

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIAS E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS

RAFAEL SANTOS DE SOUZA

**Um novo modelo de propagação em redes Wi-Fi**

Este trabalho foi apresentado à Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologias e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Rafael Dueire Lins

Março de 2008

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIAS E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS**

**UM NOVO MODELO DE PROPAGAÇÃO EM REDES  
Wi-Fi**

por

**RAFAEL SANTOS DE SOUZA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

**ORIENTADOR: RAFAEL DUEIRE LINS, Ph.D.**

Recife, Março de 2008

© Rafael Santos de Souza, 2008

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S729u Souza, Rafael Santos de.  
Um novo modelo de propagação em redes *Wi-Fi* / Rafael Santos de Souza. –  
Recife: O Autor, 2008.  
xvii, 127 folhas, il : figs., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2008.

Inclui bibliografia e apêndice.

1. Engenharia elétrica. 2. Redes sem fio. 3. Propagação. 4. Modelagem. I.  
Título

UFPE

621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2008-135

Gostaria de dedicar este trabalho,  
bem como tudo o que tenho feito em minha vida,  
ao meu filho Gabriel.

*Tell me what you can hear  
And then tell me what you see  
Everybody has a different way  
To view the world*

*I would like you to know  
When you see the simple things  
To appreciate this life  
It's not too late to learn*

**Adrian Smith, Steve Harris**

# Agradecimentos

- Em primeiro lugar, sempre, agradeço o apoio incondicional e orientações de meu Pai e minhas amadas Mãe e Irmã;
- Não menos importantes em minha vida, também agradeço a Vanessa e Gabriel, pelos momentos de extrema felicidade que me propiciaram durante a realização do Mestrado;
- Agradeço ao Professor Rafael Dueire por ter me recebido de forma sincera e franca em nosso primeiro contato, fundamental para algumas decisões em minha vida e pelo meu ingresso no Mestrado. Também sou extremamente grato por sua atenção e valiosa orientação neste trabalho;
- Saliento também a importância das correções e contribuições dadas a este trabalho pela banca examinadora da defesa desta Dissertação, formada pelos Professores Marcelo Sampaio de Alencar e Joaquim Ferreira Martins Filho;
- Registro aqui minha gratidão, além de profunda admiração e respeito, pelos professores Hélio Magalhães de Oliveira, Valdemar Cardoso da Rocha Júnior e Ricardo Menezes Campello de Souza, todos da Universidade Federal de Pernambuco;
- Também agradeço a algumas pessoas que infelizmente não poderei abraçar ao término de mais essa etapa: meu avô “Tião”; minhas avós Dália e Frailda; e Yuri;
- Registro também minha gratidão a Kalua, Cynthia e Rodolfo que inúmeras vezes estiveram com Gabriel para me ajudar a avançar com o Mestrado;
- Agradeço a Luigi Brunelli e Rogerio Ballesteros por tudo o que têm feito por mim;
- Finalmente, agradeço aos Amigos que souberam compreender minha ausência em inúmeros fins de semana.

Resumo da Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

## **UM NOVO MODELO DE PROPAGAÇÃO EM REDES Wi-Fi**

**Rafael Santos de Souza**

**Março/2008**

Orientador: Rafael Dueire Lins, Ph.D.

Área de concentração: Comunicações

Palavras-chave: redes sem fio, propagação, modelagem.

Número de páginas: 127

O crescente uso de redes de computadores sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11 desperta a necessidade de conhecer o comportamento da propagação de sinais em tais redes, a fim de identificar suas limitações e otimizar recursos. Neste trabalho é realizado um estudo aprofundado sobre o macro-comportamento da propagação de sinais em redes sem fio operando de acordo com o padrão IEEE 802.11 na faixa de frequência de 2,4 GHz. São analisados os princípios de funcionamento da camada física do padrão e diversos modelos capazes de prever o macro-comportamento do sinal em redes de computadores sem fio. A partir de dados coletados em ambientes *outdoor* e *indoor* são feitas análises comparativas entre o desempenho dos modelos e um estudo sobre os efeitos de fatores climáticos (temperatura e umidade relativa do ar) sobre a atenuação imposta ao sinal oriundo do ponto de acesso. Por fim, um novo modelo é proposto considerando os efeitos da umidade relativa do ar, e seu desempenho é comparado ao dos demais modelos por meio de dados coletados em medições de campo.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for  
the degree of Master in Electrical Engineering

## **A NEW PROPAGATION MODEL FOR Wi-Fi NETWORKS**

**Rafael Santos de Souza**

**March/2008**

Supervisor: Rafael Dueire Lins, Ph.D.

Area of Concentration: Communications

Keywords: wireless LAN, propagation, modeling.

Number of pages: 127

The growth of computer networks based on the wireless standard IEEE 802.11 claims for a better understanding and modeling of the behavior of signal propagation in such networks, to identify their limitations and optimize resources. This work presents a detailed study of large-scale path loss on wireless networks operating in accordance with the standard IEEE 802.11 at 2.4 GHz frequency. The operation principles of the IEEE 802.11 physical layer and several models able to predict the large-scale path loss on wireless networks are analyzed. Using data collected from indoor and outdoor environments, a comparative analysis of the performance of models and the effects of climatic factors (temperature and relative humidity) on the attenuation imposed to the signal is made. A new empirical model is proposed considering the effects of relative humidity, and its performance is compared to other models in the literature.

# Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Sistemas de comunicação sem fio .....	1
1.2	Modelagem da propagação de sinal em sistemas de comunicação sem fio .....	6
1.3	O padrão IEEE 802.11 .....	12
1.4	Modelagem da propagação de sinal no padrão IEEE 802.11 .....	17
1.5	Motivação .....	19
1.6	Objetivo .....	20
1.7	Metodologia.....	20
1.8	Organização da dissertação .....	21
2	A camada física em 2,4 GHz no padrão IEEE 802.11 .....	22
2.1	A estruturação da camada física no padrão IEEE 802.11.....	23
2.2	As técnicas de transmissão utilizados no padrão IEEE 802.11 .....	24
2.2.1	A técnica de transmissão FHSS.....	25
2.2.2	A técnica de transmissão DSSS.....	27
2.2.3	A técnica de transmissão OFDM.....	29
2.3	Os modos de operação em 2,4 GHz da camada física do padrão IEEE 802.11 .....	31
2.3.1	O modo de operação FHSS .....	31
2.3.2	O modo de operação DSSS .....	35
2.3.3	O modo de operação HR/DSSS (802.11b).....	39
2.3.4	O modo de operação ERP (802.11g).....	44
3	Modelos para o macro-comportamento da propagação de sinal em 2,4 GHz.....	50
3.1	A modelagem do macro-comportamento da propagação de sinal.....	50
3.2	Modelos para o macro-comportamento da propagação de sinal em ambientes <i>outdoor</i> .....	52
3.2.1	O modelo de Young.....	52
3.2.2	O modelo logaritmo da distância.....	53
3.2.3	O modelo multi-inclinações.....	54
3.2.4	O modelo de Oliveira, Alencar, Rocha Jr. e Lopes .....	56
3.3	Modelos para o macro-comportamento da propagação de sinal em ambientes <i>indoor</i> .....	57
3.3.1	O modelo da <i>International Telecommunication Union</i> .....	57

3.3.2	O modelo logaritmo da distância com incremento da atenuação por obstáculos ...	60
3.3.3	O modelo de Cheung, Sau e Murch.....	61
4	Um novo modelo para o macro-comportamento da propagação de sinal em redes 802.11 na faixa de frequência de 2,4 GHz .....	63
4.1	Metodologia.....	63
4.2	Resultado das medições em ambiente <i>outdoor</i> .....	65
4.2.1	Análise dos dados .....	70
4.2.2	Análise da aderência dos modelos para ambiente <i>outdoor</i> aos dados obtidos .....	72
4.2.3	Influência dos fatores climáticos na propagação do sinal em ambiente <i>outdoor</i> ...	74
4.3	Resultado das medições em ambientes <i>indoor</i> .....	76
4.3.1	Análise dos dados .....	81
4.3.2	Análise da aderência dos modelos para ambiente <i>indoor</i> aos dados obtidos .....	82
4.3.3	Influência dos fatores climáticos na propagação do sinal em ambiente <i>indoor</i> .....	86
4.4	Um novo modelo para o macro-comportamento da propagação de sinal em 2,4 GHz... ..	88
4.4.1	Interpretação do modelo proposto .....	91
4.4.2	Desempenho do modelo proposto .....	93
5	Validação do modelo proposto .....	98
5.1	Resultado das medições em ambiente <i>outdoor</i> para a etapa de validação .....	98
5.1.1	Análise da aderência dos modelos aos dados obtidos nas medições <i>outdoor</i> .....	101
5.2	Resultado das medições em ambiente <i>indoor</i> para a etapa de validação .....	106
5.2.1	Análise da aderência dos modelos aos dados obtidos nas medições <i>indoor</i> .....	108
6	Conclusão .....	114
7	Referências bibliográficas .....	118
Apêndice A - Constelações BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM utilizadas no modo ERP- OFDM da extensão 802.11g.....		124
Apêndice B – Função <i>regress</i> do Matlab 7.0 .....		126

# Lista de Figuras

<b>Figura 1.1</b> – <i>Propagação de uma onda eletromagnética plana [3].</i> .....	3
<b>Figura 1.2</b> - <i>O espectro eletromagnético e a alocação de sistemas de comunicação [7].</i> ...	5
<b>Figura 1.3</b> - <i>Representação vetorial da reflexão de uma onda eletromagnética.</i> .....	7
<b>Figura 1.4</b> - <i>Difração de uma onda eletromagnética através de uma fenda.</i> .....	8
<b>Figura 1.5</b> - <i>Difração de uma onda eletromagnética contornando um obstáculo.</i> .....	9
<b>Figura 1.6</b> – <i>Espalhamento de uma onda eletromagnética.</i> .....	9
<b>Figura 1.7</b> – <i>WLAN no modo infra-estrutura.</i> .....	16
<b>Figura 1.8</b> – <i>WLAN no modo ponto-a-ponto.</i> .....	16
<b>Figura 2.1</b> – <i>A estruturação da camada física no padrão IEEE 802.11.</i> .....	23
<b>Figura 2.2</b> – <i>Espalhamento da energia de um sinal transmitido via FHSS [7].</i> .....	26
<b>Figura 2.3</b> – <i>Utilização dos canais no tempo em uma transmissão via FHSS [7].</i> .....	26
<b>Figura 2.4</b> – <i>Transmissão de sinal por meio da técnica DSSS [19].</i> .....	27
<b>Figura 2.5</b> – <i>Transmissão DSSS de uma seqüência com uso do operador XOR [7].</i> .....	29
<b>Figura 2.6</b> – <i>Exemplo de sinal transmitido via OFDM [19].</i> .....	30
<b>Figura 2.7</b> – <i>Espalhamento da energia em transmissão no modo DSSS [19].</i> .....	38
<b>Figura 2.8</b> – <i>Canais sem sobreposição (América do Norte) na extensão 802.11b [17].</i> ...	43
<b>Figura 2.9</b> – <i>Canais com sobreposição (América do Norte) na extensão 802.11b [17].</i> ....	43
<b>Figura 2.10</b> – <i>Canais sem sobreposição (Europa) na extensão 802.11b [17].</i> .....	43
<b>Figura 2.11</b> – <i>Canais com sobreposição (Europa) na extensão 802.11b [17].</i> .....	43
<b>Figura 2.12</b> – <i>Máscara para espalhamento espectral no esquema ERP-OFDM [16].</i> .....	48
<b>Figura 3.1</b> – <i>Curvas de atenuação previstas pelo modelo logaritmo da distância na frequência de 2,4 GHz com fator de atenuação igual a 2, 2,5 ou 3.</i> .....	54
<b>Figura 3.2</b> – <i>Curvas de atenuação previstas pelo modelo da ITU para a frequência de 2,4 GHz e com coeficiente de perda igual a 20, 25 ou 30.</i> .....	59
<b>Figura 4.1</b> – <i>Roteador wireless WRT54G.</i> .....	64
<b>Figura 4.2</b> – <i>Termo-higrômetro MT-241.</i> .....	65
<b>Figura 4.3</b> – <i>Vista frontal do prédio do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE.</i> .	66
<b>Figura 4.4</b> – <i>Medição outdoor no ponto de referência.</i> .....	66
<b>Figura 4.5</b> – <i>Medição outdoor a distância de 15 metros do roteador wireless.</i> .....	67
<b>Figura 4.6</b> – <i>Curva de atenuação do sinal prevista pelo modelo logaritmo da distância para o ambiente outdoor.</i> .....	71

<b>Figura 4.7</b> – <i>Curvas de atenuação do sinal previstas pelos modelos e parâmetros da Tabela 4.3.</i> .....	73
<b>Figura 4.8</b> – <i>Planta baixa da residência onde foram realizadas as medições indoor.</i> .....	77
<b>Figura 4.9</b> – <i>Localização dos pontos onde foram realizadas as medições indoor.</i> .....	78
<b>Figura 4.10</b> – <i>Curvas de atenuação do sinal previstas pelo modelo logaritmo da distância para as raias 1 e 2 no ambiente indoor.</i> .....	82
<b>Figura 4.11</b> – <i>Curvas de atenuação do sinal previstas pelos modelos e parâmetros da Tabela 4.9.</i> .....	84
<b>Figura 4.12</b> – <i>Curvas de atenuação do sinal previstas pelos modelos e parâmetros da Tabela 4.10.</i> .....	85
<b>Figura 4.13</b> – <i>Curvas de atenuação do sinal previstas pelo modelo proposto e pelo modelo logaritmo da distância para os dados das medições outdoor.</i> .....	93
<b>Figura 4.14</b> – <i>Curvas de atenuação do sinal para os dados das medições outdoor (modelos de Young, dual-slope e proposto).</i> .....	96
<b>Figura 4.15</b> – <i>Curvas de atenuação do sinal para os dados das medições indoor, raia 1 (modelos da ITU, logaritmo da distância e proposto).</i> .....	96
<b>Figura 4.16</b> – <i>Curvas de atenuação do sinal para os dados das medições indoor, raia 2 (modelos da ITU, logaritmo da distância e proposto).</i> .....	97
<b>Figura 5.1</b> – <i>Rua Joaquim Marques de Jesus, Piedade, Jaboaão dos Guararapes (vista frontal).</i> .....	99
<b>Figura 5.2</b> – <i>Rua Joaquim Marques de Jesus, Piedade, Jaboaão dos Guararapes (vista superior).</i> .....	99
<b>Figura 5.3</b> – <i>Curvas de atenuação do sinal para os dados da medição outdoor, etapa de validação.</i> .....	102
<b>Figura 5.4</b> – <i>Planta baixa da residência onde foram realizadas as medições indoor para a etapa de validação (com indicação dos pontos de medição e do AP).</i> .....	107
<b>Figura 5.5</b> – <i>Curvas de atenuação do sinal para os dados da medição indoor, etapa de validação.</i> .....	111
<b>Figura 6.1</b> – <i>Atenuação específica causada pelos gases oxigênio e vapor d'água em transmissões na direção horizontal e ao nível do mar.</i> .....	115
<b>Figura 7.1</b> – <i>Constelações BPSK, QPSK e 16-QAM do modo ERP-OFDM.</i> .....	124
<b>Figura 7.2</b> – <i>Constelação 64-QAM do modo ERP-OFDM.</i> .....	125

# Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1</b> – Operador lógico XOR.....	28
<b>Tabela 2.2</b> – Valores da função $b(i)$ para definição de seqüência de saltos no modo FHSS. .....	33
<b>Tabela 2.3</b> – Seqüência de saltos para $x = 10$ no modo FHSS.....	33
<b>Tabela 2.4</b> – Mapeamento de símbolos para modulação 2GFSK e 4GFSK no modo FHSS. .....	34
<b>Tabela 2.5</b> – Definição de canais de operação para o modo DSSS na América do Norte e Europa. ....	36
<b>Tabela 2.6</b> – Mapeamento de símbolos para modulação DBPSK e DQPSK no modo DSSS. .....	37
<b>Tabela 2.7</b> – Definição do parâmetro $\varphi_1$ no esquema de modulação CCK.....	41
<b>Tabela 2.8</b> – Definição dos parâmetros $\varphi_2$ , $\varphi_3$ e $\varphi_4$ no esquema CCK à taxa de 11 Mbits/s. .....	42
<b>Tabela 2.9</b> – Canais operacionais para a América do Norte na extensão 802.11b. ....	43
<b>Tabela 2.10</b> – Canais operacionais para a Europa na extensão 802.11b.....	43
<b>Tabela 2.11</b> – Parâmetros do esquema ERP-OFDM. ....	46
<b>Tabela 3.1</b> – Fórmulas de cálculo do incremento da atenuação por piso no modelo da ITU.....	59
<b>Tabela 3.2</b> – Valores recomendados pela ITU para o coeficiente de perda $N$ .....	59
<b>Tabela 4.1</b> – Resultado das medições outdoor (Parte 1).....	68
<b>Tabela 4.2</b> – Resultado das medições outdoor (Parte 2).....	69
<b>Tabela 4.3</b> – Modelos, expressões e parâmetros utilizados no comparativo com os dados obtidos para a propagação de sinal em ambiente outdoor. ....	72
<b>Tabela 4.4</b> – Comparativo entre os valores previstos pelos modelos em análise e aqueles aferidos para propagação outdoor. ....	73
<b>Tabela 4.5</b> – Valores médios da atenuação para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar. ....	74
<b>Tabela 4.6</b> – Variação dos aspectos queda de conexão, fator de atenuação e alcance teórico para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar. ....	75
<b>Tabela 4.7</b> – Resultado das medições indoor (Raia 1). ....	79
<b>Tabela 4.8</b> – Resultado das medições indoor (Raia 2). ....	80

<b>Tabela 4.9</b> – Modelos, expressões e parâmetros utilizados no comparativo com os dados obtidos para a propagação de sinal em ambiente indoor, raia 1. ....	83
<b>Tabela 4.10</b> – Modelos, expressões e parâmetros utilizados no comparativo com os dados obtidos para a propagação de sinal em ambiente indoor, raia 2. ....	83
<b>Tabela 4.11</b> – Comparativo entre os valores previstos pelos modelos em análise e aqueles aferidos para propagação indoor, raia 1. ....	84
<b>Tabela 4.12</b> – Comparativo entre os valores previstos pelos modelos em análise e aqueles aferidos para propagação indoor, raia 2. ....	85
<b>Tabela 4.13</b> – Valores médios da atenuação para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar, raia 1. ....	86
<b>Tabela 4.14</b> – Valores médios da atenuação para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar, raia 2. ....	87
<b>Tabela 4.15</b> – Variação dos aspectos fator de atenuação e alcance teórico para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar, raia 1. ....	87
<b>Tabela 4.16</b> – Variação dos aspectos fator de atenuação e alcance teórico para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar, raia 2. ....	87
<b>Tabela 4.17</b> – Regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições outdoor. ....	90
<b>Tabela 4.18</b> – Regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições indoor, raia 1. ....	90
<b>Tabela 4.19</b> – Regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições indoor, raia 2. ....	90
<b>Tabela 4.20</b> – Coeficientes da regressão múltipla para os dados das medições outdoor e indoor. ....	94
<b>Tabela 4.21</b> – Expressões obtidas através de regressão múltipla para a atenuação do sinal nos ambientes outdoor e indoor. ....	94
<b>Tabela 4.22</b> – Comparativo de desempenho dos modelos estudados e o modelo proposto para os dados das medições outdoor. ....	94
<b>Tabela 4.23</b> – Comparativo de desempenho dos modelos estudados e o modelo proposto para os dados das medições indoor, raia 1. ....	95
<b>Tabela 4.24</b> – Comparativo de desempenho dos modelos estudados e o modelo proposto para os dados das medições indoor, raia 2. ....	95
<b>Tabela 5.1</b> – Resultado das <u>medições</u> outdoor para a etapa de validação. ....	100

<b>Tabela 5.2</b> – Modelos, expressões e parâmetros utilizados no comparativo com os dados das medições outdoor obtidos para a etapa de validação. ....	101
<b>Tabela 5.3</b> – Desempenho dos modelos comparados aos dados das medições outdoor obtidos para a etapa de validação. ....	102
<b>Tabela 5.4</b> – Valores médios das <u>medidas</u> de atenuação por agrupamento em função da umidade relativa do ar aplicado aos dados das medições outdoor para a etapa de validação. ....	103
<b>Tabela 5.5</b> – Valores da atenuação <u>previstos</u> pelo modelo proposto para cada um dos grupos extraídos dos dados das medições outdoor para a etapa de validação. ....	104
<b>Tabela 5.6</b> – Desempenho dos modelos comparados aos grupos obtidos a partir das medições outdoor para a etapa de validação. ....	105
<b>Tabela 5.7</b> – Regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições outdoor da etapa de validação. ....	105
<b>Tabela 5.8</b> – Resultado das <u>medições</u> indoor para a etapa de validação. ....	108
<b>Tabela 5.9</b> – Modelos, expressões e parâmetros utilizados no comparativo com os dados das medições indoor obtidos para a etapa de validação. ....	109
<b>Tabela 5.10</b> – Comparativo de desempenho dos modelos para os dados das medições indoor obtidos para a etapa de validação. ....	110
<b>Tabela 5.11</b> – Valores médios das <u>medidas</u> de atenuação por agrupamento em função da umidade relativa do ar aplicado aos dados das medições indoor para a etapa de validação. ....	111
<b>Tabela 5.12</b> – Valores da atenuação <u>previstos</u> pelo modelo proposto para cada um dos grupos extraídos dos dados das medições indoor para a etapa de validação. ....	112
<b>Tabela 5.13</b> – Desempenho dos modelos comparados aos grupos obtidos a partir das medições indoor para a etapa de validação. ....	112
<b>Tabela 5.14</b> – Regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições indoor da etapa de validação. ....	113

# Lista de Acrônimos

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AP	<i>Access Point</i>
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
CCK	<i>Complementary Code Keying</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Code</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DBPSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EIRP	<i>Effective Isotropically Radiated Power</i>
ERP	<i>Extended Rate PHY</i>
FAF	<i>Floor Attenuation Factor</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FHSS	<i>Frequency-Hopping Spread Spectrum</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
HEC	<i>Header Error Check</i>
HR/DSSS	<i>High Rate Direct Sequence Spread Spectrum</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MIMO	<i>Multiple Input, Multiple Output</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
ONU	<i>Organização das Nações Unidas</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PBCC	<i>Packet Binary Convolutional Coding</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PL	<i>Path Loss</i>
PLCP	<i>Physical Layer Convergence Procedure</i>
PLME	<i>Physical Layer Management Entity</i>

PLW	<i>PSDU Length Word</i>
PMD	<i>Physical Medium Dependent</i>
PN	<i>Pseudo-noise</i>
PPDU	<i>PLCP Protocol Data Unit</i>
PSDU	<i>PLCP Service Data Unit</i>
PSF	<i>PLCP Signalling Field</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
SD	<i>Data Subcarrier</i>
SFD	<i>Start Frame Delimiter</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SP	<i>Pilot Subcarrier</i>
SPAF	<i>Soft Partition Attenuation Factor</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WAF	<i>Wall Attenuation Factor</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
XOR	<i>Exclusive Or</i>

# 1 Introdução

Neste capítulo são apresentados um breve histórico do desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio, remetendo à descoberta dos princípios de propagação de ondas eletromagnéticas até uma breve descrição das diversas aplicações existentes, e uma visão geral acerca do problema de modelar o comportamento de tais sistemas, ou seja, prever as características da propagação do sinal nos sistemas que utilizam o ar como meio de transmissão. Em seguida, é feita uma análise do sistema para comunicação de computadores sem fio em redes locais, baseado no padrão IEEE 802.11 conhecido popularmente como *Wi-Fi*, além de um estudo preliminar sobre o problema de modelagem da propagação aplicado a esse sistema específico.

Tal contextualização se faz necessária em virtude de residir na modelagem da propagação do sinal em redes sem fio o objeto de estudo deste trabalho. Foi realizada uma avaliação pioneira sobre os efeitos dos fatores climáticos temperatura e umidade relativa do ar no comportamento da propagação em redes baseadas no padrão IEEE 802.11. Ao fim deste capítulo introdutório é exposta a motivação em estudar tal tema, a metodologia a ser utilizada, os objetivos específicos do trabalho e sua estruturação.

## 1.1 Sistemas de comunicação sem fio

Desde a segunda metade do século XIX o ser humano já detinha conhecimento sobre o fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas, principalmente em virtude da teoria desenvolvida pelo matemático e físico escocês James Clerk Maxwell [1]. Em 1864, ele descreveu o comportamento e a relação entre campos elétricos e magnéticos, com aquelas que ficaram conhecidas universalmente por Equações de Maxwell, nas quais estava indicada, de forma teórica, a existência de ondas eletromagnéticas. Pouco mais de 20 anos

após Maxwell expor sua teoria, o físico alemão Heinrich Hertz demonstrou a existência de ondas eletromagnéticas em laboratório de maneira totalmente aderente às proposições de Maxwell [2].

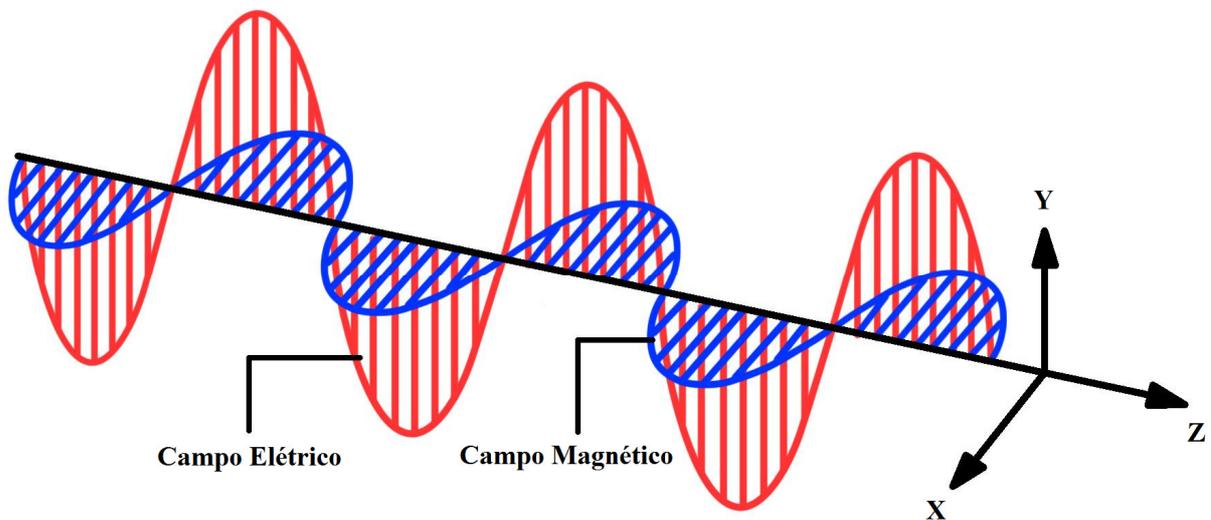
Em sua essência, as Equações de Maxwell indicam que um campo elétrico variando no tempo é capaz de gerar um campo magnético e que, de forma análoga, um campo magnético variando no tempo é capaz de produzir um campo elétrico. Com esses dois fenômenos ocorrendo simultaneamente, os campos elétrico e magnético produzem uma onda que, por representar o resultado de sua combinação, foi denominada onda eletromagnética. A visualização desse efeito é complexa, sob o aspecto físico ou matemático, uma vez que as ondas eletromagnéticas se propagam de forma esférica quando geradas a partir de um ponto [3].

Uma simplificação interessante para a compreensão do processo de geração de ondas eletromagnéticas é supor que a distância entre os pontos de transmissão e recepção seja grande o suficiente, de modo que as ondas esféricas possam ser aproximadas, satisfatoriamente, por ondas planas. Com essa suposição, a direção de propagação da onda eletromagnética e os vetores referentes aos campos elétrico e magnético geradores da onda podem ser visualizados em um plano tridimensional (plano XYZ), com todos os vetores ortogonais entre si [3]. Tal condição é ilustrada na Figura 1.1, extraída de [3], com o vetor campo elétrico oscilando na direção do eixo Y, o vetor campo magnético oscilando na direção do eixo X, e a onda eletromagnética se propagando na direção do eixo Z de acordo com vetor resultante do produto vetorial das componentes elétrica e magnética [3].

Existem, dentre diversas outras, três características importantes associadas às ondas eletromagnéticas: seu comprimento de onda, tipicamente representado pela letra grega  $\lambda$ , que indica a distância percorrida pela onda em 1 ciclo; sua frequência, normalmente representada pela letra  $f$ , igual ao número de ciclos ou repetições que aquela onda produz em 1 segundo; e, por fim, sua velocidade de propagação. A frequência de uma onda é medida em hertz, que é equivalente ao inverso do segundo ( $s^{-1}$ ), em homenagem a Heinrich Hertz. A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no espaço livre (vácuo) é aproximada pelo valor de  $3 \times 10^8$  m/s, quantidade também utilizada quando o meio de propagação é o ar, em virtude da proximidade entre os valores reais para estes dois meios [3]. A relação entre estas grandezas é dada pela equação

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.1)$$

em que o parâmetro  $c$  representa a velocidade de propagação da onda.



**Figura 1.1** – Propagação de uma onda eletromagnética plana [3].

A teoria e os princípios apresentados por Maxwell, e comprovados por Hertz, forneceram as ferramentas necessárias ao desenvolvimento dos primeiros mecanismos para comunicação via ondas eletromagnéticas, ainda no século XIX, com destaque para os esforços e resultados obtidos pelos cientistas Nikola Tesla (Croácia), Guglielmo Marconi (Itália), Alexander Popov (Rússia) e Padre Landell de Moura (Brasil) [4].

No início do século XX começam a ser registrados os primeiros resultados expressivos no estabelecimento de comunicações por ondas eletromagnéticas. Em 1901, Guglielmo Marconi alegou êxito no envio de sinais telegráficos<sup>1</sup> da Inglaterra para a América do Norte, atravessando todo o oceano Atlântico em uma distância aproximada de 3.500 km [5]. Os resultados desse experimento de Marconi são contestados por alguns críticos que crêem no fato de que Marconi captou ruído oriundo da atmosfera ao invés do sinal efetivamente transmitido [4].

Havia ainda dificuldade em imaginar a transmissão de sinais de voz em sistemas sem fio, uma vez que a faixa de frequência audível para os seres humanos é baixa (de 20 Hz a 20 kHz) e considerada ruim para a propagação de ondas eletromagnéticas, empecilho este que havia sido visualizado por Hertz em seus estudos [1].

---

<sup>1</sup> O sinal telegráfico é uma seqüência de pulsos curtos e longos, equivalentes, respectivamente, a “pontos” e “traços”, que representam caracteres de acordo com o código Morse.

Também nos primeiros anos do século XX, grandes foram as contribuições do matemático e inventor canadense Reginald Fessenden para o desenvolvimento dos sistemas de comunicação sem fio. É creditado a ele o mérito da primeira transmissão de voz e música com técnicas de modulação que deslocavam o sinal para frequências mais altas, antes da transmissão, contornando a dificuldade levantada por Hertz de transmitir sinais na faixa de frequências audíveis aos seres humanos. Tal princípio, chamado de modulação de sinais, serve até os dias atuais como base para o funcionamento de boa parte dos sistemas de comunicação sem fio [1].

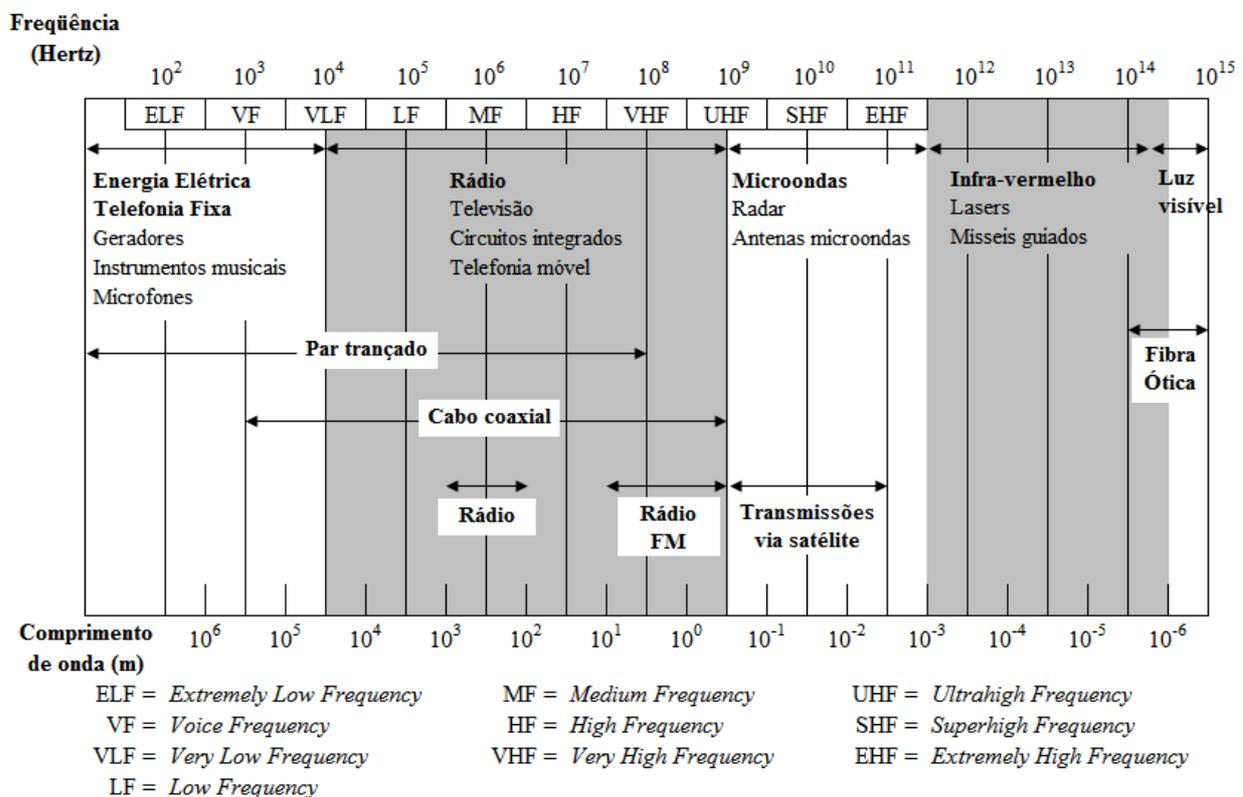
Nos anos que se seguiram ao longo do século XX e início do século XXI foi observado o surgimento de inúmeros sistemas utilizando o ar como meio de transmissão (TV, transmissões via satélite, telefonia móvel, redes de computadores sem fio, etc...), todos baseados nos princípios fundamentais de propagação eletromagnética e apoiados por técnicas que viabilizam seu funcionamento de acordo com seus propósitos específicos. Sobre tais técnicas, podem ser citadas as notáveis evoluções nas áreas de antenas e de modulação e processamento de sinais, fundamentais no desenvolvimento de algumas tecnologias e serviços [6].

Os sistemas de comunicação baseados na propagação de ondas eletromagnéticas operam em faixas específicas de frequência, ou, equivalentemente, com comprimentos de onda típicos. Desta forma, é possível visualizar uma escala de frequências, e seus respectivos comprimentos de onda, com os diversos sistemas de comunicação ocupando intervalos da escala. Tal recurso é conhecido como espectro eletromagnético e uma boa esquematização dele encontra-se na Figura 1.2 [7].

Na Figura 1.2 podem ser observados alguns detalhes interessantes sobre o espectro eletromagnético e sua utilização:

- Faixa de 1 Hz a 10 kHz: faixa na qual estão alocados serviços de telefonia fixa e fornecimento de energia elétrica, tipicamente utilizando meios de transmissão metálicos. É comum, na literatura, encontrar a designação de faixa de ondas-longas, em virtude dos comprimentos de onda associados às frequências deste intervalo (maiores que 50 km);

- Faixa de 10 kHz a 1 GHz: muitas vezes associada ao termo rádio, é nesta faixa em que são alocados, dentre outros, os serviços de rádio AM, rádio FM, TV aberta e telefonia móvel<sup>2</sup>;
- Faixa de 1 GHz a 500 GHz: conhecida como faixa de microondas, comporta serviços de TV via satélite, redes locais de computadores sem fio (padrão IEEE 802.11), redes metropolitanas de computadores sem fio (padrão IEEE 802.16), etc.



**Figura 1.2** - O espectro eletromagnético e a alocação de sistemas de comunicação [7].

A próxima seção aborda o problema da modelagem da propagação das ondas eletromagnéticas, também chamada de propagação de sinais, visto que as ondas eletromagnéticas transportam a informação ou sinal.

<sup>2</sup> Boa parte dos padrões de telefonia móvel no mundo operam na faixa entre 800 MHz e 1 GHz, mas há também padrões que definem a alocação do serviço em faixas acima de 1 GHz, tipicamente entre 1,7 e 2 GHz, como pode ser visto no capítulo introdutório de [8].

## 1.2 Modelagem da propagação de sinal em sistemas de comunicação sem fio

Compreender o comportamento da propagação de ondas eletromagnéticas é um passo importante para quem trabalha com sistemas de comunicação sem fio. Existem diversos aspectos que motivam esta afirmação, sempre baseados na relevância em se deter o conhecimento do desempenho e alcance do sistema, dentre os quais podem ser destacados:

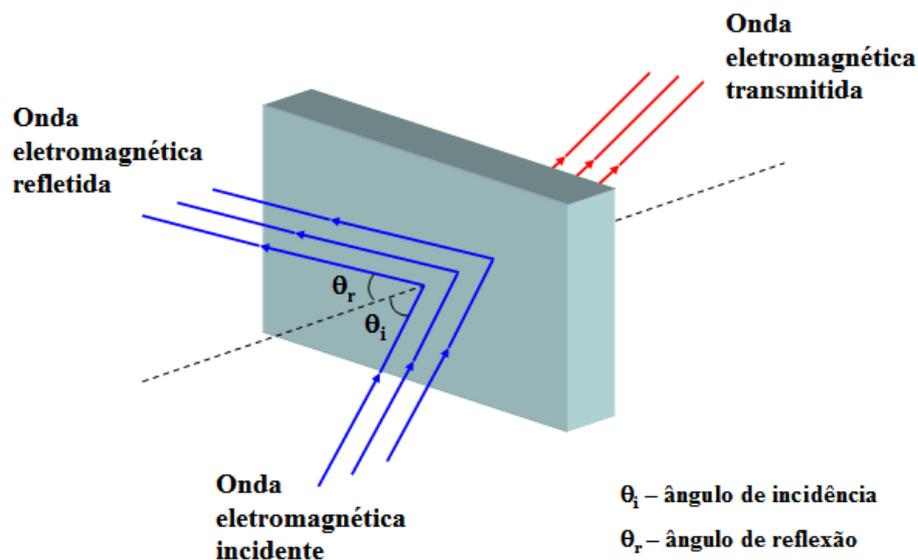
- a possibilidade de prever o desempenho do sistema dentro de uma determinada área de cobertura [3];
- a possibilidade de estimar a potência necessária para o estabelecimento da comunicação entre dois pontos [9];
- a capacidade de planejar adequadamente a alocação de antenas em sistemas de comunicação mais complexos [10].

Com o crescimento no número de aplicações baseadas na propagação de ondas eletromagnéticas, encontrar modelos matemáticos capazes de prever o comportamento da propagação do sinal tornou-se um desafio interessante e necessário. A dificuldade dessa tarefa deriva da complexidade e diversidade de fatores envolvidos no processo de propagação. Isso fica claro quando se estudam os três efeitos na propagação mais relevantes no comportamento de ondas eletromagnéticas: reflexão, difração e espalhamento.

O primeiro desses efeitos ocorre quando uma onda eletromagnética encontra, em seu caminho, um obstáculo cujas dimensões são relativamente grandes comparadas ao comprimento da onda ( $\lambda$ ) e esse obstáculo possui características elétricas distintas daquelas do meio que produziu a onda eletromagnética. Quando isso acontece, uma parte da onda eletromagnética (de sua energia, para ser mais preciso) é refletida, enquanto outra fração dela é transmitida através do segundo meio. A fração da onda eletromagnética que é refletida, ou transmitida, é função das propriedades elétricas do material no qual a onda

incide, da polarização da onda<sup>3</sup>, da frequência de propagação e do ângulo de incidência [8]. A Figura 1.3 ilustra vetorialmente, de maneira simplificada, a ocorrência desse efeito.

Ainda sobre a reflexão de ondas, vale salientar dois pontos: dependendo das características elétricas do material que constitui o obstáculo no caminho da onda, é possível que apenas uma pequena fração dessa seja transmitida; a disposição simétrica exposta na Figura 1.3, na prática, pode ser fortemente afetada pela superfície do obstáculo, como será visto na abordagem do mecanismo de espalhamento.



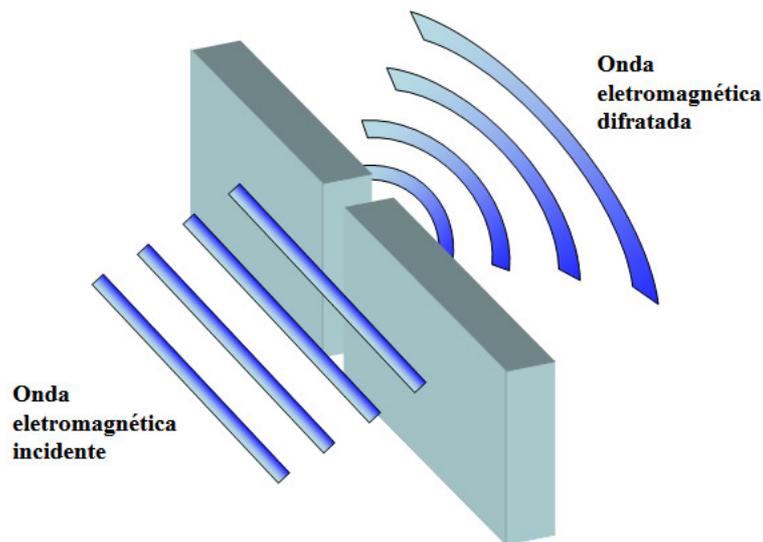
**Figura 1.3** - Representação vetorial da reflexão de uma onda eletromagnética.

A difração é o fenômeno observado quando uma onda eletromagnética contorna algum obstáculo, de forma a conduzir, até a região encoberta por este, parte da energia que ela transporta. Esse mecanismo pode ser explicado pelo princípio de Huygen, o qual indica que cada ponto em uma onda eletromagnética se comporta como se fosse uma de radiação, propagando a energia em diversas direções, mas favorecendo aquela determinada pela real fonte da onda eletromagnética [9]. Desta forma, os pontos da onda que alcançam as bordas do(s) obstáculo(s) atuam como uma fonte de propagação eletromagnética, garantindo que uma parcela da energia associada à onda alcance a parte posterior do obstáculo.

---

<sup>3</sup> A polarização de uma onda eletromagnética é definida em função da forma com que variam no tempo as componentes vertical e horizontal do campo elétrico às quais a onda está associada. Em [11] pode-se encontrar explicações mais detalhadas sobre essa definição e algumas ilustrações elucidativas.

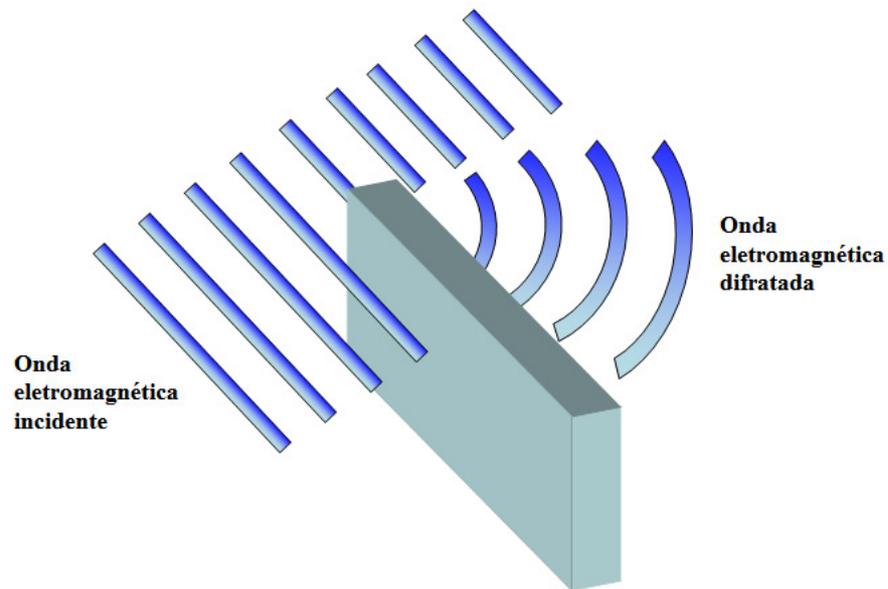
Assim como no caso da reflexão, a difração é um fenômeno cujos efeitos dependem de características da onda eletromagnética (amplitude, fase, polarização e frequência, por exemplo) e da geometria do obstáculo [8]. É comum encontrar na literatura duas situações ilustrativas sobre o mecanismo de difração: a passagem de uma onda eletromagnética por uma espécie de fenda; ou, uma onda contornando a borda de um obstáculo. Elas são exibidas nas Figuras 1.4 e 1.5, respectivamente.



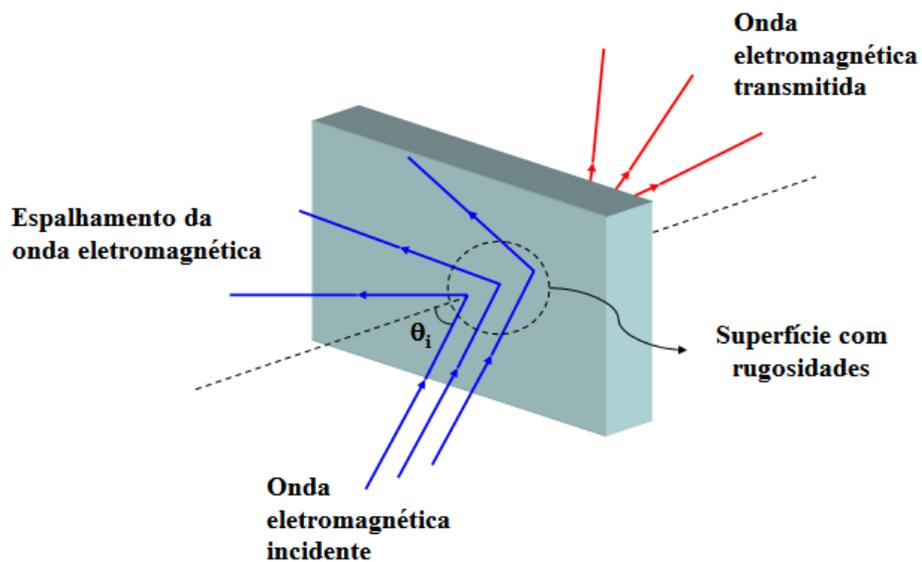
**Figura 1.4** - Difração de uma onda eletromagnética através de uma fenda.

Na primeira, Figura 1.4, a fenda funciona como uma nova fonte para a onda eletromagnética, enquanto na segunda, Figura 1.5, o ponto situado no limite a esquerda do obstáculo realiza esta função. Em ambas a propagação da onda foi considerada plana e apenas o mecanismo de difração foi ilustrado.

Como adiantado de forma breve na exposição do mecanismo de reflexão, a textura da superfície de um obstáculo no caminho de uma onda eletromagnética pode afetar severamente sua propagação. Na prática, é bastante comum que tais superfícies apresentem rugosidades capazes de interferir na reflexão das ondas, causando seu espalhamento em virtude da difusão da energia associada à onda em diferentes direções [12]. Esse efeito é ilustrado de forma vetorial na Figura 1.6.



**Figura 1.5** - Difração de uma onda eletromagnética contornando um obstáculo.



**Figura 1.6** – Espalhamento de uma onda eletromagnética.

Existem diferentes níveis de rugosidade em superfícies e a existência de uma superfície perfeitamente plana é improvável. Dessa forma, na análise do fenômeno de espalhamento de uma onda eletromagnética, torna-se importante saber a partir de que ponto a rugosidade de uma superfície afeta a reflexão de uma onda, causando seu

espalhamento, o que pode ser feito usando o critério de Rayleigh [8]. O primeiro passo do critério é encontrar um parâmetro  $h_c$ , definido por

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \cdot \sin \theta_i}, \quad (1.2)$$

em que  $\lambda$  representa o comprimento da onda eletromagnética e  $\theta_i$  o seu ângulo de incidência na superfície. Calculado o valor de  $h_c$ , definir se uma superfície deve ou não ser considerada rugosa, implica em encontrar a diferença entre as maiores protuberâncias existentes na superfície (a mais externa e a mais interna) e comparar este valor com  $h_c$ . Se a diferença for maior, a superfície será considerada rugosa. Caso contrário, a superfície será considerada lisa.

Da Equação 1.2 ainda podem ser extraídas 3 considerações importantes:

- quanto menor o comprimento de onda (equivalente à frequências mais altas), maior a sensibilidade à rugosidades;
- quanto menor o ângulo de incidência, menor a sensibilidade à rugosidades;
- para um mesmo ângulo de incidência de uma onda eletromagnética, uma superfície pode ser considerada lisa ou rugosa dependendo da frequência da onda.

A análise dos mecanismos de reflexão, difração e espalhamento fornece uma noção a respeito da complexidade em modelar a propagação de ondas eletromagnéticas. Essa dificuldade é agravada pelo fato de que, dado um ponto no espaço sob atuação de uma onda eletromagnética, a intensidade de seu sinal é a resultante de um somatório vetorial englobando as contribuições oriundas de cada um dos mecanismos analisados e, possivelmente, da propagação direta até aquele ponto (propagação em linha reta) [8].

Na modelagem da propagação de sinais em ondas eletromagnéticas a variável de interesse é a intensidade com que um receptor recebe o sinal ou, em outras palavras, a potência do sinal disponível no local onde se encontra o receptor. Conhecidas a intensidade do sinal transmitido (potência transmitida) e a do recebido (potência recebida), torna-se possível calcular a perda imposta pelo meio usando a equação

$$PL(dB) = 10 \cdot \log \frac{P_t}{P_r}, \quad (1.3)$$

em que  $PL$  (*path loss*) representa a perda do sinal em decibéis,  $P_t$  a potência transmitida e  $P_r$  a potência recebida [8].

Dois comportamentos distintos podem ser observados quando é feita uma avaliação do comportamento da propagação de uma onda eletromagnética [8]. O primeiro deles, que pode ser chamado de macro-comportamento, aponta uma redução natural da intensidade do sinal com incrementos significativos da distância entre transmissor e receptor, em função das perdas impostas pelo meio. Em contrapartida, também é observada uma espécie de micro-comportamento, quando pequenos incrementos na distância entre transmissor e receptor acarretam grandes flutuações na intensidade do sinal, sem uma tendência bem definida. Existem, portanto, duas linhas de modelagem da propagação de ondas sob esse aspecto, uma que trata do macro-comportamento da propagação (importante para estimar o alcance, ou cobertura, proporcionado pelo transmissor) e outra da análise das rápidas oscilações sofridas pelo sinal em função de pequenas mudanças na separação entre transmissor e receptor.

Outra distinção que pode ser feita sobre a modelagem da propagação de ondas eletromagnéticas diz respeito do método utilizado [9]. A modelagem pode seguir alguma metodologia determinística, com a qual se busca identificar todos os fatores no meio que interferem de forma relevante na propagação e calcular seus efeitos. Em virtude dos mecanismos inerentes à propagação de ondas eletromagnéticas, essa opção pode ser de alta complexidade e difícil implementação. Porém, um modelo bem elaborado pode apresentar excelente aderência ao comportamento real da propagação.

A segunda forma utilizada é a modelagem empírica, em que os modelos são encontrados por meio da coleta de dados relativos à propagação do sinal e à análise estatística de seu comportamento. Essa metodologia torna os modelos empíricos, quando comparados aos determinísticos, mais fáceis de descrever e implementar. Em contrapartida, por representarem aproximações do comportamento da propagação do sinal, podem incorrer em certa perda de precisão que pode ser controlada em patamares bastante razoáveis.

Por fim, a modelagem da propagação de ondas eletromagnéticas também pode ser feita de acordo com o tipo de ambiente no qual o sinal é transmitido. Basicamente, existem

os modelos de propagação para ambientes abertos (*outdoor*) e aqueles utilizados para ambientes fechados (*indoor*), como prédios e residências.

### 1.3 O padrão IEEE 802.11

Redes de computadores sem fio têm se tornado comuns no dia a dia, especialmente para aqueles que utilizam equipamentos portáteis como *laptops* ou *smartphones*. Um parâmetro interessante, que embasa essa afirmação, foi divulgado pela *Wi-Fi Alliance*<sup>4</sup> em seu relatório anual de 2006 [13]. No documento, a organização informa estimar que em 2006 foram fabricados cerca de 200 milhões de adaptadores de rede para o padrão 802.11, o dobro da quantidade produzida em 2004. Prevê ainda que este número cresça em aproximadamente 100 milhões de unidades ao ano até 2010, quando é esperada uma produção da ordem de 600 milhões de unidades.

O crescimento da utilização de redes sem fio no padrão 802.11 é uma realidade fortemente ligada ao esforço realizado pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, mais conhecido por suas iniciais IEEE, em parceria com inúmeras empresas dos setores de informática e telecomunicações, em padronizar alguns aspectos do funcionamento de redes locais de computadores sem fio (*wireless local area network*, ou simplesmente WLAN). Mesmo antes da criação do padrão 802.11, já era possível o estabelecimento da comunicação sem fio entre computadores, porém sem um padrão técnico definido.

A ausência de um padrão para qualquer tecnologia trás algumas dificuldades que foram muito bem retratadas no capítulo introdutório de [7]:

- custo elevado dos equipamentos para implantação das redes (a padronização da tecnologia possibilita a fabricação em larga escala dos componentes eletrônicos necessários e a conseqüente redução dos custos de produção);
- falta de interoperabilidade para os equipamentos de diversos fabricantes (a partir da existência de um padrão tecnológico há como garantir que equipamentos de fabricantes distintos, seguindo o padrão, terão a capacidade de “conversar”).

---

<sup>4</sup> A Wi-Fi Alliance é a organização responsável pela certificação de dispositivos sem fio que implementam as recomendações do padrão IEEE 802.11.

Impulsionado pela evidente carência desse padrão para redes de computadores sem fio, e apoiado por diversas empresas, o IEEE iniciou na década de 1990 o trabalho de elaboração de um padrão tecnológico para esse fim. Tal trabalho culminou na divulgação, em 1997, do padrão IEEE 802.11 [14]<sup>5</sup>, que especificou as condições de funcionamento das camadas física e de acesso ao meio para redes locais sem fio (camadas equivalentes às mais baixas do modelo OSI, ou seja, as camadas física e de enlace de dados).

Essa primeira versão do padrão previa a operação do sistema na faixa de frequência de 2,4 GHz, com taxas de 1 Mbit/s ou 2 Mbits/s por canal e transmissão do sinal por meio de técnicas de espalhamento espectral por seqüência direta (DSSS) ou salto em frequência (FHSS). Para o controle do acesso ao meio físico, especificou-se o uso do método CSMA/CA (*carrier sense multiple access with collision avoidance*). Havia ainda a possibilidade da camada física operar na faixa de infravermelho, com comprimento de onda entre 850 e 950 nm, opção que nunca se consolidou na aplicação do padrão em virtude de sua fragilidade frente à existência de obstáculos entre transmissor e receptor [15].

A partir de 1999 as extensões ao padrão IEEE 802.11 começaram a ser divulgadas, sempre com o intuito de incrementar a taxa de transmissão máxima da tecnologia ou atender demandas do mercado de telecomunicações (como o aumento do nível de segurança oferecido pelo padrão, garantia de interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos, etc...). As duas primeiras extensões, definidas pelo IEEE como 802.11a e 802.11b, preocuparam-se com o primeiro aspecto.

A extensão 802.11a [16], divulgada em setembro de 1999, definiu a operação da camada física na faixa de frequência de 5 GHz com transmissão do sinal com multiplexação por divisão de frequência (modo OFDM). Nela foi possível alcançar, teoricamente, taxas de transmissão da ordem de 54 Mbits/s. A segunda extensão [17], apresentada simultaneamente à primeira, era uma evolução da camada física no modo DSSS em 2,4 GHz definida no padrão original, com a qual foi possível aos sistemas operando de acordo com a extensão 802.11b alcançar, também, taxas de 5,5 e 11 Mbits/s por canal (em adição às taxas de 1 e 2 Mbits/s previstas inicialmente).

---

<sup>5</sup> A referência apontada data de 1999 por tratar-se de uma revisão do documento divulgado pelo IEEE em 1997.

---

Extensões ao padrão IEEE 802.11, não menos importantes que as já citadas, porém sem alterações profundas no modo de operação do padrão, também foram desenvolvidas e são citadas a seguir, de forma sintética, de acordo com [15]:

- 802.11c: aprovada em setembro de 1998, define condições para a camada de acesso que propiciam ao padrão 802.11 interoperabilidade com redes IEEE 802.X;
- 802.11d: extensão para adequar o padrão 802.11 às questões regulatórias de diversos países. Foi aprovada em junho de 2001;
- 802.11e: aprovada em setembro de 2005, estabelece novas funcionalidades para a camada de acesso com o objetivo de prover melhor qualidade de serviço (QoS) às redes 802.11, especialmente para atender às demandas de serviços de voz e vídeo;
- 802.11f: aprovada em junho de 2003, adicionou ao padrão 802.11 características que garantem interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos.

Também em junho de 2003, o IEEE aprovou a extensão 802.11g do padrão [18], na qual foram especificadas novas condições para a camada física operando na faixa de frequência de 2,4 GHz de forma a alcançar maiores taxas de transmissão. Essa evolução da camada física em 2,4 GHz era uma resposta do IEEE à necessidade de prover ao 802.11b capacidade compatível ao 802.11a, dada sua aceitação no mercado de telecomunicações e ao fato de que, tipicamente, a segunda extensão do padrão oferecia maior alcance (ou maior área de cobertura) que a primeira [19]. Assim, foi definida na extensão 802.11g a ERP (*Extended Rate PHY*) em que são propostos esquemas de transmissão e modulação para a camada física capazes de alcançar taxas similares àquelas da extensão 802.11a.

Além das extensões já abordadas, um número significativo de trabalhos adicionais têm sido desenvolvidos pelo IEEE para a evolução do padrão 802.11. Alguns já estão aprovados, outros não. A seguir são destacados os principais deles:

- 802.11i: extensão voltada a melhorias nos quesitos de segurança do padrão. Foi aprovada em junho de 2004 [20];
- 802.11n: com esta extensão, ainda sob processo de elaboração, o IEEE pretende incrementar a taxa máxima por canal para um valor da ordem de 100 Mbits/s, com apoio da técnica MIMO (multiple input, multiple output antennas) e em ambas as faixas previstas no padrão (2,4 GHz e 5 GHz) [19];
- 802.11y: também em fase de desenvolvimento, esta extensão deve habilitar a operação do padrão na faixa de 3,65 - 3,7 GHz, a princípio para utilização nos EUA<sup>6</sup>.

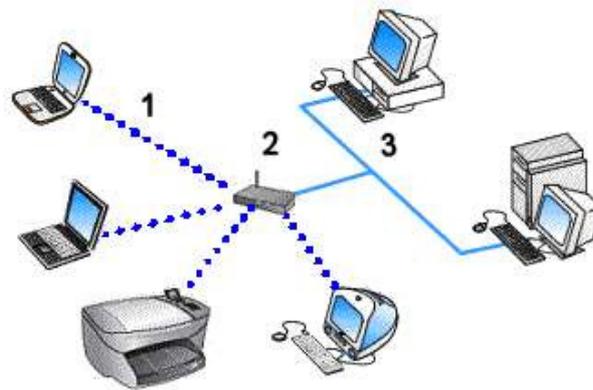
Há grande expectativa sobre a aprovação final da extensão 802.11n e a previsão de que, aos poucos, ela substitua as versões anteriores em virtude da sua maior capacidade e possibilidade de operação nas faixas de frequência de 2,4 e 5 GHz. Por sua vez, a já aprovada extensão 802.11i é importante para a consolidação do padrão, dados os avanços propiciados por ela ao aspecto de segurança de rede.

Redes locais baseadas no padrão IEEE 802.11 (WLAN) têm sido elaboradas, normalmente, dentro de duas configurações: o modo infra-estrutura e o modo ponto-a-ponto (citado muitas vezes como modo *ad hoc*) [22]. O primeiro deles é caracterizado pela existência de um elemento central, chamado ponto de acesso (ou AP, da expressão em inglês *access point*), que viabiliza o acesso à rede pelos demais elementos. Dependendo do equipamento utilizado como ponto de acesso, essa distribuição pode ocorrer com ou sem fio, conforme exposto na Figura 1.7.

O modo ponto-a-ponto, ou *ad-hoc*, é aquele em que não há a presença de um elemento central na rede e seus integrantes “conversam” diretamente. Tal configuração é ilustrada na Figura 1.8.

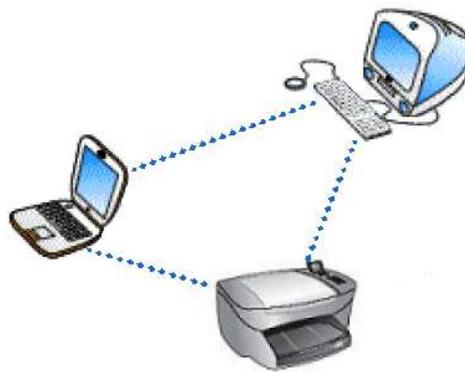
---

<sup>6</sup> Em [21] pode ser visto um acompanhamento, no tempo, das extensões ao padrão IEEE 802.11. Para o caso da extensão 802.11y, é possível acessar seu PAR (*Project Authorization Request*) com a definição do escopo e propósito da extensão.



- 1 - Conexão sem fio
- 2 - Ponto de acesso (AP)
- 3 - Conexão física

**Figura 1.7** – WLAN no modo infra-estrutura.



**Figura 1.8** – WLAN no modo ponto-a-ponto.

Na próxima seção é abordada, de forma introdutória, a modelagem da propagação de sinais em redes sem fio no modo infra-estrutura baseadas no padrão IEEE 802.11, tema que, em virtude da ampla utilização do padrão e suas extensões, tem sido bastante estudado pela comunidade científica.

## 1.4 Modelagem da propagação de sinal no padrão IEEE 802.11

Em agosto de 2007 a *Webtorials*<sup>7</sup> publicou uma pesquisa realizada pela *Kubernan*<sup>8</sup>, com suporte da *Nortel*, apresentando uma análise do mercado de redes locais sem fio [23]. Os dados foram coletados em junho de 2007 a partir de 300 pessoas em diversos países, sendo 47% delas da América do Norte, 25% da Europa Ocidental, 16% da Ásia ou Oceania, 7% da América Latina e 6% de outras localidades. Os resultados dessa pesquisa fornecem uma visão importante sobre a aplicação do padrão IEEE 802.11

O primeiro aspecto relevante diz respeito aos ambientes de aplicação das redes sem fio. Apenas 22% dos entrevistados informou utilizá-las em locais abertos (*outdoor*), enquanto a maioria apontou o uso da tecnologia em ambientes fechados (*indoor*) como, por exemplo, escritórios, salas de reunião ou conferência, áreas de convívio, etc. Quanto à tecnologia específica utilizada, mais de 80% dos participantes afirmaram ser usuários das extensões b ou g do padrão 802.11 e 50% deles indicaram o uso da extensão 802.11a<sup>9</sup>.

Algumas justificativas para a maior adoção do padrão 802.11 na faixa de 2,4 GHz são retratadas em [WIR07] e [WEB07]. No primeiro é colocada a questão da maior facilidade de implementação da extensão 802.11b comparada a 802.11a. Isto levou, após a divulgação simultânea de ambas especificações, a uma rápida disponibilidade de equipamentos operando em 2,4 GHz no mercado, garantindo uma maior penetração para as extensões 802.11b e 802.11g, conseqüentemente. A segunda fonte aborda as dificuldades relacionadas às políticas regulatórias de utilização da faixa de frequências. Mundialmente não há um consenso sobre o uso da faixa de 5 GHz, inclusive com países que não

---

<sup>7</sup> Informações sobre essa organização podem ser obtidas no endereço [www.webtorials.com](http://www.webtorials.com), no qual também é possível realizar um registro gratuito e acessar as publicações feitas pela organização.

<sup>8</sup> A Kubernan é uma empresa voltada a realização de pesquisas de mercado nas áreas de tecnologia da informação e comunicações. Seu endereço eletrônico é [www.kubernan.com](http://www.kubernan.com).

<sup>9</sup> Apesar de não possuir sua versão final aprovada, a extensão 802.11n foi apontada como em uso por 6% dos entrevistados. Porém, junto a tecnologia *WiMAX* Móvel (802.16e), já aparece como líder de intenção de uso.

permitem seu uso para redes de computadores, ou o fazem com restrições<sup>10</sup>. Esse empecilho, até certo ponto, desestimulou fabricantes e empresas multinacionais que, ao buscar implementações de redes sem fio padronizadas não adotariam um sistema sem facilidade de uso em todo o mundo.

Esses dados e fatos indicam a existência de um perfil de uso mais comum para redes locais sem fio operando de acordo com o padrão IEEE 802.11: WLAN em ambientes fechados (*indoor*) com frequência de operação de 2,4 GHz. Com o notável crescimento no número de tais redes sem fio, este perfil tornou-se um alvo freqüente da comunidade científica, que passou a realizar inúmeros trabalhos para compreender o seu real comportamento e desempenho [27-31].

O interesse em entender o comportamento real de redes sem fio 802.11 conduz à necessidade de estabelecer modelos capazes de prever a propagação do sinal. A solução desse problema pode trazer alguns benefícios muito bem destacados em [34]:

- possibilidade de desenvolver aplicativos para localização remota baseados em redes com o padrão 802.11 [33-35];
- capacidade de projetar adequadamente a alocação dos pontos de acesso em redes sem fio, no modo infra-estrutura, de forma a otimizar os custos de implantação e garantir desempenho satisfatório da rede em todos os pontos cobertos por ela.

A maior parte dos modelos para a propagação de sinais em redes baseadas no padrão IEEE 802.11 utilizam abordagem empírica. Também é possível encontrar modelos determinísticos, como em [36], porém eles são criticados por outros autores [10]. Normalmente, essas críticas derivam da complexidade e falta de flexibilidade dos modelos determinísticos. Eles requerem uma grande quantidade de dados geométricos e características elétricas do ambiente e dos obstáculos existentes no local onde o sistema irá operar. O levantamento dessas informações demanda certo esforço e, em alguns casos,

---

<sup>10</sup> As definições atuais sobre a utilização das faixas de frequências de 2,4 GHz e 5 GHz para redes de computadores sem fio no Brasil encontram-se nas seções IX e X da Resolução 365, de 10 de maio de 2004, da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [26].

pode tornar-se inviável, pois, para cada novo local de aplicação de uma rede sem fio, um novo levantamento precisaria ser feito.

Os empecilhos da abordagem determinística justificam a maior dedicação encontrada na literatura aos modelos empíricos, para os quais a previsão do comportamento da propagação do sinal baseia-se em dados coletados, na aplicação de expressões relativamente simples e no uso de teoria estatística [10]. Esse é um caminho aparentemente mais simples, mas que parece estar alinhado com a aleatoriedade de alguns dos fatores que interferem na propagação de ondas eletromagnéticas como a presença/ausência de obstáculos, movimento dos obstáculos, interferência eletromagnética, etc.

Na prática, alguns dos modelos ditos empíricos representam uma mescla de abordagens. Isto porque são adicionadas à modelagem considerações pontuais e determinísticas sobre o efeito de obstáculos (como paredes e pisos) com o intuito de melhorar sua precisão. Então, retorna-se ao problema da abordagem determinística, em que se perde a capacidade de generalização, ou seja, a possibilidade do modelo prever com razoável precisão o comportamento da propagação do sinal em diversos locais com características semelhantes, independentemente da disposição de paredes, corredores, móveis e outros. Esse talvez seja o maior desafio da modelagem: encontrar um mecanismo com boa precisão e alta capacidade de generalização.

## 1.5 Motivação

Na verdade podem ser elencados alguns fatores motivadores ao estudo do comportamento real das redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11. Sem dúvida o fato de ser um assunto atual, e que envolve um sistema ainda em fase de desenvolvimento e crescimento, desperta a curiosidade em compreender melhor os detalhes de seu funcionamento e do seu desempenho.

Um segundo aspecto motivador decorre da existência, na literatura, de um bom número de modelos desenvolvidos para o comportamento da propagação de sinal em redes sem fio operando de acordo com o padrão 802.11. Qual deles de fato apresenta maior aderência ao comportamento real destas redes? Qual deles é mais flexível, ou seja, apresenta bons resultados em diversos locais? Qual deles é mais rápido e simples? Essas são perguntas cujas respostas não são facilmente encontradas na literatura.

Por fim, em nenhum dos modelos vistos na literatura foi identificada uma associação do comportamento das redes sem fio a fatores climáticos, tais como temperatura e umidade do ar, e boa parte dos estudos encontrados foram realizados em locais com condições climáticas muito diferentes das encontradas no Nordeste do Brasil. Reside nesses dois últimos fatos a maior motivação deste trabalho.

## 1.6 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral aprofundar o conhecimento sobre o funcionamento da camada física no padrão IEEE 802.11 na faixa de frequência de 2,4 GHz e a modelagem do macro-comportamento da propagação de sinais em redes sem fio operando de acordo com esse padrão tecnológico. Mais especificamente, busca-se: comparar o desempenho dos principais modelos empíricos existentes para previsão do macro-comportamento da propagação de sinal; identificar as possíveis variações no comportamento real de tais redes em função de fatores climáticos; e, propor, caso seja identificado como relevante, que estes fatores sejam incorporados em um novo modelo.

## 1.7 Metodologia

A avaliação dos principais modelos empíricos existentes para previsão do macro-comportamento da propagação de sinal em redes 802.11 e a análise das variações causadas pelos fatores climáticos temperatura e umidade relativa do ar são feitas com base na coleta de dados reais da atenuação do sinal em redes sem fio *indoor* e *outdoor* operando no modo infra-estrutura em 2,4 GHz. Apesar de não ser o perfil de uso mais comum do padrão, dado o interesse em visualizar os efeitos dos fatores climáticos torna-se relevante estudar seus efeitos em redes *outdoor* pela maior exposição às variações desses parâmetros.

O levantamento dos dados foi feito de acordo com as recomendações encontradas na literatura, principalmente no que diz respeito à definição dos pontos de medição da atenuação do sinal. O diferencial proposto é o de registrar não apenas os valores de atenuação, mas também a temperatura e a umidade relativa do ar observados durante cada medição. De posse dos dados, é possível traçar as curvas de atenuação do sinal em função da distância para o ponto de acesso (AP) e observar: variações nas curvas de atenuação para diferentes valores de temperatura e umidade relativa do ar; e o grau de aderência dos modelos encontrados na literatura às curvas de atenuação obtidas a partir de dados reais.

## 1.8 Organização da dissertação

No segundo capítulo deste trabalho é analisada a especificação de funcionamento da camada física do padrão IEEE 802.11 na faixa de frequência de 2,4 GHz, a fim de obter-se uma visão mais aprofundada acerca da propagação de sinais em redes sem fio operando de acordo com esse padrão. No Capítulo 3 são vistos, em detalhes, alguns dos modelos encontrados na literatura e em artigos científicos para previsão do macro-comportamento da propagação de sinais em redes sem fio *outdoor* e *indoor* baseadas no padrão 802.11. Essa revisão permite que, com o levantamento de dados reais, seja feita uma análise comparativa entre os diversos modelos, para verificar qual deles apresenta um melhor desempenho no tocante à aderência, capacidade de generalização e simplicidade de implementação. O levantamento dos dados, acompanhado da análise comparativa, é apresentado no Capítulo 4.

No quarto capítulo do trabalho pretende-se analisar os dados sob a ótica do efeito das variações climáticas, a fim de buscar um entendimento sobre sua relevância e impacto. De acordo com os resultados observados, um novo modelo é proposto incluindo as variáveis climáticas identificadas como relevantes na propagação de sinais em redes sem fio.

No quinto capítulo são apresentados os resultados do levantamento de dados adicional acerca da atenuação de sinais em ambientes *outdoor* e *indoor* realizado em locais distintos daqueles apresentados no Capítulo 4. O intuito deste esforço extra é o de validar o modelo proposto com dados distintos daqueles que motivaram sua definição.

Finalmente, o sexto capítulo apresenta as conclusões da dissertação, com uma análise bastante detalhada sobre o problema da modelagem da propagação de sinais em redes sem fio operando de acordo com o padrão 802.11 em 2,4 GHz e algumas propostas de trabalhos futuros. Os Apêndices A e B apresentam, respectivamente, as constelações utilizadas no modo de operação ERP-OFDM da extensão 802.11g para definição das seqüências de *bits* a serem transmitidas e definições sobre a função *regress* do Matlab 7.0, que é utilizada para determinação dos parâmetros do modelo proposto neste trabalho.

## 2 A camada física em 2,4 GHz no padrão IEEE 802.11

Este capítulo destina-se a apresentar uma revisão sobre o funcionamento da camada física do padrão IEEE 802.11 na faixa de frequência de 2,4 GHz. Algumas das definições também são válidas para a camada física em 5 GHz, principalmente as que dizem respeito à sua estruturação. Entretanto, não são analisados os detalhes específicos do padrão 802.11 em 5 GHz, parte pelos motivos expostos no capítulo introdutório, parte em virtude da maior implantação de redes sem fio operando em 2,4 GHz no Brasil<sup>1</sup> e da comercialização quase que exclusiva de produtos operando apenas nesta faixa<sup>2</sup>.

Inicialmente é apresentada a estrutura na qual está baseado o funcionamento da camada física no padrão IEEE 802.11. Em seguida é feita uma revisão sobre as técnicas de transmissão utilizadas pelo padrão e suas extensões para que, enfim, sejam apresentadas as especificações de funcionamento da camada física, desde sua primeira versão até a extensão 802.11g. As referências utilizadas são as especificações do IEEE para o padrão 802.11 [14, 17 e 18].

---

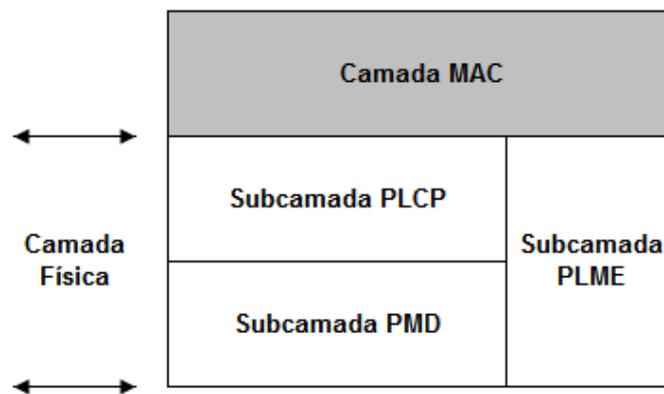
<sup>1</sup> No endereço [www.jiwire.com](http://www.jiwire.com) é possível visualizar uma grande quantidade de *hotspots* (pontos de acesso à redes sem fio tipicamente em locais públicos, restaurantes ou hotéis) existentes em diversas cidades do Brasil. Para cada *hotspot* consta a informação da extensão do padrão 802.11 utilizada, sendo possível constatar que na maioria dos casos as extensões 802.11b e 802.11g são as escolhidas.

<sup>2</sup> Uma breve pesquisa feita em sete das maiores casas de informática em Pernambuco e em quatro grandes lojas virtuais nacionais aponta para a venda, quase que exclusiva, de pontos de acesso operando na faixa de 2,4 GHz.

## 2.1 A estruturação da camada física no padrão IEEE 802.11

Os documentos elaborados pelo IEEE especificando o padrão 802.11 e suas extensões definem as condições para o funcionamento da camada de controle do acesso ao meio ou MAC (*medium access control*) e da camada física. A primeira delas é responsável por gerenciar o acesso ao meio de transmissão compartilhado pelas estações (computadores) conectadas à rede sem fio, o que inclui mecanismos de autenticação, confidencialidade e coordenação do envio/recebimento de pacotes na rede, garantindo a utilização do meio físico de forma segura, ordenada e eficiente [15]. Contudo, é o funcionamento da camada física que interessa a este trabalho.

A camada física no padrão IEEE 802.11 é subdividida em três entidades: a subcamada PLCP (*physical layer convergence procedure*), a subcamada PLME (*physical layer management entity*) e a subcamada PMD (*physical medium dependent*). A representação desse modelo pode ser vista na Figura 2.1.



**Figura 2.1** – A estruturação da camada física no padrão IEEE 802.11.

Cada uma das subcamadas está atrelada às suas respectivas funções. A subcamada PLCP é responsável por uma função de convergência na qual quadros oriundos da camada MAC são adequados para a transmissão na camada física. Essa adequação consiste no acréscimo de um preâmbulo e um cabeçalho em cada quadro recebido da camada MAC, formando uma unidade chamada de PPDU (*PLCP protocol data unit*).

O gerenciamento das ações da camada física é realizado pela subcamada PLME, em conjunto com a camada MAC. Essa interação entre a camada física e a camada MAC é

sempre realizada de acordo com um conjunto de primitivas de serviço a partir das quais são feitas todas as sinalizações a respeito de início e término de transmissão ou recebimento de pacotes, além da informação sobre a disponibilidade do meio físico.

A subcamada PMD representa a função que define os parâmetros e métodos para transmissão e recebimento de dados na camada física. Essa subcamada encontra-se fortemente relacionada com a técnica de transmissão e os esquemas de modulação utilizados em cada modo de operação previsto para o padrão IEEE 802.11 e é nela que residem os aspectos mais importantes ao desenvolvimento deste trabalho.

Os modos de operação do padrão representam, na verdade, cada um dos conjuntos de definições e recomendações para as três subcamadas em questão, sempre relacionadas a uma técnica específica de transmissão. Para facilitar o entendimento de cada um dos modos desenvolvidos pelo IEEE até a extensão 802.11g, a próxima seção aborda as três técnicas de transmissão utilizadas pela camada física em 2,4 GHz para que, na seção 2.3, sejam analisados os modos de operação previstos para o padrão 802.11.

## 2.2 As técnicas de transmissão utilizados no padrão IEEE 802.11

Todas as técnicas utilizadas para transmissão de dados no padrão IEEE 802.11 baseiam-se no mesmo princípio: o espalhamento da energia do sinal em uma certa faixa de frequências, durante sua transmissão, que deve ser maior do que aquela efetivamente necessária a sua transmissão. Essa técnica é referenciada na literatura como espalhamento espectral (*spread spectrum*) e dela derivam alguns benefícios para redes sem fio [9]:

- aumento da tolerância à interferência e ruído;
- redução da probabilidade de interceptação de sinais transmitidos;
- maior habilidade em contornar o problema da propagação por multi-percurso<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Propagação por multi-percurso é a expressão utilizada para descrever o fato de que a intensidade do sinal em um ponto sob efeito de propagação eletromagnética é a resultante das contribuições oriundas de diversos caminhos [9].

Além das vantagens citadas, outro aspecto importante impulsionou o uso das técnicas de espalhamento espectral. Em boa parte dos países as agências ou órgãos reguladores dos serviços de telecomunicações estabeleceram regras para determinadas faixas de frequências do espectro, cujo atendimento foi simplificado com o uso das técnicas de espalhamento, tanto que em alguns casos essa solução tornou-se obrigatória [19]<sup>4</sup>.

Existem maneiras distintas de se realizar o espalhamento espectral de um sinal, e cada uma delas dá origem a uma técnica específica. Até a extensão 802.11g foram definidos modos de operação baseados em três técnicas específicas: espalhamento espectral com salto em frequência (*frequency-hopping spread spectrum*, ou simplesmente FHSS), espalhamento espectral por seqüência direta (*direct sequence spread spectrum*, ou simplesmente DSSS) e espalhamento espectral com multiplexação por divisão ortogonal de frequência (*orthogonal frequency division multiplexing*, ou simplesmente OFDM). Nas próximas seções é apresentada a lógica por trás de cada uma delas.

### 2.2.1 A técnica de transmissão FHSS

A simples tradução do termo FHSS para o português, “espalhamento espectral com salto em frequência”, já fornece uma idéia bastante razoável sobre a forma com que o sinal é transmitido de acordo com esta técnica. Basicamente, o sinal, em vez de ser modulado por uma única frequência, é modulado por uma seqüência pseudo-aleatória<sup>5</sup> de frequências geradas pelo transmissor. Cada uma dessas frequências é utilizada por certo período de tempo, normalmente iguais e pré-definidos (*time slots*), após o qual ocorre um “salto” para o próximo valor da seqüência [9]. Assim, a energia do sinal é espalhada nos canais disponíveis ao longo da transmissão. Estas idéias são representadas de forma simplificada nas Figuras 2.2 e 2.3 [7].

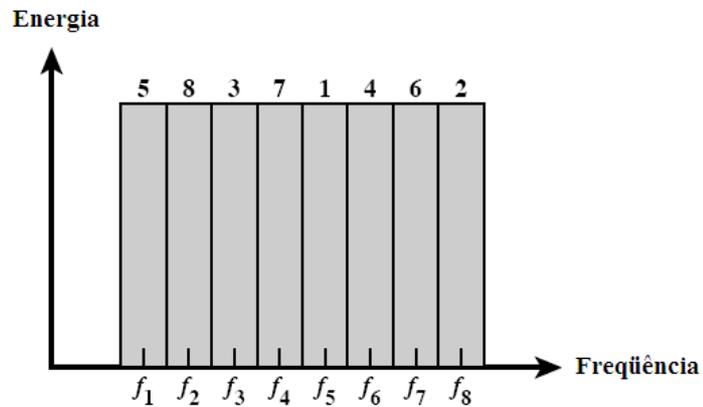
A Figura 2.2 ilustra a energia associada ao sinal transmitido distribuída pelos canais utilizados, que correspondem às frequências  $f_1$  a  $f_8$ . A numeração acima de cada barra está relacionada ao intervalo de tempo (*time slot*) em que cada canal foi utilizado, ou seja, a

---

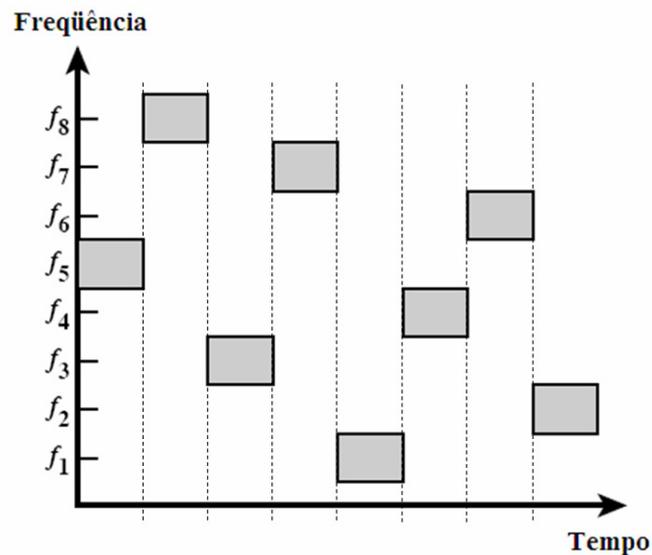
<sup>4</sup> No caso do Brasil, o uso das técnicas de espalhamento espectral é uma forma de respeitar as regras definidas na Resolução 365 da ANATEL sobre equipamentos de radiação restrita [26].

<sup>5</sup> Uma seqüência pseudo-aleatória pode ser vista como uma série de valores gerados de forma determinística, mas com a capacidade de passar por testes de aleatoriedade e que, portanto, são utilizadas como se fossem de fato aleatórias sem prejuízo ao sistema que aplica tal recurso [37].

freqüência  $f_1$  foi utilizada na 5ª janela de tempo, a freqüência  $f_2$  na 8ª janela e assim sucessivamente. Esta utilização dos canais no tempo, ou seqüência de saltos, pode ser visualizada na Figura 2.3.



**Figura 2.2** – Espalhamento da energia de um sinal transmitido via FHSS [7].



**Figura 2.3** – Utilização dos canais no tempo em uma transmissão via FHSS [7].

A recuperação do sinal transmitido está baseada na capacidade do receptor em gerar a mesma seqüência de freqüências utilizada para a transmissão do sinal e na sincronização desse com o transmissor, de modo que não ocorram descompassos das janelas de tempo [1].

A interferência entre usuários do sistema operando de acordo com a técnica FHSS é inibida com o uso de seqüências de saltos distintas para cada usuário, evitando que eles ocupem um mesmo canal em alguma janela de tempo. As seqüências pseudo-aleatórias que garantem essa característica ao sistema são chamadas de ortogonais e definidas, no padrão IEEE 802.11, como padrões de salto (*hopping pattern*).

### 2.2.2 A técnica de transmissão DSSS

O espalhamento espectral por meio da técnica de transmissão DSSS é obtido a partir da utilização de uma espécie de código matemático de espalhamento que, por sua vez, faz uso de um elemento que poderia ser chamado de espalhador (*spreader*). A operação matemática associada ao espalhador deve ser de tal forma que possibilite estabelecer uma operação inversa no receptor capaz de recuperar o sinal original [19]. Essas características são ilustradas de forma simplificada na Figura 2.4.

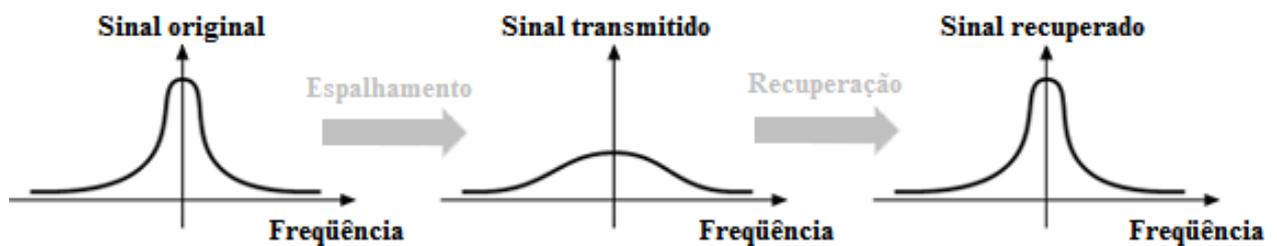


Figura 2.4 – Transmissão de sinal por meio da técnica DSSS [19].

O espalhamento do sinal em um sistema de transmissão digital utilizando a técnica DSSS pode ser conseguido a partir de uma combinação lógica da seqüência de *bits* associada ao sinal de entrada do sistema com uma seqüência de *bits*<sup>6</sup> pseudo-aleatória, tipicamente chamada de seqüência de espalhamento. Para que haja o espalhamento espectral, essa combinação lógica deve provocar o aumento do número de *bits* do sinal a ser transmitido, ou seja, em uma determinada janela de tempo o total de *bits* compreendido entre os limites da janela deve ser aumentado, acarretando a necessidade de uma maior largura de banda para sua transmissão.

---

<sup>6</sup> É comum na literatura referir-se aos bits do pseudo-ruído através do termo *chips* [8] e, como está também é a terminologia utilizada no padrão IEEE 802.11, ela será utilizada desse ponto em diante.

Uma combinação lógica que se enquadra de forma bastante simples no método de transmissão DSSS é o “ou-exclusivo”, abreviado corriqueiramente pelo termo XOR (*exclusive or*) e expresso matematicamente pelo símbolo  $\oplus$  [7]. As regras de aplicação deste operador são expressas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** – Operador lógico XOR.

XOR	0	1
0	0	1
1	1	0

A vantagem deste operador lógico é que aplicando-o entre duas seqüências quaisquer,  $A$  e  $B$ , e em seguida tornando a aplicá-lo entre o resultado da primeira operação e a seqüência  $B$ , obtém-se como resultado a seqüência  $A$ . Em outras palavras,

$$A \oplus B = C, \quad (2.1)$$

$$C \oplus B = A. \quad (2.2)$$

Essa característica do operador XOR é bastante interessante para a lógica de transmissão DSSS, pois sua utilização no espalhamento do sinal, por meio de uma seqüência pré-definida, permite que o receptor apenas repita a operação com o sinal recebido e a mesma seqüência utilizada no espalhamento para então recuperar o que foi transmitido. Um exemplo prático destas afirmações encontra-se na Figura 2.5 [7].

O êxito do processo ilustrado na Figura 2.5 como exemplo de uma transmissão via DSSS encontra-se nos seguintes pontos:

- o valor de  $T_c$ , que representa o período associado ao pseudo-ruído, deve ser menor que  $T$ , período associado ao sinal de entrada do sistema, e ser uma fração inteira deste último [7];
- a seqüência de espalhamento utilizada no transmissor deve ser de conhecimento do receptor, pois é com ela que o sinal original pode ser recuperado.

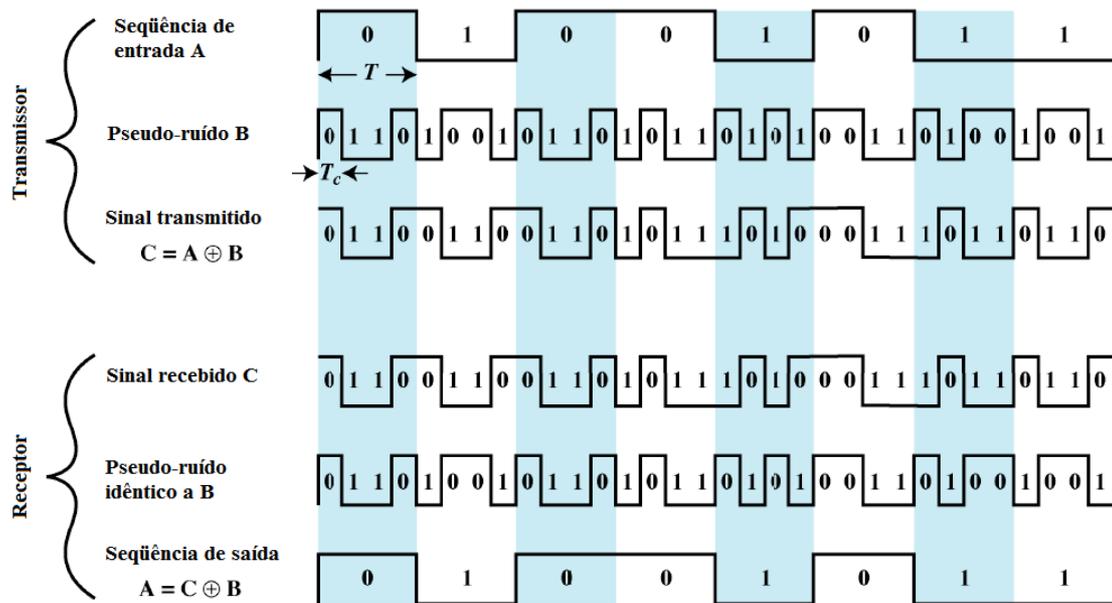


Figura 2.5 – Transmissão DSSS de uma sequência com uso do operador XOR [7].

### 2.2.3 A técnica de transmissão OFDM

O desenvolvimento da técnica OFDM data da década de 1950, mas sua aplicação em sistemas de comunicação sem fio apenas ganhou relevância com os avanços na área de processamento digital de sinais [38]. Classificada na literatura como uma técnica multi-portadora, em virtude de utilizar diversos canais na modulação do sinal a ser transmitido [39], a técnica OFDM não deixa de ser uma forma de espalhamento espectral do sinal [19].

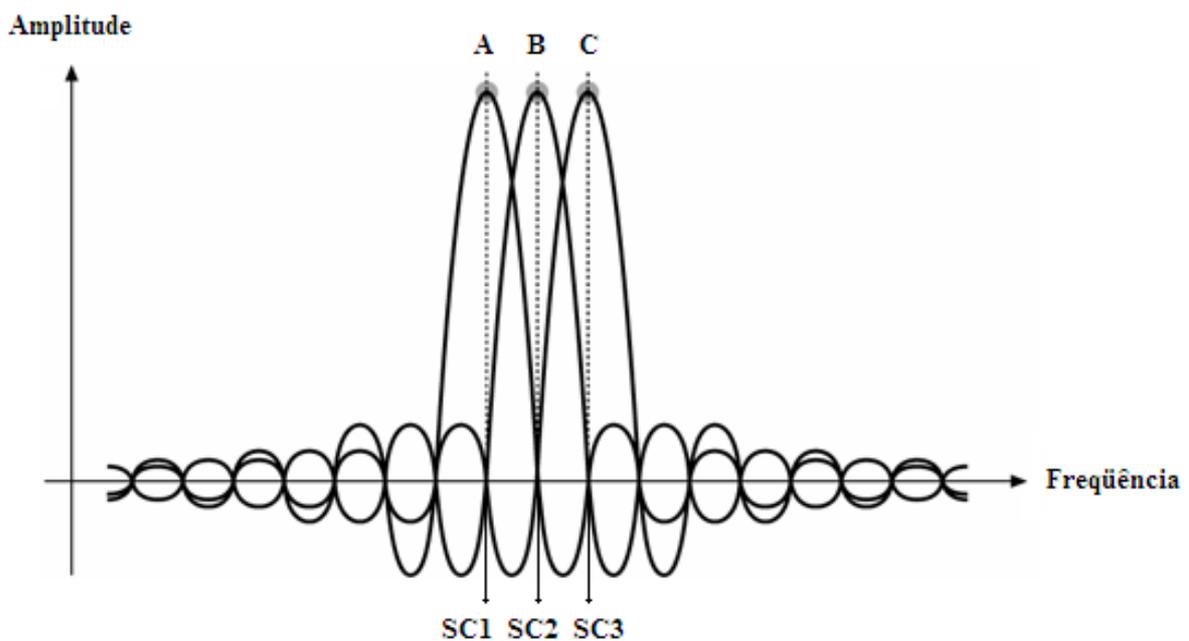
A idéia da técnica OFDM é a transmissão do sinal por diversas portadoras regularmente espaçadas dentro de um canal, ou seja, as portadoras se comportam como se fossem subcanais por meio dos quais o sinal é transmitido de forma multiplexada. Tornam-se, portanto, relevantes ao uso da técnica o espaçamento entre os subcanais e os mecanismos de modulação utilizados para transmissão.

A distância entre as portadoras em um sistema utilizando OFDM deve ser tal que, no domínio do tempo, os sinais transmitidos em cada subcanal sejam ortogonais entre si<sup>7</sup>, mesmo que haja sobreposição deles no domínio da frequência [39]. Na verdade, o sistema é projetado de modo que a sobreposição entre os espectros dos sinais transmitidos ocorra

<sup>7</sup> Um conjunto de sinais poderá ser chamado de ortogonal caso o produto interno entre dois sinais distintos, pertencentes ao conjunto, for nulo [40].

de forma controlada, possibilitando ao receptor realizar a leitura adequada daquilo que lhe foi enviado por intermédio da combinação das parcelas do sinal recebidas em cada subcanal.

Um sistema operando com OFDM recebe um bloco de *bits* para transmitir, gerados a partir de um esquema de modulação auxiliar, e mapeia o bloco nos subcanais disponíveis com uso de IFFT (*inverse fast Fourier transform*). Ao resultado da IFFT é adicionado um conjunto de *bits* com a função de proteger a transmissão daquele bloco de erros decorrentes da interferência entre blocos adjacentes, um mecanismo chamado de “período de guarda” [39]. A seqüência discreta obtida é então transformada em um sinal analógico e transmitido no canal. A Figura 2.6 exemplifica como se apresenta, no domínio freqüencial, um sinal transmitido via OFDM em três subcanais.



**Figura 2.6** – Exemplo de sinal transmitido via OFDM [19].

Cada linha contínua na Figura 2.6 representa a parcela do sinal transmitida nos subcanais SC1, SC2 e SC3. O sistema deve ser projetado de tal forma que, na freqüência associada a cada subcanal, a amplitude registrada dependa apenas da amplitude do seu respectivo sinal. Ou seja, na freqüência equivalente a SC1, por exemplo, a intensidade do sinal relativo aos subcanais SC2 e SC3 deve ser nula, garantindo que a amplitude resultante nesse ponto depende apenas da parcela do sinal transmitida em SC1 [19].

Importante salientar que está justamente na amplitude do sinal, nas frequências equivalentes aos subcanais, a informação transmitida. Tornando ao exemplo ilustrativo, os pontos A, B e C carregam a informação fundamental acerca do sinal transmitido, cabendo ao receptor identificar a amplitude do sinal em cada uma das frequências utilizadas para, com a FFT (*fast Fourier transform*), recuperar a informação transmitida<sup>8</sup> [39].

Os benefícios do uso da técnica OFDM são bastante destacados na literatura. Em especial, há o fato da otimização do uso do espectro e a possibilidade de alcance de taxas de transmissão bastante significativas [41].

## 2.3 Os modos de operação em 2,4 GHz da camada física do padrão IEEE 802.11

Nesta seção são analisadas as especificações da subcamada PMD dos modos de operação definidos para o padrão IEEE 802.11 na faixa de 2,4 GHz, desde sua primeira versão, divulgada em 1997, até as extensões 802.11b e 802.11g. A única omissão fica por conta do modo de operação na faixa de infravermelho, definido na versão inicial do padrão, pelo fato dele não ter sido implementado comercialmente por conta de algumas limitações intrínsecas às transmissões nessa faixa de frequência (em especial, a enorme sensibilidade à existência de obstáculos) [19].

### 2.3.1 O modo de operação FHSS

Definido na primeira versão do padrão 802.11 [14], esse modo de operação está apoiado no uso da técnica de espalhamento espectral por salto em frequência (FHSS) com taxas de transmissão na camada física de 1 ou 2 Mbits/s. A especificação do modo no documento [14] segue a estrutura citada na Seção 2.1, definindo as condições de operação da camada física em suas três subcamadas: PLCP, PLME e PMD.

A subcamada PLCP mapeia as unidades de dados oriundas da camada MAC, ou MPDU (*MAC protocol data unit*), em um formato adequado para a transmissão na camada física. Basicamente, é feito um encapsulamento da MPDU com a adição de um preâmbulo e um cabeçalho.

---

<sup>8</sup> Antes de aplicar a FFT, o receptor deve amostrar o sinal analógico recebido e identificar e remover os períodos de guarda inseridos pelo transmissor.

A subcamada PLME deve operar de acordo com primitivas de serviço trocadas com a camada MAC e as subcamadas PLCP e PMD, a fim de atender as necessidades da primeira e coordenar as ações das duas últimas. As principais atribuições desta entidade no modo FSSS são: garantir o sincronismo de tempo entre as estações envolvidas em uma transmissão para que os saltos de frequência ocorram simultaneamente; coordenar os saltos de frequência; e ativar/desativar a subcamada PMD para/após realizar uma transmissão.

O funcionamento da subcamada PMD depende de definições técnicas específicas, como a faixa de frequência de operação, o número de canais disponíveis, a frequência central dos canais, a seqüência de saltos a ser respeitada pelas estações e a modulação a ser aplicada ao sinal. Essas definições são feitas no padrão IEEE 802.11 atreladas a cinco localidades geográficas: América do Norte, Europa (com exceção de Espanha e França), Japão, Espanha e França. Apenas por uma questão de objetividade e similaridade são apresentadas somente as definições para América do Norte e Europa<sup>9</sup>.

Na definição da faixa de operação do padrão são indicados os limites de frequência inferior e superior, além da faixa regulada para tal fim pelas entidades governamentais que controlam o uso do espectro. Para ambos os continentes a faixa permitida para uso do padrão IEEE 802.11 é de 2,400 GHz até 2,4835 GHz, sendo os limites inferior e superior estabelecidos no padrão e equivalentes a 2,402 GHz e 2,480 GHz. Dentro dessa faixa são alocados 79 canais, enumerados de 2 a 80, cujas frequências centrais correspondem aos valores compreendidos entre 2,402 GHz e 2,480 GHz com incremento de 1 MHz.

A seqüência de saltos de frequência é definida por uma função  $f_x(i)$ . O valor dessa função indica o canal a ser utilizado na iteração  $i$ , parametrizado pelo número do padrão de saltos  $x$  (*hopping pattern number*). Para a América do Norte e Europa são definidos três conjuntos distintos contendo os números a serem utilizados como padrão de saltos:

- Conjunto 1: {0, 3, 6, 9, ... , 72, 75}
- Conjunto 2: {1, 4, 7, 10, ... , 73, 76}
- Conjunto 3: {2, 5, 8, 11, ... , 74, 77}

---

<sup>9</sup> Para simplificar e manter o alinhamento com a especificação do padrão original IEEE 802.11, deste ponto em diante, nesta seção, sempre que o continente europeu for referenciado não estão inclusos Espanha e França.

Assim que se conecta à rede, a estação recebe um valor  $x$  pertencente a um dos três conjuntos e sincronizaria o valor do parâmetro  $i$ . Com eles, ela descobre o canal a ser utilizado com a fórmula

$$f_x(i) = [b(i) + x] \text{mod}(79) + 2. \quad (2.3)$$

O valor de  $b(i)$  pode ser obtido de acordo com a Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** – Valores da função  $b(i)$  para definição de seqüência de saltos no modo FHSS.

$i$	$b(i)$														
1	0	11	76	21	18	31	34	41	14	51	20	61	48	71	55
2	23	12	29	22	11	32	66	42	57	52	73	62	15	72	35
3	62	13	59	23	36	33	7	43	41	53	64	63	5	73	53
4	8	14	22	24	71	34	68	44	74	54	39	64	17	74	24
5	43	15	52	25	54	35	75	45	32	55	13	65	6	75	44
6	16	16	63	26	69	36	4	46	70	56	33	66	67	76	51
7	71	17	26	27	21	37	60	47	9	57	65	67	49	77	38
8	47	18	77	28	3	38	27	48	58	58	50	68	40	78	30
9	19	19	31	29	37	39	12	49	78	59	56	69	1	79	46
10	61	20	2	30	10	40	25	50	45	60	42	70	28	80	-

Como exemplo, pode-se determinar o início da seqüência de saltos para  $x = 10$ :

**Tabela 2.3** – Seqüência de saltos para  $x = 10$  no modo FHSS.

$x$	$i$	$b(i)$	$f_x(i)$
10	1	0	$= [0 + 10] \text{mod}(79) + 2 = 10 + 2 = 12$
10	2	23	$= [23 + 10] \text{mod}(79) + 2 = 35$
10	3	62	$= [62 + 10] \text{mod}(79) + 2 = 74$
10	4	8	$= [8 + 10] \text{mod}(79) + 2 = 20$
10	5	43	$= [43 + 10] \text{mod}(79) + 2 = 55$
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Ou seja, a seqüência de saltos definida para  $x = 10$  inicia com o uso do canal 12 e, em seguida, são utilizados os canais 35, 74, 20, 35, etc. No Anexo B do padrão IEEE 802.11 [14] podem ser vistas todas as seqüências de saltos para cada um dos 78 padrões de salto

definidos pelo parâmetro  $x$  dos conjuntos 1, 2 e 3. É interessante destacar ainda que: a distância mínima de um salto é equivalente a seis canais (6 MHz); os saltos ocorrem em um intervalo de 224  $\mu$ s; e é recomendado o uso de cada canal por no máximo 19,5 ms.

Para a modulação do sinal o padrão define a possibilidade de uso de dois esquemas pela subcamada PMD:

- 2GFSK (*2-level gaussian frequency shift keying*), em que a modulação dos símbolos 0 e 1 é feita com um desvio na frequência central do canal de  $-f_d$  ou  $+f_d$ , respectivamente. Esta é a técnica utilizada nas transmissões com taxa de 1 Mbit/s;
- 4GFSK (*4-level gaussian frequency shift keying*), para a qual a modulação dos símbolos é feita aos pares por desvios na frequência central de  $\pm f_{d1}$  ou  $\pm f_{d2}$ , em que o segundo valor é igual ao triplo do primeiro. Esta é a técnica utilizada na transmissão de uma PSDU à taxa de 2 Mbits/s.

A Tabela 2.4 ilustra a modulação dos símbolos para as duas técnicas descritas. Como podem existir variações bruscas na frequência do sinal modulado são utilizados filtros gaussianos (que motivam o nome dado à técnica) para suavizar as transições [22].

**Tabela 2.4** – Mapeamento de símbolos para modulação 2GFSK e 4GFSK no modo FHSS.

<i>2GFSK, 1 Mbit/s</i>	
Símbolo	Desvio na frequência central do canal
1	$+ f_d$
0	$- f_d$
<i>4GFSK, 2 Mbit/s</i>	
Símbolo	Desvio na frequência central do canal
10	$+ 3f_d$
11	$+ f_d$
01	$- f_d$
00	$- 3f_d$

Observação: para a modulação 2GFSK o padrão orienta que o valor de  $f_d$  não seja inferior a 110 kHz, enquanto no 4GFSK o valor não deve ser inferior a 67,5 kHz.

O padrão recomenda ainda que a potência mínima transmitida deve ser de 10 mW EIRP (*effective isotropically radiated power*)<sup>10</sup> e que é necessário um mecanismo de controle a fim de garantir que a potência transmitida não ultrapassasse o limite de 100 mW EIRP. Mas, o padrão salienta que esses valores ficam sujeitos às orientações dos órgãos reguladores de cada país onde o sistema fosse implantado.

O modo de operação FHSS foi bastante utilizado nas primeiras WLAN's, mas caiu em desuso por conta de algumas deficiências. A taxa de transmissão possível era baixa comparada às pretensões do mercado e às taxas obteníveis em meios cabeados. Tem-se ainda o fato de que os usuários desse modo de operação transitam por toda a faixa de frequências disponível, implicando em perda sensível de desempenho caso ocorra interferência em alguns canais. Por fim, não foi definido um mecanismo para evitar que pontos de acesso vizinhos implementassem controles conjuntos dos padrões e seqüências de salto utilizados, o que aumenta as chances de interferência entre usuários [22].

### 2.3.2 O modo de operação DSSS

Também definido na primeira versão do padrão IEEE 802.11 [14], esse modo baseia o funcionamento da camada física no uso da técnica de espalhamento espectral por seqüência direta (DSSS). Assim como no modo FHSS, o documento especifica as condições de funcionamento norteado pela estrutura formada pelas subcamadas PLCP, PLME e PMD. As duas primeiras mantêm suas funções básicas, recebendo apenas pequenas modificações em função da técnica de transmissão utilizada na subcamada PMD.

As especificações da subcamada PMD para o modo de operação DSSS têm as maiores diferenças em relação ao modo FHSS. Assim como no primeiro modo abordado, o padrão especifica condições técnicas de acordo com algumas regiões geográficas e, mais uma vez, são apresentadas apenas as definições para a América do Norte e Europa (exceto Espanha e França).

O padrão indica que, nos continentes citados, o sistema deve utilizar a faixa de frequências entre 2,4 e 2,4835 GHz, conforme regulado pelos órgãos que controlam o uso do espectro de frequências nos dois continentes. O número de canais é estabelecido de

---

<sup>10</sup> O termo EIRP representa a máxima potência transmitida por uma antena na direção em que ela apresenta maior ganho (que, por sua vez, é um parâmetro relacionado às características físicas da antena e à frequência de operação a que ela é submetida) [8].

acordo com a Tabela 2.5, na qual o símbolo “X” indica o uso do canal naquela região geográfica, enquanto o traço simples “-” indica a não utilização do canal.

Como pode ser visto, está previsto para a América do Norte o uso de 11 canais no modo de operação DSSS, enquanto que na Europa são utilizados 13 canais. O canal 14, fora da faixa de frequências permitida nestes dois continentes, é definido para uso apenas no Japão. Todos os canais especificados possuem largura de banda de 5 MHz, ou seja, equivalente a 5 vezes a largura dos canais do modo FHSS.

O padrão destaca também que pontos de acesso vizinhos, ou com sobreposição de suas áreas de cobertura, devem operar em canais distintos com frequências centrais distantes em, no mínimo, 30 MHz, a fim de evitar interferência entre usuários das redes associadas aos pontos de acessos.

**Tabela 2.5** – Definição de canais de operação para o modo DSSS na América do Norte e Europa.

DADOS DOS CANAIS		REGIÃO GEOGRÁFICA	
Identificação	Frequência central	América do Norte	Europa (exceto Espanha e França)
1	2,412 GHz	X	X
2	2,417 GHz	X	X
3	2,422 GHz	X	X
4	2,427 GHz	X	X
5	2,432 GHz	X	X
6	2,437 GHz	X	X
7	2,442 GHz	X	X
8	2,447 GHz	X	X
9	2,452 GHz	X	X
10	2,457 GHz	X	X
11	2,462 GHz	X	X
12	2,467 GHz	-	X
13	2,472 GHz	-	X
14	2,484 GHz	-	-

A utilização do modo de transmissão DSSS no padrão 802.11 está apoiada no uso de uma seqüência de espalhamento específica, formada pelos *chips* 10110111000, conhecida como seqüência de Barker e que deve ser gerada a uma taxa de 11 Mchips/s. Com ela, um

único *bit* é mapeado em uma seqüência com 11 *bits*. O *bit* 0 é mapeado em uma seqüência igual à de Barker (resultado do ou-exclusivo entre o *bit* 0 e cada um dos 11 *chips* da seqüência de Barker), caso contrário é mapeado na seqüência 01001000111 (resultado do ou-exclusivo entre o *bit* 1 e os 11 *chips* da seqüência de Barker).

A seqüência de Barker possui alguns aspectos interessantes ao processo de transmissão, dentre os quais podem ser destacados:

- número de 0's (5) bem próximo ao número de 1's (6), garantindo que na transmissão de diversos quadros, embaralhados pelo *PLCP/DSSS PHY data scrambler and descrambler*, os *bits* 0 e 1 são aproximadamente equiprováveis;
- em função dos dois padrões possíveis de serem obtidos com a seqüência de Barker (10110111000 ou 01001000111) o receptor tem condição de inferir com alta probabilidade de acerto qual o *bit* efetivamente transmitido [19].

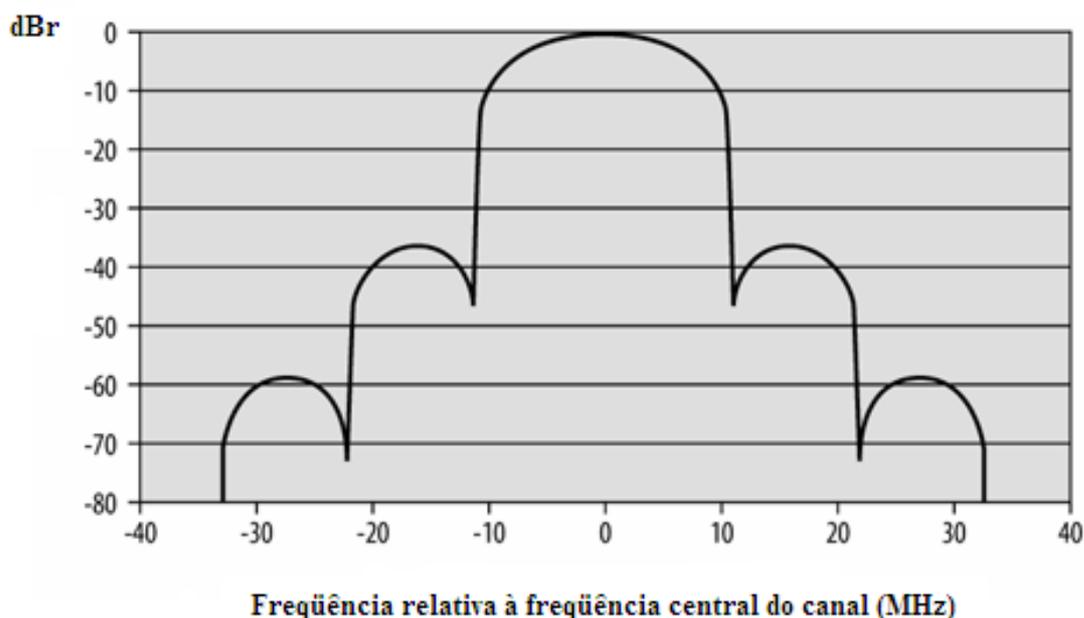
Para o modo DSSS são definidas as taxas de transmissão de 1 Mbit/s e 2 Mbits/s, decorrentes da existência de 1 ou 2 *bits* de informação a cada conjunto de 11 bits transmitidos a taxa de 11 Mbits/s. Para a taxa de 1 Mbit/s é utilizado o esquema DBPSK (*differential binary phase shift keying*), enquanto que para a taxa de 2 Mbits/s o esquema é o DQPSK (*differential quadrature phase shift keying*). Ambas utilizam, portanto, um esquema de modulação com mudanças diferenciais na fase do sinal transmitido [42], respeitando as regras de mapeamento exibidas na Tabela 2.6.

**Tabela 2.6** – Mapeamento de símbolos para modulação DBPSK e DQPSK no modo DSSS.

<i>DBPSK, 1 Mbit/s</i>	
<i>Bit</i>	Mudança de fase
0	0
1	$\pi$
<i>DQPSK, 2 Mbit/s</i>	
Par de <i>bits</i>	Mudança de fase
00	0
01	$\pi/2$
11	$\pi$
10	$3\pi/2$

O nível de potência transmitida também é alvo de recomendações neste modo de operação da camada física. Tal potência não deve ser inferior a 1 mW, e os valores máximos recomendados foram de 1.000 mW para os Estados Unidos e 100 mW (EIRP) para a Europa, atendendo recomendações da FCC (*Federal Communications Commission*) e do ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), respectivamente. Mas, curiosamente, é especificada a necessidade de, assim como no modo FHSS, estabelecer um mecanismo de controle da potência transmitida para garantir que o limite de 100 mW não fosse ultrapassado.

A última recomendação aqui abordada diz respeito ao controle do espalhamento da energia do sinal na transmissão DSSS. O padrão estabelece uma máscara com restrições para o espalhamento da energia do sinal. Tal recomendação deve-se ao fato de que a energia do sinal seria espalhada em torno da frequência central do canal seguindo um padrão similar ao da Figura 2.7 [19] (a unidade dBr no eixo vertical representa a magnitude da energia do sinal relativa ao pico registrado na frequência central do canal).



**Figura 2.7** – Espalhamento da energia em transmissão no modo DSSS [19].

Como pode ser observado na Figura 2.7, o espalhamento da energia é determinado pela frequência de geração da sequência de Barker (igual a 11 MHz, de modo que seus início e fim coincidam com aqueles do *bit* entregue pela camada MAC a uma frequência de

1 MHz). Assim, a energia é espalhada em lóbulos com largura de 22 MHz<sup>11</sup> e limites dados por  $f_c \pm 11n$  (em MHz), em que  $f_c$  representa a frequência central do canal e  $n$  um inteiro maior do que 1.

A máscara definida no padrão recomenda que a magnitude do primeiro par de lóbulos laterais (confinado entre  $f_c \pm 11$  MHz e  $f_c \pm 22$  MHz) esteja abaixo de -30 dBr. Para os demais lóbulos, esta magnitude deve ser inferior a -50 dBr. As recomendações visam minimizar a interferência entre canais adjacentes operando no modo DSSS [19].

Em virtude da largura de banda disponível na América do Norte e Europa (exceto Espanha e França), de 83,5 MHz, apenas três canais ocupando uma banda de 22 MHz cada, podem ser utilizados simultaneamente sem que haja sobreposição do espectro ou, equivalentemente, interferência entre os canais. Essa configuração terminou se consagrando na faixa de 2,4 GHz, como pode ser visto na análise dos modos de operação das extensões 802.11b e 802.11g.

Dois fatores fizeram com que o modo de operação DSSS se tornasse o preferido dentre os especificados originalmente no padrão 802.11: sua maior proteção contra o efeito de ruídos e interferências, decorrente do uso da técnica de transmissão DSSS, e o potencial percebido para o alcance de maiores taxas de transmissão [19]. Essa última característica fica evidente durante a próxima seção.

### 2.3.3 O modo de operação HR/DSSS (802.11b)

Em setembro de 1999 o IEEE divulgou a extensão 802.11b do padrão trazendo uma nova especificação para a camada física em 2,4 GHz [17]. Esse novo modo de operação, batizado como HR/DSSS, é uma evolução do modo DSSS especificado na primeira versão do padrão. Seu principal objetivo é o aumento da taxa de transmissão na camada física, limitada até aquela versão em 2 Mbits/s.

Da mesma maneira que os modos anteriormente definidos pelo IEEE, a camada física no modo HR/DSSS também está subdividida nas subcamadas PLCP, PLME e PMD, sem alterações em suas funções dentro do modelo. Algumas diferenças sutis em relação ao modo DSSS são especificadas para as duas primeiras, enquanto as alterações mais substanciais ocorrem na subcamada PMD.

---

<sup>11</sup> Não fosse o espalhamento realizado pela sequência de Barker, a energia do sinal estaria contida em lóbulos com largura de apenas 2 MHz.

Começando pela subcamada PLCP, a primeira mudança observada em relação às especificações anteriores é a possibilidade de operação com dois tipos distintos de quadros para transmissão. Um deles, obrigatório, deve ser compatível com o quadro elaborado no modo DSSS, garantindo a interoperabilidade entre os modos. O outro, opcional, permite a redução das dimensões do preâmbulo do quadro de modo a melhorar o desempenho da camada física. Mas, nesse caso, não há compatibilidade com o modo DSSS.

Os procedimentos para transmissão dos quadros na camada física, gerenciados pela subcamada PLME, estão baseados nas mesmas primitivas de serviço definidas para o modo DSSS, com pequenas adaptações em função dos tipos distintos de quadro gerados pela subcamada PLCP, das taxas de transmissão e esquemas de modulação previstos na extensão.

O modo HR/DSSS manteve, em sua especificação da subcamada PMD, a previsão de uso da mesma faixa de frequências do modo DSSS, inclusive com os mesmos canais. Assim, no caso dos continentes da Europa (exceto Espanha e França) e América do Norte, a Tabela 2.5, apresentada na Seção 2.3.2, também é válida para o modo HR/DSSS.

Para o caso de transmissões nas taxas de 1 Mbit/s ou 2 Mbits/s, o modo HR/DSSS deve operar nos mesmos moldes do modo DSSS. É utilizada a mesma seqüência para obter-se o espalhamento espectral do sinal transmitido, ou seja, a seqüência de Barker, formada pelos *chips* 10110111000, e são utilizados os esquemas de modulação DBPSK e DQPSK para as taxas de 1 e 2 Mbits/s, respectivamente. O mapeamento dos *bits* a serem transmitidos, por meio de mudanças diferenciais na fase do sinal, segue o mesmo padrão do modo DSSS (informação contida na Tabela 2.6). Em outras palavras, a extensão 802.11b prevê uma configuração básica totalmente compatível com o modo DSSS.

A novidade no modo de operação HR/DSSS é a especificação do esquema de modulação CCK (*complementary code keying*) para a subcamada PMD. Esse esquema não utiliza uma seqüência de espalhamento fixa, mas sim uma seqüência complexa de oito *chips* obtidos do conjunto

$$C = \{e^{j(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3+\varphi_4)}, e^{j(\varphi_1+\varphi_3+\varphi_4)}, e^{j(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_4)}, -e^{j(\varphi_1+\varphi_4)}, e^{j(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3)}, e^{j(\varphi_1+\varphi_3)}, -e^{j(\varphi_1+\varphi_2)}, e^{j\varphi_1}\}. \quad (2.4)$$

Os parâmetros  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  e  $\varphi_4$  são determinados pelos *bits* da seqüência a ser transmitida, de acordo com lógicas distintas para as duas taxas previstas. Para a taxa de 5,5 Mbits/s, um conjunto de quatro *bits* determina os quatro parâmetros da seguinte forma:

- o primeiro par de *bits* ( $d_0d_1$ ) determina o valor de  $\varphi_1$  via DQPSK conforme indicado na Tabela 2.7, na qual se pode observar que o valor do parâmetro deve variar também de acordo com a paridade do símbolo que está sendo transmitido (definida de forma seqüencial em cada PPDU elaborada pela subcamada PLCP);

**Tabela 2.7** – Definição do parâmetro  $\varphi_1$  no esquema de modulação CCK.

$d_0$ e $d_1$	$\varphi_1$ - p/ símbolos pares	$\varphi_1$ - p/ símbolos ímpares
00	0	$\pi$
01	$\pi/2$	$3\pi/2$
11	$\pi$	0
10	$3\pi/2$	$\pi/2$

- o segundo par ( $d_2d_3$ ) define o conteúdo dos parâmetros  $\varphi_2$  e  $\varphi_4$ , pelas equações:

$$\varphi_2 = (d_2 \cdot \pi) + \frac{\pi}{2}, \quad (2.5)$$

$$\varphi_4 = d_3 \cdot \pi. \quad (2.6)$$

- por fim, o parâmetro  $\varphi_3$  é igual a 0.

No caso da taxa de 11 Mbits/s, os quatro parâmetros são definidos a partir de um conjunto de oito *bits*, obedecendo às regras:

- o primeiro par de *bits* ( $d_0d_1$ ) determina o valor de  $\varphi_1$  via DQPSK, da mesma maneira indicada na Tabela 2.7;
- o segundo, o terceiro e o quarto pares de *bits* ( $d_2d_3$ ,  $d_4d_5$  e  $d_6d_7$ ) definem, respectivamente, os parâmetros  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  e  $\varphi_4$  via QPSK, como indica a Tabela 2.8<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> Vale destacar a diferença entre DQPSK e QPSK. No primeiro, o valor obtido nas tabelas é utilizado para alterar a fase registrada no último símbolo transmitido (daí a denominação diferencial). No QPSK, o valor obtido na tabela deve ser utilizado diretamente.

**Tabela 2.8** – Definição dos parâmetros  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  e  $\varphi_4$  no esquema CCK à taxa de 11 Mbits/s.

$d_i d_{i+1}$ ( $i = 2, 4$ ou $6$ )	$\varphi_2$ (se $i = 2$ ), $\varphi_3$ (se $i = 4$ ) ou $\varphi_4$ (se $i = 6$ )
00	0
01	$\pi/2$
10	$\pi$
11	$3\pi/2$

De posse dos valores dos quatro parâmetros, os oito *chips* da seqüência de espalhamento podem então ser calculados por meio de 2.4. Eles são então transmitidos, um a um, após serem modulados também via DQPSK<sup>13</sup>.

Apesar da redução do número de *chips* da seqüência de espalhamento em relação ao modo DSSS (de 11 para 8), a taxa com que ela é gerada permanece igual a 11 Mchips/s. Com os 8 *chips* transportando 4 *bits* de informação, tem-se a taxa de 5,5 Mbits/s. Quando esta relação é 1:1, ou seja, 8 *bits* de informação em 8 *chips*, a taxa é de 11 Mbits/s.

Outra consequência da manutenção da taxa de geração da seqüência de espalhamento em 11 Mchips/s é que o efeito espectral provocado no sinal transmitido é o mesmo daquele previsto no modo DSSS. O sinal conduzido até a subcamada PMD à frequência de 1 MHz é espalhado em um canal com largura de 22 MHz (apenas o lóbulo central). Para reduzir a interferência entre canais distintos, fruto do efeito dos lóbulos laterais, são definidos limites para o espalhamento do sinal iguais àqueles do modo DSSS: intensidade do sinal inferior a -30 dBr para o primeiro par de lóbulos laterais e inferior a -50 dBr para os demais lóbulos (sempre relativos à intensidade do lóbulo central).

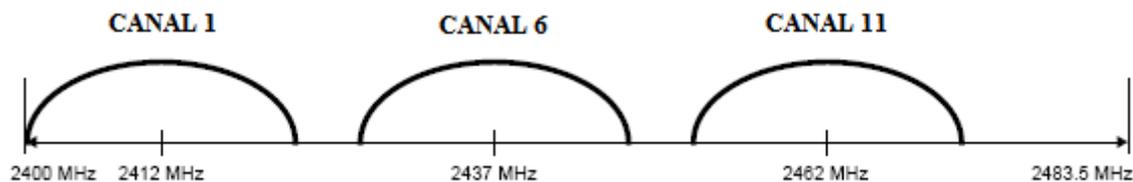
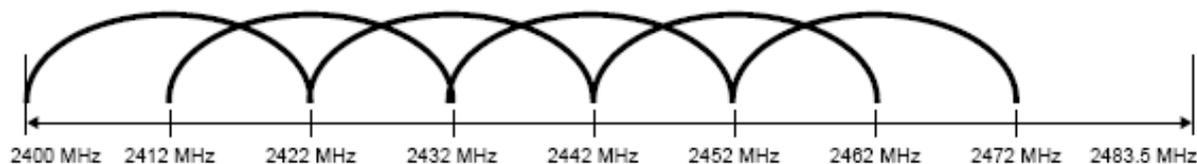
Em virtude do padrão de espalhamento provocado pela subcamada PMD, a extensão 802.11b define conjuntos de canais operacionais, com e sem sobreposição de espectro, para a América do Norte e a Europa (exceto Espanha e França). As definições para o primeiro continente se encontram na Tabela 2.9 e ilustradas nas Figuras 2.8 e 2.9 [17]. A Tabela 2.10 e as Figuras 2.10 e 2.11 exibem as definições para a segunda região<sup>14</sup> [17].

<sup>13</sup> Nesse caso a modulação DQPSK se faz necessária em virtude dos *chips* poderem assumir os valores da raiz quarta da unidade (+1, -1, +j e -j).

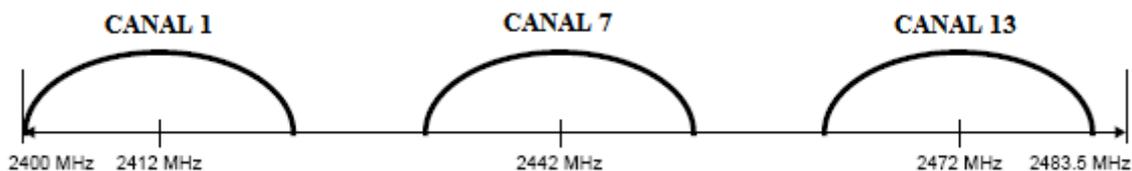
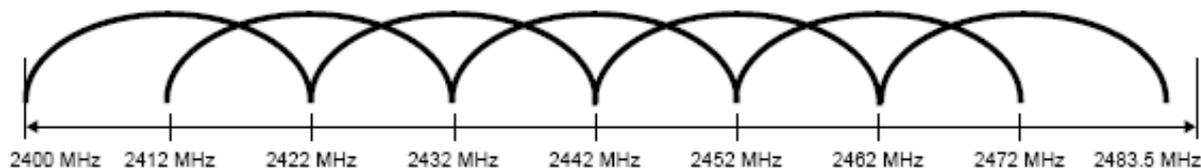
<sup>14</sup> Os números dos canais indicados nas Tabelas 2.10 e 2.11 estão de acordo com as definições da Tabela 2.5.

**Tabela 2.9** – Canais operacionais para a América do Norte na extensão 802.11b.

Grupo – Condição	Número de canais	Canais
1 – Sem sobreposição	3	1, 6, 11
2 – Com sobreposição	6	1, 3, 5, 7, 9, 11

**Figura 2.8** – Canais sem sobreposição (América do Norte) na extensão 802.11b [17].**Figura 2.9** – Canais com sobreposição (América do Norte) na extensão 802.11b [17].**Tabela 2.10** – Canais operacionais para a Europa na extensão 802.11b.

Grupo – Condição	Número de canais	Canais
1 – Sem sobreposição	3	1, 7, 13
2 – Com sobreposição	7	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13

**Figura 2.10** – Canais sem sobreposição (Europa) na extensão 802.11b [17].**Figura 2.11** – Canais com sobreposição (Europa) na extensão 802.11b [17].

Ainda sobre as especificações para a subcamada PMD, a extensão 802.11b manteve as recomendações realizadas no modo DSSS sobre os níveis máximos de potência transmitida e o seu controle abaixo de 100 mW. Entretanto, diferentemente da primeira versão, a extensão não fez recomendação sobre o nível mínimo de potência.

Vale salientar que um segundo esquema de modulação, opcional e identificado pelo termo PBCC (*packet binary convolutional coding*), também é proposto na extensão 802.11b. Ele baseia-se no uso de um código convolucional binário e dos esquemas de modulação BPSK e QPSK para alcançar, também, as taxas de 5,5 Mbits/s e 11 Mbits/s. O fato é que o esquema PBCC não chegou a ser implementado em escala significativa e não houve esforços posteriores para sua revisão e desenvolvimento [19].

A definição de diversos esquemas de modulação, associados às diferentes taxas de transmissão, garante uma flexibilidade interessante ao padrão. Sempre que o canal apresentar condições adversas, o que pode ser traduzido por uma baixa relação sinal-ruído (SNR), transmissor e receptor podem acordar o uso de um esquema com taxa de transmissão inferior, porém mais robusto e tolerante aos efeitos da degradação proporcionada pelo meio [19].

### 2.3.4 O modo de operação ERP (802.11g)

Em junho de 2003 o IEEE aprovou a extensão 802.11g do seu padrão para redes sem fio, trazendo uma nova especificação para a camada física em 2,4 GHz, prevendo o alcance de taxas de transmissão da ordem de 54 Mbits/s. Esse novo modo de operação recebeu o nome de *Extended Rate PHY* ou simplesmente ERP.

Mais uma vez, as grandes mudanças previstas na extensão estão vinculadas à subcamada PMD, especificamente pela previsão de quatro esquemas de modulação: o primeiro baseado no modo DSSS (ERP-DSSS); o segundo baseado no esquema CCK do modo HR/DSSS (ERP-CCK); o terceiro e o quarto baseiam-se no uso da técnica OFDM isoladamente (ERP-OFDM) ou em um esquema híbrido opcional combinado com a técnica de espalhamento espectral por seqüência direta (DSSS-OFDM)<sup>15</sup>. O intuito do IEEE era

---

<sup>15</sup> Também há na extensão 802.11g a definição de um esquema opcional chamado ERP-PBCC, uma evolução do esquema PBCC definido na extensão 802.11b. Assim como sua versão inicial, o esquema ERP-PBCC não chegou a ser implementado amplamente [19].

que um elemento em uma rede 802.11, no modo ERP, fosse capaz de operar com os protocolos definidos na primeira versão do padrão e em sua extensão 802.11b.

Além das mudanças previstas para a subcamada PMD, podem ser destacadas também as novas possibilidades de encapsulamento de MPDU pela subcamada PLCP. São definidos na extensão cinco formatos distintos de encapsulamento, sendo três deles obrigatórios: o quadro longo definido no modo HR/DSSS; o quadro curto, também definido no modo HR/DSSS; e um quadro específico para uso com o esquema de modulação ERP-OFDM. Os dois formatos opcionais são definidos para uso com o esquema híbrido (DSSS-OFDM).

A subcamada PLME também sofre modificações no modo ERP em função do aumento significativo de possibilidades e combinações previstas na extensão 802.11g. O número de parâmetros e formas de preenchimento dos campos nas PPDU's é substancialmente acrescido e todos esses dados transitam pela subcamada PLME embutidos nas primitivas de serviço trocadas internamente na camada física ou com a camada MAC.

O modo ERP define o uso, pela subcamada PMD, da mesma faixa de frequência e dos mesmos canais previstos para os modos DSSS e HR/DSSS (ilustrados na Tabela 2.5, Seção 2.3.2). Como os esquemas ERP-DSSS e ERP-CCK seguem basicamente as mesmas especificações realizadas na extensão 802.11b não necessitam de adaptações à faixa de frequências disponível. Uma sutil diferença na extensão 802.11g é a obrigatoriedade da possibilidade de operação com quadros curtos, diferentemente do que ocorre na extensão 802.11b. Uma vez que não foram propostas modificações sensíveis a esses esquemas em relação às primeiras especificações, não é dedicado um maior detalhamento a eles.

Os outros dois esquemas definidos para o modo ERP possuem particularidades e definições diferentes, de modo que, para facilitar a análise e compreensão, eles são abordados em subseções distintas.

#### **2.3.4.1 O esquema ERP-OFDM**

O terceiro esquema proposto, o ERP-OFDM, é uma adaptação da técnica OFDM para a faixa de 2,4 GHz, dado que ela havia sido definida como modo de operação da extensão 802.11a na faixa de 5 GHz [16]. Tanto que a extensão 802.11g não detalha as especificações para esse esquema, apenas indica as definições contidas na extensão

802.11a e a necessidade de alguns ajustes, dentre os quais o mais importante é o enquadramento às frequências e canais definidos para a faixa de 2,4 GHz.

O esquema ERP-OFDM está atrelado às definições contidas na Tabela 2.11. Nela é estabelecida a relação entre as taxas de transmissão previstas para a extensão e diversos parâmetros da técnica OFDM. Os valores da quinta coluna da tabela, por exemplo, baseiam-se no uso de 48 subcanais pelo esquema. Os dados da sexta coluna resultam da multiplicação da taxa de codificação<sup>16</sup> pelo número de bits presentes em cada símbolo OFDM.

Além dos 48 subcanais para transmissão dos pacotes de dados (definidos pelo termo SD), mais quatro subcanais devem ser utilizados no esquema ERP-OFDM a fim de evitar variações no ajuste de frequências entre transmissor e receptor e tornar o sistema mais robusto contra perturbações na fase do sinal transmitido. Estes quatro subcanais são definidos pelo termo *pilot subcarrier* (SP) e modulados via BPSK.

**Tabela 2.11** – Parâmetros do esquema ERP-OFDM.

Taxa de transmissão (Mbits/s)	Modulação	Taxa de codificação	Bits codificados por subcanal ( $N_{\text{BPSK}}$ )	Bits codificados por símbolo OFDM ( $N_{\text{CBPS}}$ )	Bits de dados por símbolo OFDM ( $N_{\text{DBPS}}$ )
6	BPSK	$\frac{1}{2}$	1	48	24
9	BPSK	$\frac{3}{4}$	1	48	36
12	QPSK	$\frac{1}{2}$	2	96	48
18	QPSK	$\frac{3}{4}$	2	96	72
24	16-QAM	$\frac{1}{2}$	4	192	96
36	16-QAM	$\frac{3}{4}$	4	192	144
48	64-QAM	$\frac{2}{3}$	6	288	192
54	64-QAM	$\frac{3}{4}$	6	288	216

Os tipos de modulação utilizados de acordo com as taxas de transmissão previstas também são apontados na Tabela 2.11. É definido o uso das técnicas BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM, com as quais os *bits* direcionados à subcamada PMD são mapeados em

<sup>16</sup> O esquema ERP-OFDM codifica os *bits* em seu processo de transmissão para correção de erros após o processo de transmissão (*forward error correction coding*).

números complexos representando os pontos da constelação da modulação em uso (as constelações podem ser vistas no Apêndice A). Para que o mapeamento ocorra corretamente, os dados precisam ser agrupados em um número de *bits* adequado à modulação a ser utilizada, ou seja, em múltiplos dos valores contidos na quarta coluna da Tabela 2.11, denominados de  $N_{\text{BPSC}}$  (*number of bits per subcarrier*).

A seqüência de números complexos gerada é agrupada em conjuntos com 48 elementos. Então, com uma função matemática definida na extensão 802.11a, os números complexos são convertidos em símbolos OFDM indexados por um valor entre -26 e 26, que representa o subcanal a ser utilizado. Dentre os 53 índices possíveis, cinco não podem ser utilizados: o valor 0, reservado para a frequência central do canal; e os valores -21, -7, 7 e 21, reservados para os subcanais PS.

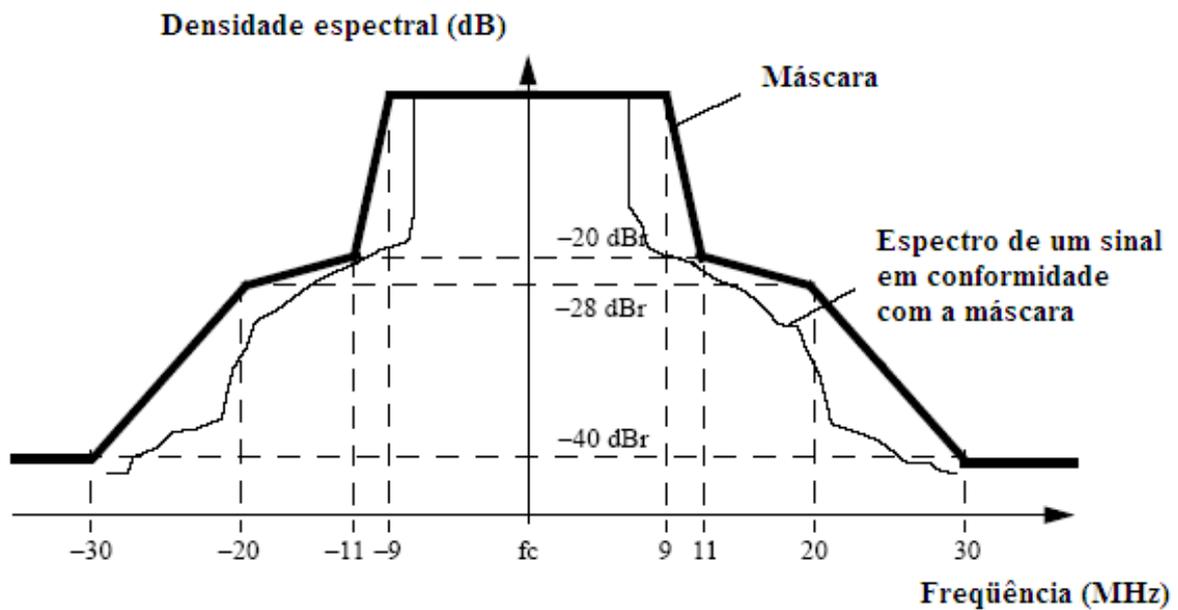
Cada subcanal tem largura de banda equivalente a 0,3125 MHz (igual a 20 MHz / 64, em que o valor de 20 MHz está relacionado com a taxa de amostragem por segundo do sinal OFDM) e transmite um símbolo OFDM a cada 4  $\mu\text{s}$ , o que equivale a uma taxa de 250.000 símbolos OFDM por segundo. Multiplicando essa taxa pelo número de *bits* contido em cada símbolo OFDM, de acordo com a Tabela 2.11, obtêm-se as diversas taxas previstas para o esquema ERP-OFDM. Entre dois símbolos OFDM consecutivos deve ser respeitado o intervalo de 0,8  $\mu\text{s}$ , referido pelo IEEE como intervalo de guarda. Como conseqüência dessas definições, o IEEE define que a banda total ocupada para a transmissão dos símbolos OFDM é de 16,6 MHz<sup>17</sup>.

Assim como nos modos DSSS e HR/DSSS, o esquema ERP-OFDM também define uma máscara para controle do espalhamento da energia do sinal transmitido. Esse recurso, tal como definido pelo IEEE, pode ser visto na Figura 2.12.

A alocação dos canais e, conseqüentemente, dos subcanais previstos para o esquema ERP-OFDM devem respeitar exatamente o plano proposto no modo HR/DSSS. Por fim, os limites de potência transmitida também são os mesmos daqueles definidos no modo HR/DSSS, com exceção ao fato de que a extensão 802.11g não menciona a necessidade de mecanismo de controle para a potência máxima transmitida, afirmando apenas a obrigatoriedade de respeitarem-se os limites impostos pelos órgãos reguladores.

---

<sup>17</sup> Conforme [39], esse valor pode ser obtido multiplicando o número de subcanais do sistema mais um pela banda ocupada por cada um deles. No caso do esquema ERP-OFDM isto equivale a multiplicar 53 por 0,3125 MHz, resultando em uma banda aproximada de 16,56 MHz.



**Figura 2.12** – Máscara para espalhamento espectral no esquema ERP-OFDM [16].

### 2.3.4.2 O esquema híbrido DSSS-OFDM

O esquema ERP-OFDM deve ser compatível com os modos DSSS e HR/DSSS, mas suporta as taxas de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54 Mbits/s. Ele utiliza as características e formatos do modo HR/DSSS para elaboração e transmissão dos preâmbulos e cabeçalhos das PPDU's, ao passo que a carga útil dos quadros é transmitida via OFDM. Em outras palavras, as definições a respeito do preâmbulo e do cabeçalho dos quadros foram aproveitadas do modo HR/DSSS, enquanto as especificações para transmissão da carga útil derivaram da extensão 802.11a.

A primeira implicação desse esquema híbrido é a necessidade de que a subcamada PMD comporte transmissões com portadora simples (para os preâmbulos e cabeçalhos) e com multi-portadoras ou subcanais (para a carga útil das PPDU's). Ainda, tornam-se também necessárias definições acerca da transição entre a transmissão do cabeçalho e o início da transmissão da carga útil.

De forma sintetizada, pode-se dizer que a transição ocorre de forma suave o suficiente para que o receptor não precise de parâmetros adicionais no recebimento e decodificação do sinal transmitido. Essa forma suave está descrita na especificação do esquema como uma transição ideal em que:

- 
- o mesmo relógio deve ser utilizado antes, durante e depois da transição, mantendo os mesmos referenciais de tempo e frequência ao longo da transmissão;
  - a mudança de fase do sinal transmitido durante a transição deve ser coerente com o último símbolo transmitido no cabeçalho da PPDU;
  - o alinhamento no tempo, necessário em função das taxas de amostragem diferentes utilizadas no modo HR/DSSS (11.000 amostras por segundo) e OFDM (20.000 amostras por segundo), é obtido com a transmissão do primeiro símbolo OFDM exatamente 1  $\mu$ s após o início da transmissão do último símbolo do cabeçalho.

A especificação do esquema DSSS-OFDM basicamente se limita a apresentar as condições necessárias a esta transição, dado que as demais características para seu funcionamento já se encontravam descritas nas especificações da extensão 802.11b e do esquema ERP-OFDM.

## 3 Modelos para o macro-comportamento da propagação de sinal em 2,4 GHz

São apresentados neste capítulo alguns dos modelos mais utilizados para prever o macro-comportamento da propagação de sinal na faixa de 2,4 GHz. Na literatura esses modelos são tipicamente referenciados pelo termo *path-loss models*, ou seja, o estudo das perdas da propagação eletromagnética em função de incrementos significativos na distância entre transmissor e receptor.

Os modelos analisados possuem caráter empírico, apesar de alguns levarem em consideração fatores determinísticos em sua formulação. Quanto ao ambiente de propagação, os modelos se dividem na literatura entre aqueles destinados à previsão do macro-comportamento da propagação em ambientes abertos (*outdoor*) e aqueles utilizado para ambientes fechados (*indoor*). Dentre esses, há aqueles cuja capacidade de modelagem não se restringe a um determinado tipo de ambiente.

Antes de mergulhar em cada um dos modelos, um breve panorama sobre o assunto, com algumas definições teóricas importantes, é apresentado.

### 3.1 A modelagem do macro-comportamento da propagação de sinal

Modelar a perda da propagação eletromagnética de um sinal representa a necessidade de inferir a potência do sinal percebida pelo receptor a uma certa distância do transmissor

dadas algumas características físicas envolvidas processo. Quando a transmissão do sinal ocorre no espaço livre essa relação é dada pela Fórmula 3.1, conhecida como equação de Friis [8],

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}. \quad (3.1)$$

Na Fórmula 3.1 a potência percebida pelo receptor ( $P_r$ ) é obtida: da potência emitida pelo transmissor  $P_t$ ; pelo ganho proporcionado pelas antenas transmissora,  $G_t$ , e receptora,  $G_r$ ; pelo comprimento de onda associado ao sinal transmitido  $\lambda$ ; e pela distância entre transmissor e receptor  $d$ . A perda associada à transmissão  $PL$  (do termo *path loss*), em dB, é obtida pela Fórmula 3.2

$$PL(d)[dB] = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}. \quad (3.2)$$

Boa parte dos modelos encontrados na literatura data da segunda metade do século XX e foram desenvolvidos sob a ótica de aplicações com alcance da ordem de alguns quilômetros. Tais modelos, de caráter empírico, têm base em dados coletados em faixas de frequência abaixo de 2,4 GHz. Esse é o caso dos modelos clássicos de Okumura e de Hata, cujos dados foram coletados, respectivamente, nas faixas de 200 a 1.920 MHz e 150 a 1.500 MHz [3].

Uma consequência direta dos fatos expostos é que uma parte dos modelos consagrados na literatura para a previsão do macro-comportamento da propagação de sinais não têm sido utilizados em estudos sobre redes baseadas no padrão 802.11. Suas aplicações parecem muito mais relacionadas a serviços como o de telefonia móvel, seja por sua frequência de operação, seja pela similaridade entre o ambiente de aplicação da telefonia móvel e aqueles utilizados na coleta dos dados para a formulação empírica.

O desenvolvimento deste capítulo trás, então, os modelos desenvolvidos sob condições menos atreladas à características típicas da telefonia móvel e aqueles que têm sido efetivamente usados na análise do macro-comportamento da propagação de sinal em redes sem fio *outdoor* ou *indoor* baseadas no padrão IEEE 802.11 na faixa de 2,4 GHz. Também são vistos alguns modelos elaborados recentemente em trabalhos científicos, cujos resultados mostraram-se relevantes no estudo do comportamento de tais redes.

## 3.2 Modelos para o macro-comportamento da propagação de sinal em ambientes *outdoor*

Esta seção apresenta quatro modelos para previsão do macro-comportamento da propagação de sinais em ambientes *outdoor*. Alguns desses modelos também podem ser utilizados para ambientes *indoor*, com o mesmo formato apresentado nesta seção ou com alguns pequenos ajustes, os quais serão vistos na seção 3.3.

### 3.2.1 O modelo de Young

O modelo de Young foi desenvolvido com base em dados coletados na cidade de Nova Iorque, em 1952, na faixa de frequências entre 150 MHz e 3.700 MHz [3]. Não foi identificado seu uso em análises recentes sobre o macro-comportamento da propagação de sinal em redes sem fio operando de acordo com padrão IEEE 802.11, mas, pela faixa de frequências na qual se baseou a elaboração do modelo, entendeu-se que ele pode ser elencado como uma das formas de modelagem das perdas em tais redes.

Diferentemente da equação de Friis para o espaço livre, o modelo de Young estima que a perda na propagação do sinal aumente com a quarta potência da distância, respeitando a fórmula

$$PL(d) = \frac{d^4}{G_t G_r (h_t h_r)^2 \beta}. \quad (3.3)$$

Nesta,  $d$  representa a distância entre transmissor e receptor, em metros, os parâmetros  $G_t$  e  $h_t$  indicam ganho e altura do transmissor e os parâmetros  $G_r$  e  $h_r$  indicam ganho e altura do receptor. Por fim, o parâmetro  $\beta$  é chamado no modelo de fator de interferência.

Supondo que na modelagem empírica seja utilizado o mesmo par transmissor-receptor e que não haja mudança na altura em que eles são posicionados, todo o denominador do segundo membro da igualdade em 3.3 pode ser considerado um único parâmetro. Assim, a fórmula da perda pode ser simplificada para

$$PL(d) = \frac{d^4}{\beta'}, \quad (3.4)$$

ou, em decibéis:

$$PL(d)[dB] = 10 \log_{10} \left( \frac{d^4}{\beta'} \right) = 40 \log(d) - 10 \log(\beta'). \quad (3.5)$$

Essa última expressão, derivada naturalmente do modelo de Young indicado pela Fórmula 3.3, que é utilizada na seqüência do trabalho.

### 3.2.2 O modelo logaritmo da distância

O modelo logaritmo da distância é bastante citado na literatura e um dos mais referenciados em trabalhos científicos recentes acerca do macro-comportamento da propagação de sinal em redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11, tanto em ambientes *outdoor*, quando em ambientes *indoor* [32, 43, 44]. Ele está baseado na idéia do aumento da perda na intensidade do sinal transmitido, a partir de um certo ponto de referência, respeitando um fator de atenuação que pode ser encontrado de forma empírica [45]. Expressando matematicamente, tem-se

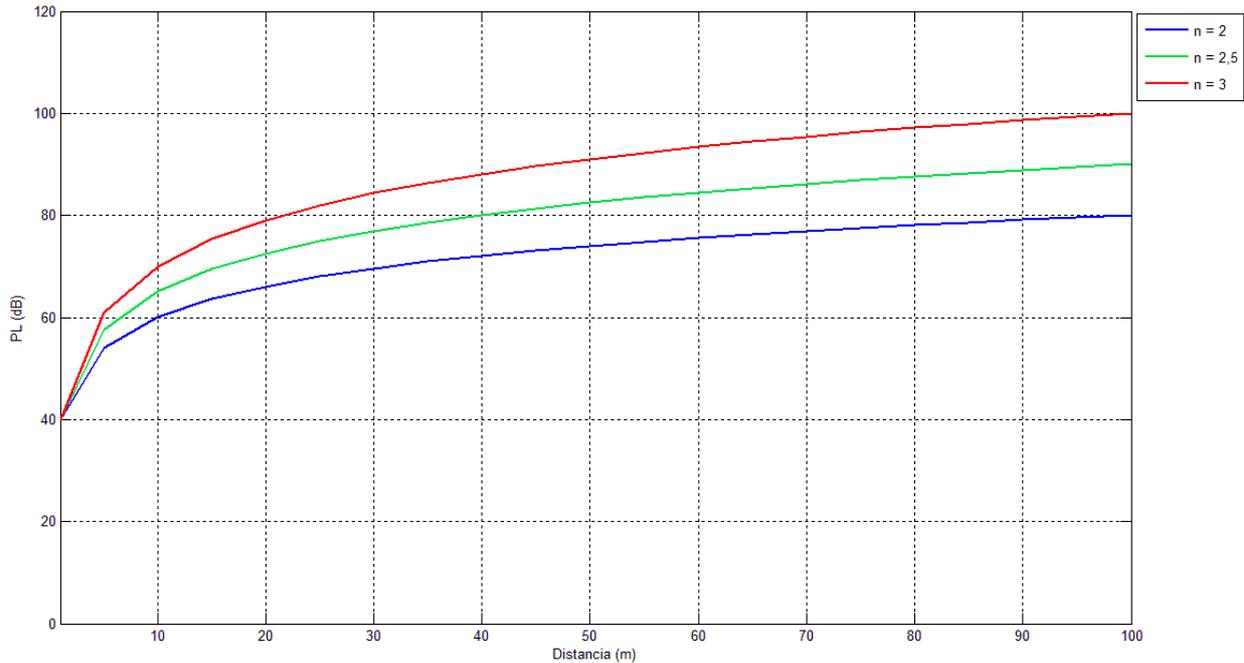
$$PL(d) \propto \left( \frac{d}{d_0} \right)^n. \quad (3.6)$$

Na relação 3.6,  $n$  representa o fator de atenuação e  $d_0$  a distância de referência utilizada. A escolha do ponto de referência normalmente é feita de modo que entre ele e o transmissor não haja obstáculos e, com isso, seja possível calcular a perda até aquele ponto por meio da equação de Friis. Na prática, a distância de 1 m é tipicamente utilizada nas aplicações desse modelo, parte por atender normalmente ao critério da inexistência de obstáculos, parte em virtude da simplificação matemática que deriva dessa escolha.

Seguindo essa lógica, a perda em decibéis a uma distância  $d$  entre transmissor e receptor é calculada a partir da fórmula

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right). \quad (3.7)$$

O valor  $PL(d_0)$  na Fórmula 3.7 representa a perda até o ponto de referência. Seu valor pode ser levantado empiricamente ou calculado pela equação de Friis desconsiderando os ganhos das antenas, ou seja, atribuindo a eles o valor unitário. A Figura 3.1 apresenta três curvas de atenuação obtidas a partir do modelo, cada uma com seu respectivo fator de atenuação ( $n = 2, 2,5$  ou  $3$ ), obtidas considerando-se o comprimento de onda igual a 0,125 m (valor aproximado para a frequência de 2,4 GHz), distância de referência  $d_0$  igual a 1m e  $PL(d_0)$  igual a 40,046 dB.



**Figura 3.1** – Curvas de atenuação previstas pelo modelo logaritmo da distância na frequência de 2,4 GHz com fator de atenuação igual a 2, 2,5 ou 3.

Uma rápida comparação entre as Fórmulas 3.4 e 3.7 permite notar que os modelos de Young e do logaritmo da distância possuem apenas sutis diferenças. O primeiro atribui ao fator de atenuação o valor 4 e o seu parâmetro  $\beta'$  torna-se o mecanismo ajustável da curva de atenuação em função da distância. O segundo sugere que o mecanismo de ajuste seja o fator de atenuação  $n$ , enquanto a perda observada ou calculada para o ponto de referência contribui como uma parcela constante no modelo. Vale destacar ainda que, de acordo com a equação de Friis para a propagação de sinal no espaço livre, o fator de atenuação sob estas condições é igual a 2. Isto torna natural que, em condições reais, ou seja, com presença de obstáculos, o valor de  $n$  seja maior do que 2.

### 3.2.3 O modelo multi-inclinações

O modelo logaritmo da distância, visto em uma escala logarítmica, trata-se de uma reta cuja inclinação é definida pelo fator de atenuação  $n$ . No modelo multi-inclinações, o intervalo de distâncias utilizado na bateria de medições é dividido em diversos trechos, cada qual com seu respectivo fator de atenuação [1]. Os aspectos fundamentais desse tipo de abordagem passam a ser o número de trechos a ser utilizado e os limites de cada um desses intervalos.

Partindo de uma determinada amostra de dados é natural que o modelo multi-inclinações tenha a capacidade de ajustar-se tão bem quanto se queira à curva de atenuação observada. O contraponto dessa relação está no fato de que quanto maior for o ajuste a uma dada amostra menor será a capacidade de generalização do modelo. Talvez essa seja a justificativa para o uso mais freqüente do modelo multi-inclinações com apenas dois trechos, citado na literatura pelo termo *dual-slope model*.

O modelo *dual-slope* é formulado pelo seguinte sistema de equações:

$$PL(d)[dB] = \begin{cases} PL(d_0)[dB] + 10n_1 \log\left(\frac{d}{d_0}\right), & \text{se } d_0 \leq d \leq d_c \\ PL(d_0)[dB] + 10n_1 \log\left(\frac{d_c}{d_0}\right) + 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_c}\right), & \text{se } d > d_c \end{cases}, \quad (3.8)$$

em que os parâmetros  $n_1$  e  $n_2$  representam o fator de atenuação no primeiro e no segundo trecho, respectivamente, ao passo que o parâmetro  $d_c$  indica a distância crítica a partir da qual ocorre a mudança do fator de atenuação utilizado.

Em [46] existem algumas ponderações interessantes acerca do modelo *dual-slope*. Em especial, três podem ser destacadas:

- o autor sugere que, caso a transmissão ocorra com linha de visada, ou seja, sem obstáculos entre transmissor e receptor, o fator de atenuação do primeiro trecho deve ser aproximadamente 2 (como na propagação em espaço livre);
- para o segundo trecho o fator de atenuação é aproximadamente 4 (como no modelo de Young);
- por fim, a distância crítica poderá ser obtida da fórmula

$$d_c = \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda}. \quad (3.9)$$

Partindo das hipóteses que transmissor e receptor estejam a 1 m de altura do solo e que a freqüência de transmissão do sinal seja de 2,4 GHz (equivalente a um comprimento de onda da ordem de 0,125 m), tem-se uma distância crítica de aproximadamente 50 m. Essas são as considerações utilizadas na avaliação do desempenho do modelo *dual-slope*.

### 3.2.4 O modelo de Oliveira, Alencar, Rocha Jr. e Lopes

Esse modelo, originalmente apresentado em [47] e divulgado em [48], vislumbra, a princípio, apoiar o planejamento de redes celulares pela previsão do macro-comportamento da propagação do sinal utilizando uma abordagem pouco complexa. Em virtude de sua sutil semelhança com os modelos já apresentados e dos bons resultados obtidos no trabalho citado, decidiu-se observar também como ele se comportaria na análise de redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11 em ambientes *outdoor*.

O modelo proposto considera que a perda imposta ao sinal transmitido, em decibéis, relaciona-se com a distância entre transmissor e receptor não apenas de forma logarítmica, mas também com uma contribuição linear cujos efeitos tendem a acentuar com o aumento da distância. Essa abordagem pode ser expressa, matematicamente, de acordo com [48], da seguinte forma

$$PL(d)[dB] = P_0 - 10 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 10m\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (3.10)$$

em que  $d_0$  representa, assim como nos modelos já apresentados, uma distância de referência para o transmissor, enquanto os parâmetros  $P_0$  e  $m$  representam os fatores de ajuste que devem ser obtidos com base nos dados coletados nas baterias de medição de modo a minimizar o erro médio quadrático cometido pela modelagem.

Chamam a atenção neste modelo os seguintes fatos:

- o parâmetro  $P_0$  não representa a perda média observada no ponto de referência  $d_0$ , mas um fator de ajuste;
- o termo, na Fórmula 3.10, proporcional ao logaritmo da razão entre a distância  $d$  e a distância de referência  $d_0$ , tem contribuição negativa para o valor absoluto da perda total, diferentemente dos demais modelos;
- o terceiro termo, relacionado diretamente com a razão  $d/d_0$ , indica uma contribuição linear da distância, não prevista em outros modelos.

Essas características bastante peculiares do modelo proposto em [48] e sua relativa semelhança com os demais modelos apresentados despertaram, apesar dos enfoques distintos dos dois trabalhos, a curiosidade em observar sua aplicabilidade também na propagação de sinais em redes sem fio.

### 3.3 Modelos para o macro-comportamento da propagação de sinal em ambientes *indoor*

São vistos nessa seção três modelos para determinação do macro-comportamento da propagação de sinais em ambientes *indoor*. Todos estão fortemente relacionados com o modelo logaritmo da distância, mas incorporam fatores de ajuste com caráter determinístico a fim de diminuir o erro cometido no processo de modelagem. A seqüência na qual eles são apresentados visa dar uma noção evolutiva dos esforços científicos em melhorar a capacidade dos modelos.

#### 3.3.1 O modelo da *International Telecommunication Union*

O primeiro modelo é o recomendado pela *International Telecommunication Union* (ITU)<sup>1</sup> para a modelagem da propagação de sinal em redes LAN na faixa de 900 MHz a 100 GHz [49] e por esse motivo é referido na literatura simplesmente como modelo da ITU [3]. Apesar de aparentemente diferente do modelo logaritmo da distância, uma rápida manipulação matemática na fórmula proposta pela ITU permite observar que os modelos são basicamente os mesmos. Tal fórmula é expressa a seguir,

$$PL(d)[dB] = 20\log(f) + N\log(d) + Lf(m) - 28, \quad (3.11)$$

na qual os seguintes parâmetros são utilizados:

- $d$  é a distância entre transmissor e receptor em metros;
- $f$  é a frequência do sinal transmitido em MHz;

---

<sup>1</sup> A ITU é uma organização internacional ligada à ONU (Organização das Nações Unidas), cujas principais missões são padronizar e regular o uso do espectro de frequências no mundo e contribuir com o desenvolvimento do setor de Telecomunicações (vide [www.itu.int/net/about/index.aspx](http://www.itu.int/net/about/index.aspx), acessado em 08/12/2007).

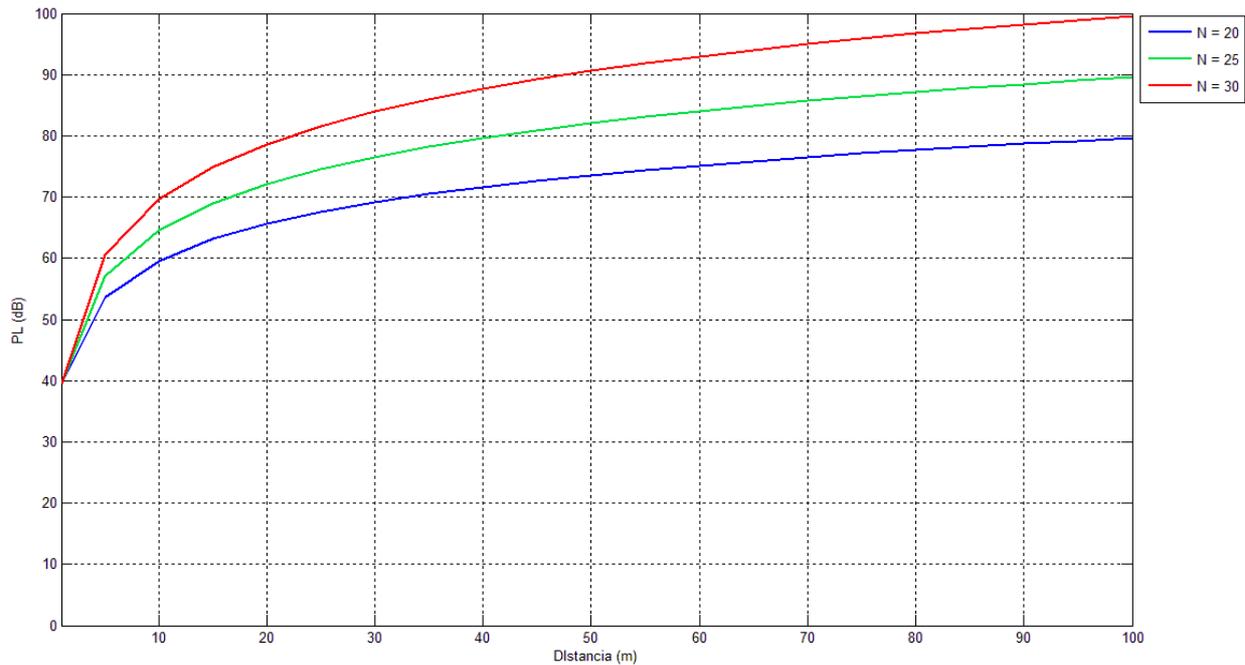
- $N$  é o coeficiente de perda;
- $L_f(m)$  é o fator de incremento da perda por piso;
- $m$  é o número de pisos entre o transmissor e o receptor.

A exceção da inclusão do fator de incremento da perda em função da presença de um ou mais pisos entre transmissor e receptor (aspecto determinístico), o modelo da ITU é essencialmente igual ao modelo logaritmo da distância contido na Fórmula 3.7, apenas respeitando os seguintes detalhes:

- $PL(d_0)[dB]$  é re-escrita como uma função da frequência do sinal em MHz respeitando a equação de Friis para o espaço livre, considerando o ganho das antenas unitário e a distância de referência  $d_0$  igual a 1 m, originando o termo “ $20\log(f) - 28$ ” (os passos dessa mudança são detalhados em [3]);
- o coeficiente de perda  $N$  equivale a 10 vezes o fator de atenuação  $n$  do modelo logaritmo da distância.

Assim, o modelo da ITU difere do modelo logaritmo da distância apenas por incluir um fator de incremento da perda associado ao número de pisos existentes entre o transmissor e o receptor, ou seja, adicionando uma informação determinística ao modelo empírico. A Figura 3.2 ilustra algumas curvas de atenuação obtidas a partir do modelo da ITU assumindo três valores distintos para o coeficiente de perda ( $N = 20, 25$  ou  $30$ ), frequência igual a 2,4 GHz e a inexistência de pisos entre transmissor e receptor.

A ITU, baseada em medições, sugeriu valores para o incremento da atenuação por piso e o coeficiente de perda em diversas frequências e tipos de ambiente, como exibido nas Tabelas 3.1 e 3.2.



**Figura 3.2** – Curvas de atenuação previstas pelo modelo da ITU para a frequência de 2,4 GHz e com coeficiente de perda igual a 20, 25 ou 30.

**Tabela 3.1** – Fórmulas de cálculo do incremento da atenuação por piso no modelo da ITU.

Frequência	Ambiente: Residencial	Ambiente: Escritório	Ambiente: Loja comercial
900 MHz	-	9 (para $m = 1$ ) 19 (para $m = 2$ ) 24 (para $m = 3$ )	-
1,8 – 2 GHz	$4m$	$15 + 4(m-1)$	$6 + 3(m-1)$
5,2 GHz	-	16 (apenas para $m = 1$ )	-

**Tabela 3.2** – Valores recomendados pela ITU para o coeficiente de perda  $N$ .

Frequência	Ambiente: Residencial	Ambiente: Escritório	Ambiente: Loja comercial
900 MHz	-	33	20
1,2 – 1,3 MHz	-	32	22
1,8 – 2 MHz	28	30	22
4 GHz	-	28	22
5,2 GHz	-	31	-

O próximo modelo a ser visto é uma aparente evolução ao modelo da ITU, passando a considerar também os incrementos na perda provocados por obstáculos como paredes e divisórias, com uma formulação mais parecida com a do modelo logaritmo da distância. A ITU, em sua recomendação [49], afirma que o coeficiente de perda  $N$ , encontrado de forma empírica, é suficiente para absorver os efeitos de tais obstáculos.

### 3.3.2 O modelo logaritmo da distância com incremento da atenuação por obstáculos

Em [45] é exposta uma extensão ao modelo logaritmo da distância para ambientes *indoor* considerando os efeitos de pisos, divisórias (referido no documento como *soft partitions*) e paredes. Para cada um desses obstáculos no caminho da propagação do sinal um certo incremento na perda total deve ocorrer, de forma que o modelo assume a expressão

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + FAF[dB] + p \cdot SPAF[dB] + q \cdot WAF[dB]. \quad (3.12)$$

Nela estão indicados:

- *FAF* (*floor attenuation factor*), em decibéis, representando o incremento na perda pela existência de pisos entre transmissor e receptor;
- *SPAF* (*soft partition attenuation factor*), em decibéis, representando o incremento na perda pela existência de  $p$  divisórias entre transmissor e receptor quando os mesmos se encontram a uma distância  $d$ ;
- *WAF* (*wall attenuation factor*), também em decibéis, representando o incremento na perda pela existência de  $q$  paredes entre transmissor e receptor quando os mesmos se encontram a uma distância  $d$ .

Uma das dificuldades desse modelo é inferir com precisão quais os valores médios do incremento provocado por cada um dos obstáculos. Tanto em [45], como em diversos outros trabalhos, são realizados estudos nesse sentido, ou seja, buscando identificar qual a contribuição média na perda total que cada tipo de obstáculo impõe.

Para o caso específico de redes sem fio operando segundo o padrão IEEE 802.11 em 2,4 GHz pode ser destacado o trabalho [50] em que é apontado um incremento médio da ordem de 6,29 dB por parede de concreto, com base em medições realizadas em 16 prédios distintos. O trabalho de mestrado [51], por sua vez, apresenta um estudo bastante interessante sobre os efeitos da disposição de transmissor e receptor em pisos distintos também na faixa de 2,4 GHz. Por fim, em [52] pode ser vista uma análise bastante detalhada dos efeitos de obstáculos na propagação de sinais em redes sem fio *indoor* na faixa de frequências de 2,5 GHz, inclusive com ponderações acerca dos efeitos de divisórias na atenuação do sinal.

### 3.3.3 O modelo de Cheung, Sau e Murch

Divulgado no trabalho [53], o modelo de Cheung, Sau e Murch para propagação em ambientes *indoor* também é baseado no modelo logaritmo da distância. Ele incorpora a idéia do modelo *dual-slope* e, assim como no modelo citado na Seção 3.3.2, leva em consideração os efeitos de possíveis obstáculos entre transmissor e receptor, porém de uma forma peculiar não observada nos demais modelos.

O modelo de Cheung, Sau e Murch considera que, a partir de um determinado ponto de quebra (*breakpoint*), o sinal passa a ser atenuado de forma mais severa. É um conceito similar ao do modelo *dual-slope* para ambientes *outdoor* que indica a existência de uma distância crítica a partir da qual um novo fator de atenuação passa a ditar o ritmo da perda imposta ao sinal transmitido. Os autores propõem em seu trabalho que o uso da distância de 10 m como ponto de quebra e que, até esse ponto, o fator de atenuação considerado deve ser igual a 2. Após o ponto de quebra os autores sugerem, baseados em medições realizadas na faixa de 900 MHz, que o fator de atenuação seja da ordem de 2,5.

O incremento na atenuação do sinal em virtude da existência de obstáculos deve, de acordo como o modelo de Cheung, Sau e Murch, levar em consideração o ângulo de incidência entre o raio que se propaga na direção que une transmissor e receptor e o obstáculo. Quando este ângulo é 0, ou seja, o raio incide no obstáculo na direção normal a sua superfície, tem-se o valor máximo de energia transmitida através do obstáculo. Na medida em que o ângulo se aproxima de 90°, a parcela de energia que é transmitida através do obstáculo vai reduzindo até tornar-se nula no limite em que o ângulo de incidência é exatamente 90° [8]. Em outras palavras, o efeito do obstáculo na atenuação do sinal que o

transpõe é proporcional ao ângulo de incidência da direção de propagação da onda eletromagnética associada ao sinal sobre o obstáculo.

Essas idéias absorvidas pelo modelo de Cheung, Sau e Murch conduzem à seguinte expressão para a perda total

$$\begin{aligned}
 PL(d)[dB] = & PL(d_0)[dB] + 10 \log \left( \frac{d}{d_0} \right)^{n_1} \cdot U(d_{bp} - d) + 10 \left[ \log \left( \frac{d_{bp}}{d_0} \right)^{n_1} + \log \left( \frac{d}{d_{bp}} \right)^{n_2} \right] \cdot U(d - d_{bp}) \\
 & + \sum_{p=1}^P \frac{WAF(p)}{\cos \theta_p} + \sum_{q=1}^Q \frac{FAF(q)}{\cos \theta_q}.
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Na Expressão 3.13 tem-se:

- $n_1$  é o fator de atenuação para distâncias inferiores ao ponto crítico ou de quebra;
- $n_2$  é o fator de atenuação para distâncias superiores ao ponto crítico ou de quebra;
- $d_{bp}$  é a distância crítica ou ponto de quebra;
- a função  $U(d)$  é nula para  $d < 0$  e igual à unidade para  $d > 0$ ;
- os parâmetros  $WAF(p)$  e  $FAF(q)$  são os mesmos do modelo logaritmo da distância com incremento da atenuação por obstáculos, porém vistos individualmente, para cada parede  $p$  ou piso  $q$ ;
- $P$  é o número total de paredes entre transmissor e receptor a distância  $d$ ;
- $\theta_p$  é o ângulo de incidência entre o raio e o obstáculo  $p$ ;
- $Q$  é o número total de pisos entre transmissor e receptor a distância  $d$ ;
- $\theta_q$  é o ângulo de incidência entre o raio e o piso  $q$ .

Da Expressão 3.13 pode-se então observar que as premissas adotadas pelo modelo foram formuladas utilizando: a função degrau unitário  $U(d)$ , caracterizando dois possíveis valores para o fator de atenuação em função da distância, antes e após o ponto de quebra; e a divisão do efeito de obstáculos pela função cosseno, a fim de caracterizar o aumento da perda imposta sempre que o ângulo de incidência se afastar da direção normal à superfície do obstáculo. A validade desse último recurso é comprovada em [53] por meio de gráficos cruzando dados reais sobre a atenuação imposta por paredes e o ângulo de incidência.

## **4 Um novo modelo para o macro-comportamento da propagação de sinal em redes 802.11 na faixa de frequência de 2,4 GHz**

Neste capítulo são apresentados os resultados das baterias de medições realizadas em ambientes *outdoor* e *indoor* com o intuito de observar o comportamento real da propagação de sinal em redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11. Os dados coletados são cruzados com aqueles previstos pelos modelos abordados no Capítulo 3, para identificar quais modelos possuem maior aderência ao comportamento observado.

As medições foram realizadas em locais sob influência direta dos aspectos climáticos, em especial a umidade relativa do ar, de modo a permitir uma avaliação acerca dos efeitos que ela produz na propagação do sinal. De acordo com o resultado dessa avaliação, um novo modelo para previsão do macro-comportamento da propagação de sinais em redes IEEE 802.11 é sugerido, levando em consideração os aspectos identificados como relevantes no processo.

### **4.1 Metodologia**

As medições, tanto em ambiente *outdoor* quanto *indoor*, foram realizadas com um *laptop* do fabricante Toshiba, modelo Satellite A105, com sistema operacional Windows XP Professional e os seguintes recursos de *hardware*:

- Processador Intel Centrino Duo de 1,8 GHz;
- Memória RAM de 1 Gb;
- HD de 120 Gb com 75% de espaço livre;
- Adaptador Wireless Intel PRO 3945ABG.

O roteador wireless, ou *access point*, utilizado em todas as medições foi o WRT54G do fabricante Linksys (divisão da Cisco) compatível com o padrão 802.11 em suas extensões B e G, ou seja, operando exclusivamente na frequência de 2,4 GHz. Segundo o *data sheet* do equipamento, ele apresenta potência de saída de 18 dBm e opera normalmente nas faixas de temperatura de 0°C a 40°C e de umidade entre 10% e 85%. Infelizmente, o documento não trás detalhes sobre o par de antenas utilizado pelo equipamento, como pode ser visto na Figura 4.1, nem sobre o seu alcance.



**Figura 4.1** – Roteador wireless WRT54G.

O roteador *wireless* foi configurado para operar no modo infra-estrutura, com modulação OFDM e suporte a taxas de até 54 Mbits/s. Também foi definida a operação do equipamento na frequência central de 2,422 GHz, equivalente ao canal 3 do padrão 802.11, apenas para fugir de uma maior concentração de redes operando no canal 6 observada nos locais onde foram realizadas as medições.

A aferição da perda imposta ao sinal transmitido pelo roteador *wireless* até o ponto de medição foi feita, no *laptop*, com o *software* WirelessMon Professional versão 2.0 da

Passmark ([www.passmark.com](http://www.passmark.com)). Tal *software* permite a geração de um arquivo texto em que é registrado, linha a linha, o valor da atenuação imposta ao sinal a cada intervalo de tempo pré-definido pelo usuário. O arquivo gerado pode ser aberto em planilha eletrônica para serem extraídas as estatísticas acerca da medição realizada.

Paralelamente às medições de atenuação eram registrados os valores da umidade relativa do ar e da temperatura observados com o termo-higrômetro modelo MT-241 do fabricante Minipa ([www.minipa.com.br](http://www.minipa.com.br)). O equipamento afere temperatura (interna e externa) e a umidade relativa do ar com resolução de 0,1°C e 1%, respectivamente. A precisão é de  $\pm 1^\circ\text{C}$  para temperaturas na faixa de 0°C a 40°C e de  $\pm 5\%$  para a umidade relativa do ar. O termo-higrômetro utilizado pode ser visto na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Termo-higrômetro MT-241.

## 4.2 Resultado das medições em ambiente *outdoor*

As medições em ambiente *outdoor* foram realizadas no campus da Universidade Federal de Pernambuco, mais especificamente no estacionamento do prédio onde se encontra o Centro de Tecnologia e Geociências (Figuras 4.3, 4.4 e 4.5). O roteador *wireless* foi posicionado na extremidade direita do prédio, olhando-o frontalmente, e as medições foram realizadas a cada 15 metros de distância, deslocando-se na direção da extremidade esquerda do prédio, sempre em linha reta e com visada, até que ocorresse a queda da conexão sem fio. A única exceção fica por conta das medidas realizadas a apenas 1 metro do roteador, ou seja, no ponto de referência citado por diversos modelos. Tanto o roteador quanto o *laptop* estavam, aproximadamente, a uma mesma altura do solo.



**Figura 4.3** – Vista frontal do prédio do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE.



**Figura 4.4** – Medição outdoor no ponto de referência.



**Figura 4.5** – *Medição outdoor a distância de 15 metros do roteador wireless.*

Em cada bateria de medições a atenuação do sinal era aferida nos pontos situados a cada 15 metros do roteador durante o intervalo de 1 minuto, gerando em média 30 amostras da perda imposta ao sinal, em decibéis. O valor associado à perda naquele ponto corresponde, naquela bateria de medições, à média das amostras coletadas. Para cada bateria também foram associados os valores médios da temperatura e da umidade relativa do ar observados ao longo das medições.

Foi realizado um total de 35 baterias de medição *outdoor* dentro das condições especificadas, gerando 317 arquivos texto com os dados da atenuação do sinal (média de 9 arquivos por bateria). Ou seja, para cada ponto de medição foram coletadas cerca de 1.050 amostras (35 medições x 30 amostras por medição) da atenuação do sinal em diferentes dias, horários e sob condições climáticas distintas. As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam o resultado das medições *outdoor*.

**Tabela 4.1** – Resultado das medições outdoor (Parte 1).

Bateria	Temp. [°C]	Umidade Relativa	PL(1 m) [dB]	PL(15 m) [dB]	PL(30 m) [dB]	PL(45 m) [dB]	PL(60 m) [dB]	PL(75 m) [dB]
1	34	40%	39,27	53,00	56,73	70,77	74,30	74,77
2	35	41%	36,97	52,57	57,03	69,87	75,30	74,03
3	34	41%	36,55	48,87	56,73	71,20	74,06	74,55
4	34	42%	36,83	53,26	60,27	70,32	79,23	76,37
5	34	42%	38,93	51,53	59,27	70,90	78,70	77,84
6	30	47%	36,13	49,03	58,40	69,00	79,07	73,37
7	30	49%	37,90	54,16	58,33	71,37	76,53	80,52
8	30	49%	40,07	49,77	58,57	70,12	79,77	73,42
9	30	51%	39,42	51,03	61,00	72,40	77,90	76,93
10	30	51%	38,10	53,37	58,50	71,00	81,33	77,00
11	30	55%	34,40	53,26	60,83	68,63	81,80	77,50
12	30	56%	38,10	49,80	57,67	70,35	76,67	76,50
13	30	57%	34,30	54,10	58,71	70,10	77,45	78,00
14	29	59%	39,10	51,97	60,07	69,37	78,90	76,32
15	30	60%	36,83	50,83	63,07	69,50	77,57	75,57
16	29	60%	41,13	52,93	61,30	68,80	80,97	78,63
17	29	60%	38,94	53,94	59,65	70,77	76,80	75,29
18	28	64%	35,47	52,20	60,10	70,67	76,00	74,52
19	30	65%	37,30	49,03	60,50	71,30	75,53	73,17
20	30	66%	32,87	51,06	60,71	70,97	77,97	76,39
21	30	67%	34,07	49,93	60,30	70,50	78,13	78,70
22	28	68%	39,17	53,77	60,56	72,77	80,74	77,87
23	29	69%	36,67	50,37	62,33	71,27	80,57	80,77
24	29	71%	38,71	53,97	62,48	72,97	76,09	75,13
25	29	71%	37,23	51,60	61,60	72,33	76,63	73,09
26	28	71%	40,14	54,91	61,90	72,35	78,03	77,29
27	28	71%	38,84	56,43	59,40	71,70	78,50	77,07
28	28	72%	37,00	50,83	62,10	69,70	77,00	75,30
29	28	72%	35,43	53,53	60,10	75,07	83,30	72,87
30	28	73%	38,53	55,03	58,03	70,67	79,36	75,70
31	28	75%	39,40	55,17	63,33	76,60	82,47	77,00
32	28	76%	36,67	54,58	66,07	73,74	82,20	76,97
33	28	76%	33,37	53,20	61,13	75,63	82,30	73,53
34	28	77%	36,63	54,26	62,60	73,55	83,30	76,87
35	28	77%	36,00	55,47	65,87	73,13	81,90	73,50
<b>MÉDIA</b>			<b>37,33</b>	<b>52,54</b>	<b>60,44</b>	<b>71,41</b>	<b>78,75</b>	<b>76,07</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>			<b>2,01</b>	<b>2,04</b>	<b>2,25</b>	<b>1,88</b>	<b>2,57</b>	<b>2,05</b>

**Tabela 4.2 – Resultado das medições outdoor (Parte 2).**

Bateria	Temp. [°C]	Umidade Relativa	PL(90 m) [dB]	PL(105 m) [dB]	PL(120 m) [dB]	PL(135 m) [dB]	PL(150 m) [dB]
1	34	40%	79,70	83,47	85,60	-	-
2	35	41%	81,20	83,23	85,91	-	-
3	34	41%	77,58	82,87	84,00	-	-
4	34	42%	80,25	83,07	84,85	-	-
5	34	42%	77,58	82,50	85,00	-	-
6	30	47%	77,30	83,70	84,17	-	-
7	30	49%	79,60	81,47	84,09	-	-
8	30	49%	77,09	80,00	81,30	83,87	83,47
9	30	51%	76,63	80,37	84,43	-	-
10	30	51%	76,87	81,80	87,00	-	-
11	30	55%	79,37	79,53	82,73	82,83	-
12	30	56%	79,37	82,83	82,38	-	-
13	30	57%	79,37	82,41	82,67	-	-
14	29	59%	85,13	84,97	81,73	-	-
15	30	60%	78,67	81,93	83,00	-	-
16	29	60%	75,30	79,77	82,13	81,97	-
17	29	60%	77,80	84,07	81,64	82,07	-
18	28	64%	78,67	86,39	84,70	-	-
19	30	65%	75,58	82,74	85,64	-	-
20	30	66%	80,23	80,23	83,38	-	-
21	30	67%	73,42	81,52	85,40	-	-
22	28	68%	79,83	86,43	83,00	-	-
23	29	69%	81,70	85,53	89,00	-	-
24	29	71%	79,83	84,00	87,00	-	-
25	29	71%	77,48	85,97	88,00	-	-
26	28	71%	79,40	85,13	-	-	-
27	28	71%	78,17	85,73	84,26	-	-
28	28	72%	81,20	85,94	87,61	-	-
29	28	72%	80,27	85,38	-	-	-
30	28	73%	78,77	85,19	-	-	-
31	28	75%	82,47	83,17	83,10	-	-
32	28	76%	80,97	83,03	84,63	-	-
33	28	76%	80,83	85,53	85,63	-	-
34	28	77%	82,53	84,93	85,80	-	-
35	28	77%	82,93	80,70	84,67	-	-
<b>MÉDIA</b>			<b>79,23</b>	<b>83,30</b>	<b>84,51</b>	-	-
<b>DESVIO PADRÃO</b>			<b>2,36</b>	<b>2,05</b>	<b>1,92</b>	-	-

## 4.2.1 Análise dos dados

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 são exibidos os valores médios encontrados para a atenuação do sinal (indicados pela abreviação PL, do termo *path loss*) nas distâncias de 1 a 150 metros em cada uma das 35 baterias de medições realizadas. A presença do caracter “-” na segunda tabela indica que houve queda da conexão no ponto imediatamente anterior àquele ou no deslocamento entre eles.

Como pode ser observado, apenas em quatro oportunidades chegou-se a realizar medições na distância de 135 metros e em apenas 1 houve medição na distância de 150 metros. Em virtude do pequeno número de amostras para esses dois pontos, eles foram desconsiderados para a análise do comportamento da propagação do sinal que, portanto, se limita a faixa compreendida entre 1 e 120 metros.

A atenuação média observada no ponto de referência, ou seja, a distância de 1 metro do roteador *wireless*, está um pouco abaixo do valor esperado de acordo com a equação de Friis para o espaço livre (Expressões 3.1 e 3.2 no terceiro capítulo). Utilizando a referida equação, para a frequência de 2,422 GHz e supondo ganho unitário para as antenas envolvidas, a atenuação à distância de 1 metro seria de 40,13 dB. As medições realizadas no ambiente outdoor apontaram um valor médio de 37,33 dB. Essa diferença está, muito possivelmente, associada às considerações feitas acerca do ganho das antenas transmissora e receptora.

Nos demais pontos o comportamento médio observado pode ser considerado natural, ou seja, com o acréscimo do nível de atenuação com o aumento da distância. A exceção fica por conta do ponto situado a 60 metros do local onde foi posicionado o roteador *wireless*, o qual apresentou um nível de atenuação destoante, visto que ele foi superior ao valor médio observado à distância de 75 metros e muito próximo ao valor observado à distância de 90 metros.

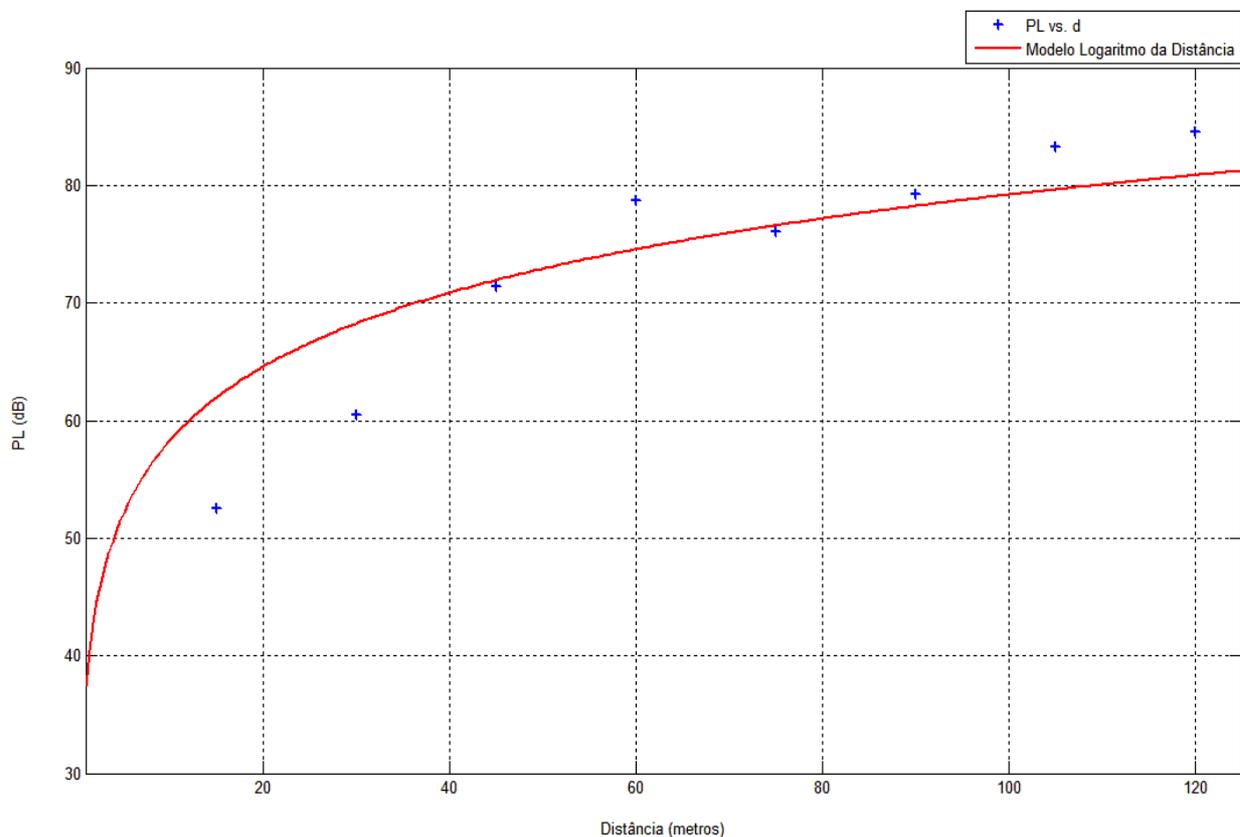
Outra avaliação interessante é identificar qual o fator de atenuação associado aos dados obtidos de acordo com o modelo logaritmo da distância:

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (4.1)$$

$$PL(d)[dB] = PL(1m)[dB] + 10n \log\left(\frac{d}{1}\right),$$

$$PL(d)[dB] = 37,33 + 10n \log(d). \quad (4.2)$$

Com a ferramenta *Curve Fitting Tool* do Matlab 7.0, utilizando os valores médios da atenuação observados nos 8 pontos entre 15 e 120 metros de distância e a Fórmula 4.2, é possível encontrar um fator de atenuação  $n = 2,093$ , com fator  $R^2$  de  $0,7822^1$  e RMSE (raiz do erro médio quadrático) de 5,287 dB. Esse valor encontrado para o fator de atenuação é bastante coerente com a teoria, que indica um valor igual a 2 para propagação no espaço livre. Na Figura 4.6 encontra-se o gráfico cruzando os dados reais obtidos (pontos em forma de cruz azul) e a curva de atenuação derivada do modelo logaritmo da distância com fator de atenuação igual a 2,093 (linha contínua vermelha).



**Figura 4.6** – Curva de atenuação do sinal prevista pelo modelo logaritmo da distância para o ambiente outdoor.

<sup>1</sup> O fator  $R^2$  indica, de forma percentual, quão bem um modelo matemático representa sua variável dependente [54]. Em outras palavras, é um valor que indica quanto da variação da grandeza aferida é explicada pelas variáveis de entrada do modelo.

## 4.2.2 Análise da aderência dos modelos para ambiente *outdoor* aos dados obtidos

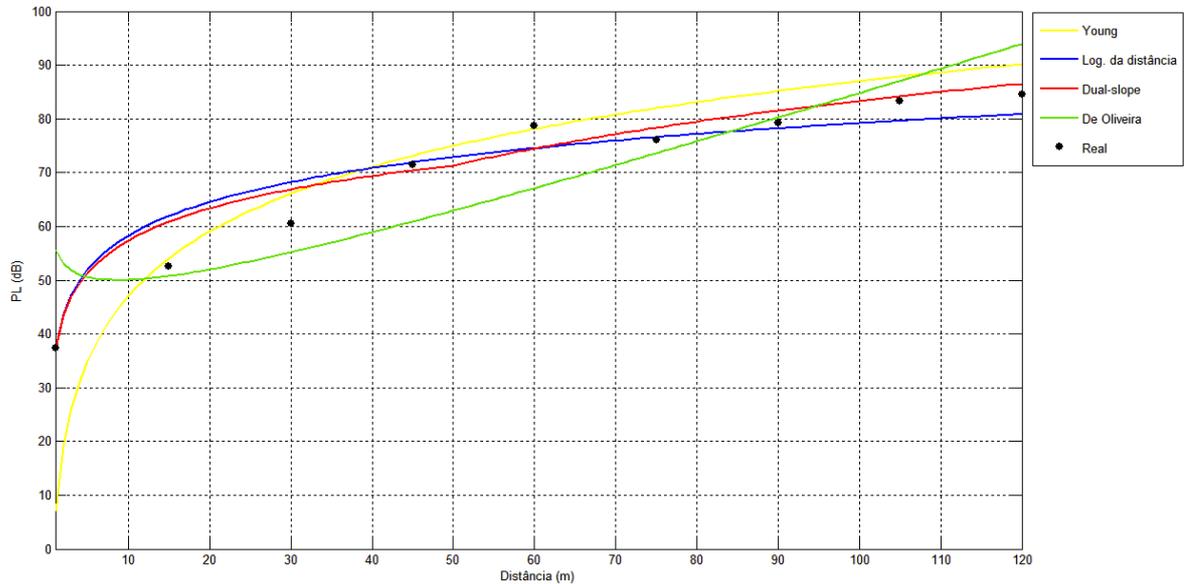
Os dados obtidos para a propagação do sinal transmitido a partir do roteador *wireless* no ambiente *outdoor* foram cruzados com os quatro modelos apresentados no Capítulo 3, a fim de identificar qual, dentre eles, demonstra maior aderência aos valores médios obtidos. A Tabela 4.3 sumariza os modelos utilizados com suas respectivas expressões e parâmetros encontrados. Para os dois primeiros modelos os parâmetros necessários foram obtidos com a ferramenta *Curve Fitting Tool* do Matlab 7.0 aplicada aos valores médios da atenuação em cada um dos pontos de medição. No terceiro modelo os parâmetros utilizados foram aqueles sugeridos em [46] e para o quarto modelo os parâmetros foram encontrados via regressão linear, aplicada a todo o conjunto de dados oriundo das medições, como sugerido pelo autor em [48]. Essa parametrização também permite a geração das curvas de atenuação prevista por cada modelos, as quais são indicadas na Figura 4.7, onde elas podem também serem comparadas aos dados reais obtidos nas medições.

**Tabela 4.3** – Modelos, expressões e parâmetros utilizados no comparativo com os dados obtidos para a propagação de sinal em ambiente *outdoor*.

Modelo	Expressão	Parametrização
Young	$PL(d) = 40 \log(d) - 10 \log(\beta')$	$\beta' = 0,1995$
Logaritmo da distância	$PL(d) = 37,33 + 10n \log(d)$	$n = 2,093$
<i>Dual-slope</i>	$PL(d) = \begin{cases} 37,33 + 10n_1 \log(d), & \text{se } 1 < d < d_c \\ 37,33 + 10n_1 \log(d_c) + 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_c}\right), & \text{se } d > d_c \end{cases}$	$n_1 = 2$ $n_2 = 4$ $d_c = 50\text{m}$
De Oliveira <i>et al.</i>	$PL(d) = P_0 - 10 \log(d) + 10md$	$P_0 = 55,054 \text{ dB}$ $m = 0,04973$

De posse das expressões e seus respectivos parâmetros é possível montar uma tabela com os valores previstos para a atenuação por cada um dos modelos nas distâncias onde foram feitas as medições. A partir dos valores médios obtidos nas medições é calculada a RMSE cometida por cada modelo para que seja feita a comparação do desempenho entre

eles. Todas essas informações são apresentadas na Tabela 4.4, na qual se pode observar que o modelo *dual-slope* apresentou o melhor desempenho com RMSE de 4,553 dB.



**Figura 4.7** – Curvas de atenuação do sinal previstas pelos modelos e parâmetros da Tabela 4.3.

**Tabela 4.4** – Comparativo entre os valores previstos pelos modelos em análise e aqueles aferidos para propagação outdoor.

	Real	Modelo de Young	Modelo logaritmo da distância	Modelo <i>dual-slope</i>	Modelo de Oliveira <i>et al.</i>
PL(15 m)	52,54 dB	54,04 dB	61,94 dB	60,85 dB	50,75 dB
PL(30 m)	60,44 dB	66,09 dB	68,24 dB	66,87 dB	55,20 dB
PL(45 m)	71,41 dB	73,13 dB	71,93 dB	70,39 dB	60,90 dB
PL(60 m)	78,75 dB	78,13 dB	74,54 dB	74,47 dB	67,11 dB
PL(75 m)	76,07 dB	82,00 dB	76,57 dB	78,35 dB	73,60 dB
PL(90 m)	79,23 dB	85,17 dB	78,23 dB	81,52 dB	80,27 dB
PL(105 m)	83,30 dB	87,85 dB	79,63 dB	84,20 dB	87,06 dB
PL(120 m)	84,51 dB	90,17 dB	80,84 dB	86,52 dB	93,94 dB
<b>RMSE</b>	-	<b>4,791 dB</b>	<b>5,287 dB</b>	<b>4,553 dB</b>	<b>7,433 dB</b>

### 4.2.3 Influência dos fatores climáticos na propagação do sinal em ambiente *outdoor*

A avaliação de possíveis efeitos dos fatores climáticos sobre o macro-comportamento da propagação do sinal em ambiente *outdoor* partiu de uma divisão no conjunto com as 35 medições realizadas. O conjunto foi ordenado de acordo com a umidade relativa do ar e dividido em três grupos com 12, 11 e 12 medições. O mesmo não foi feito com respeito à temperatura dado que a faixa de valores registradas durante as medições era relativamente pequena, levando a acreditar que não haveria efeito significativo deste parâmetro sobre a atenuação do sinal dentro da amostra em estudo, algo que foi comprovado posteriormente.

No primeiro conjunto foram agrupadas as medições com umidade relativa do ar entre 40 e 56%, com valor médio de 47%. No segundo conjunto a umidade relativa do ar variava entre 57 e 69%, com valor médio de 63%, ao passo que, no último conjunto, a umidade variava de 71 a 77% com média de 74%. Os valores médios de atenuação observados para cada um desses grupos estão registrados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5** – Valores médios da atenuação para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar.

	<b>Grupo I (UR entre 40 e 56%)</b>	<b>Grupo II (UR entre 57 e 69%)</b>	<b>Grupo III (UR entre 71 e 77%)</b>
Número de medições	12	11	12
UR média	47%	63%	74%
PL(15 m)	51,64 dB	51,83 dB	54,08 dB
PL(30 m)	58,61 dB	60,66 dB	62,05 dB
PL(45 m)	70,49 dB	70,55 dB	73,12 dB
PL(60 m)	77,89 dB	78,24 dB	80,09 dB
PL(75 m)	76,07 dB	76,84 dB	75,36 dB
PL(90 m)	78,55 dB	78,70 dB	80,40 dB
PL(105 m)	82,07 dB	83,27 dB	84,56 dB
PL(120 m)	84,29 dB	83,84 dB	85,63 dB

Para cada um do conjuntos foram levantados os seguintes aspectos: distância na qual ocorreram as quedas na conexão *wireless*; fator de atenuação de acordo com o modelo logaritmo da distância; e o alcance teórico da rede *wireless* em 2,4 GHz de acordo com o

modelo logaritmo da distância e o fator de atenuação identificado. Essas informações se encontram registradas na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** – *Variação dos aspectos queda de conexão, fator de atenuação e alcance teórico para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar.*

	<b>Grupo I</b> (UR entre 40 e 56%)	<b>Grupo II</b> (UR entre 57 e 69%)	<b>Grupo III</b> (UR entre 71 e 77%)
Quedas de conexão a 105 metros do AP	0	0	3
Quedas de conexão a 120 metros do AP	10	9	9
Quedas de conexão a 135 metros do AP	1	2	0
Quedas de conexão a 150 metros do AP	1	0	0
Fator de atenuação $n$	2,049	2,078	2,154
Distância a partir da qual PL > 80 dB (teórico)	121 m	113 m	96 m

Os dados da Tabela 4.6 sugerem a ocorrência de um incremento no nível de atenuação do sinal com o aumento da umidade relativa do ar em ambiente *outdoor*. Esta afirmação é baseada na variação do fator de atenuação, do modelo logaritmo da distância, para os três grupos em análise. Quanto maior a umidade relativa do ar, mais afastado ficou o fator de atenuação do valor teórico  $n = 2$ . Uma consequência direta deste fato é a redução do alcance teórico da rede sem fio, uma vez que, quanto maior a umidade relativa do ar, mais rapidamente o sinal atingiria o limite de perda sugerido pelo IEEE.

No documento [18], o IEEE sugere que a antena receptora tenha sensibilidade suficiente para trabalhar com sinais cuja perda seja de até 76 dB. Na prática foi observado que, com os equipamentos utilizados, a conexão mantém-se estável para níveis de atenuação de até 80 dB<sup>2</sup>, valor que foi utilizado como parâmetro para definição do alcance

<sup>2</sup> A interface para conexão *wireless* baseada no padrão IEEE 802.11 existente no *laptop* utilizado nas medições não especifica o nível máximo de atenuação com o qual o equipamento pode operar. Seu *data sheet* apenas afirma que o produto é certificado pela Wi-Fi Alliance, ou seja, sugerindo que as recomendações do padrão IEEE 802.11 são respeitadas pelo equipamento.

teórico na Tabela 4.6. Outro aspecto que chamou a atenção foi a observação da distância na qual ocorreram as quedas de conexão ao longo das medições realizadas. Na maioria dos casos (28 de 35) a queda ocorreu a 120 metros do roteador *wireless* ou no deslocamento entre este ponto e o posterior. Apenas em quatro oportunidades foi possível ultrapassar essa distância, todas nos grupos I ou II. Em contrapartida, em três oportunidades a queda de conexão ocorreu antes da distância de 120 metros, todas elas registradas no grupo III, apoiando a constatação de que há incremento do fator de atenuação com o aumento da umidade relativa do ar.

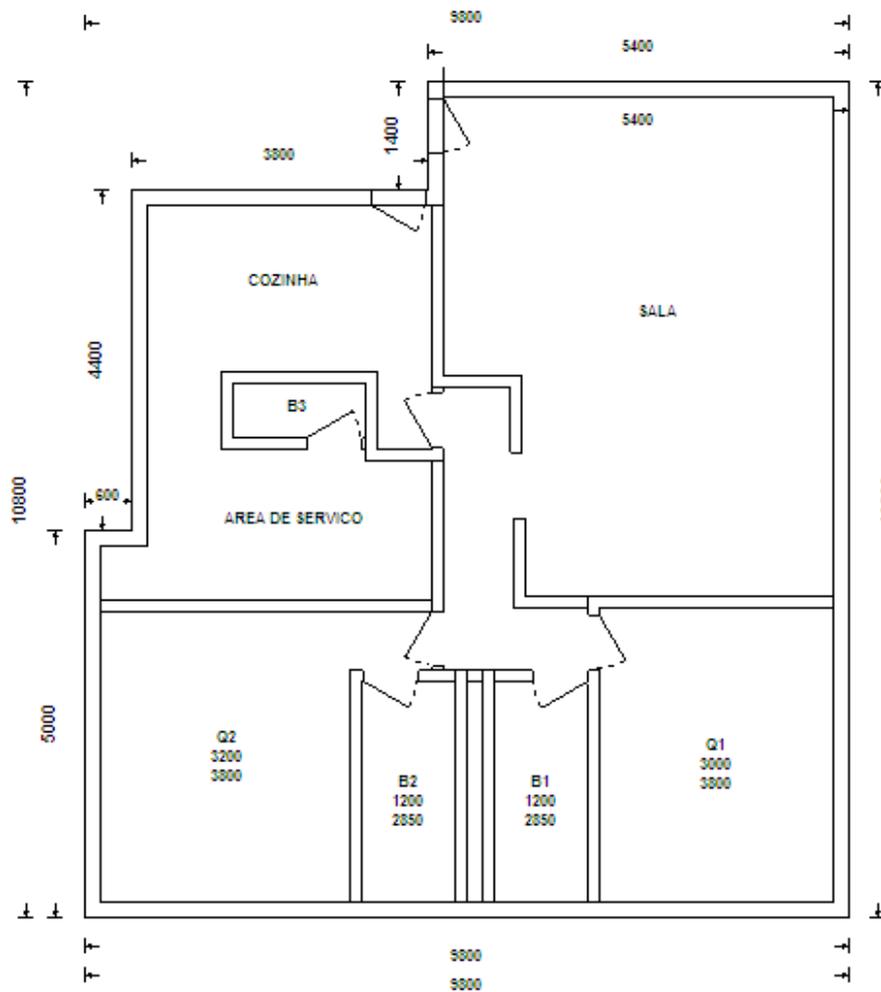
### 4.3 Resultado das medições em ambientes *indoor*

As medições em ambiente *indoor* foram realizadas em um apartamento no município de Jaboatão dos Guararapes, região metropolitana da cidade de Recife, em Pernambuco. A opção de realizar as medições em um apartamento partiu do interesse em observar os efeitos dos fatores climáticos, o que eliminou a possibilidade de realização dos testes em ambiente com climatização artificial. A Figura 4.8 apresenta um esboço da planta baixa do apartamento onde foram realizadas as medições.

O roteador *wireless* foi posicionado no quarto 1 (indicado na Figura 4.8 por Q1), próximo ao seu canto inferior esquerdo, e as medições realizadas, a partir dele, em duas direções: a primeira vertical, na direção da sala; a segunda sob um ângulo aproximado de 36°, na direção da cozinha. Cada uma delas foi chamada de raia e a opção em tomar as medidas em duas raias distintas ocorreu em virtude das dimensões reduzidas do imóvel.

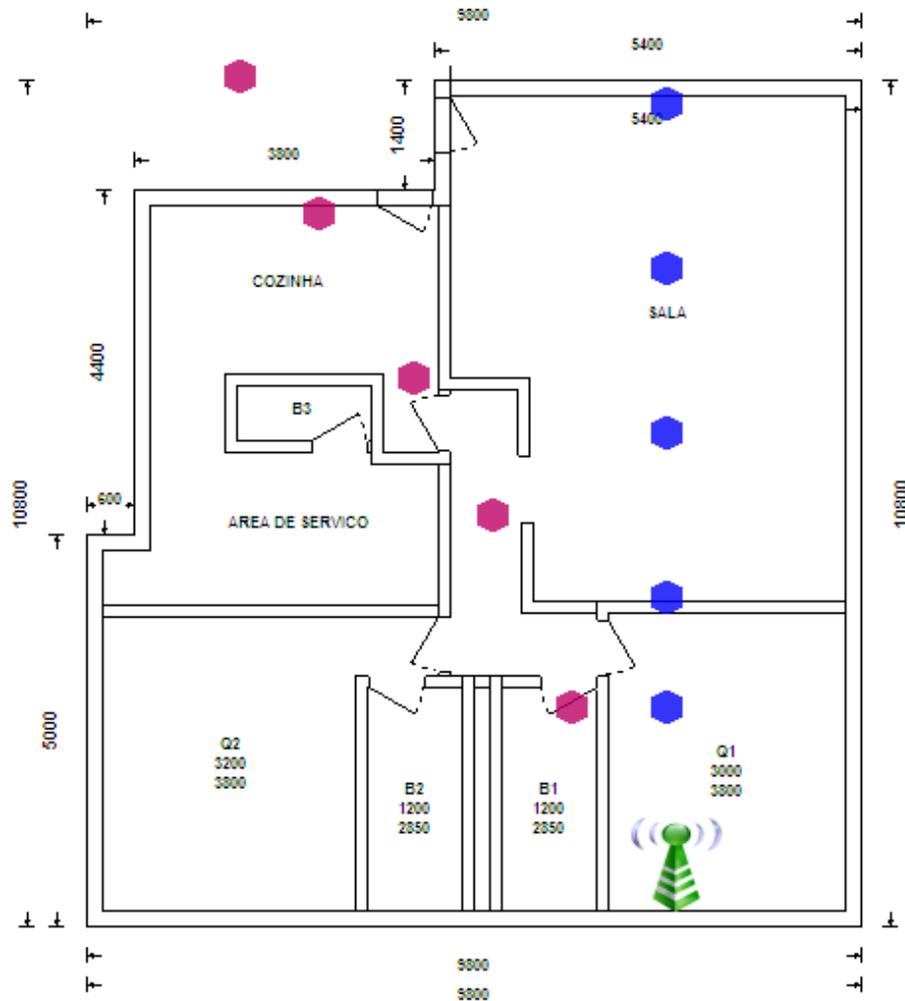
Na definição dos pontos onde foram realizadas as medições buscou-se padronizar a distância entre eles em torno de 2 metros. Nem sempre isto foi possível em virtude da disposição de paredes e móveis no interior da residência. Para cada uma das raias foram tomados cinco pontos para medição, nas seguintes distâncias:

- Raia 1 (na direção da sala): 2,6 m; 4,3 m; 6,3 m; 8,3 m; 10,3 m.
- Raia 2 (na direção da cozinha): 2,6 m; 5,3 m; 7,9 m; 10,3 m; 12,7 m.



**Figura 4.8** – Planta baixa da residência onde foram realizadas as medições indoor.

A Figura 4.9 esboça a posição dos 10 pontos citados e do roteador *wireless*. Além dessas, também foram tomadas medições a 1 metro do roteador *wireless*, que tiveram seus valores médios considerados válidos para ambas as raias. Durante as medições buscou-se garantir que algumas condições não fossem alteradas, tais como: posição de móveis e portas no interior da residência; quantidade de pessoas (apenas uma) na residência; altura em que foram posicionados roteador *wireless* e *laptop* (próximas de 1 metro).



**Figura 4.9** – Localização dos pontos onde foram realizadas as medições indoor.

De forma similar às medições em ambiente *outdoor*, em cada ponto visitado foram coletadas cerca de 20 amostras da atenuação do sinal da rede sem fio durante o período de 1 minuto. Foram realizadas 30 baterias de medição, passando por cada um dos 11 pontos determinados (incluindo a distância de referência) e totalizando uma média de 600 amostras da atenuação do sinal em cada um deles. Assim como no caso das medições *outdoor*, as medições *indoor* foram realizadas em diferentes dias e sob diferentes condições climáticas no que diz respeito, principalmente, a umidade relativa do ar. As tabelas 4.7 (Raia 1) e 4.8 (Raia 2) sumarizam os resultados das medições.

**Tabela 4.7 – Resultado das medições indoor (Raia 1).**

Bateria	Temp. [°C]	Umidade Relativa	PL(1 m) [dB]	PL(2,6 m) [dB]	PL(4,3 m) [dB]	PL(6,3 m) [dB]	PL(8,3 m) [dB]	PL(10,3 m) [dB]
1	31	55%	32,45	40,20	50,30	55,40	58,70	62,87
2	31	55%	36,00	38,35	48,89	55,09	56,91	61,59
3	31	55%	34,95	38,40	52,45	58,75	60,35	63,75
4	30	55%	34,55	39,89	50,30	57,20	58,50	61,25
5	30	56%	31,90	37,52	49,81	58,30	56,85	63,80
6	29	58%	37,25	40,30	49,90	57,20	58,19	63,90
7	30	60%	35,00	40,75	50,90	57,45	61,30	59,05
8	29	60%	34,33	43,85	51,35	57,00	56,33	63,76
9	28	60%	38,33	41,40	51,95	55,90	58,20	61,71
10	28	61%	36,80	41,70	51,80	55,90	58,67	66,70
11	30	65%	36,85	43,75	49,57	53,80	59,70	58,05
12	29	65%	38,60	39,50	49,30	53,35	57,15	60,65
13	29	66%	38,43	42,85	51,25	59,45	60,00	66,15
14	29	67%	41,15	42,40	51,00	56,80	63,05	65,90
15	28	67%	37,10	43,00	47,80	56,15	61,30	62,00
16	30	68%	43,00	47,67	47,95	55,25	58,50	65,10
17	29	68%	41,70	45,45	48,20	53,70	56,30	65,00
18	30	70%	38,30	44,70	49,25	54,30	58,35	67,48
19	29	71%	42,30	43,60	48,60	54,45	60,20	66,60
20	29	71%	37,45	43,10	47,25	53,00	60,35	62,20
21	29	72%	41,20	43,55	48,70	56,40	59,65	67,20
22	27	74%	38,75	48,15	50,90	57,00	59,70	59,00
23	27	74%	37,90	46,15	51,75	57,95	58,80	61,85
24	27	75%	38,90	48,40	51,55	57,60	58,55	66,45
25	27	75%	41,85	45,10	51,35	62,10	64,20	69,15
26	26	75%	38,70	45,50	50,70	58,00	60,65	66,85
27	27	78%	41,35	41,25	54,41	58,21	62,70	67,35
28	28	79%	36,05	38,75	52,55	55,62	62,75	62,95
29	27	80%	36,90	41,05	52,45	59,15	64,33	65,50
30	27	81%	34,75	39,05	52,70	59,30	63,30	62,05
<b>MÉDIA</b>			<b>37,76</b>	<b>42,51</b>	<b>50,50</b>	<b>56,66</b>	<b>59,78</b>	<b>63,86</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>			<b>2,88</b>	<b>3,00</b>	<b>1,71</b>	<b>2,09</b>	<b>2,27</b>	<b>2,84</b>

**Tabela 4.8 – Resultado das medições indoor (Raia 2).**

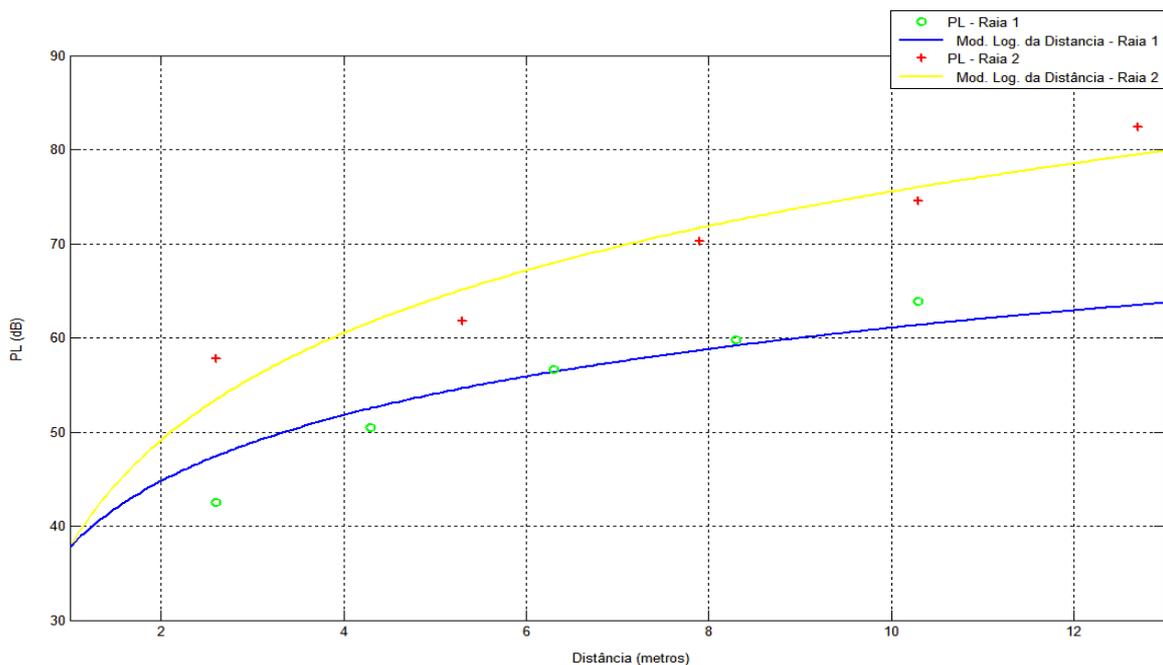
Bateria	Temp. [°C]	Umidade Relativa	PL(1 m) [dB]	PL(2,6 m) [dB]	PL(5,3 m) [dB]	PL(7,9 m) [dB]	PL(10,3 m) [dB]	PL(12,7 m) [dB]
1	31	55%	32,45	56,15	60,90	69,70	76,80	84,15
2	31	55%	36,00	54,05	62,30	67,20	72,05	83,50
3	31	55%	34,95	57,20	63,20	68,80	73,20	82,60
4	30	55%	34,55	54,65	61,15	67,20	72,45	82,95
5	30	56%	31,90	53,65	61,00	70,75	71,80	83,05
6	29	58%	37,25	58,67	62,05	69,70	73,95	83,69
7	30	60%	35,00	60,00	60,25	67,80	70,90	80,55
8	29	60%	34,33	60,30	59,80	68,90	71,35	82,14
9	28	60%	38,33	59,75	62,25	68,20	75,33	82,10
10	28	61%	36,80	57,20	63,15	70,57	74,50	82,43
11	30	65%	36,85	59,25	60,40	71,25	71,05	79,20
12	29	65%	38,60	56,45	60,95	69,70	75,55	78,40
13	29	66%	38,43	55,60	63,20	70,15	74,05	79,55
14	29	67%	41,15	60,20	64,10	71,60	78,75	80,35
15	28	67%	37,10	56,20	61,00	72,75	78,25	80,91
16	30	68%	43,00	59,67	62,20	72,60	73,15	80,76
17	29	68%	41,70	56,05	61,45	65,20	74,05	83,20
18	30	70%	38,30	57,48	64,50	67,00	75,85	78,40
19	29	71%	42,30	59,95	58,70	69,40	74,47	79,55
20	29	71%	37,45	58,10	62,45	66,35	72,90	81,05
21	29	72%	41,20	59,00	63,90	70,40	74,90	81,05
22	27	74%	38,75	57,60	58,95	71,05	75,05	87,90
23	27	74%	37,90	56,40	61,15	72,25	72,85	84,75
24	27	75%	38,90	55,45	60,60	69,95	75,50	83,25
25	27	75%	41,85	57,38	61,52	70,95	78,65	87,40
26	26	75%	38,70	57,70	64,65	71,40	73,30	83,60
27	27	78%	41,35	60,10	61,50	73,55	76,65	85,50
28	28	79%	36,05	60,20	63,75	73,05	74,30	83,24
29	27	80%	36,90	60,65	61,15	77,40	79,35	84,10
30	27	81%	34,75	59,90	62,29	72,35	76,35	84,40
<b>MÉDIA</b>			<b>37,76</b>	<b>57,83</b>	<b>61,82</b>	<b>70,24</b>	<b>74,58</b>	<b>82,46</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>			<b>2,88</b>	<b>2,05</b>	<b>1,53</b>	<b>2,50</b>	<b>2,31</b>	<b>2,37</b>

### 4.3.1 Análise dos dados

Apesar das dificuldades inerentes ao processo de propagação *indoor* foi interessante notar, com os dados levantados, um macro-comportamento bastante regular da atenuação imposta ao sinal transmitido pelo roteador *wireless*. Essa regularidade diz respeito ao fato de que, mesmo com as pequenas dimensões do espaço utilizado, sempre houve incremento da atenuação média do sinal com o aumento da distância entre o ponto de medição e o roteador *wireless*.

Assim como nas medições realizadas em ambiente *outdoor*, também foi observado que a atenuação média do sinal no ponto de referência estava ligeiramente abaixo do valor esperado de acordo com a equação de Friis para o espaço livre. Como poderia ser presumido, o valor médio encontrado nas medições *indoor*, de 37,76 dB, está muito próximo daquele identificado nas medições *outdoor* (37,33 dB).

Uma análise na planta baixa do local onde foram feitas as medições também permite presumir que a atenuação do sinal ao longo da raia 2 deve ser maior que na raia 1. Isto porque ao longo do segundo trajeto existe um maior número de obstáculos à propagação do sinal (além das paredes ilustradas na planta baixa do imóvel inexistem outros obstáculos nas duas raias com as mesmas dimensões de uma parede). A aplicação do modelo logaritmo da distância e a identificação do fator de atenuação associado a cada uma das raias confirmam essa hipótese. Para a raia 1 o fator de atenuação encontrado, com a ferramenta *Curve Fitting Tool* do Matlab 7.0, foi de 2,33 (com fator  $R^2$  de 87,5% e RMSE de 2,96 dB). O fator de atenuação da segunda raia, obtido da mesma maneira, foi de 3,778 (com fator  $R^2$  de 88,87% e RMSE de 3,29 dB). A Figura 4.10 exibe as duas curvas de atenuação e os respectivos dados que as originaram.



**Figura 4.10** – Curvas de atenuação do sinal previstas pelo modelo logaritmo da distância para as raia 1 e 2 no ambiente indoor.

### 4.3.2 Análise da aderência dos modelos para ambiente *indoor* aos dados obtidos

Foi realizado um cruzamento entre os valores médios de atenuação para as duas raia analisadas e os seguintes modelos para propagação *indoor*: o modelo da ITU; o modelo logaritmo da distância; o modelo logaritmo da distância com incremento da atenuação por obstáculos (WAF); e o modelo de Cheung, Sau e Murch.

As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam as expressões e parâmetros utilizados em cada um dos modelos para as raia 1 e 2, respectivamente. Para os dois primeiros foi utilizada a ferramenta *Curve Fitting Tool* do Matlab 7.0 a fim de encontrar o coeficiente de perda  $N$  e o fator de atenuação  $n$  a partir dos valores médios da atenuação em cada um dos pontos aferidos. No terceiro modelo optou-se em utilizar fator de atenuação igual a 2 (espaço livre) e WAF igual 6,29 dB, como sugerido em [50]. Para o quarto modelo foram utilizados os parâmetros sugeridos pelos seus autores em [53]. Nesses 2 últimos foi considerado, para a raia 1, o efeito de uma parede sobre os últimos 4 pontos com ângulo de incidência igual a  $0^\circ$  ( $\theta_p$ ). Para a raia 2 considerou-se: o efeito de 1 parede sobre os 4 primeiros pontos, com ângulo de incidência igual a  $54^\circ$  ( $\theta_1$ ); o efeito de 2 paredes sobre o último ponto, com ângulos de incidência iguais a  $54^\circ$  ( $\theta_1$ ) e  $36^\circ$  ( $\theta_2$ ), respectivamente.

**Tabela 4.9** – Modelos, expressões e parâmetros utilizados no comparativo com os dados obtidos para a propagação de sinal em ambiente indoor, raia 1.

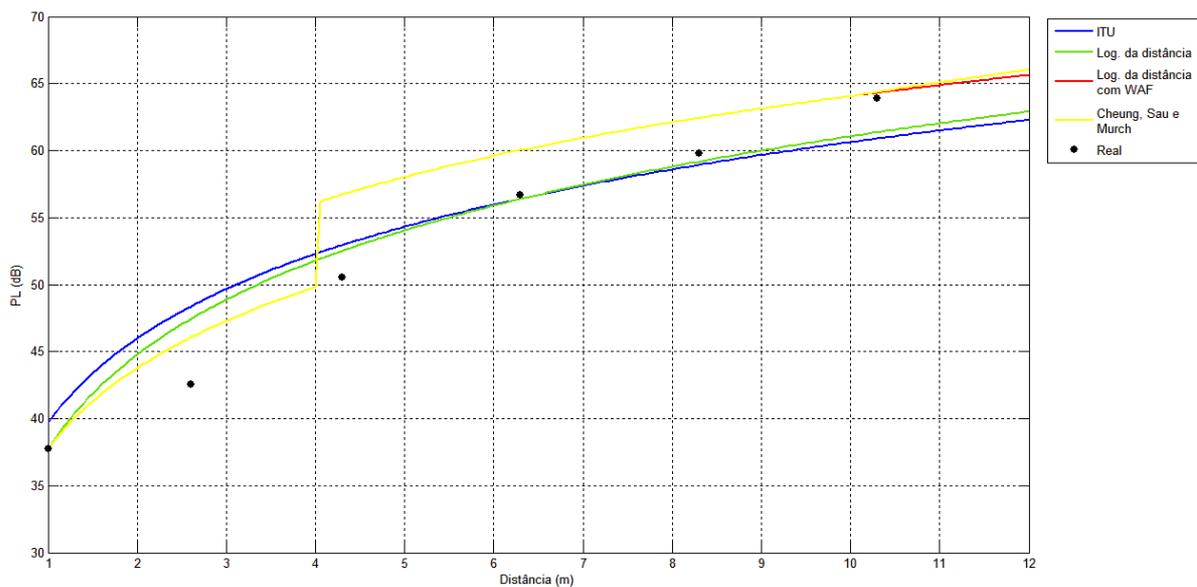
Modelo	Expressão	Parametrização
ITU	$PL(d) = 20\log(f) + N\log(d) - 28$	$f = 2.422$ MHz $N = 20,94$
Logaritmo da distância	$PL(d) = 37,76 + 10n\log(d)$	$n = 2,33$
Log. da distância com WAF	$PL(d) = 37,76 + 10n\log(d) + q \cdot WAF$	$n = 2$ $WAF = 6,29$ dB
Cheung, Sau e Murch	$PL(d) = 37,76 + 10n_1\log(d) \cdot U(d_{bp} - d) + 10 \cdot \left[ n_1\log(d_{bp}) + n_2\log\left(\frac{d}{d_{bp}}\right) \right] + \sum_{p=1}^P \frac{WAF(p)}{\cos(\theta_p)}$	$n_1 = 2$ $n_2 = 2,5$ $d_{bp} = 10$ m $WAF = 6,29$ dB $\theta_1 = 0^\circ$

**Tabela 4.10** – Modelos, expressões e parâmetros utilizados no comparativo com os dados obtidos para a propagação de sinal em ambiente indoor, raia 2.

Modelo	Expressão	Parametrização
ITU	$PL(d) = 20\log(f) + N\log(d) - 28$	$f = 2.422$ MHz $N = 35,65$
Logaritmo da distância	$PL(d) = 37,76 + 10n\log(d)$	$n = 3,777$
Log. da distância com WAF	$PL(d) = 37,76 + 10n\log(d) + q \cdot WAF$	$n = 2$ $WAF = 6,29$ dB
Cheung, Sau e Murch	$PL(d) = 37,76 + 10n_1\log(d) \cdot U(d_{bp} - d) + 10 \cdot \left[ n_1\log(d_{bp}) + n_2\log\left(\frac{d}{d_{bp}}\right) \right] + \sum_{p=1}^P \frac{WAF(p)}{\cos(\theta_p)}$	$n_1 = 2$ $n_2 = 2,5$ $d_{bp} = 10$ m $WAF = 6,29$ dB $\theta_1 = 54^\circ$ $\theta_2 = 36^\circ$

A partir das expressões e parâmetros de cada um dos modelos foram elaborados gráficos com as curvas de atenuação previstas por cada um deles e tabelas comparando os dados reais obtidos com os valores previstos pelos modelos. Mais uma vez a raiz do erro

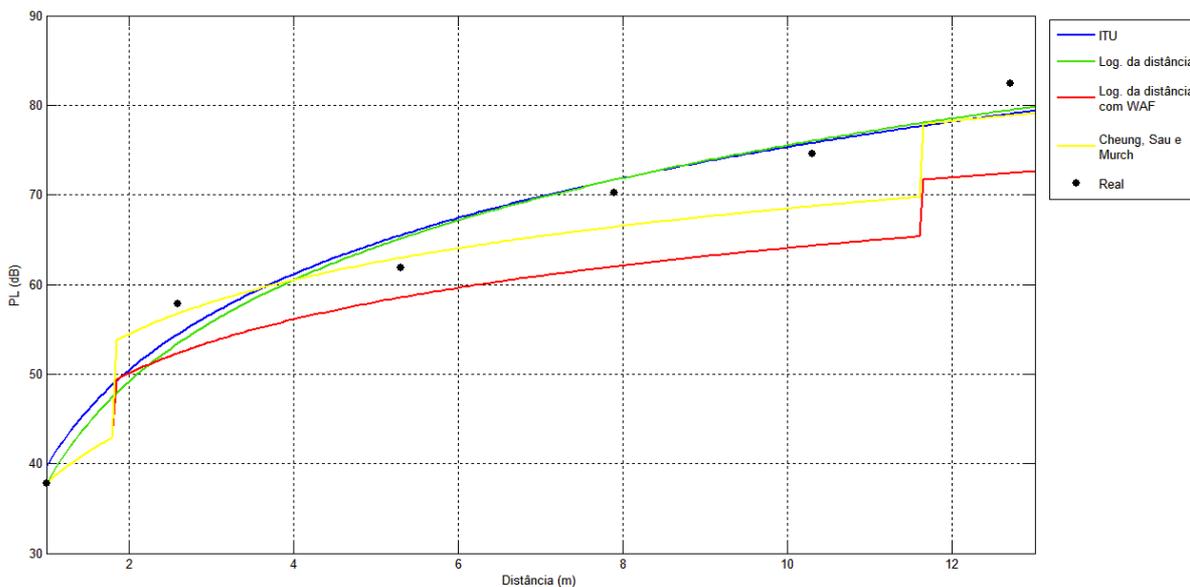
médio quadrático foi utilizada como recurso para a comparação do desempenho dos modelos. Os gráficos se encontram nas Figuras 4.11 e 4.12, ao passo que os resultados da análise comparativa são exibidos nas Tabelas 4.11 e 4.12. Deve-se destacar que, nas Figuras 4.11 e 4.12 há, em determinados trechos, sobreposição das curvas de atenuação previstas pelos modelos logaritmo da distância com WAF (linha vermelha) e o de Cheung, Sau e Murch (linha amarela), fazendo com que apenas uma delas apareça no gráfico.



**Figura 4.11** – Curvas de atenuação do sinal previstas pelos modelos e parâmetros da Tabela 4.9.

**Tabela 4.11** – Comparativo entre os valores previstos pelos modelos em análise e aqueles aferidos para propagação indoor, raia 1.

	Real	Modelo da ITU	Modelo logaritmo da distância	Modelo log. da distância com WAF	Modelo de Cheung, Sau e Murch
PL(2,6 m)	42,51 dB	48,37 dB	47,43 dB	46,06 dB	46,06 dB
PL(4,3 m)	50,50 dB	52,95 dB	52,52 dB	56,72 dB	56,72 dB
PL(6,3 m)	56,66 dB	56,42 dB	56,38 dB	60,04 dB	60,04 dB
PL(8,3 m)	59,78 dB	58,93 dB	59,17 dB	62,43 dB	62,43 dB
PL(10,3 m)	63,86 dB	60,80 dB	61,36 dB	64,31 dB	64,37 dB
<b>RMSE</b>	-	<b>3,535 dB</b>	<b>2,958 dB</b>	<b>4,181 dB</b>	<b>4,183 dB</b>



**Figura 4.12** – Curvas de atenuação do sinal previstas pelos modelos e parâmetros da Tabela 4.10.

**Tabela 4.12** – Comparativo entre os valores previstos pelos modelos em análise e aqueles aferidos para propagação indoor, raia 2.

	Real	Modelo da ITU	Modelo logaritmo da distância	Modelo log. da distância com WAF	Modelo de Cheung, Sau e Murch
PL(2,6 m)	57,83 dB	54,48 dB	53,43 dB	52,35 dB	56,76 dB
PL(5,3 m)	61,82 dB	65,50 dB	65,12 dB	58,54 dB	62,95 dB
PL(7,9 m)	70,24 dB	71,68 dB	71,66 dB	62,00 dB	66,41 dB
PL(10,3 m)	74,58 dB	75,79 dB	76,01 dB	64,31 dB	68,78 dB
PL(12,7 m)	82,46 dB	79,03 dB	79,45 dB	72,42 dB	78,83 dB
<b>RMSE</b>	-	<b>3,168 dB</b>	<b>3,293 dB</b>	<b>8,873 dB</b>	<b>3,993 dB</b>

Os dados apontam para um melhor desempenho, na média, do modelo logaritmo da distância com RMSE da ordem de 3 dB. Os modelos que incorporam aspectos determinísticos em sua formulação apresentaram desempenho inferior aos modelos que abrem mão deste tipo de recurso.

### 4.3.3 Influência dos fatores climáticos na propagação do sinal em ambiente *indoor*

Na avaliação de possíveis efeitos dos fatores climáticos sobre o macro-comportamento da propagação do sinal em ambiente *indoor* foram realizadas análises bastante similares às aquelas feitas para ambiente *outdoor*. Inicialmente, o universo de 30 medições foi ordenado de acordo com a umidade relativa do ar observada em cada medição e posteriormente dividido em 3 grupos com 10 medições cada.

No primeiro grupo encontravam-se as medições com umidade relativa do ar na faixa de 55 a 61% e valor médio de 58%. Para o segundo grupo a faixa ia de 65 a 71% com média de 68%. Por fim, o terceiro grupo registrava as medições com umidade relativa do ar variando de 72% a 81% e média de 76%. Os valores médios da atenuação dos três grupos em cada um dos pontos sob análise, para as raias 1 e 2, são indicados nas Tabelas 4.13 e 4.14, respectivamente.

A partir dos valores médios de atenuação por grupo foram analisados, para as raias 1 e 2: o fator de atenuação segundo o modelo logaritmo da distância; e o alcance teórico da rede sem fio em cada uma das raias de acordo com o fator de atenuação identificado. Mais uma vez a ferramenta *Curve Fitting Tool* do Matlab 7.0 foi utilizada para determinação do fator de atenuação. Os resultados encontram-se registrados nas Tabelas 4.15 e 4.16.

**Tabela 4.13** – Valores médios da atenuação para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar, raia 1.

	<b>Grupo I</b> <b>(UR entre 55 e 61%)</b>	<b>Grupo II</b> <b>(UR entre 65 e 71%)</b>	<b>Grupo III</b> <b>(UR entre 72 e 81%)</b>
Número de medições	10	10	10
UR média	58%	68%	76%
PL(2,6 m)	40,24 dB	43,60 dB	43,70 dB
PL(4,3 m)	50,77 dB	49,02 dB	51,71 dB
PL(6,3 m)	56,82 dB	55,03 dB	58,13 dB
PL(8,3 m)	58,40 dB	59,49 dB	61,46 dB
PL(10,3 m)	62,84 dB	63,91 dB	64,84 dB

**Tabela 4.14** – Valores médios da atenuação para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar, raia 2.

	<b>Grupo I (UR entre 55 e 61%)</b>	<b>Grupo II (UR entre 65 e 71%)</b>	<b>Grupo III (UR entre 72 e 81%)</b>
Número de medições	10	10	10
UR média	58%	68%	76%
PL(2,6 m)	57,16 dB	57,90 dB	58,44 dB
PL(5,3 m)	61,61 dB	61,90 dB	61,95 dB
PL(7,9 m)	68,88 dB	69,60 dB	72,24 dB
PL(10,3 m)	73,23 dB	74,81 dB	75,69 dB
PL(12,7 m)	82,72 dB	80,14 dB	84,52 dB

**Tabela 4.15** – Variação dos aspectos fator de atenuação e alcance teórico para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar, raia 1.

	<b>Grupo I (UR entre 55 e 61%)</b>	<b>Grupo II (UR entre 65 e 71%)</b>	<b>Grupo III (UR entre 72 e 81%)</b>
Fator de atenuação $n$	2,234	2,265	2,491
Distância a partir da qual PL > 80 dB (teórico)	78 m	73 m	50 m

**Tabela 4.16** – Variação dos aspectos fator de atenuação e alcance teórico para os 3 grupos com diferentes médias de umidade relativa do ar, raia 2.

	<b>Grupo I (UR entre 55 e 61%)</b>	<b>Grupo II (UR entre 65 e 71%)</b>	<b>Grupo III (UR entre 72 e 81%)</b>
Fator de atenuação $n$	3,705	3,702	3,925
Distância a partir da qual PL > 80 dB (teórico)	14 m	14 m	12 m

Os dados das Tabelas 4.15 e 4.16 sugerem que, assim como no caso da avaliação dos efeitos dos fatores climáticos sobre o macro-comportamento da propagação de sinais em ambiente *outdoor*, o aumento da umidade relativa do ar acarreta um incremento no nível de atenuação imposto ao sinal e, conseqüentemente, na redução do alcance teórico da rede.

## 4.4 Um novo modelo para o macro-comportamento da propagação de sinal em 2,4 GHz

A proposta de um novo modelo surgiu da curiosidade de identificar, utilizando regressão linear múltipla, a combinação de variáveis que melhor representa o macro-comportamento da propagação de sinal em 2,4 GHz baseado nos dados obtidos em ambiente *outdoor* e *indoor*. Pretende-se encontrar um modelo generalista, tal qual o modelo logaritmo da distância, utilizável em qualquer tipo de ambiente e, possivelmente, levando em consideração aspectos climáticos.

Por meio de regressão linear múltipla busca-se um modelo com a forma [54]

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon, \quad (4.3)$$

em que  $Y$  é a grandeza modelada,  $X_1, X_2, \dots, X_k$  são as variáveis explicativas e  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  são os coeficientes da equação (ou regressão). A componente aleatória  $\varepsilon$  representa o erro cometido pelo modelo e a capacidade de suas variáveis independentes explicarem o fenômeno. Os coeficiente da equação devem ser encontrados de acordo com alguma premissa estatística, dentre as quais pode-se destacar o método dos mínimos quadrados com o qual se busca minimizar a soma dos erros quadráticos cometidos pelo modelo quando comparado à amostra de dados utilizada.

A grandeza a ser modelada no problema em estudo é a atenuação do sinal, em decibéis. Para o papel de variáveis explicativas foram elencadas algumas possibilidades com base nos modelos vistos ao longo do trabalho e também do interesse em observar a relevância em incluir os aspectos climáticos em um novo modelo. Assim, as seguintes variáveis foram consideradas:

- logaritmo da distância ( $\log(d)$ ), tal qual sugerido no modelo clássico que recebe o mesmo nome da variável;
- a própria distância ( $d$ ), como sugerido no Modelo de Oliveira *et al.* [48] a fim de penalizar um pouco mais os efeitos do aumento da distância;
- logaritmo da umidade relativa do ar, em valor absoluto ( $\log(UR)$ );
- logaritmo da temperatura em graus Celsius ( $\log(T)$ ).

Para as variáveis climáticas temperatura e umidade relativa do ar, optou-se em utilizá-las de forma logarítmica após observar, por meio da aplicação de regressão linear aos dados das medições, que a utilização dos valores absolutos dessas variáveis interfere negativamente na modelagem (uma vez que aumenta o comprimento do intervalo de confiança dos  $\beta_i$ ) e não melhora o seu desempenho (o fator R2 não aumenta quando comparado aos modelos utilizando o logaritmo das variáveis em questão). No caso específico da umidade relativa do ar, a aplicação do logaritmo ao seu valor absoluto ( $< 1$ ) implica em uma contribuição negativa da variável, mas que é diretamente proporcional à atenuação, ou seja, quanto menor a umidade relativa do ar, mais negativo será o logaritmo e menor é sua contribuição para a atenuação.

Essa proposta está alinhada com aquilo que foi observado a partir dos dados obtidos nas medições e das avaliações feitas nas Seções 4.2.3 e 4.3.3, e representa um esforço em explicar de maneira razoável os efeitos da umidade relativa do ar sobre a propagação do sinal. Matematicamente, outras formulações são possíveis sem que haja perda de desempenho do modelo, mas talvez elas não traduzissem tão bem as condições observadas.

Definidas as possíveis variáveis explicativas partiu-se para a busca da melhor combinação delas por meio de regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições. Por uma questão de coerência, e até mesmo a fim de permitir uma comparação dos resultados, os dados foram divididos em três partes: aqueles referentes às medições *outdoor*; os referentes às medições *indoor* na raia 1; e os referentes às medições *indoor* na raia 2. Os dados, que incluem os valores de atenuação aferidos, foram exportados para o Matlab 7.0 e, a partir da função *regress*<sup>3</sup>, calculados os parâmetros ( $\beta_i$ ) do modelo, com seus respectivos intervalos de confiança, e as estatísticas acerca de sua adequação.

As Tabelas 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam os resultados desta investigação com parâmetro comparativo R<sup>2</sup>.

---

<sup>3</sup> No Apêndice B deste trabalho é feita uma breve descrição sobre o uso da função *regress* do Matlab 7.0.

**Tabela 4.17** – Regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições outdoor.

Modelo	R <sup>2</sup>
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d)$	89,98%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d$	94,41%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR)$	94,61%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR) + \beta_4 \log(T)$	94,61%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR)$	83,10%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR)$	83,32%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR) + \beta_3 \log(T)$	83,32%

**Tabela 4.18** – Regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições indoor, raia 1.

Modelo	R <sup>2</sup>
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d)$	88,76%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d$	92,08%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR)$	93,11%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR) + \beta_4 \log(T)$	93,19%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR)$	90,50%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR)$	91,53%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR) + \beta_3 \log(T)$	91,61%

**Tabela 4.19** – Regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições indoor, raia 2.

Modelo	R <sup>2</sup>
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d)$	94,16%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d$	94,47%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR)$	94,85%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR) + \beta_4 \log(T)$	94,87%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR)$	87,70%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR)$	88,08%

$$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR) + \beta_3 \log(T) \quad | \quad 88,10\%$$

As Tabelas 4.17, 4.18 e 4.19 sugerem que:

- as variáveis logaritmo da distância ( $\log(d)$ ) e distância ( $d$ ) propiciam uma melhor modelagem da grandeza atenuação quando combinadas;
- incluir a variável  $\log(UR)$  ao modelo melhora a explicação da grandeza aferida;
- a variável  $\log(T)$  acrescenta muito pouco ao modelo e possui, ainda, um problema não retratado nas tabelas: o intervalo de confiança de seu coeficiente multiplicativo sempre passa pelo 0 (zero), indicando que, para a amostra de dados sob análise, há incerteza sobre os efeitos desta variável na grandeza aferida. Como sua contribuição ao modelo é pequena, a literatura sugere [54] que a variável seja descartada.

Essa última condição é, até certo ponto, esperada, pois durante as medições a variação da temperatura foi muito pequena (mínima de 26°C e máxima de 31°C *indoor*; mínima de 28°C e máxima de 35°C *outdoor*). O fato é que, para os dados em análise, a temperatura não surge como uma variável capaz de auxiliar na modelagem, o que não descarta a possibilidade desta grandeza afetar o macro-comportamento da propagação do sinal.

Vistos os resultados da análise realizada por meio de regressão linear múltipla e as considerações sobre os efeitos da temperatura chega-se ao seguinte modelo proposto

$$PL(d, UR)[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR), \quad (4.4)$$

onde os coeficiente  $\beta_i$  são positivos,  $0 < UR < 1$ ,  $d \geq 1$  metro (distância de referência).

#### 4.4.1 Interpretação do modelo proposto

O modelo logaritmo da distância considera que a atenuação do sinal, em decibéis, possui uma parcela constante, igual à atenuação média observada no ponto de referência,

mais uma parcela variável proporcional a  $d^n$ . Re-escrevendo a Expressão 4.4 é possível realizar uma análise comparativa interessante entre os modelos:

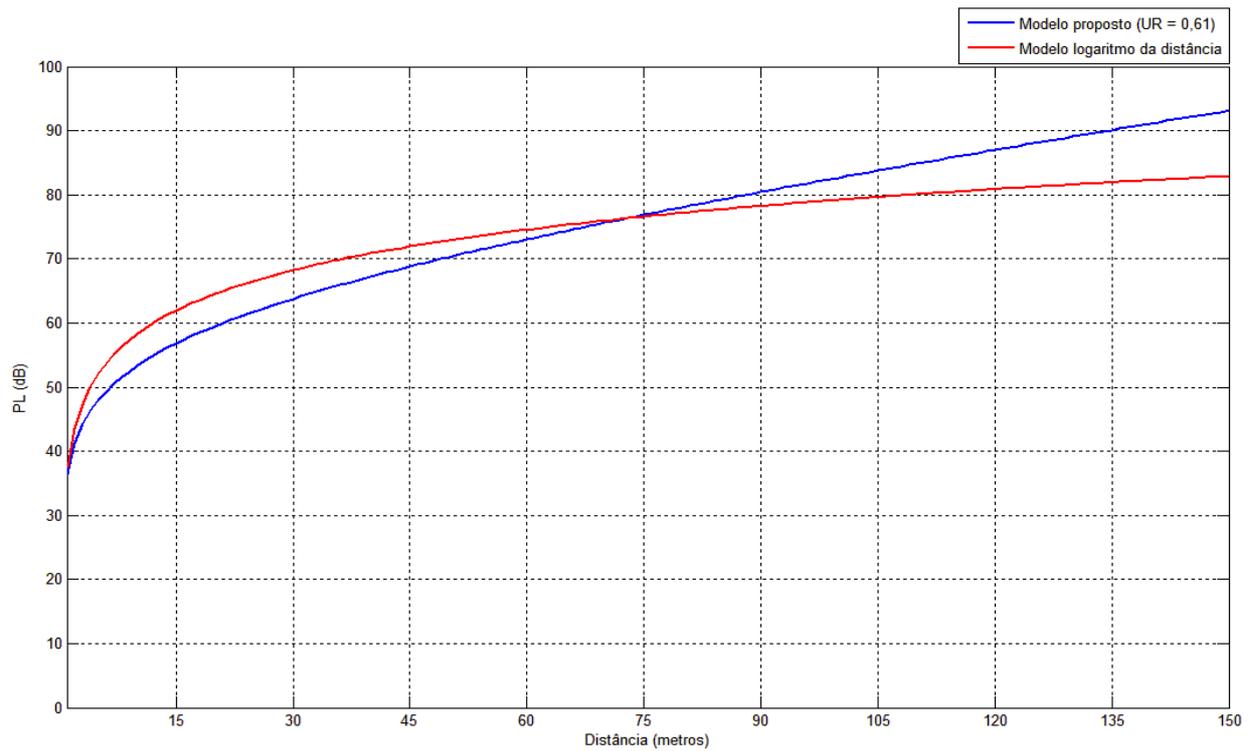
$$\begin{aligned} PL(d, UR)[dB] &= \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 (d - 1 + 1) + \beta_3 \log(UR) \\ PL(d, UR)[dB] &= \beta_0 + \beta_2 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 (d - 1) + \beta_3 \log(UR) \\ PL(d, UR)[dB] &= [\beta_0 + \beta_2 + \beta_3 \log(UR)] + \beta_1 \log(d) + \beta_2 (d - 1). \end{aligned} \quad (4.5)$$

Pela Expressão 4.5 é possível notar que, considerando um valor fixo para a umidade relativa do ar, o novo modelo também possui uma parcela constante definida pela soma dos termos entre colchetes. A componente variável, representando o incremento da atenuação com a distância, passa a obedecer a regra

$$PL(d) \propto d^{0,1\beta_1} \cdot 10^{0,1\beta_2(d-1)}. \quad (4.6)$$

Uma forma mais interessante de comparar os modelos é observar as curvas de atenuação produzidas por eles para, por exemplo, os dados obtidos nas medições *outdoor* (Figura 4.13). Para a aplicação do modelo proposto o valor da umidade relativa do ar foi fixado em 0,61 (valor médio observado ao longo das medições). A partir da figura pode-se salientar:

- o ponto de partida das curvas, ou atenuação na distância de referência, é basicamente o mesmo para ambos os modelos;
- o modelo proposto suaviza os efeitos da distância para os pontos mais próximos do transmissor;
- em contra-partida, para os pontos mais distantes, o modelo penaliza um pouco mais o efeito da distância quando comparado ao modelo logaritmo da distância.



**Figura 4.13** – Curvas de atenuação do sinal previstas pelo modelo proposto e pelo modelo logaritmo da distância para os dados das medições outdoor.

#### 4.4.2 Desempenho do modelo proposto

Torna-se interessante neste momento comparar o desempenho do modelo proposto neste trabalho com os demais modelos estudados no Capítulo 3. Mais uma vez essa comparação entre modelos é feita com a observação da raiz do erro médio quadrático (RMSE) cometido pela previsão gerada por cada um deles quando comparada aos dados reais.

Antes, faz-se necessário encontrar os coeficientes da Expressão 4.4 para cada um dos conjuntos de dados obtidos nas medições em ambiente *outdoor* e *indoor*. Exportando esses dados para o Matlab 7.0 e aplicando a eles a função *regress* chega-se aos seguintes coeficientes (Tabela 4.20) e expressões (Tabela 4.21):

**Tabela 4.20** – Coeficientes da regressão múltipla para os dados das medições outdoor e indoor.

Ambiente	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Outdoor	37,67	15,402	0,155	7,508
Indoor, raia 1	38,63	11,157	1,724	18,417
Indoor, raia 2	41,87	30,598	0,607	16,844

**Tabela 4.21** – Expressões obtidas através de regressão múltipla para a atenuação do sinal nos ambientes outdoor e indoor.

Ambiente	Expressão para a atenuação em dB
Outdoor	$PL(d, UR)[dB] = 37,67 + 15,402 \log(d) + 0,155d + 7,508 \log(UR)$
Indoor, raia 1	$PL(d, UR)[dB] = 38,63 + 11,157 \log(d) + 1,724d + 18,417 \log(UR)$
Indoor, raia 2	$PL(d, UR)[dB] = 41,87 + 30,598 \log(d) + 0,607d + 16,844 \log(UR)$

As Tabelas 4.4, 4.11 e 4.12 podem então ser re-escritas com a inclusão dos dados do novo modelo, salientando que no caso das medições em ambiente *outdoor* o valor considerado para a variável *UR* é de 0,61 (média da umidade relativa do ar observada durante as medições) e para as medições *indoor* seu valor é de 0,67. Foram geradas assim as Tabelas 4.22, 4.23 e 4.24.

**Tabela 4.22** – Comparativo de desempenho dos modelos estudados e o modelo proposto para os dados das medições outdoor.

	Real	Modelo de Young	Modelo logaritmo da distância	Modelo <i>dual-slope</i>	Modelo de Oliveira <i>et al.</i>	Modelo proposto
PL(15 m)	52,54 dB	54,04 dB	61,94 dB	60,85 dB	50,75 dB	56,50 dB
PL(30 m)	60,44 dB	66,09 dB	68,24 dB	66,87 dB	55,20 dB	63,46 dB
PL(45 m)	71,41 dB	73,13 dB	71,93 dB	70,39 dB	60,90 dB	68,50 dB
PL(60 m)	78,75 dB	78,13 dB	74,54 dB	74,47 dB	67,11 dB	72,75 dB
PL(75 m)	76,07 dB	82,00 dB	76,57 dB	78,35 dB	73,60 dB	76,56 dB
PL(90 m)	79,23 dB	85,17 dB	78,23 dB	81,52 dB	80,27 dB	80,11 dB
PL(105 m)	83,30 dB	87,85 dB	79,63 dB	84,20 dB	87,06 dB	83,46 dB
PL(120 m)	84,51 dB	90,17 dB	80,84 dB	86,52 dB	93,94 dB	86,68 dB
<b>RMSE</b>	-	<b>4,791 dB</b>	<b>5,287 dB</b>	<b>4,553 dB</b>	<b>7,433 dB</b>	<b>3,277 dB</b>

**Tabela 4.23** – Comparativo de desempenho dos modelos estudados e o modelo proposto para os dados das medições indoor, raia 1.

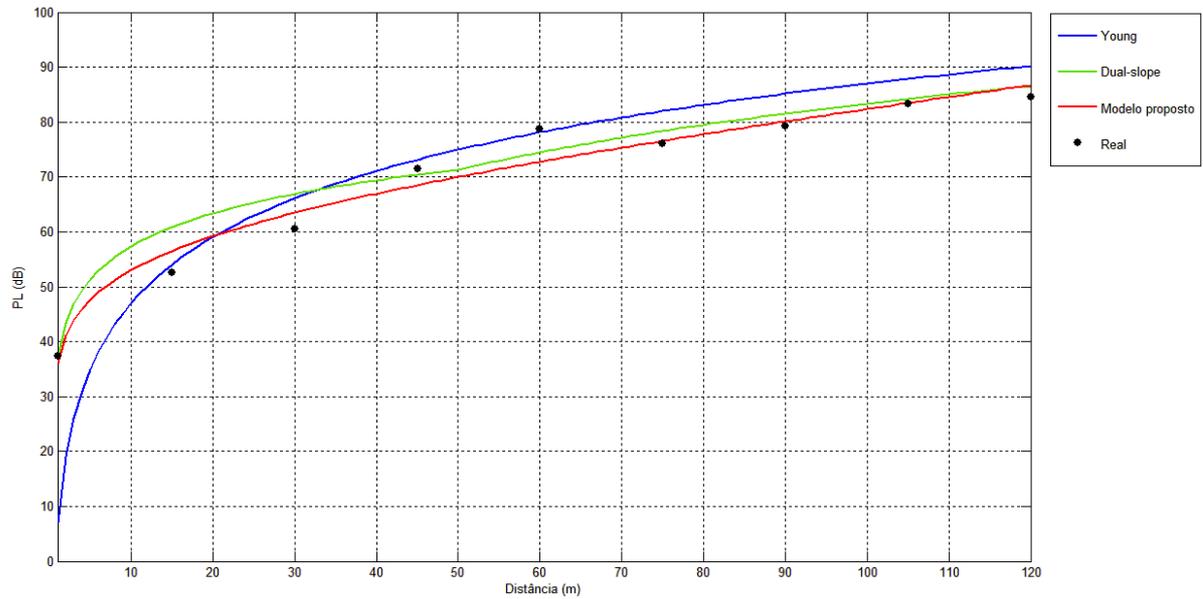
	Real	Modelo da ITU	Modelo logaritmo da distância	Modelo log. da distância com WAF	Modelo de Cheung, Sau e Murch	Modelo proposto
PL(2,6 m)	42,51 dB	48,37 dB	47,43 dB	46,06 dB	46,06 dB	44,54 dB
PL(4,3 m)	50,50 dB	52,95 dB	52,52 dB	56,72 dB	56,72 dB	49,91 dB
PL(6,3 m)	56,66 dB	56,42 dB	56,38 dB	60,04 dB	60,04 dB	55,21 dB
PL(8,3 m)	59,78 dB	58,93 dB	59,17 dB	62,43 dB	62,43 dB	59,99 dB
PL(10,3 m)	63,86 dB	60,80 dB	61,36 dB	64,31 dB	64,37 dB	64,48 dB
<b>RMSE</b>	-	<b>3,535 dB</b>	<b>2,958 dB</b>	<b>4,181 dB</b>	<b>4,183 dB</b>	<b>1,323 dB</b>

**Tabela 4.24** – Comparativo de desempenho dos modelos estudados e o modelo proposto para os dados das medições indoor, raia 2.

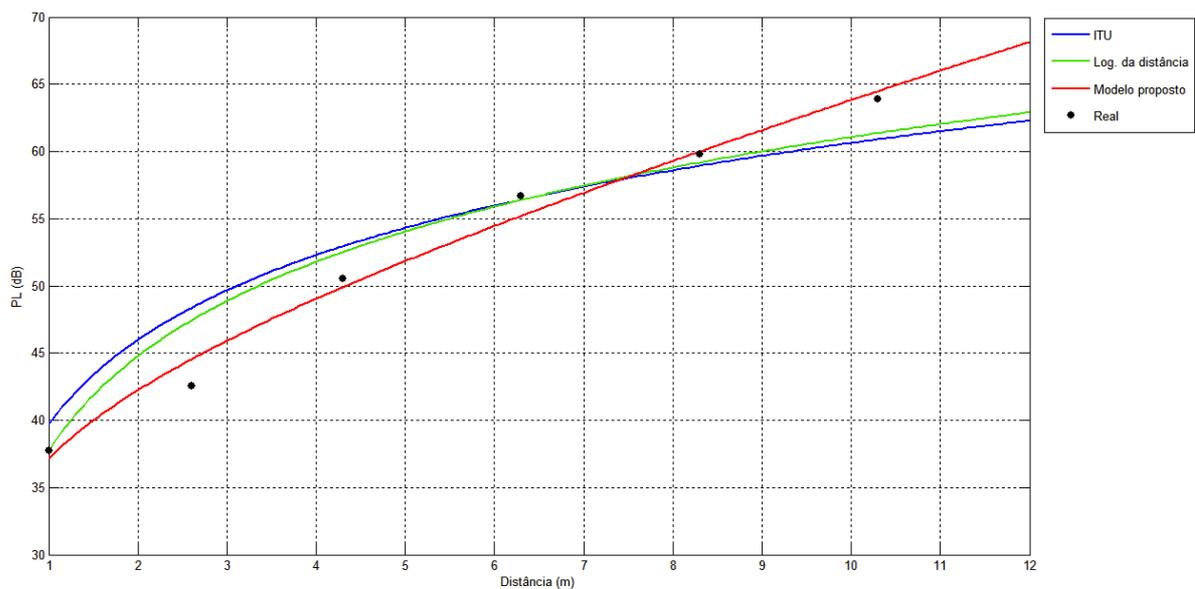
	Real	Modelo da ITU	Modelo logaritmo da distância	Modelo log. da distância com WAF	Modelo de Cheung, Sau e Murch	Modelo proposto
PL(2,6 m)	57,83 dB	54,48 dB	53,43 dB	52,35 dB	56,76 dB	53,22 dB
PL(5,3 m)	61,82 dB	65,50 dB	65,12 dB	64,83 dB	62,95 dB	64,32 dB
PL(7,9 m)	70,24 dB	71,68 dB	71,66 dB	68,29 dB	66,41 dB	71,20 dB
PL(10,3 m)	74,58 dB	75,79 dB	76,01 dB	70,60 dB	68,78 dB	76,18 dB
PL(12,7 m)	82,46 dB	79,03 dB	79,45 dB	78,71 dB	78,83 dB	80,42 dB
<b>RMSE</b>	-	<b>3,168 dB</b>	<b>3,293 dB</b>	<b>4,267 dB</b>	<b>3,993 dB</b>	<b>2,967 dB</b>

Nestas três tabelas pode ser visto que o modelo proposto produziu a melhor previsão do macro-comportamento da propagação do sinal em todas as três situações. A exceção do ambiente *indoor*, raia 2, em que o desempenho do modelo proposto é apenas ligeiramente superior aos modelos da ITU e logaritmo da distância, a diferença de desempenho do modelo proposto para os demais é bastante significativa, confirmando os resultados da análise realizada por regressão linear múltipla que apontavam este modelo como sendo o que melhor explicaria a grandeza atenuação.

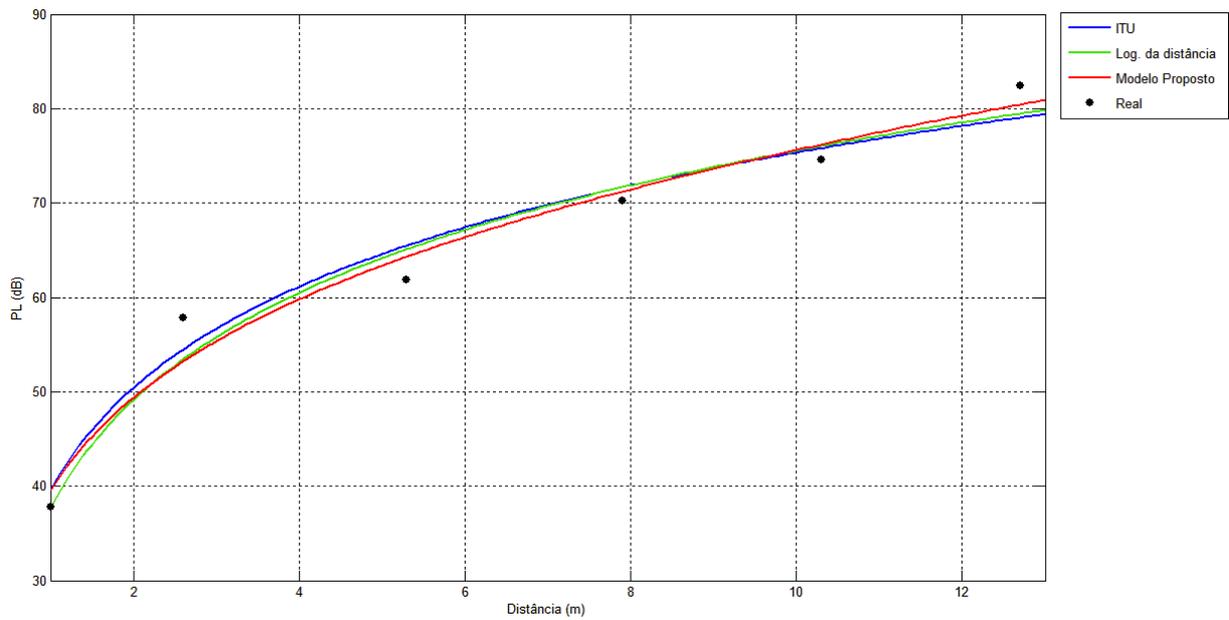
Por fim, as Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 ilustram as curvas de atenuação obtidas a partir dos 3 modelos com menor RMSE, de acordo com os resultados indicados nas Tabelas 4.22, 4.23 e 4.24, para os dados referentes às medições *outdoor* e *indoor*, raias 1 e 2.



**Figura 4.14** – Curvas de atenuação do sinal para os dados das medições outdoor (modelos de Young, dual-slope e proposto).



**Figura 4.15** – Curvas de atenuação do sinal para os dados das medições indoor, raia 1 (modelos da ITU, logaritmo da distância e proposto).



**Figura 4.16** – *Curvas de atenuação do sinal para os dados das medições indoor, raia 2 (modelos da ITU, logaritmo da distância e proposto).*

## 5 Validação do modelo proposto

Com o intuito de validar o modelo proposto no Capítulo 4 deste trabalho, com dados distintos daqueles que serviram como base para sua formulação, foram realizadas medições adicionais em novos ambientes *outdoor* e *indoor* para a atenuação de sinal transmitido na frequência de 2,4 GHz. Os equipamentos e o *software* utilizados nessas medições foram os mesmos citados no Capítulo 4.

### 5.1 Resultado das medições em ambiente *outdoor* para a etapa de validação

As medições em ambiente *outdoor* foram realizadas na Rua Joaquim Marques de Jesus, uma rua sem saída e com pouco movimento de veículos localizada na região metropolitana de Recife, mais precisamente no bairro de Piedade, município de Jaboatão dos Guararapes. As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam vistas frontal e superior da referida rua.

Supondo uma diagonal cruzando a rua em questão de seu canto inferior direito ao canto superior esquerdo (linha vermelha tracejada na Figura 5.2), o roteador *wireless* foi posicionado na extremidade dessa diagonal mais a direita de quem entra na rua. As medições foram tomadas no ponto de referência, ou seja, a 1 metro do equipamento, e a cada 10 metros de distância do roteador na direção da diagonal citada até a distância de 40 metros (que representa a outra extremidade da diagonal). Roteador e *laptop* estavam posicionados a mesma altura do solo.



**Figura 5.1** – *Rua Joaquim Marques de Jesus, Piedade, Jabotão dos Guararapes (vista frontal).*



**Figura 5.2** – *Rua Joaquim Marques de Jesus, Piedade, Jabotão dos Guararapes (vista superior).*

Em cada bateria de medições a atenuação do sinal foi aferida durante o intervalo de 1 minuto nos cinco pontos sob análise, gerando em média 30 amostras da perda imposta ao sinal, em decibéis. O valor associado à perda daquele ponto corresponde, naquela bateria de medições, a média das amostras coletadas. Para cada bateria também foi registrado o valor médio da umidade relativa do ar observado ao longo das medições.

Um total de 20 baterias de medição foi realizado, gerando 100 arquivos texto com os dados da atenuação do sinal (5 arquivos por bateria). Ou seja, para cada ponto de medição foram coletadas cerca de 600 amostras (20 medições x 30 amostras por medição) da atenuação do sinal em diferentes dias, horários e sob condições climáticas distintas. A Tabela 5.1 apresenta o resultado das medições.

**Tabela 5.1** – Resultado das medições outdoor para a etapa de validação.

Bateria	Umidade Relativa	PL(1 m) [dB]	PL(10 m) [dB]	PL(20 m) [dB]	PL(30 m) [dB]	PL(40 m) [dB]
1	71%	37,29	63,67	76,11	82,80	79,94
2	72%	38,60	62,27	72,74	79,63	81,43
3	71%	35,87	61,58	76,89	82,37	79,71
4	72%	37,50	62,13	74,37	81,63	79,45
5	67%	38,10	60,17	74,53	79,40	79,33
6	67%	35,00	60,71	75,67	80,37	79,80
7	67%	38,33	60,57	76,90	80,03	79,94
8	66%	36,26	59,30	77,87	80,00	81,55
9	67%	38,00	59,47	75,40	81,85	78,17
10	72%	36,00	58,33	74,37	80,48	82,47
11	48%	36,57	60,71	68,65	78,10	77,37
12	50%	37,63	59,84	71,73	80,83	78,90
13	49%	37,90	61,00	70,87	78,97	76,23
14	50%	36,58	61,47	74,60	80,70	81,00
15	52%	35,00	59,24	70,70	78,77	79,89
16	56%	35,73	60,56	73,83	78,70	80,65
17	55%	35,97	59,63	73,97	79,00	80,42
18	56%	37,17	59,52	72,80	79,63	80,57
19	56%	36,93	60,90	73,19	78,10	77,36
20	56%	37,42	60,57	69,57	79,20	77,90
<b>MÉDIA</b>		<b>36,89</b>	<b>60,58</b>	<b>73,74</b>	<b>80,03</b>	<b>79,60</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>		<b>1,07</b>	<b>1,24</b>	<b>2,50</b>	<b>1,35</b>	<b>1,58</b>

### 5.1.1 Análise da aderência dos modelos aos dados obtidos nas medições *outdoor*

Os dados da Tabela 5.1 foram utilizados para uma comparação com os valores de atenuação previstos pelos modelos de Young, logaritmo da distância, *dual-slope*, de Oliveira *et al.* e o modelo proposto neste trabalho. Essa comparação baseou-se no uso dos parâmetros indicados na Tabela 5.2 para cada um dos modelos. No caso dos dois primeiros modelos utilizou-se a ferramenta *Curve Fitting Tool* do Matlab 7.0 para encontrar os parâmetros  $\beta'$  e  $n$  a partir dos valores médios observados nas medições. Para o modelo *dual-slope* foram utilizados os parâmetros sugeridos em [46], o que reduziu o modelo para a equação de perda no espaço livre dado que as distâncias das medições foram sempre inferiores a 50 metros. Para o quarto e quinto modelos os parâmetros foram encontrados via regressão linear, também com o auxílio do Matlab 7.0 com sua função *regress*, e utilizando todo o conjunto de dados referentes às medições realizadas.

**Tabela 5.2** – Modelos, expressões e parâmetros utilizados no comparativo com os dados das medições *outdoor* obtidos para a etapa de validação.

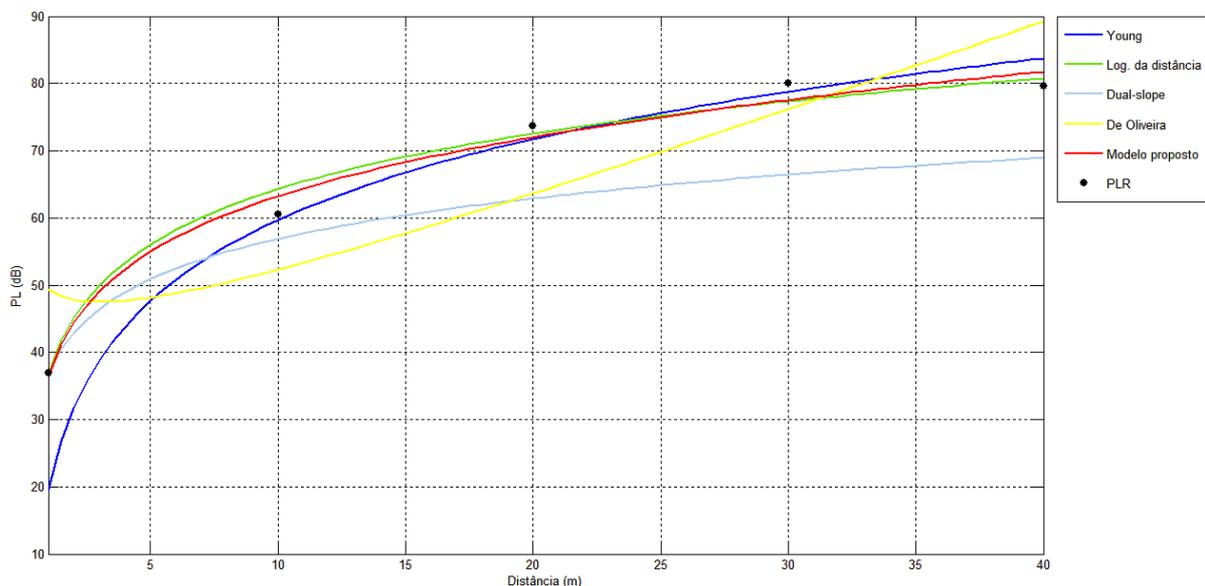
Modelo	Expressão	Parametrização
Young	$PL(d) = 40 \log(d) - 10 \log(\beta')$	$\beta' = 0,01075$
Logaritmo da distância	$PL(d) = 36,89 + 10n \log(d)$	$n = 2,739$
<i>Dual-slope</i>	$PL(d) = \begin{cases} 36,89 + 10n_1 \log(d) & \text{se } 1 < d < d_c \\ 36,89 + 10n_1 \log(d_c) + 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_c}\right) & \text{se } d > d_c \end{cases}$	$n_1 = 2$ $n_2 = 4$ $d_c = 50\text{m}$
De Oliveira <i>et al.</i>	$PL(d) = P_0 - 10 \log(d) + 10md$	$P_0 = 47,98 \text{ dB}$ $m = 0,1433$
Modelo proposto	$PL(d) = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR)$	$\beta_0 = 38,88$ $\beta_1 = 25,849$ $\beta_2 = 0,099$ $\beta_3 = 11,56$

De posse dos modelos e suas respectivas expressões e parâmetros foi realizada a comparação entre os valores previstos para a atenuação do sinal nas distâncias de 10, 20, 30 e 40 metros por cada um deles com os valores médios efetivamente observados nas

medições. Para essa comparação mais ampla utilizou-se, no modelo proposto, o valor de 0,61 para a umidade relativa do ar (equivalente à média observada ao longo das medições). Mais uma vez foi utilizada a raiz do erro médio quadrático (RMSE) como parâmetro de desempenho. Os resultados dessa análise comparativa são exibidos na Tabela 5.3, enquanto a figura 5.3 exibe as curvas de atenuação sugeridas por cada um dos modelos.

**Tabela 5.3** – Desempenho dos modelos comparados aos dados das medições outdoor obtidos para a etapa de validação.

	Real médio	Modelo de Young	Modelo logaritmo da distância	Modelo <i>dual-slope</i>	Modelo de Oliveira <i>et al.</i>	Modelo proposto <i>UR = 61%</i>
PL(10 m)	60,58 dB	59,69 dB	64,28 dB	56,89 dB	52,31 dB	63,24 dB
PL(20 m)	73,74 dB	71,73 dB	72,53 dB	62,91 dB	63,63 dB	72,01 dB
PL(30 m)	80,03 dB	78,77 dB	77,35 dB	66,43 dB	76,20 dB	77,55 dB
PL(40 m)	79,60 dB	83,77 dB	80,77 dB	68,93 dB	89,28 dB	81,77 dB
<b>RMSE</b>	-	<b>2,815 dB</b>	<b>2,810 dB</b>	<b>11,967 dB</b>	<b>9,642 dB</b>	<b>2,638 dB</b>



**Figura 5.3** – Curvas de atenuação do sinal para os dados da medição outdoor, etapa de validação.

A fim de observar de forma mais direta os efeitos da umidade relativa do ar e a resposta do modelo proposto com a variação desse fator, o universo contendo as 20 baterias de medições foi ordenado em função da umidade relativa e dividido em grupos.

Em cada grupo estão apenas as medições realizadas sob o mesmo valor de umidade relativa do ar. Dessa forma, para os dados das medições outdoor para a etapa de validação (Tabela 5.1), foram definidos 10 grupos com os seguintes valores de umidade relativa: 48%, 49%, 50%, 52%, 55%, 56%, 66%, 67%, 71% e 72%. Para cada um deles foi calculado o valor médio da atenuação nas distâncias de 10, 20, 30 e 40 metros, como ilustrados na Tabela 5.4.

Apesar do pequeno número de amostras (em alguns casos os grupos da Tabela 5.4 contém apenas uma medição), essa divisão permitiu comparar os valores médios da atenuação em cada grupo com as previsões dos diversos modelos para as distâncias onde foram realizadas as medições. Para os modelos encontrados na literatura não há variação dos valores previstos (portanto eles são os mesmos da Tabela 5.3), dado que nenhum deles leva em consideração o fator umidade relativa do ar. As variações foram notadas apenas no modelo proposto, para o qual foram assumidos os mesmos valores para os coeficientes  $\beta_i$  da Tabela 5.2, variando apenas o valor do parâmetro  $UR$ , de acordo com o grupo. Os valores previstos pelo modelo proposto para cada um dos grupos são indicados na Tabela 5.5.

**Tabela 5.4** – Valores médios das medidas de atenuação por agrupamento em função da umidade relativa do ar aplicado aos dados das medições outdoor para a etapa de validação.

<b>Grupo</b>	<b>UR</b>	<b>PL(10m) [dB] Valor médio</b>	<b>PL(20m) [dB] Valor médio</b>	<b>PL(30m) [dB] Valor médio</b>	<b>PL(40m) [dB] Valor médio</b>
1	48%	60,71	68,65	78,10	77,37
2	49%	61,00	70,87	78,97	76,23
3	50%	60,66	73,17	80,77	79,95
4	52%	59,24	70,70	78,77	79,89
5	55%	59,63	73,97	79,00	80,42
6	56%	60,39	72,35	78,91	79,12
7	66%	59,30	77,87	80,00	81,55
8	67%	60,23	75,63	80,41	79,31
9	71%	62,63	76,50	82,59	79,83
10	72%	60,91	73,83	80,58	81,12

**Tabela 5.5** – Valores da atenuação previstos pelo modelo proposto para cada um dos grupos extraídos dos dados das medições *outdoor* para a etapa de validação.

Grupo	UR	PL(10m) [dB]	PL(20m) [dB]	PL(30m) [dB]	PL(40m) [dB]
		Previsto	Previsto	Previsto	Previsto
1	48%	62,03	70,81	76,35	80,57
2	49%	62,14	70,91	76,45	80,67
3	50%	62,24	71,01	76,55	80,77
4	52%	62,44	71,21	76,75	80,97
5	55%	62,72	71,49	77,03	81,25
6	56%	62,81	71,58	77,12	81,34
7	66%	63,63	72,40	77,95	82,17
8	67%	63,71	72,48	78,02	82,24
9	71%	64,00	72,77	78,31	82,53
10	72%	64,07	72,84	78,38	82,60

Partindo dos dados das Tabelas 5.3 (valores previstos pelos modelos), 5.4 (valores médios da atenuação por grupo) e 5.5 (valores previstos pelo modelo proposto para cada um dos grupos) foi realizada a comparação de desempenho entre eles para cada um dos grupos em que foram divididos os dados das medições *outdoor* para a etapa de validação. Por uma questão de simplicidade, a comparação foi feita apenas entre os modelos de Young, logaritmo da distância e o modelo proposto, dado o indicativo da Tabela 5.3 de que esses apresentaram maior aderência aos dados. Os resultados dessa comparação por grupos é apontado na Tabela 5.6.

Os resultados registrados nas Tabelas 5.3 e 5.6 permitem observar que o modelo proposto apresentou desempenho ligeiramente superior aos modelos de Young e logaritmo da distância. Mesmo com a redução da distância entre pontos consecutivos quando comparada àquela utilizada nas medições feitas para o Capítulo 4 deste trabalho (de 15 para 10 metros) e a menor distância utilizada para as medições (até 40 metros), o modelo proposto teve resultado bastante satisfatório permanecendo com desempenho acima dos modelos encontrados na literatura. Espera-se que o modelo reproduza de maneira mais fiel a realidade, em ambientes *outdoor*, para distâncias da ordem de 100 metros, porém novos testes são necessários para validar esta hipótese.

**Tabela 5.6** – Desempenho dos modelos comparados aos grupos obtidos a partir das medições outdoor para a etapa de validação.

Grupo	UR	Modelo de Young (RMSE do grupo)	Modelo logaritmo da distância (RMSE do grupo)	Modelo proposto (RMSE do grupo)
1	48%	4,160 dB	3,646 dB	2,562 dB
2	49%	4,447 dB	3,500 dB	3,020 dB
3	50%	2,681 dB	2,938 dB	2,920 dB
4	52%	2,331 dB	3,242 dB	2,289 dB
5	55%	2,331 dB	2,975 dB	2,598 dB
6	56%	2,739 dB	2,604 dB	2,204 dB
7	66%	3,843 dB	4,509 dB	4,213 dB
8	67%	3,562 dB	3,537 dB	3,479 dB
9	71%	4,528 dB	3,952 dB	3,714 dB
10	72%	2,325 dB	2,806 dB	2,449 dB
<b>Médias</b>	<b>61%</b>	<b>3,295 dB</b>	<b>3,371 dB</b>	<b>2,945 dB</b>

A Tabela 5.6 aponta um erro máximo cometido pelo modelo proposto no grupo 7, com RMSE acima de 4 dB e equivalente à umidade relativa do ar de 66%. Infelizmente, nesse grupo apenas uma medida foi obtida, como pode ser visto na tabela 5.1 e, portanto, tal medida não possui significância estatística. A análise via regressão linear múltipla aplicada ao conjunto de dados obtidos para a etapa de validação em ambiente *outdoor* reforçou a relevância do novo modelo, pois a combinação de variáveis explicativas logaritmo da distância ( $\log(d)$ ), distância ( $d$ ) e logaritmo da umidade relativa do ar ( $\log(UR)$ ) foi a que melhor explicou as variações observadas na atenuação do sinal. Tal afirmação baseou-se nos resultados obtidos para o fator  $R^2$  quando da aplicação da função *regress* do Matlab 7.0 aos dados coletados, conforme indicado na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7** – Regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições outdoor da etapa de validação.

Modelo	Fator $R^2$
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d)$	97,34%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d$	97,48%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR)$	97,67%

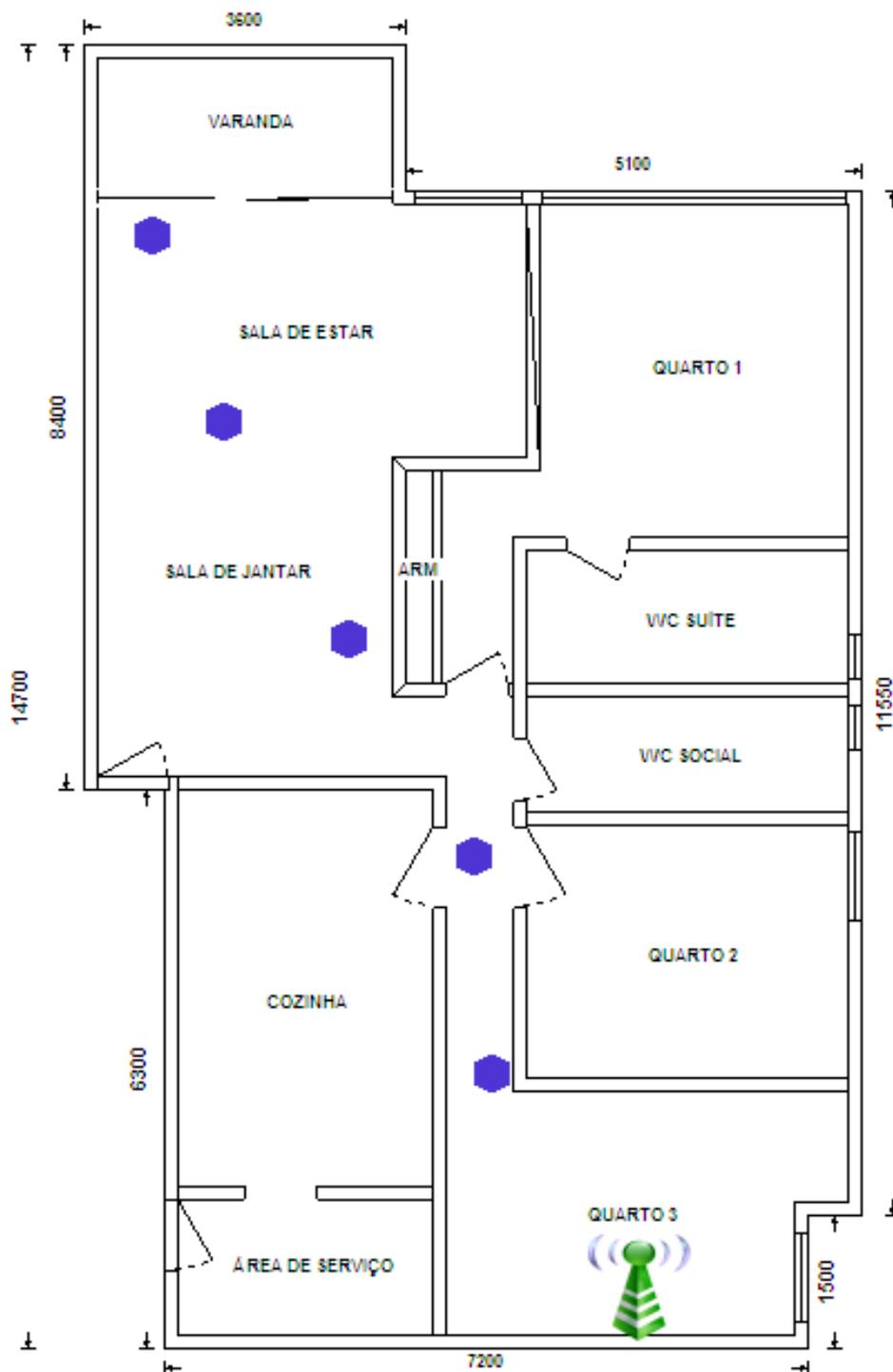
## 5.2 Resultado das medições em ambiente *indoor* para a etapa de validação

As medições em ambiente *indoor* para a etapa de validação foram realizadas em um apartamento também situado no município de Jaboatão dos Guararapes, região metropolitana da cidade de Recife, em Pernambuco. A Figura 5.4 apresenta um esboço da planta baixa do apartamento onde foram realizadas as medições e indica os pontos onde foram realizadas as medições e o local onde se encontrava o roteador *wireless*.

Como pode ser visto na Figura 5.4, o roteador *wireless* foi posicionado no quarto 3 e as medições realizadas, a partir dele, em uma diagonal com ângulo aproximado de 30°. Foram selecionados 5 pontos situados, aproximadamente, nas distâncias de 3, 6, 9, 12 e 15 metros do equipamento. Além desses, também foram realizadas medições à distância de 1 metro do roteador para identificação da atenuação média no ponto de referência.

Assim como nas primeiras medições em ambiente *indoor*, houve um esforço no sentido de garantir a inalterância de algumas condições, tais como: posição de móveis e portas no interior da residência; quantidade de pessoas (apenas uma) na residência; e altura em que foram posicionados roteador *wireless* e *laptop* (próximas de 1 metro).

Em cada ponto selecionado foram coletadas cerca de 30 amostras da atenuação do sinal oriundo do roteador *wireless*, durante o período de 1 minuto, em cada bateria de medição. Foram realizadas 20 baterias, passando por cada um dos 6 pontos (incluindo a distância de referência) e totalizando uma média de 600 amostras da atenuação do sinal em cada um deles. As medições foram realizadas em diferentes dias e sob diferentes condições de umidade relativa do ar. A Tabela 5.8 sumariza os resultados das medições.



**Figura 5.4** – Planta baixa da residência onde foram realizadas as medições indoor para a etapa de validação (com indicação dos pontos de medição e do AP).

**Tabela 5.8** – Resultado das *medições* indoor para a etapa de validação.

Bateria	Umidade Relativa	PL(1 m) [dB]	PL(3 m) [dB]	PL(6 m) [dB]	PL(9 m) [dB]	PL(12 m) [dB]	PL(15 m) [dB]
1	78%	34,83	50,13	59,73	75,77	86,97	90,70
2	78%	35,07	49,47	58,77	76,43	83,20	90,29
3	77%	34,06	49,10	57,23	73,97	86,66	90,90
4	76%	34,47	50,33	62,67	74,10	84,57	88,10
5	75%	33,90	49,97	63,53	76,43	84,10	89,27
6	77%	35,10	49,33	60,10	74,93	84,17	91,00
7	76%	33,97	48,63	58,62	75,30	87,90	90,17
8	75%	35,73	49,18	63,73	75,30	85,87	90,90
9	75%	35,10	50,13	61,87	74,90	85,63	90,16
10	75%	34,71	50,10	58,32	74,30	83,48	89,41
11	67%	29,10	44,20	55,00	68,97	82,48	87,40
12	67%	34,47	44,27	55,32	67,27	84,43	83,32
13	68%	34,20	43,57	56,41	71,00	84,27	85,65
14	68%	34,45	44,58	56,00	70,42	83,61	86,60
15	68%	32,73	46,40	55,20	69,43	82,77	87,06
16	68%	31,53	43,47	58,33	70,89	83,30	88,31
17	68%	32,63	45,63	58,30	69,30	82,70	84,03
18	68%	31,33	44,17	59,33	69,90	83,14	84,39
19	67%	31,63	44,23	56,12	67,70	82,57	83,33
20	66%	30,50	43,33	55,13	69,97	82,40	87,27
<b>MÉDIA</b>		<b>33,48</b>	<b>47,01</b>	<b>58,49</b>	<b>72,31</b>	<b>84,21</b>	<b>87,91</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>		<b>1,80</b>	<b>2,80</b>	<b>2,80</b>	<b>3,09</b>	<b>1,61</b>	<b>2,65</b>

### 5.2.1 Análise da aderência dos modelos aos dados obtidos nas *medições indoor*

Partindo dos dados da Tabela 5.8 e das características físicas do apartamento foram encontrados os parâmetros dos modelos para propagação *indoor* (ITU; logaritmo da distância; logaritmo da distância com incremento da atenuação por obstáculos; e o modelo de Cheung, Sau e Murch). Esforço similar foi feito para determinar os parâmetros do modelo proposto neste trabalho a fim de comparar o desempenho do novo modelo com aqueles encontrados na literatura.

Para os modelos da ITU e logaritmo distância a determinação dos parâmetros  $N$  e  $n$ , respectivamente, ocorreu com o uso da ferramenta *Curve Fitting Tool* do Matlab 7.0 e dos valores médios da atenuação em cada um dos pontos onde houve aferição, conforme indicado na Tabela 5.8. No modelo logaritmo da distância com WAF optou-se em utilizar fator de atenuação igual a 2 (espaço livre) e WAF igual 6,29 dB, como sugerido em [50]. No modelo de Cheung, Sau e Murch foram utilizados os parâmetros sugeridos pelos seus autores em [53]. Nesses dois últimos foram considerados: o efeito de uma parede sobre o segundo ponto, com ângulo de incidência igual a  $30^\circ$  ( $\theta_1$ ); o efeito de 2 paredes sobre os 3 últimos pontos, com ângulos de incidência iguais a  $30^\circ$  ( $\theta_1$ ) e  $60^\circ$  ( $\theta_2$ ), respectivamente.

No caso do modelo proposto, seus parâmetros foram determinados por meio da aplicação de regressão linear múltipla ao universo de dados coletados nas medições. Mais uma vez utilizou-se a função *regress* do Matlab 7.0 com essa finalidade. Os resultados encontrados para os parâmetros desse modelo, bem como os dos demais, são indicados na Tabela 5.9. Chamou a atenção, em especial, o valor encontrado para o parâmetro  $\beta_3$ , alto comparado com os valores encontrados anteriormente, que sempre estiveram abaixo de 20.

**Tabela 5.9** – Modelos, expressões e parâmetros utilizados no comparativo com os dados das medições indoor obtidos para a etapa de validação.

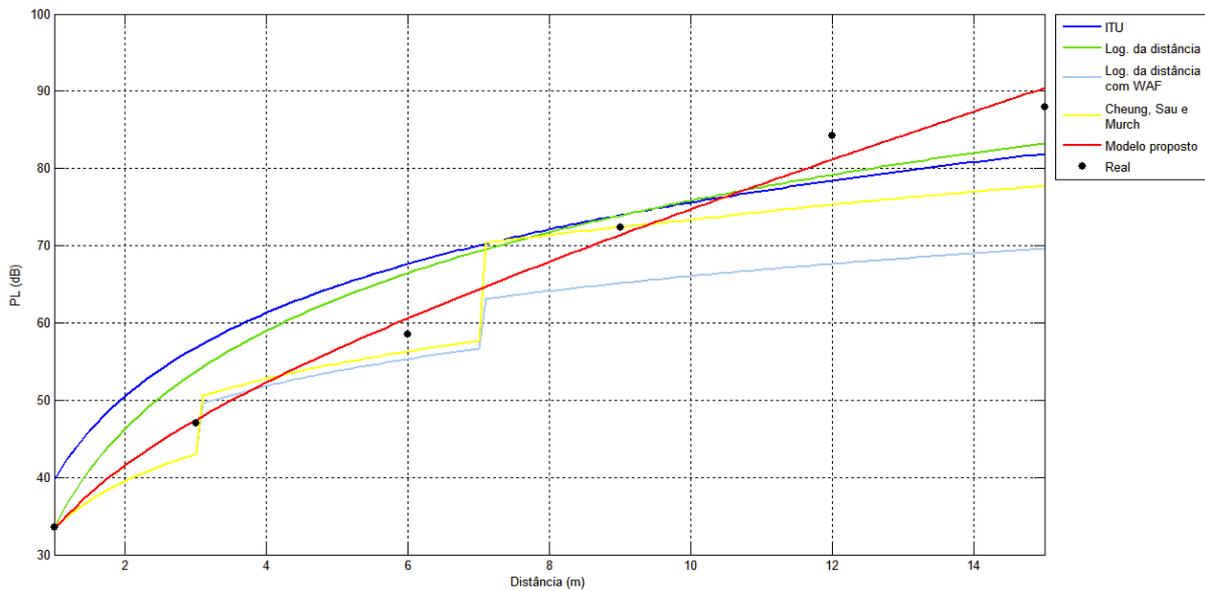
Modelo	Expressão	Parametrização
ITU	$PL(d) = 20 \log(f) + N \log(d) - 28$	$f = 2.422$ MHz $N = 35,9$
Logaritmo da distância	$PL(d) = 33,48 + 10n \log(d)$	$n = 4,235$
Log. Da distância com WAF	$PL(d) = 33,48 + 10n \log(d) + q \cdot WAF$	$n = 2$ $WAF = 6,29$ dB
Cheung, Sau, e Murch	$PL(d) = 33,48 + 10n_1 \log(d) \cdot U(d_{bp} - d) + 10 \cdot \left[ n_1 \log(d_{bp}) + n_2 \log\left(\frac{d}{d_{bp}}\right) \right] + \sum_{p=1}^P \frac{WAF(p)}{\cos(\theta_p)}$	$n_1 = 2$ $n_2 = 2,5$ $d_{bp} = 10$ m $WAF = 6,29$ dB $\theta_1 = 30^\circ$ e $\theta_2 = 60^\circ$
Modelo proposto	$PL(d) = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR)$	$\beta_0 = 41,17$ $\beta_1 = 19,407$ $\beta_2 = 2,4527$ $\beta_3 = 72,813$

De posse dos modelos e seus respectivos parâmetros ficou viabilizada a comparação entre a média dos dados reais obtidos nas baterias de medição e a previsão de cada um dos modelos para as distâncias onde foram realizadas as medições. No caso específico do modelo proposto neste trabalho essa primeira comparação foi realizada fixando o valor do parâmetro *UR* em 0,72 (média da umidade relativa observada ao longo das bateria de medição). Os resultados dessa comparação encontram-se na Tabela 5.10, ao passo que a Figura 5.5 ilustra as curvas de atenuação do sinal sugerida por cada um dos modelos.

**Tabela 5.10** – *Comparativo de desempenho dos modelos para os dados das medições indoor obtidos para a etapa de validação.*

	<b>Real médio</b>	<b>Modelo da ITU</b>	<b>Modelo logaritmo da distância</b>	<b>Modelo log. da distância com WAF</b>	<b>Modelo de Cheung, Sau e Murch</b>	<b>Modelo proposto <i>UR</i> = 72%</b>
PL(3 m)	47,01 dB	56,81 dB	53,69 dB	43,02 dB	43,02 dB	47,40 dB
PL(6 m)	58,49 dB	67,62 dB	66,43 dB	55,33 dB	56,31 dB	60,60 dB
PL(9 m)	72,31 dB	73,94 dB	73,89 dB	65,14 dB	72,41 dB	71,38 dB
PL(12 m)	84,21 dB	78,43 dB	79,18 dB	67,64 dB	75,30 dB	81,16 dB
PL(15 m)	87,91 dB	81,91 dB	83,29 dB	69,58 dB	77,73 dB	90,40 dB
<b>RMSE</b>	-	<b>7,932 dB</b>	<b>6,263 dB</b>	<b>13,113 dB</b>	<b>7,138 dB</b>	<b>2,291 dB</b>

Da mesma maneira como foi procedido com os dados das medições *outdoor* para a etapa de validação, os dados das medições *indoor* foram agrupados de acordo com a umidade relativa do ar. Dessa vez foram obtidos apenas sete grupos com os seguintes valores para a umidade relativa: 66%, 67%, 68%, 75%, 76%, 77% e 78%. Na Tabela 5.11 são indicados os valores médios de atenuação nos pontos onde foram realizadas as medições para cada um dos sete grupos.



**Figura 5.5** – Curvas de atenuação do sinal para os dados da medição indoor, etapa de validação.

**Tabela 5.11** – Valores médios das medidas de atenuação por agrupamento em função da umidade relativa do ar aplicado aos dados das medições indoor para a etapa de validação.

Grupo	UR	PL(3m) [dB] Valor médio	PL(6m) [dB] Valor médio	PL(9m) [dB] Valor médio	PL(12m) [dB] Valor médio	PL(15m) [dB] Valor médio
1	66%	43,33	55,13	69,97	82,40	87,27
2	67%	44,23	55,48	67,98	83,16	84,68
3	68%	44,64	57,26	70,16	83,30	86,01
4	75%	49,85	61,86	75,23	84,77	89,94
5	76%	49,48	60,65	74,70	86,24	89,14
6	77%	49,22	58,67	74,45	85,42	90,95
7	78%	49,80	59,25	76,10	85,09	90,50

Repetindo os passos realizados na validação com os dados das medições *outdoor*, foram identificados os valores previstos pelo modelo proposto para cada um dos sete grupos em que foram divididos os dados das medições *indoor*. Admitiu-se para os parâmetros  $\beta_i$  os mesmos valores indicados na Tabela 5.9, variando apenas o valor de  $UR$ , de modo que os valores previstos para cada um dos grupos é indicado na Tabela 5.12.

**Tabela 5.12** – Valores da atenuação previstos pelo modelo proposto para cada um dos grupos extraídos dos dados das medições indoor para a etapa de validação.

Grupo	UR	PL(3m) [dB]	PL(6m) [dB]	PL(9m) [dB]	PL(12m) [dB]	PL(15m) [dB]
		Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto
1	66%	44,65	57,85	68,62	78,41	87,65
2	67%	45,12	58,32	69,10	78,88	88,12
3	68%	45,59	58,79	69,57	79,35	88,59
4	75%	48,69	61,89	72,67	82,45	91,69
5	76%	49,11	62,31	73,08	82,87	92,11
6	77%	49,52	62,72	73,50	83,28	92,52
7	78%	49,93	63,13	73,91	83,69	92,93

A partir dos dados das Tabelas 5.10 (valores previstos pelos modelos encontrados na literatura), 5.11 (valores médios da atenuação nos pontos de medição nos sete grupos sob análise) e 5.12 (valores previstos pelo modelo proposto para cada um dos grupos) foi feita a comparação de desempenho entre os modelos tendo em vista os dados reais de cada um dos grupos. Mais uma vez por questão de simplicidade, a comparação foi restrita apenas aos modelos com melhor desempenho observado na primeira comparação (Tabela 5.10) entre eles: logaritmo da distância; de Cheung, Sau e Murch; e o modelo proposto. Os resultados desse comparativo por grupo se encontram na Tabela 5.13.

**Tabela 5.13** – Desempenho dos modelos comparados aos grupos obtidos a partir das medições indoor para a etapa de validação.

Grupo	UR	Modelo logaritmo da distância (RMSE do grupo)	Modelo de Cheung, Sau e Murch (RMSE do grupo)	Modelo proposto (RMSE do grupo)
1	66%	8,316 dB	6,101 dB	2,599 dB
2	67%	8,094 dB	5,743 dB	3,172 dB
3	68%	7,147 dB	5,939 dB	2,543 dB
4	75%	5,312 dB	9,001 dB	2,024 dB
5	76%	5,826 dB	8,881 dB	2,534 dB
6	77%	6,675 dB	9,017 dB	2,474 dB
7	78%	6,292 dB	9,041 dB	2,634 dB
<b>Médias</b>	<b>72%</b>	<b>6,809 dB</b>	<b>7,675 dB</b>	<b>2,569 dB</b>

A diferença significativa de desempenho entre os modelos indicada pelas Tabelas 5.10 e 5.13 pode ser melhor compreendida com a análise dos efeitos das grandezas explicativas (distância e umidade relativa do ar) sobre o fenômeno em observação (atenuação do sinal) por meio de regressão linear múltipla. Assim como realizado com os dados das medições *outdoor*, foi avaliada qual combinação explicava de forma mais precisa as variações observadas nas medições *indoor*, avaliação calcada na observação do fator  $R^2$ . Os resultados se encontram na Tabela 5.14 e evidenciam o valor do novo modelo.

**Tabela 5.14** – Regressão linear múltipla aplicada aos dados das medições *indoor* da etapa de validação.

<b>Modelo</b>	<b>Fator <math>R^2</math></b>
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d)$	93,09%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d$	97,56%
$PL[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR)$	98,54%

## 6 Conclusão

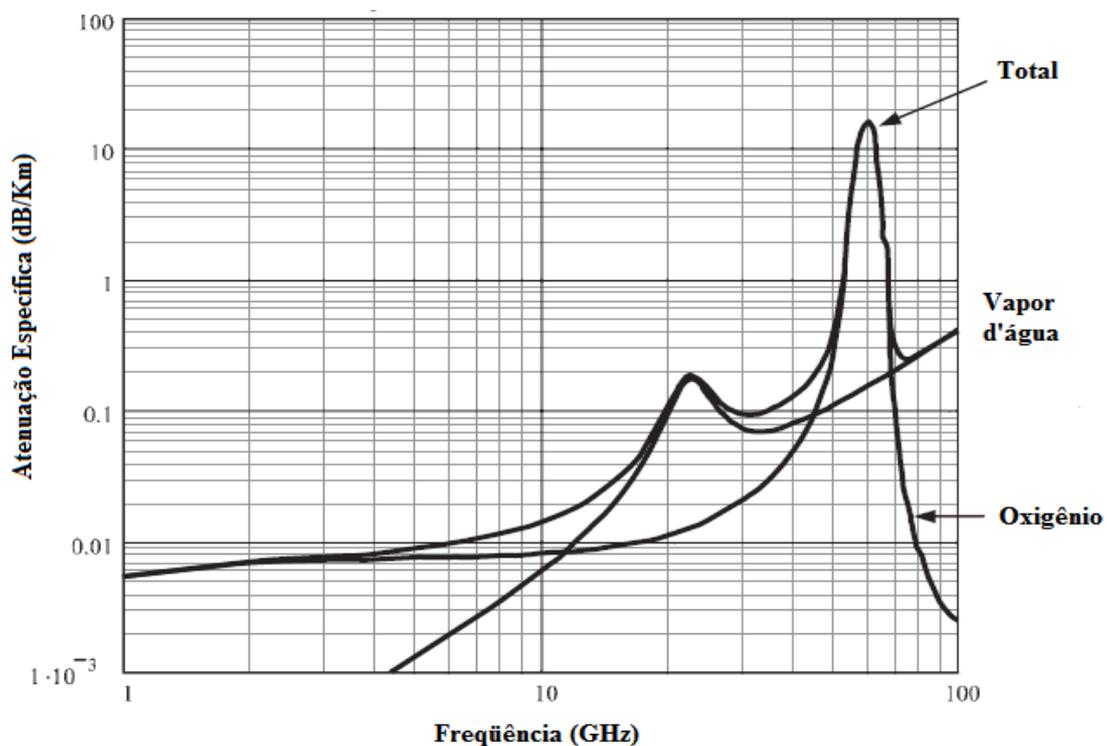
Este trabalho permite extrair diversas conclusões acerca do problema da modelagem do macro-comportamento da propagação de sinais na faixa de frequência de 2,4 GHz. Elas podem ser consideradas úteis à compreensão do real funcionamento de redes sem fio baseadas no padrão 802.11, em suas extensões **b** e **g**, afirmação reforçada pela aceitação do artigo relacionado a esta dissertação no XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações [55].

A primeira conclusão do trabalho diz respeito aos modelos encontrados na literatura. Os resultados das medições realizadas reforçam o valor dado ao modelo logaritmo da distância, pois em quatro dos cinco ambientes analisados (dois *outdoor* e três *indoor*) este modelo ou apresentou o melhor desempenho (três casos), ou esteve muito próximo dele (um caso). Pesam ainda de forma favorável ao modelo sua simplicidade, sua capacidade de utilização em medições *outdoor* ou *indoor* e a simples interpretação física que possui.

Ainda sobre os modelos encontrados na literatura vale destacar os pontos negativos observados acerca dos modelos determinísticos. Além de apresentarem desempenho inferior aos modelos empíricos, foi observada certa complexidade na sua aplicação em virtude da subjetividade que deve ser utilizada na definição de alguns aspectos intrínsecos aos modelos. Em especial, as considerações sobre o número de obstáculos entre o transmissor e o receptor, principalmente quando o percurso entre eles não é horizontal ou vertical, acabam tornando-se dependentes da interpretação de quem aplica o modelo por não apresentarem uma regra específica que defina quando considerar ou não os efeitos de uma parede sobre a propagação do sinal, por exemplo.

As mesmas medições que apontaram para o bom desempenho do modelo logarítmico da distância também indicaram uma relevante influência da umidade relativa do ar sobre o macro-comportamento da propagação do sinal na faixa de 2,4 GHz. Ficou claro que esse fator tem a capacidade de interferir sensivelmente na atenuação imposta ao sinal transmitido e de reduzir o alcance da rede quando a umidade aproxima-se de seu valor máximo. Essa é uma conclusão alinhadas com as expectativas teóricas.

É sabido que as condições atmosféricas têm influência sobre a atenuação imposta a um sinal transmitido em sistemas de comunicação sem fio. Entre 1 e 100 GHz essa influência está diretamente relacionada aos efeitos provocados pelas moléculas de oxigênio e água presentes no ar [3] e, portanto, o incremento na atenuação imposta ao sinal pelas condições atmosféricas resulta da combinação de seus efeitos. Isso é ilustrado na Figura 6.1, adaptada de [3], onde é indicado o incremento na atenuação, em decibéis por quilômetro, como função da frequência de operação para transmissões na direção horizontal e ao nível do mar. Nela podem ser vistos dois picos: o primeiro em 22 GHz, conseqüência de uma maior absorção atmosférica causada pelas moléculas de água; a outra, em 60 GHz, é causada pela maior abosorção das moléculas de oxigênio.



**Figura 6.1** – Atenuação específica causada pelos gases oxigênio e vapor d'água em transmissões na direção horizontal e ao nível do mar.

Por outro lado, ainda observando os dados da Figura 6.1, é possível notar que em torno da frequência de 2,4 GHz os efeitos causados por moléculas d'água (representado pela curva vinculada à vapor d'água) são considerados muito pequenos, praticamente desprezíveis. Esse, por sua vez, é um aspecto teórico não comprovado pelo trabalho, dado que os resultados das medições de campo indicaram incrementos mais significativos na atenuação do sinal transmitido em decorrência do aumento da umidade relativa do ar.

Conclusões sobre os efeitos da temperatura não puderam ser extraídas, muito provavelmente em virtude das pequenas variações desse parâmetro ao longo das medições. Essa ponderação não quer dizer, necessariamente, que esse aspecto climático não tenha interferência sobre o fenômeno analisado.

O estudo realizado inspirado no modelo de Oliveira *et al.* [48], utilizando regressão linear múltipla aplicada aos dados coletados, apontou para uma combinação de variáveis com alta capacidade de explicar as variações sofridas pela atenuação do sinal na faixa de 2,4 GHz, independentemente do tipo de ambiente onde os dados foram coletados. Essa combinação, utilizando as variáveis distância e umidade relativa do ar, foi proposta como um novo modelo para propagação de sinais e demonstrou, a partir dos próprios dados que a inspiraram, e de novos dados coletados para validação, ter um desempenho superior aos modelos encontrados na literatura.

Pode-se então destacar, de forma sintetizada, as seguintes conclusões deste trabalho:

- o bom desempenho do modelo proposto, que por sua simplicidade e capacidade pode ser útil em projetos de implantação de redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11 operando na faixa de frequências de 2,4 GHz;
- o aumento da atenuação imposta a um sinal transmitido na faixa de frequência de 2,4 GHz com a distância pode ser mais bem explicado pela combinação das contribuições logarítmica e linear dessa grandeza;
- a importância de considerar os efeitos da umidade relativa do ar sobre a propagação de sinais, o que pode ajudar a compreender algumas variações observadas na prática, principalmente em lugares onde ocorrem grandes variações nesse fator climático;

- a necessidade de, na busca por um modelo empírico para propagação de sinais, zelar por sua simplicidade e capacidade de generalização.

Por fim, resta salientar alguns aspectos interessantes que podem ser alvo de estudos futuros sobre este mesmo tema:

- avaliar o impacto do aumento da atenuação imposta ao sinal transmitido sobre outros aspectos de interesse em redes de computadores, tais como perda de pacotes e taxa efetiva de transmissão;
- realizar estudo sobre o problema da modelagem da propagação de sinais na faixa de 5 GHz, em virtude da extensão 802.11n, do padrão IEEE 802.11, prever a possibilidade de operação em ambas as faixas de frequência discutidas neste trabalho. Isto tornará relevante identificar as diferenças no macro-comportamento da propagação de sinais nas duas faixas;
- estudar, em locais onde ocorram variações mais bruscas da temperatura, possíveis efeitos dessa variável sobre a atenuação do sinal em redes operando de acordo com o padrão IEEE 802.11;
- estender os estudos sobre os efeitos da umidade relativa do ar sobre o macro-comportamento da propagação de sinais em locais onde o comportamento dessa grandeza seja distinto daquele observado ao longo das medições realizadas para este trabalho;
- desenvolver um algoritmo para determinação de mapas da atenuação de sinal (*site survey*) baseado no modelo empírico proposto neste trabalho.

## 7 Referências bibliográficas

- [1] GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. 1<sup>st</sup> Edition. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [2] SUSSKIND C. *Heinrich Hertz: A Short Life*. San Francisco: San Francisco Press, 1995.
- [3] SEYBOLD, J. S. *Introduction to RF Propagation*. 1<sup>st</sup> Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [4] Wikipedia. *Invention of radio*. [Online]. Disponível em: [http://en.wikipedia.org/wiki/Invention\\_of\\_radio](http://en.wikipedia.org/wiki/Invention_of_radio). Acesso em: 23 de setembro de 2007.
- [5] BELROSE, J. S. Fessenden and Marconi: Their Differing Technologies and Transatlantic Experiments During the First Decade of this Century. Em: INTERNATIONAL CONFERENCE ON 100 YEARS OF RADIO (Set. 1995: Canadá). Disponível em: [http://www.ieee.ca/millennium/radio/radio\\_differences.html](http://www.ieee.ca/millennium/radio/radio_differences.html). Acesso em: 24 de setembro de 2007.
- [6] KUCAR, A. D. Mobile Radio: An Overview. *IEEE Communications Magazine*, EUA, vol. 29, ed. 11, págs. 72-85, nov. 1991.
- [7] STALLINGS, W. *Data and Computer Communications*. 7<sup>th</sup> Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [8] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications Principles and Practice*. 2<sup>nd</sup> Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [9] HAYKIN, S.; MOHER, M. *Modern Wireless Communications*. 1<sup>st</sup> Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [10] ZVANOCEC, S.; PECHAC, P.; KLEPAL, M. Wireless LAN Networks Design: Site Survey or Propagation Modeling? *Radioengineering*, República Tcheca, vol. 12, n.º. 4, págs. 42-49, dez. 2003.

- 
- [11] KONG, J. A. *Electromagnetic Wave Theory*. 2<sup>nd</sup> Edition. EUA: John Wiley & Sons, 1990.
- [12] PARSONS, J. D. *The Mobile Radio Propagation Channel*. 2<sup>nd</sup> Edition. EUA: John Wiley & Sons, 2000.
- [13] WI-FI ALLIANCE. *Annual Report 2006*. EUA: 2007. Disponível em: [http://www.wi-fi.org/about\\_overview.php](http://www.wi-fi.org/about_overview.php). Acesso em: 3 de outubro de 2007.
- [14] IEEE. *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, Std. 802.11, 1999 Edition. EUA, mar. 1999.
- [15] STALLINGS, W. IEEE 802.11: Wireless LANs from a to n. *IT Pro*, Inglaterra, n<sup>o</sup>. 1520-9202/04, pág. 32-37, out. 2004.
- [16] IEEE. *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band*, Std. 802.11a-1999. EUA, set. 1999.
- [17] IEEE. *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – High-speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band*, Std. 802.11b-1999. EUA, set. 1999.
- [18] IEEE. *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band*, Std. 802.11g-2003. EUA, jun. 2003.
- [19] GAST, M. *802.11 Wireless Networks The Definitive Guide*. 2<sup>nd</sup> Edition. California: O'Reilly, 2005.
- [20] IEEE. *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Medium Access Control (MAC) Security Enhancements*, Std. 802.11i-2004. EUA, jul. 2004.
- [21] *Official IEEE 802.11 Working Group Project Timelines*. IEEE. Disponível em: [http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/802.11\\_Timelines.htm](http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/802.11_Timelines.htm). Acesso em: 2 de outubro de 2007.
- [22] ROSHAN, P.; LEARY, J. *802.11 Wireless LAN Fundamentals*. 1<sup>st</sup> Edition. Indiana: Cisco Press, 2003.
- [23] Kubernan. *2007 Wireless LAN State-of-the-Market Report*. EUA: Webtorials, agosto de 2007. Disponível em: <http://www.webtorials.com/main/resource/papers/kubernan/sotm07-3.htm>. Acesso em: 3 de outubro de 2007.

- 
- [24] Wireless LAN Association. *High-Speed Wireless LAN Options 802.11a and 802.11g*. [Online]. Disponível em: [http://www.wlana.org/learning\\_center.html](http://www.wlana.org/learning_center.html). Acesso em: 3 de outubro de 2007.
- [25] Webtorials. *2007 Wireless LAN State-of-the-Market Report*. EUA: Webtorials, agosto de 2007. Disponível em: <http://www.webtorials.com/main/resource/papers/sotm/paper3.htm>. Acesso em: 3 de outubro de 2007.
- [26] BRASIL. Resolução N° 365, de 10 de maio de 2004. Republica o Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita. *Agência Nacional de Telecomunicações*, Brasília.
- [27] BIANCHI, G.; FORMISANO, F.; GIUSTINIANO, D. 802.11b/g Link Level Measurements for an Outdoor Wireless Campus Network. Em: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON A WORLD OF WIRELESS, MOBILE AND MULTIMEDIA NETWORKS. *Proceedings*. New York, 2006. Págs. 525-530.
- [28] CARVALHO, L.; ANGEJA, J.; NAVARRO, A. A new packet loss model of the IEEE 802.11g wireless network for multimedia communications. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, EUA, vol. 51, ed. 3, págs. 809-814, ago. 2005.
- [29] SILVENNOINEN, A.; HALL, M.; HÄGGMAN, S. The Effect of Terminal Movement on the Performance of IEEE 802.11 g Wireless LAN Systems in Simulated Radio Channels. *Wireless Personal Communications*, Holanda, vol. 41, ed. 4, págs. 487-505, jun. 2007.
- [30] VASSIS, D.; KORMENTZAS, G.; ROUSKAS, A.; MAGLOGIANNIS, I. The IEEE 802.11g standard for high data rate WLANs. *IEEE Network*, EUA, vol. 19, ed. 3, págs. 21-26, jun. 2005.
- [31] WIJESINHA, A. L.; SONG, Y.; KRISHNAN, M.; MATHUR, V.; AHN, J.; SHYAMASUNDAR, V. Throughput Measurement for UDP Traffic in an IEEE 802.11g WLAN. Em: SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE ENGINEERING, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, NETWORKING AND PARALLEL/DISTRIBUTED COMPUTING AND FIRST ACIS INTERNATIONAL WORKSHOP ON SELF-ASSEMBLING WIRELESS NETWORKS. *Proceedings*. Maryland, 2005. Págs. 220-225.

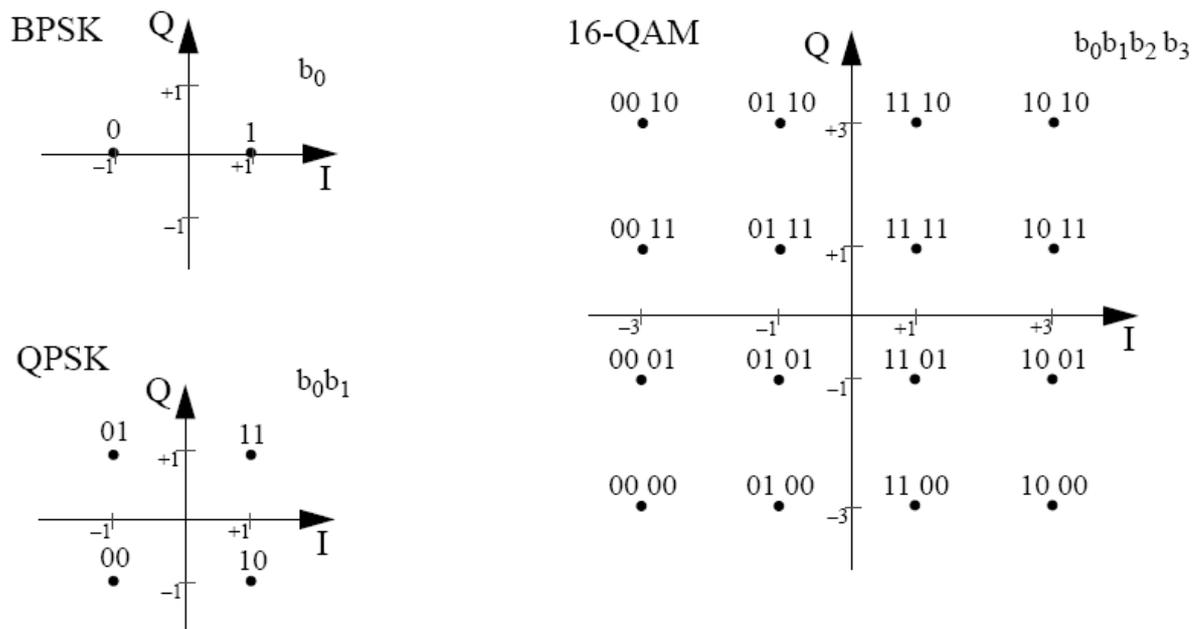
- 
- [32] LI, X.; MARTIN, R. P. A Simple Ray-Sector Signal Strength Model for Indoor 802.11 Networks. Em: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE ADHOC AND SENSOR SYSTEMS CONFERENCE. *Proceedings*. Washington, 2005. Pág. 10.
- [33] HOWARD, A.; SIDDIQI, S.; SUKHATME, G. S. An Experimental Study of Localization Using Wireless Ethernet. Em: THE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FIELD AND SERVICE ROBOTICS. *Proceedings*. Japão, 2003. Disponível em: <http://citeseer.ist.psu.edu/howard03experimental.html>. Acesso em: 7 de outubro de 2007.
- [34] SAHA, S.; CHAUDHURI, K.; SANGHI, D. *et al.*; Location determination of a mobile device using IEEE 802.11b access point signals. Em: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING. *Proceedings*. Louisiana, 2003. Vol. 3. Págs. 1987-1992.
- [35] WANG, Y.; JIA, X.; LEE, H. K. An indoor wireless positioning system based on wireless local area network infrastructure. Em: THE 6TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SATELLITE NAVIGATION TECHNOLOGY INCLUDING MOBILE POSITIONING & LOCATION SERVICES. *Proceedings*. Melbourne, 2003. Disponível em: <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications>. Acesso em: 7 de outubro de 2007.
- [36] LEE, B.S.; NIX, A.R.; MCGEEHAN, J.P. Indoor space-time propagation modelling using a ray launching technique. Em: ELEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION. *Proceedings*. Manchester, 2001. Vol. 1. Págs. 279-283.
- [37] STALLINGS, W. *Cryptography and Network Security Principles and Practices*. 4<sup>th</sup> Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [38] NASSAR, C. R.; NATARAJAN, B.; WU, Z. *et al.* *Multi-Carrier Technologies for Wireless Communications*. 1<sup>st</sup> Edition. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [39] LI, Y. G.; STÜBER, G. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications*. 1<sup>st</sup> Edition. New York: Springer, 2006.
- [40] de OLIVEIRA, H. M. *Análise de Fourier e Wavelets: Sinais Estacionários e não Estacionários*. 1<sup>a</sup> Edição. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2007.
- [41] PRASAD, R. *OFDM for Wireless Communications Systems*. 1<sup>st</sup> Edition. Boston: Artech House, 2004.

- [42] PROAKIS, J. G. *Digital Communications*. 4<sup>th</sup> Edition. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [43] KIM, H. K.; KIM, J. H.; YOON, Y. J. *et al.* A study on the outdoor propagation channel model for the 5 GHz WLAN service. Em: ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM. *Proceedings*: Seoul, 2003. Vol. 4. Págs. 915-918.
- [44] SUJAK, B.; GHODGAONKAR, D.K.; ALI, B.M. *et al.* Indoor propagation channel models for WLAN 802.11b at 2.4 GHz ISM band. Em: ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON APPLIED ELECTROMAGNETICS. *Proceedings*: Kuala Lumpur, 2005. Págs. 373-377.
- [45] SEIDEL, S.Y.; RAPPAPORT, T.S. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, EUA, vol. 40, ed. 2, págs. 207-217, fev. 1992.
- [46] ANDERSEN, J.B.; RAPPAPORT, T.S.; YOSHIDA, S.; Propagation measurements and models for wireless communications channels. *IEEE Communications Magazine*, EUA, vol. 33, ed. 1, págs. 42-49, jan. 1995.
- [47] OLIVEIRA, José Nilson Cordeiro de. *Estudo de Modelos de Predição para Telefonia Móvel Celular*. Recife, 2004. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.
- [48] de OLIVEIRA, J. N. C.; ALENCAR, M. S.; da ROCHA Jr., V. C.; LOPES, W. T. A. A *New Propagation Model for Cellular Planning*. Em: VI INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS SYMPOSIUM. *Proceedings*. Fortaleza, 2006. Págs. 35-37.
- [49] ITU-R Recommendations. *Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900MHz to 100GHz*, ITU-R P.1238-5, Suíça, fev. 2007.
- [50] LLORET, J.; LOPEZ, J. J. *et al.* A fast design model for indoor radio coverage in the 2.4 GHz wireless LAN. Em: 1<sup>st</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WIRELESS COMMUNICATIONS SYSTEMS. *Proceedings*. Mauritius, 2004. Págs. 408-412.
- [51] SUNDARAM, Preethi. *New results for characterization of indoor channels in two ISM Bands (900-928 MHz and 2.4-2.5 GHz)*. Ohio, 2006. Thesis (Master in Electrical Engineering and Computer Science). Russ College of Engineering and Technology, Ohio University.

- 
- [52] ANDERSON, C.R.; RAPPAPORT, T.S. In-building wideband partition loss measurements at 2.5 and 60 GHz. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, EUA, vol. 3, ed. 3, págs. 922-928.
- [53] CHEUNG, K.-W.; SAU, J.H.-M.; MURCH, R.D. A new empirical model for indoor propagation prediction. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, EUA, vol. 47, ed. 3, págs. 996-1001, ago. 1998.
- [54] KLEINBAUM, D.G. *et al.* *Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods*. 3<sup>rd</sup> Edition. California: Duxbury Press, 1998.
- [55] de SOUZA, R. S.; LINS, R. D. *Um Novo Modelo de Propagação para Redes Wi-Fi em 2,4 GHz*. Em: XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES. Anais. Rio de Janeiro, 2008.

# Apêndice A - Constelações BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM utilizadas no modo ERP-OFDM da extensão 802.11g

As Figuras 7.1 e 7.2 exibem as constelações utilizadas no modo ERP-OFDM da extensão 802.11g e, nos eixos I e Q, os respectivos números complexos aos quais devem ser associadas as seqüências de bits moduladas em cada uma das técnicas.



**Figura 7.1** – Constelações BPSK, QPSK e 16-QAM do modo ERP-OFDM.

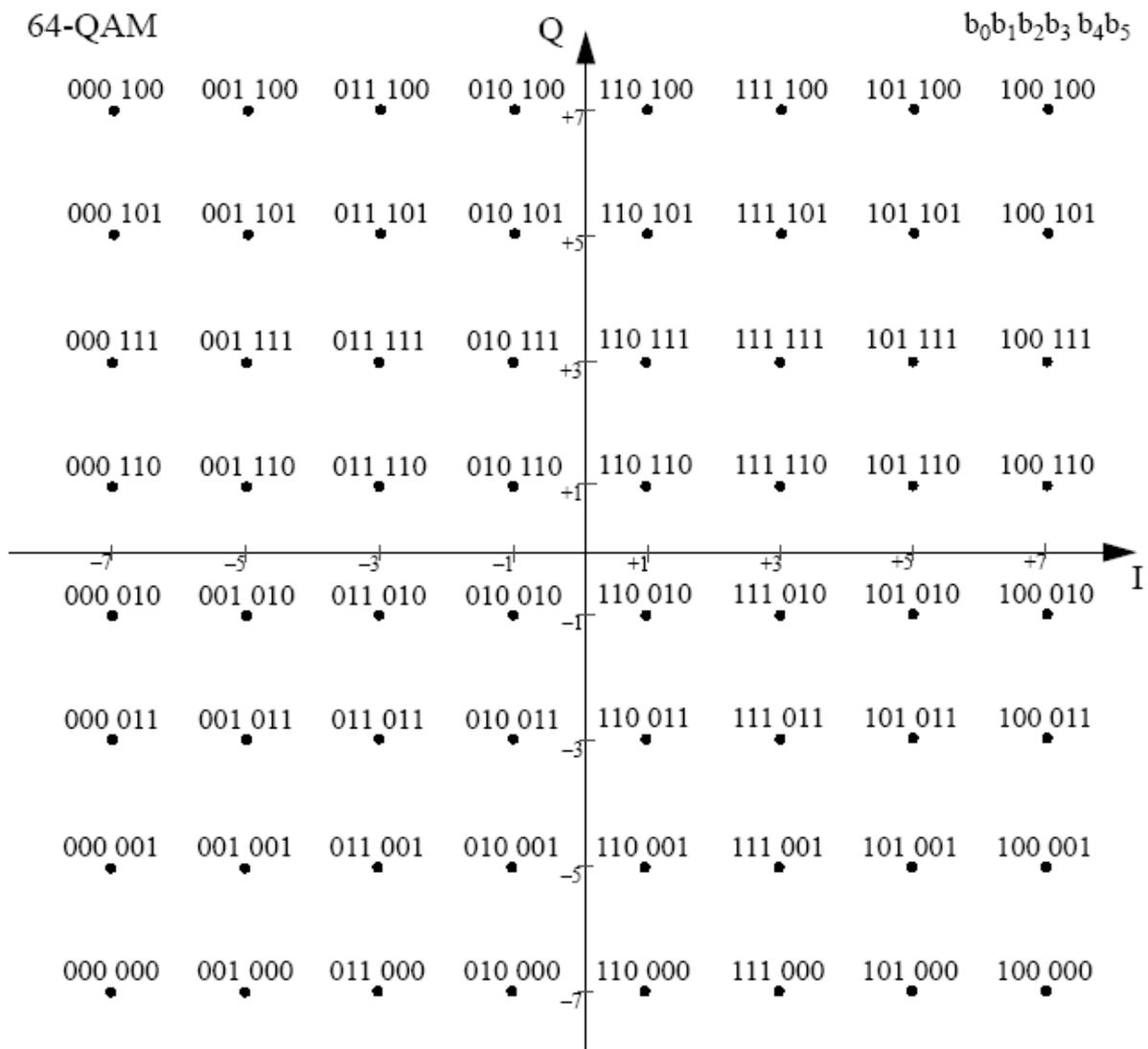


Figura 7.2 – Constelação 64-QAM do modo ERP-OFDM.

## Apêndice B – Função *regress* do Matlab 7.0

A função *regress* do Matlab 7.0 realiza a operação de regressão linear múltipla a partir de dois vetores, por exemplo  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$ , utilizando o método de mínimos quadrados. O vetor  $\mathbf{X}$ , com dimensão  $m$  por  $n$ , deve conter a primeira coluna com todos os elementos iguais a unidade<sup>1</sup> e as demais com os valores das  $n - 1$  variáveis explicativas para cada uma das  $m$  medições da grandeza em análise. Essa, por sua vez, tem seus valores lançados no vetor  $\mathbf{Y}$ , com dimensão  $m$  por 1.

A sintaxe completa para uso da função *regress* é exposta a seguir

$$[\mathbf{B}, \text{BINT}, \mathbf{R}, \text{RINT}, \text{STATS}] = \text{REGRESS}(\mathbf{Y}, \mathbf{X}, \alpha). \quad (\text{B.1})$$

Além dos vetores  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$  a função *regress* também recebe como parâmetro de entrada o valor  $\alpha$  com o qual são computados o intervalo de confiança dos coeficientes da regressão e o intervalo de significância dos resíduos do modelo. Caso seja omitido, o Matlab assume que este valor é igual 0,05, calcula os coeficientes da regressão com nível de confiança de 95% ( $1 - \alpha$ ) e os resíduos com nível de significância de 5% ( $\alpha$ ).

Os coeficientes da regressão são calculados com base na equação

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_{n-1} X_{n-1} + \varepsilon. \quad (\text{B.2})$$

---

<sup>1</sup> A necessidade da primeira coluna ter seus elementos iguais a 1 decorre do modelo de regressão linear múltipla assumir a existência de uma parcela constante e independente das variáveis explicativas, indicada em B.2 por  $\beta_0$ .

Os valores dos coeficientes  $\beta_i$  do modelo de regressão linear múltipla são armazenados no vetor **B** e o intervalo de confiança de cada um deles registrado no vetor **BINT**. Os resíduos do modelo para cada uma das  $m$  medições são indicados no vetor **R** e seu intervalo de significância registrado em **RINT**.

No vetor **STATS** são armazenadas algumas estatísticas relativas à aplicação da regressão linear múltipla aos dados contidos nos vetores **X** e **Y**. A primeira delas é o fator  $R^2$ , amplamente utilizado neste trabalho como fator comparativo na aplicação de regressão linear múltipla para a obtenção de um modelo matemático para a atenuação de sinal. Os demais parâmetros estatísticos são: a estatística F do modelo e seu valor  $p$ , que representam uma forma alternativa de avaliar o desempenho do modelo obtido por meio de regressão linear múltipla [54]; e uma estimativa da variância do erro cometido pelo modelo.

Todas as informações contidas neste apêndice têm como fonte os arquivos de ajuda do Matlab 7.0.