



**Marta Pudwell Chaves de Almeida**

**Modelamento de Efeitos de Propagação em Enlaces  
Satélite de Órbita Baixa**

**Tese de Doutorado**

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

Orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro  
Agosto de 2003



**Marta Pudwell Chaves de Almeida**

**Modelamento de Efeitos de Propagação em Enlaces  
Satélite de Órbita Baixa**

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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..

**Dr. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**

Orientador

Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

**Dr. Erasmus Couto Brazil de Miranda**

Co-Orientador

UCP

**Dr. Luiz Cláudio Palma Pereira**

Fundação CPqD

**Dr. Mauro Soares de Assis**

IME

**Dr. Eduardo Javier Arancibia Vásquez**

TIM / Brasil

**Dr. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia**

Centro de Estudos de Telecomunicações – PUC-Rio

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de agosto de 2003

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

### **Marta Pudwell Chaves de Almeida**

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações pela PUC-Rio em 1993. Fez Mestrado em Engenharia Elétrica, com área de concentração em Eletromagnetismo Aplicado, 1996.

#### Ficha Catalográfica

Almeida, Marta Pudwell Chaves de

Modelamento de efeitos de propagação em enlaces satélite de órbita baixa / Marta Pudwell Chaves de Almeida; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

141 f. :li. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Atenuação por chuvas. 3. Propagação de ondas radioelétricas. 4. Precipitação. 5. Enlaces satélite. 6. Sistemas de órbita baixa. 7. Satélites geoestacionários. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título

*Ao meu marido  
Alexandre*

*às nossas pequenas  
Marianna e Manuela.*

## Agradecimentos

Ao professor Silva Mello, meu orientador, por ter me guiado neste trabalho e por ter compreendido as mudanças em minha vida durante esta caminhada.

Ao amigo Erasmus, pelo incentivo e pela grande colaboração no desenvolvimento do trabalho.

Ao Rodolfo, pelo apoio na utilização do banco de dados, e ao Marcelo Jimenez pelo valioso auxílio durante o desenvolvimento do programa de simulação.

Ao CNPQ pelo apoio concedido para a realização do trabalho.

Ao Alexandre, meu marido dedicado, meu amigo e meu maior incentivador, pelo apoio incondicional que foi decisivo para a conclusão da tese.

Ao meu pai José, pelo estímulo contínuo, e muito especialmente à minha mãe Isolete, pelo carinho e pelo apoio diário.

À Rose, cuja função foi primordial para que eu pudesse me dedicar com tranquilidade a este trabalho.

## Resumo

Almeida, Marta Pudwell Chaves de. **Modelamento de Efeitos de Propagação em Enlaces Satélite de Órbita Baixa**. Rio de Janeiro, 2003. 141p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O efeito da atenuação por chuvas em enlaces satélites que operam em frequências acima de 10 GHz é decisivo no cálculo de desempenho do sistema. A evolução da tecnologia dos sistemas satélite e a necessidade de expansão dos serviços de comunicações móveis pessoais levaram ao uso de sistemas de comunicação com satélites de órbita baixa. Estes sistemas são particularmente interessantes para o oferecimento destes serviços por suas características de pequeno atraso de propagação e uso de potência de transmissão mais baixas que os sistemas geoestacionários. Satélites em órbita baixas (LEO) operam em altitudes de cerca de 1000km e possuem movimento em relação à estação terrena. Esta característica de mobilidade traz novas questões sobre o comportamento da atenuação por chuvas, em particular a necessidade de um modelo de previsão de atenuação para estes enlaces com ângulo de elevação variante no tempo. Neste trabalho um modelo para a previsão de atenuação em enlaces com ângulo de elevação fixo, mais preciso do que os existentes na literatura técnica, foi desenvolvido como primeiro passo para o tratamento do problema de enlaces com ângulo de elevação variável. A seguir foi feita uma simulação de medidas em enlaces LEO a partir do banco de dados de medidas de atenuação em enlaces fixos no Brasil, considerando um modelo de constelação de satélites. Foi implementado um método geral que utiliza o histograma dos ângulos de elevação do satélite como ponderação da distribuição cumulativa de atenuação em cada ângulo. O método foi testado contra os resultados obtidos com simulações para a constelação Globalstar sendo obtida muito boa concordância entre o modelo de predição desenvolvido e a simulação.

## Palavras-chave

Atenuação por chuvas, propagação de ondas radioelétricas, precipitação, enlaces satélite, sistemas de órbita baixa, satélites geoestacionários.

## **Abstract**

Almeida, Marta Pudwell Chaves de. **Modelamento de Efeitos de Propagação em Enlaces Satélite de Órbita Baixa**. Rio de Janeiro, 2003. 141p. PhD Thesis – Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Rain attenuation is the most important propagation effect to be taken into account in the performance calculation for satellite systems operation at frequencies above 10 GHz. The technological evolution of such systems and the need for personal communication systems with global coverage lead to the use of low earth orbit communication systems, that not only have shorter propagation delays but also allow the use of lower transmission power than the traditional geostationary systems. Low earth orbit (LEO) satellites have altitudes around 1.000 Km and are in motion relatively to the earth stations. This mobility requires a new approach to the problem of rain attenuation prediction, particularly the need for a prediction model that takes into account the elevation angle variability. In this work, an improved rain attenuation prediction method for the geostationary case has been developed as a starting point for the analysis of the non-geostationary case. Then, the rain attenuation in the a LEO system has been simulated using measured data from fixed system systems and the satellite constellation model. A general method for slant path rain attenuation prediction considering variable elevation angles is proposed. The method uses the histogram of the elevation angles to weight the distributions obtained for fixed elevation. The method has been tested with simulations performed for the Globalstar LEO system and a very good agreement was obtained.

## **Key words**

Satellite links, rain attenuation, radio propagation.

## Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Sistemas Satélite Não Geoestacionários	19
1.2.	Alocação de Frequências	22
1.3.	Sistema de Rastreamento de Satélites	22
1.4.	Atenuação por Chuvas	24
1.4.1.	Atenuação específica	24
1.4.2.	Modelagem da estrutura da chuva	25
1.4.3.	Modelos de previsão de atenuação da UIT-R e CETUC	27
2	Modelagem da previsão de atenuação por chuvas em enlaces GEO	34
2.1.	Preparação do Banco de Dados	36
2.2.	Métodos utilizados na estimação dos parâmetros de $L_o$ e $h_r$	36
2.3.	Procedimento de modelagem dos parâmetros de $L_o$ e $h_r$	37
2.4.	Aplicação dos modelos de previsão Cetuc/BR e Cetuc/Global no Brasil	41
2.5.	Comparação entre o modelo desenvolvido e o modelo UIT-R	43
2.6.	Conclusão	46
3	Desenvolvimento da fórmula de conversão de atenuação	48
3.1.	Banco de dados de atenuação e taxa de precipitação	49
3.2.	Determinação da fórmula de conversão de atenuação	50
3.3.	Validação da fórmula de conversão – Tipo I	53
3.3.1.	Resultados da aplicação das conversões nas distribuições cumulativas de atenuação	54
3.3.2.	Comparação entre os modelos de conversão do Tipo I	57
3.4.	Validação das fórmulas de conversão – Tipo II	58
3.4.1.	Aplicação da conversão na série temporal de atenuação	58
3.4.2.	Elaboração do programa de cálculo	59
3.4.3.	Descrição do Programa#1 - cálculo de distribuições cumulativas	60

3.4.4. Resultados da validação com conversão direta na série temporal de atenuação	61
3.4.5. Comparação dos modelos de conversão do Tipo II	64
3.5. Conclusões	65
4 Caracterização do ângulo de elevação variante no tempo	66
4.1. Implementação do modelo orbital	68
4.2. Modelo orbital com coordenadas cartesianas	69
4.3. Elementos Orbitais Keplerianos	76
4.3.1. Nomenclatura dos elementos orbitais	76
4.4. Perturbações Orbitais	78
4.5. Procedimento do cálculo de elevação variante no tempo	82
4.5.1. Constelação de satélites LEO	82
4.5.2. Banco de Dados do movimento da constelação	83
4.5.3. Estatísticas do ângulo de elevação	88
5 Modelagem da previsão de atenuação por chuvas em enlaces LEO	104
5.1. Modelo de previsão de atenuação em enlaces NGEO proposto pela UIT-R	105
5.2. Simulação das medidas de atenuação dinâmica	106
5.3. Método de previsão de atenuação baseado no modelo UIT-R	112
5.4. Aplicação do modelo de distribuição do ângulo de elevação	113
5.5. Comparação dos resultados	113
6 Conclusões	118
6.1. Sugestões de trabalhos futuros	120

## Lista de figuras

Figura 1 – Célula de chuva equivalente	26
Figura 2 – Geometria do deslocamento da célula de chuva	28
Figura 3 – Posições relativas da cél. em relação ao enlace no caso $L_o \geq L_{scos\theta}$	29
Figura 4 – Geometria da primeira integral	29
Figura 5 – Geometria da segunda integral	29
Figura 6 – Geometria da terceira integral	30
Figura 8 – Plotagem dos resíduos do Modelo Cetuc/BR segundo valores da distribuição normal	38
Figura 9 – Valores previstos versus observados	38
Figura 10 – Distribuição dos resíduos do Modelo Cetuc/Global	40
Figura 11 – Valores previstos versus observados	41
Figura 12 – Previsão de atenuação por dois modelos em Mosqueiro (PA)	42
Figura 13 – Previsão de atenuação por dois modelos no Rio de Janeiro (RJ), período 1	42
Figura 14 – Previsão de atenuação por dois modelos no Rio de Janeiro (RJ), período 2	42
Figura 15 – Previsão de atenuação por dois modelos em Curitiba (PR), período 1	43
Figura 16 – Previsão de atenuação por dois modelos em Porto Alegre (RS)	43
Figura 17 – Erro relativo médio	44
Figura 18 – Desvio padrão	45
Figura 19 – Erro RMS	45
Figura 20 – Valor de $V_i$ médio	45
Figura 21 – Desvio padrão de $V_i$	46
Figura 22 – Valor RMS de $V_i$	46
Figura 23 - Distribuições cumulativas medidas e convertida 53°-90°, período 2	55
Figura 24 - Conversão 53°-90° pelo modelo Cetuc, período 2	56
Figura 25 - Distribuições cumulativas medidas e convertida 90°-53°, período 2	56
Figura 26 - Conversão 90°-53°, período 2	56

Figura 27 – Estrutura geral do Programa #1	60
Figura 28 - Gráfico das séries de atenuação RA medida, convertida para 90° e chuva	61
Figura 29 – Distrib. cumulativas medidas e convertidas 53°-90°, período 2	62
Figura 30 - Conversão 53°-90°, período 2	62
Figura 31 - Distrib. cumulativas medidas e convertidas 90°-53°, período 2	63
Figura 32 - Conversão 90°-53°, período 2	63
Figura 33 – Coordenadas do plano orbital $x_0, y_0, z_0$ e coordenadas ECI $x, y, z$	70
Figura 34 – Sistema de coordenadas inerciais centradas na Terra (ECI)	71
Figura 35 – Geometria do meridiano de Greenwich e do meridiano do ponto subsatélite	72
Figura 36 – Coordenadas ECF $x', y', z'$ e coordenadas topocêntricas $x_t, y_t, z_t$	75
Figura 37 – Geometria da Terra oblata	80
Figura 38 – Variação do ângulo de elevação de dois satélites, visto do Rio de Janeiro	83
Figura 39 – Intervalo de visibilidade de dois satélites	84
Figura 40 – Estrutura geral dos Programas #2 – Gerador de Órbita	85
Figura 41 – Envoltória do ângulo de elevação visto de Mosqueiro	85
Figura 42 - Envoltória do ângulo de elevação visto de Recife	86
Figura 43 - Envoltória do ângulo de elevação visto do Rio de Janeiro	86
Figura 44 - Envoltória do ângulo de elevação visto de Curitiba	86
Figura 45 - Envoltória do ângulo de elevação visto de Porto Alegre	87
Figura 46 – Envoltória em intervalo de 2 horas	87
Figura 47 – Histograma médio de Mosqueiro	89
Figura 48 – Histograma médio de Recife	89
Figura 49 – Histograma médio do Rio de Janeiro	89
Figura 50 – Histograma médio de Curitiba	90
Figura 51 – Histograma médio de Porto Alegre	90
Figura 52 – Variação dos histogramas com a latitude	91
Figura 53 – Correlação entre histogramas da latitude -40°	92
Figura 55 – Histogramas em latitudes simétricas na longitude zero	93
Figura 57 – Variação do fator de escala com a latitude	96
Figura 58 – Destaque da posição do modo na latitude 45°	97

Figura 59 – Ajuste do fator de escala na faixa 0° a 40°	97
Figura 60 – Ajuste do fator de escala na faixa de 50° a 70°	97
Figura 61 – Variação do fator de forma com a latitude	98
Figura 62 – Ajuste do fator de forma na faixa de 0° a 40°	98
Figura 63 – Ajuste do fator de forma na faixa de 45° a 70°	99
Figura 64 – Variação do fator de deslocamento com a latitude	99
Figura 65 – Ajuste do fator de deslocamento na faixa de 0° a 40°	99
Figura 66 – Ajuste do fator de deslocamento na faixa de 45° a 70°	100
Figura 67 – Comparação entre as distrib. estimada e ajustada pelo modelo	101
Figura 68 – Histogramas medido e calculado para Mosqueiro	102
Figura 69 – Histogramas medido e calculado para Recife	102
Figura 70 – Histogramas medido e calculado para o Rio de Janeiro	103
Figura 71 – Histogramas medido e calculado para Curitiba	103
Figura 72 – Histogramas medido e calculado para Porto Alegre	103
Figura 73 – Eventos de atenuação e chuva	107
Figura 74 – Fatores de conversão para Mosqueiro (PA)	108
Figura 75 – Fatores de conversão para o Rio de Janeiro (RJ)	108
Figura 77 – Simulação de medidas dinâmicas em Mosqueiro	109
Figura 78 – Simulação de medidas dinâmicas em Recife, período 1	110
Figura 79 – Simulação de medidas dinâmicas em Recife, período 2	110
Figura 80 – Simulação de medidas dinâmicas no Rio de Janeiro, período 1	110
Figura 81 – Simulação de medidas dinâmicas no Rio de Janeiro, período 2	110
Figura 82 – Simulação de medidas dinâmicas em Curitiba	111
Figura 83 – Simulação de medidas dinâmicas em Porto Alegre.	111
Figura 84 – Resultados para Mosqueiro	114
Figura 85 – Resultados para Recife, período 1	114
Figura 86 – Resultados para Recife, período 2	114
Figura 87 – Resultados para Rio de Janeiro, período 1	115
Figura 88 – Resultados para Rio de Janeiro, período 2	115
Figura 89 – Resultados para Curitiba	115
Figura 90 – Resultados para Porto Alegre	116

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores dos parâmetros da Modelagem Cetuc/BR	37
Tabela 2 – Parâmetros para o Modelo Cetuc/Global	40
Tabela 3 – Locais e tipos de medidas	49
Tabela 4 – Distribuições cumulativas de atenuação e chuvas medidas no Rio de Janeiro nos períodos 1 e 2	54
Tabela 5 - Distribuições cumulativas para período 2	57
Tabela 6 – Erro médio, desvio padrão e valor RMS para o período 1	57
Tabela 7 - Erro médio, desvio padrão e valor RMS para o período 2	58
Tabela 8 – Distribuições cumulativas para o período 2, conversão Tipo II	64
Tabela 9 – Erro médio, desvio padrão e valor RMS para o período 1, conversão Tipo II	64
Tabela 10 – Erro médio, desvio padrão e valor RMS para o período 2, conversão Tipo II	64
Tabela 11 – Valores do TLE	78
Tabela 12 – Características dos locais de medidas	85
Tabela 13 – Parâmetros de Weibull para cada latitude	96
Tabela 14 – Características de cada local de medida e faixa de valores de fator de conversão	108
Tabela 15 - Erro, desvio padrão e valor RMS para Mosqueiro	116
Tabela 16 - Erro, desvio padrão e valor RMS para Recife período I	117
Tabela 17 – Erro, desvio padrão e valor RMS para Recife período II	117
Tabela 18 – Erro, desvio padrão e valor RMS para o Rio de Janeiro período I	117
Tabela 19 - Erro, desvio padrão e valor RMS para o Rio de Janeiro período II	117
Tabela 20 - Erro, desvio padrão e valor RMS para Curitiba	117
Tabela 21 - Erro, desvio padrão e valor RMS para Porto Alegre	117

## GLOSSÁRIO

ITU	International Telecommunications Union
UIT	União Internacional das Telecomunicações
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
HEO	High Elliptical Orbit
GEO	Geostationary Orbit
NGEO	Nongeostationary Orbit
MSS	Mobile Satellite Service
FSS	Fixed Satellite Service
WGS 84	World Geodetic System do ano 1984
ECI	Earth Centered Inertial
ECF	Earth Centered Fixed