

Fernando Jose de Almeida Andrade

**Planejamento de Sistemas Fixos para
Acesso Sem Fio em Faixa Larga
Operando em Ambientes Abertos
em Frequências entre 10 e 66 GHz**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica**

Rio de Janeiro, abril de 2006



Fernando Jose de Almeida Andrade

**Planejamento de Sistemas Fixos para
Acesso Sem Fio em Faixa Larga
Operando em Ambientes Abertos
em Frequências entre 10 e 66 GHz**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro

Abril de 2006



Fernando José de Almeida Andrade

**Planejamento de Sistemas Fixos para
Acesso Sem Fio em Faixa Larga
Operando em Ambientes Abertos em
Frequências entre 10 e 66 GHz**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau 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. Geraldo Gil Ramundo Gomes
INATEL

Prof. Erasmus Couto Brazil de Miranda
UCP

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

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

Rio de Janeiro, 12 de abril de 2006

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

Fernando Jose de Almeida Andrade

Graduou-se em Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1989. Especializou-se em Engenharia de Redes e Sistemas de Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações em 2003. Trabalhou durante 13 anos com automação comercial e sistemas de telecomunicações.

Ficha Catalográfica

Andrade, Fernando Jose de Almeida

Planejamento de sistemas fixos para acesso sem fio em faixa larga operando em ambientes abertos em frequências entre 10 e 66 GHz / Fernando Jose de Almeida Andrade ; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

149 f. : il. (col.) ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. BWA. 3. WMAN. 4. WiMAX. 5. IEEE 802.16. 6. Banda larga. 7. Comunicações sem fio. 8. Radio-propagação. 9. Atenuação por chuvas. 10. Planejamento. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para minhas filhas, Fernanda e Mariana,
que chegaram durante a realização
deste trabalho.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Luiz Alencar Reis da Silva Mello, pela orientação e apoio para a realização deste trabalho e durante todo o curso;

À Professora Marlene Sabino Pontes pela confiança e pelo incentivo durante a realização do curso;

Ao Erasmus Miranda pela preciosa colaboração com valiosas sugestões;

À minha esposa, Maura, pelo apoio, paciência e colaboração que foram decisivos para a realização deste trabalho especialmente durante esta etapa da minha vida após o nascimento de nossas filhas;

Aos meus pais, Moacyr e Renita, pela educação, apoio e incentivo por toda a minha vida;

À minha tia, Thery, pelo carinho, incentivo e apoio permanentes;

À Maria Lúcia pela permanente disposição para colaborar na biblioteca do CETUC;

À PUC-Rio pela bolsa que viabilizou o início da realização dos estudos;

Ao CNPQ pelo auxílio concedido, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado;

À FAPERJ pelo auxílio concedido através do Programa Bolsa Nota Dez, imprescindível para a realização deste trabalho.

Resumo

Andrade, Fernando Jose de Almeida; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da. **Planejamento de Sistemas Fixos para Acesso Sem Fio em Faixa Larga Operando em Ambientes Abertos em Frequências entre 10 e 66 GHz.** Rio de Janeiro, 2006. 149p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O projeto de sistemas fixos de acesso sem fio em banda larga operando em ambientes abertos em frequências entre 10 e 66 GHz requer um planejamento criterioso devido à necessidade de maximizar a utilização da largura de banda disponível, maximizar a capacidade da rede, garantir requisitos mínimos de disponibilidade e minimizar os custos em um tipo de ambiente e em uma faixa de frequências em que as ondas eletromagnéticas são sujeitas a fenômenos específicos durante a propagação. Este trabalho apresenta os aspectos envolvidos no planejamento de sistemas deste tipo que utilizam topologia ponto-multiponto e atendem à recomendação IEEE 802.16. São apresentados modelos para previsão de cobertura, cálculo da atenuação diferencial por chuvas e previsão da atenuação por chuvas considerando a não-homogeneidade das chuvas em duas dimensões horizontalmente. Os efeitos das interferências no desempenho dos sistemas são analisados em conjunto com alguns exemplos de planejamento das células. Os aspectos importantes para o planejamento da capacidade são descritos e técnicas que permitem maximizar a capacidade são apresentadas. Com o objetivo de organizar todas as informações para ajudar em situações reais uma metodologia de planejamento é proposta incluindo considerações técnicas, mercadológicas e financeiras.

Palavras-chave

BWA; WMAN; WiMAX; IEEE 802.16; Banda Larga; Comunicações Sem Fio; Rádio-propagação; Atenuação por Chuvas; Planejamento.

Abstract

Andrade, Fernando Jose de Almeida; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Advisor). **Planning of Outdoor Broadband Fixed Wireless Access Systems Operating at 10-66 GHz Band.** Rio de Janeiro, 2006. 149p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The development of outdoor fixed broadband wireless access (BWA) systems operating at 10-66 GHz frequency requires a carefully planning in order to maximizing the use of the bandwidth, maximizing network capacity, assuring minimum requirements of availability and minimizing costs in an environment and in a frequency band where the propagation of electromagnetic waves are subjected to specific issues. This work presents the aspects related to the development of this kind of system in a point-to-multipoint architecture standardized by the IEEE 802.16 recommendation. Models to predict coverage, estimate differential rain attenuation and predict rain attenuation considering the un-homogeneity of the rain in horizontal plane. The effects of interference in the system performance are discussed with some examples of cell planning. The main aspects of capacity planning are described and techniques to maximize capacity are presented. In order to helping the planners in practical situations the information are organized in a proposal of planning methodology that includes technical, business and marketing issues.

Keywords

BWA; WMAN; WiMAX; IEEE 802.16; broadband; wireless; propagation; rain attenuation; planning.

Sumário

1 Introdução	16
1.1. Histórico	18
2 Tecnologia IEEE 802.16	21
2.1. Introdução	21
2.2. Faixas de frequências de operação	21
2.3. Topologias de rede	22
2.4. Camada de controle de acesso ao meio (MAC)	24
2.5. Camada física para a faixa de 10 a 66 GHz	27
2.5.1. Enlace de descida	28
2.5.2. Enlace de subida	29
2.5.3. Taxas de comunicação e larguras de canais	29
2.5.4. Subsistema de rádio	30
2.5.5. Requisitos de desempenho	31
2.5.6. Medidas de qualidade do canal	32
3 Propagação em ambientes abertos na faixa 10-66 GHz	33
3.1. Perdas na propagação	35
3.1.1. Atenuação por gases atmosféricos e vapor de água	35
3.1.2. Atenuação por chuva	36
3.1.3. Atenuação diferencial	43
3.1.4. Variação nos ângulos de partida e chegada das ondas	45
3.1.5. Desvanecimentos por outros mecanismos	46
3.2. Cálculo da atenuação total na propagação	46
3.3. Redução na discriminação da polarização cruzada (XPD)	47
4 Aspectos Técnicos para o Planejamento	48
4.1. Cobertura	49
4.1.1. Previsão da área não sujeita a obstrução por edificações	51

4.1.2. Efeitos das chuvas na cobertura	54
4.1.3. Efeitos de outros fatores na cobertura	58
4.1.4. Melhoria da cobertura	59
4.2. Interferências	59
4.2.1. Coexistência entre sistemas	61
4.2.2. Interferências intra-sistema	65
4.2.3. Minimização de interferência	70
4.3. Planejamento de frequências e setorização	72
4.3.1. Influência da setorização e do tipo de modulação na cobertura	78
4.3.2. Exemplo de configuração para um conjunto de células	79
4.4. Capacidade	82
4.4.1. Aspectos que influem na capacidade de um sistema	82
4.4.2. Técnicas para aumento da capacidade	84
4.4.3. Escalabilidade no planejamento da capacidade	86
5 Metodologia de Planejamento	88
5.1. Proposta de metodologia de planejamento	89
5.2. Projeto de rede	94
5.2.1. Raio das células em sistemas baseados no padrão IEEE 802.16	94
5.2.2. Cálculo da capacidade	111
5.2.3. Estimativa de interferência co-canal	114
5.2.4. Metodologia de projeto de rede	117
6 Estudo de caso	124
7 Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros	135
8 Referências bibliográficas	137
APÊNDICE A Informações sobre o Projeto Realizado	146

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Arranjos de canais de RF [12]	30
Tabela 3.1 – Coeficientes para cálculo da atenuação específica na faixa de frequências em estudo [34]	41
Tabela 4.1 – Espaçamento necessário conforme o tipo de cenário [11]	64
Tabela 4.2 – Valores mínimos de S/I_a [12]	68
Tabela 4.3 – Influência do tipo de modulação e da quantidade de setores na área de cobertura [40]	79
Tabela 5.1 – Valores mínimos de potência no receptor em dBm para cada tipo de modulação conforme especificação de taxa de erro de bits (BER) [12]	96
Tabela 5.2 – Parâmetros de um sistema IEEE 802.16 no enlace de descida	100
Tabela 5.3 – Potência mínima de no receptor da estação assinante de um sistema IEEE 802.16.	101
Tabela 5.4 – Requisitos mínimos de relação $S/(N+I)$.	101
Tabela 5.5 – Níveis máximos de interferência em dBm no limiar do receptor de uma estação assinante.	101
Tabela 5.6 – Raio máximo das células em condições de céu claro para $BER = 10^{-6}$.	102
Tabela 5.7 – Raio máximo das células em condições de céu claro para $BER = 10^{-3}$.	103
Tabela 5.8 – Taxas de chuvas das cidades analisadas.	105
Tabela 5.9 – Raio máximo das células em condições de chuvas (Paris)	105
Tabela 5.10 – Raio máximo das células em condições de chuvas (Rio de Janeiro)	106
Tabela 5.11 – Raio máximo das células em condições de chuvas (Belém)	106
Tabela 6.1 – Raio máximo da célula na cidade de São Paulo	127
Tabela A.1 – Especificações das estações base	146

Lista de figuras

Figura 3.1 – Propagação em visada direta [18].	33
Figura 3.2 - Atenuação específica por gases atmosféricos e vapor de água [25].	37
Figura 3.3 - Diferença de atenuação entre polarização horizontal e vertical [26]	38
Figura 3.4 – Situação de atenuação diferencial por chuvas [22].	44
Figura 4.1 – Ilustração da localização das edificações entre as estações transmissora e receptora [43]	52
Figura 4.2 – Ilustração das distâncias envolvidas na determinação da condição de desobstrução entre as estações transmissora e receptora [43]	53
Figura 4.3 – Ilustração de uma célula de raio L e área de cobertura durante a ocorrência de chuvas limitada pelo raio d_0 [43]	56
Figura 4.4 – Variação da cobertura em função do raio da célula para diferentes alturas da antena da estação base [43].	60
Figura 4.5 – Variação da cobertura em função do raio da célula para diferentes alturas das antenas das estações assinantes [43]	60
Figura 4.6 – Formas de interferência [11].	61
Figura 4.7 – Interferências intra-sistema [46].	65
Figura 4.8 – Diagrama de irradiação de uma das antenas da estação base G [46]	66
Figura 4.9 – Ilustração de relação sinal/interferência de canal adjacente [46]	67
Figura 4.10 – Ilustração de configuração com células retangulares e setores de 90° .	74
Figura 4.11 – Ilustração de configuração de células com repetição “espelhada” dos canais [54].	76
Figura 4.12 – Configuração de células com o uso de polarizações diferentes [46].	77

Figura 4.13 – Distribuição de valores de S/I dentro de um setor [54].	78
Figura 4.14 – Exemplo de configuração comum [55].	80
Figura 4.15 – Minimização das áreas sujeitas a problemas de cobertura [55].	81
Figura 4.16 – Configuração com uso de polarizações diferentes na fronteiras entre setores [46].	85
Figura 4.17 – Aumento gradual da capacidade [53]	86
Figura 5.1 – Etapas principais do planejamento	90
Figura 5.2 – Raio máximo das células em condições de céu claro	103
Figura 5.3 – Regiões da célula com cada tipo de modulação.	104
Figura 5.4 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (QPSK)	107
Figura 5.5 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (16-QAM)	108
Figura 5.6 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (64-QAM)	108
Figura 5.7 – Efeito da especificação da disponibilidade no raio máximo da célula em condições de chuvas	109
Figura 5.8 – Variação do raio máximo da célula em condições de chuvas conforme a especificação da taxa de erro de bits e do tipo de modulação utilizado	110
Figura 5.9 – Exemplo de análise de visibilidade [60]	119
Figura 6.1 – Região da cidade de São Paulo onde a rede foi projetada	125
Figura 6.2 – O relevo da região escolhida está apresentado na área destacada	125
Figura 6.3 – Ilustração da área total com visibilidade para os locais escolhidos para as estações base	127
Figura 6.4 – Tamanho das células e área com cada tipo de modulação	129
Figura 6.5 – Mapa de cobertura com intensidade de sinal em situação de céu claro	130
Figura 6.6 – Mapa de cobertura conforme o melhor servidor em situação de céu claro	130

Figura 6.7 – Mapa de cobertura conforme o tipo de modulação (céu claro)	131
Figura 6.8 – Cobertura através de modulação QPSK considerando as chuvas	131
Figura 6.9 – Mapa de níveis de relação $S/(N+I)$	133

*O amor somado ao perdão é a
fórmula infalível para se obter a paz.*

Isabel Salomão de Campos