MHz e 1 800 MHz), EB e ruas medidas.

#### • Zona do Arco Cego

			Estação	Base do Campo	o Pequeno
Rua	Fraguância [MHz]	Sector		P <sub>r teo</sub> - P <sub>r exp</sub>	
Nua		Sector	μ [ <b>dB</b> ]	μ <sub>abs</sub> [dB]	σ [dB]
Vilhena Barbosa	900	В	16.0	16.0	3.2
v inicita Darbosa	1 800	В	8.8	8.8	3.5
Reis Gomes	900	В	15.8	15.8	9.7
Kels Gollies	1 800	В	8.9	9.9	9.2
Brito Aranha	900	В	3.0	4.6	4.8
Brito Aranna	1 800	В	2.4	3.6	3.6
Costa Goodolfim	900	В	21.2	21.2	7.2
Costa Goodonnin	1 800	В	21.1	21.1	7.4
Bacelar e Silva	900	В	35.3	35.3	6.6
Dacelai e Silva	1 800	В	39.2	39.2	7.2
Gomes de Silve (d)	900	В	15.5	15.5	5.4
Gomes da Silva (d)	1 800	В	12.8	12.8	4.4
Comes de Silve (e)	900	В	13.0	13.0	6.5
Gomes da Silva (e)	1 800	В	12.9	12.9	2.5
Média	Global 900 MHz	17.1	17.3	6.2	
Média (	Global 1 800 MHz	15.2	15.5	5.4	

**Tab. L.1** – Parâmetros estatísticos para a diferença entre a potência

teórica e experimental recebida pelo TM na zona do

Arco Cego para a EB Campo Pequeno

			Estaç	ão Base da Rep	oública
Due	Eroquâncio [MHz]	Sector		P <sub>r teo</sub> - P <sub>r exp</sub>	
Kua	Frequencia [MIIIZ]	Beetor	μ[ <b>dB</b> ]	μ <sub>abs</sub> [dB]	σ [dB]
Vilhena Barbosa	900	С	4.0	4.9	4.1
V Inicita Daroosa	1 800	С	1.9	5.1	5.4
Xavier Cordeiro	900	С	-0.1	3.9	5.0
	1 800	С	-1.3	5.4	7.0
Tomás Borba	900	С	18.0	18.0	7.9
Tomus Borou	1 800	С	23.6	23.6	7.7
Reis Gomes	900	С	-20.7	20.7	9.1
Kers Comes	1 800	С	-21.5	21.5	10.3
Brito Aranha	900	С	-16.2	16.2	3.9
Ditto Malilla	1 800	С	-18.9	18.9	5.9
Gomes da Silva (d)	900	С	-22.5	22.5	6.6
Gomes da Sirva (d)	1 800	С	-21.3	21.3	5.7
Cardoso Oliveira	900	С	4.8	8.3	8.2
Curdoso Onvente	1 800	С	10.1	10.1	5.9
Gomes da Silva (e)	900	С	3.7	8.9	9.1
Comes da Sirva (C)	1 800	С	8.6	10.5	8.8
Média	-3.6	12.9	6.7		
Média	Global 1 800 MHz	-2.4	14.6	7.1	

Tab. L.2 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre a potência

teórica e experimental recebida pelo TM na zona do

Arco Cego para a EB República

#### • Zona das Avenidas Novas

			Estação I	Base do Campo	o Pequeno
Rug	Fraguância [MHz]	Sector			
Kua			μ [ <b>dB</b> ]	μ <sub>abs</sub> [dB]	σ [dB]
Duque D'Ávila	900	С	10.7	11.6	6.4
Duque D Avia	1 800	С	7.2	10.4	9.2
Miguel Bombarda	900	С	18.8	13.1	8.7
Wilguer Bolilbarda	1 800	С	6.0	7.8	6.6
Elias Garcia	900	С	4.1	5.8	5.9
Ellas Galela	1 800	С	4.3	5.1	4.4
Defensores Chaves	900	С	6.8	11.2	12.7
Defensores Chaves	1 800	С	4.7	8.0	10.1
Papública	900	C	5.0	7.0	6.7
Republica	1 800	С	6.3	8.1	7.5
Média	9.1	9.7	8.1		
Média	Global 1 800 MHz	5.7	7.9	7.6	

 Tab. L.3 - Parâmetros estatísticos para a diferença entre a potência

teórica e experimental recebida pelo TM na zona das

Avenida Novas para a EB Campo Pequeno

			Estag	ção Base da Rej	pública		
Avenida	Frequência [MHz]	Sector	$P_{r teo} - P_{r exp}$				
Avenua			μ [ <b>dB</b> ]	$\mu_{abs} \left[ dB \right]$	σ [dB]		
Miguel Bombarda	900	В	2.9	15.7	18.5		
	1 800	В	12.2	12.5	10.4		
Elias Garcia	900	С	10.7	11.7	10.8		
Lilas Galeia	1 800	С	9.3	9.4	5.8		
República	900	С	-7.9	12.8	16.8		
Republica	1 800	С	8.8	16.7	17.7		
5 de Outubro	900	В	12.2	12.5	7.5		
	1 800	В	11.9	12.1	10.3		
Média	Global 900 MHz	4.5	13.2	13.4			
Média	Global 1 800 MHz	10.6	12.7	11.1			

**Tab. L.4** - Parâmetros estatísticos para a diferença entre a potênciateórica e experimental recebida pelo TM na zona das

Avenida Novas para a EB República

			Estação Base de São Sebastião				
Rua		Sector	P <sub>r teo</sub> - P <sub>r exp</sub>				
Nua			μ [ <b>dB</b> ]	μ <sub>abs</sub> [dB]	σ [dB]		
Flias Garcia	900	А	15.9	15.9	5.6		
Lilas Galcia	1 800	А	12.5	12.5	4.3		
5 de Outubro	900	А	17.6	18.0	7.4		
	1 800	А	10.0	10.3	6.4		
Marquês de Tomar	900	А	6.8	8.3	7.7		
Marques de Tollia	1 800	А	4.9	5.9	5.5		
Média	Global 900 MHz	13.4	14.1	6.9			
Média	Global 1 800 MHz	9.1	9.6	5.4			

**Tab. L.5** - Parâmetros estatísticos para a diferença entre a potênciateórica e experimental recebida pelo TM na zona das

Avenidas Novas para a EB São Sebastião

### ANEXO M

# Medidas e previsões da potência recebida para as zonas estudadas

Neste anexo são apresentadas as medidas efectuadas e as previsões obtidas a partir dos modelos de propagação para o andamento da potência recebida, para 900 MHz e para 1 800 MHz, ao longo da rua onde se desloca o TM. As curvas representadas são: a média das medidas da potência recebida, obtida através do método de janela deslizante com uma dimensão de janela de  $30\lambda$ , a potência teórica recebida estimada a partir da ferramenta de cálculo. Assim, as curvas apresentadas podem ser identificadas a partir das seguintes legendas, consoante se trate da banda de 900 MHz ou da banda de 1 800 MHz, respectivamente:





#### **EB** Campo Pequeno



#### • Arco Cego

Fig. M.1 – Potência recebida a 1 800 MHz para a R Brito Aranha, EB D\_C\_PE\_B.



Fig. M.2 - Potência recebida a 900 MHz para a R Brito Aranha, EB C\_PEQ\_B.



Fig. M.3 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R Bacelar e Silva, EB D\_C\_PE\_B.



Fig. M.4 - Potência recebida a 900 MHz para a R Bacelar e Silva, EB C\_PEQ\_B.


Fig. M.5 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R Costa Goodolfim, EB D\_C\_PE\_B.



Fig. M.6 - Potência recebida a 900 MHz para a R Costa Goodolfim, EB C\_PEQ\_B.



Fig. M.7 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R Gomes da Silva (d), EB D\_C\_PE\_B.



Fig. M.8 - Potência recebida a 900 MHz para a R Gomes da Silva (d), EB C\_PEQ\_B.



Fig. M.9 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R Gomes da Silva (e), EB D\_C\_PE\_B.



Fig. M.10 - Potência recebida a 900 MHz para a R Gomes da Silva (e), EB C\_PEQ\_B.



Fig. M.11 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R Reis Gomes, EB D\_C\_PE\_B.



Fig. M.12 - Potência recebida a 900 MHz para a R Reis Gomes, EB C\_PEQ\_B.



Fig. M.13 – Potência recebida a 1 800 MHz para a R. Vilhena Barbosa, EB D\_C\_PE\_B.



Fig. M.14 - Potência recebida a 900 MHz para a R. Vilhena Barbosa, EB C\_PEQ\_B.

### • Avenidas Novas



Fig. M.15 – Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Duque D'Ávila, EB D\_C\_PE\_C.



Fig. M.16 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Duque D'Ávila, EB C\_PEQ\_C.



Fig. M.17 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Defensores de Chaves, EB D\_C\_PE\_C.



Fig. M.18 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Defensores de Chaves, EB C\_PEQ\_C.



Fig. M.19 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Elias Garcia, EB D\_C\_PE\_C.



Fig. M.20 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Elias Garcia, EB C\_PEQ\_C.



Fig. M.21 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Miguel Bombarda, EB D\_C\_PE\_C.



Fig. M.22 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Miguel Bombarda, EB C\_PEQ\_C.



Fig. M.23 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. da República, EB D\_C\_PE\_C.



Fig. M.24 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. da República, EB C\_PEQ\_C.

# EB República



### • Arco Cego

Fig. M.25 – Potência recebida a 1 800 MHz para a R. Brito Aranha, EB DCS\_RE\_C.







Fig. M.27 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R. Cardoso Oliveira, EB DCS\_RE\_C.



Fig. M.28 - Potência recebida a 900 MHz para a R. Cardoso Oliveira, EB REPUBL\_C.



Fig. M.29 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R. Gomes da Silva (d), EB DCS\_RE\_C.



Fig. M.30 - Potência recebida a 900 MHz para a R. Gomes da Silva (d), EB REPUBL\_C.



Fig. M.31 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R. Gomes da Silva (e), EB DCS\_RE\_C.



Fig. M.32 - Potência recebida a 900 MHz para a R. Gomes da Silva (e), EB REPUBL\_C.



Fig. M.33 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R. Reis Gomes, EB DCS\_RE\_C.



Fig. M.34 - Potência recebida a 900 MHz para a R. Reis Gomes, EB REPUBL\_C.



Fig. M.35 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R. Tomás Borba, EB DCS\_RE\_C.



Fig. M.36 - Potência recebida a 900 MHz para a R. Tomás Borba, EB REPUBL\_C.



Fig. M.37 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R. Vilhena Barbosa, EB DCS\_RE\_C.



Fig. M.38 - Potência recebida a 900 MHz para a R. Vilhena Barbosa, EB REPUBL\_C.



Fig. M.39 - Potência recebida a 1 800 MHz para a R. Xavier Cordeiro, EB DCS\_RE\_C.



Fig. M.40 - Potência recebida a 900 MHz para a R. Xavier Cordeiro, EB REPUBL\_C.

## Avenidas Novas



Fig. M.41 – Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. 5 de Outubro, EB DCS\_RE\_B.



Fig. M.42 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. 5 de Outubro, EB REPUBL\_B.



Fig. M.43 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Elias Garcia, EB DCS\_RE\_C.



Fig. M.44 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Elias Garcia, EB REPUBL\_C.



Fig. M.45 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Miguel Bombarda, EB DCS\_RE\_B.



Fig. M.46 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Miguel Bombarda, EB REPUBL\_B.



Fig. M.47 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. da República, EB DCS\_RE\_C.



Fig. M.48 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. da República, EB REPUBL\_C.



#### • Avenidas Novas



Fig. M.49 – Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. 5 de Outubro, EB DCS\_SE\_A.



Fig. M.50 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. 5 de Outubro, EB S\_SEB\_A.



Fig. M.51 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Elias Garcia, EB DCS\_SE\_A.



Fig. M.52 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Elias Garcia, EB S\_SEB\_A.



Fig. M.53 - Potência recebida a 1 800 MHz para a Av. Marquês de Tomar, EB DCS\_SE\_A.



Fig. M.54 - Potência recebida a 900 MHz para a Av. Marquês de Tomar, EB S\_SEB\_A.

# ANEXO N

# Representação em MICROSTATION das medidas e previsões da potência recebida para as zonas estudadas
Fig. N.1 – Potência recebida experimental, para a estação base do Campo Pequeno, em 1 800 MHz

Fig. N.2 – Potência recebida experimental, para a estação base do Campo Pequeno, em 900 MHz

Fig. N.3 – Potência recebida experimental, para a estação base da República, em 1 800 MHz

Fig. N.4 – Potência recebida experimental, para a estação base da República, em 900 MHz

Fig. N.5 – Potência recebida experimental, para a estação base de São Sebastião, em 1 800 MHz

Fig. N.6 – Potência recebida experimental, para a estação base de São Sebastião, em 900 MHz

Fig. N.7 – Potência recebida experimental, para a estação base do Campo Pequeno, em 1 800 MHz (nível de sensibilidade)

Fig. N.8 – Potência recebida experimental, para a estação base do Campo Pequeno, em 900 MHz (nível de sensibilidade)

Fig. N.9 – Potência recebida experimental, para a estação base da República, em 1 800 MHz (nível de sensibilidade)

Fig. N.10 – Potência recebida experimental, para a estação base da República, em 900 MHz (nível de sensibilidade)

Fig. N.11 – Potência recebida experimental, para a estação base de São Sebastião, em 1 800 MHz (nível de sensibilidade)

Fig. N.12 – Potência recebida experimental, para a estação base de São Sebastião, em 900 MHz (nível de sensibilidade)

Fig. N.13 – Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebida pelo TM, para a estação base do Campo Pequeno, em 1 800 MHz

Fig. N.14 – Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebida pelo TM, para a estação base do Campo Pequeno, em 900 MHz

Fig. N.15 – Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebida pelo TM, para a estação base da República, em 1 800 MHz

Fig. N.16 – Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebida pelo TM, para a estação base da República, em 900 MHz

Fig. N.17 – Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebida pelo TM, para a estação base de São Sebastião, em 1 800 MHz

Fig. N.18 – Diferença entre as potências teóricas e experimentais recebida pelo TM, para a estação base de São Sebastião, em 900 MHz

## ANEXO O

Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagação experimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz Nas tabelas seguintes apresentamos os valores da média, média do módulo e desvio padrão, obtidos através de (4.4) a (4.6), para a diferença entre as atenuações de propagação medidas nas duas bandas de frequência, dada por (4.3). Os resultados serão apresentados individualmente para cada uma das bandas (900 MHz e 1 800 MHz), EB e ruas medidas.

#### • Zona do Arco Cego

		Estação Base do Campo Pequeno		
Due	Sector -	$L_{p\ 1800} - L_{p\ 900}$		
Kua		μ [ <b>dB</b> ]	μ <sub>abs</sub> [dB]	σ [dB]
Vilhena Barbosa	В	-0.4	1.1	1.3
Reis Gomes	В	1.2	2.2	2.6
Brito Aranha	В	8.6	8.6	2.6
Costa Goodolfim	В	6.6	6.6	2.3
Bacelar e Silva	В	8.9	8.9	2.3
Gomes da Silva (d)	В	6.0	6.0	2.9
Gomes da Silva (e)	В	6.6	6.6	4.3
Média Global		5.4	5.7	4.3

Tab. 0.1 – Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagaçãoexperimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz na zona do

Arco Cego para a EB Campo Pequeno

		Estação Base da República		
Rua	Sector	$L_{p\ 1800} - L_{p\ 900}$		
		μ [dB]	μ <sub>abs</sub> [ <b>dB</b> ]	σ [dB]
Vilhena Barbosa	C	5.9	5.9	2.2
Xavier Cordeiro	C	6.2	6.2	1.3
Tomás Borba	C	11.5	11.5	3.5
Reis Gomes	C	9.0	9.0	2.8
Brito Aranha	C	6.8	6.8	3.5
Gomes da Silva (d)	C	11.6	11.7	6.3
Cardoso Oliveira	C	13.2	13.2	3.1
Gomes da Silva (e)	C	12.7	12.7	2.4
Média Global		9.6	9.6	3.1

**Tab. O.2** – Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagaçãoexperimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz na zona do

Arco Cego para a EB República

### • Zona das Avenidas Novas

		Estação Base do Campo Pequeno		
Avenida	Sector -	$L_{p1800} - L_{p900}$		
		μ [dB]	$\mu_{abs} [dB]$	σ [dB]
Duque D'Ávila	С	5.4	5.9	4.6
Miguel Bombarda	C	1.5	2.4	3.1
Elias Garcia	С	9.8	9.8	4.2
Defensores de Chaves	C	5.7	5.9	6.7
República	С	9.9	9.9	4.2
Média Global		6.5	6.8	4.6

Tab. O.3 – Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagação experimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz na zona das Avenidas Novas para a EB Campo Pequeno

		Estação Base da República		
Avenida	Sector	$L_{p\ 1800} - L_{p\ 900}$		
Aveniua		μ [ <b>d</b> B]	$\mu_{abs} \left[ dB \right]$	σ [dB]
Miguel Bombarda	В	17.7	18.1	11.5
Elias Garcia	С	5.1	10.4	11.7
República	C	22.9	22.9	8.7
5 de Outubro	В	8.7	8.7	3.0
Média Global		13.6	15.0	8.7

Tab. 0.4 – Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagaçãoexperimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz na zona das

Avenidas Novas para a EB República

		Estação Base de São Sebastião		
Avenida	Sector	$L_{p\ 1800} - L_{p\ 900}$		
Avenida		μ [ <b>dB</b> ]	μ <sub>abs</sub> [dB]	σ [dB]
Elias Garcia	А	4.8	5.1	3.6
5 de Outubro	А	1.2	4.7	5.3
Marquês de Tomar	А	7.3	7.3	3.8
Média Global		4.4	5.7	4.2

Tab. O.5 – Parâmetros estatísticos para a diferença entre as atenuações de propagação experimental nas bandas de 900 MHz e 1 800 MHz na zona das Avenidas Novas para a EB São Sebastião

## **ANEXO P**

# Atenuação de propagação experimental em função da distância

Neste anexo são apresentados graficamente os valores de atenuação de propagação, obtidos a partir da potência recebida experimentalmente ao longo da rua, para 900 MHz e para 1 800 MHz. As curvas representadas são: a atenuação de propagação média para 900 MHz e a atenuação de propagação média para 1 800 MHz. Assim, as curvas representadas podem ser identificadas a partir da seguinte legenda:

Potência recebida experimental a 1 800 MHz

x Potência recebida teórica a 900 MHz

Х

Apresenta-se ainda em cada figura os valores do factor de decaimento médio de potência para 900 MHz e para 1 800 MHz, obtidos por regressão linear das respectivas curvas.
### **EB** Campo Pequeno



#### Arco Cego

Fig. P.1 – Atenuação de propagação para a Rua Brito Aranha, EB Campo Pequeno\_B.



Fig. P.2 - Atenuação de propagação para a Rua Bacelar e Silva, EB Campo Pequeno\_B.



Fig. P.3 - Atenuação de propagação para a Rua Costa Goodolfim, EB Campo Pequeno\_B.



Fig. P.4 - Atenuação de propagação para a Rua Gomes da Silva (d), EB Campo Pequeno\_B.



Fig. P.5 – Atenuação de propagação para a Rua Gomes da Silva (e), EB Campo Pequeno\_B.



Fig. P.6 - Atenuação de propagação para a Rua Reis Gomes, EB Campo Pequeno\_B.



Fig. P.7 - Atenuação de propagação para a Rua Vilhena Barbosa, EB Campo Pequeno\_B.



#### Avenidas Novas

Fig. P.8 - Atenuação de propagação para a Av. Duque d'Ávila, EB Campo Pequeno\_C.



Fig. P.9 - Atenuação de propagação para a Av. Defensores de Chaves, EB Campo Pequeno\_C.



Fig. P.10 - Atenuação de propagação para a Av. Elias Garcia, EB Campo Pequeno\_C.



Fig. P.11 - Atenuação de propagação para a Av. Miguel Bombarda, EB Campo Pequeno\_C.



Fig. P.12 - Atenuação de propagação para a Av. da República, EB Campo Pequeno\_C.

## **EB República**



#### Arco Cego

Fig. P.13 - Atenuação de propagação para a Rua Brito Aranha, EB República\_C.







Fig. P.15 - Atenuação de propagação para a Rua Gomes da Silva (d), EB República\_C.



Fig. P.16 - Atenuação de propagação para a Rua Gomes da Silva (e), EB República\_C.



Fig. P.17 - Atenuação de propagação para a Rua Reis Gomes, EB República\_C.



Fig. P.18 - Atenuação de propagação para a Rua Tomás Borba, EB República\_C.



Fig. P.19 - Atenuação de propagação para a Rua Vilhena Barbosa, EB República\_C.



Fig. P.20 - Atenuação de propagação para a Rua Xavier Cordeiro, EB República\_C.

#### Avenidas Novas



Fig. P.21 - Atenuação de propagação para a Av. Elias Garcia, EB República\_C.



Fig. P.22 - Atenuação de propagação para a Av. Miguel Bombarda, EB República\_B.



Fig. P.23 - Atenuação de propagação para a Av. da República, EB República\_C.



Fig. P.24 - Atenuação de propagação para a Av. 5 de Outubro, EB República\_C.



Fig. P.25 - Atenuação de propagação para a Av. 5 de Outubro, EB República\_C.





#### Avenidas Novas

Fig. P.26 - Atenuação de propagação para a Av. Elias Garcia, EB S.Sebastião\_A.



Fig. P.27 - Atenuação de propagação para a Av. Marquês de Tomar, EB S.Sebastião\_A.



Fig. P.28 - Atenuação de propagação para a Av. 5 de Outubro, EB S.Sebastião\_A.

# ANEXO Q

# Representação em MICROSTATION da atenuação de propagação experimental para as zonas estudadas

\_

Fig. Q.1 – Atenuação de propagação experimental, para a estação base do Campo Pequeno, em 1 800 MHz

Fig. Q.2 – Atenuação de propagação experimental, para a estação base do Campo Pequeno, em 900 MHz

Fig. Q.3 – Atenuação de propagação experimental, para a estação base da República, em 1 800 MHz

Fig. Q.4 – Atenuação de propagação experimental, para a estação base da República, em 900 MHz

Fig. Q.5 – Atenuação de propagação experimental, para a estação base de São Sebastião, em 1 800 MHz

Fig. Q.6 – Atenuação de propagação experimental, para a estação base de São Sebastião, em 900 MHz

Fig. Q.7 – Diferença entre a atenuação de propagação na banda de 1 800 MHz e 900 MHz, para a estação base do Campo Pequeno

Fig. Q.8 – Diferença entre a atenuação de propagação na banda de 1 800 MHz e 900 MHz, para a estação base da República

Fig. Q.9 – Diferença entre a atenuação de propagação na banda de 1 800 MHz e 900 MHz, para a estação base de São Sebastião
## ANEXO R

## **Gráficos Auxiliares**



Rua Brito Aranha – EB Campo Pequeno

Fig. R.1 - Perfil estação base - terminal móvel com CGD e sem CGD,

para  $d_via = 56$  m e  $d_via = 57$  m.



Fig. R.2 – Perfil para dois pontos consecutivos da R. Brito Aranha.



Avenida Elias Garcia – EB Campo Pequeno

Fig. R.3 – Ganho das antenas da estação base do Campo Pequeno ao longo da Avenida Elias Garcia para 900 MHz



Fig. R.4 – Ganho das antenas da estação base do Campo Pequeno ao longo da Avenida Elias Garcia para 1 800 MHz



Avenida Elias Garcia – EB Campo Pequeno





Fig. R.6 – Andamento dos ângulos  $\theta e \phi$  ao longo da Avenida Elias Garcia para 1 800 MHz



Avenida da República – EB República

Fig. R.7 – Ganho das antenas da estação base da República ao longo da Avenida da República para 900 MHz



Fig. R.8 – Ganho das antenas da estação base da República ao longo da Avenida da República para 1 800 MHz



## Avenida da República – EB República





Fig. R.10 – Andamento dos ângulos  $\theta e \phi$  ao longo da Avenida da República para 1 800 MHz



Avenida Elias Garcia – EB São Sebastião

Fig. R.11 – Perfil para dois pontos consecutivos da Av. Elias Garcia

para a estação base de São Sebastião.