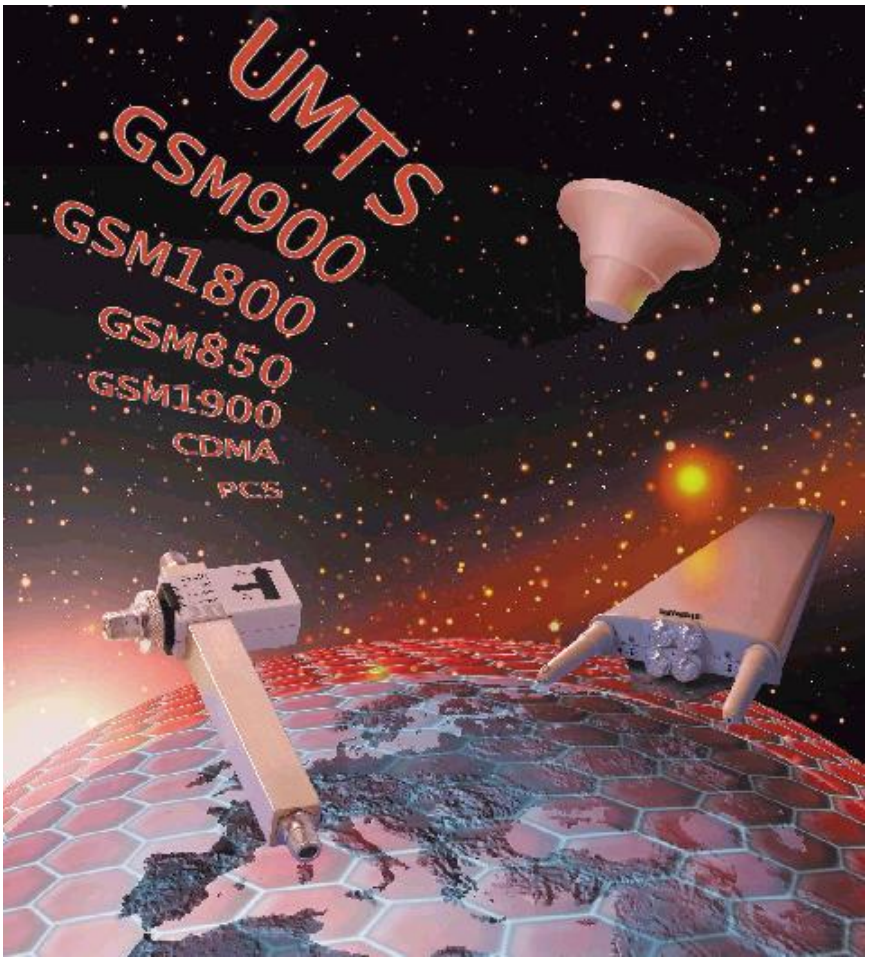
UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

CARACTERIZAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE SINAL EM EDIFÍCIOS PARA O GSM



© Kathrein

David M. Xavier
Jorge M. Venes

561/2001/L

Lisboa, Setembro de 2002

Sob a orientação de

Professor Luís M. Correia

Secção de Propagação e Radiação
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Instituto Superior Técnico

‘ Radio has no future’

***Lord Kelvin**, 1897*

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Luís Correia, pela confiança em nós depositada na atribuição deste trabalho, e por todos os conhecimentos que conosco partilhou, como professor e como orientador. Ter tido o privilégio de trabalhar sob a sua orientação foi um experiência que nos enriqueceu consideravelmente não só no aspecto científico, como em todos os outros aspectos da vida. A sua capacidade de organização, a sua dimensão humana, o cunho de rigor e isenção que faz questão de imprimir a tudo o que faz e a sua elevada competência científica, aliadas ao seu carisma, descontracção e simpatia naturais converteram trabalho em prazer, e souberam induzir-nos subtilmente na procura constante e determinada da excelência. Obrigado pela disponibilidade, pelos conselhos, pela regularidade das reuniões e pelo seu apoio sempre presente. Bem haja!

À Vodafone Telecel – Comunicações Pessoais SA. pela cedência do material de medida e dos dados de rede, essenciais para a execução de um trabalho deste tipo, e em particular aos engenheiros Carlos Caseiro e Luís Reis. Uma palavra especial de apreço ao Engenheiro Luís Reis, pela valiosa colaboração, pelo interesse e entusiasmo demonstrados, e pela eficiência e prontidão com que nos forneceu dados e esclarecimentos sempre que o solicitámos.

À Sofia Brito, da Mobiconsult, pelos esforços e persistência na marcação das medições, o que nem sempre terá sido tarefa fácil.

A todas as outras pessoas que participaram indirectamente na campanha de medidas, que tiveram a amabilidade e a paciência de nos acompanhar no decorrer do (fastidioso) processo de medições, das quais gostaríamos de destacar a simpática pessoa do Sr. Eduardo Ferreira, do Edifício Monumental, inexcedível no apoio, na assistência e na companhia que voluntária e amavelmente nos dispensou ao longo de dois dias.

Aos nossos companheiros de laboratório, sem ordem preferencial, Allen, Patrícia, Gonçalo e Carla, pelas sugestões e auxílio, pelos momentos de convívio e pela companhia, que muito nos ajudou a ultrapassar as intermináveis horas de trabalho no nosso espaço comum.

Ao Jorge Aguiar e à Gabriela Marques pelo apoio logístico que nos prestaram e também pela disponibilidade para o esclarecimento de todas as questões que lhes solicitámos.

Aos nossos amigos e namoradas, pela compreensão dos nossos períodos de ausência dedicados ao trabalho e pelo apoio importantíssimo e insubstituível que só eles, cada um na sua forma especial, nos podem dar: Pacheco ("Zé"), Hugo Portugal, Sérgio "Lampião" Mendes, Elisa Matias, Hugo Andrez, Filipe, Pinhas, Luís "Sócio", Nuno Boavista e à "malta do Técnico", Cabeço, Crispim, João Paulo, Brito e Gonçalo.

Aos nossos familiares, aos nossos irmãos e avós, aos vivos e aos que faleceram entretanto, que certamente gostariam de partilhar este momento conosco, tal como nós gostaríamos.

A nossa última e mais importante palavra de reconhecimento dirige-se aos nossos pais. Companheiros e protectores de todas as horas, foram, são e sempre serão os nossos grandes pilares de apoio ao longo da nossa vida. Num país onde infelizmente a educação não é barata, foram eles que nos proporcionaram todas as condições para que nos pudéssemos dedicar a tempo inteiro aos nossos cursos; é também graças a eles que conseguimos chegar até aqui. Obrigado!

Resumo

O objectivo deste trabalho é o estudo da penetração de sinal em edifícios para a banda de 1 800 MHz do GSM. Em particular, pretende-se modelar a atenuação de sinal no interior dos edifícios, relativamente a um nível padrão, aferido no exterior ao nível da rua, a cerca de 1,5 m do solo. Os edifícios são divididos em quatro categorias, de acordo com a sua altura (Alto ou Baixo) e grau de integração na estrutura urbana (Integrado ou Isolado), de modo a que se possam aferir também resultados característicos de cada uma das categorias.

Com vista à obtenção de um suporte teórico para a resolução do problema em estudo, é feito, na literatura, um levantamento dos principais modelos de estimação de perdas de penetração. O suporte prático consiste numa extensa campanha de medidas, utilizando a rede GSM da Vodafone, realizada em onze edifícios na cidade de Lisboa. A partir dos resultados obtidos, foi criado um novo modelo, baptizado como Modelo da Dupla Normal, pensado justamente para se adaptar aos resultados observados em termos de probabilidade de ocorrência de um determinado valor de atenuação no interior de um edifício. Para caracterizar estatísticamente as amostras recolhidas e aferir de uma forma expedita os parâmetros optimizados do modelo para cada edifício foi desenvolvida uma ferramenta de *software* em Matlab, usando como critério de convergência o cumprimento do Teste do χ^2 . Foram obtidas curvas de densidade de probabilidade de atenuação para cada um dos onze edifícios e para cada uma das quatro categorias estudadas, bem como a curva global de densidade de probabilidade de atenuação, tendo-se verificado que esta última assume a forma de uma função Normal, de encontro ao postulado do Teorema do Limite Central, com um valor médio de 10,2 dB e um desvio padrão de cerca de 13,8 dB. Dado o grande números de medidas úteis obtido (cerca de 120 000) que é revestido de elevada relevância estatística, os parâmetros obtidos revestem-se de grande representatividade das condições de propagação reais, e quiçá, de grande utilidade para um operador de comunicações móveis, em termos de planeamento de cobertura. Obtiveram-se também parâmetros (escassos na literatura) para um modelo empírico de carácter estatístico (Modelo de Berg) e é testada a eficácia de uma extensão do Modelo de Walfisch-Ikegami, destinada a dotar o mesmo de capacidade de estimação de atenuação no interior de edifícios; o conjunto apresentou, contudo, estimativas com erros consideráveis associados.

É também efectuada, para alguns edifícios, uma comparação com resultados de medidas de atenuação na banda de 900 MHz, esperando-se obter, para a banda de 1 800 MHz, atenuações superiores em cerca de 6 dB, o que se verificou na maioria dos casos. É também levado a cabo um estudo sobre a correlação da atenuação medida nos vários pisos de um edifício e o ganho direccional de uma antena, situada a menos de 200m e em linha de vista com esse edifício, para cada um desses pisos, tendo-se obtido, em quatro casos, coeficientes de correlação inversa superiores a 0,75.

Palavras Chave

GSM. Modelos de Propagação. Atenuação. Penetração. Cobertura.

Índice

Agradecimentos.....v
Resumo e Palavras Chave.....vii
Índice.....ix
Lista de Figuras.....xv
Lista de Tabelas.....xix
Lista de Siglas.....xxiii
Lista de Símbolos.....xxv
Lista de Programas xxvii

I. Introdução.....1

II. Aspectos Teóricos.....7
II.1 Considerações Gerais..... 7
II.2 Modelos de Propagação para Exteriores..... 8
II.3 Modelos de Propagação Estatísticos para Interiores..... 9
II.3.1 Modelo de Espaço Livre Modificado..... 9
II.3.2 Modelo Multi-Paredes..... 10
II.3.3 Modelo de Ganho em Altura..... 11
II.3.4 Modelo de Gahleitner e Bonek..... 12
II.3.5 Modelo IST/Telecel 900..... 13
II.4 Modelos de Propagação Semi-Determinísticos e Determinísticos para Interiores..... 13
II.4.1 Modelo de Berg..... 13
II.4.2 Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido..... 15
II.4.3 Modelos Determinísticos..... 17
II.5 Caracterização das Antenas..... 18

III. Recolha e Processamento de Dados.....21
III.1 Processo de Medida.....21
III.2 Descrição Física dos Edifícios Medidos.....24

III.3 Processamento de Dados....27

IV. Análise de Resultados....33
IV.1 Categoria Isolado-Alto.... 33
IV.2 Categoria Isolado-Baixo.... 37
IV.3 Categoria Integrado-Alto....39
IV.4 Categoria Integrado-Baixo....42
IV.5 Resultados Globais.... 43

V. Conclusões.... 49

Anexo A – Dados do Edifício da Av. Almirante Reis
A.1 Geral.... A-1
A.2 Resultados da Campanha de Medidas.... A-2
A.3 Cobertura....A-4
A.4 Testes Estatísticos.... A-5
A.4.1 Cobertura....A-5
A.4.2 Modelo da Dupla Normal.... A-5
A.4.3 Modelo de Berg....A-7
A.4.4 Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido.... A-8

Anexo B – Dados do Edifício Monumental
B.1 Geral.... B-1
B.2 Resultados da Campanha de Medidas....B-2
B.3 Cobertura.... B-8
B.4 Testes Estatísticos.... B-9
B.4.1 Distribuição.... B-9
B.4.2 Modelo da Dupla Normal....B-9
B.4.3 Modelo de Berg....B-11

Anexo C – Dados do Edifício Castil
C.1 Geral.... C-1
C.2 Resultados da Campanha de Medidas....C-2
C.3 Cobertura.... C-7
C.4 Testes Estatísticos.... C-8
C.4.1 Distribuição.... C-8
C.4.2 Modelo da Dupla Normal....C-8
C.4.3 Modelo de Berg.... C-10
C.4.4 Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido.... C-12

Anexo D – Dados do Centro Cultural de Belém
D.1 Geral.... D-1
D.2 Resultados da Campanha de Medidas.... D-2

D.3 Cobertura (Blocos 1 e 2)..... D-5
D.4 Testes Estatísticos (Blocos 1 e 2).....D-6
D.4.1 Distribuição.....D-6
D.4.2 Modelo da Dupla Normal (Blocos 1 e 2).....D-6
D.4.3 Modelo de Berg (Blocos 1 e 2)..... D-8
D.5 Resultados da Campanha de Medidas (Bloco 3).....D-9
D.6 Cobertura (Blocos 3)..... D-10
D.7 Testes Estatísticos..... D-11
D.7.1 Distribuição.....D-11
D.7.2 Modelo da Dupla Normal..... D-11

Anexo E – Dados do Edifício Castil

E.1 Geral.....E-1
E.2 Resultados da Campanha de Medidas.....E-2
E.3 Cobertura..... E-6
E.4 Testes Estatísticos..... E-7
E.4.1 Distribuição..... E-7
E.4.2 Modelo da Dupla Normal.....E-7
E.4.3 Modelo de Berg.....E-9
E.4.4 Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido.....E-11

Anexo F – Dados do Edifício Cpo. Mártires da Pátria

F.1 Geral.....F-1
F.2 Resultados da Campanha de Medidas..... F-2
F.3 Cobertura.....F-4
F.4 Testes Estatísticos.....F-6
F.4.1 Distribuição.....F-6
F.4.2 Modelo da Dupla Normal..... F-6
F.4.3 Modelo de Berg..... F-8
F.4.4 Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido..... F-9

Anexo G – Dados do Edifício Sede do Grupo Jerónimo Martins

G.1 Geral..... G-1
G.2 Resultados da Campanha de Medidas..... G-2
G.3 Cobertura.....G-6
G.4 Testes Estatísticos..... G-7
G.4.1 Distribuição.....G-7
G.4.2 Modelo da Dupla Normal..... G-7
G.4.3 Modelo de Berg.....G-9

Anexo H – Dados da Torre Norte do Instituto Superior Técnico

H.1 Geral..... H-1
H.2 Resultados da Campanha de Medidas..... H-2

H.3 Cobertura.....H-6
H.4 Factor de Correcção do Ganho das Antenas..... H-7
H.5 Testes Estatísticos..... H-8
H.5.1 Distribuição.....H-8
H.5.2 Modelo da Dupla Normal..... H-8
H.5.3 Modelo de Berg.....H-10

Anexo I – Dados do Pavilhão Central do Instituto Superior Técnico

I.1 Geral.....I-1
I.2 Resultados da Campanha de Medidas..... I-2
I.3 Cobertura.....I-5
I.4 Factor de Correcção do Ganho das Antenas..... I-7
I.5 Testes Estatísticos.....I-8
I.5.1 Distribuição..... I-8
I.5.2 Modelo da Dupla Normal.....I-8
I.5.3 Modelo de Berg..... I-10

Anexo J – Dados da Torre da Vodafone

J.1 Geral.....J-1
J.2 Resultados da Campanha de Medidas.....J-2
J.3 Cobertura..... J-7
J.4 Factor de Correcção do Ganho das Antenas.....J-9
J.5 Testes Estatísticos..... J-10
I.5.1 Distribuição..... J-10
J.5.1 Modelo da Dupla Normal..... J-10
J.5.2 Modelo de Berg.....J-12

Anexo K – Dados do Complexo Interdisciplinar do Instituto Superior Técnico

K.1 Geral.....K-1
K.2 Resultados da Campanha de Medidas..... K-2
K.3 Cobertura.....K-6
K.4 Factor de Correcção do Ganho das Antenas..... K-7
K.5 Testes Estatísticos.....K-8
K.5.1 Distribuição.....K-8
K.5.2 Modelo da Dupla Normal..... K-8
K.5.3 Modelo de Berg..... K-10
K.5.4 Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido.....K-11

Anexo L – Dados Gerais das Classes de Edifícios

L.1 Geral.....L-1
L.2 Parâmetros Gerais de Cobertura..... L-2
L.3 Modelo da Dupla Normal.....L-5

L.3.1 Categoria Isolado Alto..... L-6
L.3.2 Categoria Isolado Baixo..... L-8
L.3.3 Categoria Integrado Alto..... L-10
L.3.4 Categoria Integrado Baixo.....L-12
L.3.5 Geral..... L-14

Anexo M – Antenas para Comunicações Móveis.....M-1

Anexo N – Teste do χ^2.....N-1

Anexo O – Equipamento de Medida e Edifícios.....O-1

Referências.....Ref-1

Lista de Figuras

Figura I.1 Cobertura de interiores a partir do exterior (extraído de [MeKu01])..... 2
Figura II.1 Caminhos de propagação entre a estação de base, representada por BS, e os diferentes pisos de um edifício (extraído de [MeKu01])……..... 11
Figura II.2 Cenário de NLoS com a antena da EB acima do nível dos telhados (extraído de [DaCo99])..... 14
Figura II.3 Cenário de NLoS com a antena da EB abaixo do nível dos telhados (extraído de [DaCo99])..... 15
Figura II.4 Cenário de propagação NLoS típico para aplicação do Modelo W-I Estendido; parâmetros associados……..... 16
Figura II.5 Ângulo de incidência com o eixo da rua..... 17
Figura III.1 Exemplo de um ficheiro do tipo "scn"..... 22
Figura III.2 Processo de medida..... 23
Figura III.3 Aspecto da função distribuição de probabilidade típica..... 29
Figura III.4 O Processo de "espelhamento"..... 29
Figura III.5 Fluxograma do algoritmo de tratamento de dados..... 30
Figura IV.1 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear…... 34
Figura IV.2 Função de probabilidade acumulada…… 36
Figura IV.3 Representação gráfica das atenuações medidas e corrigidas……..... 36
Figura IV.4 Histograma do número de ocorrências de cada classe…….. 37
Figura IV.5 Comparação entre as duas bandas do sistema GSM……..... 38
Figura IV.6 Funções acumuladas de probabilidade das várias categorias..... 44
Figura IV.7 Histograma global..... 47
Figura A.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto)..... A-2
Figura A.2 Função de Probabilidade Acumulada..... A-4
Figura A.3 Função Densidade de Probabilidade..... A-5
Figura A.4 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... A-6
Figura A.5 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... A-6
Figura A.6 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear..... A-8
Figura B.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto)..... B-2
Figura B.2 Função de Probabilidade Acumulada..... B-8
Figura B.3 Função Densidade de Probabilidade..... B-9
Figura B.4 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... B-10
Figura B.5 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... B-11
Figura B.6 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear..... B-12
Figura C.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto)..... C-2
Figura C.2 Função de Probabilidade Acumulada..... C-7
Figura C.3 Função Densidade de Probabilidade..... C-8
Figura C.4 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... C-9
Figura C.5 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... C-9
Figura C.6 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear..... C-11
Figura D.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto)..... D-2
Figura D.2 Função de Probabilidade Acumulada..... D-5
Figura D.3 Função Densidade de Probabilidade..... D-6
Figura D.4 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... D-7
Figura D.5 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... D-7
Figura D.6 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear..... D-8

Figura D.7 Função de Probabilidade Acumulada..... D-10
Figura D.8 Função Densidade de Probabilidade.....D-11
Figura D.9 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... D-12
Figura D.10 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... D-12
Figura E.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).....E-2
Figura E.2 Função de Probabilidade Acumulada..... E-6
Figura E.3 Função Densidade de Probabilidade.....E-7
Figura E.4 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... E-8
Figura E.5 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... E-8
Figura E.6 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.... E-10
Figura F.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).....F-2
Figura F.2 Função de Probabilidade Acumulada..... F-4
Figura F.3 Comparação entre as duas bandas do sistema GSM.....F-3
Figura F.4 Função Densidade de Probabilidade.....F-6
Figura F.5 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... F-7
Figura F.6 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... F-7
Figura F.7 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.... F-9
Figura G.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).....G-2
Figura G.2 Função de Probabilidade Acumulada (1ª parte)..... G-6
Figura G.3 Função de Probabilidade Acumulada (2ª parte)..... G-6
Figura G.4 Função Densidade de Probabilidade.....G-7
Figura G.5 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... G-8
Figura G.6 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... G-8
Figura G.7 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.... G-10
Figura H.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).....H-2
Figura H.2 Função de Probabilidade Acumulada..... H-6
Figura H.3 Representação gráfica das atenuações medidas e corrigidas..... H-7
Figura H.4 Função Densidade de Probabilidade.....H-8
Figura H.5 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... H-9
Figura H.6 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... H-9
Figura H.7 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.... H-12
Figura I.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).....I-2
Figura I.2 Função de Probabilidade Acumulada..... I-5
Figura I.3 Comparação entre as duas bandas do sistema GSM.....I-6
Figura I.4 Representação gráfica das atenuações medidas e corrigidas..... I-7
Figura I.5 Função Densidade de Probabilidade.....I-8
Figura I.6 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... I-9
Figura I.7 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... I-9
Figura I.8 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.... I-10
Figura J.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).....J-2
Figura J.2 Função de Probabilidade Acumulada (1º parte)..... J-7
Figura J.3 Função de Probabilidade Acumulada (2º parte)..... J-7
Figura J.4 Comparação entre as duas bandas do sistema GSM..... J-8
Figura J.5 Representação gráfica das atenuações medidas e corrigidas..... J-9
Figura J.6 Função Densidade de Probabilidade.....J-10
Figura J.7 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... J-11
Figura J.8 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... J-11
Figura J.9 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.... J-14
Figura K.1 Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).....K-2
Figura K.2 Função de Probabilidade Acumulada..... K-6

Figura K.3 Representação gráfica das atenuações medidas e corrigidas..... K-7
Figura K.4 Função Densidade de Probabilidade..... K-8
Figura K.5 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... K-9
Figura K.6 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... K-9
Figura K.7 Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.... K-11
Figura L.1 Funções de Probabilidade Acumulada para edifícios da categoria "Isolado Alto"..... L-3
Figura L.2 Funções de Probabilidade Acumulada para edifícios da categoria "Isolado Baixo"..... L-3
Figura L.3 Funções de Probabilidade Acumulada para edifícios da categoria "Integrado Alto"..... L-4
Figura L.4 Funções de Probabilidade Acumulada para edifícios da categoria "Integrado Baixo"..... L-4
Figura L.5 Função Densidade de Probabilidade da categoria "Isolado Alto"..... L-5
Figura L.6 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... L-6
Figura L.7 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... L-6
Figura L.8 Função Densidade de Probabilidade da categoria "Isolado Baixo"..... L-7
Figura L.9 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... L-7
Figura L.10 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... L-8
Figura L.11 Função Densidade de Probabilidade da categoria "Integrado Alto"..... L-8
Figura L.12 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... L-9
Figura L.13 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... L-9
Figura L.14 Função Densidade de Probabilidade da categoria "Integrado Baixo"..... L-10
Figura L.15 Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5)..... L-10
Figura L.17 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5)..... L-11
Figura M.1 Antena *dual-band* para GSM 1900 e UMTS (extraído de [Kath02])..... M-1
Figura M.2 Antena de UMTS (extraído de [Kath02])..... M-1
Figura M.3 Diagrama de Radiação Vertical de uma antena omnidireccional (extraído de [Kath01])..... M-2
Figura M.4 Antena sectorial *dual-band* para GSM 1800 e UMTS (extraído de [Kath01])..... M-2
Figura M.5 Diagrama de Radiação de antena direccional *dual-band* para GSM 1800 e UMTS (extraído de [Kath01])..... M-2
Figura M.6 Antena adaptativa para o sistema TDMA 1900, instalada em conjunto com antenas de diversidade espacial (extraído de [ACHL99])..... M-3
Figura O.1 Veículo de medida, PC portátil e terminal móvel..... O-1
Figura O.2 Edifício da Avenida Almirante Reis : (a) Aspecto exterior; (b) Aspecto interior..... O-3
Figura O.3 Edifício Monumental..... O-4
Figura O.4 Edifício Castil: (a) Aspecto exterior; (b) Corredores; (c) Salas interiores..O-7
Figura O.5 Centro Cultural de Belém: (a) Aspecto exterior; (b) Aspecto interior.....O-8
Figura O.6 Edifício da Avenida da República: (a) Aspecto exterior; (b) Aspecto interior..... O-10
Figura O.7 Edifício do Campo Mártires da Pátria: (a) Aspecto exterior; (b) Aspecto interior..... O-11
Figura O.8 Edifício Sede do Grupo Jerónimo Martins: (a) Vista da 2ª circular; (b) Fachada lateral. O-13
Figura O.9 Torre Norte do Instituto Superior Técnico: (a) Fachada frontal; (b) Vista do "campus" do IST..... O-15
Figura O.10 Pavilhão Central do Instituto Superior Técnico.....O-16

Figura O.11 Torre da Vodafone: (a) e (d): Fachada frontal; (b) Fachada lateral; (c) Fachada traseira..... O-20
Figura O.12 Complexo Interdisciplinar do Instituto Superior Técnico..... O-21

Lista de Tabelas

Tabela I.1 Valores máximos de potência das estações de base em GSM……..3
Tabela I.2 Valores máximos de potência das estações de base em GSM para microcélulas…….... ..3
Tabela I.3 Valores máximos e mínimos de potência dos terminais móveis em GSM.....4
Tabela I.4 Valores de sensibilidade para os terminais móveis……. ..4
Tabela I.5 Sensibilidades para diferentes débitos binários em UMTS……. ..5
Tabela I.6 Valores máximos de potência das estações de base em UMTS...…….....5
Tabela II.1 Classificação de edifícios para efeitos de planeamento……... ..8
Tabela II.2 Valores típicos dos parâmetros do Modelo de Gahleitner e Bonek….....13
Tabela IV.1 Parâmetros estatísticos (por piso)…… 42
Tabela IV.2 Probabilidades de cobertura para cada categoria…… 45
Tabela IV.3 Parâmetros do Modelo da Dupla Normal por edifício…….……45
Tabela IV.4 Parâmetros do Modelo da Dupla Normal por categoria…..…… 45
Tabela IV.5 Erro Quadrático Médio por categoria e edifício…….. 46
Tabela IV.6 Parâmetros dos Modelos de Berg e Walfisch – Ikegami Estendido por edifício……. 46
Tabela IV.7 Parâmetros dos Modelos de Berg e Walfisch – Ikegami Estendido por classe……47
Tabela A.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas……A-2
Tabela A.2 Atenuações interiores medidas.....…… A-3
Tabela A.3 Parâmetros gerais (por piso)……. A-3
Tabela A.4 Parâmetros de cobertura……....A-4
Tabela A.5 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)…..... A-5
Tabela A.6 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg……..A-7
Tabela A.7 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado……A-7
Tabela A.8 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado……..A-8
Tabela A.9 Cálculo do parâmetro L_{tm}……..A-8
Tabela A.10 Parâmetros do modelo……...A-8
Tabela B.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas……... B-2
Tabela B.2 Atenuações interiores medidas …… B-3
Tabela B.3 Parâmetros gerais (por piso)……. B-7
Tabela B.4 Parâmetros de cobertura……... B-8
Tabela B.5 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)…….. B-9
Tabela B.6 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg……..... B-11
Tabela B.7 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado……....B-12
Tabela B.8 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado……. B-12
Tabela C.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas……... C-2
Tabela C.2 Atenuações interiores medidas …… C-3
Tabela C.3 Parâmetros gerais (por piso)……. C-6
Tabela C.4 Parâmetros de cobertura……....C-7

Tabela C.5 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)..... C-8
Tabela C.6 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg..... C-11
Tabela C.7 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado..... C-11
Tabela C.8 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado..... C-12
Tabela C.9 Cálculo do parâmetro L_{tm}..... C-12
Tabela C.10 Parâmetros do modelo..... C-12
Tabela D.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas..... D-2
Tabela D.2 Atenuações interiores medidas D-3
Tabela D.3 Parâmetros gerais (por piso)..... D-4
Tabela D.4 Parâmetros de cobertura..... D-5
Tabela D.5 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)..... D-6
Tabela D.6 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg..... D-8
Tabela D.7 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado..... D-8
Tabela D.8 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado..... D-8
Tabela D.9 Atenuações interiores medidas D-9
Tabela D.10 Parâmetros gerais (por piso)..... D-9
Tabela D.11 Parâmetros de cobertura..... D-10
Tabela D.12 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)..... D-11
Tabela E.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas..... E- 2
Tabela E.2 Atenuações interiores medidas E-3
Tabela E.3 Parâmetros gerais (por piso)..... E-5
Tabela E.4 Parâmetros de cobertura..... E-6
Tabela E.5 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)..... E-7
Tabela E.6 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg..... E-9
Tabela E.7 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado..... E-10
Tabela E.8 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado..... E-10
Tabela E.9 Cálculo do parâmetro L_{tm}..... E-11
Tabela E.10 Parâmetros do modelo..... E-11
Tabela F.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas..... F-2
Tabela F.2 Atenuações interiores medidas F-3
Tabela F.3 Parâmetros gerais (por piso)..... F-3
Tabela F.4 Parâmetros de cobertura..... F-4
Tabela F.5 Comparação entre as duas bandas..... F-5
Tabela F.6 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)..... F-6
Tabela F.7 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg..... F-8
Tabela F.8 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado..... F-8
Tabela F.9 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado..... F-9
Tabela F.10 Cálculo do parâmetro L_{tm}..... F-9

Tabela F.11 Parâmetros do modelo…….. F-9
Tabela G.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas……..... G-2
Tabela G.2 Atenuações interiores medidas ...…… G-3
Tabela G.3 Parâmetros gerais (por piso)……. G-5
Tabela G.4 Parâmetros de cobertura……G-7
Tabela G.5 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)...……...G-7
Tabela G.6 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg……..G-10
Tabela G.7 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado……G-10
Tabela G.8 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado……..G-11
Tabela H.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas……... H-2
Tabela H.2 Atenuações interiores medidas .....…… H-3
Tabela H.3 Parâmetros gerais (por piso)……. H-5
Tabela H.4 Parâmetros de cobertura……H-6
Tabela H.5 Atenuações e resultados extrapolados para o Diagrama de Radiação.. H-7
Tabela H.6 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)...…….. H-8
Tabela H.7 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg……..H-10
Tabela H.8 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado……H-11
Tabela H.9 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado……..H-12
Tabela I.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas……... I-2
Tabela I.2 Atenuações interiores medidas …… I-4
Tabela I.3 Parâmetros gerais (por piso)……. I-4
Tabela I.4 Parâmetros de cobertura……I-5
Tabela I.5 Comparação entre as duas bandas……... I-6
Tabela I.6 Atenuações e resultados extrapolados para o Diagrama de Radiação.. I-7
Tabela I.7 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)...……...I-8
Tabela I.8 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg……..I-10
Tabela I.9 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado……I-10
Tabela I.10 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado……..I-10
Tabela J.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas……... J-2
Tabela J.2 Atenuações interiores medidas ...…… J-3
Tabela J.3 Parâmetros gerais (por piso)……. J-6
Tabela J.4 Parâmetros de cobertura……J-8
Tabela J.5 Comparação entre as duas bandas…… J-8
Tabela J.6 Atenuações e resultados extrapolados para o Diagrama de Radiação.. J-9
Tabela J.7 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)...…….. J-10
Tabela J.8 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg……..J-12
Tabela J.9 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado……J-14
Tabela J.10 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado……..J-15
Tabela K.1 Parâmetros exteriores das Estações Base medidas……... K-2
Tabela K.2 Atenuações interiores medidas …… K-3
Tabela K.3 Parâmetros gerais (por piso)……. K-5

Tabela K.4 Parâmetros de cobertura……... K-6
Tabela K.5 Atenuações e resultados extrapolados para o Diagrama de Radiação.. K-7
Tabela K.6 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do χ^2 e raiz do erro quadrático médio (em percentagem)...…….. K-8
Tabela K.7 Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg……..K-10
Tabela K.8 Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado……K-10
Tabela K.9 Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado……..K-11
Tabela K.10 Cálculo do parâmetro L_{tm}……..K-11
Tabela K.11 Parâmetros do Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido...……... K-11
Tabela L.1 Parâmetros específicos de cobertura para cada edifício……... L-2
Tabela L.2 Parâmetros de atenuação para cada edifício……. L-2
Tabela L.3 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal e respectivos parâmetros do teste do χ^2…..... L-5
Tabela L.4 Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal e a respectiva raiz do erro quadrático médio (em percentagem)...….....….... L-5

Lista de Siglas

ARFCN	*Absolute Radio Frequency Channel*
BCCH	*Broadcast Channel*
BSIC	*Base Station Identity Code*
DECT	*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*
DR	Diagrama de Radiação
EB	Estação de Base
ETSI	*European Telecommunications Standards Institute*
FDD	*Frequency-Division Duplex*
FDMA	*Frequency Division Multiple Acess*
FDTD	Técnica das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Diferences Time Domain*)
GA	Ganho em Altura
GO	Óptica Geométrica (*Geometric Optics*)
GSM	*Global System for Mobile Communications*
GTD	Teoria Geométrica da Difracção (*Geometric Theory of Difraction*)
LAC	*Location Area Code*
LoS	Linha de Vista (*Line of Sight)*
NLoS	Ausência de Linha de Vista (*Non-Line of Sight*)
PACS	*Personal Acess Communications System*
PHS	*Personal Handy Phone System*
TDD	*Time-Division Duplex*
TDMA	*Time Division Multiple Acess*
TEMS	*Test Mobile System*
TM	Terminal Móvel
UMTS	*Universal Mobile Telecommunications System*
W-I	Walfisch-Ikegami

Lista de Símbolos

a,b parâmetros empíricos
c_o velocidade da luz no vácuo
d distância entre emissor e receptor
$E(X)$ valor esperado de X
f frequência
$F^{esp}(s)$ frequência esperada para a classe s
$F^{obs}(s)$ frequência observada para a classe s
G_e ganho da antena de emissão
G_h ganho em altura
G_{piso} ganho da antena na direcção de um piso
G_r ganho da antena de recepção
G_{rua} ganho da antena na direcção do nível da rua
H_B altura dos edifícios circundantes
h altura do receptor acima do nível da rua
h_m altura do móvel
I número de tipos de paredes
int/ext parâmetro Interior/Exterior
J número de tipos de pisos
K dimensão do conjunto de amostras
k_{fj} número de pisos de tipo j penetrados pelo raio directo
k_{im} número de paredes interiores do tipo m
k_{mn} número de paredes de tipo m interceptadas pela semi-recta perpendicular à parede exterior n e com origem na localização do receptor
k_{wi} número de paredes de tipo i penetradas pelo raio directo
L factor "linear" de atenuação da parede exterior
L_C termo constante
L_{FS} atenuação de espaço livre
L_{f1} atenuação introduzida por um piso
L_{fj} atenuação do piso de tipo j
L_{int} atenuação de penetração num edifício
L_m factor "linear" de atenuação da parede de tipo m
L_o nível de atenuação exterior de referência
L_{ori} parâmetro do Modelo de Walfisch-Ikegami
L_{piso} média da atenuação num piso
$L_{piso/corr}$ atenuação corrigida num piso
L_p atenuação de propagação;
L_{tm} atenuação suplementar devido à difracção para o terminal móvel
L_{tt} atenuação suplementar devido à propagação sobre os telhados dos edifícios
L_{w0} factor de atenuação de parede para $k_f=0$
L_{wi} atenuação da parede de tipo i
L_{wm} factor de atenuação da parede de tipo m
L_p^{int} atenuação no interior de um edifício
L_p^{rua} atenuação num ponto exterior adjacente ao edifício
M número de tipos de parede interior

Max	máximo
Min	mínimo
N	número de paredes interiores relevantes num dado piso
N_p	número total de pisos
N_{adj}^{ext}	número de amostras recolhidas no passeio adjacente
N_{apo}^{ext}	número de amostras recolhidas no passeio aposto
n	número de piso
n_m	número de paredes de tipo m
P_A	potência média no exterior, junto à parede
P_{An}	potência média ao nível do solo ao longo da n-ésima parede exterior
P_E	potência média no interior de uma sala
P^{int}	valores de potência medidos no interior do edifício
P_{ref}^{ext}	valor de referência da potência exterior por estação de base
P_{adj}^{ext}	somatório dos valores de potência medidos no passeio adjacente à parede do edifício
P_{apo}^{ext}	somatório dos valores de potência medidos no passeio aposto à parede do edifício
P_e	potência emitida
P_r	potência recebida
S	número de classes
T	estatística de teste do Teste do Teste do χ^2
x_i	valor da amostra i
W_e	atenuação introduzida pela parede exterior
W_{ge}	parâmetro de acerto
W_{im}	atenuação introduzida por uma parede interior de tipo m
w_s	largura da rua
α	parâmetro característico (variável com o tipo de edifício considerado)
ΔG	factor de correcção do ganho das antenas
ϕ	ângulo de incidência com o eixo da rua
μ	média
θ, φ	variáveis do algoritmo de extrapolação do diagrama de radiação de uma antena
ρ_{XY}	coeficiente de correlação entre as variáveis X e Y
σ	desvio padrão
σ_{esq}	desvio padrão da normal esquerda
σ_{dir}	desvio padrão da normal direita

Lista de Programas

- Matlab
- MS Office (Word, Excel)
- MS Paint
- Paint Shop Pro 6
- TEMS

I. Introdução

A indústria de serviços de comunicações móveis protagonizou, nos últimos anos, um dos mais espectaculares casos de sucesso comercial de sempre. De facto, tais serviços têm a particularidade (e a felicidade) de vir ao encontro de uma das mais elementares necessidades das sociedades modernas: a comunicação entre indivíduos, com a potencialidade de o realizar de uma forma simples, prática, fiável e relativamente económica.

Nos primórdios das comunicações móveis, como na generalidade das áreas tecnológicas, poucos eram os indivíduos com disponibilidade financeira para utilizar estes serviços. As redes detinham pouca capacidade e um nível de cobertura que permitia apenas comunicações de exterior, através de terminais que, ainda que transportáveis, pecavam por pesados e pouco práticos. Contudo, o sucesso obtido motivou uma grande evolução tecnológica, resultando numa redução progressiva das dimensões e do peso dos terminais móveis, permitindo proporcionar aos utilizadores uma maior mobilidade. A par da evolução da tecnologia surgiu a evolução das exigências, e, hoje em dia, um utilizador espera cobertura e boa qualidade de serviço onde quer que se encontre: na rua, no metropolitano, dentro de edifícios, em garagens, no elevador, em centros comerciais, aeroportos, etc. Estas exigências levaram ao desenvolvimento das redes de comunicações pessoais, no sentido de dar resposta ao uso crescente de terminais móveis no interior de edifícios. Desta forma, a análise da propagação e o desenvolvimento de modelos para ambientes interiores tornou-se uma importante área de investigação.

Uma possibilidade para cobrir o interior dos edifícios consiste na instalação de pico-células, i.e., células muito pequenas, onde a estação de base é colocada dentro do edifício, o que é o caso de sistemas de comunicações pessoais de menor escala tais como o DECT (*Digital Enhanced Cordless Tellecommunications*), o PHS (*Personal Handy Phone System)* e o PACS (*Personal Acess Communications System).* A outra, consiste em "aproveitar" as micro-células cujas estações de base estão instaladas no exterior para proporcionar cobertura de fora para dentro dos edifícios, Fig. I.1, que se dá, na esmagadora maioria dos casos, em condições de ausência de uma linha de vista (NLoS). O presente estudo debruça-se essencialmente sobre a segunda hipótese, ou seja, sobre os aspectos relacionados com a penetração de sinal nas estruturas urbanas em NLoS, para a banda de 1 800 MHz em GSM (*Global System for Mobile Communications*) [ETSI97], pretendendo-se obter uma estimativa de atenuação de penetração referida à atenuação medida ao nível da rua, a 1,5 m do solo, junto às paredes exteriores de edifício. Em geral, as ferramentas de planeamento não incluem esta perspectiva, limitando-se a fornecer estimativas de atenuação para o exterior, ao nível da rua. Nesse sentido, este estudo poder-se-á assumir como a "ponte" para a estimação de atenuação em interiores, a partir das ferramentas de planeamento vulgares.

Pretende-se obter um conjunto de resultados que possam servir de base a esse mesmo planeamento de cobertura de interiores em GSM e também em UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [HoTo00]. Para tal, foi levada a cabo, com a colaboração do operador Vodafone Telecel – Comunicações Pessoais, SA., uma campanha de medidas sobre onze edifícios, de características bastante distintas entre si do ponto de vista da propagação radioeléctrica, sendo aqui minuciosamente apresentados os resultados decorrentes do tratamento e análise dos dados obtidos. Numa perspectiva de inovação, teria sido desejável realizar medidas na banda do UMTS. Contudo, não existe ainda, à data, uma rede UMTS implementada no terreno, capaz de satisfazer os objectivos propostos. Assim, as medidas foram efectuadas na banda de frequências disponível em GSM que mais se aproxima

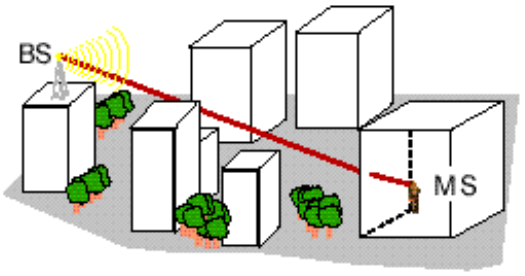


Figura I.1 – Cobertura de interiores a partir do exterior (extraído de [MeKu01]).

daquela em que o UMTS irá funcionar, ou seja, a banda 1 800 MHz. Em todo o caso, e devido à proximidade espectral das duas bandas, as medidas de atenuação obtidas para GSM 1800 podem facilmente ser extrapoladas para a banda do UMTS, tendo em conta que a potência varia com a frequência (*f*) aproximadamente segundo uma lei de 20.log (*f*). O problema da estimação da atenuação no interior de edifícios para UMTS poderia ser solucionado através do recurso a uma ferramenta de planeamento em conjunto com um modelo de perdas de penetração referidas a um ponto exterior junto às paredes exteriores, disponível na literatura. Porém, os parâmetros propostos para a maior parte desses modelos estão associados à banda de 900 MHz do GSM, pelo que seria necessária uma extrapolação de resultados pela referida lei de variação da potência com a frequência, não sendo garantida a obtenção de aproximações razoáveis. Assim, os resultados apresentados neste trabalho, por se encontrarem associados a uma banda espectralmente mais próxima da banda do UMTS poderão oferecer maiores garantias numa extrapolação do mesmo tipo.

O GSM surgiu no início de 1992, englobado na segunda geração de sistemas de comunicações móveis, e cedo se afirmou como um sistema de estrondoso sucesso comercial, atingindo elevadas taxas de adesão em todo o mundo num intervalo de tempo relativamente curto. Baseado em tecnologia digital de comutação de circuítos, destina-se fundamentalmente a fornecer serviços de voz, permitindo também o transporte de dados. O GSM é, como se sabe, um sistema de FDMA/TDMA (*Frequency Division Multiple Acess / Time Division Multiple Acess*), onde o recurso partilhado é a frequência e onde cada portadora se divide temporalmente para servir um conjunto de utilizadores. Na sua primeira fase de implementação, este sistema ocupou exclusivamente a banda dos 900 MHz, nomeadamente [890, 915] MHz para a ligação no sentido ascendente e [935, 960] MHz para a ligação no sentido descendente. Contudo, devido ao grande sucesso comercial que obteve e à consequente necessidade de servir um número cada vez maior de utilizadores, tornou-se imperiosa a obtenção de mais recursos. Nessa medida, apressou-se a entrada em funcionamento do sistema DCS 1800, que mais tarde tomaria a designação de GSM 1800 (ficando a anterior banda conhecida como GSM 900) e que opera na banda dos 1 800 MHz, nomeadamente [1 710, 1 785] MHz para a ligação no sentido ascendente e [1 805, 1 880] MHz para a ligação no sentido descendente. O GSM possui *hard-handover*, e é caracterizado por uma largura de banda de 200 kHz por portadora, onde cada portadora está por sua vez dividida em oito *time-slots*, permitindo assim a implementação de oito canais físicos sobre a mesma portadora. O planeamento celular em GSM é feito com base em parâmetros tais como o tráfego expectável, utilizando-se como ponto de partida o valor de tráfego médio gerado por cada utilizador de voz em GSM e a interferência (co-canal e de canal adjacente) sendo o valor mínimo admitido para a relação portadora-interferência de 9 dB. O padrão típico de reutilização celular das frequências é de 4, tendo-se como tamanho máximo de cada célula 35 km, valor calculado através do tempo de guarda da trama de acesso.

Em termos de valores de potência das estações de base (EB), estes encontram-se divididos em classes de potência de transmissão, para GSM 900 e 1800, Tab. I.1, segundo as normas do *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) [ETSI97]. O ETSI especifica ainda valores máximos de potência de transmissão de estações de base em microcélulas segundo três classes, indicadas na Tabela I.2.

Em relação aos terminais móveis (TM), apresentam-se na Tabela I.3 os valores máximos e mínimos de potência de saída segundo a classe de potência considerada. Os valores de referência para a sensibilidade dos terminais móveis, em termos de perda de tramas e erros de bit, são especificados segundo as diversas classes na Tabela I.4. A classe "TM Pequeno" diz respeito aos terminais móveis que possuem as seguintes características:

- Pertencem à classe 4 ou 5
- O seu peso total (excluindo a bateria) é inferior a 200 g
- O seu volume (excluindo a bateria) é inferior a 500 cm^3

Tabela I.1 – Valores máximos de potência das estações de base em GSM.

GSM 900		**GSM 1800**	
Classe de Potência	Potência Máxima de Saída [dBm]	Classe de Potência	Potência Máxima de Saída [dBm]
1	58	1	46
2	55	2	43
3	52	3	40
4	49	4	37
5	46	-	-
6	43	-	-
7	40	-	-
8	37	-	-

Tabela I.2 – Valores máximos de potência das estações de base em GSM para microcélulas.

GSM 900 micro-EB		**GSM 1800 micro-EB**	
Classe de Potência	Potência Máxima de Saída [dBm]	Classe de Potência	Potência Máxima de Saída [dBm]
M1	24	M1	32
M2	19	M2	27
M3	15	M3	22

O UMTS, por sua vez, suporta-se numa filosofia substancialmente diferente do seu antecessor. É um sistema baseado em CDMA (*Code Division Multiple Acess*), onde a cada utilizador se associa um código. Os códigos são ortogonais entre si, o que permite ao receptor encarar como ruído a informação dos restantes utilizadores. É utilizada uma largura de banda total de 155 MHz, centrada nos 2 GHz. O funcionamento do UMTS está previsto para dois modos, o modo TDD (*Time Division Duplex*) e o modo FDD (*Frequency Division Duplex*). Ao modo FDD são atribuídas duas bandas, de 60 MHz cada: a banda [1 920, 1 980] MHz, para a implementação do canal ascendente e a banda [2 110, 2 170] MHz, para o canal descendente. Nas comunicações em modo FDD, são atribuídas duas bandas de 5 MHz a cada

utilizador, que se distingue dos demais através do código que lhe é atribuído. Este é, portanto, um modo muito direccionado para serviços simétricos, onde a eficiência espectral não é tão boa quanto seria desejável. O modo FDD funciona com *soft / hard handover* e estará mais associado tanto a macro-células (raio > 1 km), como a micro-células (raio $\in$ [0.1, 1] km). O débito máximo é de 384 kbps. Para o modo TDD, as duas bandas atribuídas são [1 900, 1 920] MHz e [2 010, 2 025] MHz, onde as ligações descendente e ascendente se efectuam na mesma frequência, mas em *time-slots* distintos, sendo possível uma utilização total de sete portadoras com uma largura de banda de 5 MHz por portadora. Cada portadora suporta 15 *time-slots* e a cada *time-slot* são atribuídos 16 códigos ortogonais entre si; para efectuar uma comunicação, é atribuído a um utilizador um determinado código num dado time-slot. O modo TDD é mais flexível, em termos de débito, que o modo FDD, permitindo atingir valores mais elevados; para aumentar o débito de uma ligação é apenas necessário aumentar o número de *time-slots* atribuídos a essa ligação, dentro de cada ciclo. A atribuição de *time-slots* é um processo dinâmico, onde o número de *time-slots* atribuídos aos canais ascendente e descendente varia consoante as necessidades do utilizador, podendo ter-se serviços fortemente assimétricos (e.g. *webrowsing*), obtendo-se assim uma melhor eficiência espectral. Este modo funciona com *hard-handover*, estando tipicamente associado a pico-células (raio < 100 m). O débito máximo expectável é de 2 Mbps.

Tabela I.3 – Valores máximos e mínimos de potência dos terminais móveis em GSM.

GSM 900			**GSM 1800**		
Classe de Potência	Potência Máxima de Saída [dBm]	Potência Mínima de Saída [dBm]	Classe de Potência	Potência Máxima de Saída [dBm]	Potência Mínima de Saída [dBm]
1	-	5	1	30	0
2	39		2	24	
3	37		3	36	
4	33		4	-	
5	29		5	-	

Tabela I.4 – Valores de sensibilidade para os terminais móveis.

GSM 900		**GSM 1800**	
Classe	Sensibilidade [dBm]	Classe	Sensibilidade [dBm]
TM Pequeno	-102	TM Classe 1 ou 2	-100
Outros TM's e EB normal	-104	TM Classe 3	-102
Micro EB M1	-97	Micro EB M1	-102
Micro EB M2	-92	Micro EB M2	-97
Micro EB M3	-87	Micro EB M3	-92

No que diz respeito ao planeamento em UMTS [MaAn01], este afigura-se substancialmente diferente e mais complexo do que o planeamento de redes móveis de sistemas de segunda geração, tais como o GSM. As principais limitações a registar, na ligação em sentido descendente, residem na cobertura, visto todos os utilizadores partilharem entre si

a potência da mesma estação base. Quanto à ligação em sentido ascendente, a principal limitação reside na capacidade devido à interferência que se verifica entre os vários utilizadores. Em UMTS, a relação portadora – interferência, varia consoante o débito da ligação pretendida, uma vez que existem vários valores de débito possíveis. Em relação à sensibilidade dos terminais móveis, são apresentados na Tab. I.5 valores para três débitos possíveis [MaAn01]. Quanto a potências para as estações de base, os valores variam de acordo com os débitos pretendidos [3GPP00], sendo os valores máximos apresentados na Tab.I.6.

Tabela I.5 – Sensibilidades para diferentes débitos binários em UMTS.

Débito [kbps]	Sensibilidade [dBm]
12,2	-120,2
144,0	-113,0
384,0	-109,2

Tabela I.6 – Valores máximos de potência das estações de base em UMTS.

	Potência Máxima da Estação Base *Node B* [dBm]
Macro-Células	30
Micro-Células	20

O relatório consiste em cinco capítulos e quinze anexos. O Capítulo II descreve os principais aspectos teóricos de suporte à compreensão do problema em estudo, no que diz respeito a modelos de propagação para ambientes exteriores, modelos de penetração exterior-interior dos tipos estatístico, semi-determinístico e determinístico, bem como a caracterização das antenas de estações de base e dos terminais móveis em GSM e UMTS. No Capítulo III são apresentados o equipamento de medida, o *software* de suporte e o processo de medida adoptados. É feita uma descrição pormenorizada da arquitectura e dos pormenores relevantes dos edifícios medidos durante a campanha, bem como dos parâmetros estatísticos resultantes do processamento de dados obtidos para cada um desses edifícios. O mesmo capítulo descreve ainda o método utilizado para a aferição dos parâmetros de dois modelos teóricos. No Capítulo IV procede-se à apresentação e análise de resultados, nomeadamente medidas estatísticas de caracterização da atenuação nos edifícios, parâmetros calculados para os modelos teóricos aferidos a partir das medidas obtidas num subconjunto de edifícios, e ainda, nos edifícios com estações de base situadas na zona próxima e em condições LoS, uma medida de dispersão (desvio padrão) para as atenuações medidas e corrigidas pela não homogeneidade do ganho das antenas, bem como uma medida de correlação (coeficiente de correlação) entre a atenuação e o ganho na direcção de cada piso. Quando possível, efectua-se também uma comparação entre os resultados obtidos para a banda GSM 1800 e os resultados obtidos para a banda GSM 900. No Capítulo V apresentam-se as conclusões globais, referem-se as principais limitações e sugerem-se possíveis orientações de trabalho futuro a partir da informação obtida no decorrer deste estudo. Quanto aos Anexos, apresentam-se, nos Anexos de A a K, todos os dados, medidos e processados, referentes aos onze edifícios medidos. O Anexo L apresenta os resultados por classes de edifícios, bem como os resultados globais. No

Anexo M encontram-se fotografias de antenas utilizadas em redes de comunicações móveis, bem como diagramas de radiação dessas antenas. O Anexo N descreve o Teste do $\div^2$, destinado à averiguação do (possível) carácter gaussiano de uma dada distribuição estatística, teste esse utilizado na aferição dos parâmetros de um novo modelo. Por último, apresentam-se, no Anexo O, fotografias do equipamento de medida e dos edifícios medidos na campanha.

Neste trabalho são aferidos parâmetros, a partir de valores reais, para um modelo de estimação de perdas conhecido (Modelo de Berg) sendo proposta e testada uma extensão a um outro modelo, o bem conhecido Modelo de Walfisch-Ikegami, destinada a dotar o mesmo de capacidade de efectuar estimativas para atenuações no interior de edifícios. Por outro lado, a observação de um comportamento típico e modelável da atenuação nos edifícios conduziu à criação de um novo modelo, baptizado, em alusão à sua filosofia, como "Modelo da Dupla Normal", sendo optimizados, a menos de um dado erro, e apresentados parâmetros para o mesmo, com base nas medidas efectuadas. O processamento e a optimização desses parâmetros foi realizado por uma ferramenta informática destinada a funcionar em ambiente Matlab, criada para o efeito no decorrer do trabalho. São também efectuadas extrapolações de diagramas de radiação a três dimensões, a partir de diagramas de radiação nos planos horizontal e vertical, recorrendo a um algoritmo próprio para esse efeito, de modo a verificar a correlação entre o ganho direccional de uma antena e a atenuação medida ao longo de um edifício.

.

II. Aspectos Teóricos

II.1 Considerações Gerais

A potência recebida num receptor, P_r, é dada por:

$$P_{r\,[\mathrm{dBm}]} = P_{e\,[\mathrm{dBm}]} + G_{e\,[\mathrm{dBi}]} + G_{r\,[\mathrm{dBi}]} - L_{p\,[\mathrm{dB}]} \qquad \text{(II.1)}$$

onde se tem:

- P_e - potência emitida
- G_e - ganho da antena de emissão
- G_r - ganho da antena de recepção
- L_p - atenuação de propagação

Em termos de planeamento, há que garantir que P_r tenha um valor superior à sensibilidade do terminal móvel. Sendo os ganhos de emissão e de recepção fixados à partida, é necessário que a conjugação potência emitida-atenuação satisfaça a condição referida. A atenuação de propagação é dada através dos modelos de propagação, para exteriores e interiores. Uma abordagem comum a muitas das ferramentas actualmente existentes para planeamento de cobertura no interior de edifícios é a de estimar as perdas de propagação exteriores na proximidade dos mesmos, adicionando-lhes depois um valor constante, de modo a obter uma estimativa do valor das perdas de propagação no interior do edifício. Tem-se assim:

$$L_{p[\mathrm{dB}]} = L^{rua}_{p[dB]} + L_{\mathrm{int}[dB]} \qquad \text{(II.2)}$$

ou seja, a atenuação total de percurso é dada pela soma de um termo de atenuação calculada num ponto exterior ao edifício, L_p^{rua}, (normalmente no meio de uma rua) com um termo de atenuação de penetração, L_{int}, que dá conta das perdas que afectam o sinal na sua propagação desde esse ponto até ao ponto desejado dentro do edifício. Da mesma forma, a atenuação de penetração na parede exterior de um edifício é dada pela diferença entre o valor médio de potência medido junto a essa parede, do lado de dentro e do lado de fora.

Com efeito, a estratégia básica de planeamento de cobertura dentro de edifícios envolve duas fases: a) encontrar uma estimativa das perdas de propagação nas ruas e b) utilizar essa estimativa como valor de entrada para um modelo de perdas de penetração, que fornece estimativas das perdas de propagação em qualquer ponto situado dentro do edifício. Segundo esta perspectiva, existem então dois tipos de modelos de propagação: modelos para exteriores, destinados a executar a fase a) do planeamento, e modelos para interiores, destinados à execução da fase b), existindo ainda alguns modelos [RaSH99], ou macro-modelos se assim se desejar, que prevêm a execução de ambas as fases .

Embora a classificação não seja unívoca, os modelos de propagação dividem-se normalmente nas seguintes classes: determinísticos, estatísticos ou mistos, também designados habitualmente por semi-determinísticos. A modelização determinística do ambiente de propagação pressupõe uma descrição topológica e também a caracterização electromagnética dos materiais constituintes. Apesar de serem menos complexos em termos matemáticos, os modelos determinísticos são computacionalmente exigentes, tornando-se frequentemente necessário encontrar um compromisso entre a precisão pretendida e a

eficiência computacional. Os modelos determinísticos são, intrinsecamente, modelos de banda-larga, uma vez que não dependem de parâmetros empíricos. Por sua vez, a modelação estatística baseia-se em equações de carácter geral, cujos parâmetros são aferidos experimentalmente para concordância com os resultados práticos. Relativamente aos modelos determinísticos, os modelos estatísticos permitem uma mais fácil generalização das características de propagação a outros cenários do mesmo tipo. Qualquer modelo estatístico será, por natureza, um modelo de banda-estreita, pois assenta em coeficientes empíricos obtidos a partir de medidas efectuadas numa banda de frequências muito específica (por exemplo, a banda dos 900 MHz do GSM).

Acompanhando a crescente importância do estudo das condições de propagação no interior de estruturas, foi sendo desenvolvido, ao longo dos últimos anos, um vasto conjunto de modelos de propagação, destinado a fornecer estimativas sobre aspectos como a atenuação e outros, necessários para efectuar planeamento. Uma classificação possível de edifícios [CPGF98] para efeitos de planeamento é apresentada na Tab. II.1:

Tabela II.1- Classificação de edifícios para efeitos de planeamento.

Classe	Descrição
1	Casas residenciais, em áreas suburbanas
2	Casas residenciais, em áreas urbanas
3	Edifícios de escritórios, em áreas suburbanas
4	Edifícios de escritórios, em áreas urbanas
5	Edifícios industriais, com maquinaria pesada
6	Outros edifícios industriais, centros de exposições, pavilhões de desportos
7	Espaços abertos (aeroportos, estações de comboios,...)
8	Ambientes subterrâneos (metropolitano, tuneis,...)

Nas secções que se seguem serão descritos alguns modelos de estimação de perdas de penetração em edifícios. Existem ainda modelos [JCLH96], [LeLe00], [SeRa92], [MuSC95], [MaRo96], [BuSW97], [Chan99], empíricos, determinísticos, ou semi-determinísticos, apropriados para tratar o capítulo específico das comunicações rádio em ambientes interiores, e, portanto, sem interesse no contexto deste estudo, pelo que não serão aqui abordados.

II.2 Modelos de Propagação para Exteriores

Os modelos de propagação mais utilizados para ambientes exteriores, tanto em GSM, como em UMTS, são:

- COST 231 - Okumura – Hata
- COST 231 - Walfisch – Ikegami

O Modelo COST 231 – Okumura – Hata [DaCo99] baseia-se numa exaustiva série de medições efectuadas na cidade de Tóquio, sendo como tal um modelo empírico. *Okumura* [OOKF68] expôs os resultados sob a forma de curvas, por volta de 1968 e, em 1980, essas curvas foram modeladas por *Hata* [Hata80], que estabeleceu expressões matemáticas destinadas a aproximar essas curvas. Posteriormente, o projecto COST 231 [DaCo99] adaptou e estendeu alguns dos resultados. O modelo fornece o valor mediano da intensidade de campo, levando em linha de conta factores como a frequência, a distância entre o móvel e a

base, as alturas das antenas (do móvel e da base) e o tipo de ambiente (área aberta, urbana ou suburbana). É válido para uma gama de frequências no intervalo [150, 2 000] MHz, distâncias de 1 a 20 km, alturas de estação base entre 30 a 100 m e alturas dos móveis entre 1 a 10 m e é normalmente o modelo utilizado para a estimação de atenuações de propagação para distâncias elevadas (superiores a 5 km).

O Modelo COST 231 – Walfisch – Ikegami foi desenvolvido no âmbito do projecto COST 231. Trata-se de um modelo determinístico, que conjuga o Modelo de Ikegami [IYTU84], o Modelo de Walfisch – Bertoni [WaBe88] e também resultados de medidas realizadas em cidades europeias. No Modelo de Ikegami, o campo recebido pelo móvel é dado pela soma dos campos reflectidos e difractados nos edifícios da rua onde este se encontra; contudo, este modelo é severamente limitado pelo facto de se admitir que a propagação estação base – telhado se faz em espaço livre, pelo que apenas contabiliza o efeito do multipercurso dentro da rua onde se encontra o móvel. Por sua vez, no Modelo de Walfisch – Bertoni, admite-se que a estrutura urbana é regular, que todos os edifícios têm alturas iguais e que a propagação de dá perpendicularmente à direcção das ruas, e a sua grande inovação face ao Modelo de Ikegami é que contabiliza a difracção provocada por um conjunto de lâminas (prédios), que penetram no primeiro Elipsóide de Fresnel [Sale98]. Este modelo é válido para uma gama de frequências no intervalo [800, 2 000] MHz, distâncias de 20 m a 5 km, alturas de estação base entre 4 a 50 m e alturas dos móveis entre 1 a 3 m, e é normalmente o modelo utilizado para a estimação de atenuações de propagação para distâncias curtas (inferiores a 5 km) dentro de cidades.

As ferramentas de planeamento vulgares baseiam-se normalmente neste tipo de modelos, fornecendo apenas estimativas da atenuação verificada no exterior. Na Secção II.3 são descritos alguns modelos que poderão ser utilizados para estender os resultados fornecidos pelas ferramentas de planeamento, com vista à obtenção de estimativas de interiores. Existem ainda outros modelos determinísticos (traçado de raios) para exteriores [RaSH99], especialmente adequados para usar em conjunto com modelos para interiores, tendo em vista a cobertura do interior de edifícios.

II.3 Modelos de Propagação Estatísticos para Interiores

II.3.1 Modelo de Espaço Livre Modificado

Um dos exemplos mais simples de modelo estatatístico é o Modelo de Espaço-Livre Modificado [WoWL99]. A expressão da atenuação para este modelo é dada por:

$$L_{p[\mathrm{dB}]} = 10\log P_e - 10\log P_r = 10\log \frac{(4\pi f)^2 d^{\alpha}}{c_0^2 G_e} \qquad \text{(II.3)}$$

onde se tem:

- P_e - potência emitida
- P_r - potência recebida
- f - frequência
- d - distância entre emissor e receptor
- α - parâmetro característico (variável com o tipo de edifício considerado)
- c_o - velocidade da luz no vácuo
- G_e - ganho da antena de emissão

Em vez de se considerar o material constituinte e a posição exacta das paredes, é utilizada uma abordagem mais geral, onde perdas de penetração mais significativas se traduzem num expoente α mais elevado. Deste modo, diferentes tipos de edifício são

caracterizados por diferentes valores para o parâmetro ***a***. Este é, portanto, um modelo de carácter empírico, uma vez que os seus parâmetros deverão ser sintonizados com medidas. O Modelo de Espaço-Livre Modificado, implementado em *software* [WINP99], é muito rápido, pois tem como parâmetro de entrada único a distância entre emissor e receptor. No entanto este é um modelo algo limitado, pois tal simplicidade tem, obviamente, repercussões em termos de precisão dos resultados fornecidos.

II.3.2 Modelo Multi-Paredes

Um outro exemplo de modelo estatístico de carácter empírico, um pouco mais elaborado, é o Modelo "Multi-Paredes" [MoKe88], que consiste numa extensão mais aperfeiçoada do modelo originalmente criado por Motley e Keenan. Este modelo é especialmente adequado para aplicar em situações em que emissor e receptor se encontram dentro do mesmo edifício, ou ainda quando, com o receptor dentro do edifício, a antena emissora se encontra no telhado do mesmo, duas situações típicas em comunicações móveis. A expressão da atenuação de percurso para este modelo é dada por:

$$L_{p[\mathrm{dB}]} = L_{FS[\mathrm{dB}]} + L_{C[\mathrm{dB}]} + \sum_{i=1}^{I} k_{wi} L_{wi[\mathrm{dB}]} + \sum_{j=1}^{J} k_{fj} L_{fj[\mathrm{dB}]} \qquad \text{(II.4)}$$

onde se tem:

- L_{FS} - atenuação de espaço livre
- L_C - termo constante
- k_{wi} - número de paredes de tipo *i* penetradas pelo raio directo
- k_{fj} - número de pisos do tipo *j* penetrados pelo raio directo
- L_{wi} - atenuação da parede de tipo *i*
- L_{fj} - atenuação do piso de tipo *j*
- I - número de tipos de paredes
- J - número de tipos de pisos;

Os factores de atenuação L_f e L_w são funções [MaRo96] do número de andares, k_f, entre o emissor e o receptor são dados por:

$$L_w(k_f) = L_{w0} \cdot 10^{-\frac{k_f^2}{a}} \qquad \text{(II.5)}$$

$$L_f(k_f) = \frac{L_{f1[dB]}}{k_f^{\left(b - \frac{1}{1+k_f}\right)}} \qquad \text{(II.6)}$$

onde se tem:

- L_{w0} - factor de atenuação de parede para k_f=0
- a,b - parâmetros empíricos
- L_{f1} - atenuação introduzida por um piso

Diferentes tipos de edifício (escritórios, bibliotecas, hotéis, edifícios modernos ou antigos,...) são caracterizados por diferentes coeficientes de atenuação. Se forem conhecidos os materiais empregues na construção dos edifícios é possível computar o valor mediano da atenuação introduzida pelas paredes. A atenuação é dada pela soma da atenuação de espaço livre com a atenuação introduzida pelas paredes e pisos atravessados pelo raio directo. O termo constante L_C, em geral de valor aproximadamente nulo [AnNe97], permite ajustar o

modelo aos resultados experimentais quando se utiliza regressão múltipla. Convém igualmente referir que os coeficientes de atenuação não representam necessariamente os valores reais de perdas das paredes e dos pisos, sendo antes coeficientes optimizados a partir das medidas, normalmente contendo já implicitamente outros efeitos, como aqueles causados pelo mobiliário diverso situado junto do receptor ou o efeito "guia-de-ondas" dos corredores.

II.3.3 Modelo de Ganho em Altura

Na maioria dos casos, as perdas de penetração nos edifícios decrescem com o aumento do nível do piso considerado. Diversas campanhas de medidas efectuadas em ambientes macrocelulares mostram claramente que o nível de potência recebido varia entre diferentes pisos de um edifício. Habitualmente, este fenómeno, facilmente modelável através de regressão linear, é designado na literatura por *Floor Height Gain*, e será daqui para a frente designado por Ganho em Altura ou simplesmente GA. Em rigor, este "modelo" funciona como um sub-modelo da maioria dos modelos empíricos. Por outras palavras, um modelo empírico de estimação de perdas de penetração é normalmente composto por duas parcelas: a primeira determina o valor de atenuação no piso de referência (normalmente o piso térreo), sendo comum a todos os pisos; a atenuação para cada um dos restantes pisos é dada pela atenuação do piso de referência, afectada pela parcela de ganho em altura.

O GA é um efeito causado pela influência de efeitos de difracção em edifícios situados nas proximidades, Fig.II.1, e é expresso em dB/piso. Uma vez que a altura de um piso varia consoante o tipo de edifício, poderá ser preferível descrever o GA como função da altura física do mesmo, em dB/m. A expressão (II.7) é proposta [MeKu01] para descrever o ganho em altura, G_h, onde se assume que a altura dos pisos é de 3 metros.

$$G_h = 2{,}9n + 1.16 \ , \ n>0 \qquad \text{(II.7)}$$

onde n é o número do piso (n= 0;1;2...).

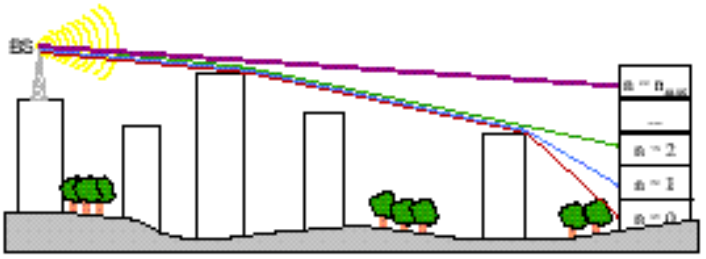


Figura II.1 – Caminhos de propagação entre a estação de base, representada por BS, e os diferentes pisos de um edifício (extraído de [MeKu01]).

O efeito descrito deixa de ser aplicável em pisos que se situam consideravelmente acima da altura média dos edifícios circundantes, o que não é de estranhar, uma vez que quanto mais alto é o piso considerado, maior é a probabilidade de existir LoS. A soma do nível de atenuação exterior de referência com o ganho de atenuação em altura (que é negativo) não deve, no entanto, ser inferior ao valor correspondente de propagação em espaço livre. Em ambientes micro-celulares, onde as antenas das estações de base estão colocadas

substancialmente abaixo do nível dos edifícios circundantes, a atenuação de penetração em LoS é pouco afectada pelo GA quando a distância entre a antena e o edifício é razoável. O mesmo sucede para NLoS, mas apenas quando a propagação se efectua predominantemente ao longo das ruas. Pelo contrário, quando, em NLoS, a parte dominante da potência recebida tem origem em raios que, devido a múltiplas reflexões e difracções, se propagaram desde o nível dos telhados dos edifícios circundantes, podem ser obtidos consideráveis ganhos em altura. É também de esperar que o GA varie substancialmente com a distância a que se encontram situados os edifícios mais próximos, tendendo o seu efeito a tornar-se menos significativo com o aumento da largura das ruas adjacentes aos edifícios.

II.3.4 Modelo de Gahleitner e Bonek

O Modelo de Gahleitner e Bonek [GaBo94] é um outro exemplo de modelo empírico. Testado na baixa da cidade de Viena (Áustria) na banda dos 1800 MHz, este modelo utiliza como base para os cálculos da potência no interior de um edifício os valores médios da potência de sinal, ao nível da rua, ao longo das paredes exteriores do edifício. Assume-se que o edifício é iluminado por todos os lados e direcções possíveis. Ao contrário dos modelos já apresentados, em que estes eram caracterizados pela expressão da atenuação de percurso, optou-se, neste caso, e apenas por uma questão de coerência com a fonte, por descrever o modelo através da expressão da potência média dentro de uma sala, tal como esta é apresentada no artigo fonte. Assim, a potência média P_E numa sala é modelada por um somatório dos valores médios de potência no exterior, multiplicados pelos respectivos factores de atenuação empíricos das paredes interiores e exteriores, onde a dependência com a altura é modelada por um ganho de altura G_h (em unidades dB/m):

$$P_{E[\mathrm{dBm}]} = 10 \cdot \log\left[\sum_{n=1}^{N}\left[P_{An[\mathrm{mW}]} \cdot (1/L) \cdot \prod_{m=1}^{M}(1/L_m)^{k_{mn}}\right]\right] + h \cdot G_{h[\mathrm{dB/m}]} \qquad \text{(II.8)}$$

onde se tem:

- N - número de paredes interiores relevantes num dado piso
- P_{An} - potência média ao nível do solo ao longo da n-ésima parede exterior
- L - factor "linear" de atenuação da parede exterior
- M - número de tipos de parede interior
- L_m - factor "linear" de atenuação da parede de tipo m
- k_{mn} - número de paredes de tipo m interceptadas pela semi-recta perpendicular à parede exterior n e com origem na localização do receptor
- G_h - ganho em altura
- h - altura do receptor acima do nível da rua

A expressão (II.8) deve ser aplicada especialmente em situações de ausência de linha de vista entre a EB e o edifício em questão, onde várias ondas com níveis de potência semelhantes chegam ao receptor de todas as direcções. No caso em que existem ondas dominantes (tipicamente quando existe linha de vista) que são recebidas segundo direcções específicas (previsíveis), o factor L de atenuação da parede exterior deverá tornar-se uma função do ângulo de incidência. Para as situações de LoS, em microcélulas urbanas, assumindo médias a longas distâncias, o ganho em altura, G_h deixa de ser influente, pois, como se viu em II.3.3, este existe fundamentalmente para contabilizar efeitos de difracção nos telhados dos edifícios circundantes; como tal, toma um valor nulo. Com apenas uma parede exterior electromagneticamente iluminada em LoS, (II.8) simplifica-se, dando origem a:

$$P_{E[\mathrm{dBm}]} = P_{A[\mathrm{dBm}]} - \sum_{m=1}^{M} n_m \cdot L_{wm[\mathrm{dB}]} \qquad \text{(II.9)}$$

onde se tem:

- P_A - potência média no exterior, junto à parede
- n_m - número de paredes de tipo m
- L_{wm} - factor de atenuação da parede de tipo m

Como foi já referido, este modelo foi testado na baixa da cidade austríaca de Viena, nomeadamente em três edifícios. A Tab. II.2 apresenta valores típicos para os parâmetros do modelo, para o Edifício A, uma construção à base de pedra, e para o Edifício B, um edifício moderno de escritórios com paredes externas à base de betão armado e paredes internas em madeira.

Tabela II.2 – Valores típicos dos parâmetros do Modelo de Gahleitner e Bonek

	Edifício A	**Edifício B**
***L* (parede externa) [dB]**	20,5	17,6
***L₁* (parede interna) [dB]**	5,8	6,7
***G_h* (ganho em altura) [dB/m]**	1,6	1,1

II.3.5 Modelo IST/Telecel 900

A criação do modelo IST/Telecel 900 [CPGF98] resultou de um estudo efectuado em Julho de 1998 pelo Instituto Superior Técnico, em colaboração com a Telecel (actualmente Vodafone), que envolveu uma exaustiva campanha de medidas realizadas num conjunto de edifícios situados nas cidades de Lisboa e Porto, na banda 900 MHz de GSM. O modelo referido divide os edifícios em quatro categorias, consoante a sua altura relativa (Alto ou Baixo) e o seu grau de integração no tecido urbano (Integrado ou Isolado) fornecendo, individualmente e para cada uma das categorias, uma gama muito completa de medidas estatísticas e resultados, entre os quais figuram curvas de probabilidade de cobertura muito úteis para efectuar planeamento. Na realização do presente estudo foram repetidas as medições em alguns dos edifícios medidos pelos autores do IST/Telecel 900, agora porém na banda 1 800 MHz. Conhecendo desde já que, variando a potência (em dB) segundo uma lei de 20.log (frequência), e portanto, cerca de 6 dB com a duplicação da frequência, será interessante efectuar, em secções posteriores, comparações entre os resultados dos dois estudos. De resto, uma vez que todos os procedimentos levados a cabo no IST/Telecel 900 são repetidos numa parte deste estudo, torna-se desnecessário descrever aquele com mais pormenor.

II.4 Modelos de Propagação Semi-Determinísticos e Determinísticos para Interiores

II.4.1 Modelo de Berg

Existe uma classe de modelos que encerra, simultâneamente, características de um modelo empírico e características de um modelo determinístico. O Modelo de Berg, desenvolvido no âmbito do projecto COST 231 [DaCo99], constitui um exemplo de um

modelo semi-determinístico de estimação de perdas de penetração em edifícios, pois apesar do seu carácter estatístico, considera parâmetros determinísticos, como por exemplo, o ângulo de incidência das frentes de onda. O modelo distingue entre si os casos de LoS e de NLoS, apresentando, para cada um dos mesmos, diferentes expressões de atenuação de penetração. Enquanto que a expressão prevista para o modelo para a situação de LoS é de carácter determinístico, a expressão de atenuação para a situação de NLoS é de carácter puramente estatístico. Uma vez que os objectivos deste estudo estão predominantemente orientados a modelizações estatísticas para situações preferencialmente de NLoS, apenas se apresenta a segunda parte do modelo.

Nos cenários ilustrados nas Figs. II.2 e II.3, que mostram esquematicamente os principais mecanismos de introdução de perdas em ambiente urbano, as perdas por penetração são referidas ao valor padrão de atenuação exterior, aferida a 2 metros do solo, indicado por L_1 e L_2 na Fig. II.2 e por L_a e L_b, na Fig. II.3. Na Fig. II.2, os valores padrão de atenuação L_1 e L_2 resultam da atenuação de sinal introduzida por difracção no topo dos edifícios e por multiplas reflexões nas suas fachadas, com a antena de emissão colocada acima do nível médio dos telhados. Na Fig. II.3 os valores L_a e L_b resultam da atenuação introduzida por difracção no topo e nas esquinas dos edifícios, com a antena de emissão colocada abaixo do nível médio dos telhados. Nesta última figura, embora estejam apenas representados os edifícios A e B, assume-se que toda a área está coberta por edíficios. Considerando antenas isotrópicas, a atenuação total referida ao nível padrão de atenuação no exterior, L_o , é dada, para NLoS, por:

$$L_{p[\mathrm{dB}]} = L_{o[\mathrm{dB}]} + W_{e[\mathrm{dB}]} + W_{ge[\mathrm{dB}]} + \sum_{m=1}^{M} k_{im} \cdot W_{im[\mathrm{dB}]} - n \cdot G_{h[\mathrm{dB/piso}]} \qquad \text{(II.10)}$$

onde se tem:

- L_o - nível de atenuação exterior de referência
- W_e - atenuação introduzida pela parede exterior
- W_{ge} - parâmetro de acerto
- k_{im} - número de paredes interiores do tipo m
- W_{im} - atenuação introduzida por uma parede interior de tipo m
- M - número de tipos de parede interior
- n - número de piso
- G_h - ganho em altura

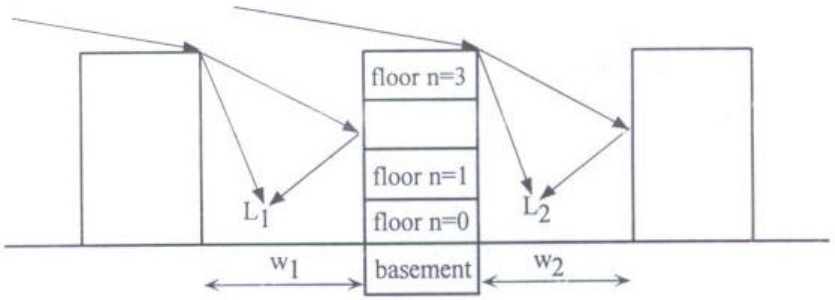


Figura II.2 – Cenário de NLoS com a antena da EB acima do nível dos telhados. (extraído de [DaCo99]).

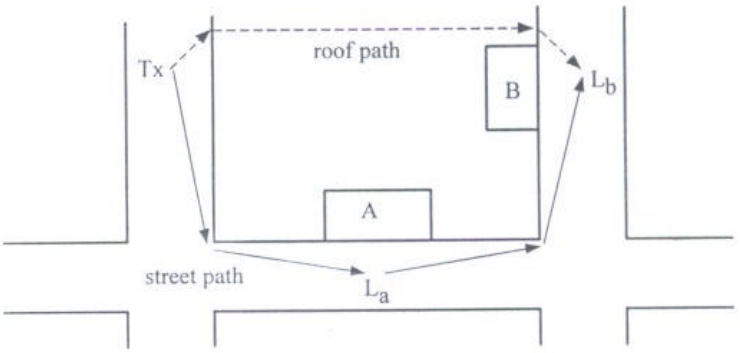


Figura II.3 – Cenário de NLoS com a antena da EB abaixo do nível dos telhados (extraído de [DaCo99]).

Em alguns testes realizados com o modelo, verificou-se que as perdas de penetração obtidas para situações semelhantes são substancialmente diferentes. Pode, no entanto, haver uma explicação física para as diferenças encontradas, pelo que Berg propõe a introdução do parâmetro W_{ge} em (II.10), de modo a eliminar possiveis ambiguidades nos valores de perdas de penetração nas paredes. Um valor de aproximadamente 5-7 dB é sugerido para W_{ge}. Contudo, no Capítulo IV, onde serão sugeridos parâmetros para a componente NLoS deste modelo aferidos a partir das medidas realizadas, fez-se simplesmente W_{ge}=0.

II.4.2 Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido

O Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido (W-I Estendido) [DaCo99] consiste, como o próprio nome indica, numa extensão do vulgar Walfisch-Ikegami, de modo a aproveitar as suas potencialidades na estimação de atenuação de penetração em edifícios. O carácter determinístico do Modelo de Walfisch-Ikegami original, aliado ao carácter empírico da extensão que lhe é acrescentada atribuem ao conjunto um carácter semi-determinístico.

Como se sabe, para situações NLoS, Fig.II.4, a atenuação ao nível da rua é, segundo o modelo de Walfisch-Ikegami, dada por:

$$L_{p[\mathrm{dB}]}^{rua} = L_{FS[\mathrm{dB}]} + L_{tt[\mathrm{dB}]} + L_{tm[\mathrm{dB}]} \qquad \text{(II.11)}$$

onde se tem:

- L_{FS} - atenuação em espaço livre
- L_{tt} - atenuação suplementar devido à propagação sobre os telhados dos edifícios
- L_{tm} - atenuação suplementar devido à difracção para o terminal móvel

Analogamente, a atenuação no interior do edifício, L_p^{int}, pode ser dada através de (II.12), se se substituir L_{tm} por um termo de atenuação de penetração no interior do edifício, L_{int}, obtendo-se:

$$L_{p[\mathrm{dB}]}^{\mathrm{int}} = L_{o[\mathrm{dB}]} + L_{tt[\mathrm{dB}]} + L_{\mathrm{int}[\mathrm{dB}]} \qquad \text{(II.12)}$$

É agora possível calcular a potência recebida, tanto no eixo da rua (II.13) como para o interior (II.14):

$$P_{r[\mathrm{dBm}]}^{rua} = P_{e[\mathrm{dBm}]} + G_{e[\mathrm{dBi}]} + G_{r[\mathrm{dBi}]} - L_{p[\mathrm{dB}]}^{rua} \quad \text{(II.13)}$$

$$P_{r[\mathrm{dBm}]}^{\mathrm{int}} = P_{e[\mathrm{dBm}]} + G_{e[\mathrm{dBi}]} + G_{r[\mathrm{dBi}]} - L_{p[\mathrm{dB}]}^{\mathrm{int}} \quad \text{(II.14)}$$

sendo o significado dos parâmetros de (II.13) e (II.14) definido na Secção II.1. Estão agora criadas as condições para calcular a atenuação de penetração, L_p, subtraindo (II.14) a (II.13), e recorrendo a (II.12) e (II.11), obtendo-se (II.15), sendo L_{tm} dado por (II.16):

$$L_{p[\mathrm{dB}]} = L_{\mathrm{int}[\mathrm{dB}]} - L_{tm[\mathrm{dB}]} \quad \text{(II.15)}$$

$$L_{tm[\mathrm{dB}]} = -16{,}9 - 10 \cdot \log(w_s) + 10 \cdot \log(f_{[\mathrm{MHz}]}) + 20 \cdot \log(H_B - h_m) + L_{ori[\mathrm{dB}]} \quad \text{(II.16)}$$

onde se tem:

- w_s - largura da rua
- f - frequência
- H_B - altura dos edifícios circundantes
- h_m - altura do móvel

e

$$L_{ori[\mathrm{dB}]} = \begin{cases} -10{,}0 + 0{,}354 \cdot f_{[\circ]} & ,0^{\circ} \le f < 35^{\circ} \\ 2{,}5 + 0{,}075 \cdot (f_{[\circ]} - 35) & ,35^{\circ} \le f < 55^{\circ} \\ 4{,}0 - 0{,}114 \cdot (f_{[\circ]} - 55) & ,55^{\circ} \le f < 90^{\circ} \end{cases} \quad \text{(II.17)}$$

sendo f o ângulo de incidência com o eixo da rua, Fig.II.5. A expressão total da atenuação fica assim completa:

$$L_{p[\mathrm{dB}]} = L_{\mathrm{int}[\mathrm{dB}]} - L_{tm[\mathrm{dB}]} - G_{h[\mathrm{dB/piso}]} \cdot (N_p - p) \quad \text{(II.18)}$$

com:

- G_h - ganho em altura
- N_p - número total de pisos
- p - número de piso

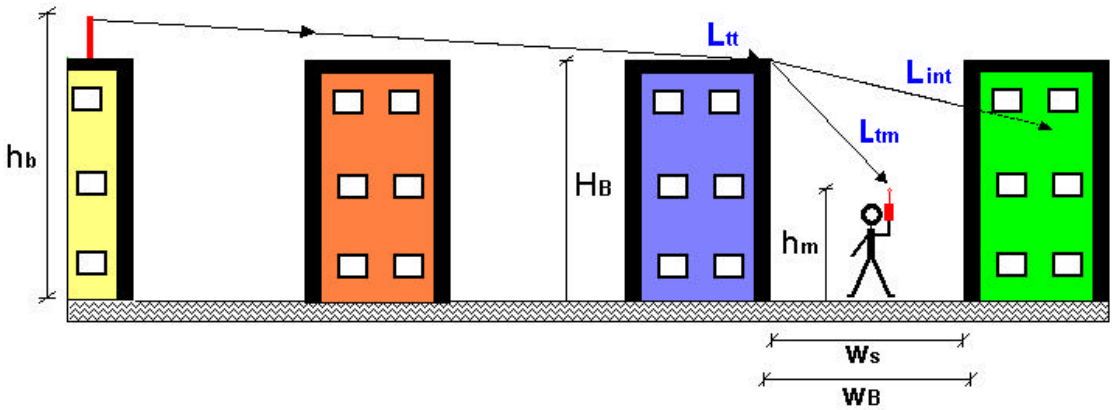


Figura II.4 - Cenário de propagação NLoS típico para aplicação do Modelo W-I Estendido; parâmetros associados.

A razão de a influência do termo de ganho em altura vir invertido em relação aos modelos já descritos prende-se com os pressupostos do modelo, ou seja, espera-se que a atenuação obtida à parte da influência do ganho em altura se aproxime dos valores que se verificam nos pisos mais elevados de um edifício rodeado por edifícios sensivelmente da mesma altura, caso em que se espera obter melhores resultados.

Um outro exemplo de modelo semi-determinístico, de relativa complexidade, foi desenvolvido por três elementos da NOKIA, nomeadamente J. Rajala, K. Sipila e K. Heiska [RaSH99]. Trata-se, em rigor, de um "Macro-Modelo", ou seja, é composto por dois modelos: um modelo de traçado de raios a 3D para a estimação da atenuação exterior junto à parede de um edifício, a qualquer altura do chão que se deseje, e um modelo de perdas de penetração que usa como dados de entrada os resultados fornecidos pelo primeiro. No entanto, por divergir ligeiramente dos objectivos centrais deste estudo, não será aqui abordado.

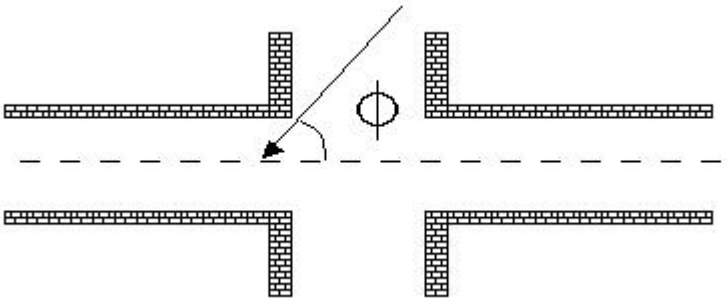


Figura II.5 – Ângulo de incidência com o eixo da rua.

II.4.3 Modelos Determinísticos

Os modelos não-determinísticos baseiam-se em equações simples, suportando-se normalmente em aproximações grosseiras na análise das características de propagação do canal. Além disso, a aferição dos seus parâmetros é feita através de uma sintonização do modelo com medidas, o que implica uma validação prévia do mesmo antes de este poder ser utilizado em diferentes tipos de ambiente rádio. Estas limitações podem ser minimizadas recorrendo a modelos determinísticos, baseados em técnicas de traçado de raios, [McHa91], que permitem simular os mecanismos de propagação mais relevantes em ambientes interiores. Estas técnicas encontram o seu suporte na Óptica Geométrica (GO) e na Teoria Geométrica da Difracção (GTD) ou em técnicas numéricas tais como o a Técnica das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) ou ainda no Método dos Momentos [SNZC97]. Os métodos baseados em propagação de raios ópticos têm a vantagem óbvia de serem muito precisos nas suas estimativas, padecendo, no entanto, de consideráveis exigências em termos computacionais, nomeadamente no tempo de processamento. Os modelos de traçado de raios baseiam-se normalmente em uma de duas técnicas:

- Método das Imagens
- Método de Lançamento de Raios

O Método das Imagens [HWWL00] é um método analítico que permite calcular, sem aproximações, todos os raios que chegam ao receptor, tornando assim possível o cálculo em precisão do comprimento e da fase de cada raio recebido. As superfícies reflectoras são substituídas por imagens da fonte, sendo o campo total num dado ponto obtido por sobreposição das contribuições de todas as imagens. Na prática, o método é sempre implementado de forma aproximada, uma vez que a sua aplicação rigorosa exigiria a consideração de um número infinito de imagens. O Método de Lançamento de Raios

[LaMc94], [SeRa94], [KrUG93] por sua vez, consiste, como o próprio nome indica, no lançamento, a partir da fonte e sobre a totalidade 4π do espaço de estereoradianos, de raios que se propagam desde o transmissor, segundo a Teoria da Óptica Geométrica, considerando fenómenos de propagação como a reflexão, a difracção e o espalhamento. Estes são seguidos até atingirem o receptor ou até saírem do edifício em que se propagam. A exactidão dos resultados pode ser melhorada com o aumento do número de raios lançados, com o consequente aumento do tempo de computação.

Além dos modelos determinísticos baseados em técnicas de traçado de raios, existem também modelos baseados em redes neuronais artificiais [WoLa97] que apresentam resultados mais exactos do que os modelos empíricos, uma vez que a rede neuronal é treinada com medidas efectuadas dentro de edifícios, considerando assim efeitos reais de propagação e também outros parâmetros difíceis de contabilizar em equações analíticas. Existem ainda outras alternativas em termos de modelos determinísticos, como a abordagem proposta em [BBOZ96], destinada a tratar a situação específica de penetração de ondas através de janelas. Neste modelo efectua-se uma modelação específica de objectos (e.g., janelas, paredes), sendo este baseado num formalismo de equações integrais a partir das condições de fronteira que é resolvido através do Método dos Momentos.

II.5 Caracterização das Antenas

Descrevem-se, nesta secção, as principais características das antenas [Kath01] das estações de base e dos terminais móveis nos sistemas GSM e UMTS. As antenas utilizadas nas estações de base podem ser de dois tipos: omnidireccionais e sectoriais. As antenas omnidireccionais, normalmente monopolos ou dipolos, são preferencialmente utilizadas em macro-células para cobrir zonas rurais, onde não se colocam grandes problemas a nível de interferência. Em termos de características eléctricas, as antenas omnidireccionais utilizadas em comunicações móveis possuem normalmente valores de impedância de entrada de 50 Ù, potência máxima de entrada até cerca de 500 W e factor de onda estacionária de 1.5 a 1. O ganho varia normalmente entre 2 e 12 dBi e a polarização é do tipo linear vertical. A Fig. M.1 mostra uma antena omnidireccional *dual-band* para GSM 1800 e UMTS. Um exemplo de antena omnidireccional exclusivamente para UMTS é ilustrado na Fig. M.2. Em termos de diagrama de radiação (DR), este tipo de antenas apresenta um diagrama vertical do tipo representado na Fig. M.3. O DR no plano horizontal (plano "H") é normalmente omnidireccional, característica típica dos monopolos, e o mesmo diagrama no plano vertical (plano "E"), tal como mostra a Fig. M.3, apresenta um lobo principal normalmente estreito, com valores típicos de largura de feixe a meia potência situados entre 5º e 30º, podendo, contudo, em casos especiais apresentar valores substancialmente superiores aos referidos.

Quanto a antenas sectoriais, o tipo de antena[1] normalmente utilizado é um agregado, formado por dipolos simples ou dobrados ou por antenas impressas, Fig. M.4. Este tipo de antena é preferencialmente usado em micro-células tri-sectoriais nos centros urbanos, uma vez que a confinação do seu feixe no plano horizontal permite um maior controlo da interferência co-canal, permitindo assim aumentar o padrão de reutilização de frequências. Os diagramas de radiação de uma destas antenas podem ser observados na Fig.M.5. Os parâmetros típicos a nivel de diagrama de radiação são os seguintes:

- Largura de feixe a -3dB no plano vertical: 5º a 50º
- Largura de feixe a –3dB no plano horizontal: 33º a 90º

[1] Faz-se a devida ressalva ao termo "antena" aqui, e daqui para a frente. Na verdade, trata-se de um "abuso" de linguagem para designar um agregado de antenas.

- Relação Frente-Trás: 30 dB
- Ganho: 7 a 25 dBi
- Downtilt Eléctrico: <15º
- Polarização: dual linear +/- 45º ou linear (vertical);

Quanto a características eléctricas típicas, os valores de impedância de entrada são normalmente 50 Ù, as potência máximas de entrada de cerca de 300 W e o factor de onda estacionária de 1.5 a 1.

Uma outra alternativa em termos de antenas para estações de base consiste no uso de antenas adaptativas (ou inteligentes) [ACHL99], [Ande99]. O tema das antenas adaptativas é uma área de investigação relativamente recente que promete revolucionar o panorama das comunicações móveis, com particular incidência sobre a terceira geração. A utilização de antenas adaptativas visa aumentar a capacidade dos sistemas, substituindo as antenas sectoriais convencionais. O princípio básico é, em vez de se transmitir informação para todo o sector, transmiti-la apenas em feixes estreitos da EB para o terminal móvel, resultando tal em benefícios evidentes no que diz respeito a interferência de canais. A Fig. M.6 mostra uma antena adaptativa para o sistema TDMA 1900.

No que diz respeito a antenas para móveis, o tipo de antenas utilizado têm naturalmente evoluído nos últimos anos. Os primeiros telemóveis GSM vinham normalmente equipados com monopolos. Com a entrada em funcionamento do GSM 1800 e com a necessidade de funcionar em duas bandas, tornou-se útil a introdução das antenas de hélice. Recentemente, por questões de marketing e de estética, os fabricantes foram pressionados no sentido do desenvolvimento de antenas impressas que pudessem ser incorporadas internamente. Actualmente, as antenas mais utilizado nos terminais móveis de GSM são precisamente as antenas impressas. Em relação a antenas para terminais UMTS, pouco ainda é conhecido, pois o fabrico massificado desses terminais ainda não teve início. Em termos de valores típicos de características eléctricas, as antenas para terminais móveis possuem normalmente impedância de entrada de 50 Ù e potência máxima de entrada até 10 W. A polarização é do tipo linear.

Se se atentar nas Figs. M.3 e M.5, constata-se que os diagramas de radiação apresentados apenas contemplam os planos vertical e horizontal. Como é óbvio, não existem antenas que radiem apenas nestes dois planos, pois a radiação de uma antena distribui-se tridimensionalmente no espaço. Este é, no entanto, o cenário que se pode encontrar na esmagadora maioria dos catálogos fornecidos pelos fabricantes, que normalmente apenas fornecem os diagramas de radiação no plano "E" e no plano "H", fornecendo até, por vezes, apenas a largura de feixe a -3dB em detrimento do primeiro. No início das comunicações móveis esta lacuna não constituía um problema em termos de planeamento, uma vez que se usavam macrocélulas com extensões de dezenas de quilómetros, onde os ângulos de radiação se situavam muito próximos do plano horizontal da antena, tornando desnecessário o conhecimento do diagrama de radiação no plano vertical. Contudo, com o aumento do número de utilizadores, tornou-se necessário um aumento de capacidade, que conduziu a uma diminuição progressiva do tamanho das células para valores na ordem de poucas dezenas de metros dentro das grandes cidades, de tal forma que o uso de microcélulas, com antenas abaixo do nível dos telhados, se tornou comum hoje em dia. Um novo problema se levanta com esta situação: para as distâncias envolvidas nas microcélulas, o ângulo de radiação das estações de base pode estar relativamente distante do plano horizontal da antena, tornando-se necessário o conhecimento do ganho da antena nessas direcções. No sentido de satisfazer essa necessidade, foram desenvolvidos algoritmos para extrapolação do diagrama de radiação tridimensional a partir dos diagramas de radiação planares, fornecendo, em casos testados, estimativas muito próximas dos diagramas de radiação reais. Como se verá adiante, foi necessário recorrer a um desses algoritmos [GCFP01] para extrapolar valores de ganho

para antenas situadas em linha de vista e em zonas próximas (<200 m) de determinados edifícios, em particular nas direcções dos diversos pisos, de modo a verificar o nível de correlação existente entre a evolução do ganho e da atenuação medida.

III. Recolha e Processamento de Dados

III.1 Processo de Medida

No âmbito do estudo da penetração das ondas electromagnéticas nos edifícios, foi realizada uma extensa campanha de medidas, na banda 1 800 MHz, em onze edifícios situados na cidade de Lisboa. O critério de selecção dos edifícios a medir consistiu no melhor compromisso possível entre dois factores: obter uma gama suficientemente representativa dos diversos tipos de edifício existentes numa cidade como Lisboa, sendo que, por motivos de facilidade de acesso aos seus espaços interiores, cada um dos mesmos deveria ser escolhido entre o vasto conjunto de edifícios concessionados à Vodafone para efeitos de instalação de antenas da sua rede celular.

Pelos motivos citados, é importante referir que os resultados obtidos através das medições devem ser associados a uma cidade com as características urbanísticas, geográficas e topográficas de Lisboa, bem como às características da rede celular do operador em causa (e.g., raio típico das células) sobre a qual foram efectuadas todas as medidas e ainda em que condições de propagação foram essas medidas efectuadas (e.g., LoS, NLoS).

O equipamento de medida utilizado consiste num telefone móvel Ericsson SH 888 *Dual-Band*, ligado a um computador portátil executando o *software* TEMS Erisoft ® (*Test Mobile System*), desenvolvido pela Ericsson [Tems96]. A aplicação TEMS realiza a aquisição de amostras de potência de sinal, recolhendo, para cada estação de base, uma amostra em cada 450 ms, para um máximo de dezasseis estações de base em simultâneo. O TEMS permite colectar dados nos modos chamada e *idle*, tendo-se optado, para evitar o controlo de potência dos canais e outros efeitos que poderiam influenciar indevidamente os resultados, pela realização de medidas em modo *idle*, e apenas sobre os canais BCCH (*Broadcast Channel*). O resultado deste *software* consiste num ficheiro com extensão ".scn", acessível a partir do Microsoft Excel. Na Fig. III.1 está representado o aspecto de um ficheiro ".scn" do TEMS. Uma estação de base é identificada a partir de um par BSIC/ARFCN (*Base Station Identity Code/ Absolute Radio Frequency Channel Number*), par esse que é único dentro de uma LAC (*Location Area Code*). A aplicação permite colocar marcas de separação dinamicamente (*filemarks*), registando, para cada medida, o valor de potência, a hora, a data e, quando disponível, as coordenadas geográficas do local. Em conjunto com as potências envolvidas na rede, o software padece contudo de limitações de sensibilidade nos seguintes casos:

- Descodificação de canais fortemente interferidos
- Descodificação de canais com potências abaixo do limiar de sensibilidade (-109 dBm)

Na impossibilidade de descodificar o BSIC, torna-se impossível identificar a estação que emite esse sinal, o que por sua vez impossibilita a contabilização das medidas que se encontram nessas condições. O telefone e o *software*, do qual a Vodafone possui uma licença, foram por esta cedidos para a execução da campanha de medidas. O equipamento foi instalado num veículo, Fig. O.1, com o telefone portátil colocado a uma altura de cerca de 1,5m do chão, veículo esse que se fez deslocar manualmente, a uma velocidade tão constante quanto possível de cerca de 1m/20s, ao longo da superfície dos locais a medir. A Fig. III.2 ilustra o processo de medida típico de um edifício. O procedimento adoptado consiste em duas fases distintas:

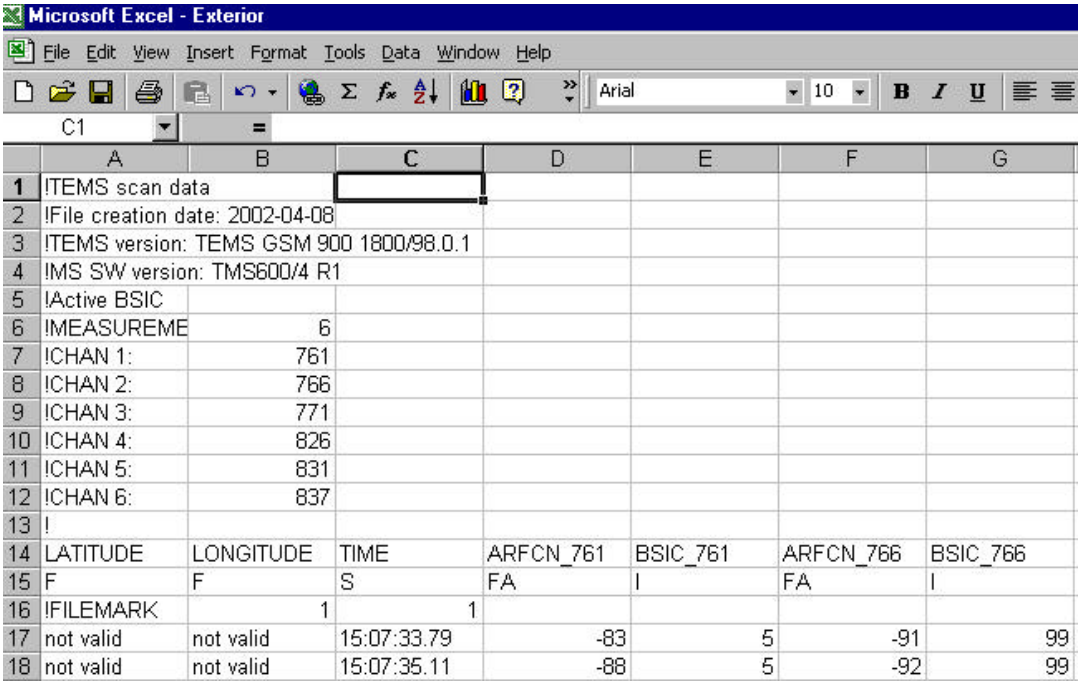
1º) Deslocar o veículo ao longo da(s) fachada(s) exterior(es) acessíveis do edifício. Sempre que possível, efectuaram-se medidas ao longo das quatro fachadas. Contudo, em casos de edifícios geminados lateralmente ou na impossibilidade de aceder às traseiras ou

outros espaços, não foi possível efectuar medidas ao longo de todas as fachadas, tal como seria desejável. Quanto às medidas em si, estas foram efectuadas, sempre que possível, nos dois lados da rua, ou seja, no passeio adjacente e no passeio do lado aposto (percursos (5) e (6) da Fig. III.2). Deste modo a média aritmética das potências dos dois lados da rua fornece uma boa estimativa do valor médio da potência no centro da rua, que é normalmente muito difícil de medir. Nesses casos, o valor de referência da potência exterior por estação base, P_{ref}^{ext}, é dada por:

$$P_{ref\,[\mathrm{dBm}]}^{ext} = \frac{P_{adj[\mathrm{dBm}]}^{ext} + P_{apo[\mathrm{dBm}]}^{ext}}{N_{adj}^{ext} + N_{apo}^{ext}} \qquad \text{(III.1)}$$

com :

- P_{adj}^{ext} - somatório dos valores de potência medidos no passeio adjacente à parede do edifício
- P_{apo}^{ext} - somatório dos valores de potência medidos no passeio aposto à parede do edifício
- N_{adj}^{ext} - número de amostras recolhidas no passeio adjacente
- N_{apo}^{ext} - número de amostras recolhidas no passeio aposto



Microsoft Excel - Exterior

	A	B	C	D	E	F	G
1	!TEMS scan data						
2	!File creation date: 2002-04-08						
3	!TEMS version: TEMS GSM 900 1800/98.0.1						
4	!MS SW version: TMS600/4 R1						
5	!Active BSIC						
6	!MEASUREME	6					
7	!CHAN 1:	761					
8	!CHAN 2:	766					
9	!CHAN 3:	771					
10	!CHAN 4:	826					
11	!CHAN 5:	831					
12	!CHAN 6:	837					
13	!						
14	LATITUDE	LONGITUDE	TIME	ARFCN_761	BSIC_761	ARFCN_766	BSIC_766
15	F	F	S	FA	I	FA	I
16	!FILEMARK	1	1				
17	not valid	not valid	15:07:33.79	-83	5	-91	99
18	not valid	not valid	15:07:35.11	-88	5	-92	99

Figura III.1 – Exemplo de um ficheiro do tipo ".scn"

Nos restantes casos, onde apenas foi medido o passeio adjacente à parede do edifício (percurso (5) da Fig. III.2), o valor de referência da potência exterior, por estação base, é simplesmente dado por:

$$P_{ref\,[\mathrm{dBm}]}^{ext} = \frac{P_{adj[\mathrm{dBm}]}^{ext}}{N_{adj}^{ext}} \qquad \text{(III.2)}$$

2º) Recolha de medidas nos espaços dos diversos pisos no interior do edifício. Para medir uma sala, foi efectuado, preferencialmente, um percurso em "X", assinalado como (2) na Fig.III.2. Na maioria dos casos, porém, não foi possível realizar esse percurso, pelo que se tomou, em alternativa, a opção de efectuar um dos percursos assinalados com (1) e (3) da mesma figura. Já para a determinação da atenuação localizada introduzida por uma parede interior, de modo a se obter um conjunto de amostras estatisticamente relevante, foi efectuado, ao longo de um piso, um percurso do tipo (4) e determinada a média simples das amostras recolhidas, bem como o conjunto de percursos (1), (2) ou (3) (englobando o maior número de salas possível num dado piso) e determinada a média simples do conjunto formado pelas medidas recolhidas nestes percursos. Uma estimativa da atenuação da parede interior fica assim dada pela diferença das médias.

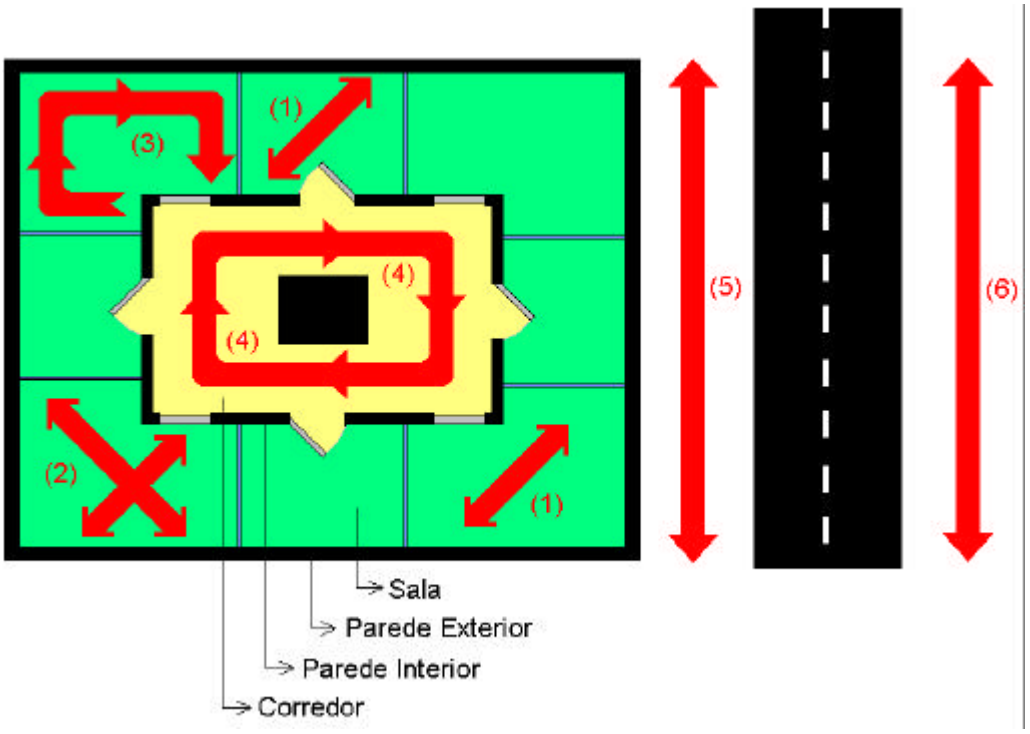


Figura III.2 – Processo de medida.

Para o parâmetro de escolha / rejeição de uma estação base fixou-se como valor mínimo 50 amostras nas medidas exteriores. Tal escolha fica a dever-se ao facto de se considerar que conjuntos de amostras com um número inferior a 50 não possuem a necessária relevância estatística, tendo sido rejeitadas todas as medidas relativas às estações que não verificavam esta condição. Em alguns casos (devidamente assinalados) porém, apenas para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg e do Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido e por motivos de escassez de medidas, consideraram-se conjuntos de amostras em número ligeiramente inferior. A atenuação, L_p, é dada por:

$$L_{p[\mathrm{dB}]} = P^{\mathrm{int}}_{[\mathrm{dBm}]} - P^{ext}_{ref[\mathrm{dBm}]} \qquad \text{(III.3)}$$

onde P^{int} representa os valores de potência medidos no interior do edifício. As atenuações encontram-se dividas em cinco classes distintas. Os elementos que fazem a distinção entre as várias classes são o piso, a estação base e o tipo de sala (com ou sem janelas):

- **Atenuação Exterior** – Relativa às atenuações num piso, de uma única estação base, medidas em salas com janelas
- **Atenuação Interior** – Relativa às as atenuações num piso, de uma única estação base, medidas em salas sem janelas
- **Atenuação Global** – Relativa às atenuações exteriores e interiores num piso e de uma única estação base
- **Atenuação por piso** – Relativa às atenuações de todos os espaços de um piso
- **Atenuação Total** – Relativa às atenuações de todos os espaços de um edifício

III.2 Descrição Física dos Edifícios Medidos

Os onze edifícios medidos foram divididos em quatro categorias, de acordo com as sua integração no tecido urbano da cidade de Lisboa. As categorias escolhidas foram as seguintes:

- Isolado Alto
- Isolado Baixo
- Integrado Alto
- Integrado Baixo

A distinção entre integrado e isolado é feita pelo facto de partilhar (ou não) paredes com os edifícios circundantes. Um edifício integrado faz sempre esta partilha, enquanto um edifício isolado não partilha paredes. Em relação aos parâmetros alto e baixo, a distinção é feita pelo número de andares: até quatro andares é considerado baixo, sendo a partir desse número considerado alto. Como exemplo para cada categoria, temos a Torre Norte do Instituto Superior Técnico como exemplo para a categoria "Isolado Alto", o Pavilhão Central do mesmo Instituto para a categoria "Isolado Baixo", a Torre da Vodafone para a categoria "Integrado Alto" e o edifício do Campo Mártires da Pátria para a categoria "Integrado Baixo". Segue-se uma breve descrição física dos edifícios medidos para melhor se entender em que categoria se enquadra cada um dos mesmos.

- ## Edifício da Avenida Almirante Reis

  O Edifício da Avenida Almirante Reis, Fig. O.2, é um edifício de sete andares (incluíndo o piso térreo), onde apenas foram medidos os primeiros três. Apesar de ter sido remodelado por dentro há relativamente pouco tempo, o edifício é de construção antiga. As suas paredes exteriores são de betão, com uma espessura de cerca de 30 cm, sendo as suas paredes internas de tijolo, com uma espessura de cerca de 15 cm. As janelas são de vidro simples. Este edifício partilha paredes com os edifícios adjacentes. Desta forma foi integrado na categoria "Integrado Baixo".

- ## Edifício Monumental

  O Edifício Monumental, Fig. O.3, situado na Praça do Saldanha, é um edifício com doze andares acima do nível do solo (incluíndo o piso térreo). Relativamente aos espaços interiores, os pisos –1 e 0 (piso térreo) são preenchidos por um centro comercial, com o piso térreo aberto para o exterior na fachada frontal, através de montras de vidro das lojas. A partir do piso 1, o edifício é preenchido essencialmente por escritórios com janelas, que derivam de um longo corredor com paredes de tijolo, com uma espessura de cerca 20 cm, forradas a pedra mármore. O 8º andar não foi medido pois não foi concedida autorização

para o fazer. Este edifício é de construção recente, com paredes exteriores de vidro laminado duplo e encontra-se situado numa praça ampla, partilhando paredes com os edifícios circundantes na fachada traseira, edifícios esses aproximadamente da mesma altura. Este edifício foi considerado como pertencente à categoria "Integrado Alto".

- **Edifício Castil**

O Edifício Castil, Fig. O.4, situado na Rua Castilho, é um edifício de onze pisos (incluíndo o piso térreo), de construção não muito recente. O piso térreo forma, com os pisos 1, 2 e 3, um centro comercial, aberto para o exterior na fachada central e numa das laterais através de montras de lojas, e fechado por parede maciça nas restantes. A partir do piso 4, o interior do edifício é preenchido por escritórios com janelas de vidro, que derivam de um corredor com paredes de tijolo duplo, com uma espessura aproximada de 20 cm. O edifício foi reconstruído há pouco tempo, visto ter sofrido um grande incêndio há cerca de dois anos, sendo que metade do 4º piso se encontra ainda ainda por reconstruir. O edifício Castil situa-se num cruzamento entre duas ruas, e partilha paredes com os edifícios adjacentes, todos com uma altura semelhante. As suas paredes exteriores são de betão, com uma espessura aproximada de 30 cm, com janelas amplas de vidro simples. O edifício foi integrado na categoria "Integrado Alto".

- **Centro Cultural de Belém**

Outro dos edifícios medidos foi o Centro Cultural de Belém (CCB), Fig. O.5. O Centro foi construído há aproximadamente uma década e situa-se à beira Tejo, numa área completamente isolada. As suas paredes exteriores são de betão, forradas a pedra, com uma espessura aproximada de 40 cm, sendo as janelas de vidro duplo. As paredes interiores são essencialmente de betão, com uma espessura aproximada de 20 cm. A sua estrutura obriga a que seja tratado de uma forma algo diferente. O edifício é constituído por três blocos, estando o 1º e o 2º blocos interligados entre si, formando este par um edifício único. Por sua vez, o 3º bloco é independente dos demais, estando ligado ao 2º bloco através de uma parede maciça de betão. Como tal, optou-se por dividir o CCB em dois edifícios distintos, onde o primeiro compreende os blocos 1 e 2 e tem quatro andares, enquanto o segundo apenas compreende o bloco 3, com três andares (piso térreo incluído). Ambos os edifícios foram integrados na categoria "Integrado Baixo".

- **Edifício da Avenida da República**

O Edifício da Avenida da República, Fig. O.6, é uma dependência do Ministério da Saúde. Trata-se de um edifício de construção antiga geminado lateralmente por edifícios de altura semelhante, com dez andares. As paredes externas são de betão, com uma espessura de 20 cm, com janelas de vidro duplo, sendo as paredes internas de tijolo, com uma espessura aproximada de 15 cm. Este edifício foi classificado como "Integrado Alto".

- **Edifício do Campo Mártires da Pátria**

O Edifício do Campo Mártires da Pátria, Fig. O.7, onde funciona uma repartição de Finanças, é um edifício de construção antiga, geminado lateralmente, com cinco andares, incluíndo o piso térreo. Tendo sido recentemente remodelado por dentro, as paredes exteriores são de tijolo, com uma espessura aproximada de 20 cm, sendo as janelas de

vidro duplo. As paredes internas são de tijolo, com uma espessura aproximada de 15 cm. Este edifício foi integrado na categoria "Integrado Baixo".

- **Edifício Sede do Grupo "Jerónimo Martins"**

O Edifício Sede do Grupo Jerónimo Martins, Fig O.8, situado no Campo Grande é de construção relativamente recente, possuíndo dezassete pisos (incluíndo o piso térreo). No piso térreo situa-se a recepção, um piso com uma estrutura distinta dos restantes, menos amplo e mais fechado para o exterior. A partir do piso 1, os espaços interiores são amplos e abertos para o exterior por meio de janelas de vidro simples em todas as fachadas. As paredes externas são de tijolo, com uma espessura de 20 cm, sendo parte de uma das suas paredes partilhada com um edifício adjacente. As paredes interiores, existentes apenas em alguns pisos, são de contraplacado, tendo por isso sido considerados como abertos todos os espaços envolvidos pelas mesmas. Decidiu-se enquadrar este edifício na categoria "Isolado Alto".

- **Torre Norte do Instituto Superior Técnico**

A Torre Norte do Instituto Superior Técnico, Fig. O.9, é um edifício de construção recente com doze pisos acima do nível do solo (incluíndo o piso térreo), sendo o piso 2 constituído apenas por um terraço e o piso 3 um piso intermédio inacessível. Situado numa das zonas mais altas de Lisboa, o edifício tem a particularidade de a sua quase totalidade se encontrar virtualmente em condições de LoS com todas as estações que para o seu estudo foram consideradas. Pelas suas características peculiares, destaca-se claramente dos edifícios circundantes, pois consiste numa moderna torre vidrada (vidro duplo), suportada por um núcleo de betão armado, tendo sido edificada a partir do seio do Pavilhão de Electricidade. No núcleo do edifício encontram-se as escadas de emergência, o poço dos elevadores, as casas de banho dos diversos pisos bem como outras dependências. Em torno do núcleo descrevem-se corredores quadrangulares, que dão acesso a gabinetes com janelas através de portas de madeira implantadas em parede de gesso cartonado. O Pavilhão de Electricidade, por sua vez, é uma estrutura antiga, com características muito semelhantes às do Pavilhão Central, descrito de seguida, e envolve a torre em todo o seu perímetro até ao 2º piso. Pelas suas características, foi englobado na categoria "Isolado Alto".

- **Pavilhão Central do Instituto Superior Técnico**

O Pavilhão Central do Instituto Superior Técnico, Fig. O.10, é um edifício de construção bastante antiga, com quatro pisos, sendo um deles a cave, encontrando-se edificado numa das zonas mais altas de Lisboa. Este edifício é consideravelmente mais baixo do que os edifícios circundantes encontrando-se isolado da estrutura envolvente e ladeado por dois pequenos jardins. A maioria das suas paredes são de pedra e bastante espessas. Foi integrado na categoria "Isolado Baixo".

- **Torre A da Vodafone**

A sede da Vodafone, Torre A, Fig. O.11, do Complexo Empresarial das Torres de Lisboa, é um edifício de construção recente, com dezasseis pisos (incluindo o piso térreo), integrada num conjunto de torres da mesma altura. Refira-se que não foi possível realizar medições no piso 4. O piso térreo (recepção) é um espaço amplo, menos aberto para o

exterior do que os restantes, que consistem essencialmente em zonas do tipo *open-space*. As suas paredes externas são de vidro duplo, enquanto que as suas paredes internas são de betão, com uma espessura aproximada de 20 cm. Foi considerado que este edifício se enquadra na categoria "Integrado Alto".

- **Complexo Interdisciplinar do Instituto Superior Técnico**

O Complexo Interdisciplinar do Instituto Superior Técnico, Fig. O.12, é um edifício de construção antiga, com seis pisos. Devido ao desnível topográfico, a fachada frontal encontra-se acima do nível do solo apenas a partir do piso 3, inclusivé, enquanto que a fachada traseira se encontra totalmente acima desse nível. O seu interior consiste essencialmente de gabinetes, dispostos ao longo de um corredor que percorre o edifício em toda a sua extensão, com paredes internas de tijolo de espessura aproximada de 5 cm. As suas paredes externas são de betão, com uma espessura aproximada de 20 cm, enquanto as janelas são de vidro simples. Este edifício foi classificado como "Isolado Alto".

III.3 Processamento de Dados

A observação de um comportamento típico para a atenuação medida no interior dos diversos edifícios motivou a criação de um novo modelo, baptizado, em alusão à sua filosofia, por "Modelo da Dupla Normal". O Modelo da Dupla Normal é, portanto, um modelo empírico, pensado no decorrer deste estudo para modelar os resultados obtidos. Observou-se que, para um dado edifício, a aparência do histograma de probabilidades de ocorrência de valores de atenuação obedecia normalmente a uma estrutura padrão, que se assemelha a uma função de densidade de probabilidade Normal "desequilibrada", Fig. III.3, ou seja, com desvios padrão diferentes para os troços à esquerda e à direita do valor médio.

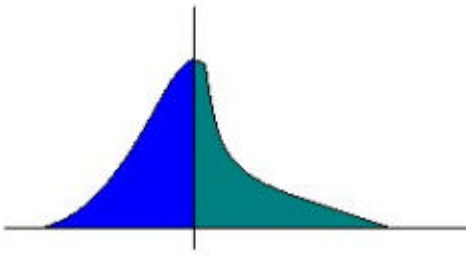


Figura III.3 – Aspecto da função densidade de probabilidade típica.

O Modelo da Dupla Normal consiste em obter dois valores de desvio padrão que minimizem o valor da estatística de teste do Teste do $\div^2$ [MoRu94] (Anexo N), de modo a que o critério do teste seja respeitado. A obtenção dos parâmetros do modelo realiza-se da seguinte forma:

- Construir um histograma com classes de atenuação de dimensão unitária
- "Partir" o histograma pela moda, obtendo-se dois semi-histogramas com o aspecto de semi-normais
- Efectuar um "espelhamento" de cada um dos dois semi-histogramas obtidos, ou seja, replicar um semi-histograma, inverter-lhe o sinal e adicioná-lo ao já existente, obtendo-se assim dois sub-histogramas com aspecto de funções normais, Fig. III.4

- Determinar a média e o calcular o desvio padrão dos dois sub-histogramas, obtendo parâmetros de duas normais
- Aplicar, a cada uma das duas normais, um algoritmo iterativo, cujo critério de convergência é a obtenção de um valor mínimo para a estatística de teste do Teste do $\div^2$, variando a dimensão das classes. O funcionamento do algoritmo encontra-se detalhadamente descrito no fluxograma da Fig. III.5.

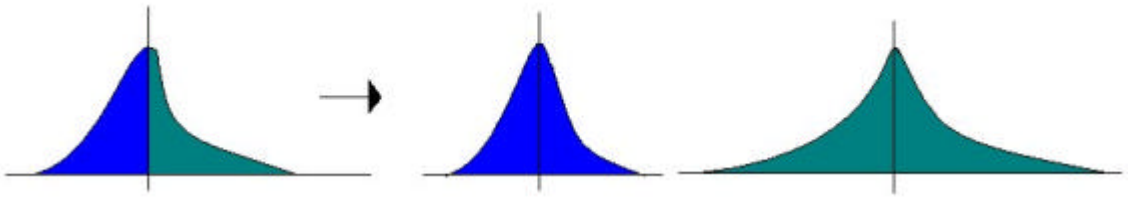


Figura III.4 – O processo do "espelhamento".

Verificou-se, como se verá adiante, que os melhores resultados em termos de estatística de teste são obtidos para o intervalo de dimensão 5. No entanto, e como o Teste do $\div^2$ é um teste exigente, regra geral não foi possível respeitar o seu pressuposto, embora em alguns casos se tivessem conseguido boas aproximações. De modo a facilitar e dinamizar o processamento de toda a informação recolhida, em termos de parâmetros estatísticos característicos de cada edifício e de parâmetros do Modelo da Dupla Normal, foi necessário recorrer à construção de um algoritmo escrito em linguagem Matlab. Para uma melhor compreensão do funcionamento do mesmo, o fluxograma do algoritmo é aqui representado, Fig. III.5 .

Os resultados obtidos durante a extensa campanha de medidas foram processados estatísticamente e descritos com grande pormenor nos anexos de A a L. Descrevem-se, de seguida e de um modo sucinto, os vários parâmetros presentes nos anexos que fazem a caracterização de cada edifício medido, bem como o método de aferição dos parâmetros dos modelos de Berg e W-I Estendido. Descreve-se ainda o método de correcção de atenuações devido ao carácter direccional do ganho das antenas, nos casos em que se aplica.

- **Média, *m***

$$m = \frac{\sum_{i=1}^{K} x_i}{K} \qquad \text{(III.4)}$$

com:

- x_i - valor da amostra i
- K - dimensão do conjunto de amostras

- **Máximo, *Max***

$$Max = \max\,[x_i\,],\ i \in [1,K] \qquad \text{(III.5)}$$

- **Mínimo, *Min***

$$Min = \min\,[x_i\,],\ i \in [1,K] \qquad \text{(III.6)}$$

- **Desvio Padrão, *s***

$$s = \sqrt{\frac{K \cdot \sum_{i=1}^{K} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{K} x_i\right)^2}{K^2}} \qquad \text{(III.7)}$$

- **Mediana**

$$\text{Mediana} : P(\text{Mediana}) = 0{,}5 \qquad \text{(III.8)}$$

sendo $P(x)$ a função de distribuição de probabilidade.

- **Moda**

$$\text{Moda} = \max\,[p(x)] \qquad \text{(III.9)}$$

sendo $p(x)$ a função densidade de probabilidade.

- **Erro Quadrático Médio, *EQM***

$$EQM = \frac{\sum_{l=1}^{L} \left(f_1(x_l) - f_2(x_l)\right)^2}{L}$$

com:
- L - número de pontos onde é contabilizado o erro
- x_l - variável discreta
- f_1, f_2 - funções de variável discreta x_l

- **Variação**

$$Variação = Atenuação_{\text{piso}(n)} - Atenuação_{\text{piso}(n-1)} \qquad \text{(III.10)}$$

Esta grandeza fornece uma noção de como a atenuação varia à medida que se sobe em altura.

- **Parâmetro Interior/Exterior, int/ext**

$$int/ext = m\left(Atenuação_{\text{interior}}\right) - m\left(Atenuação_{\text{exterior}}\right) \qquad \text{(III.11)}$$

Esta grandeza fornece uma noção da atenuação média introduzida pelas paredes interiores dos edifícios.

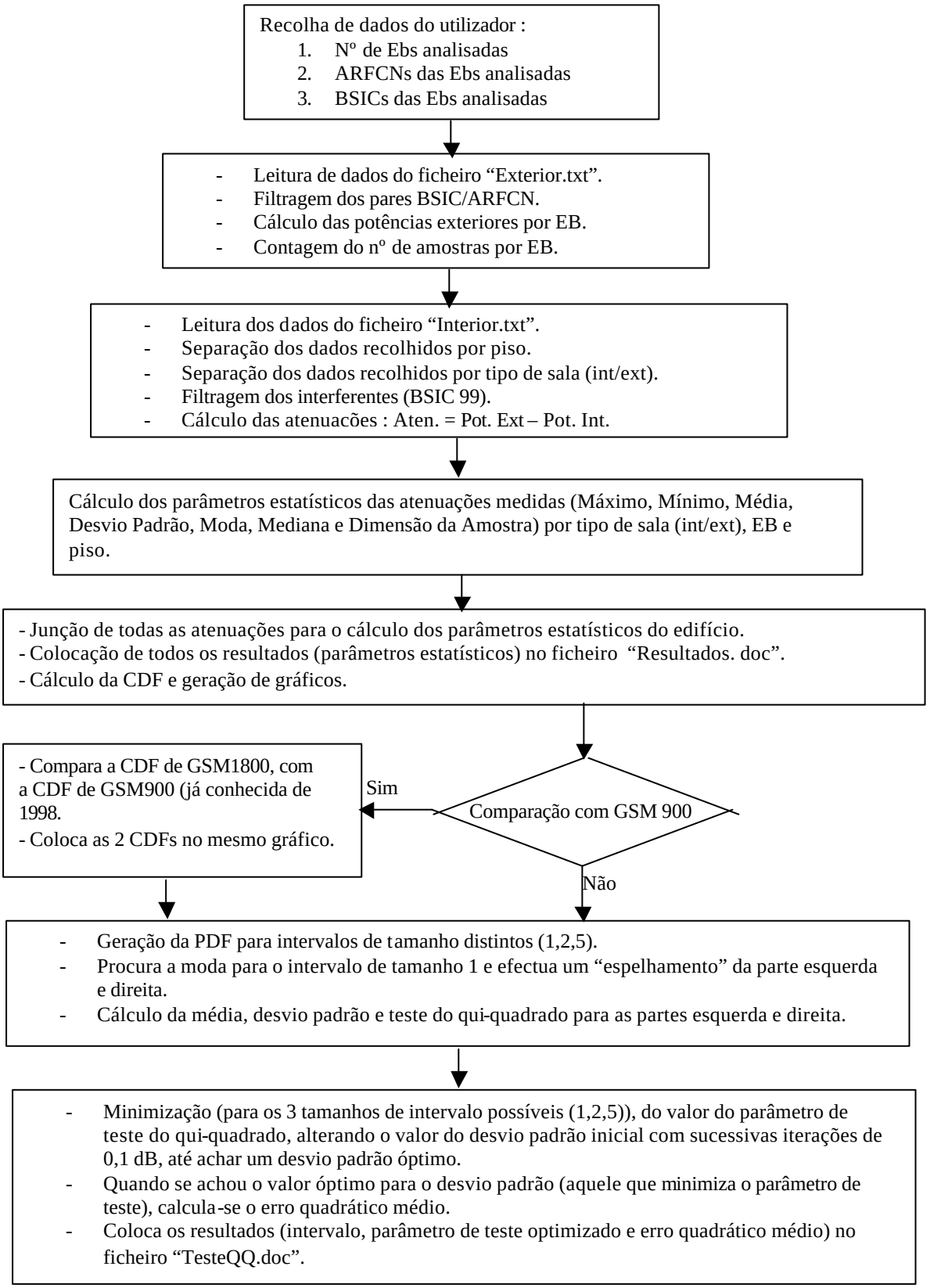


Figura III.5 – Fluxograma do algoritmo de tratamento de dados

- **Probabilidade de Cobertura**

O objectivo desta grandeza é fornecer uma estimativa do acréscimo de atenuação que se verifica no caso em que se pretenda efectuar cobertura de um determinado edifício a uma determinada percentagem. Os valores de percentagem considerados representativos foram 50%, 90% e 95%.

- **Parâmetros do Modelo de Berg**

O Modelo de Berg possui três tipos de parâmetros: W_e (atenuação introduzida pela parede exterior), W_{im} (atenuação introduzida por uma parede interior de tipo m) e G_h (ganho em altura). O parâmetro W_{im} é obtido simplesmente pela diferença das médias das amostras adquiridas num percurso do tipo (1), (2) ou (3) e num percurso do tipo (4), Fig.III.2. Os restantes parâmetros são obtido através de regressão linear a partir das médias (por piso) das amostras recolhidas em percursos do tipo (1), (2) ou (3) da Fig.III.2. Da recta resultante, G_h assume o valor do seu declive, enquanto que W_e toma o valor da mesma no piso térreo do edifício em causa.

- **Parâmetros do Modelo de Walfisch-Ikegami Estendido**

Os parâmetros do Modelo de W-I Estendido são obtidos da seguinte forma: para L_{int} e G_h podem simplesmente usar-se W_e e G_h, aferidos para o Modelo de Berg, uma vez que são parâmetros equivalentes. Quanto a L_{ori}, pode ser calculado facilmente recorrendo a uma carta topográfica para determinação do ângulo f.

- **Correcção de Ganho das Antenas**

Em alguns casos, existem antenas situadas em zonas muito próximas (menos de 200 m) e em linha de vista com o edifício em questão. Nestes casos, é necessário entrar em linha de conta com um factor de correcção, devido à não homogeneidade do diagrama de radiação. Uma vez que todas as medidas de exterior são efectuadas ao nível da rua, o factor de correcção, $ÄG$, é dado por:

$$\Delta G_{[\mathrm{dB}]} = G_{piso[\mathrm{dBi}]} - G_{rua[\mathrm{dBi}]} \qquad \text{(III.12)}$$

onde G_{piso} é o ganho da antena na direcção de cada piso e G_{rua} é o ganho da antena na direcção do nível da rua. Através deste factor correctivo, é possível calcular o verdadeiro valor de atenuação para edifícios com antenas em linha de vista, nas proximidades. A atenuação corrigida, $L_{piso/corr}$, é dada por:

$$L_{piso/corr[\mathrm{dB}]} = L_{piso[\mathrm{dB}]} + \Delta G_{[\mathrm{dB}]} \qquad \text{(III.13)}$$

onde L_{piso} é a atenuação num piso. Para alguns casos foi efectuado um estudo de comparação da atenuação medida nos diversos pisos dos edifícios e o ganho das antenas que os iluminam em LoS, a partir de estações de base situadas em zonas próximas. Recorrendo ao auxílio do programa Excel, o ganho das antenas segundo as direcções pretendidas foi extrapolado através de um algoritmo [GCFP01] disponível para o efeito. Efectuada a correcção de ganho (III.13) espera-se que a atenuação nos diversos pisos se torne mais homogénea. Para verificar a efectividade da correcção

utiliza-se uma medida de dispersão, o desvio padrão, aplicada à atenuação L_p e à atenuação corrigida L_p + $ÄG$. Espera-se, naturalmente, que o valor da segunda medida seja inferior ao da primeira. Utiliza-se uma outra medida, o coeficiente de correlação, para medir precisamente o grau de correlação existente entre a atenuação e o ganho. O coeficiente de correlação, r_{XY}, entre duas variáveis aleatórias X e Y é definido por [MoRu94]:

$$r_{XY} = \frac{s_{XY}}{s_X \cdot s_Y} \tag{III.14}$$

com:

$$s_{XY} = E(XY) - E(X) \cdot E(Y) \tag{III.15}$$

onde $E(X)$ representa o valor esperado de X.

Sendo possível provar que $r_{XY} \in$ [-1;1], diz-se que a correlação entre as variáveis X e Y é negativa, positiva ou nula, respectivamente, se $r_{XY} < 0$, $r_{XY} > 0$ ou $r_{XY} = 0$.

IV. Análise de Resultados

IV.1 Categoria Isolado - Alto

- **Torre Norte do Instituto Superior Técnico**

Para a aferição dos parâmetros estatísticos (Secção III.3) foram utilizadas medidas das estações CPeq_B, Tecn_C, Tecn_B, HSMa_C, Tecn_A, CPeq_C, PEsp_B, Camp_A e Aree_B. Tal como se esperava, os valores de atenuação medidos para salas exteriores são sempre inferiores aos valores obtidos para as salas interiores. A diferença é dada pelo parâmetro interior/exterior e vale 8,6 dB. Convém ainda realçar que, neste edifício, as salas interiores são as que se localizam no interior do núcleo central (escada de emergência, *courettes* e casas de banho).

Para este edifício foi recolhida uma amostra de 10 467 pontos, tendo-se observado uma atenuação média de -3,7 dB e um desvio padrão de 15 dB. Em relação aos parâmetros de cobertura verificou-se que, para se obter uma cobertura a 50 % é necessário subtrair 7,1 dB de potência. Contudo será necessário adicionar 20 dB de potência para se obter uma cobertura a 90% e 24,7 dB para uma cobertura a 95 %. O valor negativo obtido para a atenuação, bem como o resultado (pouco habitual) obtido para a cobertura a 50 % são justificáveis pelo facto de a torre ser um edifício muito alto, desenquadrado da estrutura urbana envolvente e que se encontra, a partir da zona do piso 6, em LoS com quase todas as estações base medidas, ao contrário do que acontece ao nível da rua. Comparando os resultados para as duas bandas de GSM, obtém-se uma atenuação mediana superior em aproximadamente 6 dB para a banda do GSM 1800, o que vem de encontro às expectativas.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

Quanto aos resultados para o Modelo de Berg, verifica-se que o erro médio de 6 dB é bastante elevado em comparação com outros casos estudados. No entanto, importa observar que a Torre Norte tem uma estrutura algo invulgar, podendo ser conceptualmente subdividida em dois edifícios com características distintas : a parte situada acima do quarto andar, que se encontra isolada, e a parte abaixo, rodeada pelo Pavilhão de Electricidade, uma estrutura muito densa de pedra, de construção antiga. Por esse motivo, não é de estranhar que os valores de erro mais elevados se verifiquem abaixo do quarto andar, Tab. H.8, pois as condições de propagação nesta zona são necessariamente distintas. Além disso, decidiu-se ajustar o modelo por regressão linear apenas com base nos 4º,5º e 6º andares, suprimindo os pisos situados abaixo, devido à escassez (ou ausência) de medidas não garantir suficiente relevância estatística, e também por arbitrariamente se ter decidido excluir dos resultados para os parâmetros a influência do Pavilhão de Electricidade. É facilmente constatável por simples intuição através da Fig. IV.1, que o ganho em altura, estimado em 1,6 dB/piso, seria substancialmente superior se se fizesse sentir a influência daquele pavilhão nos resultados. Suprimem-se igualmente os pisos situados acima por se deixarem a partir daqui de sentir os efeitos do ganho em altura. Foi também obtida uma estimativa de 4,4 dB para a atenuação introduzida pela parede interior de gesso cartonado que delimita o corredor interno, o que representa um valor aceitável. Aparentemente mais estranho é o valor (negativo) estimado para a atenuação da parede exterior de vidro. De facto este valor deve ser visto apenas como um parâmetro do modelo, que não é necessariamente representativo do valor de perdas electromegnéticas introduzido por uma parede deste tipo, escolhido antes por se ajustar bem ao referido modelo.

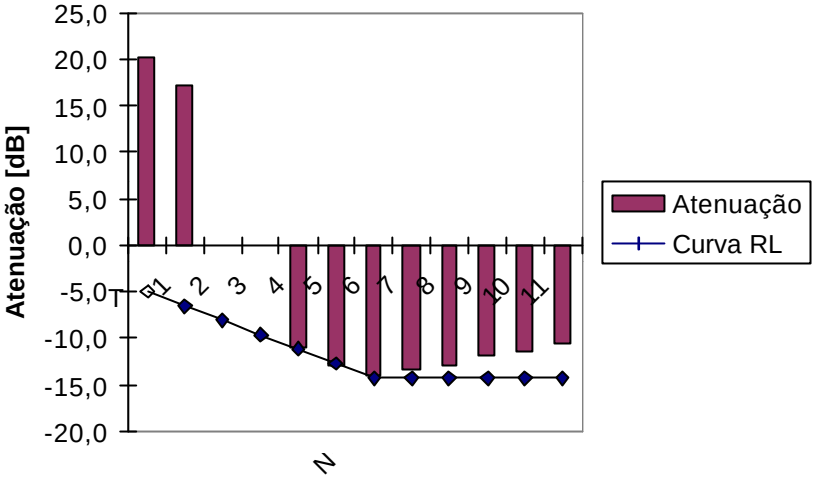


Figura IV.1 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Por existir uma antena na zona próxima (250 m) e em LoS (Tecn_A) com este edifício, foi realizado o estudo da relação atenuação/ganho da antena. Os resultados confirmaram as expectativas, como o demonstram aliás as medidas de dispersão para as atenuações medida e corrigida (desvios padrão respectivamente de 5,1 dB e 4,2 dB, respectivamente, calculados apenas para os resultados acima do 4º andar). Em relação ao coeficiente de correlação obtido, de –0,8, é possível concluir que existe um elevado grau de correlação inversa. Uma observação da Fig. H.3 revela que, a partir do 4º andar, o ganho em altura da antena, na direcção considerada, diminui, acompanhando uma atenuação progressivamente mais alta. Não se deve atribuir grande relevância aos dados obtidos abaixo do 4º andar por se encontrarem os respectivos pisos obstruídos pelo Pavilhão Central do mesmo Instituto. Verifica-se um fenómeno que merece alguma atenção, bem visível na Fig. H.3: quando a tendência é de aumento da atenuação, observa-se uma inversão da mesma tendência do piso 9 ao piso 11. Considerando as medidas de atenuação dotadas de significância estatística, a explicação poderá recair sobre uma de duas alternativas: 1) sobre o diagrama de radiação, dado que, na mesma zona, a tendência para o decréscimo do ganho tem tendência a estabilizar, e possivelmente a inverter-se e, com uma maior precisão dos diagramas de radiação disponíveis para a extrapolação, poderia mesmo ser possível chegar-se à conclusão que existe uma inversão do andamento do ganho nessa zona ou 2) sobre a presença intermédia de um jardim com árvores densamente folhadas (as medidas foram efectuadas na Primavera) e ao nível da antena, que poderão estar na origem de um fenómeno localizado de reflexão, projectando radiação na direcção dos últimos pisos.

Para a obtenção de informações detalhadas, deve-se consultar o Anexo H.

- ## Edifício Sede do Grupo Jerónimo Martins

No estudo deste edifício foram utilizadas medidas das estações de base LumN_B, Telh_B, ABra_C e LumN_C. Foi recolhida uma amostra de 6 173 pontos, tendo-se observado uma atenuação média de –7,6 dB e um desvio padrão de 9,5 dB. Em relação aos parâmetros de cobertura, é necessário subtrair 8 dB para uma cobertura a 50 %, adicionar 4,2 dB para uma cobertura a 90 % e 8,3 dB para uma cobertura a 95 %. Comparando o resultado obtido para as duas bandas do GSM, obtém-se uma atenuação mediana inferior em aproximadamente

4 dB para a banda do GSM 1800. Tal resultado não era expectável, mas talvez possa ser justificado pelo facto de os conjuntos de estações que estão na origem dos resultados obtidos para as duas bandas se localizarem em posições geograficamente muito distintas.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

No que ao Modelo de Berg diz respeito, verifica-se um ganho em altura estimado em 1,9 dB, sensivelmente até ao 10º andar, estabilizando a partir desse piso. Se considerarmos que este edifício pertence à classe isolada e que a altura média dos edifícios situados nas proximidades ronda os nove andares este resultado é muito razoável à luz dos pressupostos da modelação do ganho em altura (Secção II.3.3). Uma vez que não existem paredes interiores relevantes no interior deste edifício, foi apenas estimado o valor das perdas introduzidas pela parede externa em 10,9 dB, valor aliás aceitável quando se trata, como aqui acontece, de paredes de betão com janelas amplas. O erro não toma um valor muito elevado, à excepção dos dois últimos pisos e também dos pisos 5, 10 e 12. Não sendo erros muito significantes, estes deverão simplesmente ficar a dever-se a fenómenos localizados de reflexões ou espalhamento diversos. De resto o erro médio vale 2,3 dB.

É disponibilizada informação mais detalhada para este edifício no Anexo G.

- **Complexo Interdisciplinar do Instituto Superior Técnico**

Para este edifício foram medidas as estações de base PEsp_B, ARep_B, Tecn_C, Tecn_B, Tecn_A, e SSeb_A. Foi recolhida uma amostra de 12 403 pontos, com uma atenuação média de 5,1 dB e um desvio padrão de 10,2 dB. O parâmetro interior/exterior vale 3,5 dB. Quanto à cobertura, os acréscimos são de 3,8 dB para uma cobertura a 50 %, 17,5 dB para uma cobertura a 90% e 22,4 dB para uma cobertura a 95 %, conforme se pode observar na Fig. IV.2. Comparando os resultados para as duas bandas de GSM, obtém-se uma atenuação mediana superior em aproximadamente 6 dB para a banda do GSM 1800, o que vem de encontro às expectativas.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

Em termos de resultados para o Modelo de Berg, o Complexo Interdisciplinar é um dos casos que apresenta melhores resultados, com um erro médio estimado em 0,4 dB. Quanto aos parâmetros, o valor de 3,4 dB obtido para as perdas da parede exterior de betão, bem como o valor de 3,7 dB obtido para a parede interior, não parecem, à primeira vista, valores muito razoáveis, por serem reduzidos. Em relação à parede interior, que delimita os corredores internos, tal resultado poderá ficar a dever-se ao grande número de portas de madeira existentes nessa parede, espaçadas em média de cerca de 3 a 4 m, muitas das quais se encontravam abertas durante as medições, atenuando as diferenças entre espaços interiores e exteriores. Já quanto à parede externa, é importante observar que duas das cinco estações de base medidas se encontram a menos de 20 m do edifício em questão. Ainda que os sectores escolhidos não estejam orientados na direcção do Complexo, a distância na vertical que separa as antenas do edifício é inferior à distância que separa as mesmas do chão, local onde é medida a referência exterior, com base na qual é calculada a atenuação. Este facto poderá explicar a razão de um valor de W_e tão reduzido. Quanto ao ganho em altura, de 2,5 dB, é um valor razoável dado que, ainda que seja um edifício considerado isolado, não se destaca em altura dos edifícios circundantes, situado aliás um pouco na "sombra" dos mesmos, o que normalmente favorece a ocorrência de ganhos em altura mais elevados. Quanto a resultados para o Modelo de W-I Estendido, a atenuação é estimada em -22,4 dB, o que, se comparado com a atenuação estimada por regressão linear para o último piso (-4,1) constitui um erro grosseiro. Observe-se, no entanto que a antena SSeb_A se encontra orientada a uma direcção relativamente afastada do Instituto Superior Técnico, e embora as antenas PEsp_B e ARep_B se orientem na direcção do mesmo, é de notar que a presença de duas estações (Tecn_B e

Tecn_C) situadas a 40 m e orientadas em direcções opostas poderão estar na origem de tamanha divergência nos resultados previstos pelo mesmo modelo.

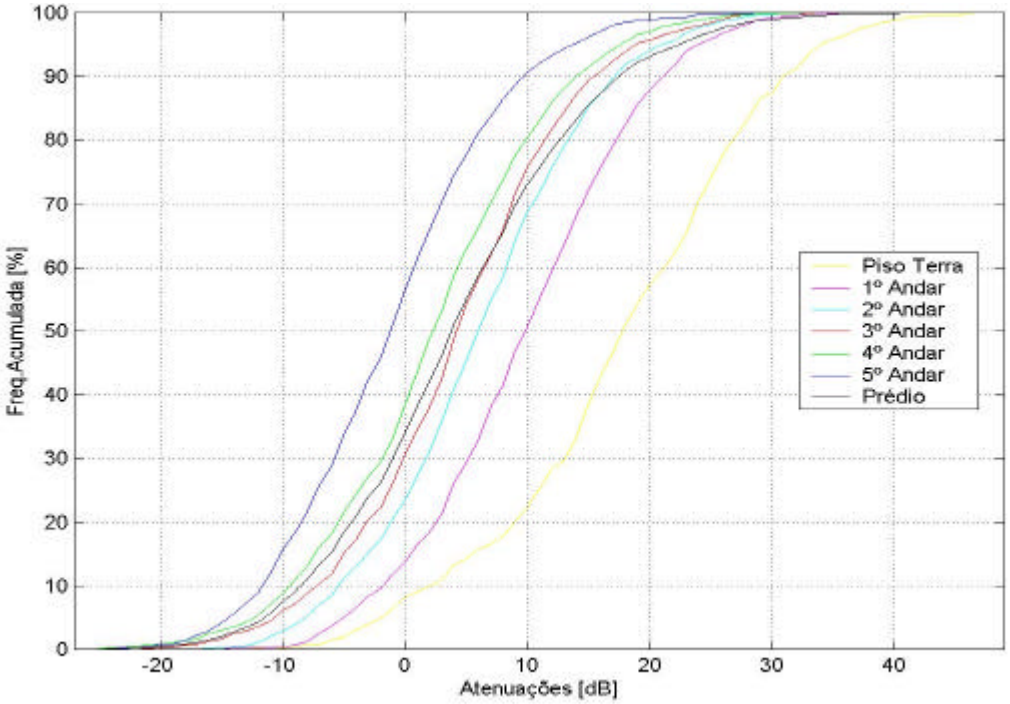


Figura IV.2 – Função de probabilidade acumulada.

Efectuou-se também para este edifício o estudo da influência do diagrama de radiação na atenuação medida para a estação em LoS, Tecn_A. Os resultados são bastante satisfatórios, atestados pela diferença do desvio padrão, de valores 6,5 dB para a atenuação medida e 3,3 dB para a atenuação corrigida. A correlação inversa é, de resto, elevada (cerca de –0,9). A Fig. IV.3 mostra de facto uma maior homogeneidade para a atenuação corrigida. Toda a informação é de resto disponibilizada no Anexo K.

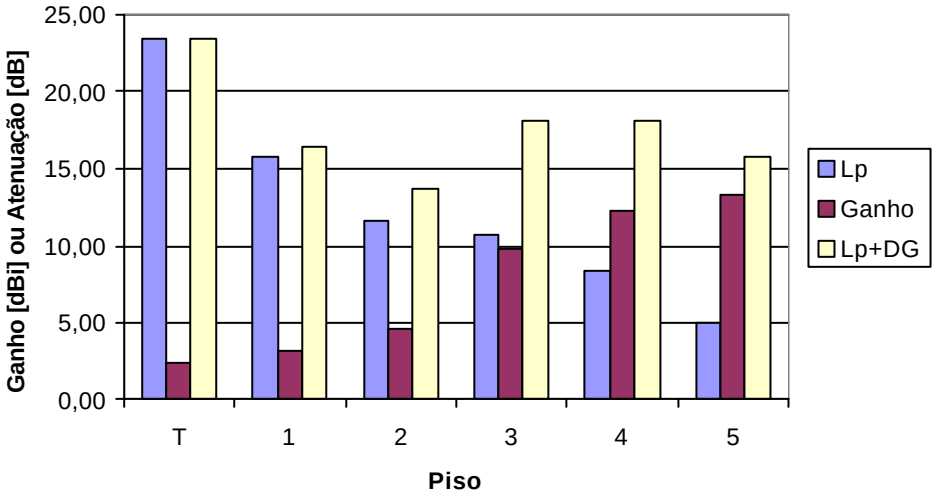


Figura IV.3 – Representação gráfica das atenuações medidas e corrigidas.

IV.2 Categoria Isolado - Baixo

- **Pavilhão Central do Instituto Superior Técnico**

Foram medidas, para este edifício, as estações de base CPeq_B, ARep_A, Tecn_C, Olai_C, Tecn_B e Tecn_A. Para a aferição dos parâmetros estatísticos foram apenas utilizadas medidas de seis antenas: os três sectores da estação do Instituto Superior Técnico, um da estação da Avenida da República e outro da estação de Olaias. Para este edifício foi recolhida uma amostra de 9 749 pontos, cujo histograma se representa na Fig. IV.4, com uma atenuação média de 16,3 dB e um desvio padrão de 11,1 dB. O parâmetro interior/exterior vale 6,5 dB. Em relação à cobertura, os acréscimos são de 16,1 dB para uma cobertura a 50 %, 30,2 dB para uma cobertura a 90 % e 33,6 dB para uma cobertura a 95 %. Comparando os resultados para as duas bandas de GSM, Fig. IV.5, obtém-se uma atenuação mediana superior em aproximadamente 7 dB para a banda de GSM 1800, o que se aproxima da diferença esperada.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

Os resultados do Modelo de Berg ajustam-se com um erro médio reduzido, de cerca de 0,05 dB, o que confere fiabilidade aos parâmetros. O valor de atenuação obtido para as paredes exteriores (grossas) de pedra toma sensivelmente os mesmos valores que paredes supostamente mais permeáveis do ponto de vista electromagnético medidas em outros edifícios. No entanto, a regressão linear, que se ajusta muito satisfatoriamente como foi referido, baseia-se apenas em três pisos, enquanto que a maioria dos edifícios permite a medição de um número maior de pisos. Os mesmos motivos poderão estar na origem da obtenção de um ganho em altura de valor relativamente elevado, uma vez que se trata de um

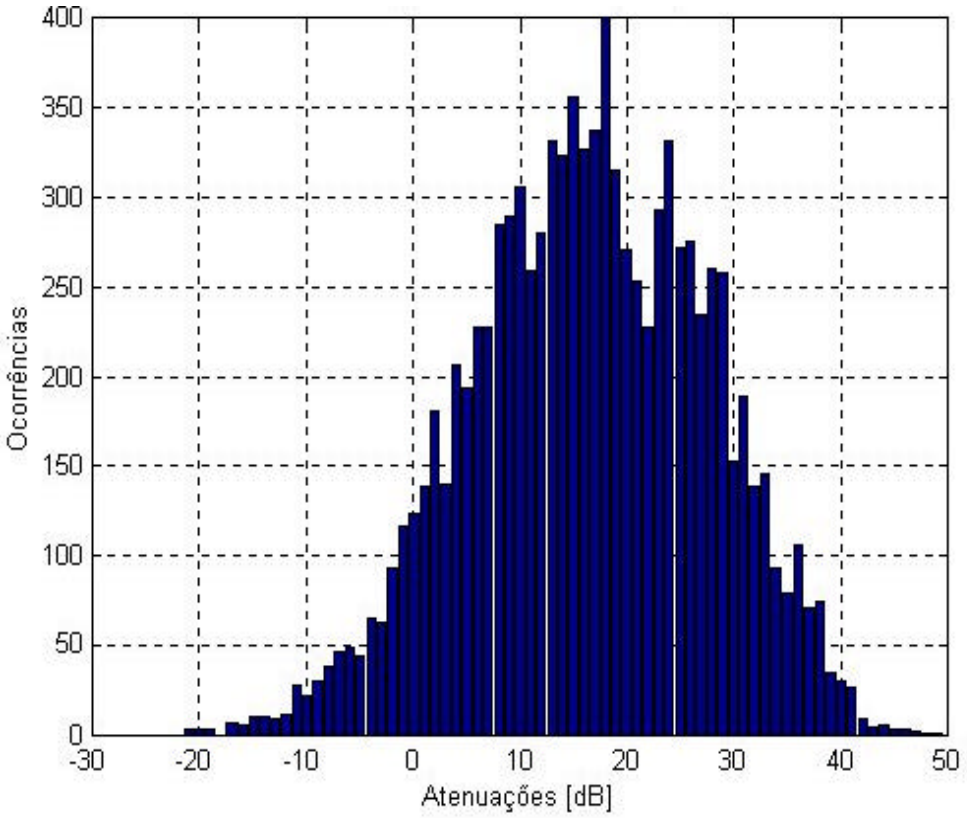


Figura IV.4 – Histograma do número de ocorrências de cada classe.

edifício isolado, logo pouco propenso a esse fenómeno. Possivelmente, um Pavilhão Central com o dobro dos pisos poderia originar resultados diferentes.

Devido à sua proximidade com a antena Tecn_A, que o ilumina em LoS, o Pavilhão Central constitui mais um caso interessante para o estudo da influência do diagrama de radiação na atenuação medida. Assim, uma observação da Secção I.4 (Anexo I) revela que, de facto, a evolução do ganho da antena e da atenuação estão efectivamente relacionados, pois enquanto que o primeiro sobe, a segunda desce. A comparação dos desvios padrão para as atenuações medida (5,5 dB) e corrigida (5,3 dB) mostra que a segunda é ligeiramente inferior à primeira, tal como se esperava. Esperava-se, apesar disso, que a correcção fosse mais efectiva. Deve-se, no entanto, ter em conta que o edifício é extenso, tanto em largura como em comprimento, e que a aferição do ganho foi efectuada segundo apenas uma direcção angular horizontal. Logo, os resultados obtidos devem ser tomados apenas como estimativas, e não como valores de grande precisão, até porque os diagramas de radiação disponíveis para esta antena apenas permitem obter aproximações dos parâmetros do algoritmo de extrapolação dos valores do ganho nas direcções pretendidas. O valor do coeficiente de correlação, calculado em –1, indica um nível de correlação inversa máximo, o que não deverá ter como sinónimo físico a correlação perfeita, pois o parâmetro é aferido apenas a partir de dois pisos.

Toda a informação em detalhe é fornecida no Anexo I.

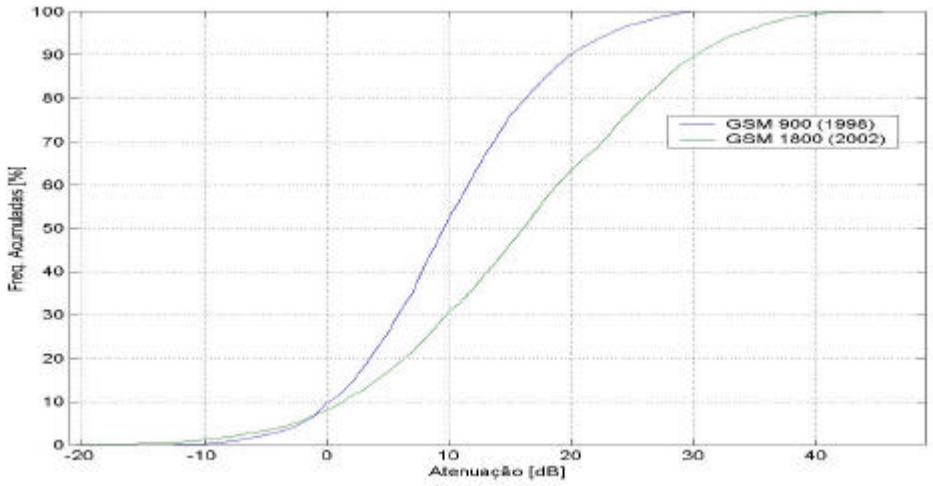


Figura IV.5 – Comparação entre as duas bandas do sistema GSM.

- ## Centro Cultural de Belém

Foram medidas, para este edifício, as estações de base Fil_C, ASAm_B, ASAm_C e ASAm_A. O Centro Cultural de Belém, um edifício com 3 blocos, foi dividido em 2 edifícios distintos, conforme explicado na Secção III.2.

Edifício 1 (Blocos 1 e 2)

Para este edifício foi recolhida uma amostra de 15 232 pontos, com uma atenuação média de 12,8 dB e um desvio padrão de 10,9 dB. O parâmetro interior/exterior vale 7 dB. Em relação à cobertura, os acréscimos são de 11,3 dB para uma cobertura a 50 %, 28 dB para uma cobertura a 90 % e 32,1 dB para uma cobertura a 95 %. Comparando os resultados para as

duas bandas de GSM, obtém-se uma atenuação mediana superior em aproximadamente 4,5 dB para a banda de GSM 1800, o que não se encontra muito distante do valor de aproximadamente 6 dB que era esperado .

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

A estimação de parâmetros do Modelo de Berg por regressão linear ajusta-se com uma precisão razoável, obtendo-se um erro médio de 1,1 dB. O valor de perdas para as paredes exteriores, estimado em cerca de 13,5 dB, verifica-se aceitável. O ganho em altura, estimado em 3,7 dB, toma um valor mais elevado do que na maioria dos restantes casos, o que não deixa de surpreender por se tratar de um edifício isolado, logo, pouco sujeito ao efeito desse fenómeno. Uma análise mais detalhada revela no entanto que o "responsável" pela elevação do valor do GA, pelo seu peso no cálculo da regressão linear, é o piso térreo, Fig. D.6, para o qual apenas existem dados para duas das quatro estações consideradas nos restantes pisos. O valor do GA poderá assim estar um pouco inflaccionado. De resto, informações mais detalhadas são fornecidas no Anexo D.

Edifício 2 (Bloco 3)

Para este edifício foi recolhida uma amostra de 3 424 pontos, com uma média de 27,7 dB e um desvio padrão de 6,9 dB. O parâmetro interior/exterior vale 5,6 dB. Em relação à cobertura, os acréscimos são de 27,8 dB para uma cobertura a 50 %, 34,7 dB para uma cobertura a 90 % e 35,9 dB para uma cobertura a 95 %.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

IV.3 Categoria Integrado - Alto

- **Torre A da Vodafone**

Neste edifício foram medidas as estações de base ELuz_A, Luz_B, Luz_A e Luz_C. Foi recolhida uma amostra de 9 466 pontos, com uma atenuação média de 14,3 dB e um desvio padrão de 13,8 dB. O parâmetro interior/exterior vale 7,9 dB. Em relação à cobertura, os acréscimos são de 13,3 dB para uma cobertura a 50 %, 32,7 dB para uma cobertura a 90 % e 38,2 dB para uma cobertura a 95 %. Comparando os resultados para as duas bandas de GSM, obtém-se uma atenuação mediana superior em aproximadamente 3,6 dB para a banda de GSM 1800, valor que, embora inferior ao que se esperava, acaba por se considerar aceitável.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

No que diz respeito aos parâmetros do Modelo de Berg, destaca-se dos demais o parâmetro W_e, com um valor de 17,8 dB, bastante elevado para caracterizar uma parede exterior de vidro. No entanto, é necessário considerar que os resultados são extraídos de um conjunto de medidas fornecidos apenas por três estações de base, duas das quais, por sinal, situadas em zonas muito próximas. Além disso, o número de amostras válidas recolhidas nos primeiros três pisos do edifício não pode garantir a fiabilidade estatística desejada para assegurar a veracidade dos dados obtidos. O referido conjunto de medidas, por dizer respeito aos primeiros pisos, poderá também ser um dos prinicipais responsáveis pela obtenção de um valor tão elevado de perdas na parede exterior, uma vez que são contabilizados para a regressão linear. O ganho em altura (1,2 dB/piso), por se tratar este de um edifício alto e não muito integrado na estrutura urbana local, é pouco elevado. O erro médio, de 2 dB é, por sua vez, aceitável dado que as medidas se adaptam razoavelmente a uma recta de declive -1,2 dB até ao 10º piso, estabilizando num valor aproximadamente constante a partir do ponto em que

os efeitos do ganho em altura se deixam de fazer sentir. De salientar que, embora seja apresentado um valor para o parâmetro W_i, relativo às paredes internas de betão, tal valor não é reforçado com significância estatística, dado o escasso número de medidas em que se baseia.

Dada a proximidade com a antena Luz_B, que ilumina em LoS o edifício, foi realizado o estudo da influência do diagrama de radiação na atenuação medida apenas para essa antena. Verifica-se que o desvio padrão da atenuação corrigida (6,1 dB) é de facto inferior ao valor da atenuação medida (6,9 dB), o que atesta a validade da correcção. Em relação ao coeficiente de correlação obtido, de –0,77, é possível retirar duas conclusões; o sinal negativo implica que a correlação é inversa, o que de facto é o caso; o módulo, próximo de 1 (correlação máxima) indica que existe de facto um razoável grau de correlação. De resto, a observação da Fig. J.5 mostra que a evolução do ganho da antena em altura acompanha coerentemente a evolução da atenuação, confirmando assim as medidas estatísticas.

De resto, e para a obtenção de informação mais detalhada, deve-se consultar o Anexo J.

- **Edifício Monumental**

Neste edifício foram medidas as estações base Pico_C, Pico_A, Tecn_C, Este_A, PEdu_A e ARep_B. Para este edifício foi recolhida uma amostra de 20 700 pontos, com uma atenuação média de 15,3 dB e um desvio padrão de 14,5 dB. A atenuação é mais intensa nos últimos pisos, e o parâmetro interior/exterior vale 8,1 dB. Em relação à cobertura, os acréscimos são de 16,1 dB para uma cobertura a 50 %, 32,8 dB para uma cobertura a 90 % e 36,9 dB para uma cobertura a 95 %. Comparando os resultados para as duas bandas de GSM, obtém-se uma atenuação mediana igual para as duas bandas. Tal resultado não seria de esperar, contudo há que referir que o conjunto de estações medidas num e noutro caso difere numa estação. Por outro lado, o conjunto de medidas obtido para a banda de 900 é três a quatro vezes superior àquele obtido para a banda de 1 800 MHz. Também não se pode garantir que os locais medidos dentro do edifício tenham sido exactamente os mesmos para os dois casos. Tais diferenças poderão (ou não) justificar o sucedido.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

No que concerne ao Modelo de Berg, verifica-se, para este caso, uma adaptação com um erro médio de aproximadamente 3 dB. O ganho em altura é ligeiramente superior àquele aferido para o Edifício da Vodafone, talvez por o Edifício Monumental estar situado numa zona mais integrada e inclusivamente ser geminado pelas traseiras. Verifica-se aqui um valor de W_e (21,5 dB) mais elevado face aquilo que seria de esperar em relação a paredes de vidro. No entanto, este edifício encontra-se obstruído em parte significativa da sua fachada traseira, sendo que quatro das seis estações de base medidas se encontram orientadas precisamente na direcção dessa fachada. Uma vez que o parâmetro em causa sofre um peso significativo por parte das medidas obtidas nos pisos inferiores, a justificação para um valor tão elevado pode residir em efeitos como o que acaba de ser descrito. Em todo o caso, deve-se ter presente que se trata simplesmente de um parâmetro, obtido apenas por sintonia com valores reais, destinado a ser parte integrante de um modelo do qual se espera que forneça resultados com alguma fiabilidade, e que nem sempre pode ser visto como um valor real de perdas de uma parede.

O Anexo B disponibiliza informação mais detalhada sobre os dados relativos a este edifício.

- ## Edifício Castil (Rua Castilho)

Neste edifício foram medidas as estações de base Camp_B, Rato_B, PEdu_A, MPom_C e Este_C. Para este edifício foi recolhida uma amostra de 18 456 pontos, com uma atenuação média de 9,8 dB e um desvio padrão de 11,6 dB. O parâmetro interior/exterior vale 6,6 dB. Em relação à cobertura, os acréscimos a considerar são de 9,8 dB para uma cobertura a 50 %, 23,7 dB para uma cobertura a 90 % e 27 dB para uma cobertura a 95 %. Comparando os resultados obtidos para as duas bandas de GSM, obtém-se uma atenuação mediana superior em aproximadamente 6 dB para a banda de GSM 900. Tal resultado não era expectável, mas talvez possa ser justificado pelo facto de os conjuntos de estações que estão na origem dos resultados obtidos para as duas bandas se localizarem em posições geograficamente muito distintas.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

Quanto a parâmetros do Modelo de Berg, destaca-se o valor obtido para a atenuação das paredes exteriores, estimada por regressão linear em 27,4 dB, com um erro médio de 2,4 dB. Trata-se de um valor elevado, mas explicável. Em primeiro lugar, chama-se a atenção para o número (pouco significativo e carente de relevância estatística) de amostras obtidas para os pisos mais baixos. Em segundo, importa tecer algumas considerações arquitectónicas sobre os quatro pisos mais baixos. Estes constituem um cento comercial, "fechado" para o exterior por todas as fachadas excepto pela frontal, através dos vidros das montras das lojas. De facto, fica a ideia, depois de observada a Fig. C.6, que, sensivelmente até ao piso 5, os valores de atenuação são bastante mais elevados, situando-se em torno do valor 22 dB. Toda esta "massa" de valores tem, consequentemente, peso na estimação da recta que determina o valor da atenuação das paredes exteriores.

O Modelo de W-I Estendido estima a atenuação em –3,5 dB, através dos parâmetros fornecidos pelo Modelo de Berg. A atenuação, para o último piso, estimada por regressão linear é de 1,7 dB. Obtém-se aqui uma aproximação razoável através deste modelo, que poderia eventualmente ser melhor se as antenas dos sectores Rato_B e PEdu_A estivessem orientadas na direcção do edifício ou pelo menos com orientação próxima da mesma.

Informação mais detalhada sobre os resultados para este edifício é disponibilizada no Anexo C.

- ## Edifício da Avenida da República

Neste edifício foram medidas as estações de base CPeq_B, Sald_B, SSeb_A, Sald_C e SSeb_B. Para a aferição dos parâmetros estatísticos, Tab. IV.1, foram apenas utilizados medidas de quatro antenas: duas da estação base do Saldanha, uma do Campo Pequeno e uma de S. Sebastião. Foi recolhida uma amostra de 8 352 pontos, com uma média de 15 dB e um desvio padrão de 10 dB. O parâmetro interior/exterior vale 4,9 dB. Em relação à cobertura, os acréscimos são de 14,4 dB para uma cobertura a 50 %, 27,3 dB para uma cobertura a 90 % e 30,7 dB para uma cobertura a 95 %. Comparando os resultados para as duas bandas de GSM, obtém-se uma atenuação mediana superior em aproximadamente 5 dB para a banda de GSM 1800, o que se aproxima razoavelmente da situação que se esperava.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

Quanto à estimação de parâmetros para o Modelo de Berg, consegue-se um bom ajustamento por regressão linear aos resultados obtidos, consolidado por um erro médio de 0,3 dB. Já em relação ao resultado obtido para o Modelo de W-I Estendido, este afasta-se um pouco do que seria de esperar: a atenuação estimada é de cerca de –5,6 dB, o que se afasta relativamente da atenuação estimada por regressão linear de 5,0 dB. Convém no entanto

realçar que nenhuma das antenas contabilizadas ilumina directamente o edifício (algumas delas estão apontadas em direcção oposta) sendo a antena SSeb_A a que radia numa direcção mais próxima (a cerca de 50º da direcção de máximo), como tal, a radiação chega ao edifício essencialmente através de reflexões. Uma vez que o ângulo de incidência do Modelo de W-I afecta um parâmetro que pode determinar diferenças substanciais, e que este ângulo é aferido apenas a partir da localização da estação de base independentemente da orientação do sector, a diferença obtida pode ser assim explicada. Para obter informação mais detalhada sobre este edifício, deve-se consultar o Anexo E.

Tabela IV.1 – Parâmetros estatísticos (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]
Térreo	39,24	9,30	24,51	7,10	24,24	23,24	213	N/A
1º	39,24	15,30	28,98	7,05	30,12	35,12	118	4,47
2º	36,24	4,30	20,35	6,60	20,12	21,24	147	-8,63
3º	39,24	3,30	20,36	7,23	19,71	17,12	1619	0,01
4º	39,24	-3,29	18,95	7,68	19,12	14,30	1415	-1,41
5º	39,24	-2,70	16,87	8,66	16,30	7,30	886	-2,08
6º	39,24	-5,29	14,70	8,81	14,12	14,12	827	-2,17
7º	37,24	-8,29	10,47	8,20	10,12	5,30	695	-4,23
8º	36,24	-13,29	11,17	8,83	11,12	14,12	1150	0,70
9º	29,24	-14,29	6,67	7,66	6,30	6,71	980	-4,50
10º	23,24	-18,70	-0,15	8,32	-0,49	0,71	302	-6,52
Total	39,24	-18,70	14,98	9,92	15,12	14,12	8352	-2,44

IV.4 Integrado - Baixo

- ## Campo Mártires da Pátria

Para este edifício foram medidas as estações de base Tecn_C e ALib_B. Foi recolhida uma amostra de 1 797 pontos, com uma média de 8,1 dB e um desvio padrão de 7,2 dB. O parâmetro interior/exterior vale 1,2 dB. Em relação à cobertura, os acréscimos são de 7,7 dB para uma cobertura a 50 %, 17,2 dB para uma cobertura a 90 % e 19 dB para uma cobertura a 95 %. Comparando os resultados para as duas bandas de GSM, obtém-se uma atenuação mediana superior em aproximadamente 4,5 dB para a banda de GSM 900. Tal resultado não era expectável, mas talvez possa ser justificado pelo facto de se possuir uma amostra tão pequena.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

O Modelo de Berg ajusta-se aos dados com um erro médio de 2,5 dB, ligeiramente superior àquele obtido para a maioria dos edifícios. No entanto, registe-se que a aferição dos parâmetros é baseada apenas nas medidas de duas estações de base. Em relação ao resultado do Modelo de W-I Estendido, obtém-se uma atenuação de –3,3 dB, quando a atenuação por regressão linear é estimada em cerca de 5 dB. No entanto, das escassas (duas) antenas consideradas, nenhuma delas ilumina directamente o edifício, pelo que o resultado não é o melhor. De resto, toda a informação consta do Anexo F.

- **Edifício da Avenida Almirante Reis**

Para este edifício foram medidas as estações de base Anjo_B, Técn_B, CPeq_B, e Tecn_A. Para a aferição dos parâmetros estatísticos foram apenas utilizados valores de potência exteriores de duas antenas. A atenuação é praticamente constante ao longo dos três andares. A explicação para tal fenómeno talvez possa residir no facto de o edifício ser tão baixo. Para este edifício foi recolhida uma amostra de 2 611 pontos, com uma atenuação média de 16,1 dB e um desvio padrão de 6,4 dB. O parâmetro interior/exterior vale 4,5 dB. Em relação à cobertura, os acréscimos são de 15,3 dB para uma cobertura a 50 %, 24,6 dB para uma cobertura a 90 % e 25,9 dB para uma cobertura a 95 %. Comparando os resultados para as duas bandas de GSM, obtém-se uma atenuação mediana superior em aproximadamente 10 dB para a banda de GSM 1800. Tal resultado aceita-se, ainda que supere em 4 dB a margem esperada.

Verificou-se que, no Modelo da Dupla Normal, não é possível respeitar o Teste do $\div^2$.

Em relação aos parâmetros do Modelo de Berg, obtiveram-se 15,76 dB para a atenuação da parede exterior, um valor razoável uma vez que se trata de uma parede de betão e um ganho em altura de 1 dB, a um erro de 0,1 dB, valor bastante razoável e que atribui credibilidade aos parâmetros. Já o valor de 3 dB obtido para a parede interior, não parece tão razoável, em comparação com outros de materiais mais permeáveis electromagnéticamente. Chama-se no entanto a atenção para o reduzido número de medidas segundo o qual este foi aferido, pelo que poderá não ser muito credível. O modelo de W-I Estendido, sintonizado com o parâmetro W_e do Modelo de Berg, estima a atenuação em -9,2 dB, valor esse que se afasta do valor de atenuação para o último andar (6º) do edifício, 12,8 dB (extrapolado por regressão linear, uma vez que não foi medido). A diferença é significativa, mas deve-se observar que as antenas consideradas não iluminam directamente o edifício, à excepção da antena CPeq_B, logo o ângulo de incidência com o eixo da rua, determinado simplesmente pelo traçado de uma semi-recta unindo a estação à localização da antena e não considerando orientação de sectores, pode influenciar significativamente o resultado. De resto, toda a informação detalhada sobre os resultados deste edifício pode ser consultada no Anexo A.

IV.5 Resultados Globais

A Fig. IV.6 ilustra as funções acumuladas de probabilidade de cobertura para cada classe de edifícios (Isolado Alto, Isolado Baixo, Integrado Alto e Integrado Baixo). Pode-se constatar que a categoria "Isolado Alto" possui valores de atenuação muito inferiores às restantes. Tal diferença seria, à partida, expectável, visto que os edifícios desta categoria não têm qualquer obstáculo à sua volta (o que não acontece com as restantes categorias), estando normalmente em linha de vista com a grande maioria das estações base medidas.

Na Tab. IV.2 encontram-se os valores de probabilidade de cobertura (50 %, 90 % e 95%) para as diferentes categorias de edifícios medidos. Verifica-se que existe uma diferença média de 10 a 15 dB entre a categoria "Isolado Alto" e as restantes. Nota-se também uma grande semelhança entre as categorias "Isolado Baixo" e "Integrado Alto". Tal semelhança pode ficar a dever-se ao facto de que tanto os edifícios "Integrados" (Alto e Baixo), como os edifícios da categoria "Isolado Baixo" estarem sujeitos ao mesmo tipo de "efeito sombra" introduzido pelos edifícios circundantes. Quanto à categoria "Integrado Baixo", esta possui, nos casos de cobertura a 90 % e a 95 %, valores ligeiramente diferentes das categorias "Isolado Baixo" e "Integrado Alto", possivelmente devido ao facto de a sua amostra ser de dimensão substancialmente inferior à das restantes categorias, não se devendo atribuir grande relevância estatística a esta amostra.

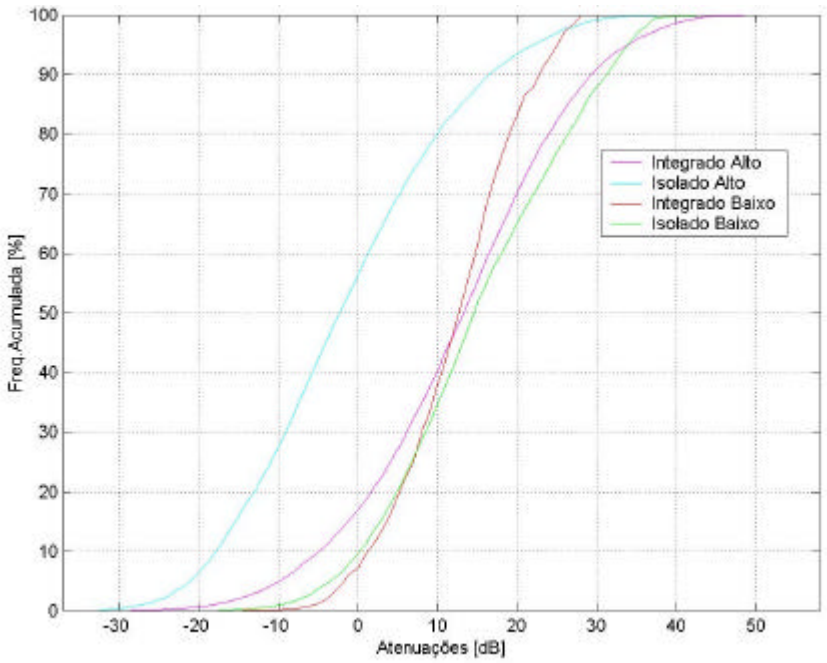


Figura IV.6 – Funções Acumuladas de Probabilidade das várias categorias.

A Tab. IV.3 mostra os parâmetros estimados, por edifício, para o Modelo da Dupla Normal. As colunas Média e Desvio Padrão (Esq. e Direita) referem-se a valores de atenuação. As colunas Estatística de Teste dizem respeito aos valores assumidos pela estatística de teste do Teste do $\div^2$, sendo os valores das colunas de Máx. Esquerda e Máx. Direita extraídos da tabela estatística da Distribuição de $\div^2$. Em relação à média, obtiveram-se como valor máximo 32,02 dB para o Edifício 2 do Centro Cultural de Belém, que é um edifício de pedra quase sem janelas, e como valor mínimo –15,99 dB para a Torre Norte do IST, que é um edifício com paredes de vidro. Em relação ao desvio padrão, obteve-se um máximo de 22,06 dB para a Torre Norte do IST, o que representa uma dispersão de atenuações muito grande, o que não é mais do que o reflexo da diversidade de ambientes que se encontram ao longo dos onze pisos da Torre, e um valor mínimo de 3,18 dB para o Edifício 2 do Centro Cultural de Belém, o que representa uma grande concentração de pontos em torno da média, explicada pelo facto de o edifício quase não possuir janelas, originando assim uma grande quantidade de elevadas atenuações da mesma ordem. A Tab. IV.4 mostra os parâmetros do Modelo da Dupla Normal obtidos para cada categoria de edifícios. Verifica-se, sem surpresa, que os valores mais elevados de desvio padrão ocorrem para as classes do tipo "Alto", uma vez que edifícios altos proporcionam maior diversidade de ambientes, o que se traduz numa maior diversidade de valores de atenuação. Em relação ao histograma global, representado na Fig.IV.7, é visível a sua semelhança com a função Normal, o que não é de estranhar atendendo ao Teorema do Limite Central. É intuitivo pensar que o histograma se tornaria tão mais semelhante à função Normal quantas mais medidas fossem efectuadas. A comprová-lo têm-se a escassa diferença entre os parâmetros de desvio padrão obtidos para o Modelo da Dupla Normal, respectivamente de 13,85 e 13,84 para a esquerda e para a direita. A Tab. IV.5 mostra o erro quadrático médio (EQM) e a sua raiz quadrada, calculado entre o histograma de atenuações com classes de dimensão 5 e a função Normal de parâmetros optimizados, para as funções da esquerda e da direita, em termos de Modelo da Dupla Normal. São avaliados os erros para cada um dos edifícios individualmente e também para as quatro categorias. Verifica-se que os erros são reduzidos, o que se deve também ao facto de os histogramas serem normalizados.

Tabela IV.2 – Probabilidades de cobertura para cada categoria.

Categoria	Probabilidade de cobertura [dB]			Dimensão Amostra
	50%	90%	95%	
Isolado Alto	-1,70	16,51	22,06	29 043
Isolado Baixo	15,37	31,25	33,89	28 405
Integrado Alto	13,71	29,33	33,85	56 974
Integrado Baixo	13,39	22,74	25,09	4 408

Tabela IV.3 – Parâmetros do Modelo da Dupla Normal por edifício.

Categoria	***Edifício***	***Modelo Dupla Normal***						
		Média [dB]	Desvio Padrão Esq. [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Estatística de Teste			
					Esquerda [dB]	Direita [dB]	Máx. Esq. [dB]	Máx Dir. [dB]
Isolado Alto	Torre Norte IST	-15,99	5,75	22,06	16,77	1175,12	30,14	14,07
	Ed. J. Martins	-6,01	10,07	9,07	33,66	19,04	19,68	19,68
	C. Interdisciplinar	4,01	9,27	11,05	18,32	35,70	25,00	19,68
Isolado Baixo	Pav. Central	17,99	12,13	10,39	11,45	82,69	19,68	25,00
	C.C.Belém (E1)	15,01	11,22	11,91	136,19	673,23	14,07	22,36
	C.C.Belém (E2)	32,02	9,72	3,18	15,28	26,60	3,84	19,68
Integrado Alto	Torre Vodafone	16,00	14,09	14,14	139,64	80,46	25,00	27,59
	Ed. Monumental	19,00	17,80	11,74	521,64	263,18	16,92	27,59
	Ed. Castil	9,00	12,19	11,45	143,54	374,83	16,92	25,00
	Av. República	14,00	9,64	10,35	42,27	45,40	16,92	19,68
Integrado Baixo	C.M.Pátria	12,01	9,37	5,21	91,30	1,43	7,81	37,65
	Av. Almirante Reis	16,02	6,70	6,97	36,70	178,36	7,81	14,07

Tabela IV.4 – Parâmetros do Modelo da Dupla Normal por categoria.

Categoria	***Modelo Dupla Normal***						
	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Estatística de Teste			
				Esquerda [dB]	Direita [dB]	Máx. Esquerda [dB]	Máx Direita [dB]
Isolado Alto	2,59	16,59	9,74	1087,31	39,26	19,68	25,00
Isolado Baixo	15,79	10,97	12,95	81,18	1659,46	19,68	22,36
Integrado Alto	13,27	13,92	12,37	92,35	170,74	25,00	27,59
Integrado Baixo	12,83	9,81	6,28	37,20	133,45	7,81	19,68
Total	10,19	13,85	13,84	487,21	840,39	25,00	25,00

Os parâmetros do Modelo de Berg, por edifício e por categoria, estão representados na Tab. IV.6, onde também se representam os parâmetros do Modelo de W-I Estendido, e IV.7. Verificam-se, para o parâmetro W_e, valores inferiores para as categorias "Isolado", o que não é de estranhar, dado que os edifícios pertencentes a esta classe estão menos condicionados pelas perdas ocorridas nas paredes dos edifícios circundantes. Em relação ao parâmetro ganho em altura, deve-se destacar o resultado obtido para a classe "Isolado Baixo". Para esta classe,

Tabela IV.5 – Erro Quadrático Médio por categoria e edifício.

Categoria	Edifício	EQM Esquerda	EQM Direita	Raiz EQM Esquerda [%]	Raiz EQM Direita [%]
Isolado Alto		6,14e-5	1,18e-5	0,78	0,34
	Torre Norte IST	9,01e-5	2,86e-4	0,95	1,69
	Ed. J. Martins	4,97e-5	5,30e-5	0,70	0,73
	C. Interdisciplinar	1,48e-5	2,69e-5	0,38	0,52
Isolado Baixo		2,05e-5	3,18e-4	0,45	1,78
	Pav. Central	1,31e-5	6,74e-5	0,36	0,82
	C. C. Belém (E1)	4,57e-5	6,19e-4	0,68	2,49
	C. C. Belém (E2)	3,53e-5	4,26e-4	0,59	2,06
Integrado Alto		5,54e-6	4,39e-6	0,24	0,21
	Torre Vodafone	8,24e-5	2,45e-5	0,91	0,49
	Ed. Monumental	8,03e-5	7,85e-5	0,90	0,89
	Ed. Castil	7,02e-5	1,34e-4	0,84	1,16
	Av. República	5,86e-5	1,02e-5	0,77	0,32
Integrado Baixo		2,84e-5	8,58e-4	0,50	2,93
	C. M. Pátria	7,52e-5	1,45e-4	0,87	1,20
	Av. Almirante Reis	2,69e-4	1,51e-3	1,64	3,89
Total		2,05e-5	1,32e-5	0,45	0,36

Tabela IV.6 – Parâmetros dos Modelos de Berg e Walfisch – Ikegami Estendido por edifício.

Categoria	***Edifício***	***Modelo Berg***				***Modelo W - I Estendido***			
		We [dB]	Wi [dB]	Gh [dB]	Erro Médio [dB]	ws [m]	Hb [m]	Ltm [dB]	Erro Médio [dB]
Isolado Alto	Torre Norte IST	-5,00	4,40	1,60	6,00				
	Ed. J. Martins	10,90		2,40	1,90				
	C. Interdisciplinar	3,40	3,70	2,50	0,40	15,00	20,00	25,82	18,32
Isolado Baixo	Pav. Central IST	13,38		5,31	0,05				
	C.C.Belém (E1)	13,54		3,69	1,08				
	C.C.Belém (E2)								
Integrado Alto	Torre Vodafone	17,80	11,90	1,20	2,00				
	Ed. Monumental	21,50	7,50	2,10	2,90				
	Ed. Castil	27,40	5,70	2,30	2,40	20,00	30,00	30,91	5,21
	Av.República	21,70	6,00	1,90	0,30	30,00	30,00	27,47	10,57
Integrado Baixo	C.M.Pátria	16,10		2,80	2,50	25,00	12,00	19,35	8,04
	Av.Almirante Reis	14,00	3,00	1,00	0,10	20,00	18,00	24,96	19,00

este parâmetro é bastante superior, e a explicação reside no método utilizado para a determinação do mesmo. Com efeito, a regressão linear regista uma tendência a fornecer

valores mais elevados para o declive da recta para edifícios com menos pisos. Para o Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido, os resultados obtidos não foram satisfatórios, como o comprova o erro médio, Tab. IV.6. No entanto, seria de esperar que os piores erros ocorressem para edifícios da categoria "Isolado", por estes se adaptarem pior às condições de aplicação do modelo, o que realmente acontece, se exceptuarmos o caso do edifício "Integrado" da Av. Almirante Reis. Contudo, foi já referida uma explicação plausível para a ocorrência de um erro tão elevado para este caso, que se desenquadra da gama de erros obtidos para as categorias "Isolado".

Tabela IV.7 – Parâmetros dos Modelos de Berg e Walfisch – Ikegami Estendido por classe.

Categoria	We [dB]	Gh [dB]	Erro Médio [dB]
Isolado Alto	3,10	2,17	2,77
Isolado Baixo	13,46	4,50	0,57
Integrado Alto	22,10	1,88	1,90
Integrado Baixo	15,05	1,90	1,30
Total	14,07	2,44	1,79

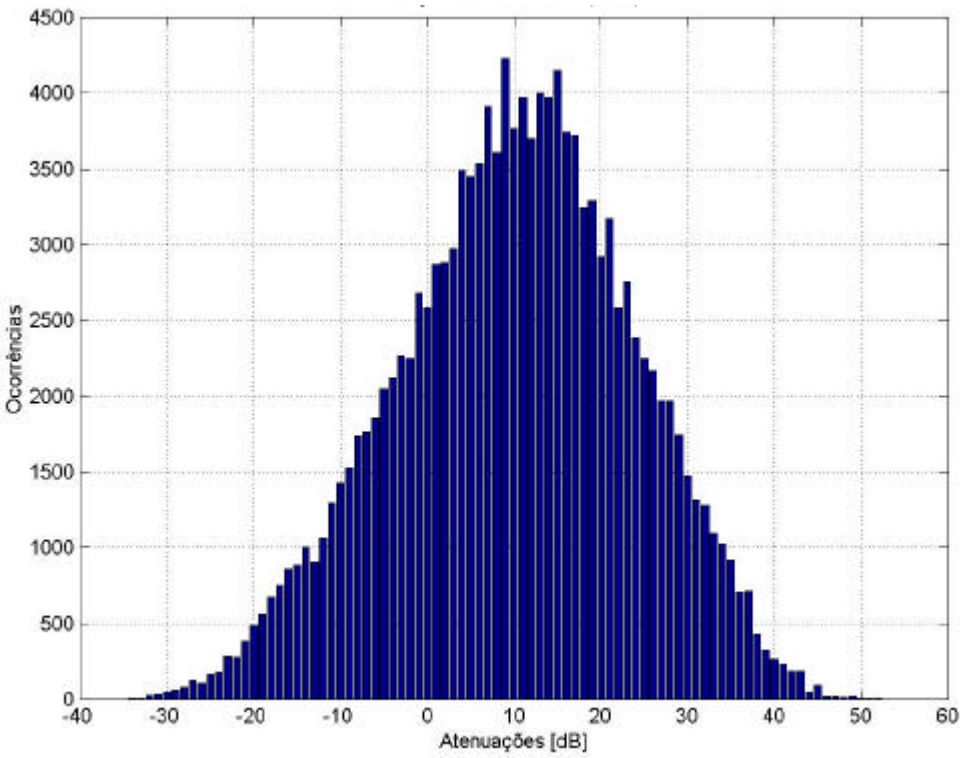


Figura IV.7 – Histograma global.

Embora todos os resultados referidos tenham sido obtidos para a banda dos 1 800 MHz do GSM, devido à proximidade espectral das bandas de frequência, estes podem ser extrapolados para UMTS recorrendo à lei de variação da atenuação com a frequência, 20.log(frequência). Assim, sendo as medidas efectuadas na ligação em sentido descendente do GSM 1800 (banda [1 805; 1 880] MHz), os resultados são extrapolados para o modo FDD do

UMTS (banda [1 920; 1 980] MHz) através de um acréscimo na atenuação compreendido no intervalo [1,0; 1,6] dB, e para o modo TDD (bandas [1 900; 1 920] MHz e [2 010; 2 025] MHz) através de um acréscimo na atenuação compreendido no intervalo [0,1; 1,0] dB. Espera-se, por isso, que valores em GSM 1800, em particular os que são obtidos neste trabalho, possam assim ser extrapolados para UMTS com garantias de fiabilidade nas estimativas.

V. Conclusões

O problema em estudo consiste na modelação da atenuação no interior de edifícios, referida a um nível padrão aferido no exterior, ao nível da rua. Foi obtida uma perspectiva real dos valores envolvidos através de medidas na rede do operador Vodafone, em GSM 1800, efectuadas em onze edifícios da cidade de Lisboa. Os edifícios foram também agrupados em classes, segundo as suas alturas e graus de integração no tecido urbano, com vista à obtenção de parâmetros caracterizadores de classes de edifícios com determinadas características em comum. As classes consideradas foram as seguintes: Isolado Alto, Isolado Baixo, Integrado Alto e Integrado Alto.

Verificou-se que, para cada edifício, a atenuação segue normalmente uma distribuição possível de ser modelada, a menos de um determinado erro, por duas semi-funções de densidade de probabilidade Normal, de desvios padrão distintos à esquerda e à direita da moda. Foi então criado um novo modelo para descrever esses resultados, que foi baptizado como Modelo da Dupla Normal. Este consiste basicamente na caracterização de determinado edifício em termos funções de probabilidade de ocorrência de determinado valor ou classe de valores de atenuação, que segundo o modelo, são do tipo Normal, sendo fornecidos os seus parâmetros (média e desvios padrão). Para extrair e optimizar os parâmetros a partir das medidas foi criada uma ferramenta informática em ambiente Matlab, usando como critério de convergência o cumprimento do Teste do $\div^2$, ou, na impossibilidade, a melhor aproximação. Uma vez que o Teste do $\div^2$ se revelou um teste muito exigente face aos dados experimentais, não se verificou o seu cumprimento para nenhum dos edifícios, embora se tenham conseguido obter boas aproximações nos casos do edifício Jerónimo Martins, do Edifício 2 do Centro Cultural de Belém e do Complexo Interdisciplinar, onde a estatística de teste excede o seu valor máximo em cerca de 10 dB, Tab. IV.3. Para a categoria Isolado Alto foi obtida uma atenuação média de 2,59 dB, com desvios padrão 10,32 e 15,88, respectivamente à esquerda e à direita; para a categoria Isolado Baixo foi obtida uma atenuação média de 15,79 dB, com desvios padrão 10,97 e 12,95; para a categoria Integrado Alto foi obtida uma atenuação média de 13,27 dB, com desvios padrão 13,92 e 12,37; para a categoria Integrado Baixo foi obtida uma atenuação média de 12,83 dB, com desvios padrão 9,81 e 6,78 dB. Verifica-se que os valores de desvio padrão obtidos para as categorias do tipo "Alto" são superiores às das categorias do tipo "Baixo" o que não é de estranhar, dado que a extensão em altura de um edifício favorece naturalmente a dispersão de resultados. Em relação aos valores médios de atenuação, a categoria "Isolado Alto" destaca-se claramente das demais. De facto, o sinal que penetra edifícios do tipo "Isolado" é menos atenuado do que aquele que penetra edifícios "Integrados". O valor (elevado) de 15,79 dB obtido para a outra classe de "Isolado" constitui excepção à regra, existindo para isso uma boa justificação: a classe é constituída por dois edifícios de paredes grossas de pedra (Pavilhão Central e Centro Cultural de Belém). Foi também obtida a curva global de densidade de probabilidade de atenuação, relativa à totalidade das medidas efectuadas em todos os edifícios, tendo-se verificado que esta última assume a forma de uma função Normal, de encontro ao postulado do Teorema do Limite Central, com um valor médio de 10,2 dB e um desvio padrão de cerca de 13,85 dB.

Em relação a valores de probabilidade de cobertura, obtiveram-se, para 50 %, os valores de –1,7, 15,4, 13,7 e 13,4 dB, respectivamente, para as classes Isolado, Alto e Baixo, e Integrado, Alto e Baixo. Uma vez que implica uma redução de potência para a obtenção de uma cobertura a 50 %, o valor de –1,7 merece especial atenção. Verifica-se, contudo, que este é fortemente influenciado por dois edifícios muito altos (Torre Norte e Jerónimo Martins). Para coberturas a 90 % e 95 % o valor menos elevado é de novo o da categoria Isolado Alto,

com valores de 16,51 e 22,06 dB, tendo-se para a classe Isolado baixo 31,25 e 33,89 dB, para a classe Integrado Alto 29,33 e 33,85 dB e para a classe Integrado Baixo 22,74 e 25,09 dB. Os valores mais elevados registam-se para os edifícios da classe Isolado Baixo, o que é normal face à constituição física dos mesmos.

Para o Modelo de Berg, os valores médios obtidos para o parâmetro W_e, foram de 3,10 e 13,46 dB, para as categorias Isolado, Alto e Baixo, e de 22,10 e 15,05 dB, para as categorias Integrado Alto e Baixo. Os valores menos elevados foram obtidos para as classes "Isolado", novamente com destaque para o valor da classe Isolado Alto. Foram também obtidos, para o mesmo modelo, parâmetros de atenuação para paredes interiores, tendo-se obtido desde 3,7 dB para paredes de tijolo de 5 cm até 12 dB para paredes de betão de cerca de 20 cm. Quanto ao ganho em altura, obtiveram-se, para a mesma ordem nas classes, os valores de 2.17, 4.50, 1.88 e 1.9 dB/piso. O valor de 4.50 dB/piso obtido para a classe Isolado Baixo destaca-se dos restantes sem razão aparente, excepto se se atentar que os edifícios que constituem esta classe possuem dois e três pisos, facto que pode conduzir facilmente a ganhos mais elevados uma vez que cada um dos (escassos) pisos detém grande influência no valor do parâmetro.

Foi também testada a eficácia de uma extensão do (bem conhecido) Modelo de Walfisch-Ikegami, que o pode dotar de capacidade para efectuar estimativas de atenuação de penetração em edifícios. Em geral, a aplicação do Modelo resultou em erros elevados: em cinco casos estudados, obtiveram-se erros de 18,32 dB (Complexo Interdisciplinar do IST), 5,21 dB (Edifício Castil), 10,57 dB (Edifício da Av. República), 8,04 dB (Edifício de C.M. Pátria) e 19,00 dB (Edifício da Av. Alm. Reis). Há que referir, no entanto, que o modelo não é apropriado para se aplicar exactamente nas condições em que o foi, uma vez que alguns sectores considerados se orientam em direcções opostas às dos edifícios em questão

Outro dos objectivos principais deste trabalho prendia-se com a confirmação da diferença esperada de cerca de 6 dB, através da lei de variação da atenuação com a frequência de 20.log(frequência), entre resultados obtidos nos mesmos edifícios para as duas bandas do GSM. Obteve-se, para a maioria dos casos, uma diferença entre 4 e 7 dB, o que se considerou aceitável. Contudo, registou-se em quatro casos algo que não correspondia às expectativas, ou seja, a atenuação para a banda de 900 MHz revelou-se igual ou superior à atenuação da banda de 1 800 MHz, facto justificável por razões de diferenças entre a localização geográfica das estações consideradas para as duas bandas, de diferenças acentuadas entre a dimensão das amostras para as mesmas bandas ou ainda pela eventualidade de as medidas dentro dos edifícios terem sido efectuadas (por diferentes pessoas) em locais distintos. Ainda assim, a verificação da referida lei para uma distância espectral de cerca de 900 MHz poderá assegurar fiabilidade à extrapolação, pela mesma lei, dos resultados obtidos em GSM 1800 para UMTS, separados por uma distância espectral de cerca de 200 MHz.

Pretendia-se também verificar a correlação inversa entre a atenuação em diversos pisos de um edifício e o ganho na direcção de cada um deles, bem como a diminuição da dispersão da atenuação depois de afectada por um factor de correcção de ganho direccional. A correlação inversa foi medida pelo coeficiente de correlação, tendo-se obtido para este, nos quatro casos analisados, valores absolutos superiores a 0,7, enquanto que o desvio padrão das atenuações corrigidas se revelou inferior, em média cerca de 1 dB, à mesma medida para as atenuações medidas.

Importa também descrever alguns factores que limitaram de algum modo este estudo. Os mais importantes serão porventura as limitações de acessibilidade aos locais a medir e as limitações de *software*/rede. O primeiro diz respeito à relutância (plenamente legítima) demonstrada por certas pessoas em determinadas salas ou gabinetes nos edifícios, face à solicitação por parte da equipa de medições (formada pelos autores do trabalho) em "invadir" os seus espaços privados com um equipamento de medida pouco familiar, tendo isso implicado, em alguns casos, a impossibilidade de medir todo um piso. Já o segundo, de

natureza bem distinta, relaciona-se com o *software*. Devido à limitação decorrente do limiar de sensibilidade, não foi possível obter amostras em número considerado suficiente em caves e elevadores. De resto, e apenas para fornecer uma ideia da dimensão destas limitações, não foi possível descodificar aproximadamente 50 % das medidas efectuadas em toda a campanha. É ainda de referir uma outra limitação óbvia: os dados obtidos apenas podem representar o tipo de edifícios onde os mesmos foram medidos, e poderiam representar tantos mais tipos de edifícios quantos mais fossem medidos; é, no entanto, na perspectiva de um Trabalho Final de Curso, manifestamente impossível efectuar um maior número de medições. Outras limitações a registar dizem respeito ao estudo da correlação entre o ganho das antenas e a atenuação. De facto, a extrapolação rigorosa dos valores de ganho a 3D ficou condicionada pela (escassa) precisão permitida pelos diagramas disponíveis. Já em relação às alturas dos pisos e dos edifícios, uma vez que não se encontravam disponíveis, foram utilizadas estimativas pois seria um pouco difícil (e desnecessário) apurar essas medidas no terreno.

Apenas como curiosidade, registe-se um facto curioso, mas pouco surpreendente, ocorrido durante as medições. Verificou-se, em alguns casos, uma imensa diversidade de canais possíveis de captar nos pisos mais altos de cada edifício, em especial nos edifícios mais altos (e.g. Torre Norte do Instituto Superior Técnico), alguns dos quais originados por estações situadas a quilómetros de distância. Conforme se referiu, tal facto não é surpreendente se considerarmos que os últimos piso de certos edifícios se encontram virtualmente em linha de vista com um grande número de estações de base.

Apontam-se aqui algumas direcções interessantes de trabalho futuro sobre o tema em estudo. Com efeito, os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal, conjugados com as actuais e completas bases de dados existentes hoje em dia para caracterizar urbanísticamente as cidades, poderão ser aproveitados na construção de uma ferramenta informática de planeamento de cobertura de interiores. Aproveitamento semelhante poderá ser feito em relação ao Modelo de Berg. Outra sugestão de interesse para a resolução do problema de cobertura poderá ser o estudo de cobertura de interiores com tecnologia *Wireless LAN*, que constitui uma perspectiva distinta daquela que é adoptada neste trabalho, uma vez que o emissor se encontra agora instalado no interior do edifício. De resto, a pesquisa literária que serviu de base à realização do trabalho revelou um grande número de modelos de propagação determinísticos e semi-determinísticos, destinados a aplicações muito particulares. Contudo, revelou igualmente uma grande escassez de modelos e resultados empíricos, muito úteis na maioria dos casos de engenharia de planeamento, onde a grande precisão não é condição essencial. Este é, pois, um tipo de modelos que interessa desenvolver.

A.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes ao edifício situado na Avenida Almirante Reis. Esse edifício foi considerado como pertencendo à categoria "Integrado Baixo".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura A.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela A.1. Nessa tabela, a coluna "Estação", indica a localização geográfica das estações de base medidas. As colunas "Sector" e "Orientação" dizem respeito precisamente à orientação angular do sector em relação ao Norte geográfico. Na coluna "Nome" figuram os nomes que foram atribuídos às estações para as designar. A coluna "Pot. Média" indica a potência média medida no exterior para cada estação e a coluna "Dimensão Amostra" refere-se ao número de pontos utilizados para calcular a potência exterior. A coluna "Distância" diz respeito à distância entre a estação base e o edifício medido, enquanto que a coluna "Ângulo" contém o ângulo medido entre o Norte geográfico e a recta que une a estação de base ao edifício.

Os resultados das medidas para atenuação levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela A.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela A.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por piso.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe na Figura A.2. Por sua vez, na Tabela A.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos, valores esses que podem ser extraídos da Figura A.2.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio (em percentagem) encontram-se na Tabela A.5. Para se ter uma boa noção dos erros do teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras A.4 e A.5, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura A.3, pode-se ainda encontrar uma função densidade de probabilidade da atenuação.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg pode ser visto na Tabelas A.6 e A.7. Na Tabela A.6 estão representados os valores de atenuação no exterior (linha "At.Ext.") e no interior (linha "At.Int.") por estação de base, encontrando-se na Tabela A.7 uma média desses valores para todas as estações de base e ainda o valor estimado para a regressão linear, bem como a diferença entre esses valores (Coluna "Erro"). Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura A.6, enquanto na Tabela A.8 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e o respectivo erro associado.

Nas Tabelas A.9 e A.10 encontram-se os valores para a aplicação do Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido.

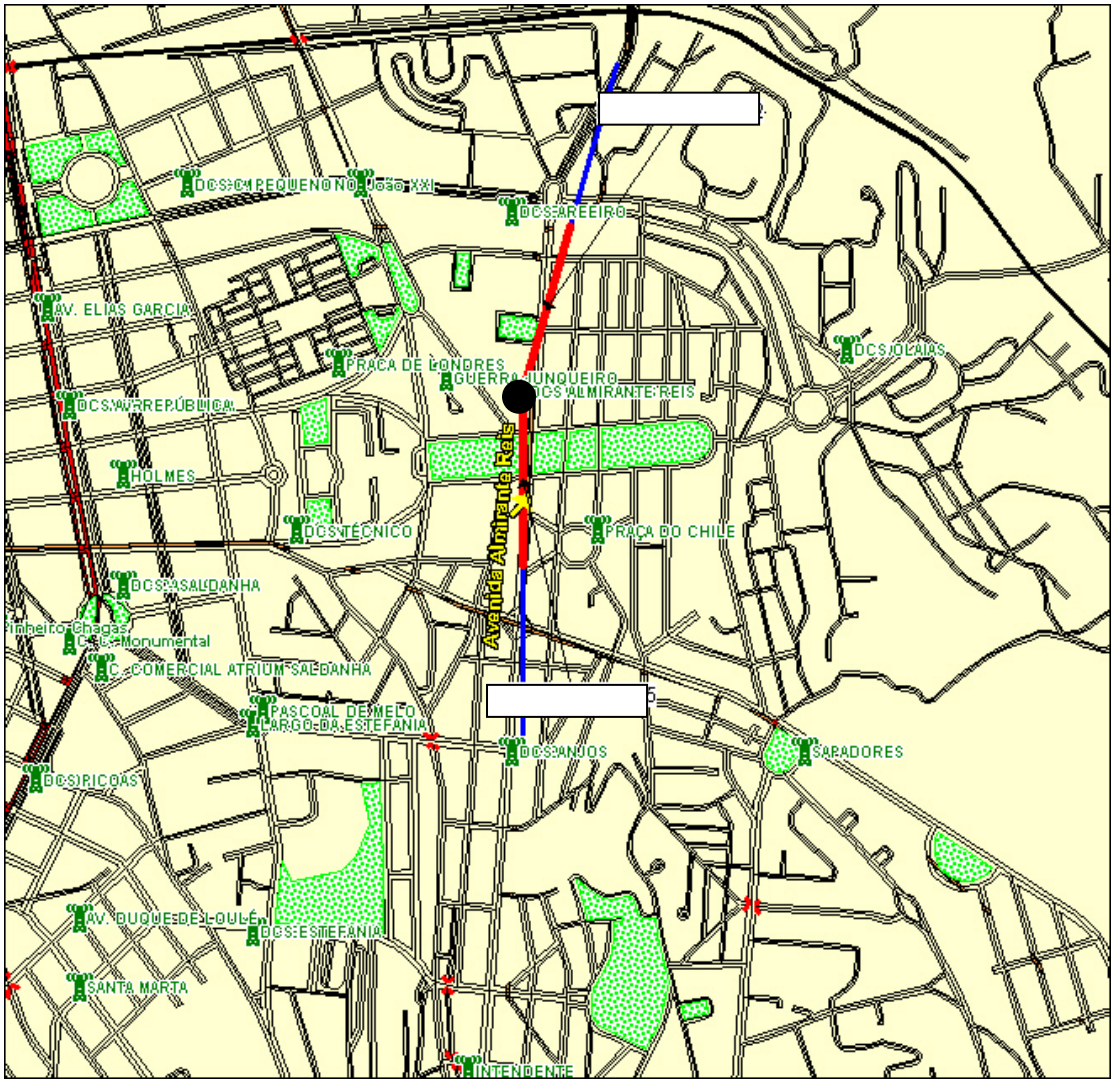


Figura A.1 – Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

A.2 Resultados da Campanha de Medidas

Tabela A.1 – Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [ª]*	*Pot. Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Anjos	B	Anjo_B	140	-87,55	174	0,80	180
Técnico	B	Técn_B	120	-77,95	127	0,59	240
Campo Pequeno	B	CPeq_B	100	-86,60	21	0,88	300
Técnico	A	Técn_A	0	-86,30	22	0,59	240

Tabela A.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	*Estação GSM 1800*	*Sector*	*Tipo*	*Máx. [dB]*	*Mín. [dB]*	*Média [dB]*	*Desv.P. [dB]*	*Mediana [dB]*	*Moda [dB]*
1º	Anjos	B	Exterior	18,45	6,45	14,16	3,30	14,45	16,45
			Global	18,45	6,45	14,70	3,26	15,45	18,45
	Técnico	B	Interior	28,06	8,06	18,47	5,25	18,06	12,05
			Exterior	28,06	1,06	15,17	6,88	15,06	8,05
			Global	28,06	1,06	16,01	6,66	16,06	8,05
2º	Anjos	B	Exterior	18,45	0,45	12,23	4,27	13,45	15,45
			Global	18,45	0,45	12,61	4,29	13,45	15,45
	Técnico	B	Interior	28,06	10,06	20,29	4,60	20,06	20,05
			Exterior	28,06	1,06	16,81	6,33	17,06	16,05
			Global	28,06	1,06	17,80	6,09	18,06	15,05
3º	Anjos	B	Exterior	18,45	1,45	11,34	4,31	11,45	16,45
			Global	18,45	1,45	11,98	4,31	13,45	14,45
	Técnico	B	Interior	28,06	7,06	20,23	5,35	21,06	26,05
			Exterior	28,06	-1,94	16,57	7,40	17,06	8,05
			Global	28,06	-1,94	17,56	7,09	18,06	26,05

Tabela A.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]	int/ext [dB]
1º	28,06	1,06	15,81	6,28	16,06	8,05	1075	N/A	3,46
2º	28,06	0,45	16,81	6,14	16,45	15,05	748	1,00	4,54
3º	28,06	-1,94	15,82	6,86	15,45	16,45	788	-0,99	5,45
Total	28,06	-1,94	16,10	6,43	16,06	16,45	2611	0,01	4,48

A.3 Cobertura

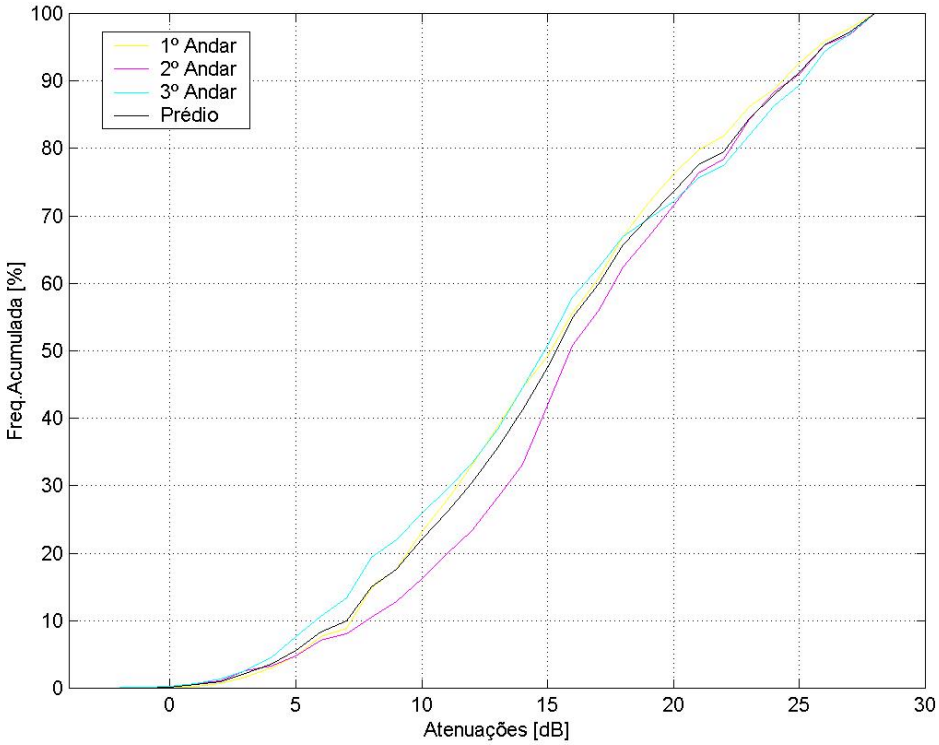


Figura A.2 – Função de Probabilidade Acumulada.

Tabela A.4 – Parâmetros de cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	16,06
90	24,63
95	25,93

A.4 Testes Estatísticos

A.4.1 Distribuição

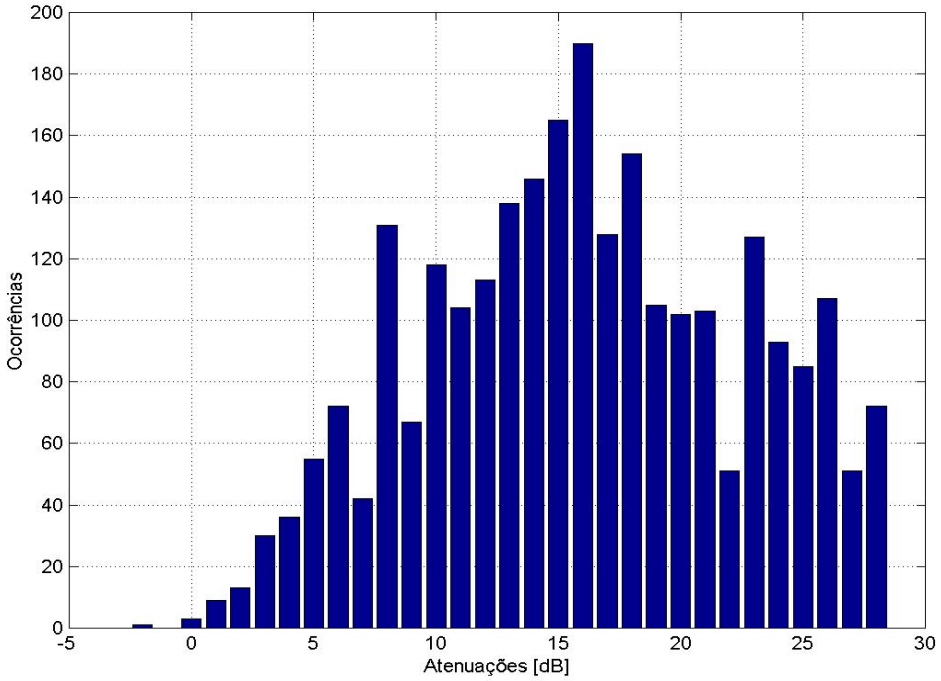


Figura A.3 – Função Densidade de Probabilidade.

A.4.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela A.5 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do χ^2 e raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		6,30	6,57				
1	16,02	6,70	7,27	98,20	268,47	0,66	1,63
2	16,02	6,20	7,67	101,52	247,46	1,79	2,54
5	16,02	6,70	6,97	36,70	178,36	1,64	3,90

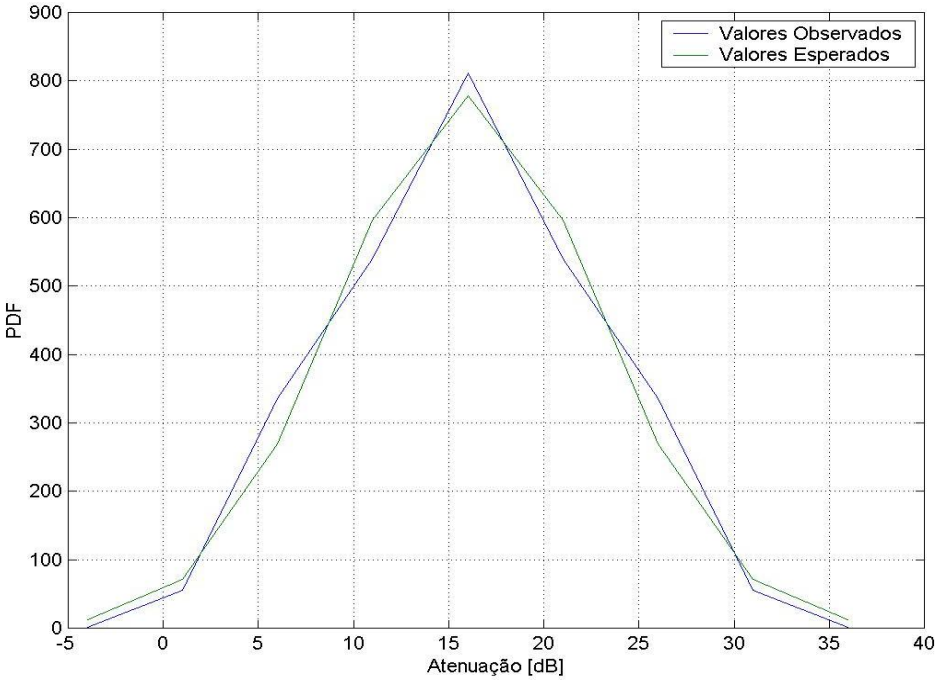


Figura A.4 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

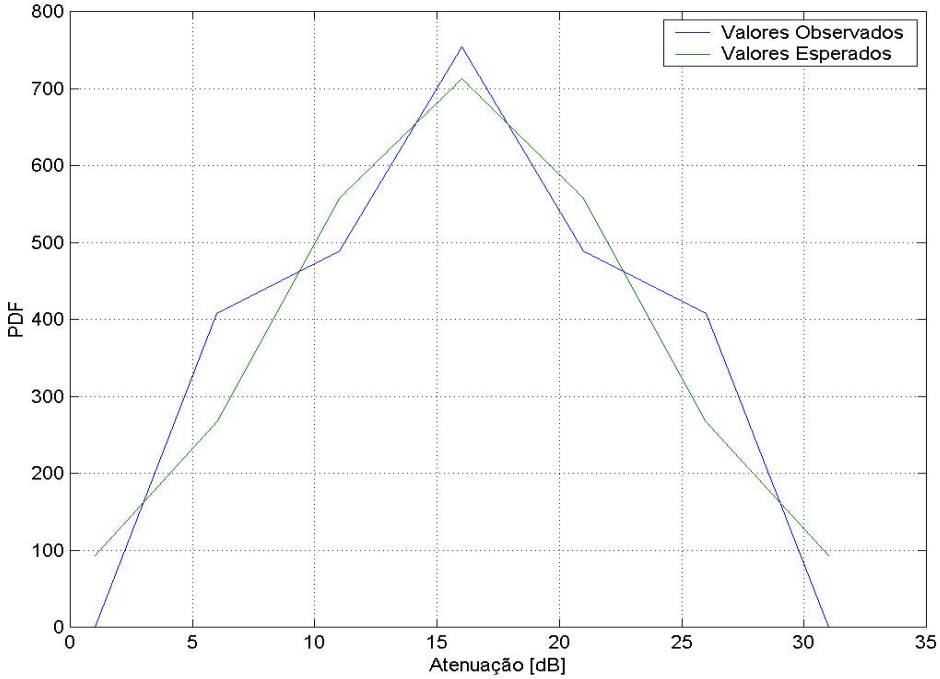


Figura A.5 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

A.4.3 Modelo de Berg

Tabela A.6 – Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg.

Piso	Tipo	Estações			
		Anjo_B	CPeq_B	Tecn_B	Tecn_A
1º	Dim.Amostra	132	41	682	423
	At.Ext. [dB]	14.50	13.40	15.20	12.00
	Dim.Amostra	17	4	76	10
	At.Int. [dB]	16.90	16.40	15.90	17.70
2º	Dim.Amostra	131	76	433	296
	At.Ext. [dB]	12.60	11.20	16.90	11.20
	Dim.Amostra	7	6	66	15
	At.Int. [dB]	17.20	15.90	17.00	16.30
3º	Dim.Amostra	206	49	396	161
	At.Ext. [dB]	11.70	5.70	16.60	13.30
	Dim.Amostra	30	6	57	18
	At.Int. [dB]	15.60	11.60	16.20	15.10

Tabela A.7 – Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado.

Piso	Tipo	Média Atenuações	Curva Reg.lin.	Erro (Módulo)
1º	Exterior	13,80	13,80	0,00
	Interior	16,70		
2º	Exterior	13,00	12,80	0,20
	Interior	16,60		
3º	Exterior	11,80	11,90	0,10
	Interior	14,60		

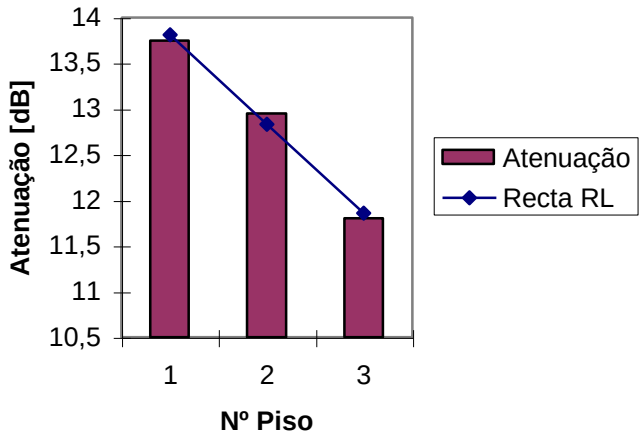


Figura A.6 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Tabela A.8 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	15,76
Wi [dB]	3,00
Gh [dB/piso]	1,00
Erro Médio [dB]	0,10

A.4.4 Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido

Tabela A.9 – Cálculo do parâmetro $L_{tm.}$

Estação	***Ângulo [º]***	***Ltm [dB]***
Anjo_B	0	16,99
CPeq_B	30	27,61
Tecn_B	30	27,61
Tecn_C	30	27,61
	Média LtmTotal	24,96

Tabela A.10 – Parâmetros do modelo.

ws [m]	20,00
Hb [m]	18,00
Ltm [dB]	24,96
Lint [dB]	15,76
Gh [dB/piso]	1,00
Erro [dB]	19,00

B.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes ao Edifício Monumental. Esse edifício foi considerado como pertencendo à categoria "Integrado Alto".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura B.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela B.1.

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela B.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela B.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe na Figura B.2. Por sua vez, na Tabela B.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela B.5. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras B.4 e B.5, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura B.3, ainda se pode encontrar a função densidade de probabilidade.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg pode ser visto nas Tabelas B.6 e B.7. Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura B.6, enquanto na Tabela B.8 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e o respectivo erro associado.

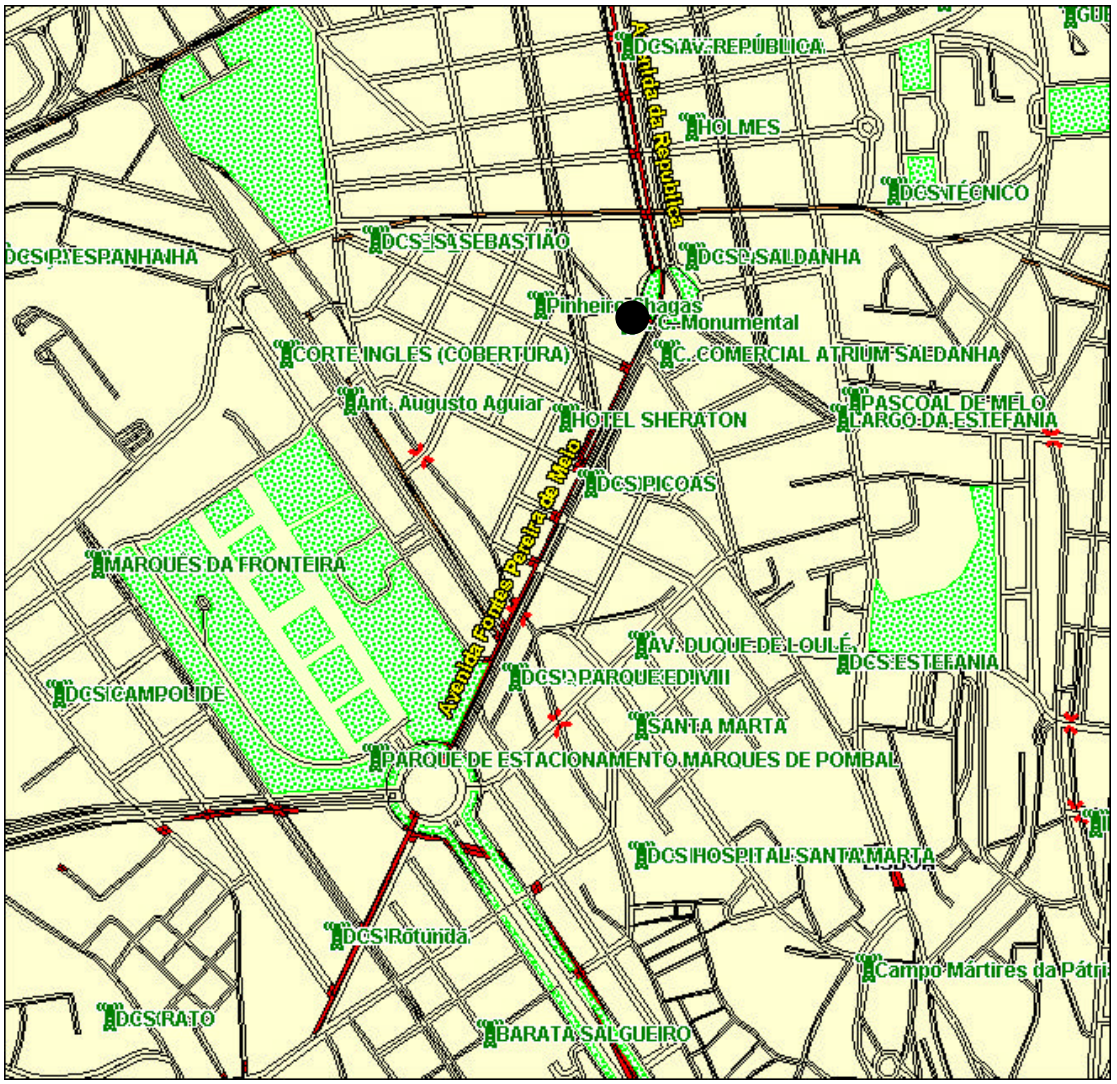


Figura B.1 – Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

B.2 Resultados da Campanha de Medidas

Tabela B.1 – Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [ª]*	*Pot. Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Picoas	C	Pico_C	240	-66,83	510	0,33	199
Picoas	A	Pico_A	0	-60,82	550	0,33	199
Técnico	C	Tecn_C	240	-71,58	558	0,65	72
Estefânia	A	Este_A	0	-74,83	509	0,77	155
Pq. Eduardo VII	A	Pedu_A	0	-80,44	237	0,74	200
Av. República	B	Arep_B	230	-62,98	575	0,49	348
Campolide	A		0	-81,50	20	1,29	238

Tabela B.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
Cave C.C.	Picoas	C	Interior	39,17	26,17	35,07	3,03	36,17	36,17	254
			Global	39,17	26,17	35,07	3,03	36,17	36,17	254
	Picoas	A	Interior	45,18	21,18	35,46	5,07	35,18	34,18	683
			Global	45,18	21,18	35,46	5,07	35,18	34,18	683
	Técnico	C	Interior	34,42	22,42	30,83	2,96	31,42	34,42	183
			Global	34,42	22,42	30,83	2,96	31,42	34,42	183
	Estefânia	A	Interior	31,17	19,17	28,70	2,16	29,17	31,17	144
			Global	31,17	19,17	28,70	2,16	29,17	31,17	144
	Av. República	B	Interior	43,02	28,02	37,53	3,50	38,02	40,02	425
			Global	43,02	28,02	37,53	3,50	38,02	40,02	425
Térreo	Picoas	C	Interior	32,17	15,17	23,53	3,34	23,17	22,17	131
			Exterior	28,17	1,17	13,61	6,07	13,17	14,17	175
			Global	32,17	1,17	17,86	7,07	19,17	22,17	306
	Picoas	A	Interior	32,18	12,18	22,24	4,33	22,18	23,18	177
			Exterior	29,18	-4,82	12,18	7,32	11,18	7,18	220
			Global	32,18	-4,82	16,66	7,94	18,18	20,18	397
	Técnico	C	Interior	34,42	15,42	24,04	4,54	23,42	24,42	164
			Exterior	31,42	2,42	15,19	5,47	14,42	12,42	220
			Global	34,42	2,42	18,97	6,72	19,42	16,42	384
	Estefânia	A	Interior	31,17	13,17	23,35	4,00	32,17	22,17	103
			Exterior	31,17	-1,83	13,40	6,69	13,17	9,17	227
			Global	31,17	-1,83	16,50	7,55	17,17	9,17	330
	Av. República	B	Interior	37,02	11,02	23,52	4,81	23,02	19,02	142
			Exterior	30,02	1,02	13,66	5,17	14,52	17,02	168
			Global	37,02	1,02	18,18	7,02	18,02	17,02	310
1º	Picoas	C	Exterior	39,17	11,17	20,76	5,95	20,67	21,17	82
			Global	39,17	11,17	21,40	6,01	21,17	21,17	105
	Picoas	A	Exterior	45,18	4,18	22,90	8,79	23,18	23,18	202
			Global	45,18	4,18	23,21	8,65	23,18	23,18	237
	Técnico	C	Exterior	33,42	-6,58	16,01	7,93	16,42	12,42	252
			Global	33,42	-6,58	16,55	7,81	16,42	18,42	294
	Estefânia	A	Exterior	31,17	-7,83	11,05	8,17	11,17	9,17	259
			Global	31,17	-7,83	11,73	8,00	11,17	9,17	305
	Av. República	B	Exterior	38,02	5,02	21,69	7,51	21,02	21,02	134
			Global	38,02	5,02	22,04	7,25	21,02	21,02	159

Tabela B.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
2º	Picoas	C	Interior	39,17	15,17	30,59	6,16	30,17	25,17	55
			Exterior	31,17	6,17	18,86	5,58	19,17	17,17	79
			Global	39,17	6,17	23,67	8,20	23,17	17,17	134
	Picoas	A	Interior	45,18	20,18	35,80	5,48	36,18	33,18	214
			Exterior	38,18	3,18	21,69	7,48	20,18	19,18	188
			Global	45,18	3,18	29,20	9,58	30,18	33,18	402
	Técnico	C	Interior	34,42	-4,58	14,90	9,89	13,42	14,42	406
			Exterior	31,42	-5,58	12,67	6,24	11,42	9,42	279
			Global	34,42	-5,58	13,99	8,66	12,42	11,42	685
	Estefânia	A	Interior	31,17	8,17	24,83	4,87	26,17	31,17	243
			Exterior	31,17	-16,83	6,23	8,99	6,17	6,17	284
			Global	31,17	-16,83	14,81	11,85	17,17	31,17	527
	Av. República	B	Interior	43,02	15,02	30,88	7,43	31,02	21,02	250
			Exterior	35,02	4,02	18,56	5,37	19,02	18,02	169
			Global	43,02	4,02	25,91	9,00	25,02	18,02	419
3º	Picoas	C	Interior	39,17	26,17	34,68	3,67	35,17	37,17	51
			Exterior	39,17	13,17	23,54	5,88	23,17	17,17	123
			Global	39,17	13,17	26,81	7,36	26,17	17,17	174
	Picoas	A	Interior	45,18	32,18	40,20	3,58	40,18	40,18	82
			Exterior	40,18	9,18	25,04	5,91	25,18	23,18	244
			Global	45,18	9,18	28,86	8,53	27,18	23,18	326
	Técnico	C	Interior	34,42	2,42	21,22	7,76	22,42	21,42	272
			Exterior	33,42	-18,58	8,07	9,93	7,42	6,42	334
			Global	34,42	-18,58	13,98	11,14	14,42	7,42	606
	Estefânia	A	Interior	31,17	15,17	24,68	3,94	25,17	27,17	146
			Exterior	27,17	-8,83	9,74	7,97	11,17	11,17	332
			Global	31,17	-8,83	14,30	9,81	14,17	11,17	478
	Av. República	B	Interior	43,02	23,02	34,43	4,73	34,02	32,02	194
			Exterior	41,02	7,02	20,99	7,01	19,02	19,02	165
			Global	43,02	7,02	28,25	8,92	30,02	32,02	359
4º	Picoas	C	Interior	39,17	15,17	32,16	5,27	32,17	30,17	63
			Exterior	36,17	11,17	25,31	5,05	25,17	24,17	142
			Global	39,17	11,17	27,42	6,00	27,17	24,17	205
	Picoas	A	Exterior	42,18	12,18	28,80	6,24	29,18	31,18	139
			Global	45,18	12,18	30,52	7,14	30,68	31,18	164
	Técnico	C	Interior	34,42	-5,58	20,51	7,47	20,42	12,42	297
			Exterior	34,42	-19,58	6,59	12,79	6,42	2,42	325
			Global	34,42	-19,58	13,24	12,67	14,42	12,42	622
	Estefânia	A	Interior	31,17	7,17	22,23	5,10	22,17	19,17	228
			Exterior	31,17	-4,83	18,11	7,47	18,17	21,17	302
			Global	31,17	-4,83	19,88	6,87	20,17	20,17	530
	Pq. Ed. VII	A	Exterior	25,56	3,56	16,39	5,25	16,56	20,56	65
			Global	25,56	3,56	17,08	5,25	17,56	20,56	79
	Av. República	B	Interior	43,02	23,02	34,56	4,67	35,02	38,02	165
			Exterior	43,02	9,02	26,10	6,67	26,02	27,02	255
			Global	43,02	9,02	29,43	7,26	30,02	27,02	420

Tabela B.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
5º	Picoas	C	Interior	38,17	13,17	28,73	4,70	28,17	27,17	67
			Exterior	32,17	10,17	21,16	4,95	21,17	22,17	149
			Global	38,17	10,17	23,51	6,00	23,17	22,17	216
	Picoas	A	Exterior	38,18	6,18	21,18	7,30	20,68	27,18	140
			Global	44,18	6,18	23,98	8,90	23,18	27,18	174
	Técnico	C	Interior	34,42	-15,58	12,25	9,98	12,42	18,42	293
			Exterior	32,42	-24,58	-2,00	10,93	-2,58	-1,58	351
			Global	34,42	-24,58	4,49	12,68	4,42	-1,58	644
	Estefânia	A	Interior	31,17	8,17	21,74	5,39	22,17	22,17	211
			Exterior	30,17	-8,83	9,83	9,12	10,17	9,17	288
			Global	31,17	-8,83	14,87	9,74	16,17	19,17	499
	Av. República	B	Interior	43,02	19,02	29,29	5,66	28,52	26,02	152
			Exterior	43,02	4,02	20,68	6,77	20,02	19,02	219
			Global	43,02	4,02	24,21	7,62	24,02	19,02	371
6º	Picoas	C	Interior	39,17	8,17	23,68	6,55	23,17	19,17	182
			Exterior	37,17	1,17	16,77	7,53	14,67	11,17	86
			Global	39,17	1,17	21,46	7,59	21,17	19,17	268
	Picoas	A	Interior	43,18	8,18	24,48	8,58	23,18	23,18	63
			Exterior	36,18	5,18	23,47	7,80	25,18	25,18	81
			Global	43,18	5,18	23,91	8,14	24,18	23,18	144
	Técnico	C	Interior	34,42	-12,58	12,85	10,45	11,42	10,42	322
			Exterior	22,42	-16,58	1,45	8,23	1,92	-7,58	372
			Global	34,42	-16,58	6,74	10,92	6,42	7,42	694
	Estefânia	A	Interior	31,17	9,17	21,25	5,69	21,17	26,17	173
			Exterior	26,17	-3,83	13,01	5,60	13,17	9,17	225
			Global	31,17	-3,83	16,59	6,96	16,17	18,17	398
	Pq. Ed. VII	A	Interior	25,56	-1,44	13,63	5,56	14,56	16,56	57
			Global	25,56	-1,44	12,28	5,72	13,56	13,56	79
	Av. República	B	Interior	42,02	11,02	26,58	7,29	26,02	23,02	192
			Exterior	38,02	1,02	16,80	5,73	17,02	21,02	273
			Global	42,02	1,02	20,84	8,02	20,02	21,02	465
7º	Picoas	C	Interior	39,17	3,17	23,68	7,37	24,17	26,17	98
			Exterior	29,17	-3,83	13,26	7,17	14,17	17,17	182
			Global	39,17	-3,83	16,91	8,78	17,17	17,17	280
	Picoas	A	Interior	43,18	6,18	24,71	8,82	24,18	22,18	52
			Exterior	37,18	0,18	16,99	7,79	16,18	11,18	111
			Global	43,18	0,18	19,45	8,88	18,18	11,18	163
	Técnico	C	Interior	33,42	-9,58	9,98	8,33	9,42	6,42	209
			Exterior	19,42	-15,58	0,58	7,75	-0,58	-7,58	212
			Global	33,42	-15,58	5,25	9,31	5,42	7,42	421
	Estefânia	A	Interior	31,17	4,17	15,84	5,88	16,17	19,17	115
			Exterior	28,17	-20,83	5,29	12,29	7,67	19,17	186
			Global	31,17	-20,83	9,32	11,52	12,17	19,17	301
	Pq. Ed. VII	A	Exterior	21,56	-5,44	6,76	5,16	6,56	7,56	77
			Global	25,56	-9,44	6,82	6,09	6,56	7,56	107
	Av. República	B	Interior	43,02	0,02	22,51	9,22	23,02	19,02	195
			Exterior	34,02	6,02	19,61	5,37	20,02	21,02	244
			Global	43,02	0,02	20,89	7,47	20,02	21,02	439

Tabela B.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
9º	Picoas	C	Exterior	27,17	-0,83	12,28	5,37	12,17	12,17	252
			Global	27,17	-0,83	12,57	5,27	12,17	12,17	278
	Picoas	A	Exterior	23,18	-0,82	10,90	5,37	10,18	10,18	116
			Global	24,18	-0,82	11,84	5,71	11,68	10,18	134
	Técnico	C	Interior	9,42	-23,58	-5,71	5,86	-5,58	-7,58	200
			Exterior	11,42	-24,58	-4,19	7,84	-3,58	2,42	233
			Global	11,42	-24,58	-4,90	7,03	-4,58	-7,58	433
	Estefânia	A	Interior	17,17	-2,83	6,95	4,61	7,17	7,17	63
			Exterior	20,17	-20,83	-3,36	8,88	-4,83	-7,83	184
			Global	20,17	-20,83	-0,73	9,18	-0,83	-7,83	247
	Pq. Ed. VII	A	Exterior	9,56	-16,44	-2,77	6,52	-1,44	-1,44	170
			Global	9,56	-16,44	-2,25	6,40	-1,44	-1,44	190
	Av. República	B	Interior	29,02	0,02	14,47	6,17	15,02	18,02	230
			Exterior	32,02	-12,98	12,57	10,00	15,02	16,02	384
			Global	32,02	-12,98	13,28	8,81	15,02	16,02	614
10º	Picoas	C	Exterior	30,17	-11,83	8,00	8,20	7,17	6,17	219
			Global	30,17	-11,83	8,00	8,20	7,17	6,17	219
	Técnico	C	Exterior	8,42	-24,58	-10,57	5,75	-10,58	-8,58	446
			Global	8,42	-24,58	-10,57	5,75	-10,58	-8,58	446
	Estefânia	A	Exterior	20,17	-23,83	-4,06	8,90	-3,83	-10,83	343
			Global	20,17	-23,83	-4,05	8,89	-3,83	-10,83	343
	Pq. Ed. VII	A	Exterior	14,56	-26,44	-7,89	6,79	-8,44	-9,44	243
			Global	14,56	-26,44	-7,89	6,79	-8,44	-9,44	243
11º	Picoas	C	Exterior	22,17	-4,83	6,98	5,06	7,17	7,17	223
			Global	22,17	-4,83	6,98	5,06	7,17	7,17	223
	Técnico	C	Exterior	1,42	-22,58	-10,19	5,05	-10,58	-12,58	291
			Global	1,42	-22,58	-10,19	5,05	-10,58	-12,58	291
	Estefânia	A	Exterior	13,17	-25,83	-8,18	9,15	-9,83	-19,83	351
			Global	13,17	-25,83	-8,18	9,15	-9,83	-19,83	351
	Pq. Ed. VII	A	Exterior	3,56	-23,44	-8,78	5,50	-8,44	-7,44	273
			Global	3,56	-23,44	-8,78	5,50	-8,44	-7,44	273

Tabela B.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]	int/ext [dB]
Cave	45,18	19,17	34,78	5,03	34,42	34,18	1693	N/A	N/A
Térreo	37,02	-4,82	17,55	7,40	18,18	12,42	1742	-17,23	9,70
1º	45,18	-7,83	17,87	9,04	18,02	18,42	1107	0,32	N/A
2º	45,18	-16,83	19,90	11,65	19,42	19,18	2172	2,03	10,93
3º	45,18	-18,58	20,31	11,90	21,17	21,42	1968	0,41	12,99
4º	45,18	-19,58	21,34	11,28	22,42	21,17	2020	1,03	6,41
5º	44,18	-24,58	14,98	12,96	17,18	19,02	1947	-6,36	8,99
6º	43,18	-16,58	15,20	10,97	16,17	10,42	2048	0,22	8,77
7º	43,18	-20,83	13,34	11,09	14,56	17,17	1711	-1,86	7,21
9º	32,02	-24,58	5,54	11,10	6,17	16,02	1896	-7,80	0,01
10º	30,17	-26,44	-5,00	9,82	-6,83	-9,44	1254	-10,54	N/A
11º	22,17	-25,83	-5,83	9,25	-7,44	-7,44	1142	-0,83	N/A
Total	45,18	-26,44	15,28	14,47	17,02	19,18	20700	-3,69	8,13

B.3 Cobertura

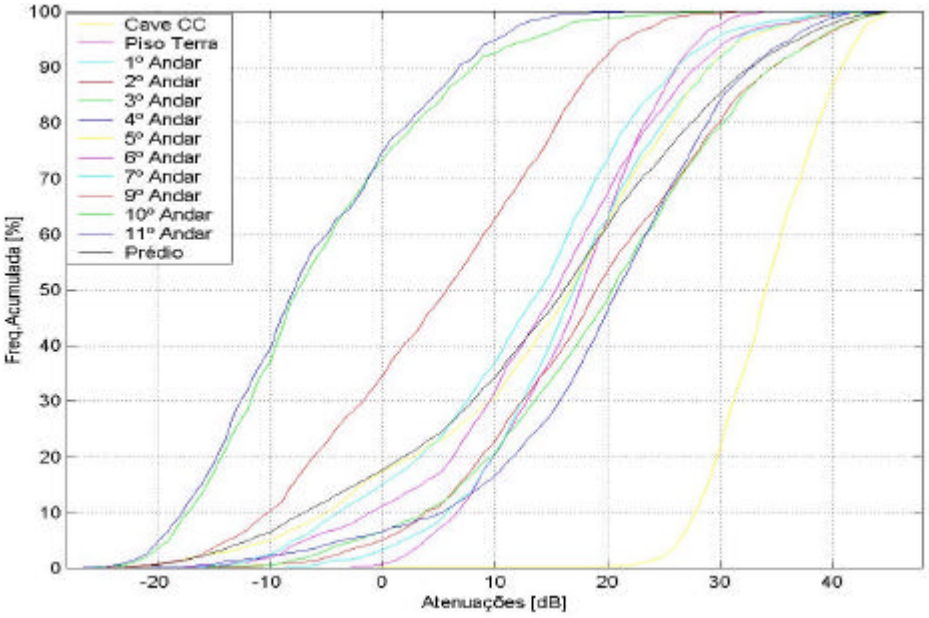


Figura B.2 – Função de Probabilidade Acumulada.

Tabela B.4 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	17,02
90	32,75
95	36,94

B.4 Testes Estatísticos

B.4.1 Distribuição

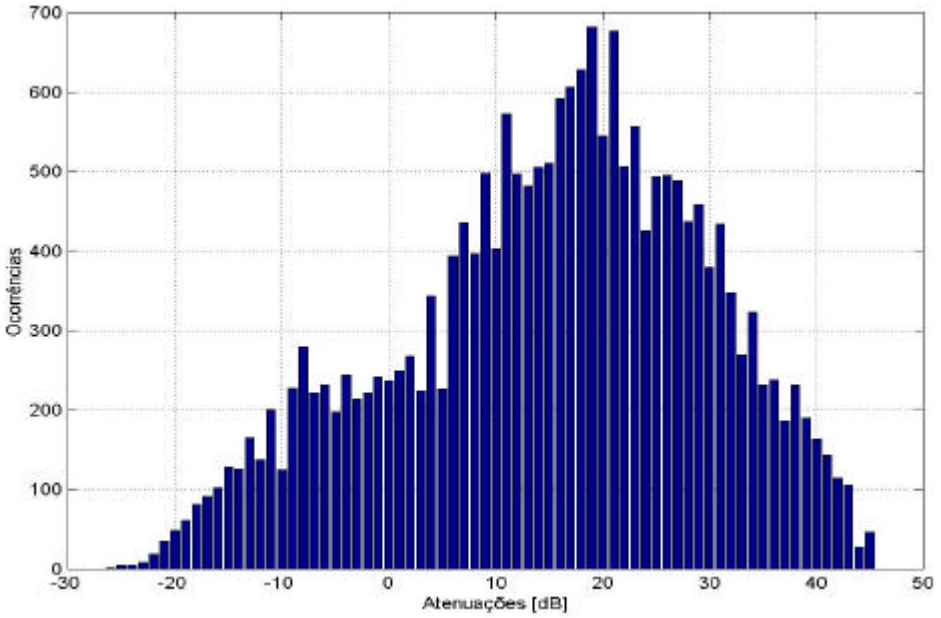


Figura B.3 – Função Densidade de Probabilidade.

B.4.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela B.5 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		17,10	11,44				
1	19,00	17,90	11,84	740,37	430,45	0,25	0,36
2	19,00	17,50	12,24	926,25	488,26	0,65	0,71
5	19,00	17,80	11,74	521,64	263,18	0,9	0,89

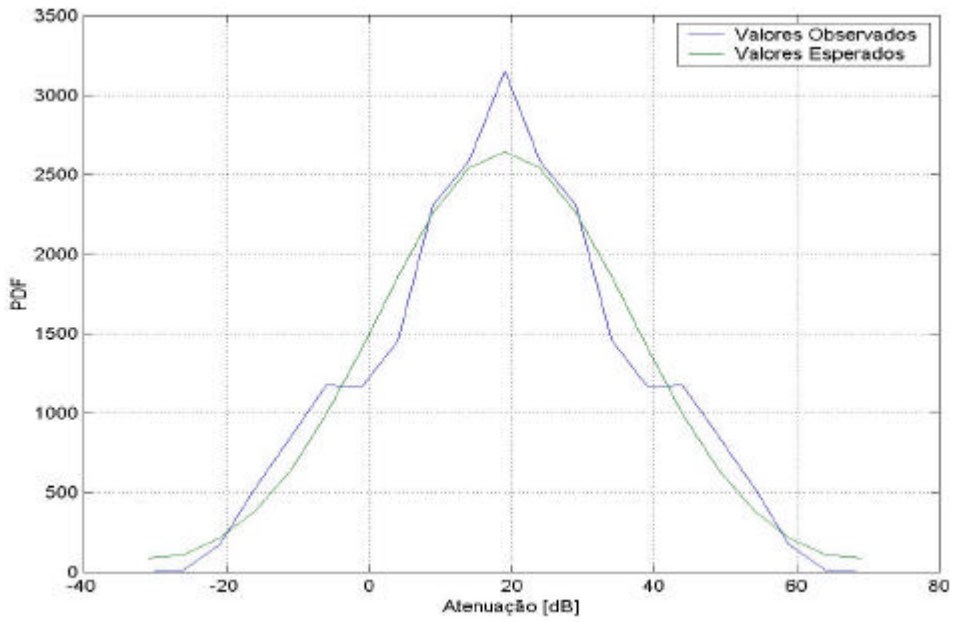


Figura B.4 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

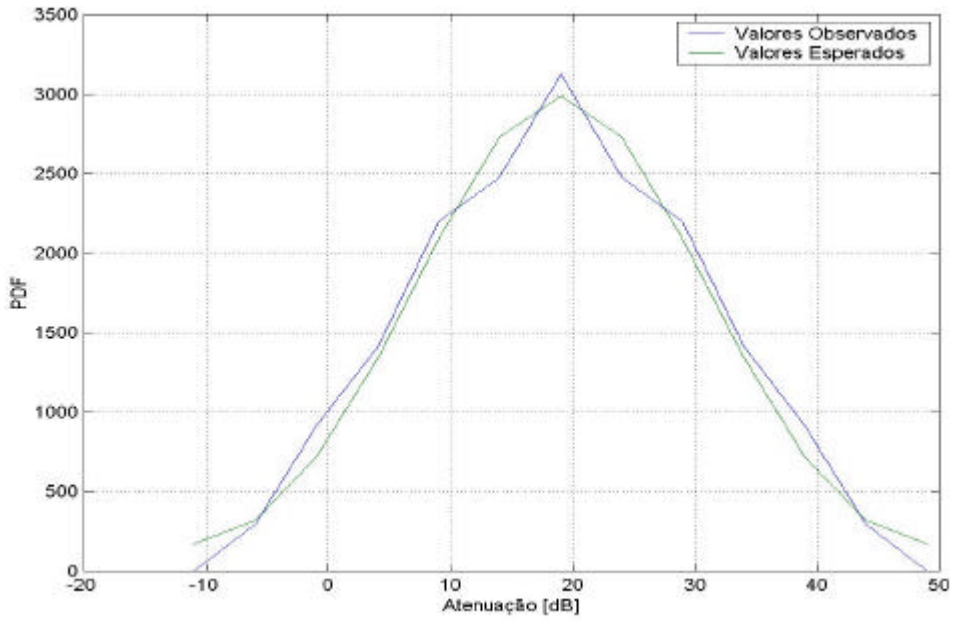


Figura B.5 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

B.4.3 Modelo de Berg

Tabela B.6 – Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg.

Local	*Tipo*	*Estações*					
		Pico_C	*Pico_A*	*Camp_A*	*Tecn_C*	*Este_A*	*ARep_C*
Cave C.C.	D.Amostra	254	683	22	183	144	425
	At.Int.[dB]	35,10	35,50	18,70	30,80	28,70	37,60
Piso Térreo	D.Amostra	306	397	5	384	330	310
	At.Ext.[dB]	17,90	16,70	14,10	19,00	16,50	18,30
1º	D.Amostra	82	202	17	252	259	134
	At.Ext.[dB]	20,80	22,90	17,40	16,00	11,10	21,80
2º	D.Amostra	79	188	26	279	284	169
	At.Ext.[dB]	18,90	21,70	12,50	12,70	6,30	18,60
3º	D.Amostra	123	244	21	334	332	165
	At.Ext.[dB]	23,60	25,10	16,40	8,10	9,80	21,10
	D.Amostra	51	82	22	272	146	194
	At.Int.[dB]	34,70	40,20	17,70	21,30	24,70	34,50
4º	D.Amostra	142	139	112	325	302	255
	At.Ext.[dB]	25,30	28,80	7,60	6,60	18,10	26,20
	D.Amostra	63	25	110	297	228	165
	At.Int.[dB]	32,20	40,10	15,10	20,50	22,30	34,60
5º	D.Amostra	149	140	87	351	288	219
	At.Ext.[dB]	21,20	21,20	3,00	-2,00	9,90	20,80
	D.Amostra	67	34	105	293	211	152
	At.Int.[dB]	28,80	35,50	5,70	12,20	21,80	29,40
6º	D.Amostra	86	81	77	372	225	273
	At.Ext.[dB]	16,80	23,50	-2,60	1,40	13,00	16,90
	D.Amostra	182	63	166	322	173	192
	At.Int.[dB]	23,70	24,50	5,70	12,80	21,30	26,70
7º	D.Amostra	182	111	99	212	186	244
	At.Ext.[dB]	13,30	17,00	-5,30	0,60	5,30	19,70
	D.Amostra	92	48	33	160	63	166
	At.Int.[dB]	23,00	23,40	0,00	7,60	16,30	20,50
9º	D.Amostra	237	114	169	277	185	358
	At.Ext.[dB]	12,20	11,30	-10,00	-4,40	-3,30	16,30
	D.Amostra	41	20	34	156	62	256
	At.Int.[dB]	14,70	15,00	-13,10	-5,80	7,00	9,10
10º	D.Amostra	219	136	167	446	343	
	At.Ext.[dB]	8,00	6,60	-12,00	-10,60	-4,00	
11º	D.Amostra	214	138	212	291	337	
	At.Ext.[dB]	7,30	4,60	-14,90	-10,20	-7,90	

Tabela B.7 – Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado.

Piso	*Tipo*	*Média Atenuações*	*Curva Reg.lin.*	*Erro (Módulo)*
Cave	Interior	31,10	23,60	7,50
Térreo	Exterior	17,10	21,50	4,40
1º	Exterior	18,30	19,40	1,10
2º	Exterior	15,10	17,30	2,20
3º	Exterior	17,30	15,30	2,10
	Interior	28,80		
4º	Exterior	18,80	13,20	5,60
	Interior	27,50		
5º	Exterior	12,30	11,10	1,20
	Interior	22,20		
6º	Exterior	11,50	9,00	2,50
	Interior	19,10		
7º	Exterior	8,40	6,90	1,50
	Interior	15,10		
8º			4,90	
9º	Exterior	3,70	2,80	0,90
	Interior	4,50		
10º	Exterior	-2,40	0,70	3,10
11º	Exterior	-4,20	-1,40	2,80

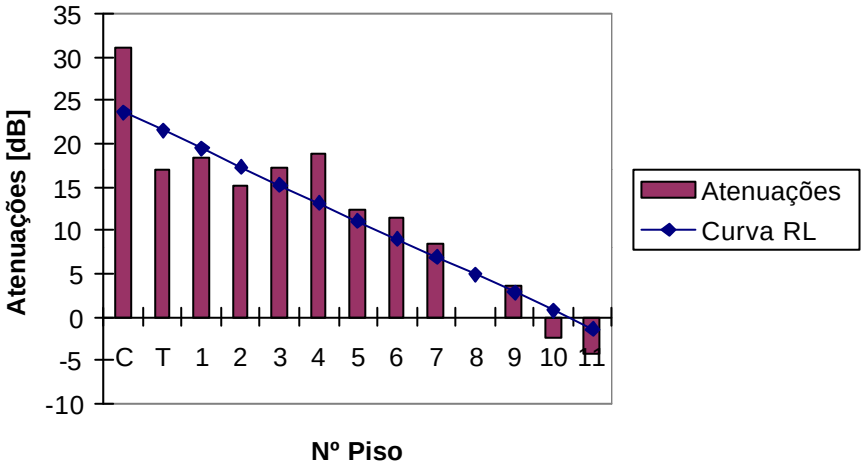


Figura B.6 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Tabela B.7 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	21,50
Wi [dB]	7,50
Gh [dB/piso]	2,10
Erro Médio [dB]	2,90

C.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes ao edifício situado na Rua Castilho. Esse edifício foi considerado como pertencendo à categoria "Integrado Alto".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura C.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela C.1.

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela C.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela C.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe na Figura C.2. Por sua vez, na Tabela C.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela C.5. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras C.4 e C.5, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura C.3, ainda se pode encontrar uma função densidade de probabilidade.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg, pode ser visto nas Tabelas C.6 e C.7. Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura C.6, enquanto na Tabela C.8 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e o respectivo erro associado.

Nas Tabelas C.9 e C.10 se encontram os valores para a aplicação do Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido.

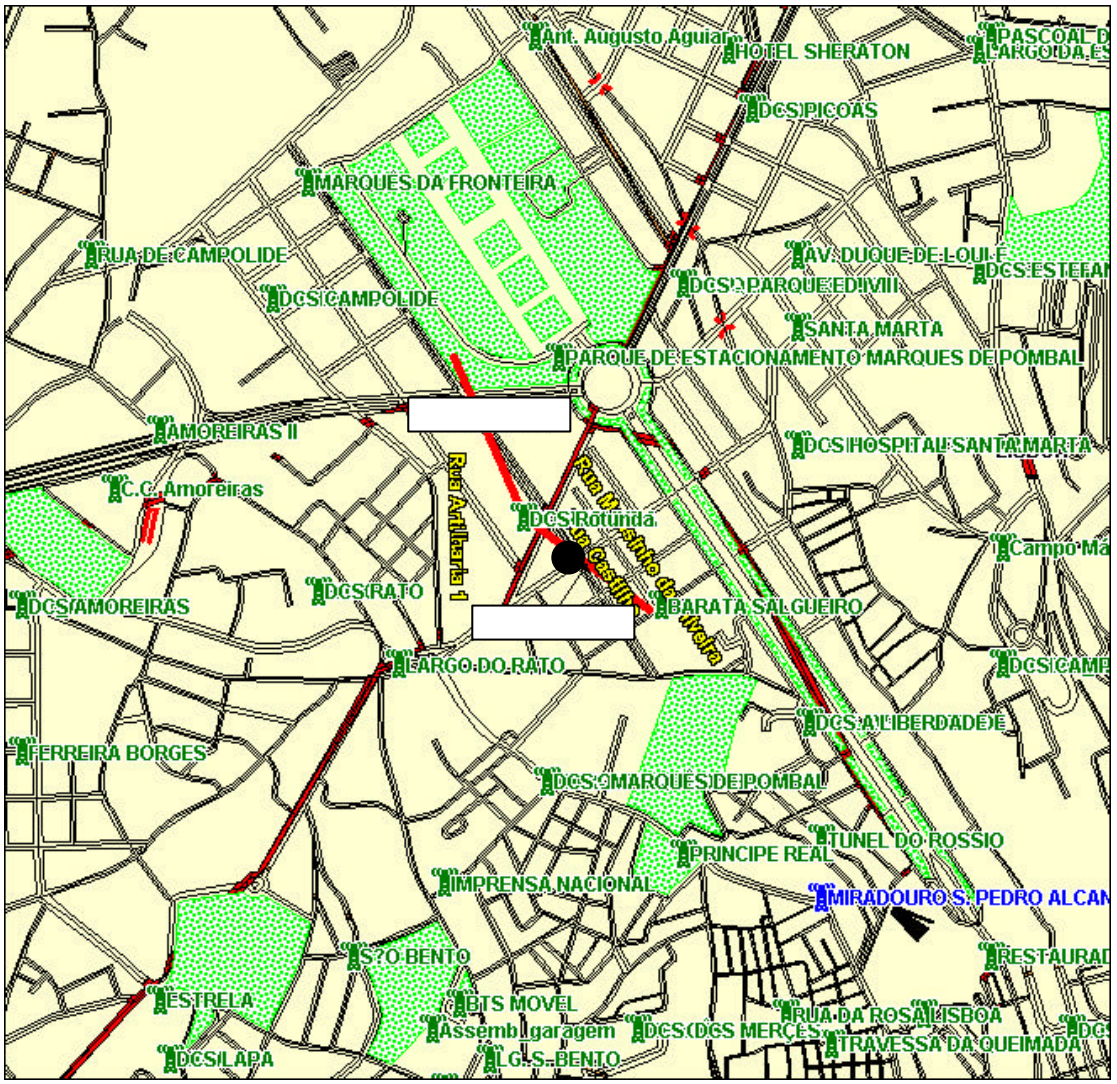


Figura C.1 - Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

C.2 Resultados da Campanha de Medidas

Tabela C.1 – Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [ª]*	*Potência Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Picoas	C	Pico_C	240	-79,78	166	1,02	28
Campolide	B	Camp_B	120	-77,38	169	0,75	309
Rato	B	Rato_B	120	-74,52	363	0,53	252
Pq. Eduardo VII	A	Pedu_A	0	-70,16	347	0,60	32
Mq. Pombal	C	Mpom_C	240	-78,19	118	0,60	180
Estefânia	C	Este_C	270	-74,35	331	1,08	61

Tabela C.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
Térreo	Rato	B	Exterior	31,48	9,48	22,93	5,34	22,48	21,48	111
			Global	31,48	9,48	22,93	5,34	22,48	21,48	111
	Pq. Ed.VII	A	Exterior	35,84	10,84	26,41	6,13	26,84	23,84	153
			Global	35,84	10,84	26,41	6,13	26,84	23,84	153
	Estefânia	C	Exterior	31,65	11,65	23,37	5,58	22,65	31,65	128
			Global	31,65	11,65	23,37	5,58	22,65	31,65	128
1º	Rato	B	Exterior	31,48	16,48	24,04	3,92	24,48	23,48	65
			Global	31,48	16,48	24,04	3,92	24,48	23,48	65
	Pq. Ed.VII	A	Exterior	32,84	10,84	20,16	4,27	20,34	20,84	82
			Global	32,84	10,84	20,16	4,27	20,34	20,84	82
	Estefânia	C	Exterior	30,65	6,65	21,18	5,89	20,65	20,65	67
			Global	30,65	6,65	21,18	5,89	20,65	20,65	67
2º	Rato	B	Exterior	30,48	7,48	19,92	5,15	20,48	21,48	117
			Global	30,48	7,48	19,92	5,15	20,48	21,48	117
	Pq. Ed.VII	A	Exterior	34,84	8,84	19,45	5,22	18,84	17,84	121
			Global	34,84	8,84	19,45	5,22	18,84	17,84	121
	Estefânia	C	Exterior	31,65	3,65	16,42	5,74	15,65	11,65	123
			Global	31,65	3,65	16,42	5,74	15,65	11,65	123
3º	Campolide	B	Exterior	26,62	5,62	15,70	4,48	15,62	14,62	118
			Global	27,62	5,62	16,93	4,72	17,62	19,62	162
	Rato	B	Interior	31,48	15,48	24,84	3,91	24,48	22,48	309
			Exterior	31,48	3,48	19,67	6,15	19,48	18,48	305
			Global	31,48	3,48	22,27	5,75	22,48	22,48	614
	Pq. Ed.VII	A	Interior	35,84	14,84	27,29	5,63	26,84	24,84	123
			Global	35,84	14,84	27,67	5,52	27,84	32,84	171
	Mq. Pombal	C	Interior	27,80	16,80	23,96	2,79	24,80	25,81	72
			Exterior	27,80	5,80	18,79	4,42	18,80	17,81	139
			Global	27,80	5,80	20,55	4,64	20,80	23,81	211
	Estefânia	C	Interior	31,65	4,65	23,11	5,56	22,65	29,65	259
			Exterior	30,65	3,65	18,34	5,82	18,65	16,65	217
			Global	31,65	3,65	20,93	6,15	20,65	19,65	476
4º	Campolide	B	Exterior	26,62	2,62	14,27	5,05	13,62	13,62	265
			Global	26,62	2,62	14,34	5,02	13,62	13,62	275
	Rato	B	Interior	31,48	14,48	24,20	4,24	23,48	26,48	185
			Exterior	31,48	-0,52	18,50	6,48	18,48	17,48	493
			Global	31,48	-0,52	20,06	6,47	20,48	19,48	678
	Pq. Ed.VII	A	Interior	35,84	11,84	24,26	6,90	24,84	17,84	168
			Exterior	35,84	3,84	19,34	10,56	18,34	8,84	108
			Global	35,84	3,84	22,34	8,83	23,84	17,84	276
	Mq. Pombal	C	Exterior	27,80	1,80	19,26	6,15	19,80	22,81	186
			Global	27,80	1,80	19,96	6,01	20,80	22,81	222
	Estefânia	C	Interior	31,65	7,65	19,17	5,24	18,65	15,65	215
			Exterior	31,65	-0,35	17,34	7,02	17,65	22,65	393
			Global	31,65	-0,35	17,99	6,50	18,65	15,65	608

Tabela C.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
5º	Campolide	B	Exterior	18,62	-1,38	9,58	5,05	10,62	13	91
			Global	21,62	-1,38	10,12	4,9	10,62	13	128
	Rato	B	Interior	31,48	7,48	19,02	5,32	18,48	18	213
			Exterior	28,48	-0,52	12,46	6,18	12,48	9	338
			Global	31,48	-0,52	15	6,67	15,48	9	551
	Pq. Ed.VII	A	Interior	35,84	9,84	22,93	5,86	23,34	21	92
			Exterior	32,84	-0,16	16,39	7,49	15,84	9	90
			Global	35,84	-0,16	19,7	7,46	20,48	21	182
	Mq. Pombal	C	Exterior	23,8	0,8	12,19	5,36	11,8	8	104
			Global	26,8	0,8	14	5,91	14,8	16	145
	Estefânia	C	Interior	24,65	-15,35	9,71	6,61	9,65	10	245
			Exterior	24,65	-12,35	4,7	7,93	4,65	10	316
			Global	24,65	-15,35	6,89	7,78	7,65	10	561
6º	Campolide	B	Interior	28,62	4,62	15,54	4,11	15,62	16	72
			Exterior	16,62	-10,38	4,13	6,41	4,62	7	164
			Global	28,62	-10,38	7,61	7,83	7,62	14	236
	Rato	B	Interior	31,48	9,48	22,81	5,04	22,98	22	200
			Exterior	31,48	-4,52	11,79	6	11,48	9	442
			Global	31,48	-4,52	15,22	7,66	14,48	9	642
	Pq. Ed.VII	A	Interior	35,84	5,84	22,48	6,76	22,84	25	96
			Exterior	28,84	5,84	16,42	6,02	15,84	14	106
			Global	35,84	5,84	19,3	7,05	19,34	22	202
	Mq. Pombal	C	Exterior	20,8	0,8	11,57	4,7	11,8	12	52
			Global	27,8	0,8	14,8	6,61	13,8	12	75
	Estefânia	C	Interior	24,65	-19,35	6,4	7,81	6,65	10	288
			Exterior	23,65	-28,35	-3,25	10,4	-3,35	-10	465
			Global	24,65	-28,35	0,44	10,58	2,65	7	753
7º	Campolide	B	Interior	20,62	2,62	11,55	3,8	11,62	7	113
			Exterior	24,62	-11,38	5,58	7,07	6,62	7	212
			Global	24,62	-11,38	7,66	6,76	8,62	7	325
	Rato	B	Interior	31,48	-5,52	15,79	6,19	15,48	13	258
			Exterior	29,48	-6,52	9,32	6,55	8,48	11	626
			Global	31,48	-6,52	11,21	7,09	11,48	11	884
	Pq. Ed.VII	A	Exterior	30,84	-3,16	12,83	9,02	11,84	14	138
			Global	33,84	-3,16	15,04	9,65	13,84	14	167
	Mq. Pombal	C	Exterior	23,8	2,8	11,77	5,13	10,8	10	103
			Global	23,8	2,8	12,57	5,4	11,8	10	118
	Estefânia	C	Interior	24,65	-16,35	1,64	8,02	1,65	5	265
			Exterior	26,65	-34,35	-1,21	12,18	-0,35	-2	694
			Global	26,65	-34,35	-0,42	11,26	0,65	5	959

Tabela C.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
8º	Campolide	B	Interior	15,62	-3,38	6,33	3,60	5,62	5,62	80
			Exterior	26,62	-16,38	0,44	8,09	-0,38	-6,38	315
			Global	26,62	-16,38	1,63	7,77	2,62	5,62	395
	Rato	B	Interior	25,48	-5,52	10,83	5,33	9,48	7,48	231
			Exterior	29,48	-9,52	5,93	6,35	5,48	9,48	639
			Global	29,48	-9,52	7,23	6,47	7,48	9,48	870
	Pq. Ed.VII	A	Interior	29,84	5,84	16,96	5,16	16,84	11,84	69
			Exterior	33,84	-7,16	6,94	7,34	7,84	13,84	107
			Global	33,84	-7,16	10,87	8,19	11,84	13,84	176
	Estefânia	C	Interior	16,65	-29,35	-5,74	7,78	-6,35	-3,35	269
			Exterior	28,65	-31,35	-6,63	11,70	-7,35	-8,35	675
			Global	28,65	-31,35	-6,38	10,73	-6,35	-3,35	944
9º	Campolide	B	Interior	23,62	2,62	14,01	4,54	14,12	13,62	80
			Exterior	15,62	-13,38	0,99	6,02	1,62	1,62	289
			Global	23,62	-13,38	3,81	7,85	3,62	1,62	369
	Rato	B	Interior	31,48	-2,52	16,92	6,44	17,48	17,48	192
			Exterior	30,48	-11,52	6,12	9,10	7,48	7,48	369
			Global	31,48	-11,52	9,82	9,74	10,48	8,48	561
	Estefânia	C	Interior	27,65	-14,35	5,22	6,79	4,65	4,65	201
			Exterior	19,65	-34,35	-2,94	9,46	-2,35	-3,35	370
			Global	27,65	-34,35	-0,06	9,45	0,65	4,65	571
10º	Campolide	B	Interior	25,62	2,62	11,97	4,68	12,62	13,62	135
			Exterior	22,62	-17,38	1,97	6,85	2,62	2,62	905
			Global	25,62	-17,38	3,27	7,41	3,62	4,62	1040
	Rato	B	Interior	29,48	-1,52	13,13	5,38	12,48	11,48	222
			Exterior	29,48	-16,52	3,36	8,66	2,48	-2,52	1138
			Global	29,48	-16,52	4,96	8,97	4,48	-2,52	1360
	Pq. Ed.VII	A	Exterior	26,84	12,84	19,07	3,84	19,84	13,84	53
			Global	31,84	8,84	20,37	5,56	20,34	23,84	88
	Mq. Pombal	C	Interior	26,80	2,80	14,61	5,99	14,80	14,81	94
			Exterior	21,80	-19,20	2,83	10,20	3,80	9,81	409
			Global	26,80	-19,20	5,03	10,60	6,80	9,81	503
	Estefânia	C	Interior	28,65	-11,35	8,71	7,13	8,65	7,65	167
			Exterior	23,65	-15,35	1,99	7,43	2,15	4,65	470
			Global	28,65	-15,35	3,75	7,92	4,65	4,65	637

Tabela C.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]	int/ext [dB]
Térreo	35,84	9,48	23,84	6,22	23,84	23,84	442	N/A	N/A
1º	32,84	6,65	21,44	5,37	21,65	20,84	239	-2,40	N/A
2º	34,84	3,65	18,36	5,65	18,22	17,84	419	-3,08	N/A
3º	35,84	3,48	21,70	6,15	21,65	19,65	1647	3,34	6,02
4º	35,84	-0,52	18,97	6,97	18,84	19,48	2094	-2,73	4,74
5º	35,84	-15,35	12,17	8,27	12,48	9,48	1588	-6,80	5,61
6º	35,84	-28,35	8,99	11,52	9,65	9,48	1936	-3,18	9,29
7º	33,84	-34,35	6,56	10,71	7,62	4,65	2471	-2,43	3,97
8º	33,84	-31,35	1,32	10,84	3,48	9,48	2436	-5,24	3,95
9º	31,48	-34,35	4,81	10,16	4,65	4,65	1545	3,49	10,04
10º	31,84	-19,20	4,68	8,95	4,62	4,62	3639	-0,13	8,98
Total	35,84	-34,35	9,72	11,62	10,22	9,48	18456	-1,91	6,58

C.3 Cobertura

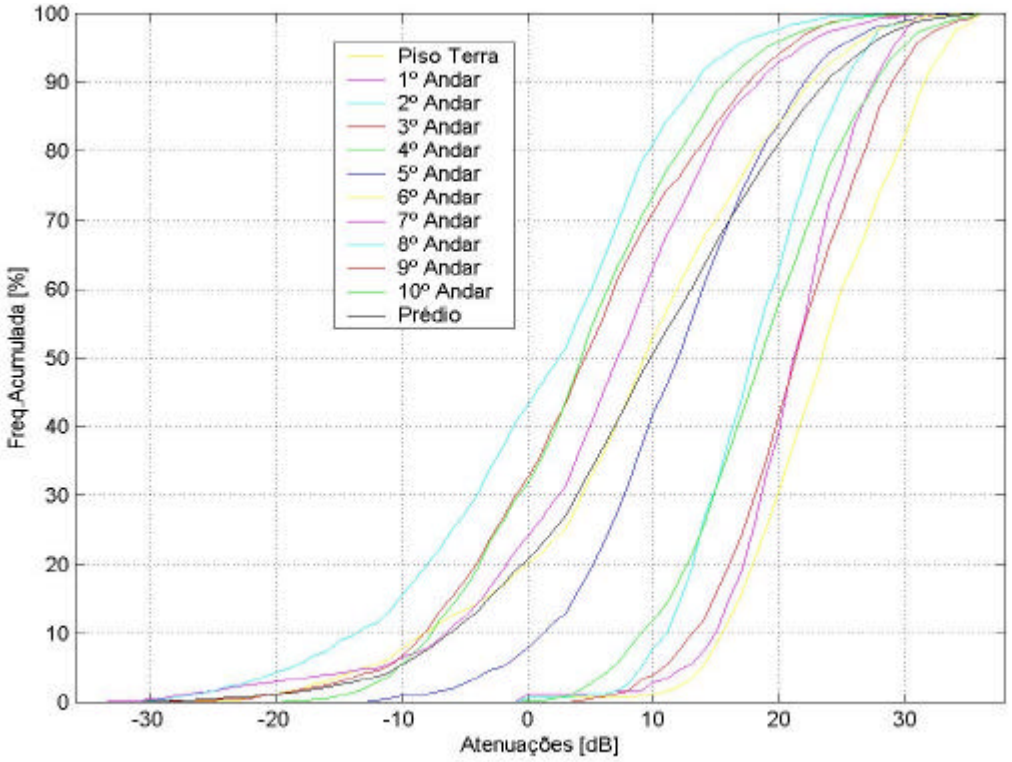


Figura C.2 – Função de Probabilidade Acumulada.

Tabela C.4 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	9,48
90	23,68
95	26,98

C.4 Testes Estatísticos

C.4.1 Distribuição

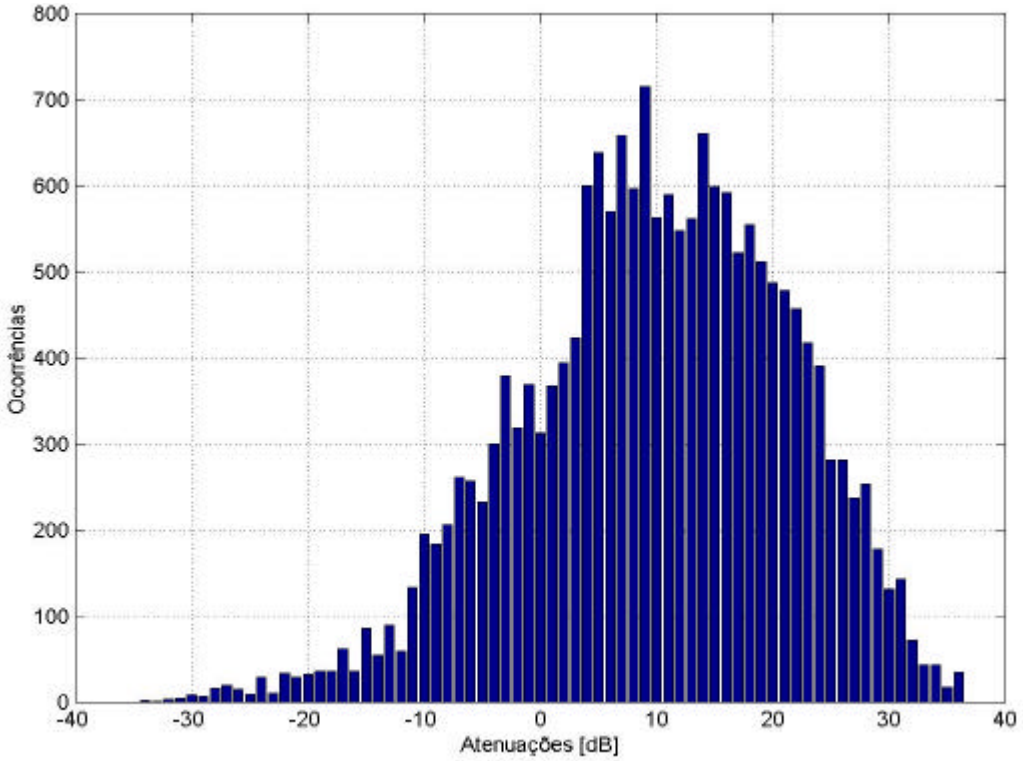


Figura C.3 – Função Densidade de Probabilidade.

C.4.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela C.5 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		12,19	11,15				
1	9,00	12,29	11,55	353,53	460,46	0,28	0,34
2	9,00	12,49	11,45	225,58	495,47	0,46	0,65
5	9,00	12,19	11,45	143,54	374,83	0,84	1,16

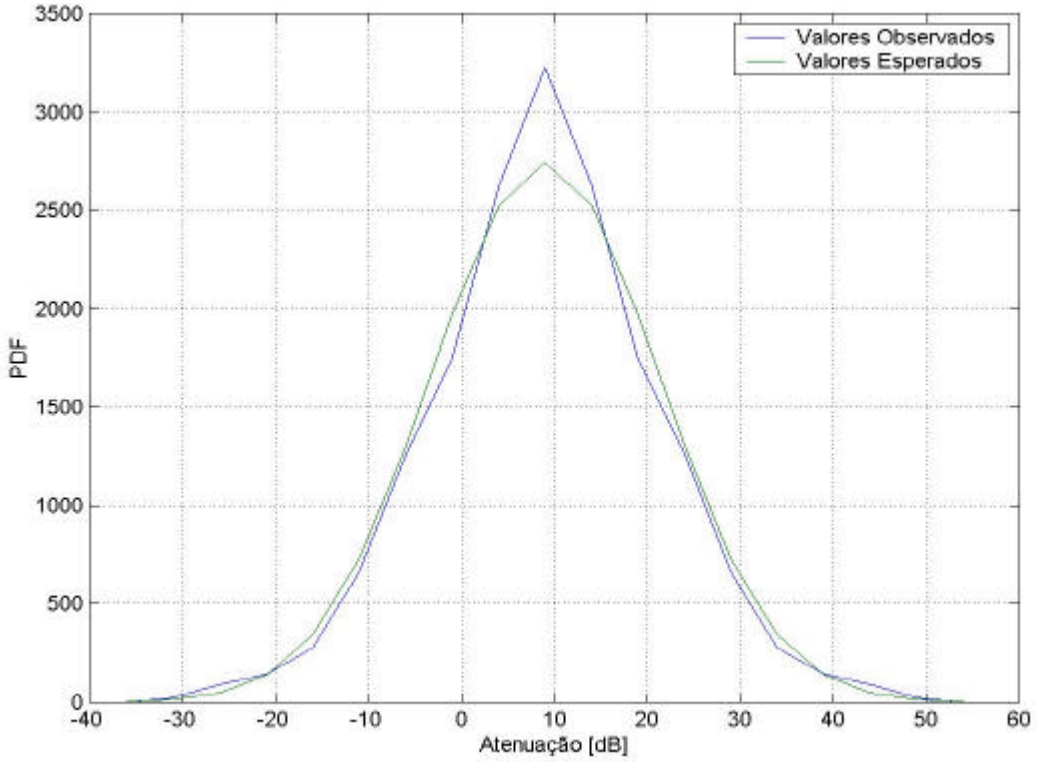


Figura C.4 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

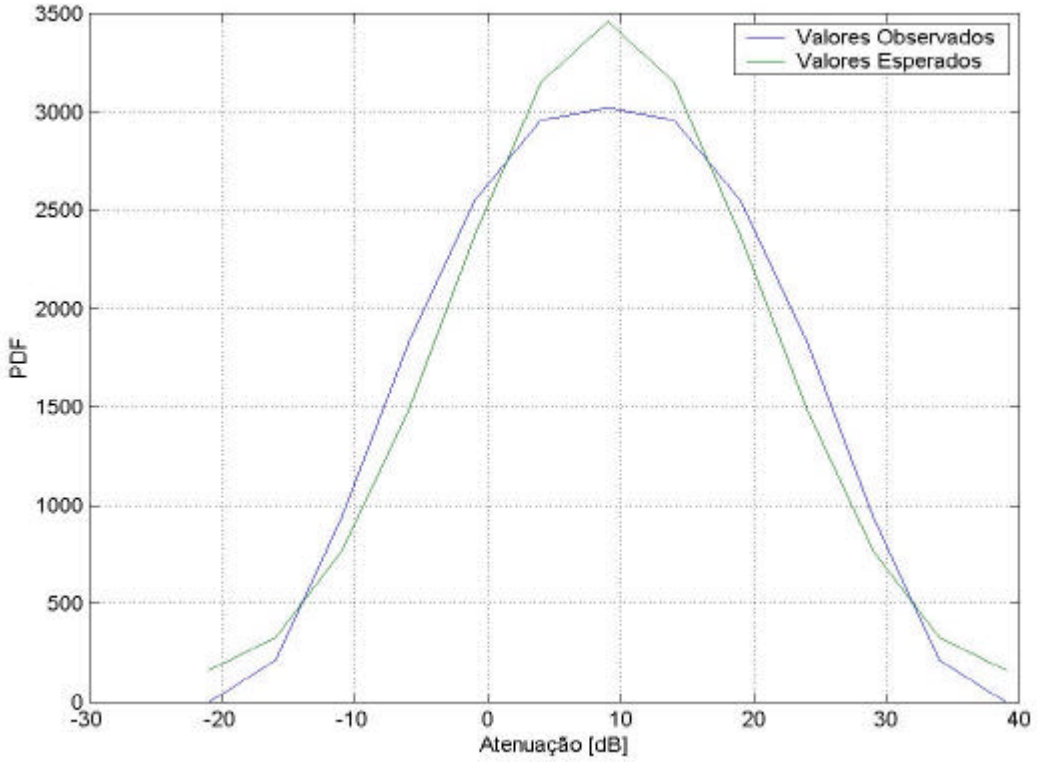


Figura C.5 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

C.4.3 Modelo de Berg

Tabela C.6 – Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg.

Local	*Tipo*	*Estações*				
		Camp_B	*Rato_B*	*PEdu_A*	*MPom_C*	*Este_C*
Térreo	Dim.Amostra	2	64	65,00	21	55
	At.Ext. [dB]	17,20	20,20	22,10	21,30	20,90
1º	Dim.Amostra	6	47	88	2	73
	At.Ext. [dB]	18,70	26,80	29,70	24,80	25,30
2º	Dim.Amostra	6	65	82	2	67
	At.Ext. [dB]	23,00	24,10	20,20	24,30	21,20
3º	Dim.Amostra	14	117	121	10	123
	At.Ext. [dB]	16,10	19,90	19,50	23,40	16,50
4º	Dim.Amostra	12	71	24	10	84
	At.Ext. [dB]	19,30	23,10	28,30	21,50	16,30
	Dim.Amostra	44	309	123	72	259
	At.Int. [dB]	20,30	24,90	27,30	24,00	23,20
5º	Dim.Amostra	74	134	27	70	73
	At.Ext. [dB]	11,40	17,00	28,80	16,70	17,20
	Dim.Amostra	10	185	168	36	215
	At.Int. [dB]	16,20	24,20	24,30	23,60	19,20
6º	Dim.Amostra	56	221	35	82	186
	At.Ext. [dB]	8,20	10,00	17,20	11,10	2,40
	Dim.Amostra	37	213	92,00	41	245
	At.Int. [dB]	11,50	19,00	23,00	18,60	9,80
7º	Dim.Amostra	145	352	55	41	345
	At.Ext. [dB]	3,30	11,40	19,70	11,10	-4,80
	Dim.Amostra	72	200	96	23	288
	At.Int. [dB]	15,60	22,80	22,50	22,10	6,40
8º	Dim.Amostra	162	513	61	89	519
	At.Ext. [dB]	4,80	9,20	17,80	11,80	-1,80
	Dim.Amostra	113	258	29	15	265
	At.Int. [dB]	11,60	15,80	25,60	18,10	1,70
9º	Dim.Amostra	233	490	57	28	491
	At.Ext. [dB]	-2,80	5,20	9,80	5,50	-8,80
	Dim.Amostra	80	231	69	3	269
	At.Int. [dB]	6,40	10,90	17,00	11,50	-5,80
10º	Dim.Amostra	289	369	4	19	370
	At.Ext. [dB]	1,10	6,10	12,40	7,10	-2,90

Tabela C.6 – Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg (continuação).

Local	Tipo	Estações				
		Camp_B	Rato_B	PEdu_A	MPom_C	Este_C
11º	Exterior [dBm]	-79,40	-77,90	-89,20	-81,00	-76,30
	Dim.Amostra	905	1138	53	409	470
	At.Ext. [dB]	2,10	3,40	19,10	2,80	2,00

Tabela C.7 – Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado.

Piso	Tipo	Média Atenuações	Curva Reg.lin.	Erro (Módulo)
Térreo	Exterior	20,30	27,40	7,10
1º	Exterior	25,00	25,10	0,00
2º	Exterior	22,50	22,70	0,00
3º	Exterior	19,00	20,40	1,30
4º	Exterior	21,70	18,10	3,60
	Interior	23,90		
5º	Exterior	18,20	15,70	2,50
	Interior	21,50		
6º	Exterior	9,70	13,40	3,60
	Interior	16,30		
7º	Exterior	8,10	11,00	2,90
	Interior	17,80		
8º	Exterior	8,30	8,70	0,40
	Interior	14,50		
9º	Exterior	1,80	6,40	4,60
	Interior	8,00		
10º	Exterior	4,70	4,00	0,70
11º	Exterior	5,80	1,70	4,10

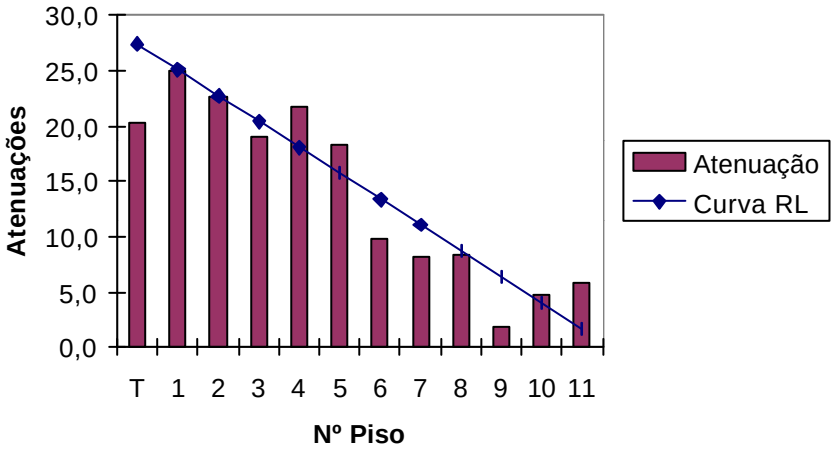


Figura C.6 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Tabela C.8 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	27,40
Wi [dB]	5,70
Gh [dB/piso]	2,30
Erro Médio [dB]	2,40

C.4.4 Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido

Tabela C.9 – Cálculo do parâmetro $L_{tm.}$

Estação	*Ângulo1 [º]*	*Ângulo2 [º]*	*Ltm1 [dB]*	*Ltm2[dB]*	*LtmTotal [dB]*
Camp_B	15,00	75,00	27,05	33,46	30,25
Rato_B	65,00	25,00	34,60	30,59	32,59
PEdu_A	30,00	30,00	32,36	32,36	32,36
MPom_C	25,00	65,00	30,59	34,60	32,59
Este_C	90,00	0,00	31,75	21,74	26,74
			Média LtmTotal		30,91

Tabela C.10 – Parâmetros do modelo.

Ws [m]	20,00
Hb [m]	30,00
Ltm [dB]	30,91
Lint [dB]	27,40
Gh [dB/piso]	2,30
Erro [dB]	5,21

D.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes ao Centro Cultural de Belém. Esse edifício foi dividido em dois edifícios distintos e foram ambos considerados como pertencentes à categoria "Integrado Baixo".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura D.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela D.1.

Edifício 1 (Blocos 1/2)

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela D.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela D.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe na Figura D.2. Por sua vez, na Tabela D.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela D.5. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras D.4 e D.5, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura D.3, ainda se pode encontrar uma função densidade de probabilidade.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg, pode ser visto nas Tabelas D.6 e D.7. Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura D.6, enquanto na Tabela D.8 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e o respectivo erro associado.

Edifício 2 (Bloco 3)

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela D.9. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela D.10, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe na Figura D.7. Por sua vez, na Tabela D.11 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela D.12. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras D.9 e D.10, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura D.8, ainda se pode encontrar uma função densidade de probabilidade.

Figura D.1 – Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

D.2 Resultados da Campanha de Medidas

Tabela D.1 – Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [ª]*	*Pot. Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Fil	C	Fil_C	290	-90,86	173	2,08	78
Alto Sto. Amaro	B	ASAm_B	120	-89,79	1 019	1,94	67
Alto Sto. Amaro	C	ASAm_C	240	-68,56	2 171	1,94	67
Alto Sto. Amaro	A	ASAm_A	0	-89,33	824	1,94	67

Blocos 1 e 2

Tabela D.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	*Estação GSM 1800*	*Sector*	*Tipo*	*Máx. [dB]*	*Mín. [dB]*	*Média [dB]*	*Desv.P. [dB]*	*Mediana [dB]*	*Moda [dB]*	*Dim. Amostra*
Térreo	Fil	C	Exterior	15,14	3,14	10,06	2,73	10,14	8,14	75
			Global	15,14	3,14	10,06	2,73	10,14	8,14	75
	Alto S. Amaro	C	Interior	37,44	9,44	28,87	6,13	30,44	32,44	899
			Exterior	37,44	2,44	18,99	6,18	19,44	15,44	652
			Global	37,44	2,44	24,72	7,85	24,44	20,44	1551
1º	Fil	C	Exterior	15,14	-6,86	4,64	5,83	4,64	3,14	78
			Global	15,14	-6,86	5,74	5,88	6,14	10,14	95
	Alto S. Amaro	B	Interior	16,21	5,21	12,33	2,58	12,21	12,21	138
			Exterior	16,21	-10,79	5,65	6,64	6,21	8,21	369
			Global	16,21	-10,79	7,46	6,53	8,21	14,21	507
	Alto S. Amaro	C	Interior	37,44	-4,56	22,42	10,17	23,44	35,44	1904
			Exterior	37,44	-22,56	14,73	11,51	15,44	15,44	2259
			Global	37,44	-22,56	18,25	11,57	19,44	15,44	4163
	Alto S. Amaro	A	Interior	16,67	-0,33	10,64	4,13	11,67	14,67	226
			Exterior	16,67	-11,33	6,09	7,85	7,67	14,67	493
			Global	16,67	-11,33	7,52	7,22	9,67	14,67	719
2º	Fil	C	Interior	15,14	-4,86	7,20	4,35	7,14	10,14	229
			Exterior	15,14	-10,86	4,14	6,22	4,14	-0,86	216
			Global	15,14	-10,86	5,72	5,55	6,14	10,14	445
	Alto S. Amaro	B	Interior	16,21	1,21	11,15	3,43	12,21	13,21	249
			Exterior	16,21	-11,79	6,11	6,25	6,21	7,21	481
			Global	16,21	-11,79	7,83	5,95	8,21	13,21	730
	Alto S. Amaro	C	Interior	37,44	-5,56	17,00	9,55	16,44	15,44	1164
			Exterior	34,44	-11,56	12,19	8,35	12,44	15,44	1534
			Global	37,44	-11,56	14,27	9,20	14,44	15,44	2698
	Alto S. Amaro	A	Interior	16,67	-3,33	10,07	4,43	10,67	12,67	311
			Exterior	16,67	-12,33	6,87	6,23	7,67	5,67	456
			Global	16,67	-12,33	8,17	5,78	8,67	12,67	767
3º	Fil	C	Interior	15,14	-7,86	3,75	4,06	3,14	2,14	315
			Exterior	12,14	-10,86	0,70	5,52	1,14	-2,86	148
			Global	15,14	-10,86	2,77	4,79	3,14	2,14	463
	Alto S. Amaro	B	Interior	16,21	-2,79	8,49	3,92	8,21	7,21	486
			Exterior	16,21	-8,79	4,77	5,79	4,21	4,21	425
			Global	16,21	-8,79	6,76	5,22	7,21	7,21	911
	Alto S. Amaro	C	Interior	27,44	-9,56	5,15	5,89	4,44	5,44	644
			Exterior	27,44	-12,56	0,82	7,39	-0,56	-4,56	488
			Global	27,44	-12,56	3,28	6,92	2,44	2,44	1132
	Alto S. Amaro	A	Interior	16,67	-2,33	8,47	4,62	8,67	11,67	497
			Exterior	16,67	-9,33	3,23	6,39	2,67	-1,33	431
			Global	16,67	-9,33	6,04	6,10	6,67	7,67	928

Tabela D.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]	int/ext [dB]
Térreo	37,44	2,44	23,72	8,40	23,44	20,44	1674	N/A	10,80
1º	37,44	-22,56	15,63	11,60	15,44	15,44	5484	-8,09	8,53
2º	37,44	-12,33	11,43	8,65	11,21	12,67	4640	-4,20	4,45
3º	27,44	-12,56	4,88	6,23	5,14	7,21	3434	-6,55	3,98
Total	37,44	-22,56	12,81	10,88	12,14	15,44	15232	-6,28	6,94

D.3 Cobertura (Blocos 1 e 2)

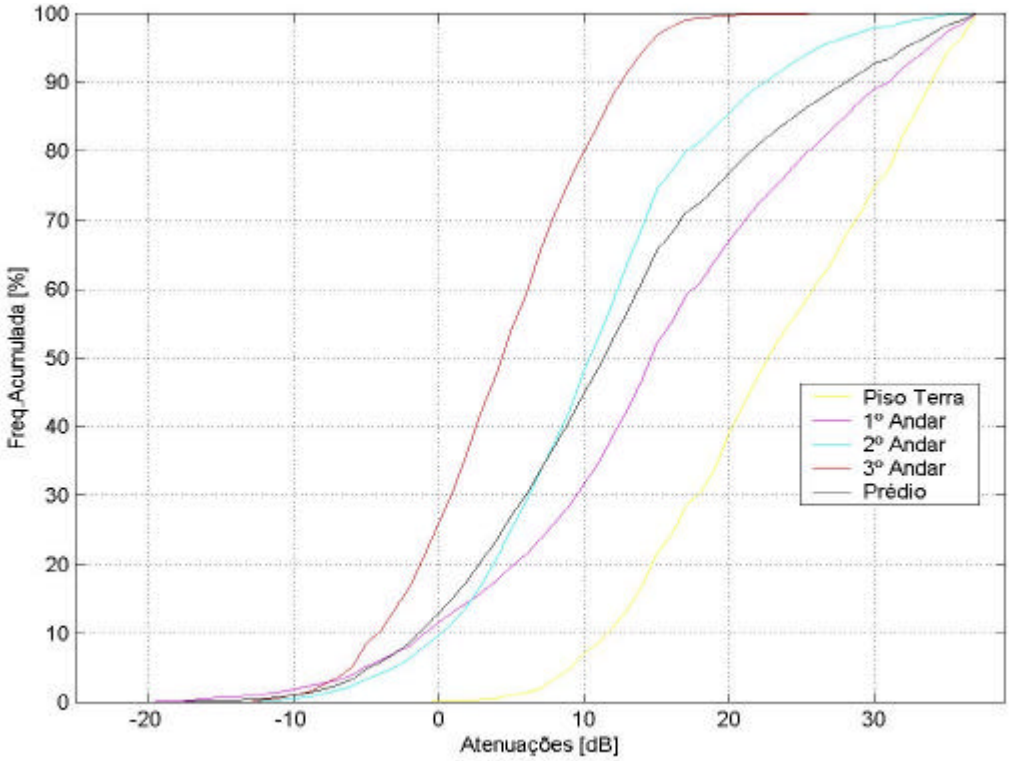


Figura D.2 – Função de Probabilidade Acumulada.

Tabela D.4 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	12,14
90	27,95
95	32,09

D.4 Testes Estatísticos (Blocos 1 e 2)

D.4.1 Distribuição

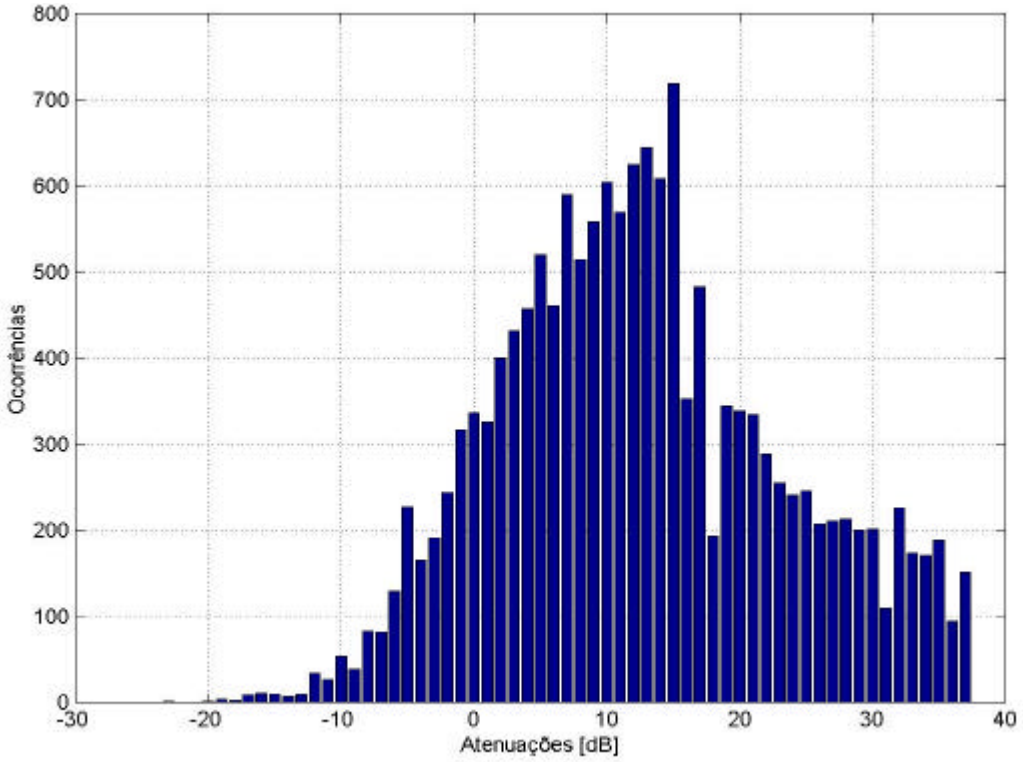


Figura D.3 – Função Densidade de Probabilidade.

D.4.2 Modelo da Dupla Normal (Blocos 1 e 2)

Tabela D.5 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		10,92	11,41				
1	15,01	11,22	12,01	232,15	977,73	0,19	0,94
2	15,01	11,02	12,51	212,92	699,97	0,41	1,22
5	15,01	11,22	11,91	136,19	673,23	0,68	2,49

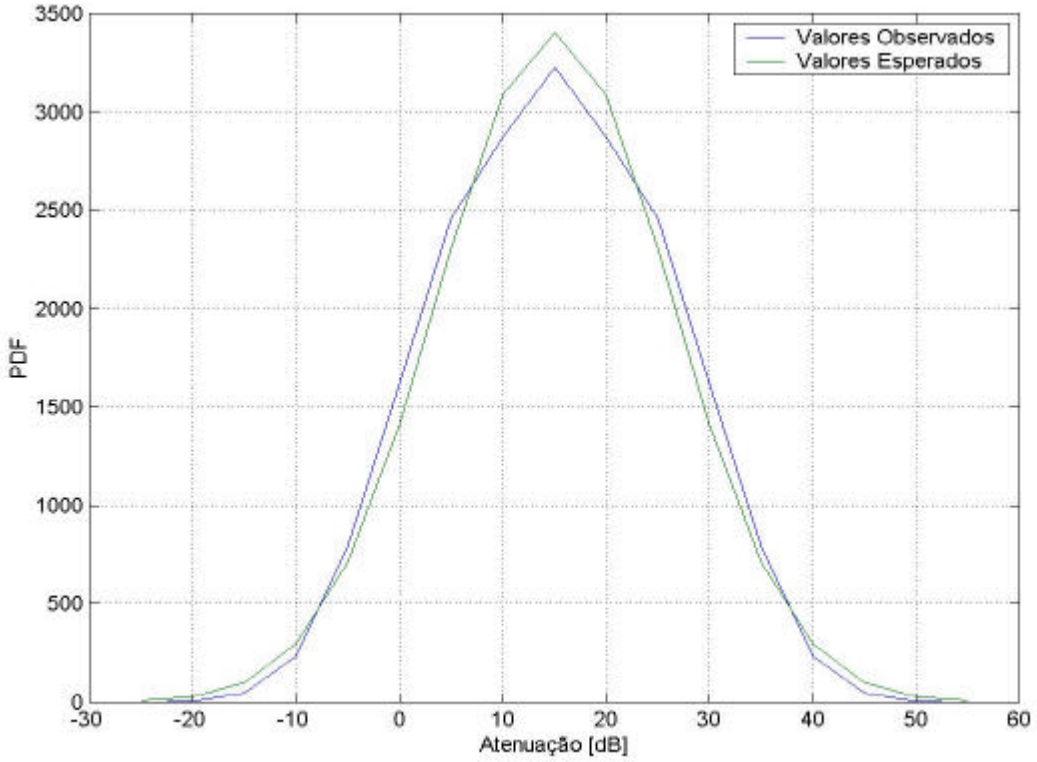


Figura D.4 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

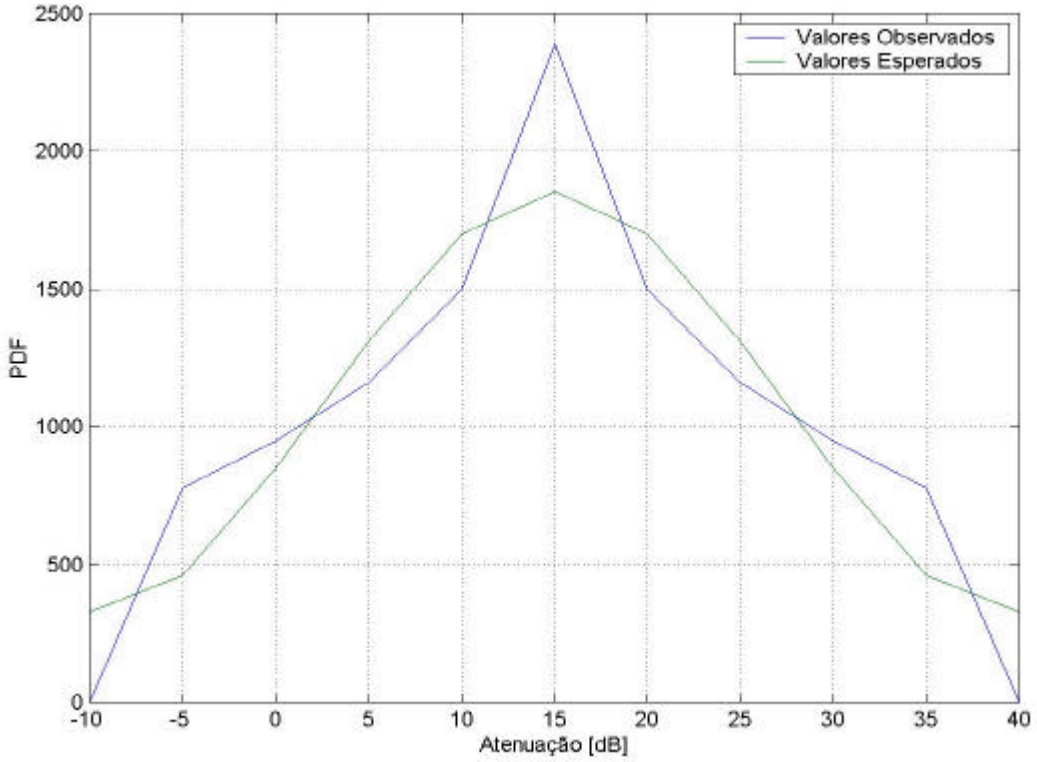


Figura D.5 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

D.4.3 Modelo de Berg (Blocos 1 e 2)

Tabela D.6 – Resultados para aferição dos parâmetros do modelo.

Local	*Tipo*	*Estações*			
		Fil_C	*ASAm_B*	*ASAm_C*	*ASAm_A*
Térreo	Dim.Amostra	75		652	
	At.Ext. [dB]	10,06		18,99	
1º	Dim.Amostra	78	369	2259	493
	At.Ext. [dB]	4,64	5,65	14,73	6,09
2º	Dim.Amostra	216	481	1534	456
	At.Ext. [dB]	4,14	6,11	12,19	6,87
3º	Dim.Amostra	148	425	488	431
	At.Ext. [dB]	0,70	4,77	0,82	3,23

Tabela D.7 – Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado.

Piso	*Tipo*	*Média Atenuações*	*Curva Reg.lin.*	*Erro (Módulo)*
Térreo	Exterior	14,53	13,54	0,99
1º	Exterior	7,78	9,85	2,07
2º	Exterior	7,33	6,16	1,17
3º	Exterior	2,38	2,47	0,09

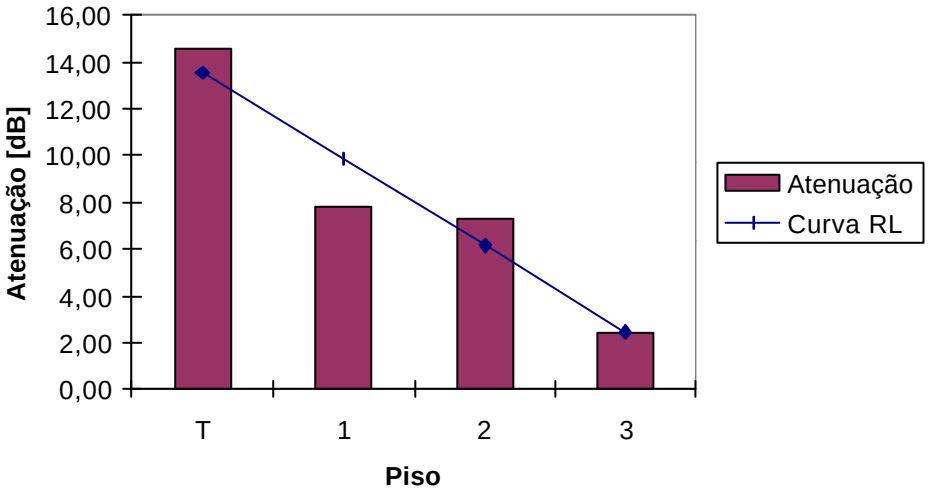


Figura D.6 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Tabela D.8 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	13,54
Gh [dB/piso]	3,69
Erro Médio [dB]	1,08

Bloco 3

D.5 Resultados da Campanha de Medidas (Bloco 3)

Tabela D.9 – Atenuações interiores medidas.

Piso	*Estação GSM 1800*	*Sector*	*Tipo*	*Máx. [dB]*	*Mín. [dB]*	*Média [dB]*	*Desv.P. [dB]*	*Mediana [dB]*	*Moda [dB]*	*Dim. Amostra*
Térreo	Alto S. Amaro	C	Interior	37,44	15,44	27,64	4,81	27,44	25,44	386
			Exterior	37,44	12,44	23,44	4,77	23,44	21,44	427
			Global	37,44	12,44	25,43	5,23	25,44	25,44	813
1º	Alto S. Amaro	C	Interior	37,44	5,44	29,17	6,16	30,44	32,44	1926
			Exterior	35,44	5,44	22,14	5,31	22,44	23,44	277
			Global	37,44	5,44	28,29	6,49	29,44	32,44	2203
2º	Alto S. Amaro	C	Interior	37,44	25,44	33,81	2,82	34,44	37,44	322
			Global	37,44	25,44	33,81	2,82	34,44	37,44	322

Tabela D.10 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]	int/ext [dB]
Térreo	37,44	12,44	24,78	5,90	24,44	25,44	857	N/A	4,20
1º	37,44	5,44	28,00	6,82	29,44	32,44	2241	3,22	7,03
2º	37,44	25,44	33,40	4,66	34,44	37,44	326	5,40	N/A
Total	37,44	5,44	27,71	6,82	28,44	32,44	3424	4,31	5,62

D.6 Cobertura (Bloco 3)

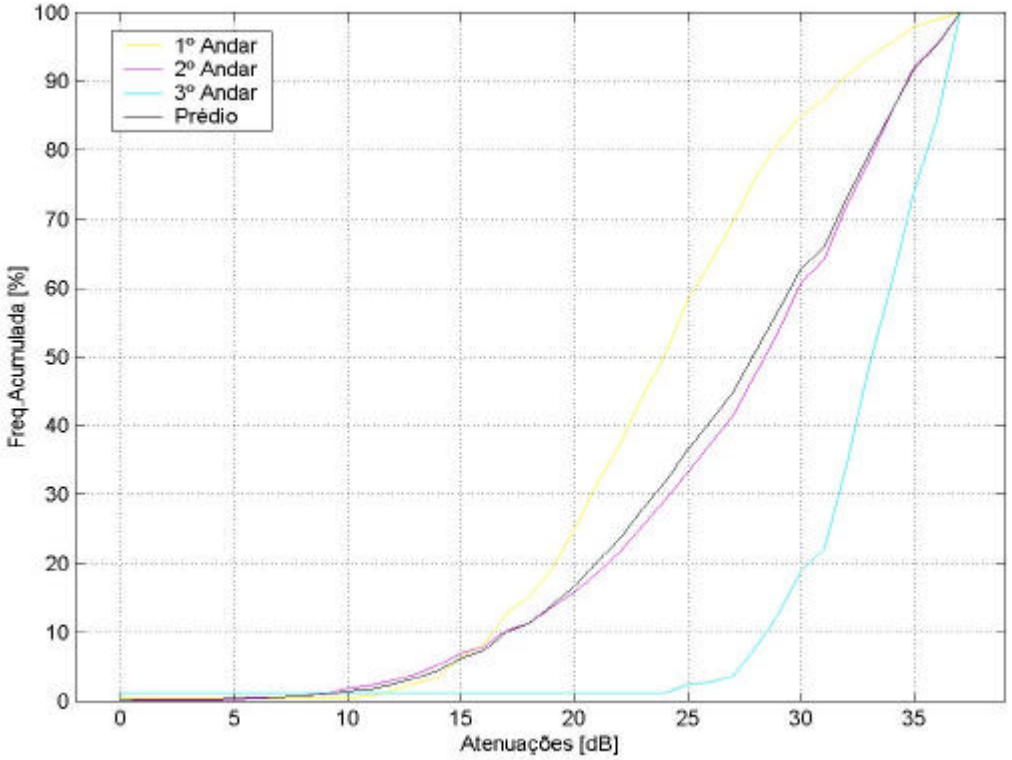


Figura D.7 – Função de Probabilidade Acumulada.

Tabela D.11 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	28,44
90	34,68
95	35,89

D.7 Testes Estatísticos

D.7.1 Distribuição

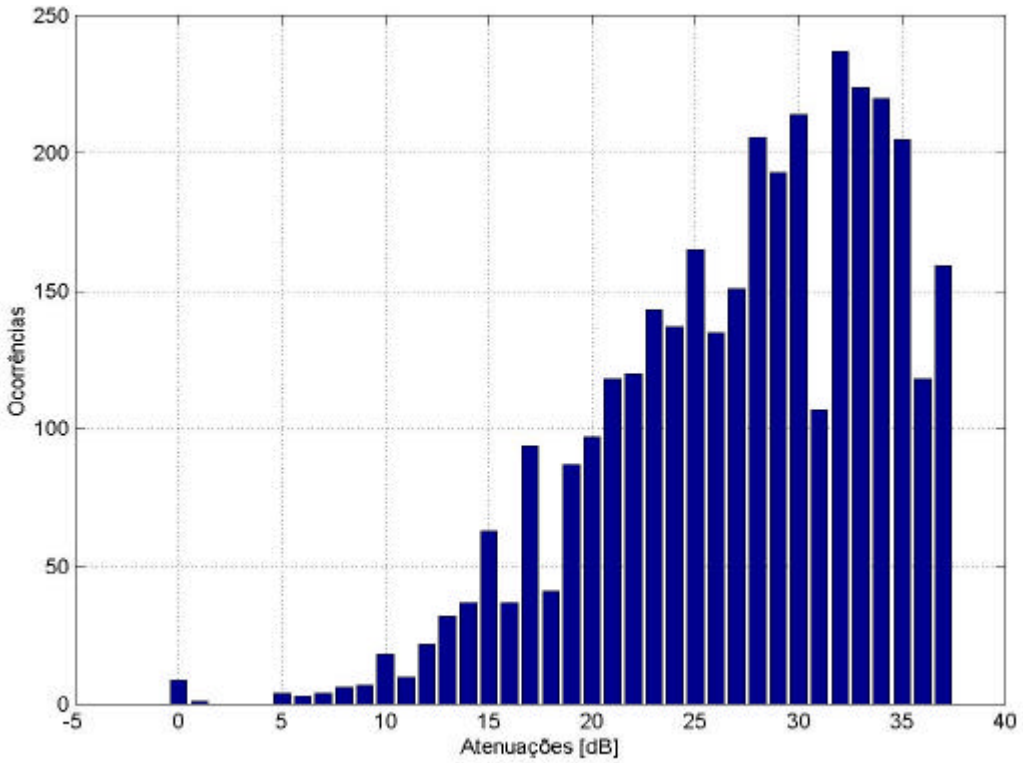


Figura D.8 – Função Densidade de Probabilidade.

D.7.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela D.12 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal e respectivos erros obtidos para o teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		9,42	3,29				
1	32,02	10,32	3,29	181,32	186,94	0,43	2,51
2	32,02	9,72	3,69	56,00	81,05	0,29	4,49
5	32,02	9,72	3,19	15,28	26,60	0,59	2,06

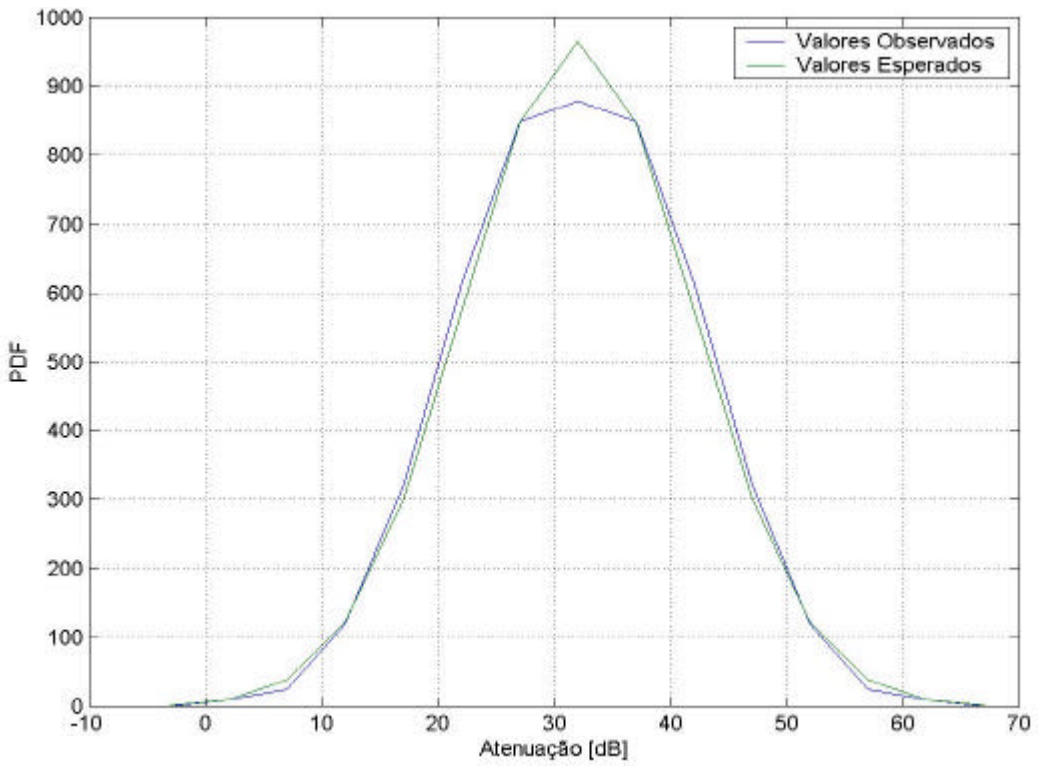


Figura D.9 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

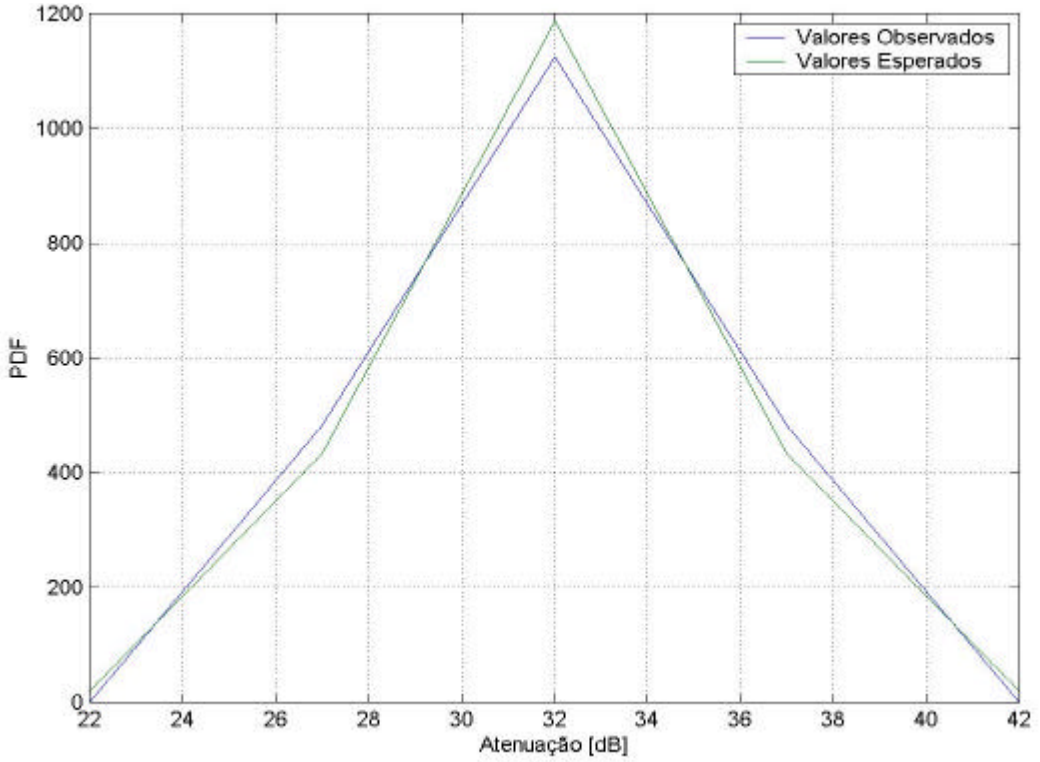


Figura D.10 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

E.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes ao edifício situado na Avenida da República. Esse edifício foi considerado como pertencendo à categoria "Integrado Alto".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura E.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela E.1.

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela E.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela E.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe na Figura E.2. Por sua vez, na Tabela E.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela E.5. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras E.4 e E.5, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura E.3, ainda se pode encontrar uma função densidade de probabilidade.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg, pode ser visto nas Tabelas E.6 e E.7. Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura E.6, enquanto na Tabela E.8 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e respectivo erro associado.

Nas Tabelas E.9 e E.10 se encontram os valores para a aplicação do Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido.

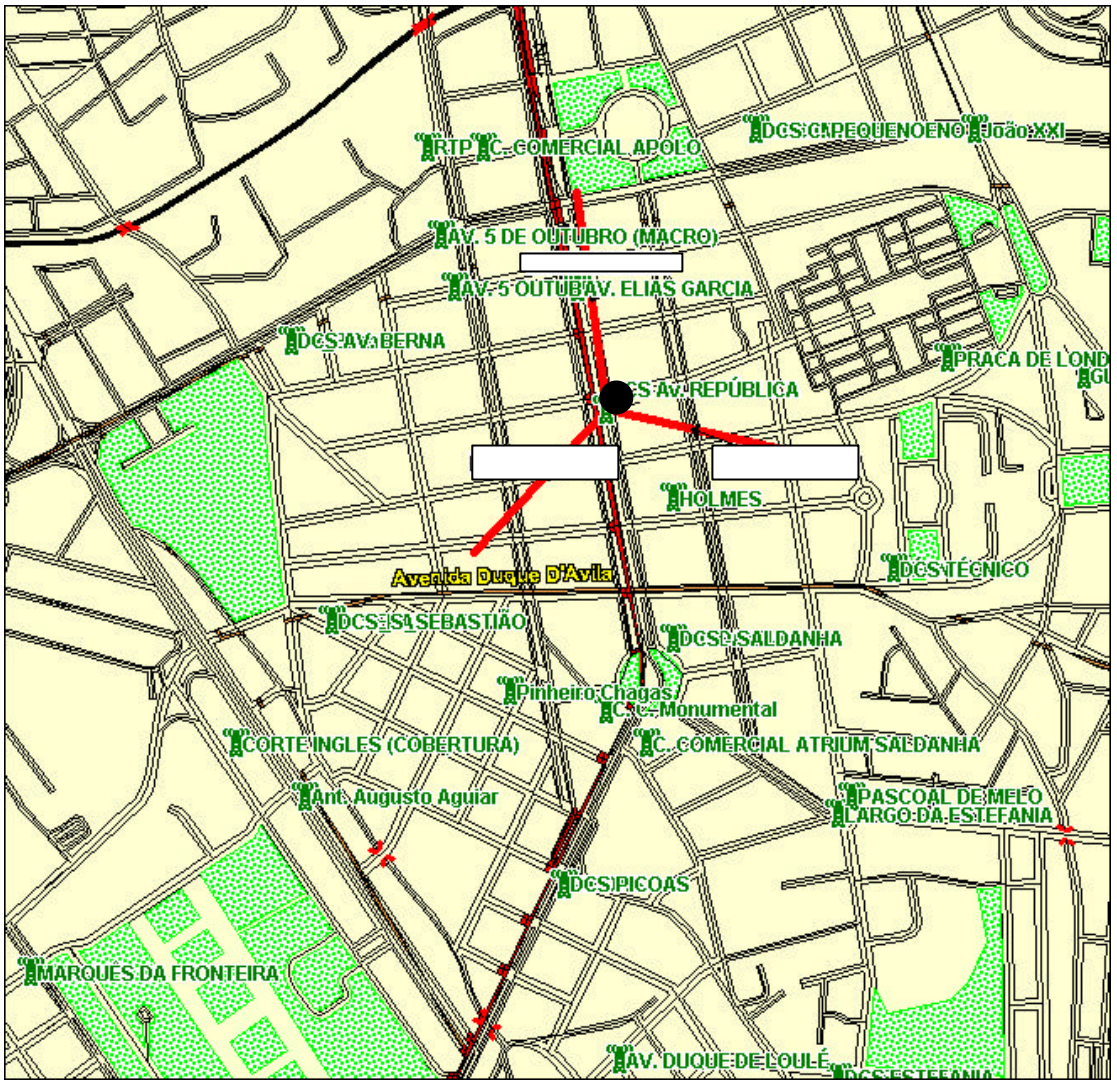


Figura E.1 – Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

E.2 – Resultados da Campanha de Medidas

Tabela E.1 – Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [ª]*	*Pot. Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Campo Pequeno	B	Cpeq_B	100	-77,29	122	0,57	27
Saldanha	B	Sald_B	290	-66,76	189	0,39	163
São Sebastião	A	Sseb_A	0	-82,70	56	0,60	233
Saldanha	A	Sald_A	210	-68,88	185	0,39	163
São Sebastião	B	Sseb_B	120	-82,90	26	0,60	233

Tabela E.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
Térreo	Saldanha	B	Exterior	36,24	18,24	25,89	4,20	25,24	23,24	52
			Global	39,24	18,24	28,36	5,06	28,24	23,24	84
	Saldanha	A	Global	37,12	13,12	26,83	5,96	27,62	28,12	62
3º	C.Pequeno	B	Interior	28,71	11,71	20,12	3,80	19,71	19,71	123
			Exterior	27,71	4,71	13,90	3,79	13,71	15,71	242
			Global	28,71	4,71	16,00	4,80	15,71	15,71	365
	Saldanha	B	Interior	39,24	19,24	31,26	4,63	30,74	34,24	152
			Exterior	38,24	8,24	23,22	5,43	23,24	23,24	298
			Global	39,24	8,24	25,93	6,42	25,24	23,24	450
	São Sebastião	A	Interior	23,30	10,30	18,61	3,49	19,30	21,30	90
			Exterior	23,30	3,30	13,96	4,08	14,30	14,30	282
			Global	23,30	3,30	15,08	4,42	15,30	14,30	372
	Saldanha	A	Interior	37,12	17,12	27,79	5,05	27,12	24,12	153
			Exterior	34,12	10,12	20,04	4,96	20,12	17,12	279
			Global	37,12	10,12	22,79	6,22	22,12	21,12	432
4º	C.Pequeno	B	Interior	25,71	6,71	17,48	4,07	16,71	16,71	82
			Exterior	22,71	-3,29	11,96	4,78	11,71	12,71	173
			Global	25,71	-3,29	13,73	5,23	13,71	12,71	255
	Saldanha	B	Interior	38,24	17,24	29,00	4,74	29,24	29,24	123
			Exterior	39,24	11,24	24,37	5,28	24,24	23,24	238
			Global	39,24	11,24	25,95	5,55	25,24	23,24	361
	São Sebastião	A	Interior	23,30	8,30	16,79	3,69	17,30	18,30	122
			Exterior	23,30	-0,70	11,69	5,15	11,30	11,30	246
			Global	23,30	-0,70	13,38	5,29	14,30	14,30	368
	Saldanha	A	Interior	37,12	13,12	25,05	5,21	25,12	24,12	167
			Exterior	33,12	1,12	18,34	5,57	18,12	15,12	264
			Global	37,12	1,12	20,94	6,33	21,12	22,12	431
5º	C.Pequeno	B	Interior	26,71	8,71	17,17	3,82	16,71	15,71	79
			Exterior	21,71	-1,29	9,52	4,45	8,71	8,71	122
			Global	26,71	-1,29	12,52	5,63	12,71	8,71	201
	Saldanha	B	Interior	39,24	21,24	30,15	4,50	29,74	26,24	66
			Exterior	37,24	10,24	22,98	5,56	22,24	19,24	136
			Global	39,24	10,24	25,32	6,22	26,24	27,24	202
	São Sebastião	A	Interior	23,30	5,30	15,43	4,48	15,30	20,30	94
			Exterior	20,30	-2,70	7,72	5,10	7,30	7,30	172
			Global	23,30	-2,70	10,45	6,12	10,30	7,30	266
	Saldanha	A	Interior	37,12	15,12	26,25	5,26	26,12	24,12	77
			Exterior	32,12	9,12	17,95	5,43	17,12	17,12	140
			Global	37,12	9,12	20,90	6,67	20,12	17,12	217

Tabela E.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
6º	C.Pequeno	B	Interior	22,71	4,71	13,77	4,16	13,71	14,71	72
			Exterior	16,71	-5,29	5,73	4,75	5,21	1,71	150
			Global	22,71	-5,29	8,33	5,92	8,71	4,71	222
	Saldanha	B	Exterior	34,24	11,24	22,95	5,21	23,24	17,24	123
			Global	39,24	11,24	24,64	5,74	24,24	24,24	170
	São Sebastião	A	Interior	23,30	9,30	16,01	3,76	16,30	13,30	65
			Exterior	20,30	-3,70	7,21	5,75	6,30	3,30	142
			Global	23,30	-3,70	9,98	6,62	10,30	14,30	207
	Saldanha	A	Interior	37,12	14,12	24,18	4,63	23,62	22,12	68
			Exterior	29,12	5,12	15,06	4,87	14,12	14,12	160
			Global	37,12	5,12	17,78	6,36	17,12	14,12	228
7º	C.Pequeno	B	Interior	24,71	1,71	10,29	4,16	10,71	11,71	78
			Exterior	16,71	-8,29	2,54	4,83	2,71	1,71	147
			Global	24,71	-8,29	5,23	5,90	4,71	1,71	225
	Saldanha	B	Exterior	30,24	11,24	18,78	4,20	18,24	17,24	77
			Global	37,24	11,24	20,80	5,24	21,24	17,24	108
	São Sebastião	A	Interior	21,30	3,30	11,77	4,96	11,30	10,30	65
			Exterior	15,30	-3,70	4,83	4,12	5,30	5,30	159
			Global	21,30	-3,70	6,84	5,39	6,30	5,30	224
	Saldanha	A	Exterior	25,12	6,12	15,16	4,02	14,12	13,12	101
			Global	33,12	6,12	16,80	4,89	16,12	13,12	138
8º	C.Pequeno	B	Interior	20,71	2,71	10,37	3,83	10,71	10,71	105
			Exterior	16,71	-13,29	1,86	5,56	2,71	4,71	252
			Global	20,71	-13,29	4,36	6,42	4,71	4,71	357
	Saldanha	B	Interior	36,24	15,24	26,56	5,03	26,24	27,24	63
			Exterior	31,24	4,24	19,04	5,92	19,24	15,24	77
			Global	36,24	4,24	22,42	6,67	23,24	15,24	140
	São Sebastião	A	Interior	23,30	2,30	10,96	4,31	10,30	9,30	122
			Exterior	16,30	-2,70	5,68	4,03	6,30	3,30	147
			Global	23,30	-2,70	8,07	4,92	8,30	8,30	269
	Saldanha	A	Interior	32,12	8,12	18,41	5,76	17,12	17,12	185
			Exterior	28,12	-2,88	12,95	6,69	14,12	14,12	199
			Global	32,12	-2,88	15,58	6,83	15,12	14,12	384
9º	C.Pequeno	B	Interior	13,71	-4,29	6,52	3,84	6,71	6,71	69
			Exterior	13,71	-14,29	1,39	6,07	2,71	2,71	232
			Global	13,71	-14,29	2,57	6,03	3,71	6,71	301
	Saldanha	B	Interior	29,24	7,24	14,29	4,47	14,24	12,24	131
			Exterior	27,24	-0,76	11,60	7,26	10,24	7,24	70
			Global	29,24	-0,76	13,35	5,73	13,24	12,24	201
	São Sebastião	A	Exterior	16,30	-4,70	4,30	3,95	4,30	3,30	99
			Global	16,30	-4,70	5,22	4,39	5,30	6,30	119
	Saldanha	A	Interior	22,12	-1,88	6,46	6,06	4,62	2,12	168
			Exterior	28,12	-9,88	7,19	9,50	5,12	1,12	191
			Global	28,12	-9,88	6,85	8,07	5,12	2,12	359

Tabela E.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	*Estação DCS*	*Sector*	*Tipo*	*Máx. [dB]*	*Mín. [dB]*	*Média [dB]*	*Desv.P. [dB]*	*Mediana [dB]*	*Moda [dB]*	*Dim. Amostra*
10º	C.Pequeno	B	Exterior	10,71	-14,29	-0,76	4,68	-1,29	-1,29	78
			Global	10,71	-14,29	-0,23	4,39	-0,29	0,71	114
	São Sebastião	A	Interior	9,30	-12,70	-4,65	5,71	-5,70	-10,70	82
			Exterior	10,30	-18,70	-5,30	7,79	-7,20	1,30	56
			Global	10,30	-18,70	-4,91	6,61	-6,70	-11,30	138

Tabela E.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]	int/ext [dB]
Térreo	39,24	9,30	24,51	7,10	24,24	23,24	213	N/A	N/A
1º	39,24	15,30	28,98	7,05	30,12	35,12	118	4,47	N/A
2º	36,24	4,30	20,35	6,60	20,12	21,24	147	-8,63	N/A
3º	39,24	3,30	20,36	7,23	19,71	17,12	1619	0,01	7,40
4º	39,24	-3,29	18,95	7,68	19,12	14,30	1415	-1,41	5,81
5º	39,24	-2,70	16,87	8,66	16,30	7,30	886	-2,08	7,32
6º	39,24	-5,29	14,70	8,81	14,12	14,12	827	-2,17	5,56
7º	37,24	-8,29	10,47	8,20	10,12	5,30	695	-4,23	2,45
8º	36,24	-13,29	11,17	8,83	11,12	14,12	1150	0,70	7,88
9º	29,24	-14,29	6,67	7,66	6,30	6,71	980	-4,50	4,30
10º	23,24	-18,70	-0,15	8,32	-0,49	0,71	302	-6,52	-2,00
Total	39,24	-18,70	14,98	9,92	15,12	14,12	8352	-2,44	4,84

E.3 Cobertura

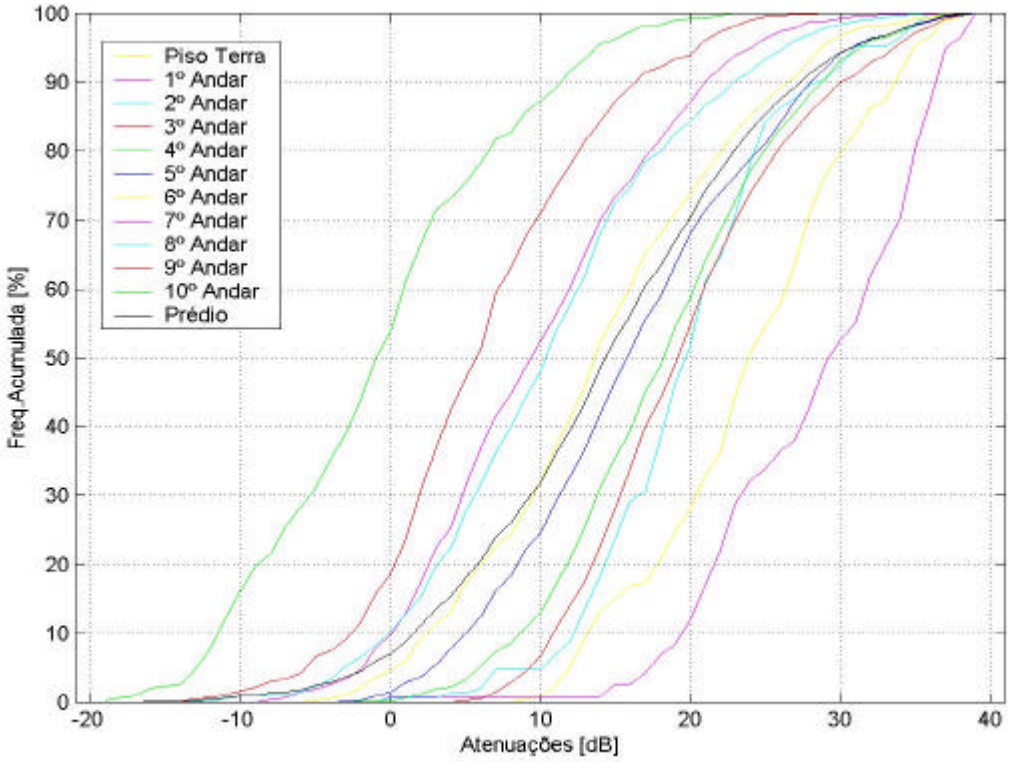


Figura E.2 – Função de Probabilidade Acumulada.

Tabela E.4 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	15,12
90	27,32
95	30,68

E.4 Testes Estatísticos

E.4.1 Distribuição

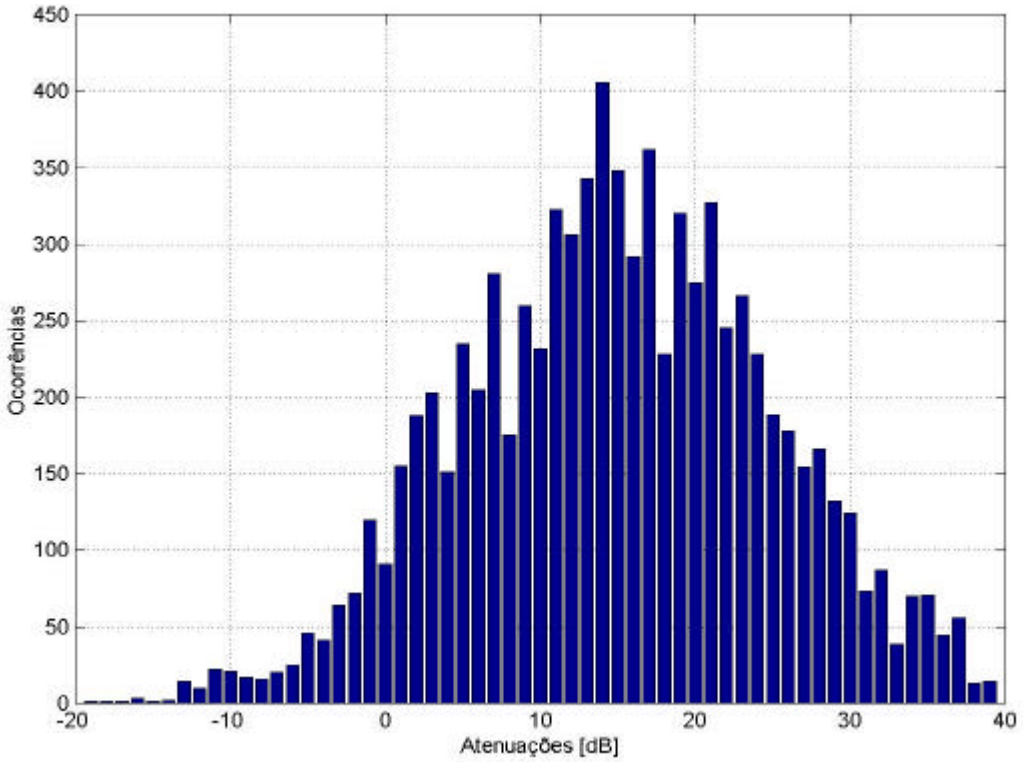


Figura E.3 – Função Densidade de Probabilidade.

E.4.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela E.5 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerdo [dB]	Desvio Padrão Direito [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		9,64	10,25				
1	14,00	9,74	10,45	154,21	195,32	0,28	0,34
2	14,00	9,64	10,75	119,54	113,37	0,46	0,65
5	14,00	9,64	10,35	42,27	45,40	0,84	1,16

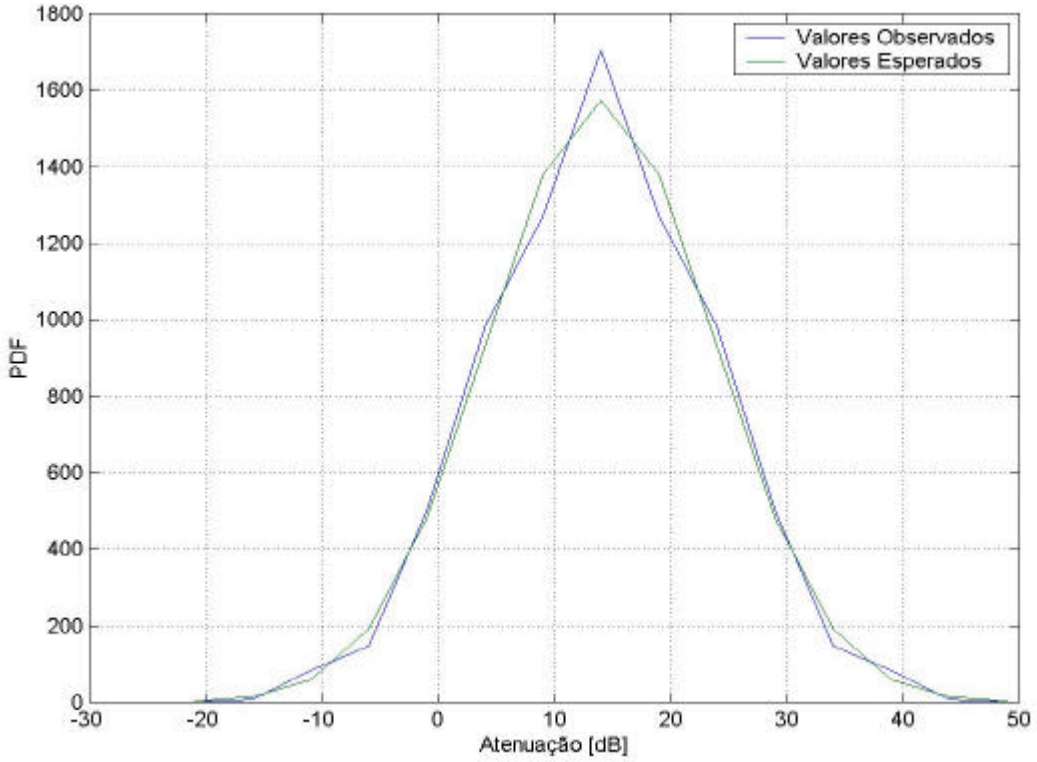


Figura E.4 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

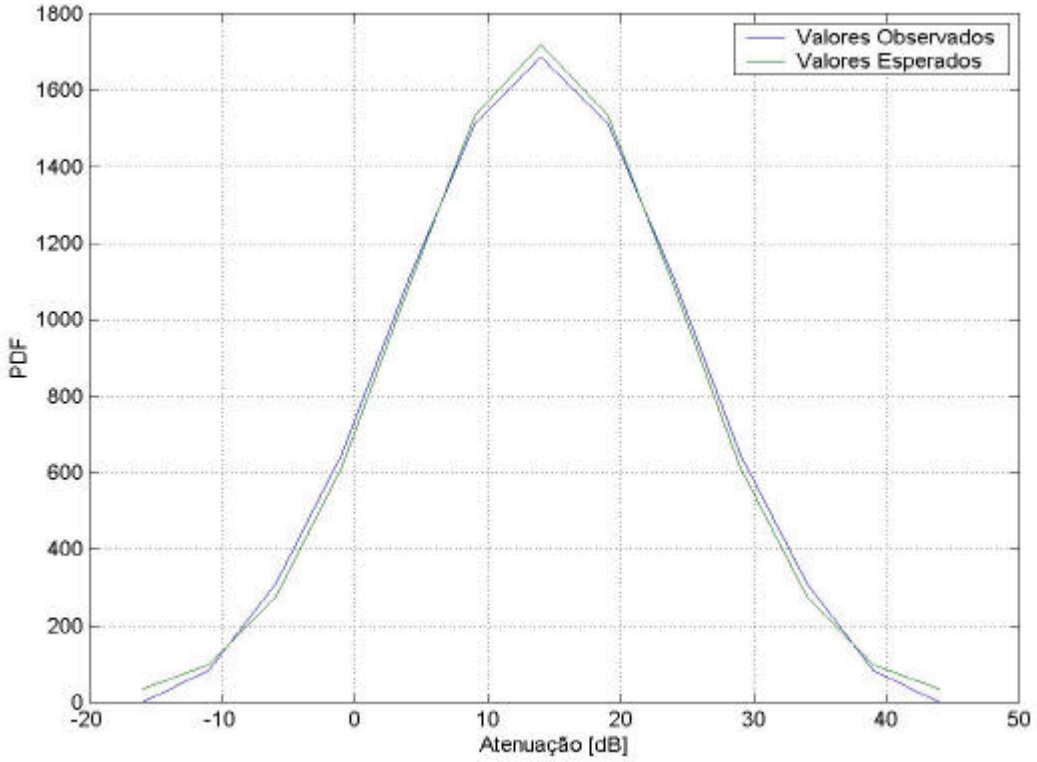


Figura E.5 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

E.4.3 Modelo de Berg

Tabela E.6 – Resultados para aferição dos parâmetros do modelo.

Local	*Tipo*	*Estações*				
		CPeq_B	*SSeb_B*	*Sald_B*	*SSeb_A*	*Sald_A*
3º	Dim.Amostra	242	173	298	282	279
	At.Ext. [dB]	13,90	11,60	23,90	13,90	19,90
	Dim.Amostra	123	28	152	90	153
	At.Int. [dB]	20,10	14,90	31,90	18,50	27,70
4º	Dim.Amostra	173	134	238	246	264
	At.Ext. [dB]	11,90	4,70	25,00	11,60	18,20
	Dim.Amostra	67	48	99	99	130
	At.Int. [dB]	16,70	10,10	28,90	16,10	24,60
5º	Dim.Amostra	122	122	136	172	140
	At.Ext. [dB]	9,50	2,70	23,60	7,60	17,80
	Dim.Amostra	55	64	43	70	57
	At.Int. [dB]	16,50	9,90	30,10	14,50	25,60
6º	Dim.Amostra	150	104	123	142	160
	At.Ext. [dB]	5,70	0,80	23,60	7,10	14,90
	Dim.Amostra	58	70	41	48	52
	At.Int. [dB]	12,90	10,40	29,60	16,00	23,80
7º	Dim.Amostra	147	76	77	159	101
	At.Ext. [dB]	2,50	-0,50	19,40	4,70	15,00
	Dim.Amostra	66	39	31	54	31
	At.Int. [dB]	10,00	6,80	26,50	10,60	20,40
8º	Dim.Amostra	252	121	77	147	199
	At.Ext. [dB]	1,80	-2,30	19,70	5,60	12,80
	Dim.Amostra	92	44	60	114	170
	At.Int. [dB]	9,90	5,00	27,20	10,70	18,10
9º	Dim.Amostra	232	109	70	99	191
	At.Ext. [dB]	1,40	0,80	12,30	4,20	7,10
	Dim.Amostra	69	11	131	20	168
	At.Int. [dB]	6,50	2,90	15,00	9,70	6,30

Tabela E.7 – Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado.

Piso	*Tipo*	*Média Atenuações*	*Curva Reg.lin.*	*Erro (Módulo)*
3º	Exterior	16,60	16,20	0,40
	Interior	22,60		
4º	Exterior	14,20	14,30	0,10
	Interior	19,20		
5º	Exterior	12,20	12,50	0,30
	Interior	19,30		
6º	Exterior	10,40	10,60	0,20
	Interior	18,50		
7º	Exterior	8,20	8,70	0,60
	Interior	14,80		
8º	Exterior	7,50	6,90	0,60
	Interior	14,10		
9º	Exterior	5,10	5,00	0,10
	Interior	8,00		

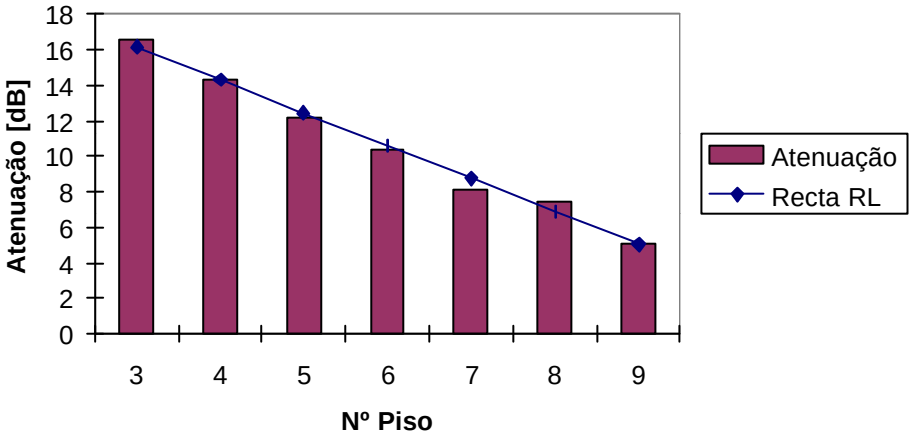


Figura E.6 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Tabela E.8 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	21,90
Wi [dB]	6,00
Gh [dB/piso]	1,90
Erro Médio [dB]	0,30

E.4.4 Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido

Tabela E.9 – Cálculo do parâmetro $L_{tm.}$

Estação	*Ângulo [º]*	*Ltm [dB]*
CPeq_B	40	32,85
SSeb_B	70	32,27
Sald_C	0	19,98
SSeb_A	70	32,27
Sald_C	0	19,98
	Média LtmTotal	27,47

Tabela E.10 – Parâmetros do modelo.

Ws [m]	30,00
Hb [m]	30,00
Ltm [dB]	27,47
Lint [dB]	21,90
Gh [dB/piso]	1,90
Erro [dB]	10,57

F.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes ao edifício situado no Campo Mártires da Pátria. Esse edifício foi considerado como pertencendo à categoria "Integrado Baixo".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura F.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela F.1.

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela F.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela F.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe na Figura F.2. Por sua vez, na Tabela F.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos. Uma comparação entre as duas bandas do sistema GSM, encontra-se na Figura F.3, enquanto que na Tabela F.5 estão representados os valores de atenuação para valores de cobertura típicos para as duas bandas e respectivas diferenças. Os valores de atenuação para a banda de GSM 900 foram obtidos do projecto IST/Telecel 900.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela F.6. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras F.5 e F.6, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 2 (gaussiana esquerda) e 5 (gaussiana direita). Na Figura F.4, ainda se pode encontrar uma função densidade de probabilidade.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg, pode ser visto nas Tabelas F.7 e F.8. Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura F.7, enquanto na Tabela F.9 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e o respectivo erro associado.

Nas Tabelas F.10 e F.11 se encontram os valores para a aplicação do Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido.

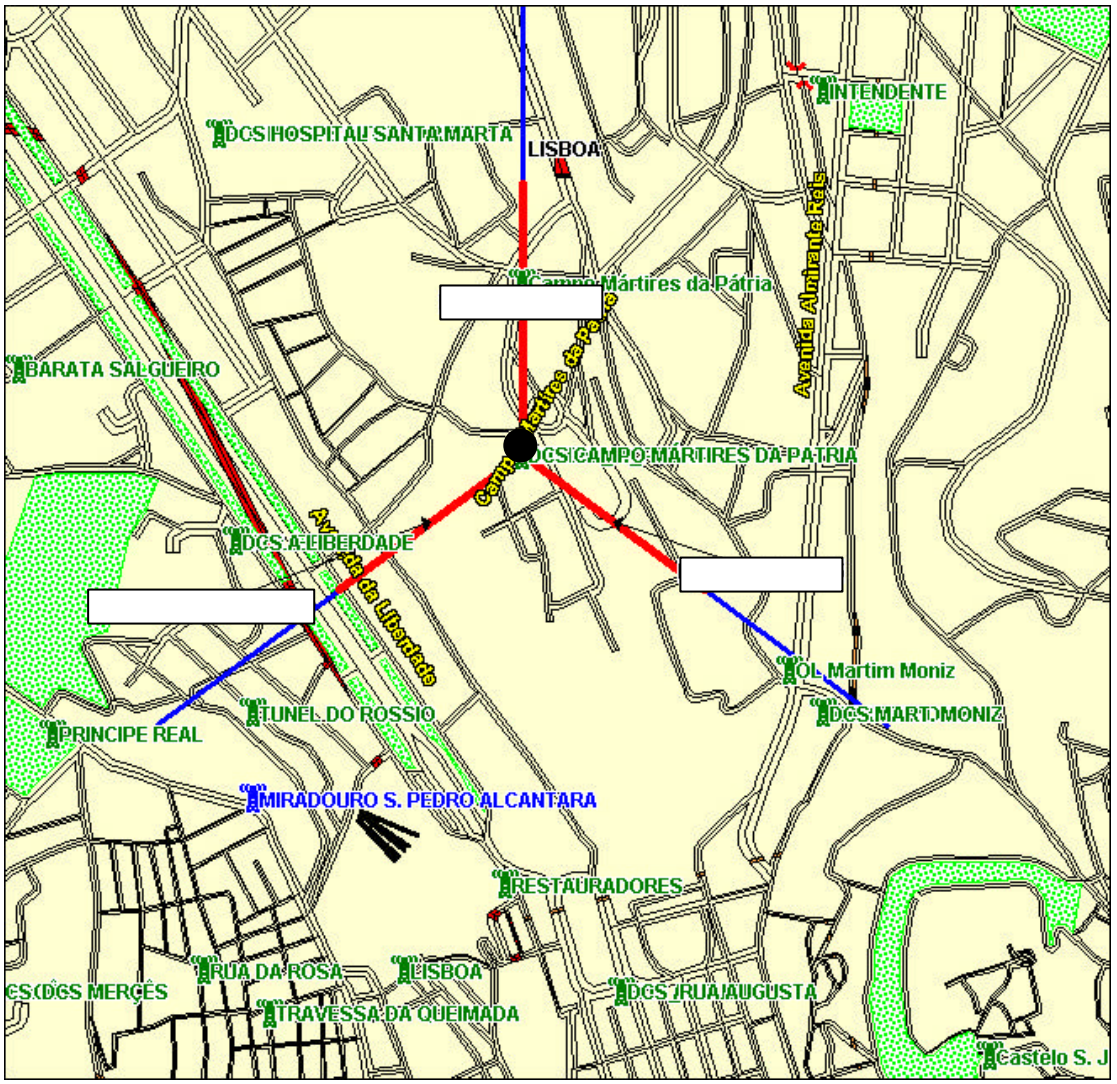


Figura F.1 – Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

F.2 Resultados da Campanha de Medidas

Tabela F.1 – Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [º]*	*Pot. Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Técnico	C	Tecn_C	240	-88,61	123	1,72	2
Av. Liberdade	B	Alib_B	130	-84,92	91	0,45	252

Tabela F.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	*Estação GSM 1800*	*Sector*	*Tipo*	*Máx. [dB]*	*Mín. [dB]*	*Média [dB]*	*Desv.P. [dB]*	*Mediana [dB]*	*Moda [dB]*	*Dim. Amostra*
1º	Técnico	C	Exterior	17,39	3,39	14,35	2,67	15,39	17,39	68
			Global	18,39	3,39	14,40	2,69	15,39	17,39	69
	Av. Liberdade	B	Exterior	21,08	-0,92	16,54	4,00	17,08	21,08	172
			Global	21,08	-0,92	16,72	3,91	18,08	21,08	191
2º	Técnico	C	Exterior	17,39	1,39	11,61	3,91	12,39	10,39	79
			Global	17,39	0,39	11,47	4,09	12,39	10,39	80
	Av. Liberdade	B	Interior	21,08	-1,92	13,37	6,77	16,08	19,08	102
			Exterior	21,08	-13,92	6,15	6,15	6,08	9,08	620
			Global	21,08	-13,92	7,17	6,72	7,08	9,08	722
3º	Técnico	C	Exterior	17,39	3,39	12,63	3,14	13,39	12,39	71
			Global	17,39	3,39	12,38	3,19	13,39	12,39	77
	Av. Liberdade	B	Interior	21,08	-4,92	7,91	7,32	9,08	12,08	91
			Exterior	21,08	-0,92	10,47	5,41	11,08	12,08	56
			Global	21,08	-4,92	8,89	6,75	10,08	12,08	147
4º	Técnico	C	Interior	13,39	-3,61	2,65	3,95	2,39	0,39	70
			Exterior	12,39	-4,61	2,59	3,59	2,39	1,39	87
			Global	13,39	-4,61	2,61	3,74	2,39	1,39	157
	Av. Liberdade	B	Exterior	14,08	-13,92	1,50	5,52	1,08	-0,92	241
			Global	14,08	-13,92	1,88	5,34	2,08	-0,92	281

Tabela F.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]	int/ext [dB]
Térreo	21,08	6,08	14,15	3,78	14,39	13,08	73	N/A	N/A
1º	21,08	-0,92	16,11	3,76	16,73	21,08	260	1,96	N/A
2º	21,08	-13,92	7,60	6,63	8,08	9,08	802	-8,51	6,60
3º	21,08	-4,92	10,09	6,01	11,39	12,08	224	2,49	-3,77
4º	14,08	-13,92	2,14	4,84	2,08	1,39	438	-7,95	0,86
Total	21,08	-13,92	8,07	7,24	8,08	12,08	1797	-3,00	1,23

F.3 Cobertura

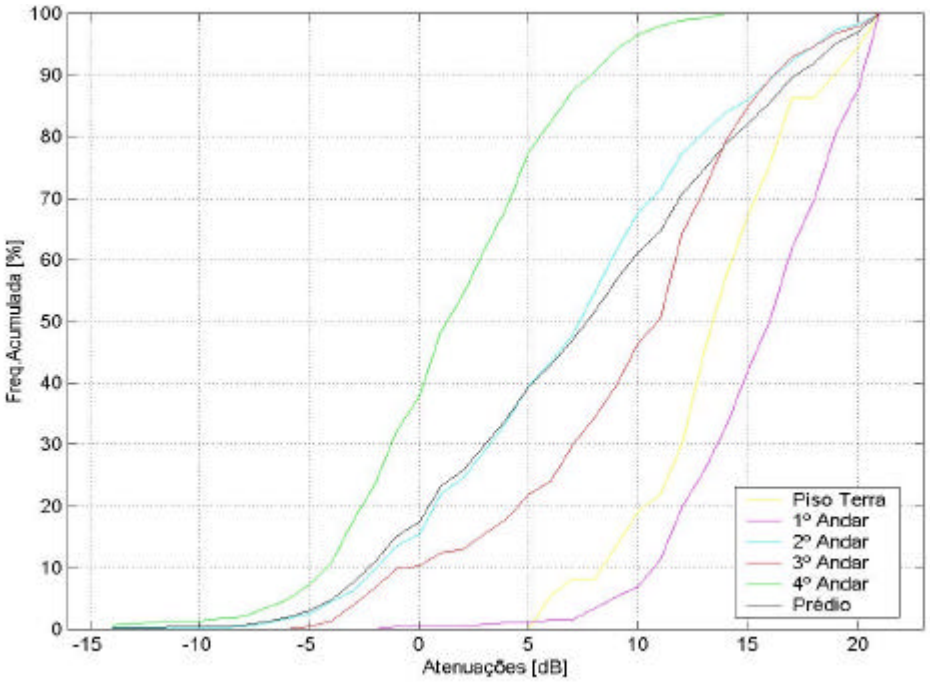


Figura F.2 – Função de Probabilidade Acumulada.

Tabela F.4 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	8,08
90	17,15
95	18,92

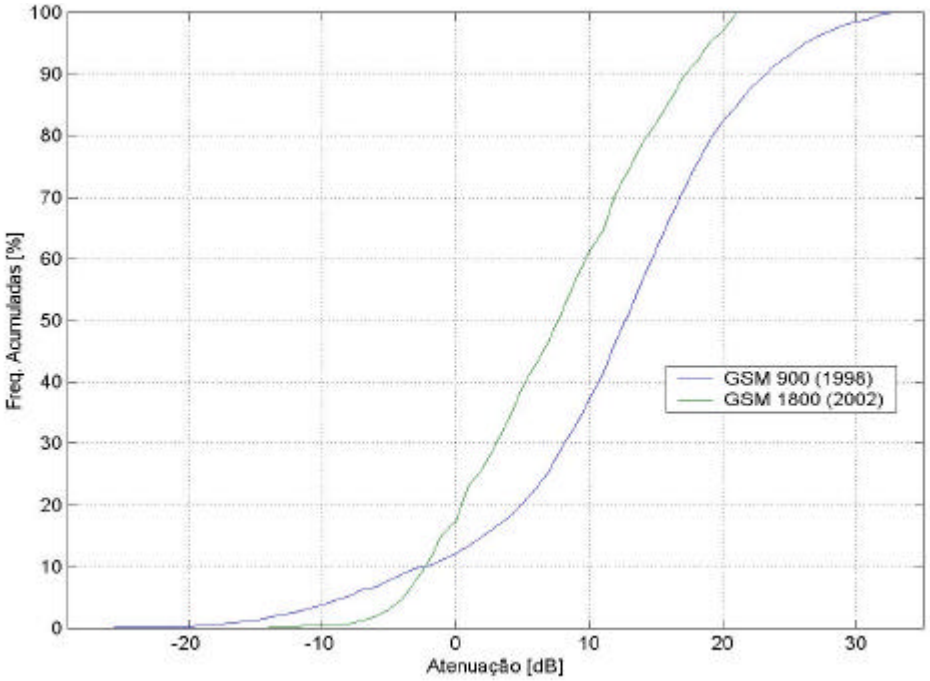


Figura F.3 – Comparação entre as duas bandas do sistema GSM.

Tabela F.5 – Comparação entre as duas bandas.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação GSM 900 [dB]	Atenuação GSM 1800 [dB]	Diferença [dB]
50	12,54	8,08	-4,46
90	23,40	17,15	-6,25
95	26,00	18,92	-7,08

F.4 Testes Estatísticos

F.4.1 Distribuição

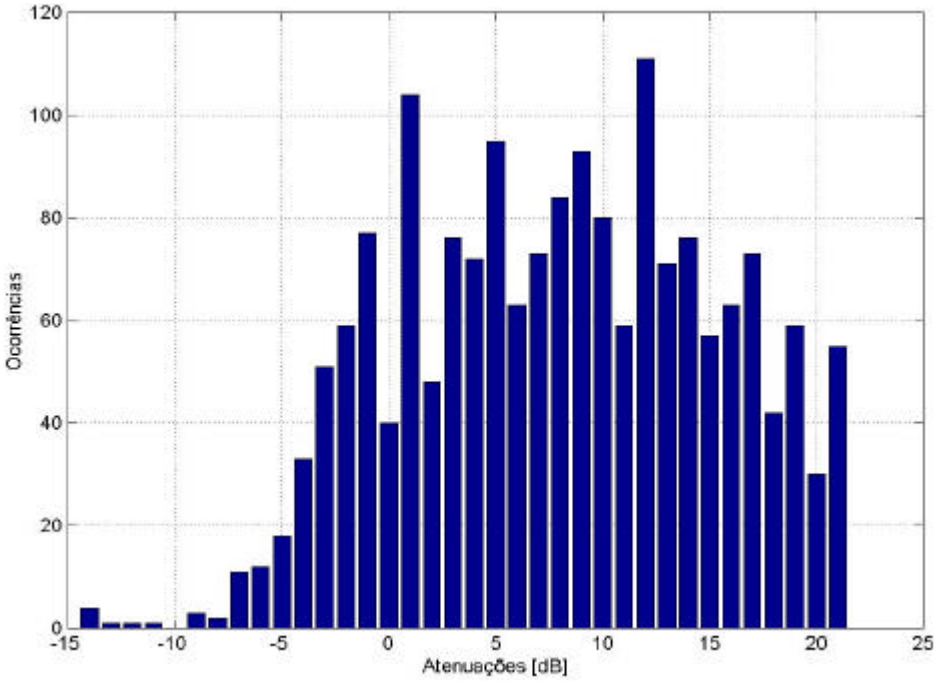


Figura F.4 – Função Densidade de Probabilidade.

F.4.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela F.6 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raiz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		9,37	5,11				
1	12,01	10,07	5,61	190,63	124,38	0,71	1,93
2	12,01	9,37	5,91	91,30	27,21	0,87	1,85
5	12,01	10,07	5,21	96,28	1,43	1,92	1,21

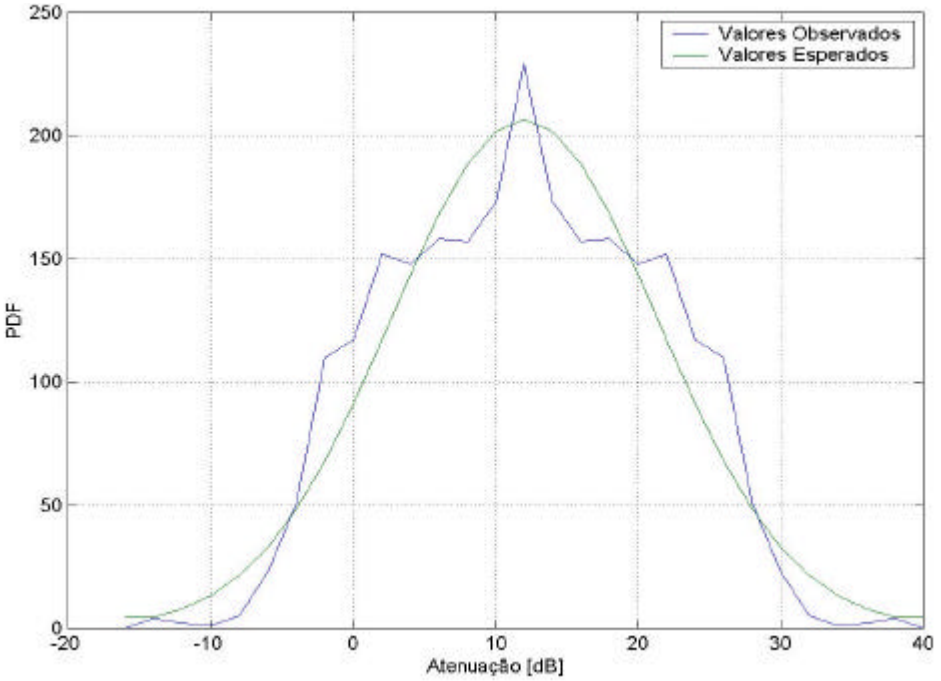


Figura F.5 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 2).

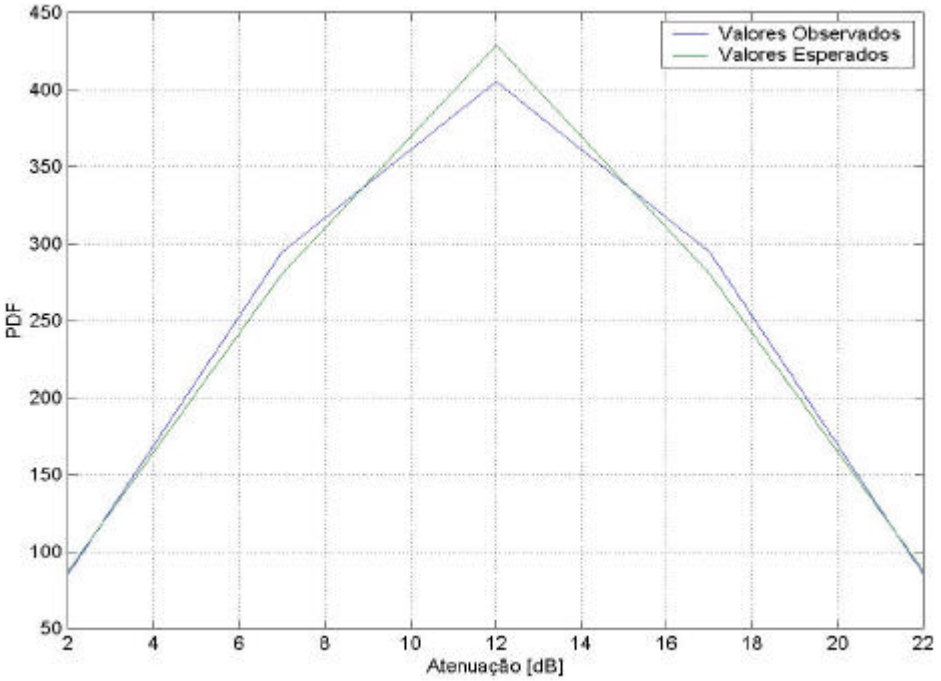


Figura F.6 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

F.4.3 Modelo de Berg

Tabela F.7 – Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg.

Local	*Tipo*	*Estações*	
		Tecn_C	*ALib_B*
Térreo	Dim.Amostra	39	32
	At.Ext. [dB]	13,36	15,01
1º	Dim.Amostra	68	172
	At.Ext. [dB]	14,35	16,54
2º	Dim.Amostra	79	620
	At.Ext. [dB]	11,61	6,15
3º	Dim.Amostra	71	56
	At.Ext. [dB]	12,63	10,47
4º	Dim.Amostra	87	241
	At.Ext. [dB]	2,59	1,50

Tabela F.8 – Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado.

Piso	*Tipo*	*Média Atenuações*	*Curva Reg.lin.*	*Erro (Módulo)*
Térreo	Exterior	14,19	16,06	1,87
1º	Exterior	15,45	13,24	2,21
2º	Exterior	8,88	10,42	1,54
3º	Exterior	11,55	7,60	3,95
4º	Exterior	2,05	4,79	2,74

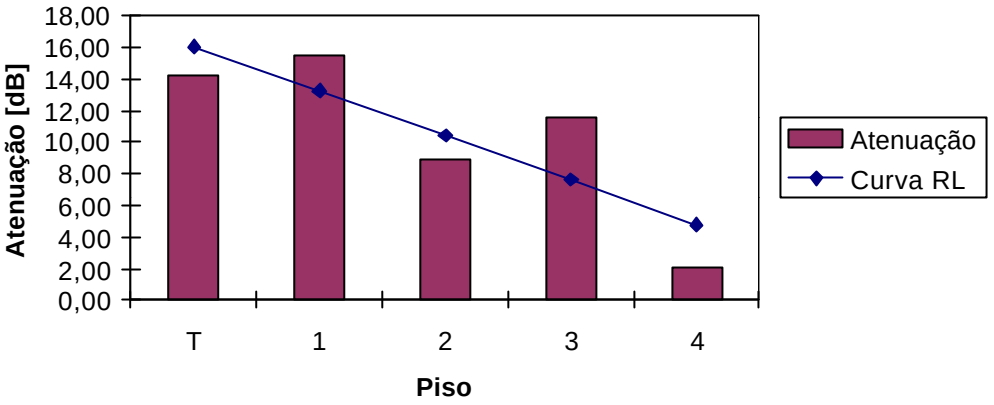


Figura F.7 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear

Tabela F.9 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	16,10
Gh [dB/piso]	2,80
Erro Médio [dB]	2,50

F.4.4 Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido

Tabela F.10 – Cálculo do parâmetro L_{tm}.

Estação	***Ângulo [º]***	***Ltm [dB]***
Tecn_C	88	22,34
ALib_B	12	16,35
	Média LtmTotal	19,35

Tabela F.11 – Parâmetros do modelo.

Ws [m]	25,00
Hb [m]	12,00
Ltm [dB]	19,35
Lint [dB]	16,10
Gh [dB/piso]	2,80
Erro [dB]	8,04

G.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes ao edifício sede do grupo Jerónimo Martins. Esse edifício foi considerado como pertencendo à categoria "Isolado Alto".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura G.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela G.1.

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela G.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela G.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe nas Figuras G.2 e G.3. Por sua vez, na Tabela G.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela G.5. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras G.5 e G.6, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura G.4, ainda se pode encontrar uma função densidade de probabilidade.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg, pode ser visto nas Tabelas G.6 e G.7. Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura G.7, enquanto na Tabela G.8 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e o respectivo erro associado.

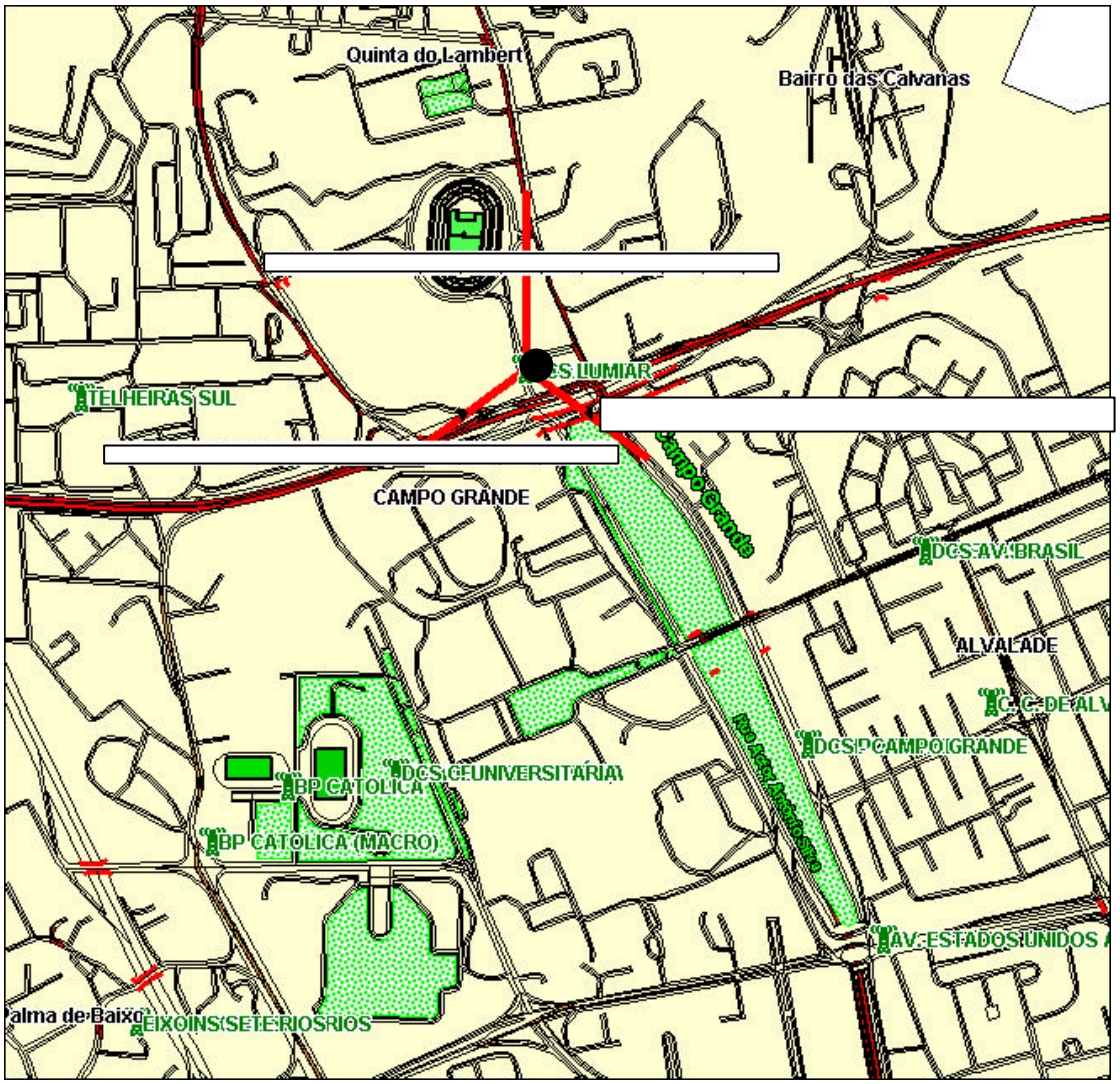


Figura G.1 - Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

G.2 Resultados da Campanha de Medidas

Tabela G.1 – Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [ª]*	*Pot. Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Lumiar Norte	B	LumN_B	120	-88,02	57	1,35	344
Telheiras	B	Telh_B	120	-82,3	77	1,77	304
Av. Brasil	C	ABra_C	350	-85,5	34	1,1	114
Lumiar Norte	C	LumN_C	230	-90,7	42	1,35	344

Tabela G.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
Térreo	Lumiar Norte	B	Exterior	17,97	-8,03	9,63	6,83	11,47	12,97	70
			Global	17,97	-8,03	9,63	6,83	11,47	12,97	70
	Telheiras	B	Exterior	21,70	-11,30	7,94	7,53	7,70	6,70	149
			Global	21,70	-11,30	7,94	7,53	7,70	6,70	149
1º	Lumiar Norte	B	Exterior	17,97	-7,03	6,95	4,63	7,97	5,97	104
			Global	17,97	-7,03	6,95	4,63	7,97	5,97	104
	Telheiras	B	Exterior	22,70	-5,30	6,54	5,41	6,70	5,70	121
			Global	22,70	-5,30	6,54	5,41	6,70	5,70	121
2º	Lumiar Norte	B	Exterior	15,97	-14,03	3,55	6,34	4,97	4,97	112
			Global	15,97	-14,03	3,55	6,34	4,97	4,97	112
	Telheiras	B	Exterior	14,70	-15,30	0,75	5,86	-0,30	-2,30	115
			Global	14,70	-15,30	0,75	5,86	-0,30	-2,30	115
3º	Lumiar Norte	B	Exterior	10,97	-9,03	0,61	4,51	-0,03	-4,03	307
			Global	10,97	-9,03	0,61	4,51	-0,03	-4,03	307
	Telheiras	B	Exterior	11,70	-16,30	-1,51	5,92	-2,30	-2,30	88
			Global	11,70	-16,30	-1,51	5,92	-2,30	-2,30	88
4º	Lumiar Norte	B	Exterior	10,97	-17,03	-5,62	5,71	-6,03	-5,03	184
			Global	10,97	-17,03	-5,62	5,71	-6,03	-5,03	184
	Telheiras	B	Exterior	15,70	-14,30	-3,48	5,69	-3,30	-4,30	96
			Global	15,70	-14,30	-3,48	5,69	-3,30	-4,30	96
5º	Lumiar Norte	B	Exterior	8,97	-10,03	-1,52	4,45	-2,03	-4,03	107
			Global	8,97	-10,03	-1,52	4,45	-2,03	-4,03	107
	Telheiras	B	Exterior	8,70	-15,30	-3,57	4,91	-3,30	-9,30	118
			Global	8,70	-15,30	-3,57	4,91	-3,30	-9,30	118
6º	Lumiar Norte	B	Exterior	4,97	-15,03	-2,90	4,97	-2,03	-2,03	77
			Global	4,97	-15,03	-2,90	4,97	-2,03	-2,03	77
	Telheiras	B	Exterior	10,70	-12,30	-2,09	4,50	-2,30	-3,30	102
			Global	10,70	-12,30	-2,09	4,50	-2,30	-3,30	102
7º	Lumiar Norte	B	Exterior	6,97	-18,03	-6,38	5,52	-7,03	-9,03	87
			Global	6,97	-18,03	-6,38	5,52	-7,03	-9,03	87
	Telheiras	B	Exterior	9,70	-22,30	-5,27	5,96	-4,30	-6,30	115
			Global	9,70	-22,30	-5,27	5,96	-4,30	-6,30	115
8º	Lumiar Norte	B	Exterior	5,97	-25,03	-12,28	6,46	-13,03	-10,03	222
			Global	5,97	-25,03	-12,28	6,46	-13,03	-10,03	222
	Telheiras	B	Exterior	9,70	-18,30	-7,03	5,97	-7,30	-6,30	187
			Global	9,70	-18,30	-7,03	5,97	-7,30	-6,30	187

Tabela G.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
9º	Lumiar Norte	B	Exterior	7,97	-25,03	-9,71	6,96	-9,03	-7,03	251
			Global	7,97	-25,03	-9,71	6,96	-9,03	-7,03	251
	Telheiras	B	Exterior	9,70	-28,30	-9,43	7,83	-9,30	-4,30	204
			Global	9,70	-28,30	-9,43	7,83	-9,30	-4,30	204
10º	Lumiar Norte	B	Exterior	-2,97	-27,03	-13,89	5,85	-14,03	-14,03	124
			Global	-2,97	-27,03	-13,89	5,85	-14,03	-14,03	124
	Telheiras	B	Exterior	6,70	-25,30	-10,85	6,96	-11,30	-14,30	175
			Global	6,70	-25,30	-10,85	6,96	-11,30	-14,30	175
11º	Lumiar Norte	B	Exterior	3,97	-25,03	-7,92	5,25	-8,03	-8,03	229
			Global	3,97	-25,03	-7,92	5,25	-8,03	-8,03	229
	Telheiras	B	Exterior	5,70	-33,30	-10,68	7,16	-10,30	-8,30	371
			Global	5,70	-33,30	-10,68	7,16	-10,30	-8,30	371
13º	Lumiar Norte	B	Exterior	10,97	-29,03	-10,59	6,74	-10,03	-9,03	487
			Global	10,97	-29,03	-10,59	6,74	-10,03	-9,03	487
	Telheiras	B	Exterior	9,70	-34,30	-10,48	8,65	-10,30	-8,30	625
			Global	9,70	-34,30	-10,48	8,65	-10,30	-8,30	625
14º	Lumiar Norte	B	Exterior	2,97	-31,03	-15,23	6,14	-15,03	-15,03	208
			Global	2,97	-31,03	-15,23	6,14	-15,03	-15,03	208
	Telheiras	B	Exterior	-0,70	-34,30	-17,25	6,58	-16,30	-15,30	260
			Global	-0,70	-34,30	-17,25	6,58	-16,30	-15,30	260
15º	Lumiar Norte	B	Exterior	-2,97	-33,03	-13,26	5,86	-13,03	-14,03	131
			Global	-2,97	-33,03	-13,26	5,86	-13,03	-14,03	131
	Telheiras	B	Exterior	1,70	-35,30	-17,18	7,56	-17,30	-19,30	215
			Global	1,70	-35,30	-17,18	7,56	-17,30	-19,30	215
16º	Lumiar Norte	B	Exterior	2,97	-32,03	-13,73	8,80	-12,03	-12,03	209
			Global	2,97	-32,03	-13,73	8,80	-12,03	-12,03	209
	Telheiras	B	Exterior	8,70	-34,30	-9,36	8,01	-9,30	-8,30	267
			Global	8,70	-34,30	-9,36	8,01	-9,30	-8,30	267

Tabela G.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]
Térreo	21,70	-11,30	8,48	7,34	8,97	12,97	219	N/A
1º	22,70	-7,03	6,73	5,06	6,70	5,70	225	-1,75
2º	15,97	-15,30	2,13	6,24	1,97	-2,30	227	-4,60
3º	11,70	-16,30	0,14	4,93	-0,03	-4,03	395	-1,99
4º	15,70	-17,03	-4,89	5,78	-5,03	-4,30	280	-5,03
5º	8,97	-15,30	-2,60	4,79	-2,30	-4,03	225	2,29
6º	10,70	-15,03	-2,44	4,71	-2,30	-2,03	179	0,16
7º	9,70	-22,30	-5,75	5,79	-6,30	-6,30	202	-3,31
8º	9,70	-25,03	-9,88	6,76	-10,30	-10,03	409	-4,13
9º	9,70	-28,30	-9,59	7,36	-9,03	-7,03	455	0,29
10º	6,70	-27,03	-12,11	6,68	-13,03	-14,30	299	-2,52
11º	5,70	-33,30	-9,63	6,63	-9,03	-8,30	600	2,48
12º	21,70	0,70	10,77	4,56	10,70	7,97	56	20,40
13º	10,97	-34,30	-10,52	7,87	-10,03	-9,03	1112	-21,29
14º	2,97	-34,30	-16,35	6,46	-16,03	-15,30	468	-5,83
15º	1,70	-35,30	-15,70	7,21	-15,03	-14,03	346	0,65
16º	8,70	-34,30	-11,28	8,64	-10,17	-12,03	476	4,42
Total	22,70	-35,30	-7,61	9,47	-8,03	-9,03	6 173	-1,24

G.3 Cobertura

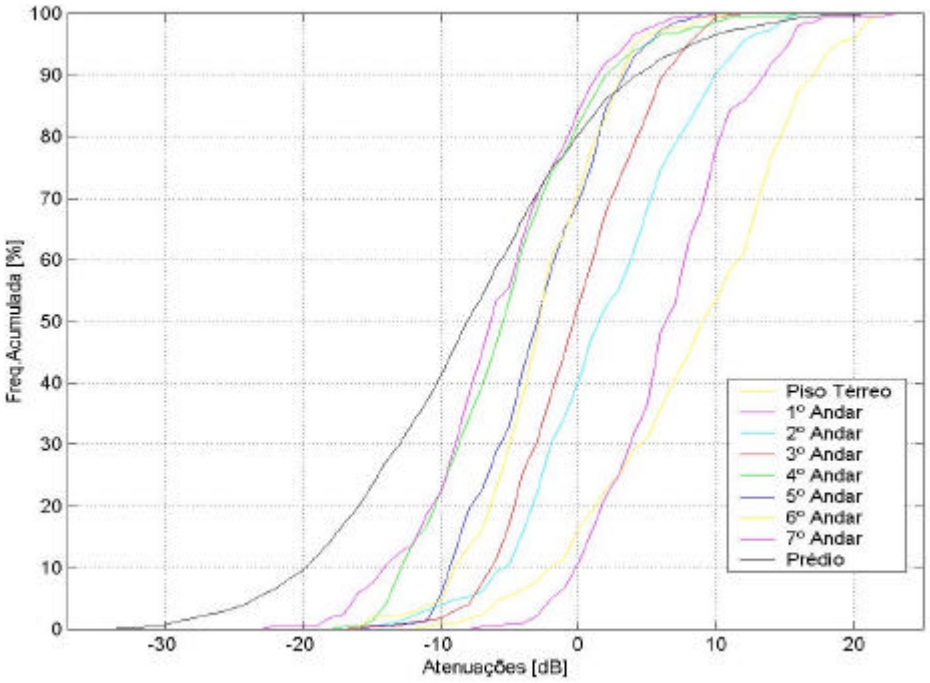


Figura G.2 – Função de Probabilidade Acumulada (1º parte).

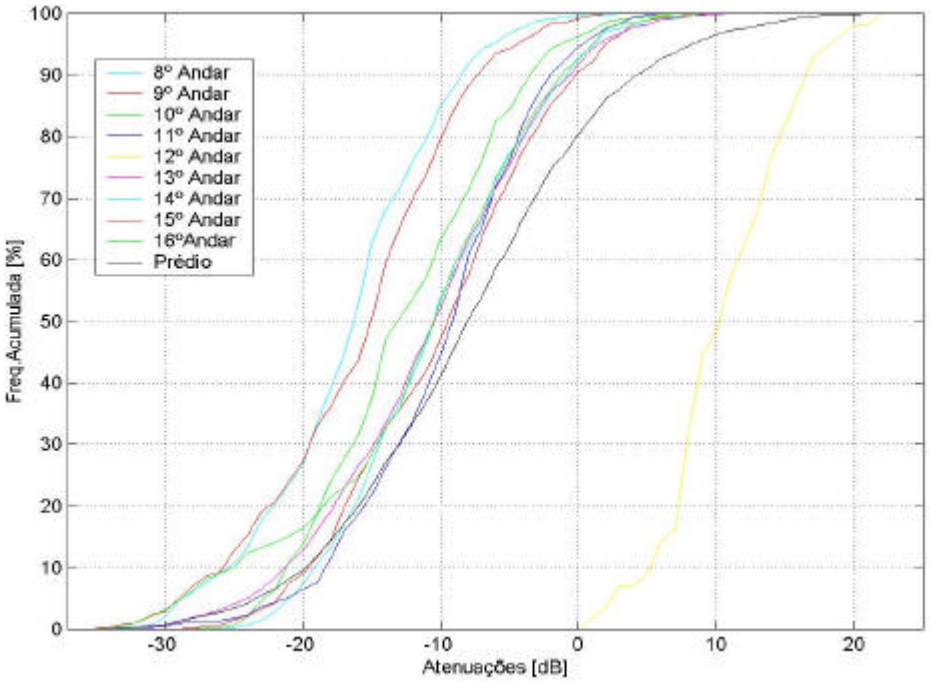


Figura G.3 – Função de Probabilidade Acumulada (2º parte).

Tabela G.4 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	-8,03
90	4,22
95	8,25

G.4 Testes Estatísticos

G.4.1 Distribuição

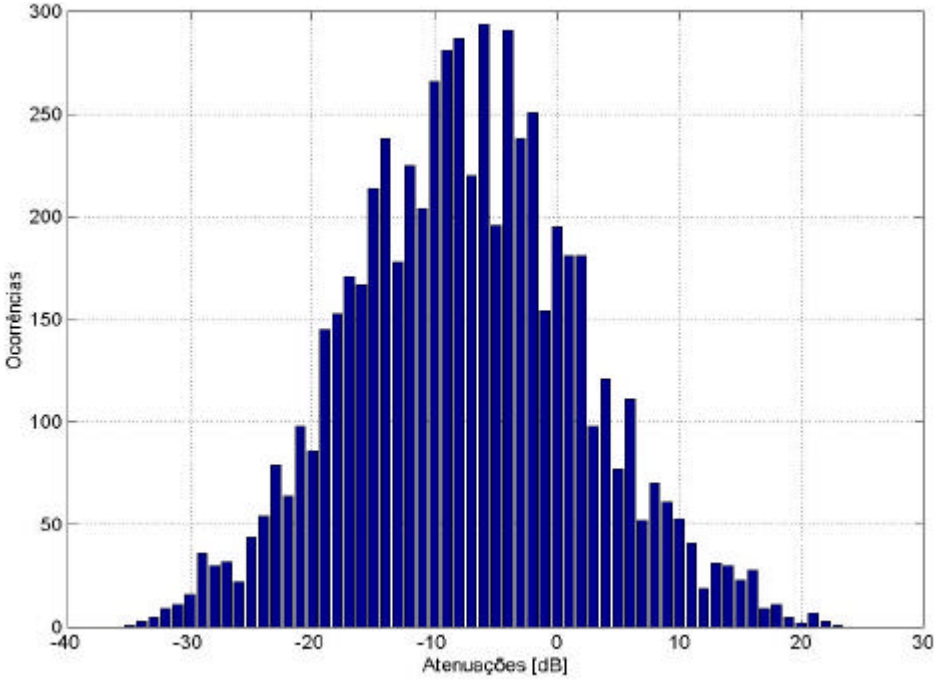


Figura G.4 – Função Densidade de Probabilidade.

G.4.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela G.5 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		10,07	8,97				
1	-6,01	10,07	9,27	94,55	135,99	0,28	0,45
2	-6,01	10,47	8,87	108,40	98,92	0,71	0,85
5	-6,01	10,07	9,07	33,66	19,04	0,71	0,73

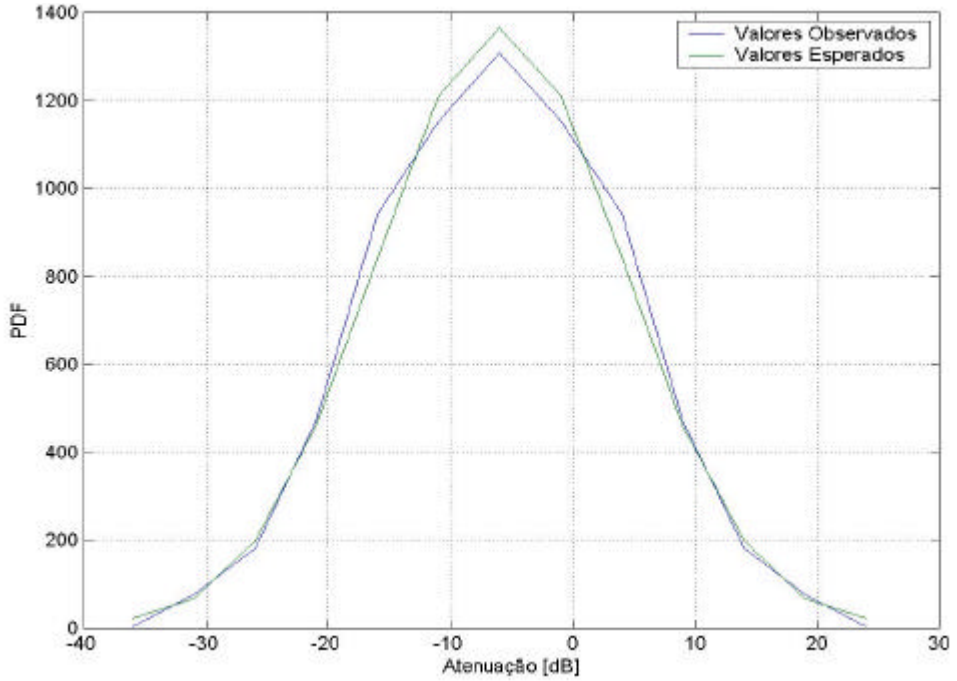


Figura G.5 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

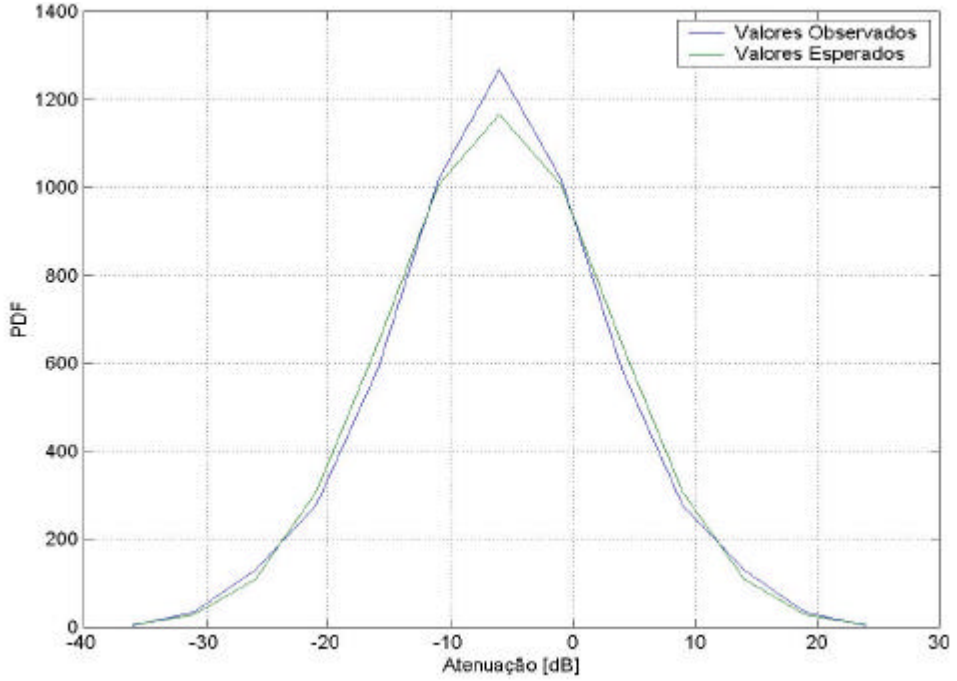


Figura G.6 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

G.4.3 Modelo de Berg

Tabela G.6 – Resultados para aferição dos parâmetros do modelo.

Local	*Tipo*	*Estações*			
		LumN_B	*ABra_C*	*LumN_C*	*Telh_B*
1º	D.Amostra	70,0	112,0	36,0	149,0
	At.Ext. [dB]	9,6	10,3	5,1	7,9
2º	D.Amostra	104,0	97,0	62,0	121,0
	At.Ext. [dB]	6,9	3,1	5,3	6,5
3º	D.Amostra	112,0	108,0	33,0	115,0
	At.Ext. [dB]	3,5	-2,6	-0,9	0,8
4º	D.Amostra	307,0	477,0	104,0	88,0
	At.Ext. [dB]	0,5	-7,4	-1,6	-1,5
5º	D.Amostra	184,0	272,0	46,0	96,0
	At.Ext. [dB]	-5,7	-12,1	-8,7	-3,5
6º	D.Amostra	107,0	209,0	36,0	118,0
	At.Ext. [dB]	-1,6	-12,2	-8,2	-3,6
7º	D.Amostra	77,0	152,0	53,0	102,0
	At.Ext. [dB]	-3,0	-9,9	-7,3	-2,1
8º	D.Amostra	87,0	126,0	18,0	115,0
	At.Ext. [dB]	-6,5	-15,2	-12,5	-5,3
9º	D.Amostra	222,0	89,0	91,0	187,0
	At.Ext. [dB]	-12,4	-12,0	-16,8	-7,0
10º	D.Amostra	251,0	75,0	165,0	204,0
	At.Ext. [dB]	-9,8	-5,8	-13,2	-9,4
11º	D.Amostra	124	92	60	175
	At.Ext. [dB]	-13,95	-14,3	-17,35	-10,8
12º	D.Amostra	229	56	154	371
	At.Ext. [dB]	-7,95	-11	-8,25	-10,7
13º	D.Amostra	487	68	387	625
	At.Ext. [dB]	-10,65	-4,7	-11,75	-10,5
14º	D.Amostra	208	6	166	260
	At.Ext. [dB]	-15,25	-9,5	-16,85	-17,3
15º	D.Amostra	131	11	83	215
	At.Ext. [dB]	-13,25	-11,9	-17,05	-17,2

Tabela G.6 – Resultados para aferição dos parâmetros do modelo (continuação).

Local	*Tipo*	*Estações*			
		LumN_B	*ABra_C*	*LumN_C*	*Telh_B*
16º	D.Amostra	209	6	122	267
	At.Ext. [dB]	-13,75	-8	-18,45	-9,4

Tabela G.7 – Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado.

Piso	*Tipo*	*Média Atenuações*	*Curva Reg.lin.*	*Erro (Módulo)*
1º	Exterior	8,20	6,20	2,00
2º	Exterior	5,50	3,80	1,70
3º	Exterior	0,20	1,40	1,20
4º	Exterior	-2,50	-0,90	1,60
5º	Exterior	-7,50	-3,30	4,20
6º	Exterior	-6,40	-5,70	0,70
7º	Exterior	-5,60	-8,10	2,50
8º	Exterior	-9,90	-10,40	0,50
9º	Exterior	-12,00	-12,80	0,80
10º	Exterior	-9,50	-12,80	3,30
11º	Exterior	-14,10	-12,80	1,30
12º	Exterior	-9,50	-12,80	3,30
13º	Exterior	-9,40	-12,80	3,40
14º	Exterior	-14,70	-12,80	1,90
15º	Exterior	-14,90	-12,80	2,10
16º	Exterior	-12,40	-12,80	0,40

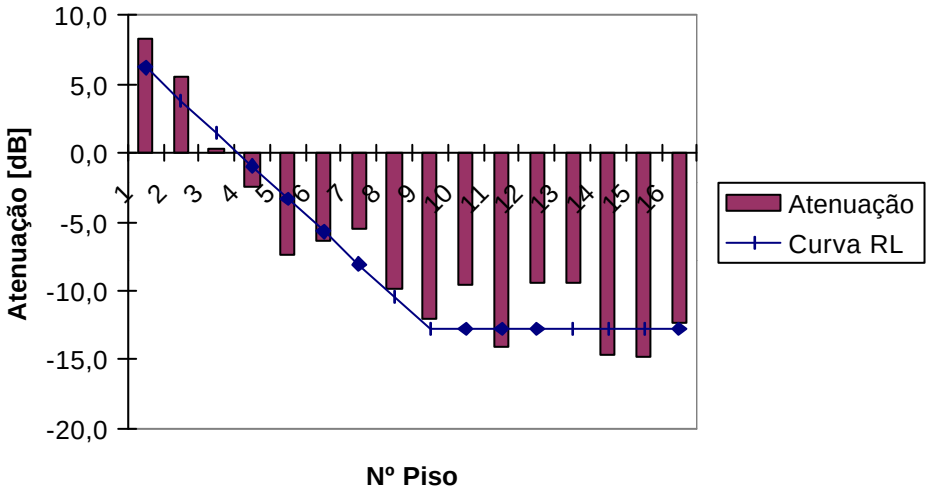


Figura G.7 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Tabela G.8 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	10,90
Gh [dB/piso]	-2,40
Erro Médio [dB]	1,90

H.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes à Torre Norte situada no Instituto Superior Técnico. Esse edifício foi considerado como pertencendo à categoria "Isolado Alto".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura H.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela H.1.

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela H.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela H.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe na Figura H.2. Por sua vez, na Tabela H.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos.

Para este edifício aplica-se o factor de correcção de ganho da antena relativa ao sector A da estação base situada no Instituto Superior Técnico, que está em LoS com o mesmo. Os resultados podem ser vistos na Tabela H.5 e na Figura H.3. Na Tab. H.5, as colunas q e j referem-se a variáveis do algoritmo de extrapolação do diagrama de radiação, necessários ao cálculo do ganho. A coluna L_p diz respeito à atenuação medida, enquanto a coluna "Ganho" se refere ao ganho direccional da antena na direcção de cada piso. A coluna L_p+DG representa a atenuação corrigida pelo factor de correcção do ganho da antena DG.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela H.6. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras H.5 e H.6, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura H.4, ainda se pode encontrar uma função densidade de probabilidade.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg, pode ser visto nas Tabelas H.7 e H.8. Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura H.7, enquanto na Tabela H.9 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e o respectivo erro associado.

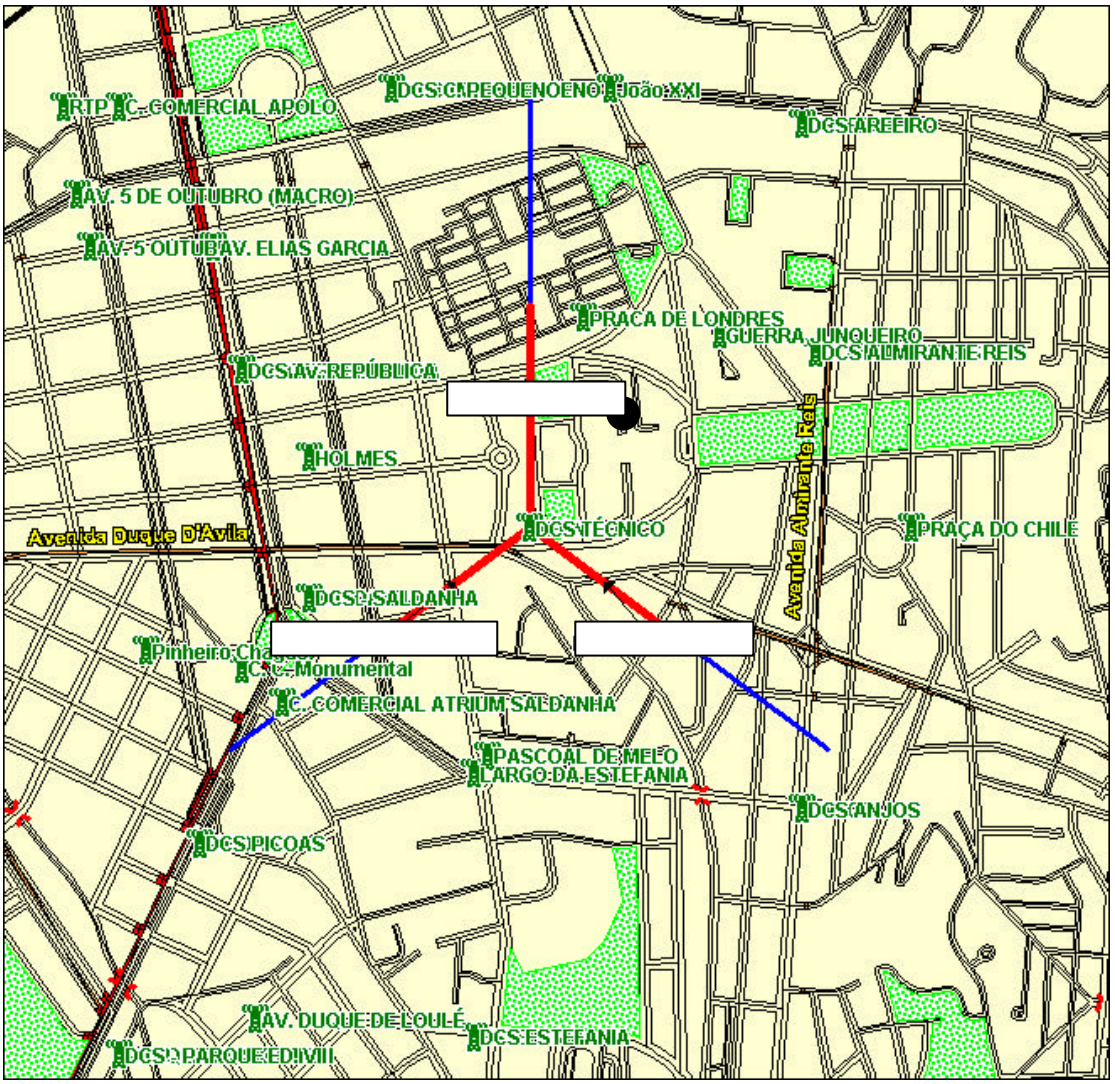


Figura H.1 – Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

H.2 Resultados da Campanha de Medidas

Tabela H.1 – Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [º]*	*Pot. Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Campo Pequeno	B	CPeq_B	100	-82.63	133	0.66	325
Técnico	C	Tecn_C	240	-83.66	63	0.25	210
Técnico	B	Tecn_B	120	-74.73	227	0.25	210
Hospital Santa Marta	C	HSMa_C	240	-89.07	53	1.61	202
Técnico	A	Tecn_A	0	-72.98	232	0.25	210
Campo Pequeno	C	CPeq_C	240	-87.12	70	0.66	325
Praça Espanha	B	Pesp_B	120	-83.2	19	1.81	259
Campolide	A	Camp_A	0	-77.7	45	2.21	235
Areeiro	B	Aree_B	310	-85.1	30	0.55	35

Tabela H.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
Térreo	Técnico	C	Exterior	22,34	3,34	14,62	3,54	14,34	13,34	79
			Global	22,34	3,34	14,92	3,72	14,34	13,34	83
	Técnico	B	Interior	31,27	14,27	25,44	4,42	26,27	28,27	154
			Exterior	31,27	3,27	17,47	6,52	17,27	15,27	188
			Global	31,27	3,27	21,06	6,92	22,27	26,27	342
	Técnico	A	Interior	33,02	13,02	25,01	4,79	25,02	24,02	373
			Exterior	26,02	-2,98	10,52	6,12	10,02	11,02	214
			Global	33,02	-2,98	19,73	8,77	21,02	24,02	587
1º	Técnico	C	Global	22,34	4,34	14,68	4,96	14,84	20,34	76
	Técnico	B	Interior	31,27	4,27	21,68	5,75	22,27	22,27	219
			Exterior	31,27	3,27	18,95	6,75	19,27	22,27	163
			Global	31,27	3,27	20,52	6,33	21,27	22,27	382
	Técnico	A	Interior	33,02	6,02	22,15	5,75	22,02	24,02	380
			Exterior	28,02	-1,98	11,25	5,99	11,02	13,02	200
			Global	33,02	-1,98	18,39	7,80	19,02	13,02	580
4º	Cpo.Pequeno	B	Global	14,37	-14,63	-6,23	6,00	-7,63	-9,63	50
	Técnico	C	Interior	15,34	-22,66	-6,24	8,93	-7,66	-9,66	135
			Exterior	-3,66	-27,66	-15,43	4,56	-15,66	-16,66	134
			Global	15,34	-27,66	-10,82	8,45	-12,66	-16,66	269
	Técnico	B	Interior	26,27	-18,73	0,34	9,76	-0,73	1,27	141
			Exterior	5,27	-23,73	-8,81	6,84	-7,73	-2,73	175
			Global	26,27	-23,73	-4,73	9,43	-5,73	-2,73	316
	Técnico	A	Interior	16,02	-22,98	-2,32	8,60	-1,98	-0,98	162
			Exterior	6,02	-24,98	-9,92	6,22	-9,98	-13,98	208
			Global	16,02	-24,98	-6,59	8,26	-6,98	-9,98	370
	Cpo.Pequeno	C	Interior	14,88	-16,12	-4,74	7,09	-5,12	-5,12	50
			Exterior	-3,12	-22,12	-11,24	4,71	-11,12	-8,12	74
			Global	14,88	-22,12	-8,62	6,59	-9,12	-8,12	124
5º	Técnico	B	Interior	12,34	-21,66	-8,39	8,05	-9,66	-16,66	101
			Exterior	-5,66	-31,66	-19,14	5,32	-19,66	-20,66	200
			Global	12,34	-31,66	-15,53	8,14	-16,66	-16,66	301
	Técnico	B	Interior	14,27	-18,73	-2,24	7,46	-2,73	-3,73	106
			Exterior	3,27	-21,73	-9,68	5,90	-9,73	-3,73	161
			Global	14,27	-21,73	-6,73	7,50	-6,73	-3,73	267
	Hp. Sta. Marta	C	Global	9,93	-20,07	-11,10	6,06	-12,57	-15,07	52
	Técnico	A	Interior	16,02	-22,98	-8,28	7,85	-8,48	-15,98	162
			Exterior	7,02	-33,98	-17,14	7,17	-16,98	-19,98	290
			Global	16,02	-33,98	-13,97	8,55	-14,98	-15,98	452
	Cpo.Pequeno	C	Exterior	-5,12	-22,12	-12,76	4,25	-13,12	-11,12	71
			Global	0,88	-22,12	-11,79	4,72	-12,12	-11,12	87

Tabela H.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
6º	Técnico	C	Interior	14,34	-25,66	-10,38	9,94	-13,66	-17,66	80
			Exterior	-4,66	-31,66	-19,29	5,19	-19,66	-22,66	201
			Global	14,34	-31,66	-16,75	7,96	-17,66	-18,66	281
	Técnico	B	Exterior	4,27	-20,73	-10,91	5,24	-10,73	-8,73	146
			Global	15,27	-20,73	-9,11	6,65	-9,73	-8,73	194
	Técnico	A	Interior	20,02	-26,98	-7,56	10,81	-8,98	-8,98	123
			Exterior	2,02	-33,98	-17,21	8,07	-17,98	-22,98	317
			Global	20,02	-33,98	-14,51	9,91	-15,98	-18,98	440
7º	Técnico	C	Interior	18,34	-24,66	-9,21	10,21	-12,66	-12,66	132
			Exterior	-2,66	-32,66	-17,97	5,27	-18,66	-19,66	220
			Global	18,34	-32,66	-14,69	8,62	-16,16	-19,66	352
	Técnico	B	Exterior	0,27	-21,73	-10,62	4,84	-10,73	-10,73	124
			Global	28,27	-21,73	-7,24	8,84	-8,73	-10,73	166
	Técnico	A	Interior	21,02	-21,98	-6,62	8,94	-7,98	-13,98	191
			Exterior	10,02	-27,98	-13,48	7,21	-13,98	-15,98	327
			Global	21,02	-27,98	-10,95	8,55	-11,98	-15,98	518
8º	Técnico	C	Interior	12,34	-21,66	-8,47	9,51	-9,66	-9,66	52
			Exterior	-4,66	-29,66	-17,11	4,80	-16,66	-15,66	257
			Global	12,34	-29,66	-15,66	6,68	-16,66	-15,66	309
	Técnico	B	Exterior	4,27	-21,73	-8,72	5,54	-9,73	-10,73	122
			Global	14,27	-21,73	-8,29	5,69	-8,73	-10,73	137
	Técnico	A	Interior	28,02	-13,98	0,28	11,54	-2,98	-9,98	75
			Exterior	4,02	-23,98	-9,14	5,19	-8,98	-8,98	360
			Global	28,02	-23,98	-7,51	7,59	-7,98	-8,98	435
9º	Técnico	C	Interior	20,34	-19,66	-2,14	9,49	-2,66	0,34	105
			Exterior	-1,66	-26,66	-15,13	4,93	-15,66	-16,66	194
			Global	20,34	-26,66	-10,57	9,26	-12,66	-16,66	299
	Técnico	B	Exterior	1,27	-20,73	-8,09	5,10	-7,73	-6,73	82
			Global	26,27	-20,73	-4,03	8,86	-4,73	-0,73	121
	Hp. Sta. Marta	C	Interior	5,93	-21,07	-10,16	6,48	-11,07	-5,07	55
			Exterior	-11,07	-29,07	-28,29	4,20	-18,07	-18,07	57
			Global	5,93	-29,07	-14,30	6,78	-15,07	-18,07	112
	Técnico	A	Interior	32,02	-9,98	4,07	8,46	2,02	-0,98	119
			Exterior	10,02	-14,98	-4,34	5,18	-4,98	-5,98	216
			Global	32,02	-14,98	-1,35	7,67	-1,98	-5,98	335

Tabela H.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	*Estação GSM 1800*	*Sector*	*Tipo*	*Máx. [dB]*	*Mín. [dB]*	*Média [dB]*	*Desv.P. [dB]*	*Mediana [dB]*	*Moda [dB]*	*Dim. Amostra*
10º	Técnico	C	Interior	16,34	-19,66	-5,30	8,67	-7,16	-9,66	90
			Exterior	2,34	-27,66	-15,55	4,81	-15,66	-15,66	198
			Global	16,34	-27,66	-12,35	7,87	-13,66	-15,66	288
	Técnico	B	Exterior	3,27	-15,73	-5,86	4,27	-5,73	-4,73	67
			Global	24,27	-15,73	-3,11	6,38	-3,73	-4,73	107
	Hp. Sta. Marta	C	Interior	16,93	-21,07	-8,42	9,10	-9,07	-17,07	53
			Exterior	2,93	-28,07	-18,20	5,99	-19,07	-19,07	69
			Global	16,93	-28,07	-13,95	8,91	-17,07	-20,07	122
	Técnico	A	Interior	29,02	-14,98	3,38	10,25	1,02	-2,98	114
			Exterior	23,02	-18,98	-4,20	6,33	-4,98	-5,98	197
			Global	29,02	-18,98	-1,42	8,77	-2,98	-5,98	311
11º	Técnico	C	Interior	18,34	-17,66	-3,89	8,66	-6,16	-10,66	88
			Exterior	-2,66	-29,66	-15,44	5,17	-16,66	-16,66	205
			Global	18,34	-29,66	-11,97	8,32	-13,66	-16,66	293
	Técnico	B	Exterior	4,27	-15,73	-6,19	4,60	-5,73	-8,73	58
			Global	18,27	-15,73	-2,76	7,72	-4,73	-4,73	86
	Hp. Sta. Marta	C	Interior	12,93	-28,07	-13,75	11,37	-19,07	-22,07	92
			Exterior	-13,07	-34,07	-23,03	4,90	-23,07	-24,07	86
			Global	12,93	-34,07	-18,23	9,98	-21,07	-24,07	178
	Técnico	A	Interior	24,02	-15,98	1,62	10,23	0,02	0,02	133
			Exterior	10,02	-21,98	-6,64	6,39	-6,98	-8,98	303
			Global	24,02	-21,98	-4,12	8,64	-5,48	-8,98	436

Tabela H.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]	int/ext [dB]
Térreo	33,02	-2,98	19,60	7,91	20,02	26,27	1068	N/A	11,23
1º	33,02	-1,98	18,66	7,14	19,02	22,27	1116	-0,94	7,27
2º	30,27	-3,07	9,54	6,41	8,88	5,27	140	-9,12	N/A
4º	26,27	-27,66	-7,23	8,67	-8,12	-9,98	1145	-16,77	8,12
5º	20,37	-33,98	-12,23	8,63	-13,07	-16,66	1180	-5,00	9,02
6º	20,02	-33,98	-14,00	8,88	-14,98	-18,66	1000	-1,77	7,78
7º	28,27	-32,66	-11,72	8,81	-13,07	-15,98	1108	2,28	6,75
8º	28,02	-29,66	-10,81	7,95	-10,98	-15,66	961	0,91	8,54
9º	32,02	-29,07	-6,70	9,63	-6,98	-5,98	890	4,11	10,13
10º	29,02	-28,07	-7,36	9,87	-7,98	-5,98	846	-0,66	10,12
11º	24,02	-34,07	-8,99	10,38	-8,98	-8,98	1013	-1,63	7,08
Total	33,02	-34,07	-3,66	14,95	-6,98	-5,98	10467	-2,86	8,60

H.3 Cobertura

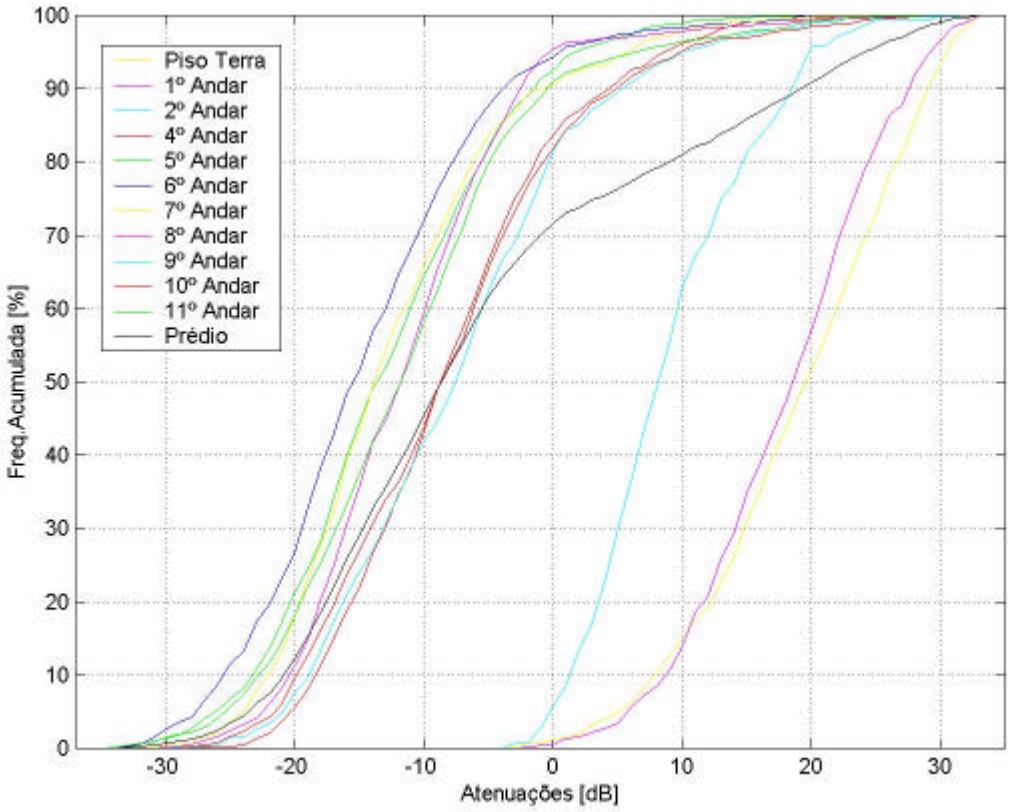


Figura H.2 – Função de Probabilidade Acumulada.

Tabela H.4 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [dB]	Atenuação [dB]
50	-6,98
90	20,01
95	24,7

H.4 Factor de Correcção do Ganho das Antenas

Tabela H.5 – Atenuações e resultados extrapolados do Diagrama de Radiação.

Piso	*Altura [m]*	q *[º]*	j *[º]*	*Lp [dB]*	*Ganho [dB]*	DG *[dB]*	Lp+DG *[dB]*
Térreo	0,00	93,43	60,00	13,05	7,85	0,00	13,05
1º	3,00	92,75	60,00	13,75	7,81	-0,04	13,71
2º	6,00	92,06	60,00	13,25	7,66	-0,19	13,06
3º	9,00	91,37	60,00				
4º	12,00	90,69	60,00	-7,35	7,79	-0,06	-7,41
5º	15,00	90,00	60,00	-14,65	8,00	0,15	-14,50
6º	18,00	89,31	60,00	-14,65	7,57	-0,28	-14,93
7º	21,00	88,63	60,00	-10,95	7,04	-0,81	-11,76
8º	24,00	87,94	60,00	-6,65	6,43	-1,42	-8,07
9º	27,00	87,25	60,00	-1,85	6,03	-1,83	-3,68
10º	30,00	86,57	60,00	-2,25	5,01	-2,84	-5,09
11º	33,00	85,88	60,00	-4,15	5,00	-2,85	-7,00

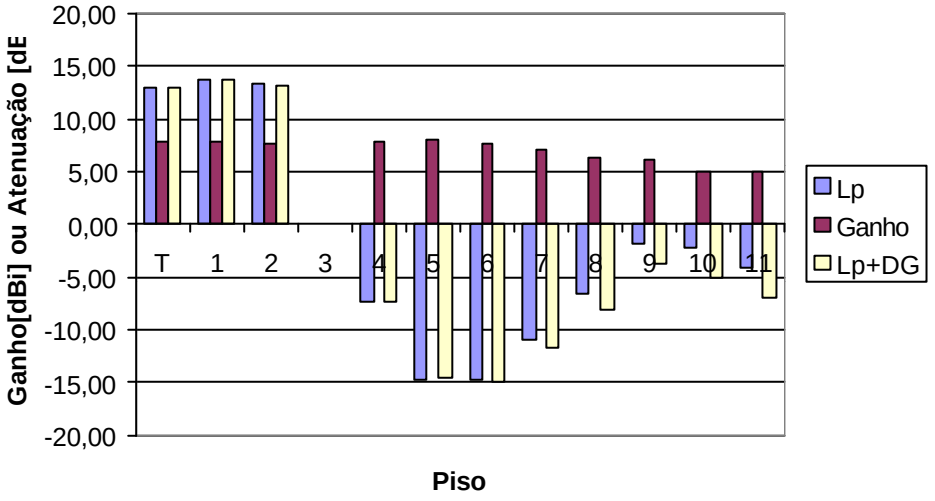


Figura H.3 – Representação gráfica das atenuações medidas e corrigidas.

H.5 Testes Estatísticos

H.5.1 Distribuição

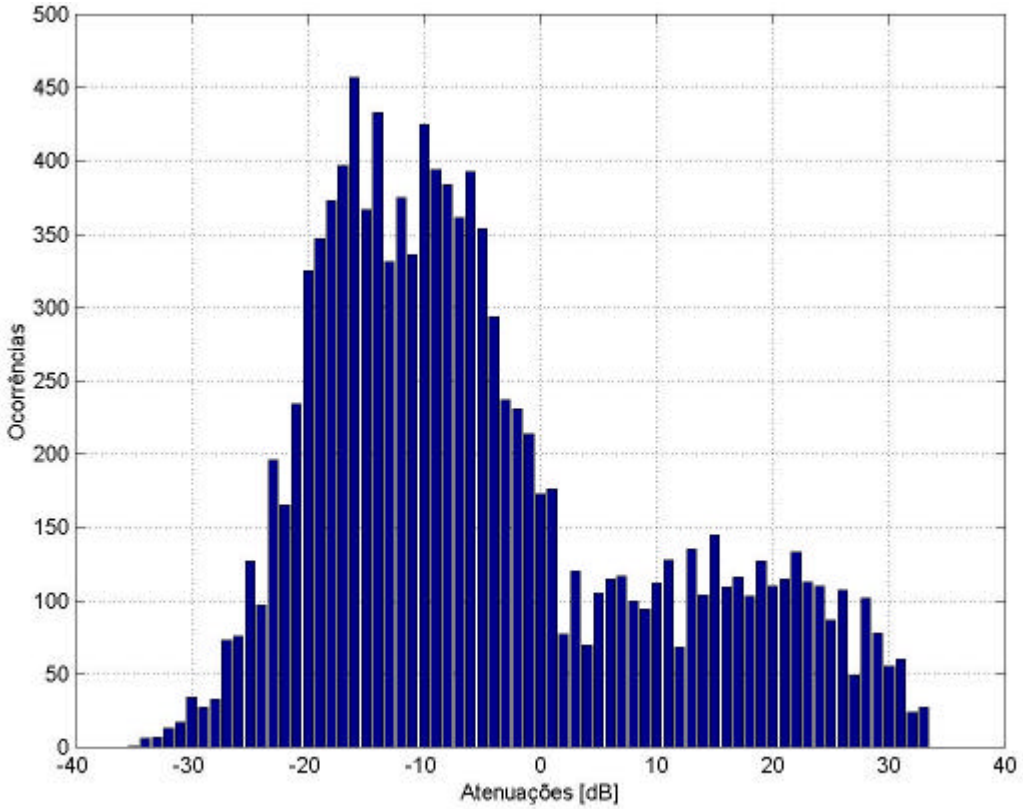


Figura H.4 – Função Densidade de Probabilidade.

H.5.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela H.6 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio.

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		5,65	21,16				
1	-15,99	5,85	22,26	73,43	1391,83	0,45	0,41
2	-15,99	5,65	22,56	113,98	1175,49	1,38	0,71
5	-15,99	5,75	22,06	16,77	1175,12	0,95	1,69

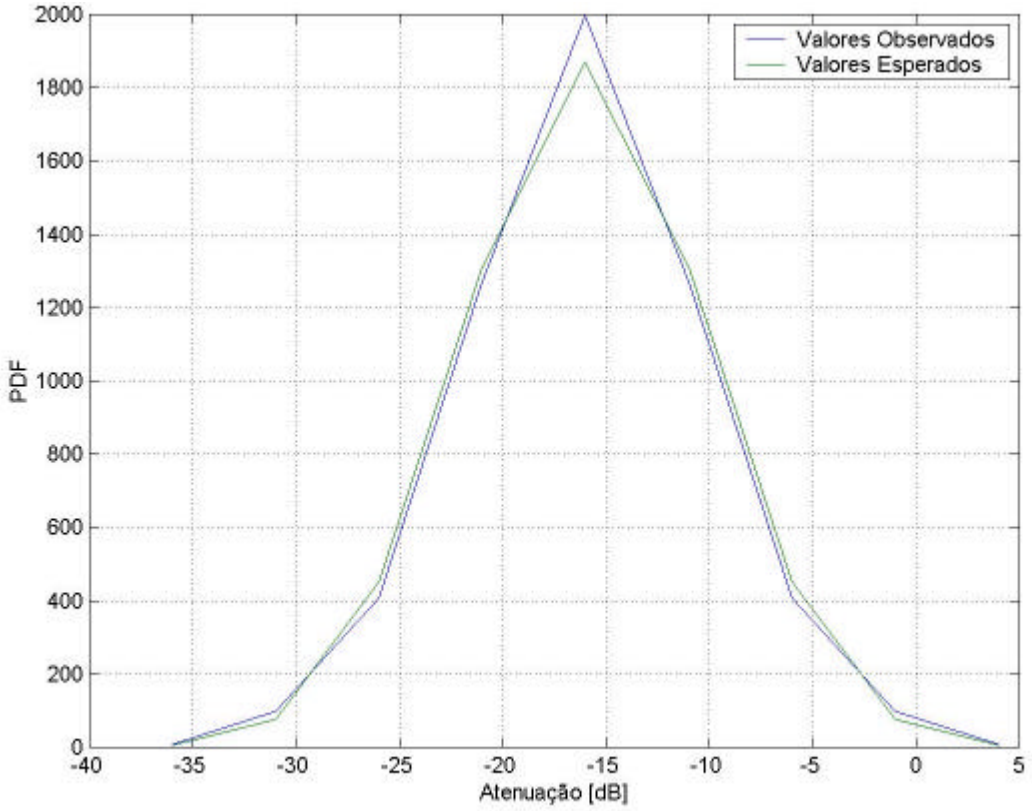


Figura H.5 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

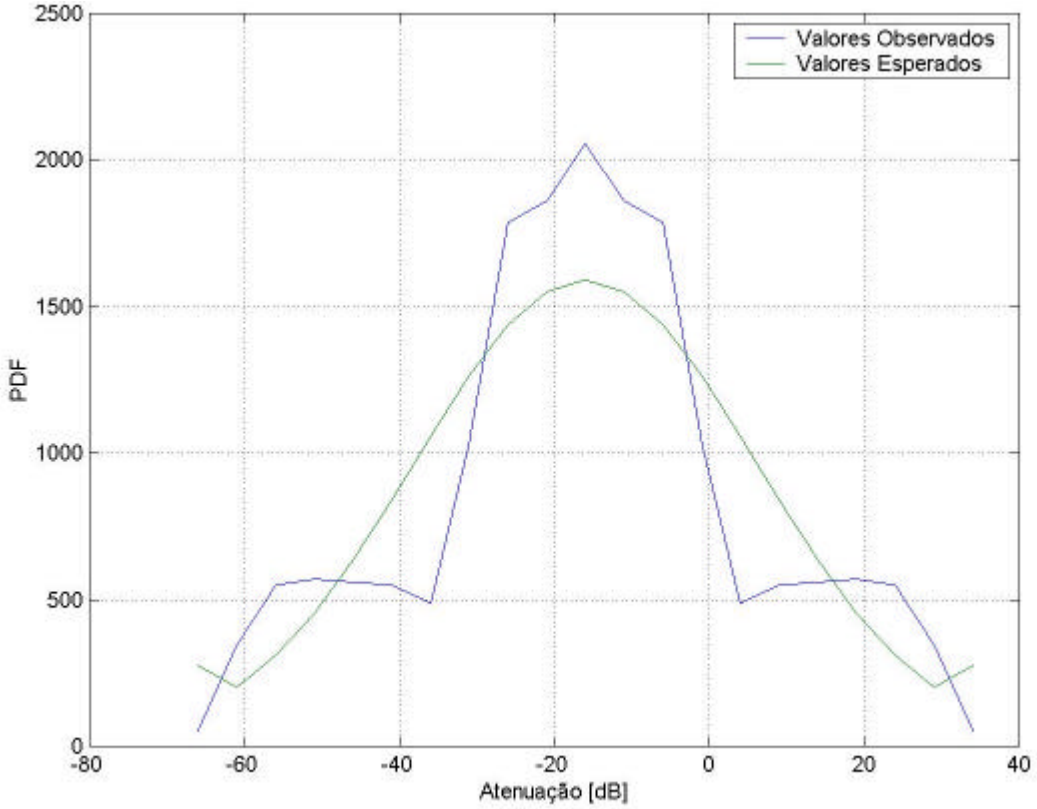


Figura H.6 - Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

H.5.3 Modelo de Berg

Tabela H.7 – Resultados para aferição dos parâmetros do modelo.

Piso	Tipo	Estações				
		PEsp_B	Camp_A	Tecn_C	Aree_C	Tecn_B
Térreo	Dim.Amostra		4,0	79,0		188,0
	At.Ext. [dB]		21,9	16,5		22,6
1º	Dim.Amostra	14,0	17,0	47,0	21,0	163,0
	At.Ext. [dB]	15,4	19,7	15,5	11,1	24,1
2º	Dim.Amostra	21,0	1,0	15,0	3,0	4,0
	At.Ext. [dB]	7,6	6,3	4,5	3,9	26,2
4º	Dim.Amostra	54,0	201,0	134,0	134,0	175,0
	At.Ext. [dB]	-10,1	-12,1	-13,6	-15,6	-3,8
	Dim.Amostra	49,0	58,0	91,0	36,0	87,0
	At.Int. [dB]	-3,0	-7,4	-8,8	-9,4	1,9
5º	Dim.Amostra	134,0	206,0	200,0	75,0	161,0
	At.Ext. [dB]	-14,0	-14,0	-17,3	-15,2	-4,7
	Dim.Amostra	40,0	55,0	65,0	20,0	65,0
	At.Int. [dB]	-8,3	-9,7	-11,0	-10,0	0,4
6º	Dim.Amostra	163	168	201	95	146
	At.Ext. [dB]	-16,9	-13,95	-17,4	-16,5	-5,85
	Dim.Amostra	65	40	54	15	30
	At.Int. [dB]	-11,9	-9,75	-12,6	-9,4	-1,05
7º	Dim.Amostra	160	269	220	116	124
	At.Ext. [dB]	-17,1	-14,05	-16,1	-14	-5,55
	Dim.Amostra	110	76	88	16	21
	At.Int. [dB]	-16	-13,75	-13,2	-9,2	0,25
8º	Dim.Amostra	186	343	257	118	122
	At.Ext. [dB]	-15,8	-15,75	-15,3	-15	-3,65
	Dim.Amostra	47	23	43		14
	At.Int. [dB]	-11,6	-16,15	-10,3		-1,05
9º	Dim.Amostra	141	241	194	102	82
	At.Ext. [dB]	-15,5	-15,05	-13,3	-12,8	-3,05
	Dim.Amostra	79	88	57	28	22
	At.Int. [dB]	-8,2	-13,25	-6,9	-9,2	3,85
10º	Dim.Amostra	118	291	197	105	67
	At.Ext. [dB]	-15,7	-14,95	-13,8	-12,2	-0,75
	Dim.Amostra	77	70	58	7	24
	At.Int. [dB]	-10,3	-9,85	-8,3	-9	4,15

Tabela H.7 – Resultados para aferição dos parâmetros do modelo (continuação).

Piso	Tipo	Estações				
		PEsp_B	Camp_A	Tecn_C	Aree_C	Tecn_B
11º	Dim.Amostra	99	249	205	152	58
	At.Ext. [dB]	-14,1	-12,25	-13,6	-12,3	-1,15
	Dim.Amostra	57	46	52	11	11
	At.Int. [dB]	-13,4	-9,65	-7,5	-8,8	1,25

Tabela H.8 – Aferição de parâmetros por regressão linear e erro associado.

Piso	Tipo	Média Atenuações	Curva Reg.lin.	Erro (Módulo)
Térreo	Exterior	20,30	-5,00	25,30
1º	Exterior	17,10	-6,50	
2º	Exterior		-8,10	
3º				
4º	Exterior	-11,00	-11,20	0,20
	Interior	-5,30		
5º	Exterior	-13,00	-12,70	0,30
	Interior	-7,70		
6º	Exterior	-14,10	-14,30	0,20
	Interior	-8,90		
7º	Exterior	-13,40	-14,30	0,90
	Interior	-10,40		
8º	Exterior	-13,10	-14,30	1,20
	Interior	-9,80		
9º	Exterior	-11,90	-14,30	2,40
	Interior	-6,70		
10º	Exterior	-11,50	-14,30	2,80
	Interior	-6,70		
11º	Exterior	-10,70	-14,30	3,60
	Interior	-7,60		

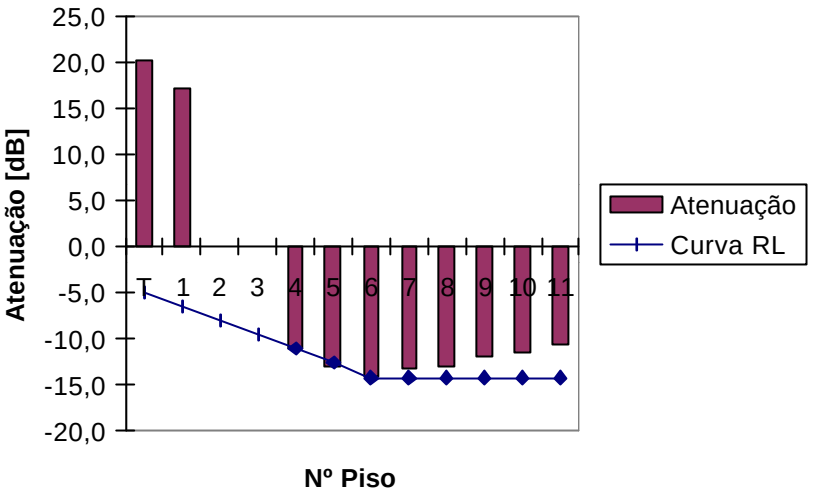


Figura H.7 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Tabela H.9 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	-5,00
Wi [dB]	4,40
Gh [dB/piso]	1,60
Erro Médio [dB]	6,00

I.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes ao Pavilhão Central situado no Instituto Superior Técnico. Esse edifício foi considerado como pertencendo à categoria "Isolado Baixo".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura I.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela I.1.

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela I.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela I.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe na Figura I.2. Por sua vez, na Tabela I.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos. Uma comparação entre as duas bandas do sistema GSM, encontra-se na Figura I.3, enquanto que a Tabela I.5, nos dá uma noção da diferença dos valores registados entre as duas bandas.

Para este edifício aplica-se o factor de correcção de ganho da antena relativa ao sector A da estação base situada no Instituto Superior Técnico que está em LoS com o mesmo. Os resultados podem ser vistos na Tabela I.6 e na Figura I.4.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela I.7. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras I.6 e I.7, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura I.5, ainda se pode encontrar uma função densidade de probabilidade.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg, pode ser visto nas Tabelas I.8 e I.9. Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura I.8, enquanto na Tabela I.10 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e o respectivo erro associado.

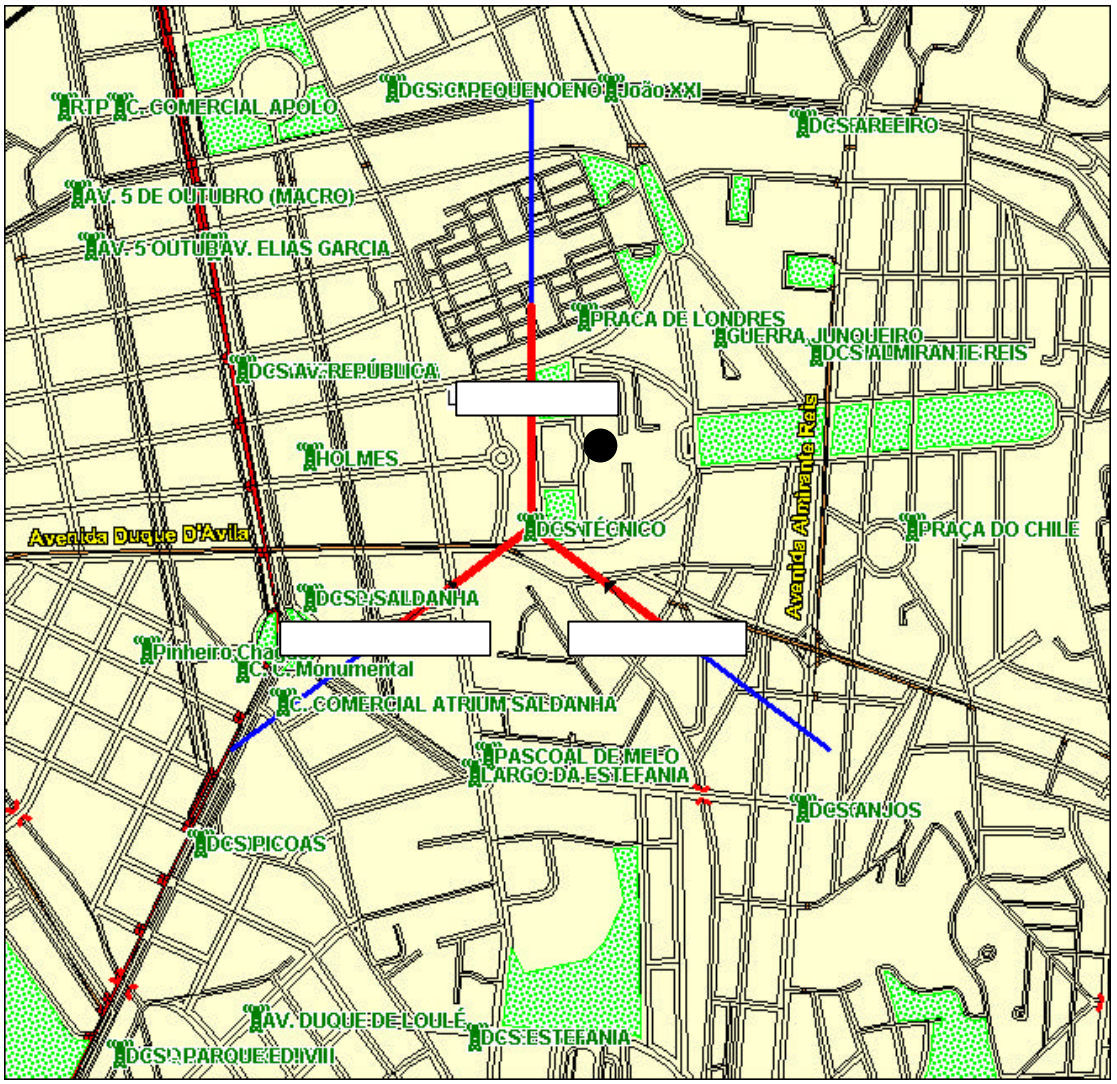


Figura I.1 - Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

I.2 Resultados da Campanha de Medidas

Tabela I.1 - Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [ª]*	*Pot. Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Campo Pequeno	B	CPeq_B	100	-78,91	54	0,71	330
Av. República	A	ARep_A	100	-74,43	51	0,53	280
Técnico	C	Tecn_C	240	-65,33	193	0,14	220
Olaias	C	Olai_C	240	-72,87	98	1,47	83
Técnico	B	Tecn_B	120	-66,47	240	0,14	220
Técnico	A	Tecn_A	0	-54,63	263	0,14	220

Tabela I.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
Cave	Av. República	A	Interior	31,57	13,57	24,89	4,60	25,57	29,57	106
			Exterior	30,57	0,57	17,33	7,15	17,57	16,57	75
			Global	31,57	0,57	21,76	6,88	22,57	29,57	181
	Técnico	C	Interior	40,67	18,67	32,75	4,98	33,67	33,67	234
			Exterior	40,67	0,67	20,00	9,77	17,67	10,67	212
			Global	40,67	0,67	26,69	9,94	29,17	33,67	446
	Olaias	C	Interior	33,13	12,13	25,97	4,44	26,13	24,13	116
			Exterior	33,13	6,13	18,90	6,72	18,13	13,13	118
			Global	33,13	6,13	22,40	6,71	23,13	22,13	234
	Técnico	B	Interior	39,53	14,53	29,62	5,40	29,53	27,53	233
			Exterior	36,53	-2,47	18,67	7,95	18,53	17,53	235
			Global	39,53	-2,47	24,12	8,73	24,53	22,53	468
	Técnico	A	Interior	47,37	12,37	30,90	6,52	31,37	29,37	411
			Exterior	49,37	-1,63	21,10	11,69	21,37	29,37	252
			Global	49,37	-1,63	27,17	10,04	29,37	29,37	663
Térreo	Cpo. Pequeno		Global	26,09	7,09	16,38	5,35	15,09	14,09	53
	Av. República	A	Interior	31,57	8,57	20,53	6,28	20,57	23,57	54
			Exterior	29,57	-11,43	9,37	8,61	9,57	9,57	312
			Global	31,57	-11,43	11,02	9,20	11,57	9,57	366
	Técnico	C	Interior	39,67	0,67	23,11	8,11	23,67	27,67	216
			Exterior	39,67	-11,33	16,23	10,59	16,67	18,67	661
			Global	39,67	-11,33	17,92	10,46	18,67	18,67	877
	Olaias	C	Interior	29,13	-7,87	13,80	6,60	13,13	13,13	132
			Exterior	33,13	-15,87	12,04	9,94	12,13	8,13	467
			Global	33,13	-15,87	12,43	9,33	13,13	13,13	599
	Técnico	B	Interior	37,53	2,53	18,60	7,10	17,53	17,53	214
			Exterior	39,53	-3,47	15,58	8,19	15,53	9,53	774
			Global	39,53	-3,47	16,24	8,06	15,53	17,53	988
	Técnico	A	Interior	39,37	6,37	19,15	6,83	18,37	15,37	244
			Exterior	42,37	-11,63	15,94	11,06	15,37	29,37	869
			Global	42,37	-11,63	16,64	10,37	16,37	24,37	1113

Tabela I.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	*Estação GSM 1800*	*Sector*	*Tipo*	*Máx. [dB]*	*Mín. [dB]*	*Média [dB]*	*Desv.P. [dB]*	*Mediana [dB]*	*Moda [dB]*	*Dim. Amostra*
1º	Cpo. Pequeno	B	Exterior	27,09	5,09	13,73	4,73	13,09	15,09	75
			Global	27,09	5,09	14,07	4,90	14,09	14,09	120
	Av. República	A	Interior	22,57	-13,43	8,02	7,70	9,07	8,57	160
			Exterior	22,57	-21,43	-0,05	9,72	0,07	1,57	242
			Global	22,57	-21,43	3,17	9,79	4,57	9,57	402
	Técnico	C	Interior	35,67	-15,33	16,19	8,78	16,67	18,67	435
			Exterior	32,67	-15,33	10,09	9,35	8,67	6,67	376
			Global	35,67	-15,33	13,36	9,54	13,67	18,67	811
	Olaias	C	Interior	33,13	-5,87	16,71	7,21	17,13	15,13	279
			Exterior	33,13	-8,87	9,84	9,08	9,13	3,13	163
			Global	33,13	-8,87	14,18	8,61	15,13	15,13	442
	Técnico	B	Interior	39,53	-5,47	15,49	8,41	15,53	17,53	459
			Exterior	39,53	-14,47	12,57	10,19	12,53	12,53	384
			Global	39,53	-14,47	14,16	9,37	14,53	17,53	843
	Técnico	A	Interior	44,37	-16,63	12,38	10,95	11,37	9,37	594
			Exterior	38,37	-20,63	11,51	12,83	12,37	4,37	544
			Global	44,37	-20,63	11,97	11,89	11,37	4,37	1138

Tabela I.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]	int/ext [dB]
Cave	49,37	-2,47	25,28	9,34	26,53	29,37	1997	N/A	10,33
Térreo	42,37	-15,87	15,67	9,80	15,57	24,37	3996	-9,61	4,62
1º	44,37	-21,43	12,15	10,60	12,53	17,53	3756	-3,52	4,43
Total	49,37	-21,43	16,28	11,13	16,53	17,53	9749	-6,57	6,46

I.3 Cobertura

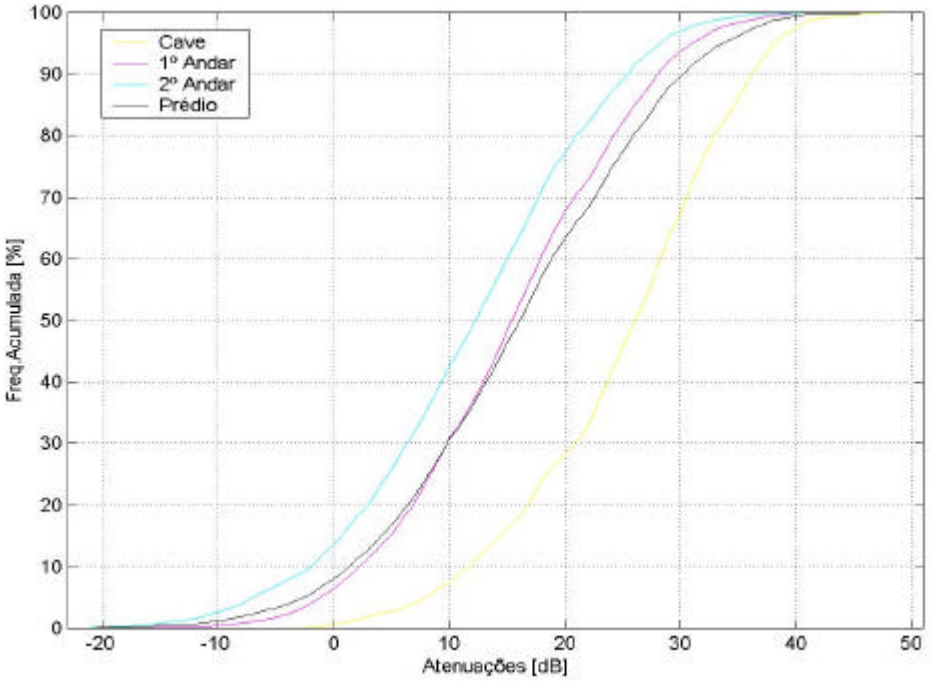


Figura I.2 – Função de Probabilidade Acumulada.

Tabela I.4 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	16,53
90	30,22
95	33,60

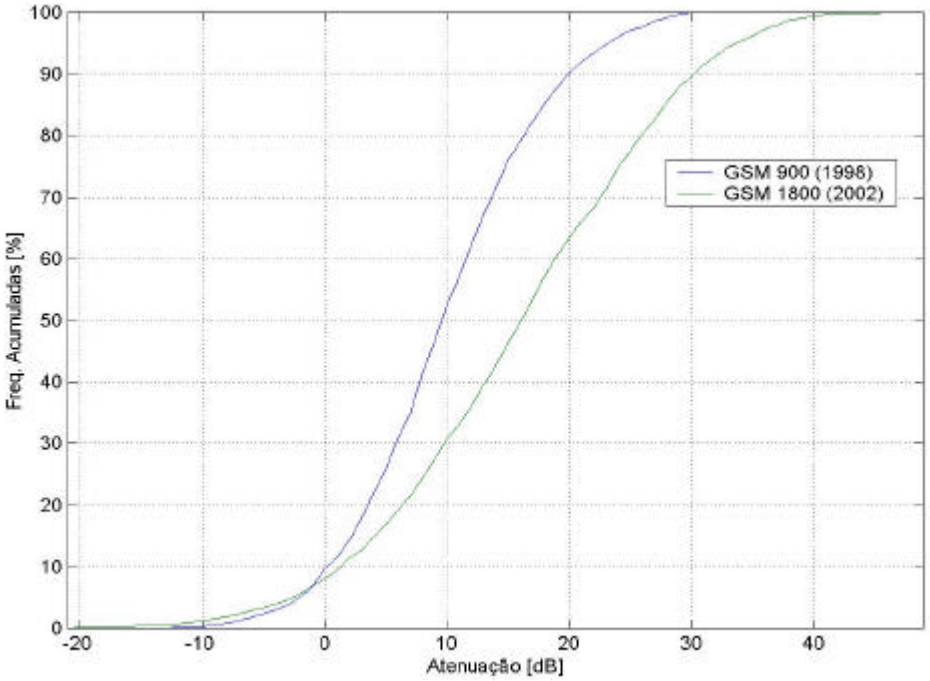


Figura I.3 – Comparação entre as duas bandas do sistema GSM.

Tabela I.5 – Comparação entre as duas bandas.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação GSM 900 [dB]	Atenuação GSM 1800 [dB]	Diferença [dB]
50	9,50	16,53	7,03
90	20,00	30,22	10,22
95	23,00	33,60	10,60

I.4 Factor de Correcção do Ganho das Antenas

Tabela I.6 – Atenuações e resultados extrapolados do Diagrama de Radiação.

Piso	*Altura [m]*	q *[º]*	j *[º]*	*Lp [dB]*	*Ganho [dB]*	*DG [dB]*	*Lp+DG [dB]*
Cave	0,00	94,09	50,00	21,10	10,48	-0,47	20,63
Térreo	3,00	92,86	50,00	15,90	10,95	0,00	15,90
1º	6,00	91,64	50,00	8,11	11,30	0,35	8,46

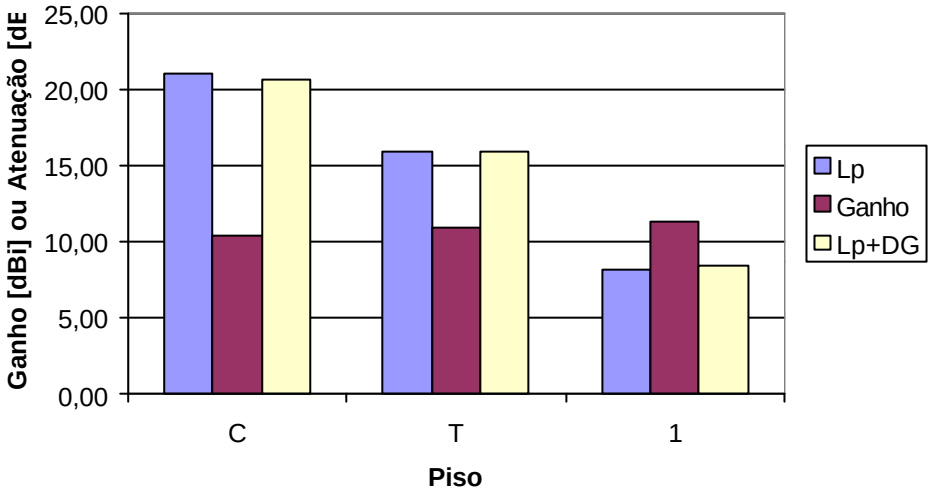


Figura I.4 – Representação gráfica das atenuações medidas e corrigidas.

I.5 Testes Estatísticos

I.5.1 Distribuição

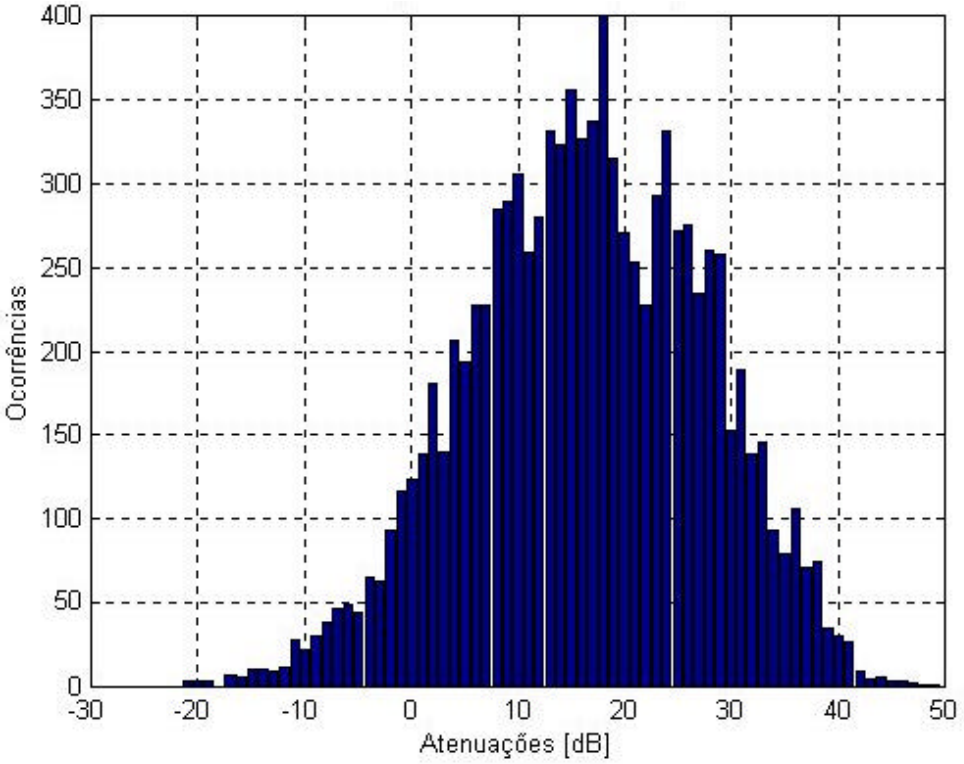


Figura I.5 – Função Densidade de Probabilidade.

I.5.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela I.7 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		12,13	10,09				
1	17,99	12,13	10,39	66,45	197,89	0,15	0,36
2	17,99	12,13	10,29	22,99	129,01	0,15	0,56
5	17,99	12,13	10,39	11,45	82,69	0,36	0,82

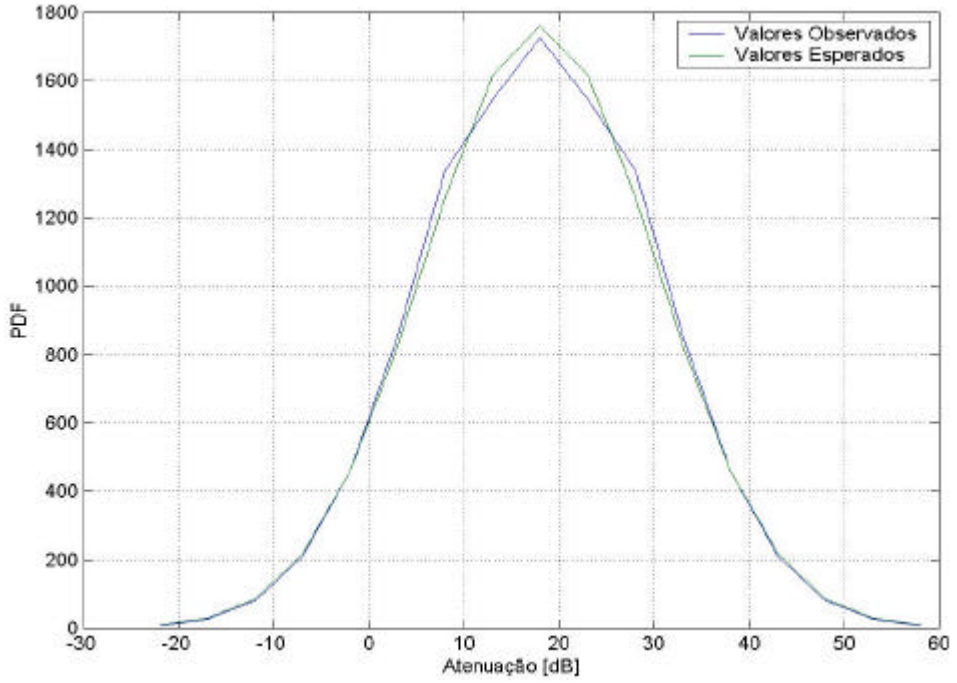


Figura I.6 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

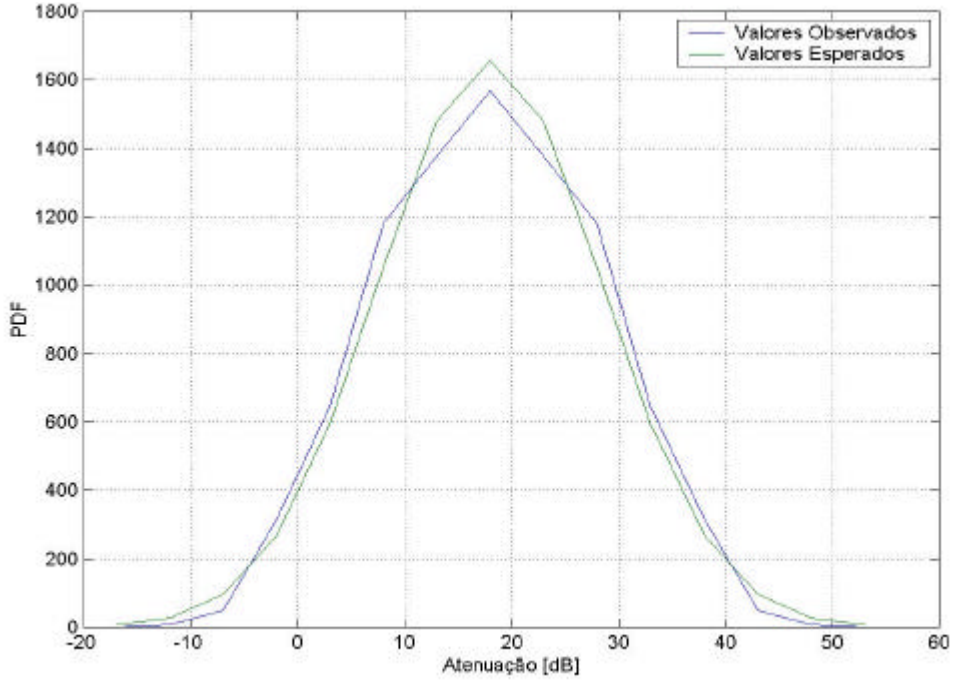


Figura I.7 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

I.5.2 Modelo de Berg

Tabela I.8 – Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg.

Local	*Tipo*	*Estações*			
		ARep_A	*Tecn_C*	*Olai_C*	*Tecn_B*
Exterior	Potência [dBm]	-74,43	-65,33	-72,87	-66,47
	Dim.Amostra	51,00	193,00	98,00	240,00
Cave	Dim.Amostra	75	212	118	235
	At.Ext. [dB]	17,33	20,00	18,90	18,70
Térreo	Dim.Amostra	312	661	467	774
	At.Ext. [dB]	9,37	16,23	12,04	15,58
1º	Dim.Amostra	242	376	163	384
	At.Ext. [dB]	-0,05	10,09	9,84	12,57

Tabela I.9 – Aferição dos parâmetros por regressão linear e erro associado.

Piso	*Tipo*	*Média Atenuações*	*Curva Reg.lin.*	*Erro (Módulo)*
Cave	Exterior	18,73	18,69	0,04
Térreo	Exterior	13,31	13,38	0,07
1º	Exterior	8,11	8,07	0,04

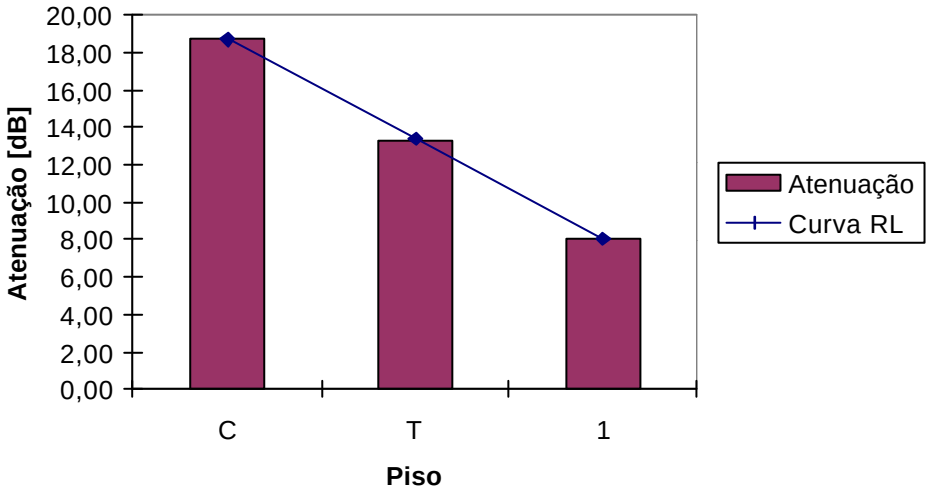


Figura I.8 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Tabela I.10 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	13,38
Gh [dB/piso]	-5,31
Erro Médio [dB]	0,05

J.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes à Torre da Vodafone (Torre A). Esse edifício foi considerado como pertencendo à categoria "Integrado Alto".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura J.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela J.1.

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela J.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela J.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe nas Figuras J.2 e J.3. Por sua vez, na Tabela J.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos. Uma comparação entre as duas bandas do sistema GSM, encontra-se na Figura J.4, enquanto que na Tabela J.5 se faz uma comparação entre os resultados obtidos para as duas bandas do sistema GSM.

Para este edifício aplica-se o factor de correcção de ganho da antena relativa ao sector B da estação base da Luz, que está em LoS com o mesmo. Os resultados podem ser vistos na Tabela J.6 e na Figura J.5.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela J.7. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras J.7 e J.8, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura J.6, ainda se pode encontrar uma função densidade de probabilidade.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg, pode ser visto nas Tabela J.8 e J.9. Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura J.9, enquanto na Tabela J.10 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e o respectivo erro associado.

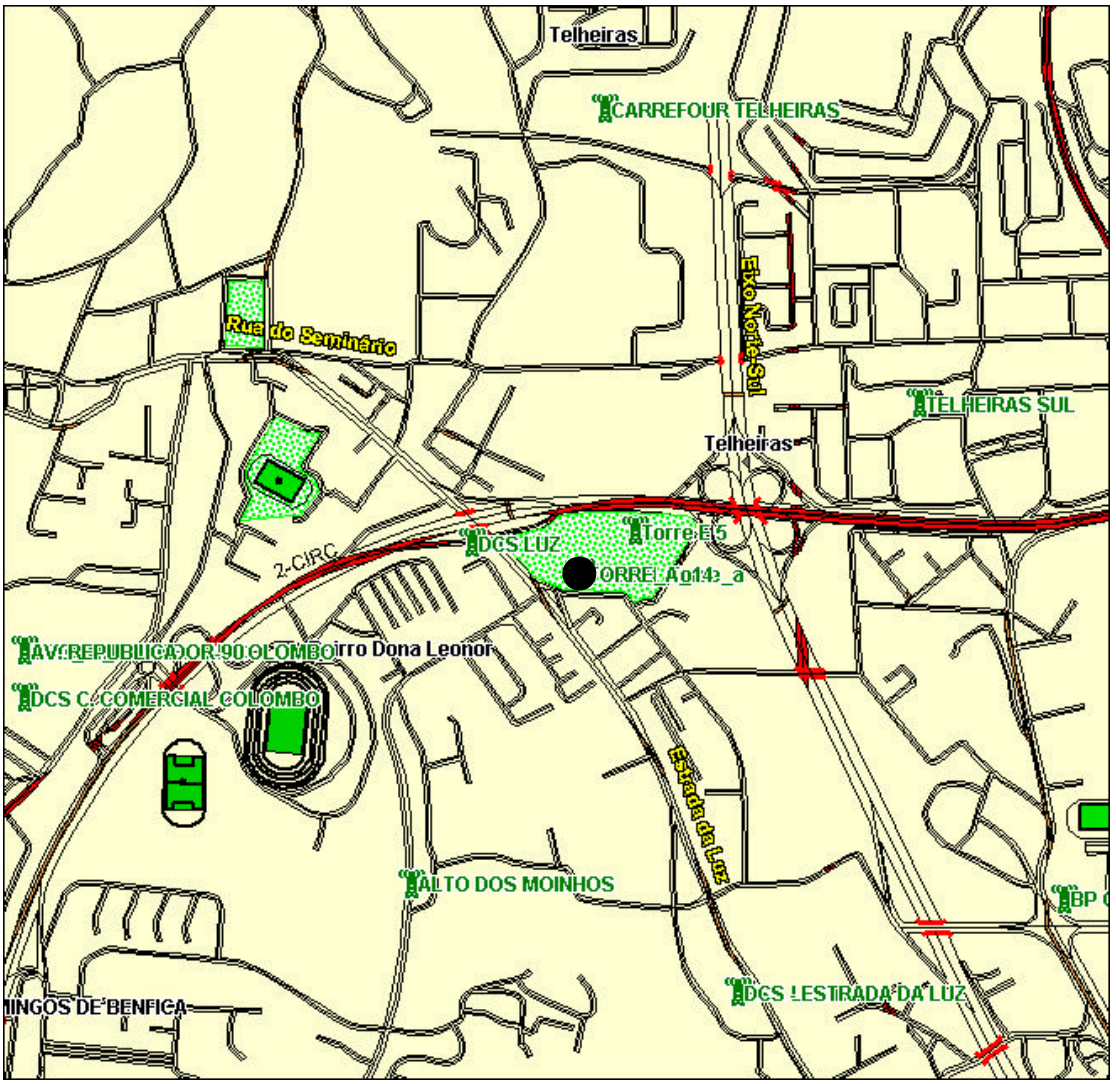


Figura J.1 – Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

J.2 Resultados da Campanha de Medidas

Tabela J.1 – Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [º]*	*Pot. Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Estrada da Luz	A	ELuz_A	0	-79,38	85	0,66	159
Luz	B	Luz_B	120	-41,46	329	0,18	287
Luz	A	Luz_A	0	-67,87	166	0,18	287
Luz	C	Luz_C	240	-68,66	96	0,18	287

Tabela J.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
Térreo	Luz	B	Exterior	44,54	-5,46	13,55	8,87	13,04	11,54	168
			Global	44,54	-5,46	13,55	8,87	13,04	11,54	168
	Luz	A	Exterior	33,13	2,13	13,53	5,84	13,13	16,13	115
			Global	33,13	2,13	13,53	5,84	13,13	16,13	115
	Luz	C	Exterior	30,34	0,34	13,90	7,46	15,34	15,34	50
			Global	30,34	0,34	13,90	7,46	15,34	15,34	50
1º	Luz	B	Exterior	40,54	-0,46	19,11	8,47	19,54	15,54	151
			Global	45,54	-0,46	22,48	9,94	22,54	15,54	197
	Luz	A	Exterior	29,13	-1,87	15,75	5,99	15,13	15,13	100
			Global	38,13	-1,87	18,54	7,99	17,13	15,13	127
2º	Est. Luz	A	Exterior	24,62	1,62	13,91	5,77	14,62	16,62	55
			Global	24,62	1,62	13,91	5,77	14,62	16,62	55
	Luz	B	Exterior	38,54	-5,46	12,56	8,91	11,54	15,54	218
			Global	41,54	-5,46	15,58	10,69	15,54	15,54	264
	Luz	A	Exterior	27,13	-4,87	10,10	6,95	11,13	13,13	146
			Global	33,13	-4,87	12,41	8,47	13,13	13,13	174
	Luz	C	Exterior	29,34	-1,66	12,16	7,59	12,34	7,34	61
			Global	32,34	-1,66	15,12	9,17	13,84	7,34	76
3º	Est. Luz	A	Exterior	26,62	0,62	17,02	5,18	16,62	15,62	50
			Global	26,62	0,62	17,31	5,30	17,12	15,62	52
	Luz	B	Exterior	38,54	-5,46	15,52	9,13	16,54	21,54	188
			Global	48,54	-5,46	18,00	9,99	19,54	22,54	233
	Luz	A	Exterior	26,13	-0,87	11,52	7,34	12,13	16,13	127
			Global	33,13	-0,87	13,58	8,43	14,13	21,13	152
	Luz	C	Exterior	28,34	4,34	14,92	6,02	15,34	21,34	61
			Global	32,34	4,34	16,57	7,11	16,84	21,34	72
5º	Est. Luz	A	Exterior	21,62	5,62	13,78	4,06	14,62	14,62	50
			Global	24,62	5,62	14,47	4,68	14,62	14,62	54
	Luz	B	Exterior	37,54	6,54	19,15	6,62	18,54	19,54	120
			Global	39,54	6,54	21,56	7,54	21,54	19,54	165
	Luz	A	Exterior	24,13	1,13	12,49	4,21	12,13	10,13	77
			Global	34,13	1,13	15,07	5,93	15,13	10,13	115
	Luz	C	Global	30,34	-0,66	14,73	6,87	14,34	11,34	52
6º	Est. Luz	A	Exterior	19,62	0,62	11,87	4,46	12,62	11,62	55
			Global	26,62	0,62	12,92	5,15	12,62	11,62	63
	Luz	B	Interior	42,54	17,54	30,88	5,64	30,04	29,54	62
			Exterior	41,54	-1,46	18,16	9,31	15,54	12,54	200
			Global	42,54	-1,46	21,17	10,14	21,54	12,54	262
	Luz	A	Exterior	26,13	-9,87	6,92	8,62	6,13	-0,87	143
			Global	36,13	-9,87	9,35	9,51	10,13	15,13	185
	Luz	C	Exterior	26,34	-4,66	12,20	7,38	11,34	9,34	82
			Global	32,34	-4,66	13,70	8,20	13,34	9,34	93

Tabela J.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
7º	Est. Luz	A	Global	26,62	3,62	14,92	6,65	14,62	6,62	63
	Luz	B	Interior	51,54	26,54	35,88	5,64	36,04	30,54	74
			Exterior	46,54	1,54	22,89	10,71	21,04	15,54	230
			Global	51,54	1,54	26,05	11,21	27,54	15,54	304
	Luz	A	Interior	38,13	6,13	23,87	5,96	23,13	21,13	62
			Exterior	32,13	-8,87	10,12	9,11	10,13	-0,87	188
			Global	38,13	-8,87	13,53	10,32	14,13	21,13	250
	Luz	C	Exterior	26,34	-0,66	13,82	6,05	14,34	15,34	97
			Global	33,34	-0,66	16,21	7,87	15,34	15,34	116
8º	Est. Luz	A	Exterior	17,62	-16,38	1,96	7,72	1,62	0,62	136
			Global	22,62	-16,38	3,99	8,48	3,62	0,62	169
	Luz	B	Exterior	44,54	1,54	21,46	9,42	22,54	25,54	257
			Global	45,54	1,54	22,82	9,64	24,54	25,54	302
	Luz	A	Exterior	26,13	-8,87	7,72	8,99	6,13	-3,87	182
			Global	29,13	-8,87	9,35	9,38	9,13	18,13	213
	Luz	C	Exterior	28,34	-1,66	8,26	6,94	6,34	2,34	109
			Global	28,34	-1,66	9,14	7,44	7,34	2,34	118
9º	Est. Luz	A	Exterior	10,62	-16,38	-4,55	6,36	-5,38	-12,38	80
			Global	10,62	-16,38	-3,65	6,17	-3,38	0,62	105
	Luz	B	Exterior	42,54	5,54	21,50	8,73	21,54	12,54	147
			Global	42,54	5,54	22,82	8,92	23,54	26,54	174
	Luz	A	Exterior	23,13	-12,87	3,13	9,10	1,13	87,00	104
			Global	23,13	-12,87	4,81	9,35	4,63	-6,87	128
	Luz	C	Exterior	19,34	-6,66	5,11	5,95	4,34	-0,66	65
			Global	21,34	-6,66	6,06	6,71	5,34	-0,66	70
10º	Est. Luz	A	Interior	13,62	-11,38	1,02	5,49	0,62	0,62	61
			Exterior	9,62	-20,38	-5,77	7,76	-6,38	-8,62	84
			Global	13,62	-20,38	-2,91	7,66	-2,38	2,62	145
	Luz	B	Interior	47,54	23,54	34,09	5,74	33,54	30,54	61
			Exterior	42,54	11,54	25,27	7,05	25,54	28,54	140
			Global	47,54	11,54	27,94	7,81	28,54	29,54	201
	Luz	A	Interior	31,13	2,13	14,27	5,81	14,13	12,13	55
			Exterior	27,13	-12,87	3,69	8,60	3,13	-2,87	111
			Global	31,13	-12,87	7,20	9,24	9,13	10,13	166
	Luz	C	Exterior	17,34	-9,66	3,26	6,94	2,34	2,34	75
			Global	26,34	-9,66	5,43	8,32	4,34	2,34	89
11º	Est. Luz	A	Exterior	15,62	-14,38	-1,62	7,90	-1,38	-10,38	102
			Global	18,62	-14,38	0,14	7,98	1,62	2,62	137
	Luz	B	Exterior	46,54	14,54	30,38	7,64	30,54	23,54	149
			Global	53,54	14,54	32,24	8,35	32,54	41,54	178
	Luz	A	Exterior	27,13	-11,87	5,29	8,24	5,13	1,13	114
			Global	30,13	-11,87	8,43	10,39	7,63	1,13	138
	Luz	C	Exterior	21,34	-8,66	5,69	5,72	5,34	5,34	89
			Global	27,34	-8,66	6,81	7,08	5,34	5,34	95

Tabela J.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
12º	Est. Luz	A	Exterior	12,62	-15,38	-2,71	6,86	-2,38	0,62	107
			Global	16,62	-15,38	-0,82	7,10	-0,38	0,62	151
	Luz	B	Exterior	47,54	15,54	30,78	6,79	30,54	27,54	157
			Global	51,54	15,54	32,79	7,75	32,54	27,54	194
	Luz	A	Exterior	25,13	-10,87	4,56	8,31	2,13	-1,87	108
			Global	34,13	-10,87	7,91	9,70	6,13	11,13	149
	Luz	C	Exterior	22,34	-6,66	4,58	6,14	4,34	4,34	94
			Global	28,34	-6,66	7,35	8,06	5,34	4,34	119
13º	Est. Luz	A	Exterior	13,62	-20,38	-5,99	7,29	-7,38	-13,38	114
			Global	13,62	-20,38	-3,89	7,73	-4,38	-1,38	151
	Luz	B	Exterior	48,54	16,54	31,30	6,56	30,54	29,54	155
			Global	52,54	16,54	33,42	7,92	32,54	29,54	187
	Luz	A	Exterior	23,13	-9,87	3,88	7,90	3,13	5,13	105
			Global	29,13	-9,87	7,23	10,15	5,13	5,13	132
	Luz	C	Exterior	22,34	-4,66	5,80	5,72	5,34	1,34	98
			Global	29,34	-4,66	8,14	7,91	6,34	1,34	116
14º	Est. Luz	A	Interior	18,62	-5,38	4,44	6,07	2,62	0,62	51
			Exterior	16,62	-23,38	-6,38	9,37	-8,38	-12,38	202
			Global	18,62	-23,38	-4,20	9,81	-5,38	0,62	253
	Luz	B	Exterior	53,54	16,54	32,15	7,53	31,54	37,54	273
			Global	53,54	16,54	33,77	8,14	34,04	37,54	322
	Luz	A	Exterior	30,13	-5,87	7,72	7,66	6,13	11,13	187
			Global	30,13	-5,87	9,65	8,42	10,13	11,13	228
	Luz	C	Exterior	23,34	-7,66	7,78	6,47	7,34	15,34	188
			Global	30,34	-7,66	9,29	7,51	9,34	15,34	216
15º	Est. Luz	A	Exterior	17,62	-29,38	-6,12	9,53	-6,38	-15,38	214
			Global	18,62	-29,38	-4,31	9,80	-3,38	-15,38	260
	Luz	B	Exterior	50,54	10,54	28,57	8,67	27,54	22,54	319
			Global	55,54	10,54	30,18	9,52	28,54	22,54	359
	Luz	A	Exterior	25,13	-10,87	3,75	7,66	2,13	-0,87	235
			Global	31,13	-10,87	5,92	9,28	4,13	-0,87	271
	Luz	C	Exterior	25,34	-12,66	5,12	7,07	4,34	2,34	246
			Global	29,34	-12,66	6,69	8,52	5,34	2,34	270

Tabela J.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx.	Mín.	Média	Desv.P.	Mediana	Moda	Dimensão	Variação	int/ext
	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	Amostra	[dB]	[dB]
Terra	44,54	-5,46	13,94	7,53	14,13	11,54	372	N/A	N/A
1º	45,54	-1,87	20,33	9,12	20,54	15,54	409	6,39	N/A
2º	41,54	-5,46	14,36	9,55	13,87	15,54	570	-5,97	N/A
3º	48,54	-5,46	16,41	8,96	17,13	22,54	509	2,05	N/A
4º	41,54	12,34	24,57	6,47	24,54	26,54	78	N/A	N/A
5º	39,54	-0,66	17,71	7,42	16,34	19,54	386	1,30	N/A
6º	42,54	-9,87	15,53	10,58	14,34	12,54	603	-2,18	17,81
7º	51,54	-8,87	19,27	11,62	18,13	15,54	733	3,74	13,89
8º	45,54	-16,38	13,26	11,86	12,54	25,54	802	-6,01	N/A
9º	42,54	-16,38	9,70	13,33	9,54	26,54	477	-3,56	N/A
10º	47,54	-20,38	11,44	14,81	10,13	28,54	601	1,74	7,49
11º	53,54	-14,38	13,81	15,72	10,34	5,34	548	2,37	N/A
12º	51,54	-15,38	13,53	15,81	10,13	0,62	613	-0,28	N/A
13º	52,54	-20,38	12,90	17,02	8,62	5,13	586	-0,63	N/A
14º	53,54	-23,38	13,76	16,94	11,62	0,62	1019	0,86	-7,79
15º	55,54	-29,38	11,38	16,22	8,62	-0,87	1160	-2,38	N/A
Total	55,54	-29,38	14,26	13,79	13,62	15,54	9466	-0,18	7,85

J.3 Cobertura

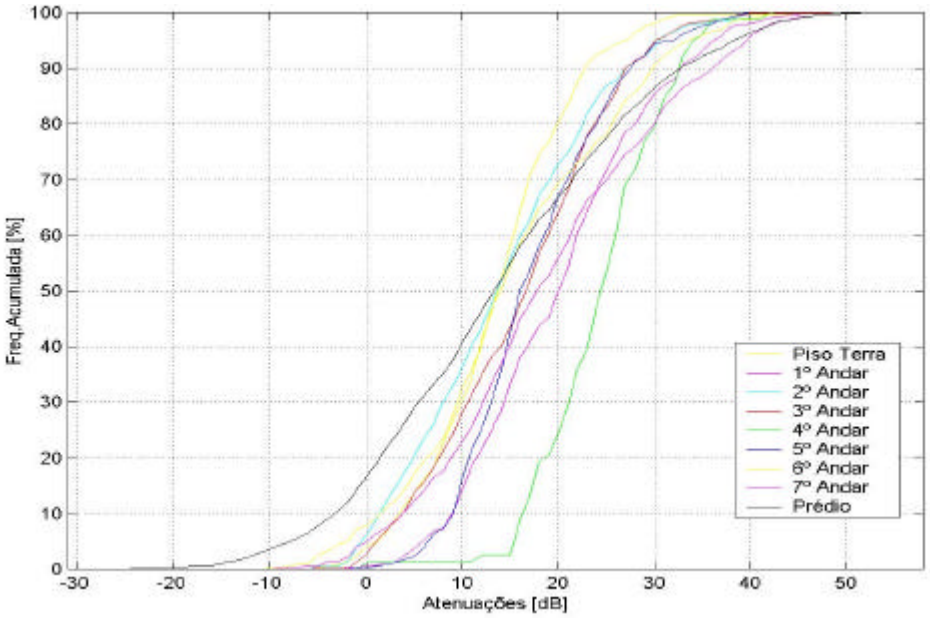


Figura J.2 – Função de Probabilidade Acumulada (1ª Parte).

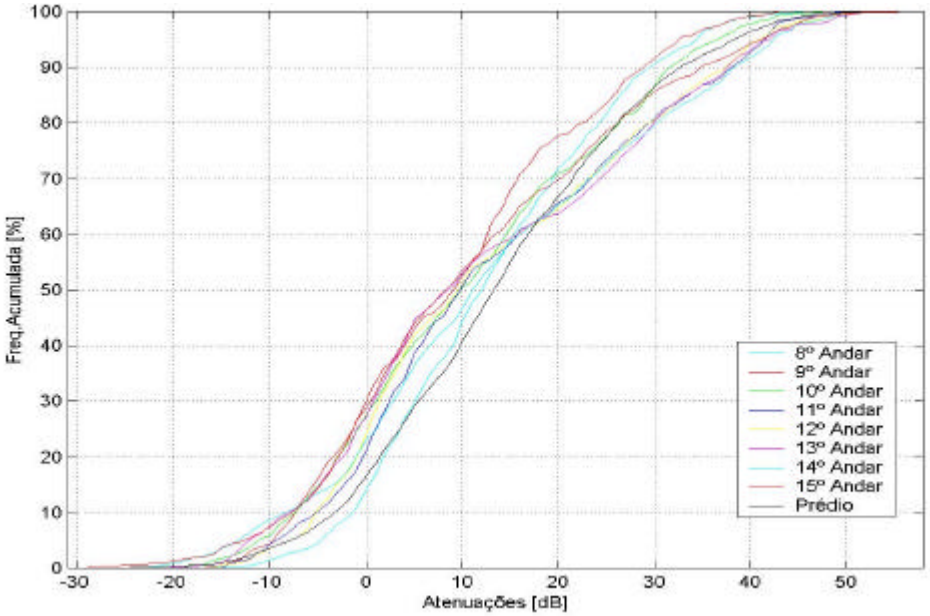


Figura J.3 – Função de Probabilidade Acumulada (2ª Parte).

Tabela J.4 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	13,62
90	32,67
95	38,21

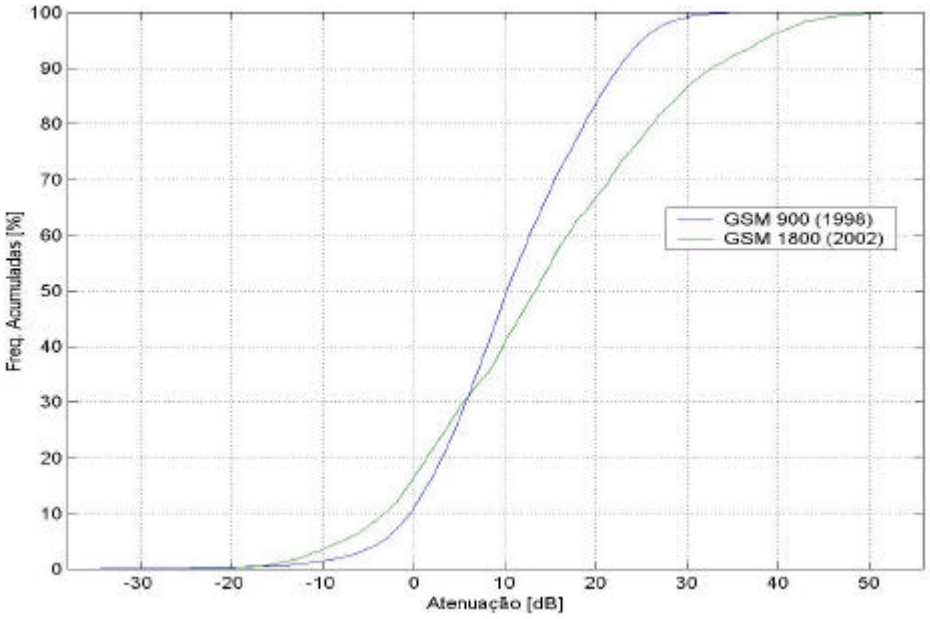


Figura J.4 – Comparação entre as duas bandas do sistema GSM.

Tabela J.5 – Comparação entre as duas bandas.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação GSM 900 [dB]	Atenuação GSM 1800 [dB]	Diferença [dB]
50	10,00	13,62	3,62
90	22,33	32,67	10,34
95	24,33	38,21	13,88

J.4 Factor de Correcção do Ganho das Antenas

Tabela J.6 – Atenuações e resultados extrapolados do Diagrama de Radiação.

Piso	*Altura [m]*	q [º]	j [º]	*Lp [dB]*	*Ganho [dB]*	DG [dB]	Lp+DG [dB]
Térreo	0	90,7	0	11,8	16,9	0	**11,8**
1º	3	89,77	0	20,2	17	0,1	20,3
2º	6	88,84	0	13,6	16,8	-0,1	13,5
3º	9	87,91	0	16,6	16,3	-0,6	16
4º	12	86,97	0				
5º	15	86,03	0	20,2	14,4	-2,5	17,7
6º	18	85,08	0	19,2	12,8	-4,1	15,1
7º	21	84,13	0	23,9	10,8	-6,1	17,8
8º	24	83,18	0	22,5	7,9	-9	13,5
9º	27	82,23	0	22,6	3,8	-13,1	9,5
10º	30	81,27	0	26,3	-4,2	-21,1	5,2
11º	33	80,32	0	31,4	-16	-32,9	-1,5
12º	36	79,36	0	31,8	-1,6	-18,5	13,3
13º	39	78,41	0	32,4	2,9	-14	18,4
14º	42	77,46	0	33,2	5,1	-11,8	21,4
15º	45	76,5	0	29,6	6,1	-10,8	18,8

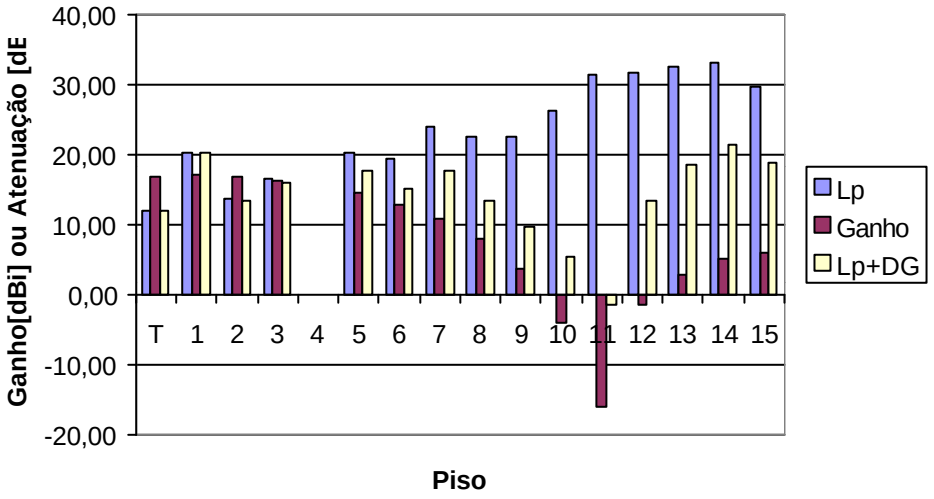


Figura J.5 – Representação gráfica das atenuações medidas e corrigidas.

J.5 Testes Estatísticos

J.5.1 Distribuição

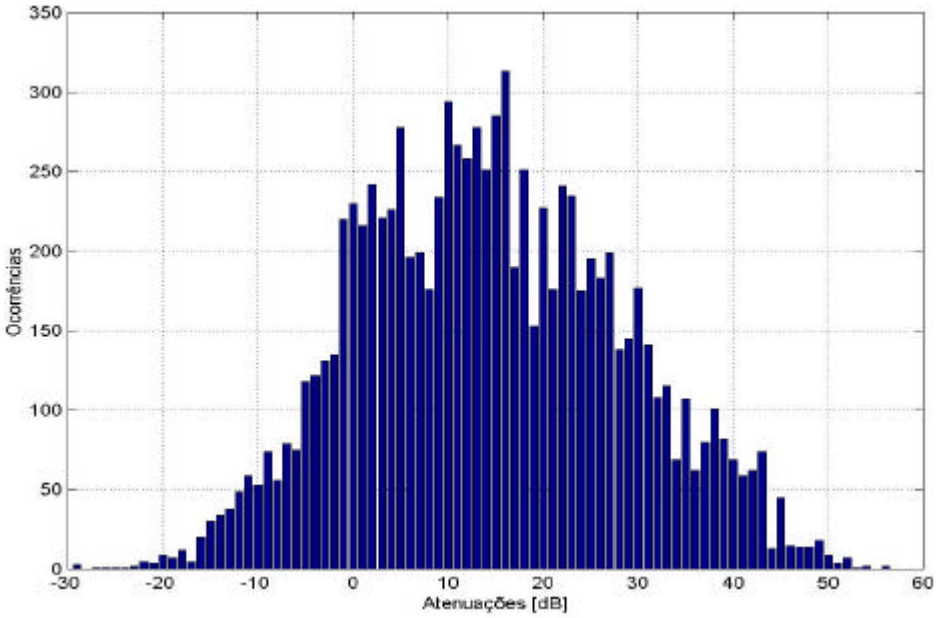


Figura J.6 – Função Densidade de Probabilidade.

J.5.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela J.7 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial		14,09	13,64				
1	16,00	14,19	14,34	236,09	241,90	0,26	0,29
2	16,00	14,19	13,94	177,53	172,32	0,47	0,51
5	16,00	14,09	14,14	139,64	80,46	0,91	0,49

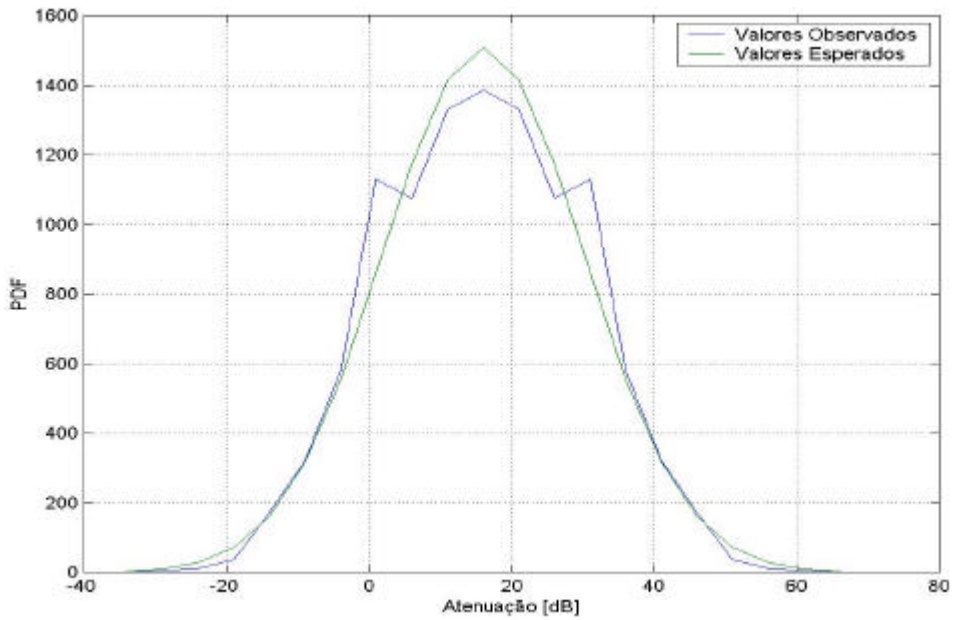


Figura J.7 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

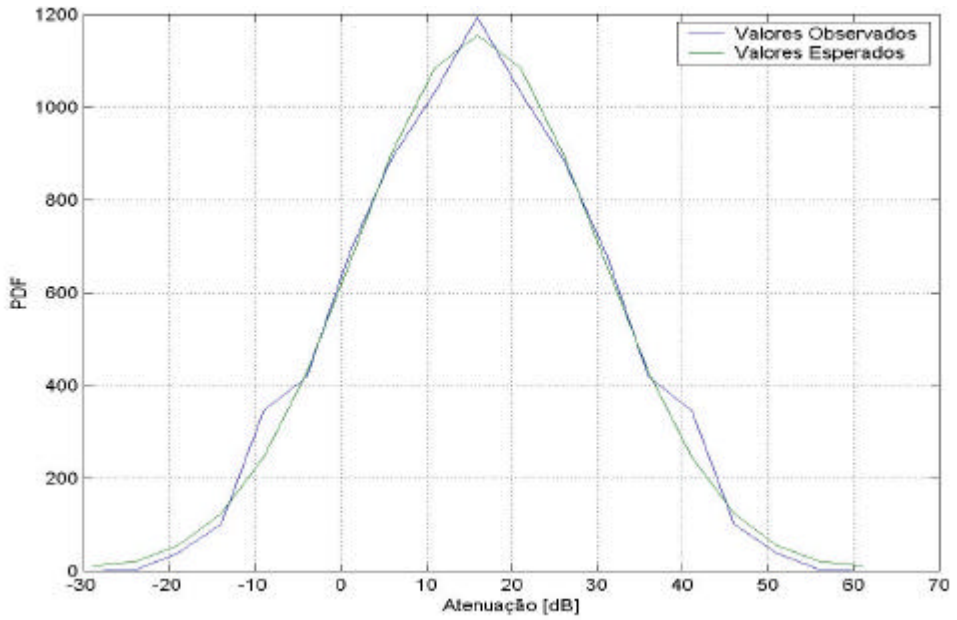


Figura J.8 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

J.5.3 Modelo de Berg

Tabela J.8 – Resultados para aferição dos parâmetros do modelo.

Local	*Tipo*	*Estações*		
		ELuz_A	*Luz_A*	*Luz_C*
Térreo	Dim.Amostra	23	84	35
	At.Ext. [dB]	19,20	12,80	12,80
1º	Dim.Amostra	36	100	40
	At.Ext. [dB]	17,60	17,00	19,20
2º	Dim.Amostra	55	146	61
	At.Ext. [dB]	15,70	11,40	13,40
3º	Dim.Amostra	50	127	61
	At.Ext. [dB]	18,80	12,80	16,20
5º	Dim.Amostra	50	77	40
	At.Ext. [dB]	15,60	13,80	13,40
6º	Dim.Amostra	55	143	82
	At.Ext. [dB]	13,70	8,20	13,50
7º	Dim.Amostra	49	188	97
	At.Ext. [dB]	14,40	11,40	15,10
	Dim.Amostra	14	62	19
	At.Int. [dB]	24,70	25,10	29,70
8º	Dim.Amostra	136	182	109
	At.Ext. [dB]	3,70	9,00	9,50
	Dim.Amostra	33	31	9
	At.Int. [dB]	14,10	20,20	21,00
9º	Dim.Amostra	80	104	65
	At.Ext. [dB]	-2,80	4,40	6,40
	Dim.Amostra	25	24	5
	At.Int. [dB]	1,00	13,40	19,60
10º	Dim.Amostra	84	111	75
	At.Ext. [dB]	-4,00	5,00	4,50
	Dim.Amostra	61	55	14
	At.Int. [dB]	2,80	15,50	18,30
11º	Dim.Amostra	102	114	89
	At.Ext. [dB]	0,20	6,60	6,90
	Dim.Amostra	35	24	6
	At.Int. [dB]	7,10	24,60	24,60

Tabela J.8 – Resultados para aferição dos parâmetros do modelo (continuação).

Local	*Tipo*	*Estações*		
		ELuz_A	*Luz_A*	*Luz_C*
12º	Dim.Amostra	107	108	94
	At.Ext. [dB]	-0,90	5,80	5,80
	Dim.Amostra	44	41	25
	At.Int. [dB]	5,60	18,00	19,00
13º	Dim.Amostra	114	105	98
	At.Ext. [dB]	-4,20	5,20	7,10
	Dim.Amostra	37	27	18
	At.Int. [dB]	4,30	21,50	22,20
14º	Dim.Amostra	202	187	188
	At.Ext. [dB]	-4,60	9,00	9,00
	Dim.Amostra	51	41	28
	At.Int. [dB]	6,20	19,70	20,70
15º	Dim.Amostra	214	235	246
	At.Ext. [dB]	-4,30	5,00	6,40
	Dim.Amostra	46	36	24
	At.Int. [dB]	5,90	21,30	24,10

Tabela J.9 – Aferição dos parâmetros de regressão linear e erro associado.

Piso	*Tipo*	*Média Atenuações*	*Curva Reg.lin.*	*Erro (Módulo)*
Térreo	Exterior	14,90	18,40	3,50
1º	Exterior	17,90	17,00	0,90
2º	Exterior	13,50	15,60	2,10
3º	Exterior	15,90	14,30	1,60
4º				
5º	Exterior	14,30	11,50	2,80
6º	Exterior	11,80	10,20	1,60
7º	Exterior	13,60	8,80	4,80
	Interior	26,50		
8º	Exterior	7,40	7,40	0,00
	Interior	18,40		
9º	Exterior	2,70	6,10	3,40
	Interior	11,30		
10º	Exterior	1,80	4,70	2,90
	Interior	12,20		
11º	Exterior	4,60	4,70	0,10
	Interior	18,80		
12º	Exterior	3,60	4,70	1,10
	Interior	14,20		
13º	Exterior	2,70	4,70	2,00
	Interior	16,00		
14º	Exterior	4,50	4,70	0,20
	Interior	15,50		
15º	Exterior	2,40	4,70	2,30
	Interior	17,10		

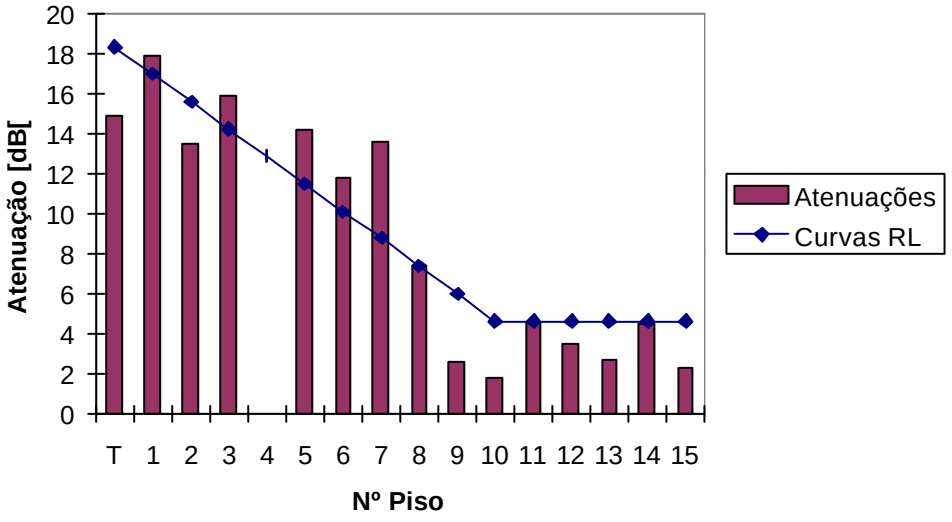


Figura J.9 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Tabela J.10 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	17,80
Wi [dB]	11,90
Gh [dB/piso]	1,20
Erro Médio [dB]	2,00

K.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes ao Complexo Interdisciplinar situado no Instituto Superior Técnico. Esse edifício foi considerado como pertencendo à categoria "Isolado Alto".

Um mapa da zona onde o edifício medido se encontra é dado pela Figura K.1.

As estações base exteriores que foram medidas podem ser analisadas na Tabela K.1.

Os resultados das medidas levadas a cabo no interior do edifício foram divididos por piso, estação base e tipo de sala (interior / exterior) e podem ser encontradas na Tabela K.2. Para uma análise mais sucinta, aconselha-se antes a consulta da Tabela K.3, onde os resultados se encontram ordenados apenas por andar.

Quanto à cobertura, esta pode ser vista em detalhe na Figura K.2. Por sua vez, na Tabela K.4 encontram-se os valores de atenuação para valores de cobertura típicos.

Para este edifício aplica-se o factor de correcção de ganho da antena relativa ao sector A da estação base situada no Instituto Superior Técnico, que está em LoS com o mesmo. Os resultados podem ser vistos na Tabela K.5 E na Figura K.3.

Os resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal (média, desvio padrão), bem como os resultados para o teste do X^2 e para a raíz do erro quadrático médio encontram-se na Tabela K.6. Para se ter uma boa noção dos erros obtidos para o teste do X^2, deverão ser consultadas as Figuras K.5 e K.6, onde se encontram os valores esperados e observados para o intervalo de dimensão 5. Na Figura K.4, ainda se pode encontrar uma função densidade de probabilidade.

Um estudo dos espaços onde se aplica o Modelo de Berg, pode ser visto nas Tabelas K.7 e K.8. Por sua vez, a evolução da atenuação em altura pode ser visualizada na Figura K.7, enquanto na Tabela K.9 podem ser vistos os parâmetros do Modelo de Berg e o respectivo erro associado.

Nas Tabelas K.10 e K.11 se encontram os valores para a aplicação do Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido.

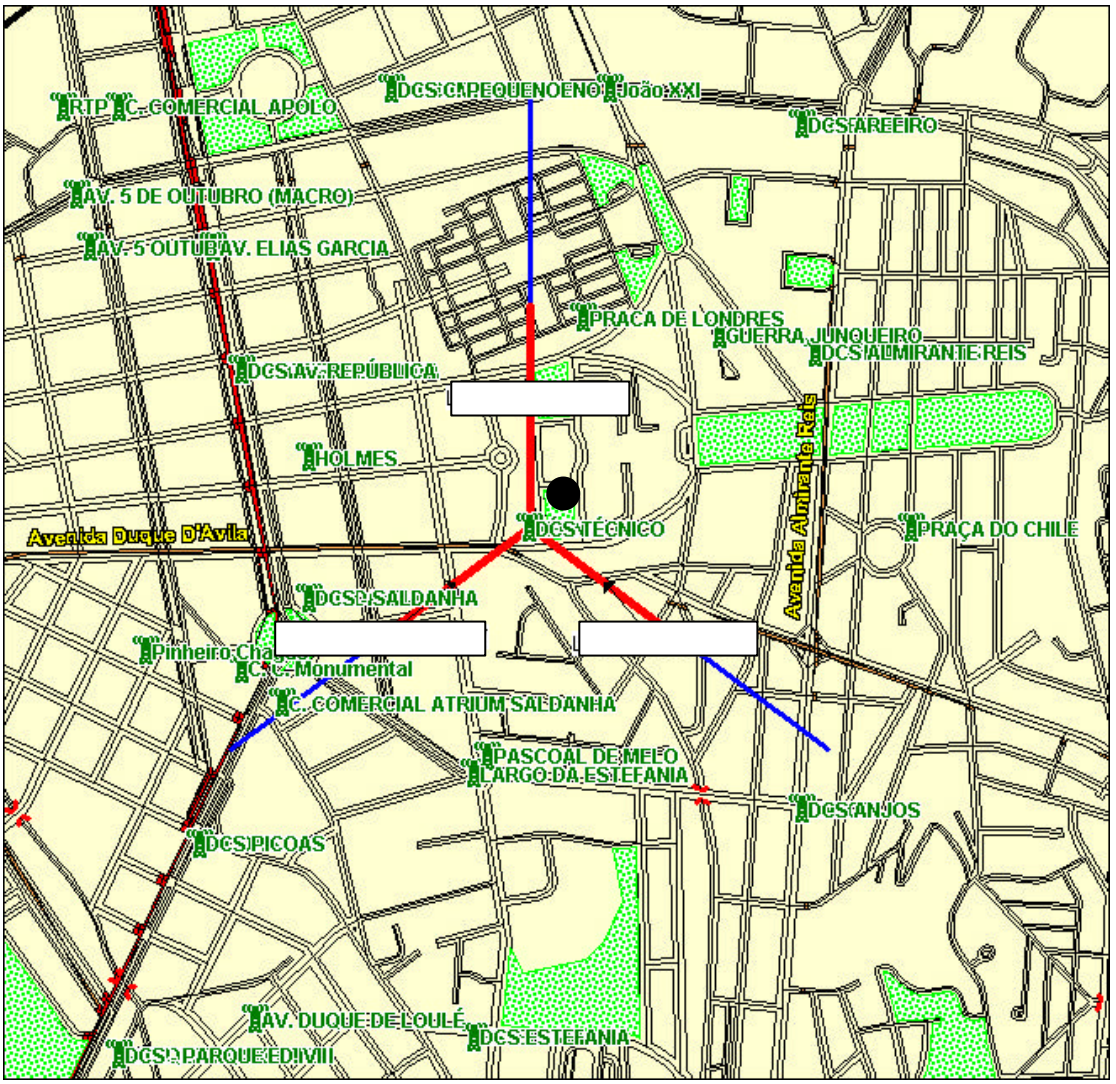


Figura K.1 - Mapa da zona (Edifício medido assinalado com um círculo a preto).

K.2 Resultados da Campanha de Medidas

Tabela K.1 – Parâmetros exteriores das Estações Base medidas.

Estação GSM 1800	*Sector*	*Nome*	*Orientação [º]*	*Pot. Média [dBm]*	*Dimensão Amostra*	*Distância [km]*	*Ângulo [º]*
Praça Espanha	B	PEsp_B	120	-88.70	60	1.89	263
Av. República	B	ARep_B	100	-78.90	232	0.43	293
Técnico	C	Tecn_C	240	-63.91	415	0.04	140
Técnico	B	Tecn_B	120	-74.52	369	0.04	140
Técnico	A	Tecn_A	0	-54.69	418	0.04	140
São Sebastião	A	SSeb_A	0	-90.90	37	1.13	261

Tabela K.2 – Atenuações interiores medidas.

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
Térreo	Av.República	B	Global	27,10	8,10	18,49	5,54	17,60	23,10	72
	Técnico	C	Interior	40,09	3,09	17,51	6,52	17,09	18,09	183
			Exterior	20,09	-7,91	1,53	4,96	0,09	0,09	75
			Global	40,09	-7,91	12,87	9,49	14,09	18,09	258
	Técnico	B	Interior	31,48	4,48	17,43	5,76	16,48	15,48	177
			Exterior	19,48	-11,52	3,09	7,23	3,48	-0,52	71
			Global	31,48	-11,52	13,33	8,98	15,48	15,48	248
	Técnico	A	Interior	47,41	18,41	31,32	5,20	30,91	29,41	184
			Exterior	38,41	15,41	23,69	4,35	24,41	24,41	75
			Global	47,41	15,41	29,11	6,05	28,41	24,41	259
1º	P.Espanha	B	Exterior	17,30	-13,70	4,78	7,04	5,30	12,30	87
			Global	17,30	-13,70	6,44	6,60	7,30	12,30	132
	Av.República	B	Exterior	26,10	1,10	12,98	5,51	12,60	11,10	118
			Global	27,10	1,10	14,52	5,77	14,60	11,10	156
	Técnico	C	Interior	31,09	2,09	12,21	5,91	12,09	7,09	113
			Exterior	30,09	-8,91	7,40	8,47	7,09	4,09	224
			Global	31,09	-8,91	9,02	8,03	9,09	7,09	337
	Técnico	B	Interior	28,48	-6,52	5,49	6,86	4,48	1,48	114
			Exterior	26,48	-13,52	4,94	7,49	5,48	4,48	203
			Global	28,48	-13,52	5,14	7,26	4,48	4,48	317
	Técnico	A	Interior	36,41	8,41	20,17	5,85	19,41	18,41	116
			Exterior	34,41	-2,59	15,40	7,36	15,41	9,41	224
			Global	36,41	-2,59	17,02	7,24	17,41	19,41	340
2º	P.Espanha	B	Interior	15,30	-5,70	4,36	5,95	2,30	2,30	56
			Exterior	16,30	-13,70	2,10	6,67	3,30	6,30	170
			Global	16,30	-13,70	2,66	6,56	3,30	2,30	226
	Av.República	B	Exterior	25,10	-0,90	9,54	4,90	9,10	7,10	245
			Global	25,10	-0,90	10,06	5,00	10,10	9,10	277
	Técnico	C	Interior	28,09	-4,91	10,01	6,87	10,09	9,09	89
			Exterior	31,09	-15,91	5,90	8,46	6,09	7,09	413
			Global	31,09	-15,91	6,63	8,34	7,09	7,09	502
	Técnico	B	Interior	19,48	-10,52	2,63	6,20	3,48	3,48	85
			Exterior	25,48	-15,52	1,96	7,19	1,48	4,48	401
			Global	25,48	-15,52	2,08	7,03	2,48	3,48	486
	Técnico	A	Interior	38,41	6,41	16,15	6,05	15,41	13,41	90
			Exterior	33,41	-14,59	11,06	9,25	10,41	4,41	417
			Global	38,41	-14,59	11,96	8,98	12,41	4,41	507

Tabela K.2 – Atenuações interiores medidas (continuação).

Piso	Estação GSM 1800	Sector	Tipo	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dim. Amostra
3º	P.Espanha	B	Interior	13,30	-17,70	-0,47	6,56	0,30	0,30	109
			Exterior	15,30	-19,70	-1,67	7,51	-2,20	-4,70	164
			Global	15,30	-19,70	-1,19	7,16	-0,70	-4,70	273
	Av.República	B	Interior	22,10	0,10	8,71	4,40	9,10	5,10	99
			Exterior	26,10	-9,90	4,29	6,30	4,10	5,10	274
			Global	26,10	-9,90	5,46	6,17	5,10	5,10	373
	Técnico	C	Interior	27,09	-10,91	10,24	6,43	9,59	9,09	202
			Exterior	27,09	-8,91	5,34	6,82	4,09	4,09	432
			Global	27,09	-10,91	6,90	7,08	6,09	4,09	634
	Técnico	B	Interior	19,48	-15,52	0,36	6,52	-0,52	-0,52	194
			Exterior	19,48	-21,52	-0,39	9,46	0,48	8,48	401
			Global	19,48	-21,52	-0,14	8,61	0,48	-0,52	595
	Técnico	A	Interior	27,41	-3,59	10,26	6,34	9,41	4,41	203
			Exterior	36,41	-11,59	10,71	9,17	10,41	9,41	440
			Global	36,41	-11,59	10,57	8,38	10,41	9,41	643
4º	P.Espanha	B	Interior	11,30	-18,70	-2,73	6,16	-1,70	-0,70	89
			Exterior	14,30	-24,70	-5,78	8,56	-4,70	0,30	293
			Global	14,30	-24,70	-5,07	8,16	-4,70	0,30	382
	Av.República	B	Interior	20,10	-9,90	6,09	5,38	5,10	5,10	74
			Exterior	26,10	-15,90	2,69	6,88	2,10	0,10	333
			Global	26,10	-15,90	3,31	6,76	3,10	0,10	407
	Técnico	C	Interior	22,09	-9,91	7,22	5,63	6,09	3,09	147
			Exterior	27,09	-16,91	3,79	7,13	3,09	1,09	539
			Global	27,09	-16,91	4,52	6,98	4,09	3,09	686
	Técnico	B	Interior	16,48	-10,52	-0,98	5,85	-1,52	-6,52	135
			Exterior	20,48	-17,52	0,94	8,24	1,48	4,48	473
			Global	20,48	-17,52	0,51	7,81	0,48	4,48	608
	Técnico	A	Interior	28,41	-2,59	8,50	6,96	8,41	2,41	151
			Exterior	39,41	-16,59	8,50	10,33	9,41	9,41	545
			Global	39,41	-16,59	8,50	9,70	9,41	4,41	696
5º	P.Espanha	B	Interior	8,30	-19,70	-5,68	4,95	-5,70	-4,70	97
			Exterior	7,30	-24,70	-8,00	6,38	-7,70	-9,70	298
			Global	8,30	-24,70	-7,43	6,14	-7,70	-9,70	395
	Av.República	B	Interior	14,10	-11,90	2,87	5,72	3,10	3,10	87
			Exterior	14,10	-23,90	-0,55	7,96	1,10	5,10	256
			Global	14,10	-23,90	0,32	7,59	1,10	5,10	343
	Técnico	C	Interior	18,09	-9,91	1,84	5,93	1,09	0,09	222
			Exterior	24,09	-16,91	0,89	6,94	1,09	0,09	565
			Global	24,09	-16,91	1,16	6,68	1,09	0,09	787
	Técnico	B	Interior	15,48	-16,52	-3,79	6,61	-4,52	-7,52	198
			Exterior	17,48	-22,52	-2,55	7,74	-2,52	-7,52	437
			Global	17,48	-22,52	-2,94	7,42	-3,52	-7,52	635
	Técnico	A	Interior	24,41	-12,59	1,04	7,40	0,41	-1,59	225
			Exterior	34,41	-16,59	4,25	9,69	3,41	-1,59	593
			Global	34,41	-16,59	3,37	9,23	2,41	-1,59	818

Tabela K.3 – Parâmetros gerais (por piso).

Piso	Máx. [dB]	Mín. [dB]	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Mediana [dB]	Moda [dB]	Dimensão Amostra	Variação [dB]	int/ext [dB]
Térreo	47,41	-11,52	18,41	10,83	18,48	15,48	848	N/A	12,60
1º	36,41	-13,70	10,59	8,66	10,45	7,09	1282	-7,82	3,26
2º	38,41	-15,91	6,90	8,59	6,48	4,48	1998	-3,69	2,39
3º	36,41	-21,52	5,08	8,86	5,09	4,09	2518	-1,82	1,70
4º	39,41	-24,70	3,14	9,12	3,09	4,48	2779	-1,94	1,16
5º	34,41	-24,70	-0,34	8,43	-0,55	0,09	2978	-3,48	-0,20
Total	47,41	-24,70	5,12	10,15	4,48	4,48	12403	-3,75	3,49

K.3 Cobertura

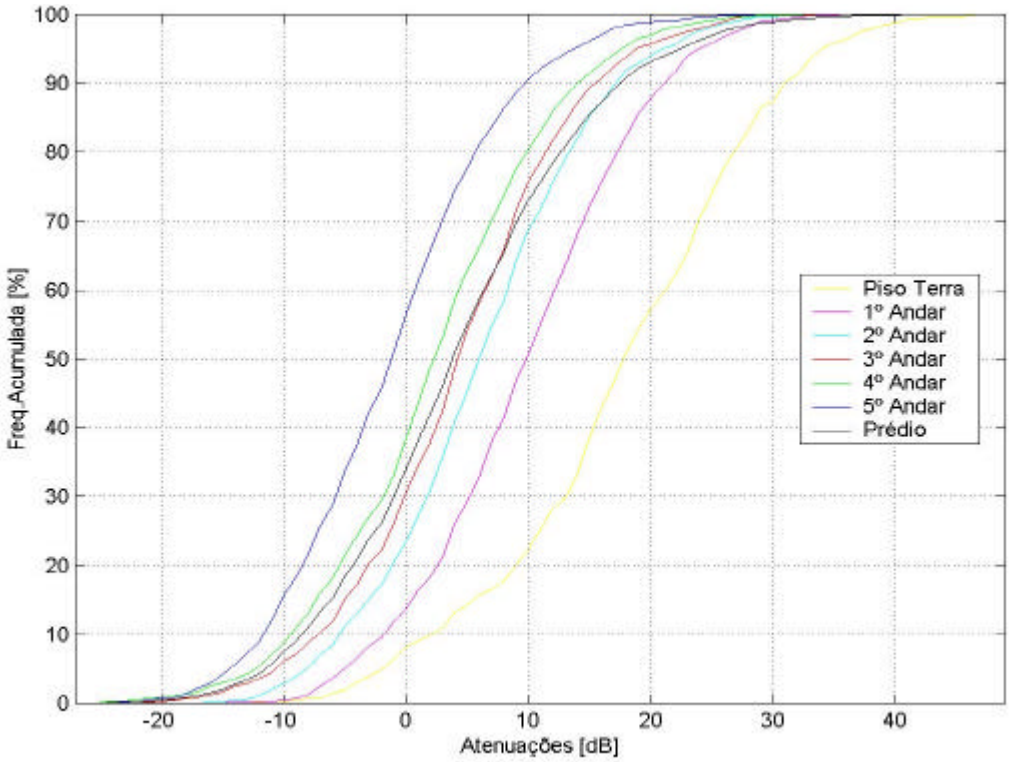


Figura K.2 – Função de Probabilidade Acumulada.

Tabela K.4 – Parâmetros de Cobertura.

Probabilidade de cobertura [%]	Atenuação [dB]
50	4,48
90	17,45
95	22,40

K.4 Factor de Correcção do Ganho das Antenas

Tabela K.5 – Atenuações e resultados extrapolados do Diagrama de Radiação.

Piso	*Altura [m]*	q *[º]*	j *[º]*	*Lp [dB]*	*Ganho [dB]*	DG *[dB]*	Lp+DG *[dB]*
Térreo	0,00	110,56	320,00	23,40	2,40	0,00	23,40
1º	3,00	106,70	320,00	15,70	3,19	0,79	16,49
2º	6,00	102,68	320,00	11,60	4,53	2,13	13,73
3º	9,00	98,53	320,00	10,70	9,86	7,46	18,16
4º	12,00	94,29	320,00	8,30	12,27	9,86	18,16
5º	15,00	90,00	320,00	4,90	13,30	10,90	15,80

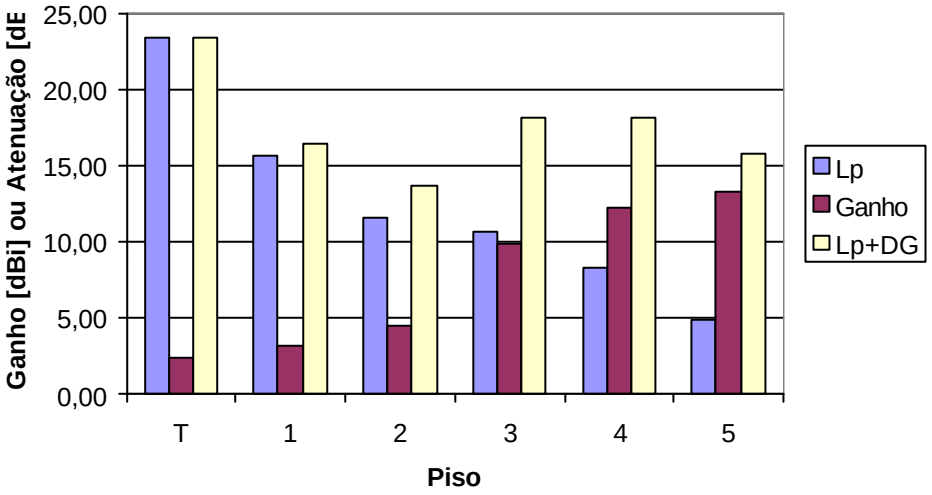


Figura K.3 – Representação gráfica das atenuações medidas e corrigidas.

K.5 Testes Estatísticos

K.5.1 Distribuição

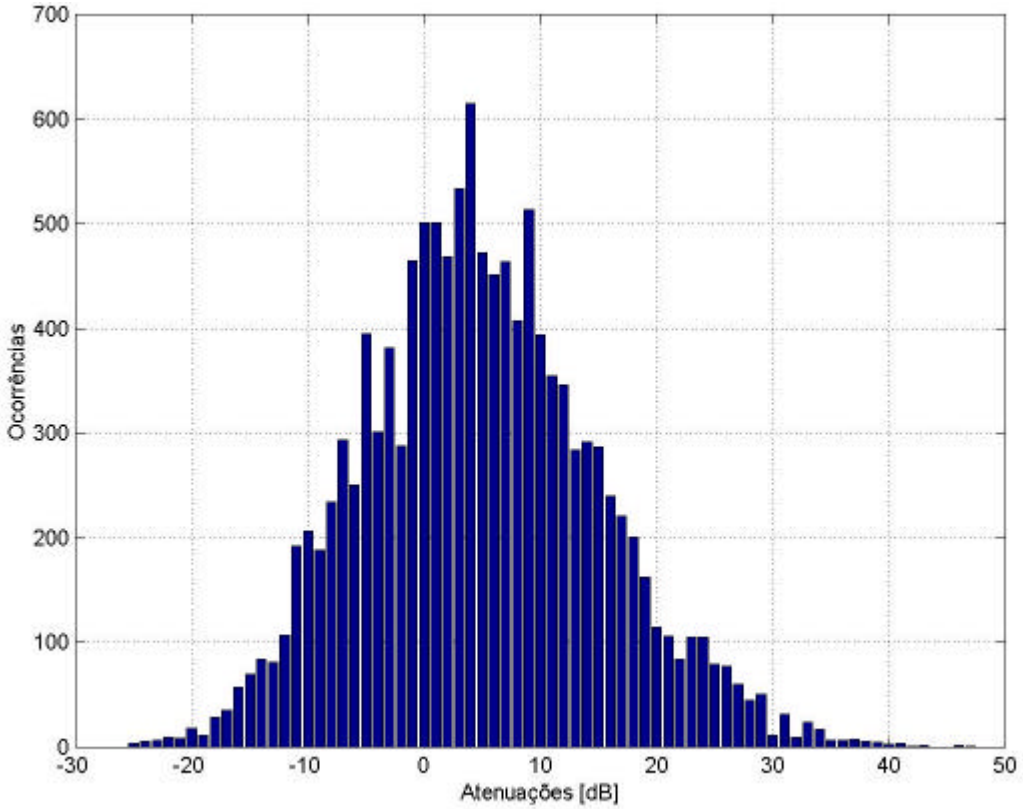


Figura K.4 – Função Densidade de Probabilidade.

K.5.2 Modelo da Dupla Normal

Tabela K.6 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal com os respectivos parâmetros do teste do X^2 e raíz do erro quadrático médio.

Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda	Raíz Erro Quad. Médio Direita
Valor Inicial		8,97	11,25				
1	4,01	9,27	11,15	145,20	157,94	0,31	0,22
2	4,01	8,77	11,45	256,59	112,03	1,01	0,43
5	4,01	9,27	11,05	18,32	35,70	0,38	0,52

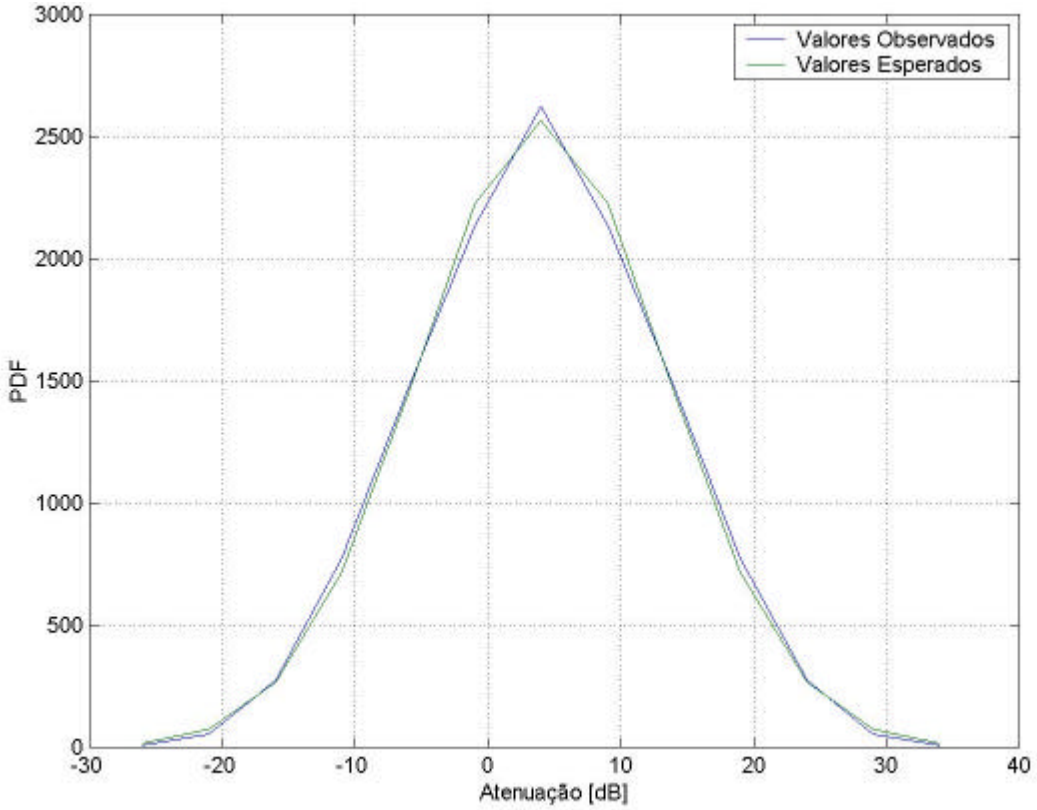


Figura K.5 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

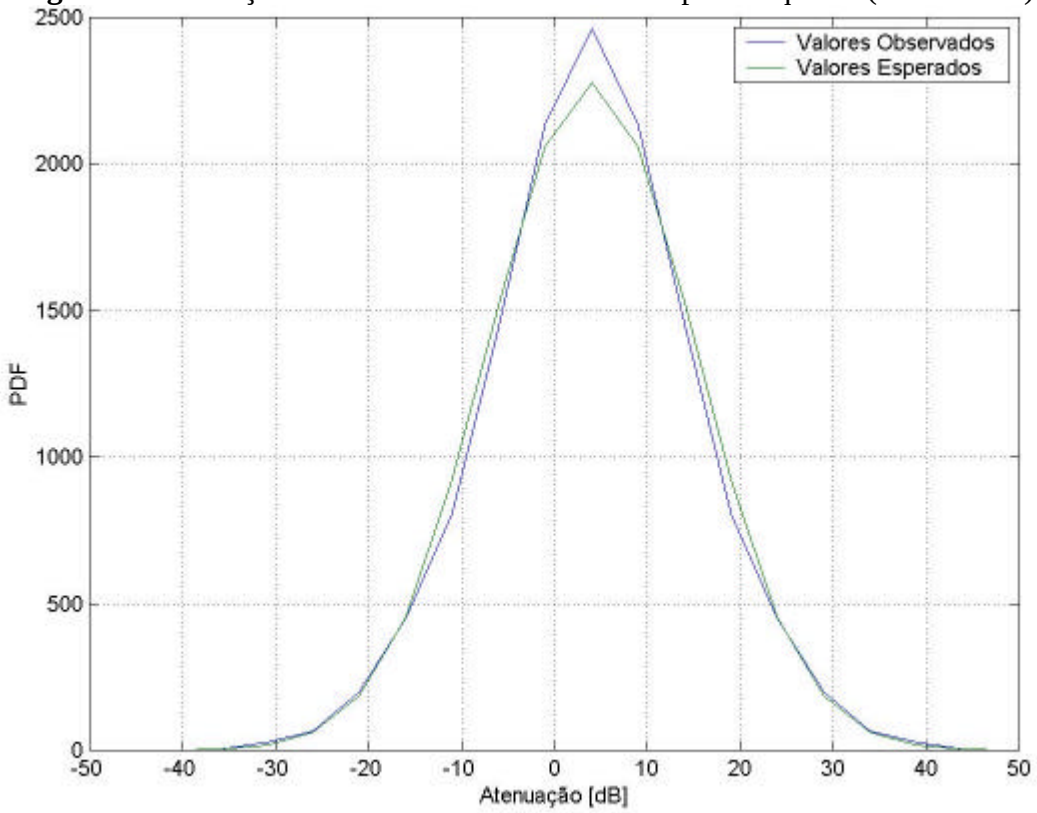


Figura K.6 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

K.5.3 Modelo de Berg

Tabela K.7 – Resultados para aferição dos parâmetros do Modelo de Berg.

Local	*Tipo*	*Estações*				
		PEsp_B	*ARep_B*	*Tecn_C*	*Tecn_B*	*SSeb_A*
Térreo	Dim.Amostra	10	49	75	71	11
	At.Ext. [dB]	10,50	15,60	1,20	3,00	10,90
	Dim.Amostra	1	23	144	142	13
	At.Int. [dB]	11,30	24,40	16,20	16,10	13,20
1º	Dim.Amostra	75	109	193	172	45
	At.Ext. [dB]	4,10	12,80	6,40	6,00	0,10
	Dim.Amostra	45	38	113	114	27
	At.Int. [dB]	9,70	19,20	11,90	5,40	8,20
2º	Dim.Amostra	126	205	345	337	102
	At.Ext. [dB]	3,10	9,50	5,50	2,80	-0,70
	Dim.Amostra	56	32	89	85	24
	At.Int. [dB]	4,40	13,90	9,70	2,60	1,70
3º	Dim.Amostra	150	257	401	371	142
	At.Ext. [dB]	-1,80	3,90	4,70	-0,40	-4,30
	Dim.Amostra	109	99	202	194	75
	At.Int. [dB]	-0,50	8,60	10,00	0,30	-2,90
4º	Dim.Amostra	289	327	520	453	263
	At.Ext. [dB]	-5,80	2,60	3,40	1,00	-5,70
	Dim.Amostra	89	74	147	135	30
	At.Int. [dB]	-2,70	6,00	6,90	-1,10	-3,10
5º	Dim.Amostra	218	206	409	295	143
	At.Ext. [dB]	-8,10	-1,90	0,70	-2,10	-11,80
	Dim.Amostra	97	87	222	198	51
	At.Int. [dB]	-5,70	2,80	1,60	-3,90	-7,20

Tabela K.8 – Aferição de parâmetros por regressão linear e erro associado.

Piso	Tipo	Média Atenuações	Curva Reg.lin.	Erro (Módulo)
Térreo	Exterior	8,20	8,50	0,30
	Interior	16,20		
1º	Exterior	5,90	6,00	0,10
	Interior	10,90		
2º	Exterior	4,00	3,40	0,60
	Interior	6,50		
3º	Exterior	0,40	0,90	0,50
	Interior	3,10		
4º	Exterior	-0,90	-1,60	0,70
	Interior	1,20		
5º	Exterior	-4,60	-4,10	0,50
	Interior	-2,50		

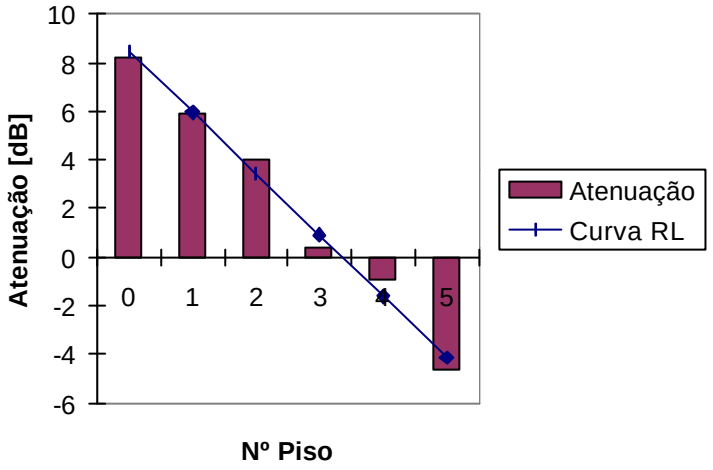


Figura K.7 – Evolução da atenuação em altura e curva ajustada por regressão linear.

Tabela K.9 – Parâmetros do Modelo de Berg e erro associado.

We [dB]	3,40
Wi [dB]	3,70
Gh [dB/piso]	2,50
Erro Médio [dB]	0,40

K.5.4 Modelo de Walfisch – Ikegami Estendido

Tabela K.10 – Cálculo do parâmetro L_{tm}.

Estação	Ângulo [º]	Ltm [dB]
PEsp_B	30	29,86
ARep_B	70	31,53
Tecn_C	0	19,24
Tecn_B	0	19,24
SSeb_A	90	29,25
	Média LtmTotal	25,82

Tabela K.11 – Parâmetros do Modelo de Walfisch – Ikegami.

ws [m]	15,00
Hb [m]	20,00
Ltm [dB]	25,82
Lint [dB]	3,40
Gh [db/piso]	2,50
Erro [dB]	18,32

L.1 Geral

Neste anexo apresentam-se os dados referentes às diferentes classes de edifícios medidas.

Na Tabela L.1 podem ser vistos os parâmetros específicos de cobertura para cada edifício. O parâmetro Média é uma média aritmética simples dos valores de cobertura de todos os edifícios da mesma classe, enquanto o parâmetro Global é o valor de cobertura extraído da curva de cada classe individual. A dimensão da amostra é o número de pontos recolhidos para cada edifício.

Os parâmetros de atenuação mais importantes (média, desvio padrão, variação e interior/exterior) para cada edifício encontram-se na Tabela L.2, bem como uma média aritmética simples de todos os edifícios da mesma classe. Nas Figuras L.1 - L.4 estão representadas as funções de probabilidade acumuladas de cada um dos edifícios da classe, bem como a curva da classe.

Os resultados obtidos para cada classe pelo Modelo da Dupla Normal encontram-se na Tabela L.3, sendo que aí se podem observar igualmente os valores máximos permitidos pelo Teste do χ^2 para cada classe. Na Tabela L.4 encontram-se os valores das raízes dos erros quadráticos médios, enquanto que as respectivas funções densidade de probabilidade e as funções de probabilidade das partes direita e esquerda para o Teste do χ^2 podem ser visualizadas nas Figuras L.6 – L.16.

Na Tabela L.5 podem ser vistos os resultados obtidos pelo Teste do χ^2 , para a amostra global (onde se juntaram as atenuações de todos os edifícios medidos), bem como os valores das raízes do erro quadrático médio. Na Figura L.17 pode ser visto a Função Densidade de Probabilidade para a amostra global, enquanto nas figuras L.18 e L.19 podem ser vistas as funções de probabilidade da parte esquerda e direita para o Teste do χ^2**.**

L.2 Parâmetros Gerais de Cobertura

Tabela L.1 – Parâmetros específicos de cobertura para cada edifício.

Categoria	Edifício	Atenuação [dB]			Dimensão Amostra
		50%	90%	95%	
Isolado Alto	Torre IST	-6,98	20,01	24,70	10 467
	Jerónimo Martins	-8,03	4,22	8,25	6 173
	Complexo Inter.	4,48	17,45	22,40	12 403
	Média	-3,51	13,89	18,45	29 043
	Global	-1,70	16,51	22,06	
Isolado Baixo	Pav. Central	16,53	30,22	33,60	9 749
	CCB (Blocos 1/2)	12,14	27,95	32,09	15 232
	CCB (Bloco 3)	28,44	34,68	35,89	3 424
	Média	19,04	30,95	33,86	28 405
	Global	15,37	31,25	33,89	
Integrado Alto	Torre Vodafone	13,62	32,67	38,21	9 466
	Monumental	17,02	32,75	36,94	20 700
	Castilho	9,48	23,68	26,98	18 456
	Av. República	15,12	27,32	30,68	8 352
	Média	13,81	29,11	33,20	56 974
	Global	13,71	29,33	33,85	
Integrado Baixo	C.M.Pátria	8,08	17,15	18,92	1 797
	Av. Alm. Reis	16,06	24,63	25,93	2 611
	Média	12,07	20,89	22,43	4 408
	Global	13,39	22,74	25,09	

Tabela L.2 – Parâmetros de atenuação para cada edifício.

Categoria	Edifício	Média [dB]	Desv.P. [dB]	Variação [dB]	int/ext [dB]	Dimensão Amostra
Isolado Alto	Torre IST	-3,66	14,95	-2,86	8,60	10 467
	Jerónimo Martins	-7,61	9,47	-1,24	N/A	6 173
	Complexo Inter.	5,12	10,15	-3,75	3,49	12 403
	Média	-2,05		-2,62	6,05	29 043
Isolado Baixo	Pav. Central	16,28	11,13	-6,57	6,46	9 749
	CCB (Blocos 1/2)	12,81	10,88	-6,28	6,94	15 232
	CCB (Bloco 3)	27,71	6,82	4,31	5,62	3 424
	Média	18,93		-2,85	6,34	28 405
Integrado Alto	Torre Vodafone	14,26	13,79	-0,18	7,85	9 466
	Monumental	15,28	14,47	-3,69	8,13	20 700
	Castilho	9,72	11,62	-1,91	6,58	18 456
	Av. República	14,98	9,92	-2,44	4,84	8 352
	Média	13,56		-2,06	6,85	56 974
Integrado Baixo	C.M.Pátria	8,07	7,24	-3,00	1,23	1 797
	Av. Alm. Reis	16,10	6,43	0,01	4,48	2 611
	Média	12,09		-1,50	2,86	4 408

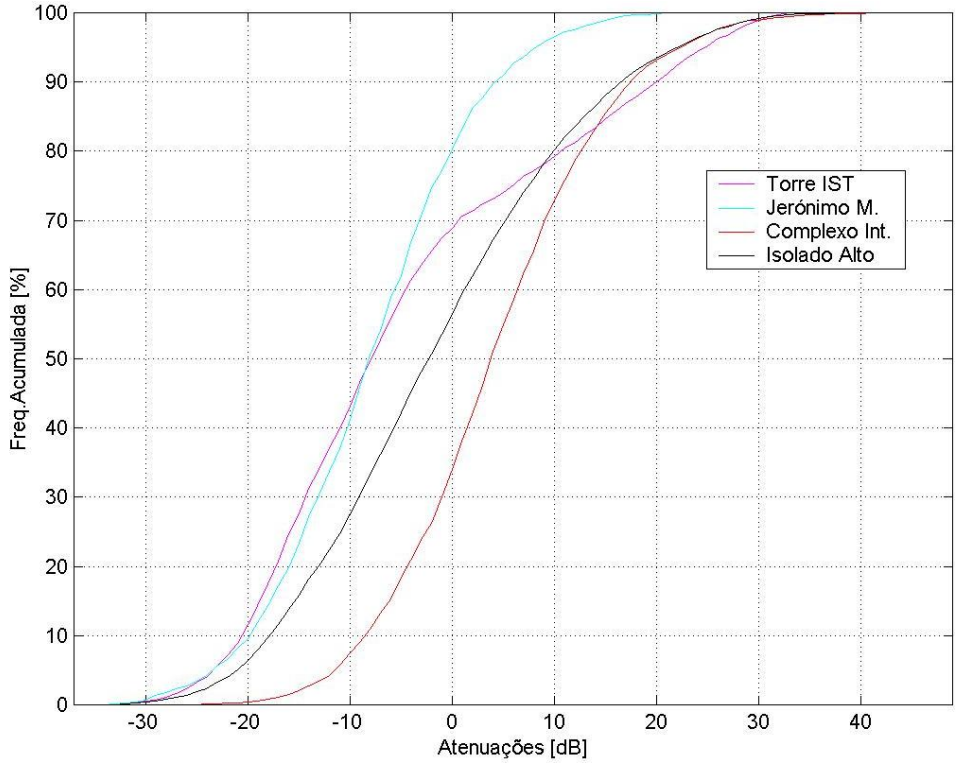


Figura L.1 – Funções de Probabilidade Acumuladas para edifícios da categoria "Isolado Alto".

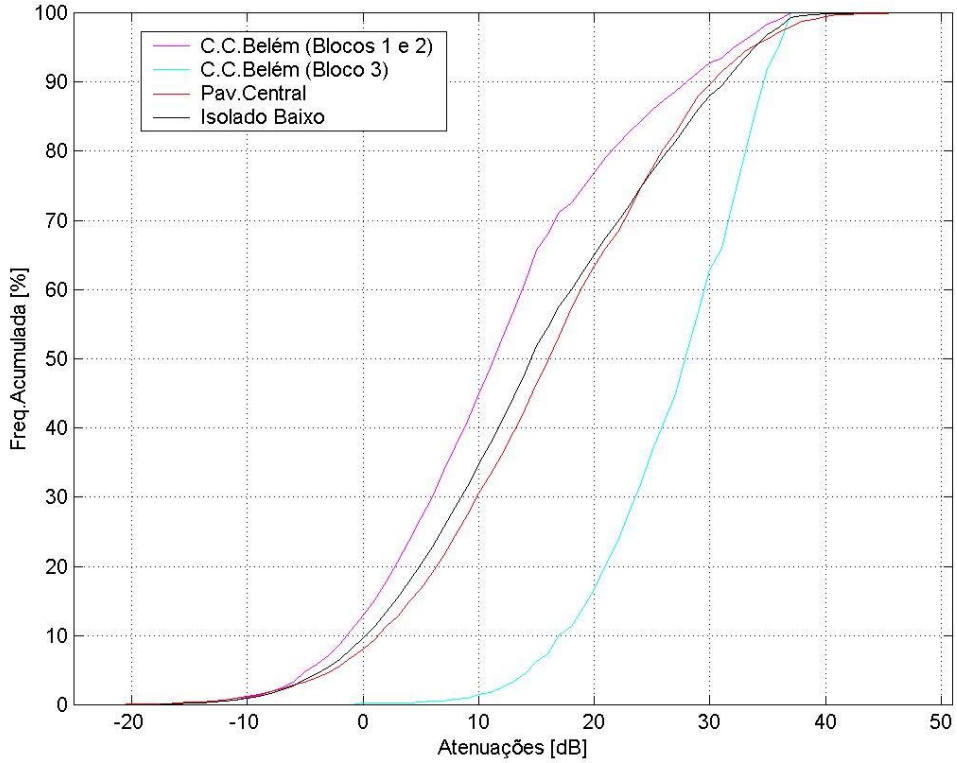


Figura L.2 – Funções de Probabilidade Acumuladas para edifícios da categoria "Isolado Baixo".

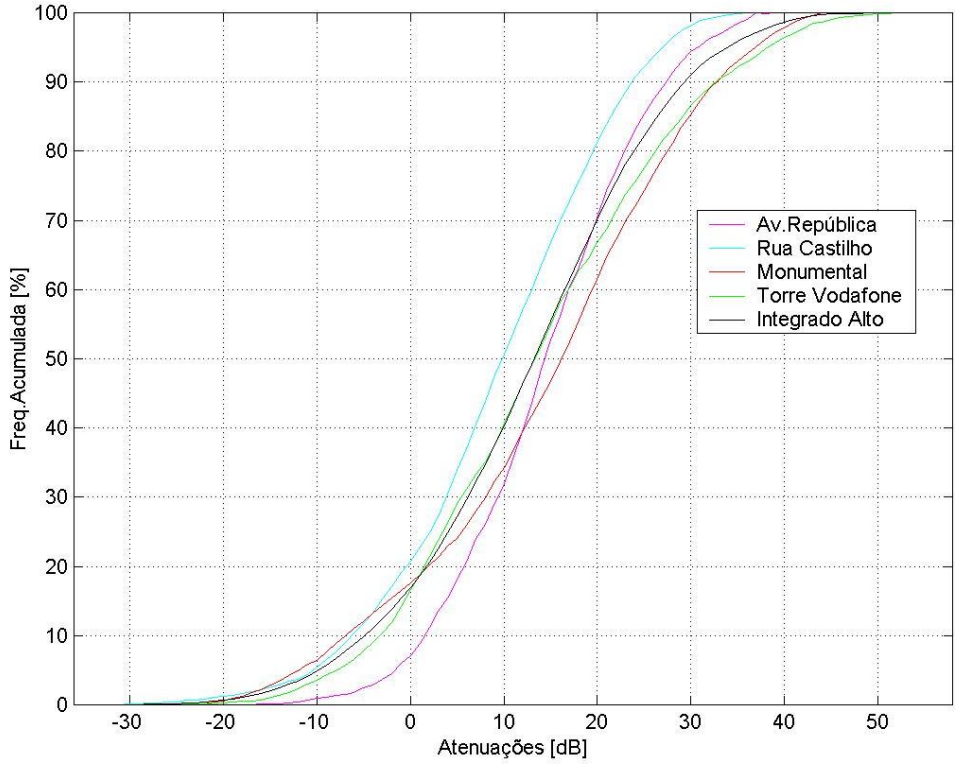


Figura L.3 – Funções de Probabilidade Acumuladas para edifícios da categoria "Integrado Alto".

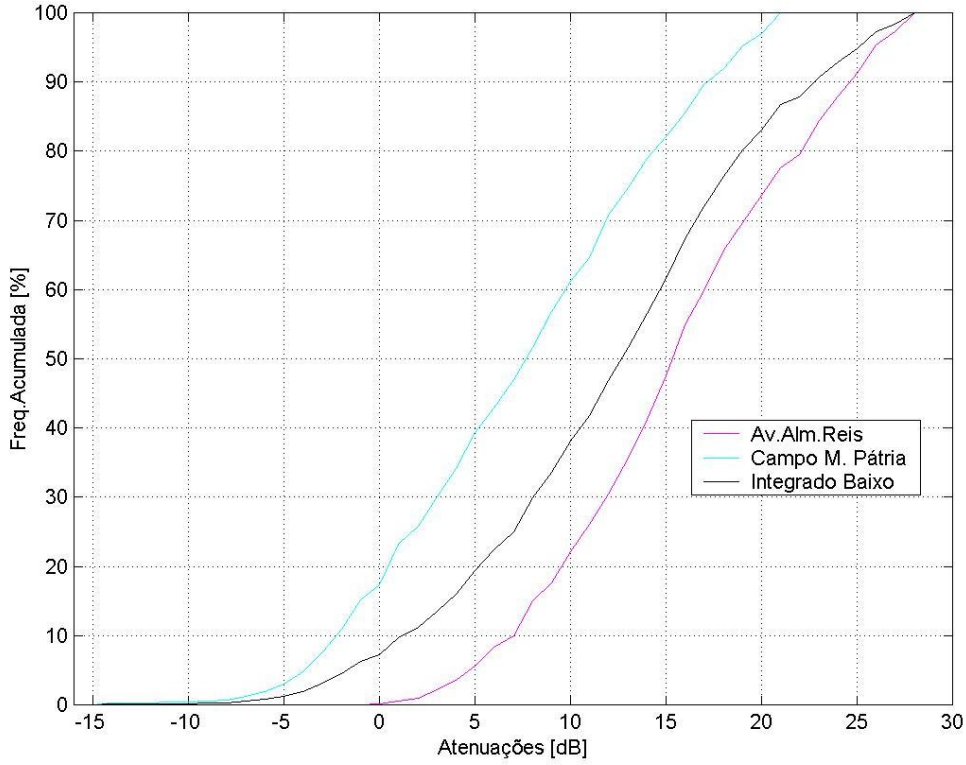


Figura L.4 – Funções de Probabilidade Acumuladas para edifícios da categoria "Integrado Baixo".

L.3 Modelo da Dupla Normal

Tabela L.3 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal e respectivos parâmetros do teste do χ^2.

Categoria	Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio P. Esquerda [dB]	Desvio P. Direita [dB]	Parâm. Teste Esquerda	Parâm. Teste Direita	Par.Teste Máximo Esquerda	Par.Teste Máximo Direita
Isolado Alto	Valor Inicial	-4.99	15,99	9,84				
	1	-4.99	16,59	9,84	1242,50	209,01		
	2	-4.99	16,49	9,94	1114,35	95,53		
	5	-4.99	16,59	9,74	1087,31	39,26	19,68	25,00
Isolado Baixo	Valor Inicial	15.00	10,87	12,25				
	1	15.00	11,07	13,05	158,24	1865,69		
	2	15.00	10,87	13,35	137,25	1862,64		
	5	15.00	10,97	12,95	81,18	1659,46	19,68	22,36
Integrado Alto	Valor Inicial	14.00	13,92	12,27				
	1	14.00	14,02	12,47	278,01	348,58		
	2	14.00	13,92	12,57	247,89	341,14		
	5	14.00	13,92	12,37	92,35	170,74	25,00	27,59
Integrado Baixo	Valor Inicial	16.01	9,51	6,08				
	1	16.01	9,91	6,58	141,31	231,41		
	2	16.01	9,31	6,98	104,17	185,63		
	5	16.01	9,81	6,28	37,20	133,45	7,81	19,68

Tabela L.4 – Resultados obtidos para o Modelo da Dupla Normal e a respectiva raíz do erro quadrático médio (em percentagem).

Categoria	Intervalo [dB]	Média [dB]	Desvio P. Esquerda [dB]	Desvio P. Direita [dB]	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Isolado Alto	Valor Inicial	-4,99	15,99	9,84		
	1	-4,99	16,59	9,84	0,18	0,20
	2	-4,99	16,49	9,94	0,33	0,21
	5	-4,99	16,59	9,74	0,78	0,34
Isolado Baixo	Valor Inicial	15,00	10,87	12,25		
	1	15,00	11,07	13,05	0,13	0,42
	2	15,00	10,87	13,35	0,29	0,76
	5	15,00	10,97	12,95	0,45	1,78
Integrado Alto	Valor Inicial	14,00	13,92	12,27		
	1	14,00	14,02	12,47	0,11	0,08
	2	14,00	13,92	12,57	0,24	0,07
	5	14,00	13,92	12,37	0,24	0,21
Integrado Baixo	Valor Inicial	16,01	9,51	6,08		
	1	16,01	9,91	6,58	0,33	1,26
	2	16,01	9,31	6,98	0,76	1,89
	5	16,01	9,81	6,28	0,53	2,93

L.3.1 Categoria Isolado Alto

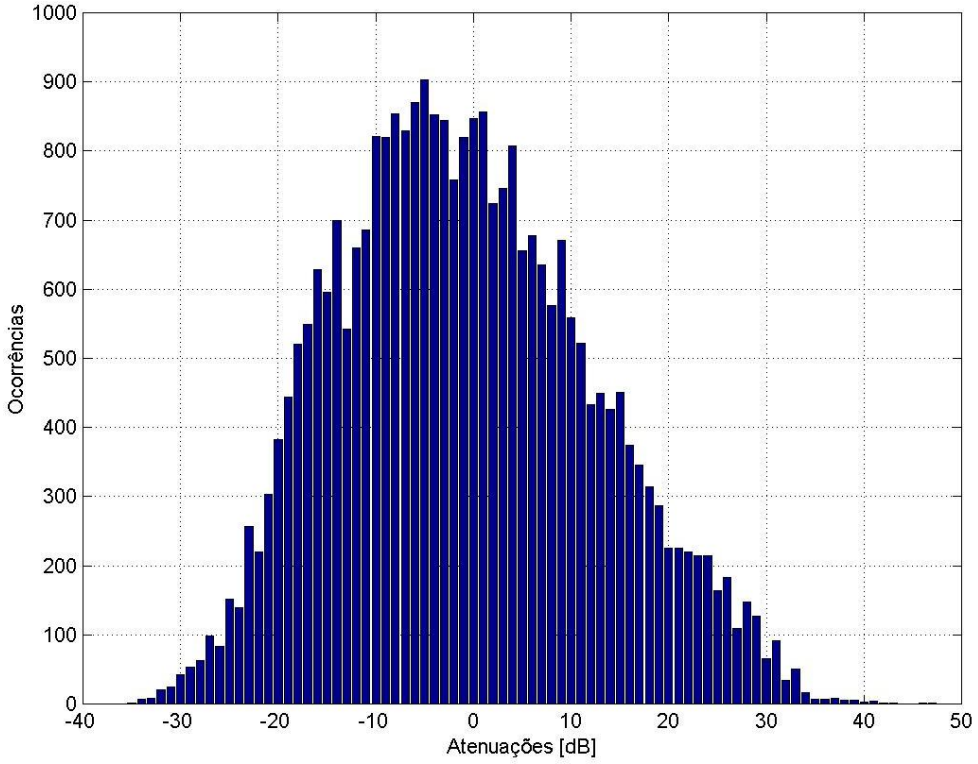


Figura L.5 – Função Densidade de Probabilidade da categoria "Isolado Alto".

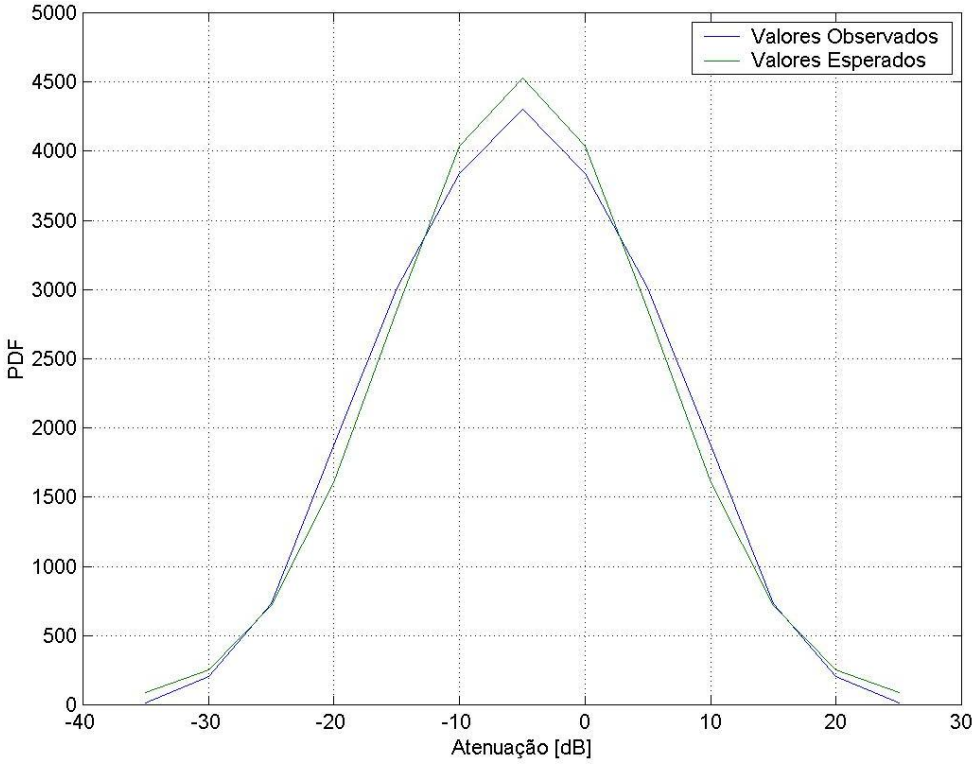


Figura L.6 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

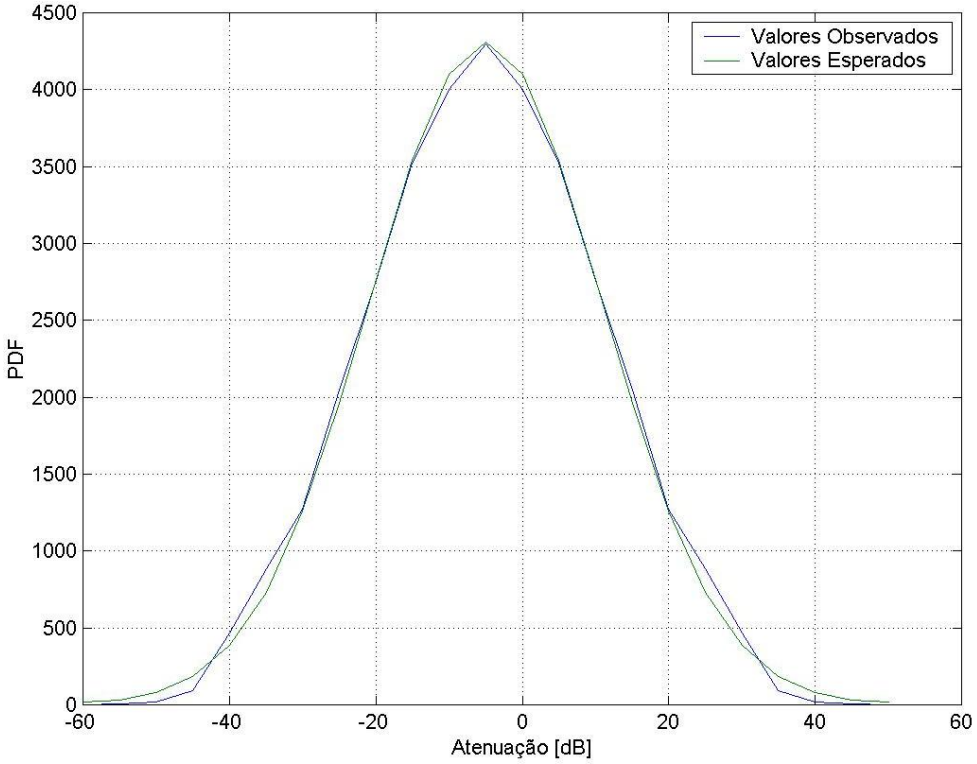


Figura L.7 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

L.3.2 Categoria Isolado Baixo

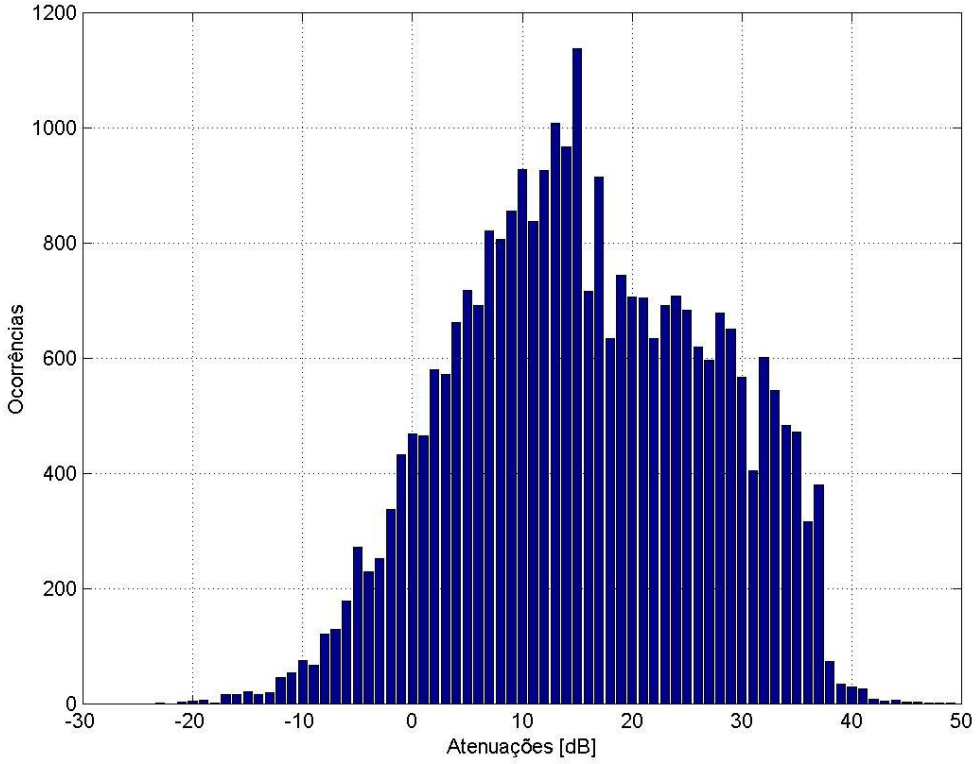


Figura L.8 – Função Densidade de Probabilidade da categoria "Isolado Baixo".

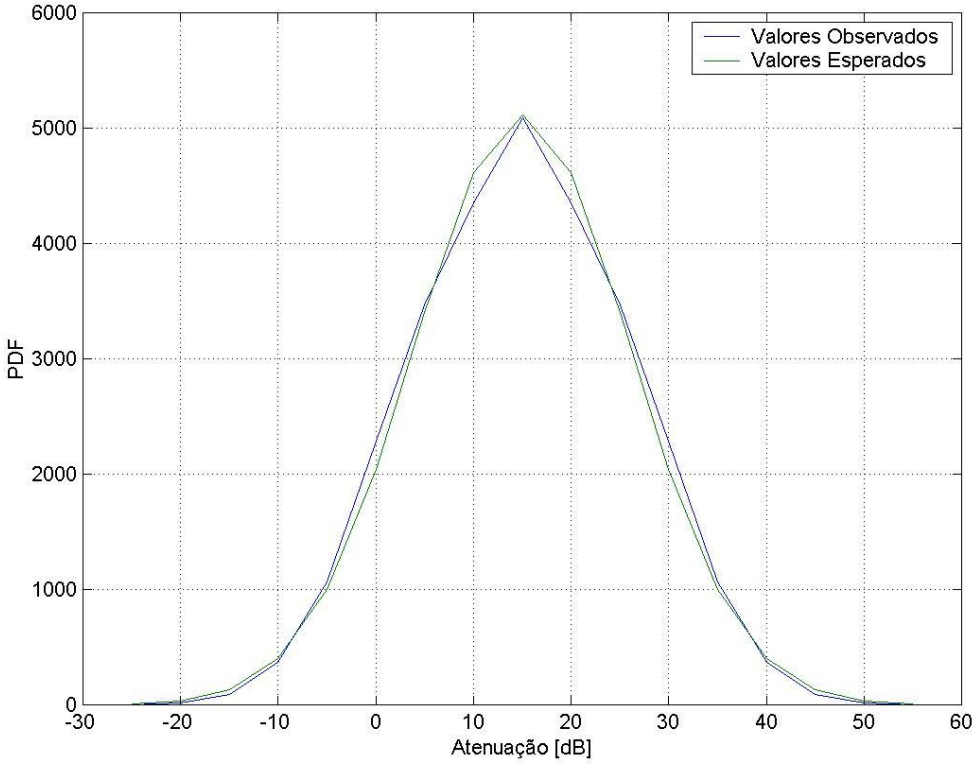


Figura L.9 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

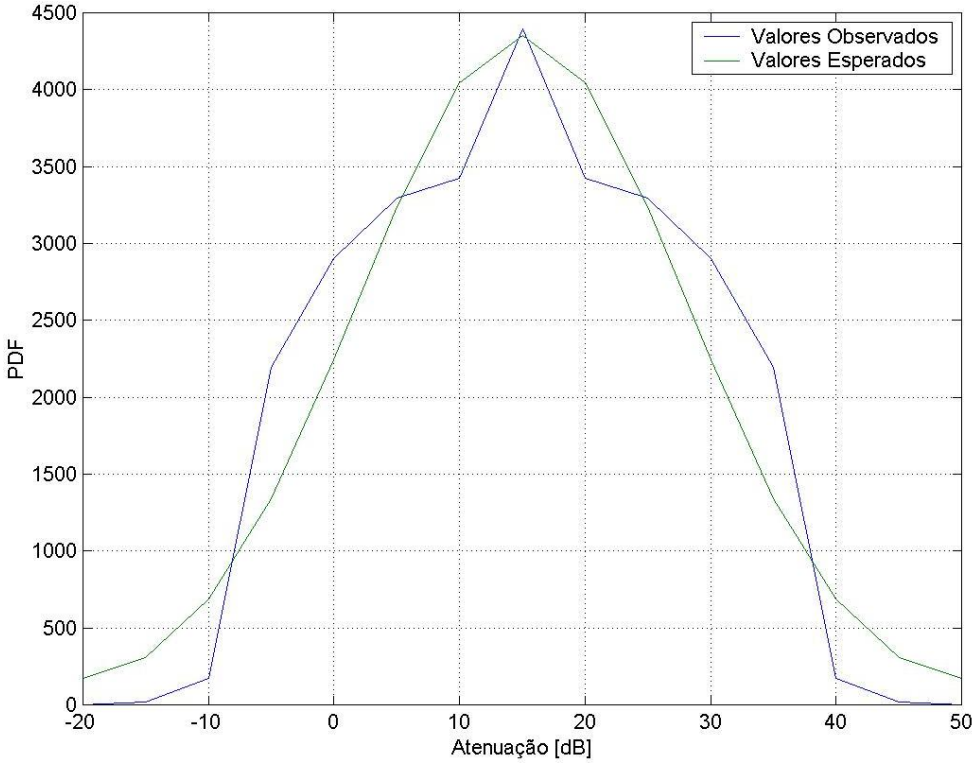


Figura L.10 Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

L.3.3 Categoria Integrado Alto

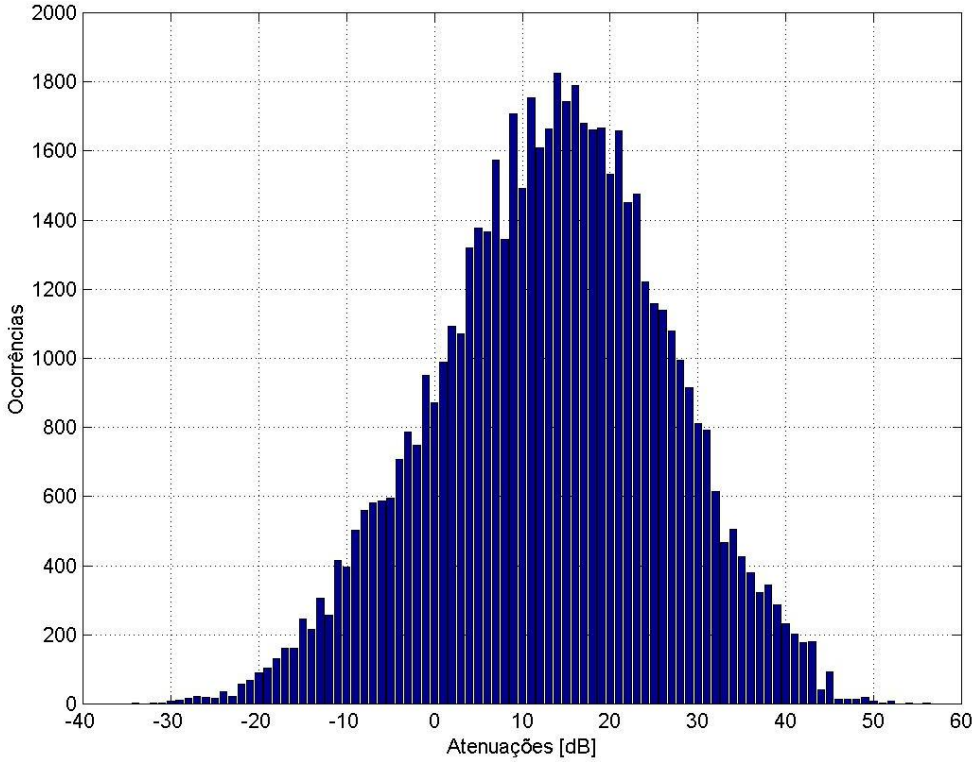


Figura L.11 – Função Densidade de Probabilidade da categoria "Integrado Alto".

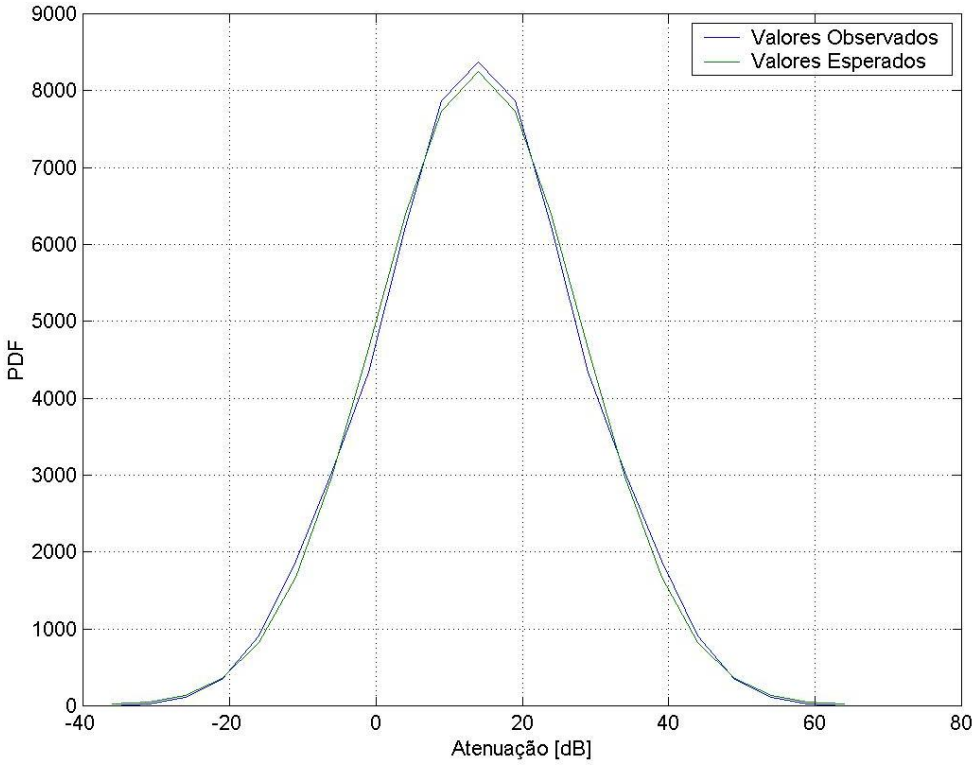


Figura L.12 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

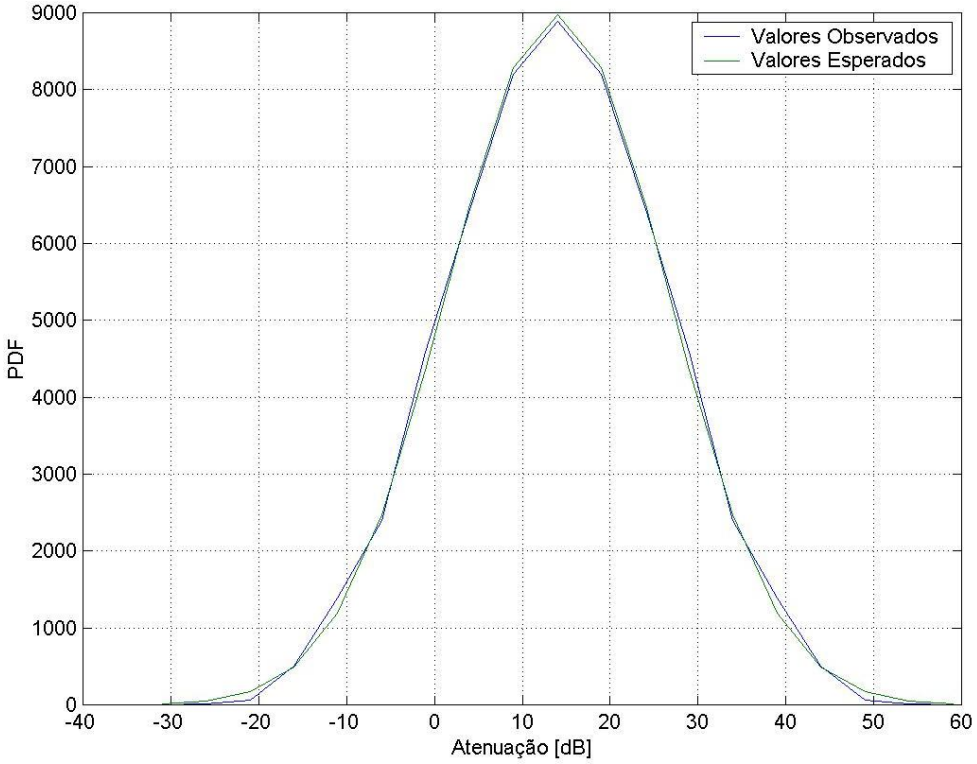


Figura L.13 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

L.3.4 Categoria Integrado Baixo

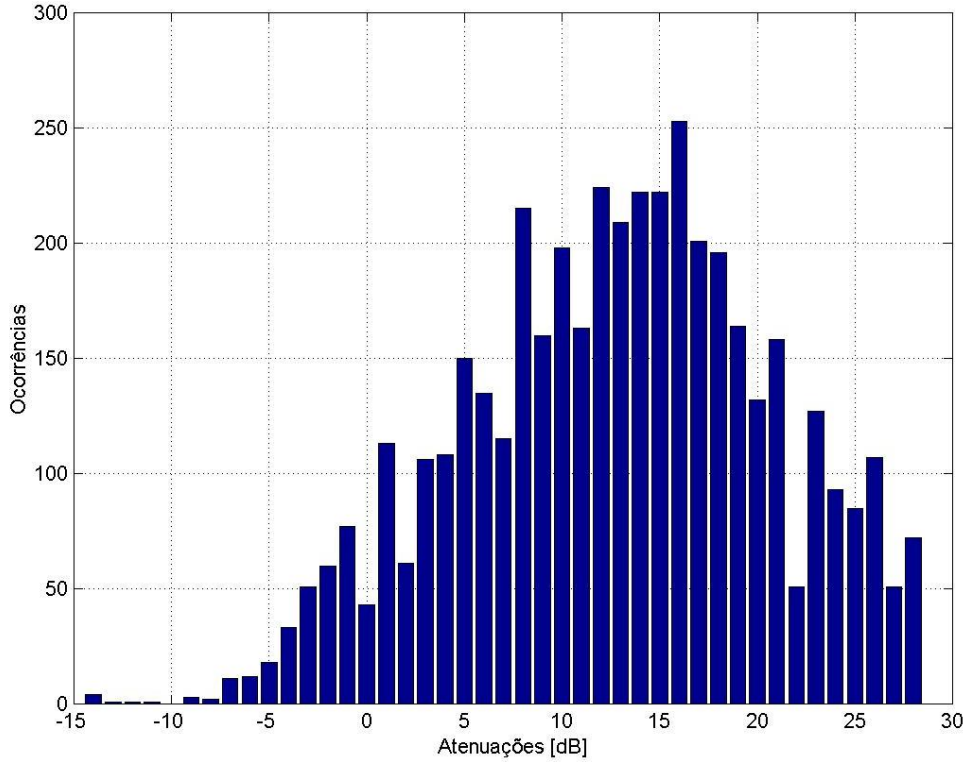


Figura L.14 – Função Densidade de Probabilidade da categoria "Integrado Baixo".

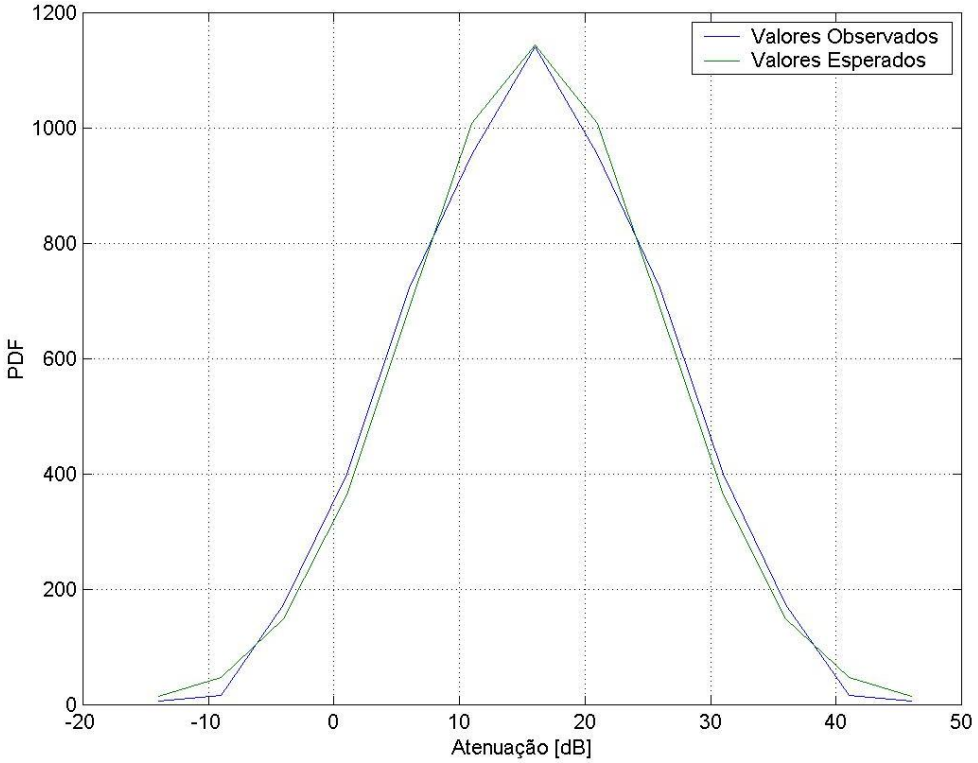


Figura L.15 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

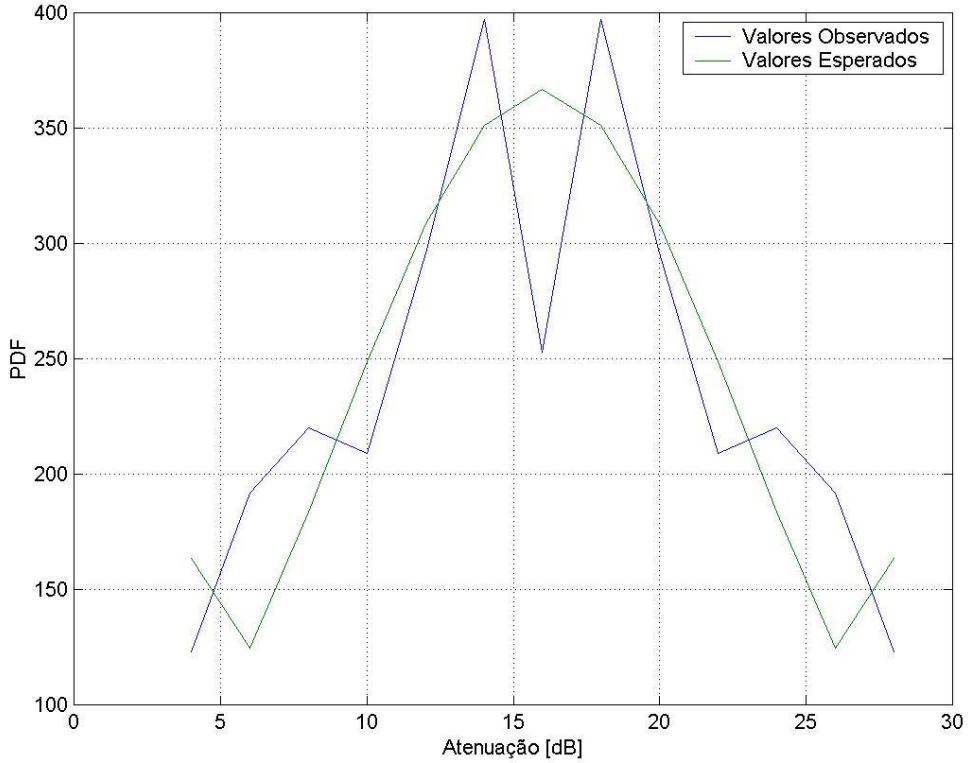


Figura L.16 - Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 2).

L.3.5 Geral

Tabela L.5 – Resultados para a curva global dados pelo Teste do χ^2 e a respectiva raíz do erro quadrático médio

Intervalo [dB]	Desvio Padrão Esquerda [dB]	Desvio Padrão Direita [dB]	Param. Teste Esquerda	Param. Teste Direita	Parâmetro Teste Máximo Esquerda	Parâmetro Teste Máximo Direita	Raíz Erro Quad. Médio Esquerda [%]	Raíz Erro Quad. Médio Direita [%]
Valor Inicial	13,75	13,74						
1	13,85	13,84	669,87	1192,97			0,12	0,11
2	13,85	14,14	726,41	1315,15			0,28	0,23
5	13,85	13,84	487,21	840,39	25,00	25,00	0,45	0,36

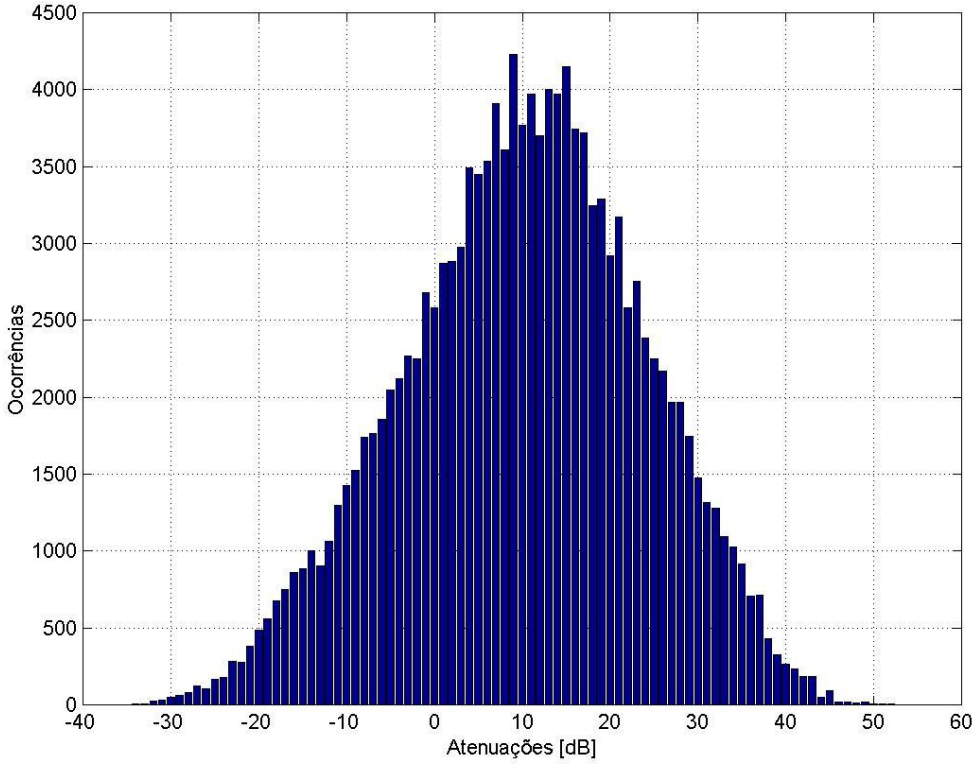


Figura L.17 – Função Densidade de Probabilidade da categoria "Geral".

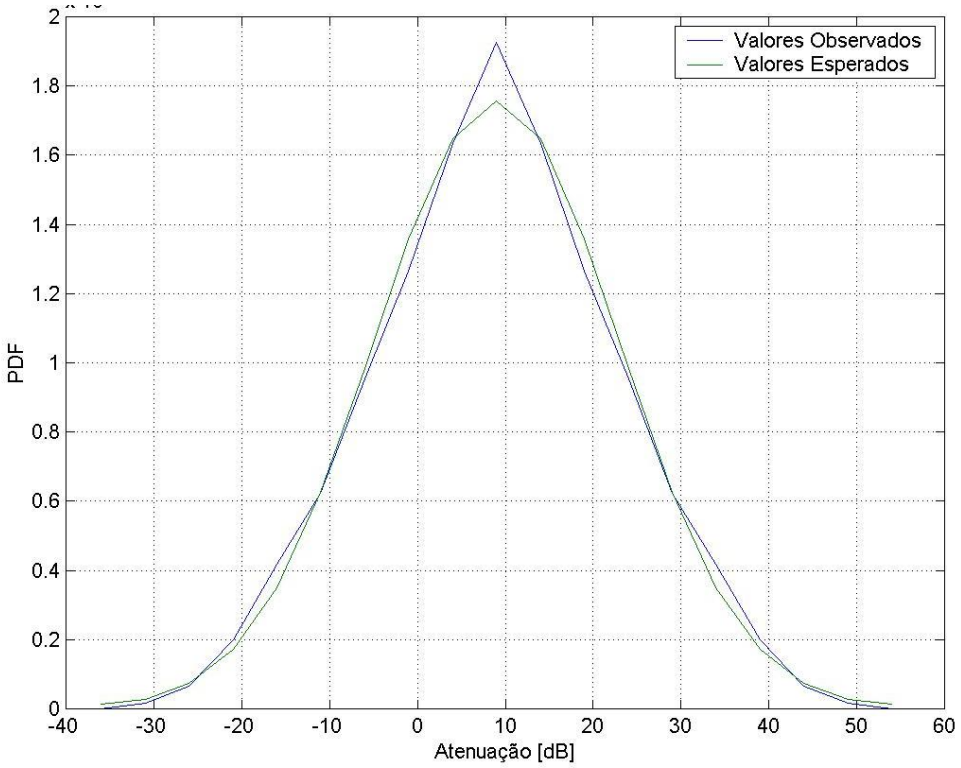


Figura L.18 – Função Densidade de Probabilidade da parte esquerda (Dimensão 5).

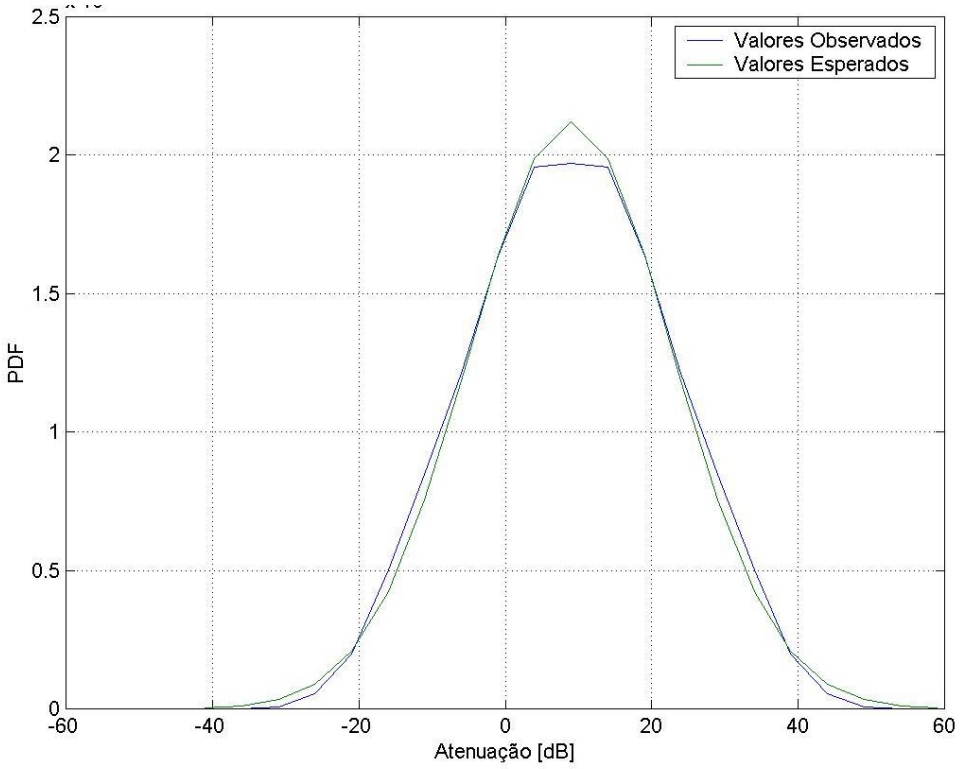


Figura L.19 – Função Densidade de Probabilidade da parte direita (Dimensão 5).

O Anexo M contém figuras com antenas de estações de base para comunicações móveis, bem como exemplos de diagramas de radiação.

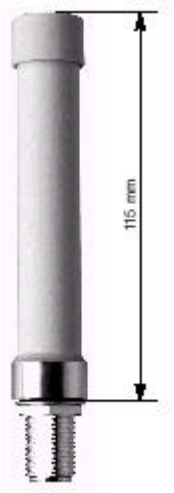


Figura M.1 – Antena *dual-band* para GSM 1800 e UMTS (extraído de [Kath01]).

Figura M.2 – Antena para UMTS (extraído de [Kath02]).

Figura M.3 – Diagrama de Radiação Vertical de uma antena omnidireccional (extraído de [Kath01]).

Figura M.4 – Antena sectorial *dual-band* para GSM 1800 e UMTS (extraído de [Kath01]).

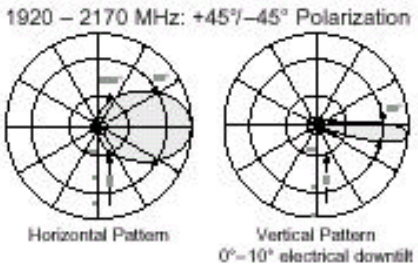


Figura M.5 – Diagrama de radiação de antena direccional *dual-band* para GSM 1800 e UMTS (extraído de [Kath01]).

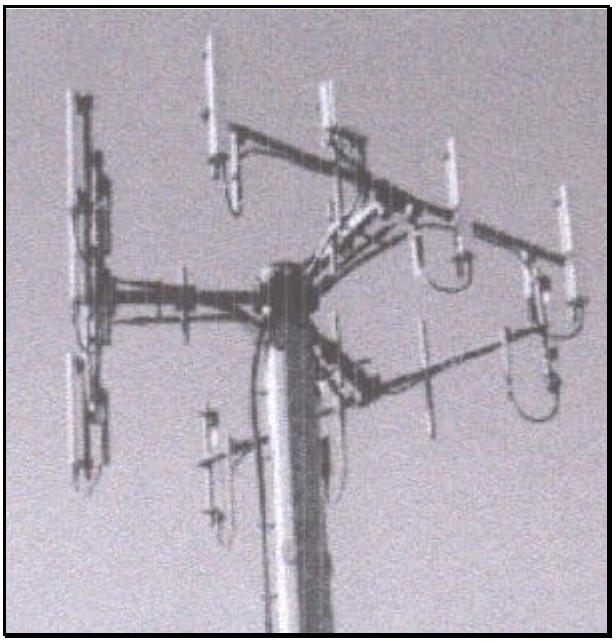


Figura M.6 – Antena adaptativa para o sistema TDMA 1900, instalada em conjunto com antenas de diversidade espacial (extraído de [ACHL99]).

O Anexo N descreve o teste estatístico do ÷² .

O Teste do ÷² [MoRu94] é um teste de ajustamento. A sua principal função é a verificação de uma determinada hipótese, isto é, obtida uma determinada população de pontos, verificar se a mesma respeita uma determinada distribuição estatística (uniforme, normal, etc).

A estatística de teste *T* do Teste do ÷² é definida por:

$$T = \sum_{s=1}^{S} \frac{\left(F^{obs}(s) - F^{esp}(s)\right)^2}{F^{esp}(s)} \qquad \text{(N.1)}$$

onde se tem :

- S - número de classes
- $F^{obs}(s)$ - frequência observada para a classe s
- $F^{esp}(s)$ - frequência esperada para a classe s

O resultado obtido para a estatística de teste *T* é comparado com o valor correspondente ao caso em estudo extraído da tabela estatística da Função de Densidade de Probabilidade do ÷², Tab. N.1. A tabela possui dois parâmetros: o factor de qualidade de ajustamento *q* e o parâmetro *õ* (número de classes menos 2). Caso o valor da estatística de teste seja inferior ao valor extraído da tabela, conclui-se que a hipótese testada é válida. Caso contrário a hipótese não é válida.

Tabela N.1 – Parte da tabela da distribuição estatística do ÷²

ν\q	0,500	0,600	0,700	…
1	0,455	0,708	1,074	…
2	1,386	1,833	2,408	…
3	2,366	2,946	3,665	…
…	…	…	…	…

A fim de consolidar graficamente a descrição do equipamento de medida e dos edifícios, apresentam-se no Anexo O algumas fotografias.

Figura O.1 – Veículo de medida, PC portátil e terminal móvel.

(a) Aspecto exterior.

(b) Aspecto interior.

Figura O.2 – Edifício da Avenida Almirante Reis.

Figura O.3 – Edifício Monumental.

(a) Aspecto exterior.

(b) Corredores.

(c) Salas interiores.

Figura O.4 – Edifício Castil.

(a) Aspecto exterior.

(b) Aspecto interior.

Figura O.5 – Centro Cultural de Belém.

(a) Aspecto exterior.

(b) Aspecto interior.

Figura O.6 – Edifício da Avenida da Républica.

(a) Aspecto exterior.

(b) Aspecto interior.

Figura O.7 – Edifício do Campo Mártires da Pátria.

(a) Vista da 2ª circular.

(b) Fachada lateral.

Figura O.8 – Edifício Sede do Grupo Jerónimo Martins.

(a) Fachada frontal.

(b) Vista do “campus” do IST.

Figura O.9 – Torre Norte do Instituto Superior Técnico.

Figura O.10 – Pavilhão Central do Instituto Superior Técnico.

(a) Fachada frontal.

(b) Fachada lateral.

(c) Fachada traseira.

(d) Fachada frontal.

Figura O.11 – Torre da Vodafone.

Figura O.12 – Complexo Interdisciplinar do Instituto Superior Técnico.

Referências

[3GPP00] http://www.3gpp.org

[Ande99] Andersson, S., "Enhancing Cellular Network Capacity With Adaptive Antennas", *Ericsson Review*, nº3, 1999.

[Ande99] Anderson, S., "Adaptive Antennas for GSM and TDMA Systems", *IEEE Personal Communications Magazine*, Vol. 6, No. 3, June 1999, pp.74-86.

[AnNe97] Ângelo, G. e Neto, I., *Aspectos de Penetração e Segurança em Edifícios com Estações de Base no Topo*, Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Set. 1997.

[BBOZ96] De Backer, B., Börjeson, H., Olysanger, F. and De Zutter, D., "The Study of Wave-Propagation Through a Windowed Wall at 1.8 GHz", in *Proc. of VTC'96 - 46th IEEE Vehicular Technology Conference*, Atlanta, Georgia, USA, Apr. 1996.

[BuSW97] Butterworth, K., Sowerby, K. and Williamson, A., "Implications of Propagation Modelling on the Design of a DS-CDMA In-Building Mobile Communications System", in *Proc. of VTC'94 - 47th IEEE Vehicular Technology Conference*, Phoenix, Arizona, USA, May 1997.

[Chan99] Chandra, A., "Comparative Study of Path Losses From Propagation Measurements at 450 MHz, 900 MHz, 1.35 GHz and 1.89 GHz, in the Corridors of a Multifloor Laboratory-cum-Office Building", in *Proc. of VTC'99 Fall - 50th IEEE Vehicular Technology Conference*, Amsterdam, The Netherlands, Sep. 1999.

[CPGF98] Claro, A, Pardelinha, C., Gil, F., Ferreira, J., Queijo, J., Almeida, S. and Correia, L.M., *Signal Requirements for 2W Mobile Phones*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, July 1998.

[Corr93] Correia, L.M., *Comunicações Móveis, Parte I : Cópia de Acetatos e Problemas*, AEIST, Lisboa, Portugal, Mar. 1993 (Rev. em Mar. 1999).

[DaCo99] Damosso, E. and Correia, L.M., COST 231 Final Report, Brussels, Belgium, 1999.

[LeLe00] Lee, D. and Lee, W., "Propagation Prediction in and Through Buildings", *IEEE Transactions on Vehicular Technology.*, Vol.49, No.5, Sep. 2000, pp.1529-1533.

[ETSI97] ETS 300 577, *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2); Radio Transmission and Reception (GSM 05.05)*, European Telecommunications Standards Institute, Sophia-Antipolis, France, Apr 1997.

[FMJC98] Flores, S., Mayorgas, L., Jiménez, A. and Cardona, N., "Comparation Between Two Geometric Indoor Propagation Models: Tube-Launching vs. Ray-Launching, in *Proc. of PIMRC'98 – 9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Boston, Massachusetts, USA, Sep. 1998.

[GaBo94] Gahleitner, R. and Bonek, E., "Radio Wave Penetration into Urban Buildings in Small Cells and Microcells", in *Proc. of VTC'94 – 44th IEEE Vehicular Technology Conference*, Stockholm, Sweden, June 1994.

[GCFP01] Gil, F., Claro, A., Ferreira, J., Pardelinha, C. and Correia, L.M., "A 3-D Interpolation Method for Base Station Antennas' Radiation Patterns", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol.13, No.2, Apr. 2001, pp. 132-137.

[Hata80] Hata, M., "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. VT-29, No.3, Aug. 1980, pp. 317 – 325.

[HoTo00] Holma, H. and Toskala A., *WCDMA for UMTS*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2000.

[HWWL00] Hoppe, R., Wertz, P., Wölfle, G. and Landstorfer, F., "Wideband Propagation Modelling for Indoor Environments and for Radio Transmission into Buildings", in *Proc. of PIMRC'00 - 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, London, UK, Sep. 2000.

[IYTU84] Ikegami, F., Yoshida, S., Takeuchi, T. and Umehira, M., "Propagation Factors Controlling Mean Field Strengh on Urban Streets", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-32, No.8, Aug. 1984, pp. 829 – 882.

[JCLH96] Ju, K., Chiang, C., Liaw, H. and Her, S., "Radio Propagation in Office Buildings at 1.8 GHz", in *Proc. of PIMRC'96 – 7th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Taipei, Taiwan, Oct.1996.

[Kath01] www.kathrein.com

[KrUG93] Kreuzgruber, P., Unterberger, P. and Gahleitner, R., "A Ray Splitting Model for Indoor Radio Propagation Associated with Complex Geometries", in *Proc. of VTC'93 - 43rd IEEE Vehicular Technology Conference*, Secaucus, New Jersey, USA, May 1993.

[LaMc94] Lawton, M. and McGeehan, J., "The Application of a Deterministic Ray Launching Algorithm for the Prediction of Radio Channel Characteristics in Small-Cell Environments", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.43, No.4, Nov. 1994, pp. 955-969.

[MaAn01] Marinho, A. e Antunes, D., *Planeamento celular em UMTS*, Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Set. 2001.

[MaRo96] Mata, L. e Rocha, P., *Modelos de Propagação para Comunicações Móveis em Ambientes Interiores*, Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Set. 1996.

[MeKu01] Meier, A. and Kürner, T., "Propagation Models for the Prediction of Indoor Coverage by Outdoor Base Stations at 1.8 GHz", in *Proc. of EPMCC'01 - 4th European Personal Mobile Communications Conference*, Vienna, Austria, Feb.2001.

[McHa91] McKown, J. and Hamilton, R., "Ray Tracing as a Design Tool for Radio Networks", *IEEE Network Magazine*, Vol. 5, No.7, Nov.1991, pp. 27-30.

[MoKe88] Motley, A.J. and Keenan, J. M. P., "Personal Communication Radio Coverage in Buildings at 900 MHz and 1700 MHz", *Electronic Letters*, Vol. 24, No. 12, Jun.1988, pp. 763-765.

[MoRu94] Montgomery, D. and Runger, C., *Applied Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley & Sons, USA, 1994.

[MuSC95] Murch, R., Sau, J. and Cheung, K., "Improved Empirical Modelling for Indoor Propagation Prediction", in *Proc. of VTC'95 - 45th IEEE Vehicular Technology Conference*, Chicago, Illinois, USA, July 1995.

[OOKF68] Okumura, Y., Ohmori, E., Kawano, T. and Fukuda, K., "Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service", *Rev. Elec. Commun. Lab.*, Vol. 16, Sep.-Oct. 1968, pp. 825-873.

[RaSH99] Rajala, J., Sipilä K. and Heiska K., "Predicting In-Building Coverage for Microcells and Small Microcells", *in Proc. of VTC'99 - 49th IEEE Vehicular Technology Conference*, Houston, Texas, USA, May 1999.

[Sale98] Salema, C., *Feixes Hertzianos*, IST Press, Lisboa, Portugal, 1998

[SeRa92] Seidel, S. and Rappaport, T., "914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 40, No. 2, Feb.1992, pp. 207-217.

[SeRa94] Seidel, S. and Rappaport, T., "Site-Specific Propagation Prediction for Wireless In-Building Personal Communication System Design", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.43, No.4, Nov.1994, pp.879-891.

[SNZC97] Sandor, Z., Nagy, L., Zoltan S. and Csaba, T., "3D Ray Launching and Moment Method for Indoor Radio Propagation Purposes", in *Proc. of PIMRC'97 - 8th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Helsinki, Finland, Sep.1997.

[Tems96] www.ericsson.com/tems/

[WaBe88] 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.

[WINP99] WINPROP, *Software tool (incl. free demo-version) for the Planning of Mobile Communication Network and for the Prediction of the Field Strenght in Urban and Indoor Environments.* http://winprop.ihf.uni-stuttgart.de, June 1999.

[WoLa97] Wölfle, G. and Landstorfer, F., "Field Strenght Prediction in Indoor Environments with Neural Networks", *in Proc. of VTC'99 - 47th IEEE Vehicular Technology Conference*, Phoenix, Arizona, USA, May 1997.

[WoWL99] Wölfle, G., Wertz, P. and Landstorfer M., "Performance, Accuracy and Generalization Capability of Indoor Propagation Models in Different Types of Buildings", in *Proc. of PIMRC'99 - 10th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Osaka, Japan, Sep.1999.