

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Marcelo Najnudel

**Estudo de Propagação em Ambientes Fechados para o
Planejamento de WLANs**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro, fevereiro de 2004



Marcelo Najnudel

**Estudo de Propagação em Ambientes
Fechados para o Planejamento
de WLANs**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti
UFC

Prof. Erasmus Couto Brazil de Miranda
UCP

Prof. Rodolfo Sabóia Lima de Souza
Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 09 de fevereiro de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marcelo Najnudel

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica – PUC-Rio em 2001

Ficha Catalográfica

Najnudel, Marcelo

Estudo de propagação em ambientes fechados para o planejamento de WLANs / Marcelo Najnudel; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

136 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. WLAN. 3. Wi-Fi. 4. Cobertura indoor. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma na
minha formação como pessoa.

Agradecimentos

À toda minha família, e especialmente aos meus pais, pelo incentivo e compreensão durante o período do desenvolvimento deste trabalho;

À minha namorada Marisa, pelo apoio, carinho e compreensão;

Ao meu orientador, Professor Luiz Alencar Reis da Silva Mello, pela orientação e entusiasmo;

Aos meus amigos e mestres, Bruno Maia e Marcio Rodrigues, pelas várias horas de discussões e constante preocupação com o andamento do trabalho;

Aos meus amigos, Marcos Pernambuco e Luiz Gonçalves, pela contribuição direta no desenvolvimento do *software* de testes que acompanha o trabalho;

À Professora Marlene Sabino Pontes, pela confiança e incentivo para iniciar e completar esta empreitada;

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Najnudel, Marcelo; Silva Mello, Luiz Alencar Reis. **Estudo de Propagação em Ambientes Fechados para o Planejamento de WLANs**. Rio de Janeiro, 2004. 136p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Recentemente, tem sido observado um crescimento explosivo na utilização de redes de acesso local sem fio (*Wireless Local Area Networks – WLANs*), utilizando equipamentos de nível de radiação restrito operando em bandas independentes de outorga de uso de rádio frequência, tanto para uso corporativo como doméstico e para prover acesso pago em ambientes públicos como aeroportos, hotéis, centros de convenções, campi universitários e mesmo restaurantes e cafés. Se estas redes serão complementares ou competidoras das redes celulares de terceira e quarta gerações é ainda uma questão polêmica e aberta.

Os objetivos deste trabalho são o desenvolvimento um modelo de propagação de sinais na faixa de frequência de 2,4 GHz em ambientes fechados (*indoor*), para a previsão de cobertura de *WLANs*, e prover ao projetista de redes *wireless* uma metodologia um bom dimensionamento da rede. São apresentados os principais modelos semi-empíricos já existentes na literatura técnica e, a partir de medidas realizadas em diferentes ambientes, é proposto um ajuste de parâmetros de um modelo de propagação *indoor* bastante completo. As medidas realizadas incluem as perdas de penetração em paredes de diferentes materiais, o efeito de difração em quinas de paredes, efeito de movimentação de pessoas no ambiente, além do coeficiente de perda de propagação com a distância.

Os modelos desenvolvidos foram implementados numa ferramenta de *software* para o planejamento de cobertura de redes *wireless indoor* que permite realizar o projeto a partir da planta baixa do ambiente disponibilizada em arquivos de imagem.

Palavras-chave

WLAN; Wi-Fi; cobertura indoor.

Abstract

Recently, an explosive growth in the use of Wireless Local Area Networks – WLANs, using restricted radiation levels and operating in license exempted frequency bands, has been observed, not only for corporative domestic use but also to provide paid internet access in public environments such as airports, hotels, convention centers, university campus and even restaurants and coffee shops. The question if these networks will be complementary or will compete with third and fourth generation of cellular networks, is still a controversial and opened.

The objectives of this work are the development a model for propagation in closed environments (indoor) at the 2,4 GHz frequency band for the coverage planning of WLANs and to provide the wireless network designer with a complete project methodology . The most important semi-empirical models available in the technical literature are presented and, based on measurements carried out in different environments, a fairly complete model with fitted parameters is proposed. The measurements include losses of penetration in walls of different materials, the effect of diffraction at wall edges, the effect of movement of people in the environment and the rate of loss with distance coefficient.

The developed models have been implemented in a software tool for coverage planning of wireless indoor networks that allows the development of the project starting from blue prints of the environment available as digital image files.

Keywords

WLAN; Wi-Fi; indoor coverage.

Sumário

1. Introdução	13
1.1. Histórico	14
1.2. Visão geral	15
1.3. Vantagens e desvantagens das <i>Wireless LANs</i> sobre as <i>Wired LANs</i>	16
1.4. Componentes de <i>WLANs</i>	17
1.4.1. Access Point (AP).....	17
1.4.2. Wireless Bridge	18
1.4.3. Workgroup Bridge (WB).....	19
1.4.4. Client adapter.....	20
1.5. Segurança em redes <i>wireless</i>	21
2. Considerações sobre <i>WLAN</i> em ambientes fechados	24
2.1. Interferência.....	24
2.2. Polarização	27
2.3. Diversidade de antenas.....	27
2.4. Cobertura	28
2.4.1. Topologia Peer-to-peer	29
2.4.2. Topologia Infra-estrutura	30
2.5. Tráfego.....	34
3. Modelos de propagação em ambientes fechados.....	35
3.1. Introdução.....	35
3.2. Caracterização do comportamento do canal rádio	35
3.2.1. Dependência com a distância	36
3.2.2. Variabilidade de larga escala	38
3.2.3. Variabilidade de pequena escala	39
3.3. Outros mecanismos e efeitos de propagação	40
3.3.1. Perda de penetração	40
3.3.2. Multipercursos.....	41
3.3.3. Reflexão, Refração, Difração e Espalhamento	41
3.3.4. Efeito da umidade	42
3.4. Modelos Teóricos e Empíricos.....	43
3.5. Modelos Teóricos	43
3.5.1. Modelo de 2 raios	43
3.5.2. Modelo de 6 raios	48
3.6. Modelos Semi-empíricos.....	51

3.6.1.	Modelos Log-distance [17]	51
3.6.2.	ITU-R P.1238-1 [18,19]	51
3.6.3.	Modelo COST 231 Keenan e Motley [17,21,22]	53
3.6.4.	Modelo COST 231 Multi-Wall [17,23,24]	53
3.7.	Comparação entre os modelos	54
4.	Teste de propagação	56
4.1.	Equipamentos utilizados nos testes de propagação	57
4.2.	Testes de propagação <i>indoor</i>	57
4.2.1.	Teste de LoS	59
4.2.2.	Teste de LoS em corredor estreito	66
4.2.3.	Difração em bordas	69
4.2.4.	Teste de atenuação em paredes	70
4.2.5.	Movimento de pessoas	71
4.2.6.	Teste de cobertura geral	71
5.	Modelo de propagação ajustado	77
5.1.	Modelo <i>single-slope</i> de ajuste parcial	77
5.1.1.	Perda de propagação inicial (L_o)	78
5.1.2.	Perda de penetração em obstáculos (L_{wi})	79
5.1.3.	Coefficiente de propagação (n)	79
5.2.	Modelo <i>single-slope</i> de ajuste completo	80
5.3.	Modelos dual-slope	84
5.3.1.	Modelo dual-slope com dados de visada (LoS)	84
5.3.2.	Modelo dual-slope com dados de LoS e NLoS	85
6.	Metodologia de projeto	89
6.1.	Definição das necessidades dos usuários	89
6.2.	Mapeamento de outras redes existente	89
6.3.	Planejamento de cobertura	90
6.3.1.	Previsão de cobertura	90
6.3.2.	Medidas de campo	91
6.4.	Planejamento de capacidade	91
6.5.	Planejamento de frequência	92
6.5.1.	Interferências da própria rede (intra-sistêmicas)	92
6.5.2.	Interferências de outros dispositivos (inter-sistêmicas)	95
6.6.	Atendimento aos limites de irradiação	96
6.7.	Instalação	98
7.	Estudo de caso	99
7.1.	Necessidades dos usuários	99
7.2.	Redes existentes	100

7.3.	Planejamento de cobertura	100
7.4.	Comparação entre os modelos ajustados	109
7.5.	Planejamento de capacidade.....	110
7.6.	Planejamento de frequência	113
8.	Conclusões e sugestões	114
	Referências Bibliográficas	117
	APÊNDICES.....	119
1.	Software de testes.....	119
1.1.	Características gerais.....	119
1.2.	Orientação espacial.....	119
1.3.	Marcações do mapa	121
1.3.1.	Posicionamento do AP	121
1.3.2.	Posicionamento dos pontos de medidas	121
1.3.3.	Atributos gráficos dos pontos	121
1.3.4.	Propriedades dos pontos.....	123
1.3.5.	Descritivo dos pontos	123
1.4.	Configurações	124
1.4.1.	Referencia de distância	124
1.4.2.	Resolução de cobertura.....	125
1.5.	Propagação	126
1.5.1.	Modelos de propagação	126
1.5.2.	Survey de cálculo.....	126
1.5.3.	Predição de cobertura	128
1.6.	Salvar, Carregar e Exportar Projetos.....	129
1.7.	Ferramentas de análise.....	129
1.7.1.	Gráfico.....	129
1.7.2.	Análise Excel®.....	130
2.	Medição do nível de sinal recebido.....	131
2.1.	Nível de sinal recebido	131
2.2.	Características de RSSI no padrão 802.11	132
2.3.	Características de equipamentos.....	132
2.4.	Hardware para obtenção de RSSI	134
2.5.	Comentários finais.....	135

Lista de figuras

Figura 1 – Exemplo de <i>Access Point</i> e antenas externas	18
Figura 2 – (a) Conexão ponto-a-ponto, (b) Conexão ponto-multiponto	19
Figura 3 – Exemplo de <i>Wireless Bridge</i>	19
Figura 4 – Exemplo de <i>Workgroup Bridge</i>	20
Figura 5 – Exemplo de <i>Client Adapters</i> (PCMCIA e PCI)	20
Figura 6 – Influência de sinal (banda estreita) em um sinal espalhado	25
Figura 7 – Transmissor <i>DS</i> utilizando <i>BPSK</i>	26
Figura 8 – Topologia <i>ad hoc</i>	29
Figura 9 – Topologia Infra-estrutura (configuração unicelular)	30
Figura 10 – Topologia Infra-estrutura (configuração com superposição celular)	31
Figura 11 – Topologia Infra-estrutura (configuração multicelular)	32
Figura 12 – Topologia Infra-estrutura (configuração <i>Multi-Hop</i>).....	33
Figura 13 – Gráfico de perda mediana em relação à distância.....	36
Figura 14 – Gráfico de retas ajustadas à perda mediana em relação à distância	37
Figura 15 – Gráfico de variabilidade de pequena e larga escala.....	39
Figura 16 – Ilustração de ocorrência de multipercursos.....	41
Figura 17 – (a) Reflexão e Refração, (b) Difração, (c) Espalhamento	42
Figura 18 – Ilustração do modelo de 2 raios.....	44
Figura 19 – Ilustração do modelo de 6 raios (vista superior do ambiente).....	48
Figura 20 – Ilustração detalhada do modelo de 6 raios (raios 4 e 6, vista lateral)	49
Figura 21 – Teste de <i>LoS</i> em corredor (PUC-Rio, Prédio Cardeal Leme 3º piso)	60
Figura 22 – Gráfico de Distância x Potência recebida no teste de <i>LoS</i>	62
Figura 23 – Gráfico1 (log-log) de Distância x Potência recebida no teste de <i>LoS</i>	63
Figura 24 – Gráfico2 (log-log) de Distância x Potência recebida no teste de <i>LoS</i>	63
Figura 25 – Gráfico3 (log-log) de Distância x Potência recebida no teste de <i>LoS</i>	64
Figura 26 – Gráfico4 (log-log) de Distância x Potência recebida no teste de <i>LoS</i>	65
Figura 27 – Teste de <i>LoS</i> em corredor para 5 mW	66
Figura 28 – Teste de <i>LoS</i> em corredor estreito (CETUC)	67
Figura 29 – Difração em bordas.....	69
Figura 30 – Medidas efetuadas em ambiente <i>indoor</i>	72
Figura 31 – Medidas com dois <i>APs</i> em ambiente comercial	74
Figura 32 – (a) Áreas de <i>roaming</i> entre <i>APs</i> , (b) Melhor servidor inicial	76
Figura 33 – Gráfico de valores medidos <i>versus</i> valores calculados (modelo <i>single-slope</i> de ajuste completo)	83
Figura 34 – Histograma da diferença entre potência calculada e medida (modelo <i>single-slope</i> de ajuste completo)	84
Figura 35 – Gráfico de valores medidos <i>versus</i> valores calculados (modelo <i>dual-</i> <i>slope</i> com dados de <i>LoS</i> e <i>NLoS</i>)	87

Figura 36 – Histograma da diferença entre potência calculada e medida (modelo <i>dual-slope</i> com dados de <i>LoS</i> e <i>NLoS</i>)	88
Figura 37 – Ilustração da canalização do padrão IEEE 802.11 no Brasil (2,4 GHz)	93
Figura 38 – Ilustração de projeto ideal de canalização	94
Figura 39 – Interferências inter-sistêmicas.....	95
Figura 40 – Cobertura provida pelo AP1	102
Figura 41 – Cobertura provida pelo AP2	103
Figura 42 – Numeração dos pontos medidos no CETUC.....	105
Figura 43 – Projeto da fase 3 no CETUC	112
Figura 44 – Posição de fontes de interferência (microondas) no CETUC.....	113
Figura 45 – Tela principal do <i>software WLAN walktest</i>	120
Figura 46 – Diálogo de criação de obstáculos	122
Figura 47 – Exemplo de criação de obstáculos.....	123
Figura 48 – Exemplo de apresentação de propriedades de ponto de medida	123
Figura 49 – Diálogo de definição de escala do mapa	124
Figura 50 – Exemplo de marcação de limites para definição de escala.....	125
Figura 51 – Exemplos de resolução cobertura: (a) Alta, (b) Média, (c) Baixa.	125
Figura 52 – Exemplo de <i>Survey</i> de cálculo	127
Figura 53 – (a) Exemplo de projeto de cobertura, (b) Rampa de cor de potência	128
Figura 54 – Arquitetura de um receptor 802.11	134

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo dos padrões IEEE 802.11.....	16
Tabela 2 – Perdas de penetração em obstáculos em 2,4 GHz.....	40
Tabela 3 – Valores de condutividade e permissividade elétrica relativa [15]... ..	45
Tabela 4 – Coeficiente de atenuação em relação à distância (ITU P. 1238-1)... ..	52
Tabela 5 – Coeficiente de atenuação por piso atravessado (ITU P. 1238-1).....	52
Tabela 6 – Desvio padrão da distribuição log-normal (ITU P. 1238-1).....	52
Tabela 7 – Perdas de penetração em obstáculos (<i>European COST 231</i>).....	53
Tabela 8 – Comparação entre os modelos de propagação semi-empíricos.....	54
Tabela 9 – Valores medidos de teste de <i>LoS</i> para 20 e 50 mW	61
Tabela 10 – Valores medidos de teste de <i>LoS</i> para 5 mW	66
Tabela 11 – Valores medidos de teste de <i>LoS</i> em corredor estreito	68
Tabela 12 – Perdas de penetração em obstáculos (medidas)	70
Tabela 13 – Atenuação devido a movimentação de pessoas	71
Tabela 14 – Valores de perda de propagação a 1 metro da antena irradiante..	78
Tabela 15 – Perdas de penetração em obstáculos (medidas)	79
Tabela 16 – Valores de coeficientes de propagação	80
Tabela 17 – Valores das variáveis ajustáveis (modelo <i>single-slope</i> de ajuste completo).....	82
Tabela 18 – Valores das variáveis ajustáveis (modelo <i>dual-slope</i> com dados de <i>LoS</i> e <i>NLoS</i>)	87
Tabela 19 – Valores usuais de tráfego médio por usuário de rede.....	91
Tabela 20 – Canalização do padrão IEEE 802.11 no Brasil (2,4 GHz)	93
Tabela 21 – Limites de exposição a irradiação não-ionizante (Res. 303 – Anatel)	97
Tabela 22 – Distâncias mínimas a antenas transmissoras (Res. 303 – Anatel)	97
Tabela 23 – Comparação entre valores medidos e calculados para o <i>AP1</i>	107
Tabela 24 – Comparação entre valores medidos e calculados para o <i>AP2</i>	108
Tabela 25 – Tabela de conversão de RSSI em dBm (Cisco)	133
Tabela 26 - Tabela de conversão de RSSI em dBm (Symbol).....	134