



**Antonio José da Silva Baptista**

**Desempenho de enlaces de satélites em  
presença de chuvas e interferências externas:  
restrições a serem impostas ao comportamento  
estatístico das interferências**

**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. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro  
agosto de 2007



**Antonio José da Silva Baptista**

**Desempenho de enlaces de satélites em  
presença de chuvas e interferências externas:  
restrições a serem impostas ao comportamento  
estatístico das interferências**

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. José Mauro Pedro Fortes**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

**Prof. Paulo Roberto Rosa Lopes Nunes**

IME

**Prof. Raimundo Sampaio Neto**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Weiler Alves Finamore**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de agosto de 2007

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

**Antonio José da Silva Baptista**

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações (Universidade Federal Fluminense).

Ficha Catalográfica

Baptista, Antonio José da Silva

Desempenho de enlaces de satélites em presença de chuvas e interferências externas: restrições a serem impostas ao comportamento estatístico das interferências/ Antonio José da Silva Baptista; orientador: José Mauro Pedro Fortes. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.

66 f.: il. ; 30 cm

1. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. Interferência. 3. Satélites. 4. Comunicações.I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Ao meu pai (em memória) e à minha mãe, alicerces da minha vida.  
À minha esposa, companheira de todas as horas.  
Aos meus filhos, pelo apoio nesta caminhada.

## Agradecimentos

Ao Prof. José Mauro Pedro Fortes, meu orientador, pelo estímulo e parceria na realização desta dissertação, pelo entusiasmo de ensinar, pela amizade e pelo exemplo de trabalho e competência.

Aos professores do CETUC, em especial aos professores Abelardo, Grivet, Raimundo, Silva Mello e Weiler, que, na nobre missão de ensinar, agregaram conhecimentos valiosos à minha bagagem profissional.

À PUC-Rio e à Marinha do Brasil que, pelo apoio e auxílios concedidos, permitiram a realização deste trabalho.

Aos funcionários e colegas do CETUC, em especial ao Tiago e Dick, pelo apoio em muitas ocasiões.

## Resumo

Baptista, Antonio José da Silva; Fortes, José Mauro Pedro. **Desempenho de enlaces de satélites em presença de chuvas e interferências externas: restrições a serem impostas ao comportamento estatístico das interferências.** Rio de Janeiro, 2007. 66p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Dois dos principais fatores que afetam o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio são a ocorrência de chuvas ao longo do percurso de transmissão e a existência de interferências externas. Para garantir um desempenho adequado para o enlace, é usual estabelecer limites para as percentagens de tempo durante as quais o desempenho do sistema pode ficar abaixo de alguns níveis pré-estabelecidos. É importante que, tanto a degradação de desempenho provocada pela chuva quanto aquela devida às interferências externas sejam tais que as restrições de desempenho sejam atendidas. A degradação devida a chuvas é usualmente considerada no dimensionamento do enlace, uma vez que os modelos matemáticos para a atenuação por chuvas são amplamente conhecidos. No caso de interferências externas, a degradação por elas causada é limitada através do estabelecimento de restrições ao comportamento estatístico das potências dos sinais interferentes. Estas restrições, atualmente em estudo no âmbito da União Internacional de Telecomunicações, devem ser tais que, independentemente das características específicas do sistema interferente considerado, as condições de desempenho requeridas para o enlace sejam satisfeitas. O presente trabalho define um problema de otimização com restrições, cuja solução permite estabelecer as condições a serem impostas ao comportamento estatístico das potências dos sinais interferentes presentes em um enlace.

## Palavras-chave

Interferência, Satélites, Comunicações

## Abstract

Baptista, Antonio José da Silva; Fortes, José Mauro Pedro. **Satellite link performance in the presence of rain and external interferences: constraints to be imposed to the statistical behaviour of interference.** Rio de Janeiro, 2007. 66p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Two of the main factors that affect the performance of wireless communication systems are fading due to rain and interfering signals that reach the receiver. To guarantee an adequate communication link performance, it is usual to limit the percentages of time during which the system performance may be below certain predefined levels. It is important that performance degradation due to both rain and external interferences be such that these performance constraints are met. Degradation due to rain is usually considered in the communication link design, as mathematical models for rain attenuation are widely known. For external interferences, degradation is usually limited by establishing constraints to the statistical behaviour of the interfering signal power. These constraints should be such that, independently of the specific characteristics of the considered interfering system, link performance objectives can be met. Studies aiming the definition of adequate constraints are currently being developed within the International Telecommunication Union. This dissertation defines a constrained optimization problem that allows for the definition of the constraints to be satisfied by the statistical behaviour of the interfering signal power so that link performance are met.

## Keywords

Interference, Satellites, Communications

# Sumário

1	Introdução	12
2	Descrição do Problema	15
2.1	Condição de ocorrência apenas de chuva	17
2.2	Condição de ocorrência simultânea de chuva e interferência	18
3	Modelagem Matemática	22
3.1	Definição das restrições do problema de otimização	22
3.2	Definição da função objetivo	28
3.3	Definição do problema de otimização	31
3.4	Relacionamento entre os comportamentos estatísticos da interferência e da degradação devida a interferências	33
4	Resultados Numéricos	37
5	Conclusões	57
	Referências Bibliográficas	59
A	Polinômios de Legendre	61
B	Procedimento para cálculo da distribuição cumulativa de atenuação por chuvas	62
C	Procedimento para obtenção de $(E_b/N_0)_{CS}$	65



## Lista de figuras

2.1	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação devida a chuvas	19
2.2	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação devida a chuvas e interferências externas	21
3.1	Função densidade de probabilidade da degradação devida a interferências externas	23
3.2	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação $z$ devida somente à ocorrência de chuvas	29
3.3	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação $z$ devida à ocorrência de chuvas e interferências	30
3.4	Máscara a ser satisfeita pelo comportamento estatístico da razão $i/n$	36
4.1	Função densidade de probabilidade da degradação devida a interferências externas - condição inicial	38
4.2	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação devida a chuvas para o enlace em 19 GHz	39
4.3	Função densidade de probabilidade da degradação devida a interferências externas para o enlace em 19 GHz	41
4.4	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação devida a interferências externas para o enlace em 19 GHz	42
4.5	Distribuição cumulativa de probabilidade da razão $i/n$ para o enlace em 19 GHz	43
4.6	Exemplo de máscara obtida a partir da Figura 4.5	43
4.7	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação total $z$ para o enlace em 19 GHz	44
4.8	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação devida a chuvas para o enlace em 29 GHz	45
4.9	Função densidade de probabilidade da degradação devida a interferências externas para o enlace em 29 GHz	47
4.10	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação devida a interferências externas para o enlace em 29 GHz	48
4.11	Distribuição cumulativa de probabilidade da razão $i/n$ para o enlace em 29 GHz	48
4.12	Exemplo de máscara obtida a partir da Figura 4.10	49
4.13	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação total $z$ para o enlace em 29 GHz	50
4.14	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação devida a chuvas para o enlace em 29 GHz, com APC	52
4.15	Função densidade de probabilidade da degradação devida a interferências externas para o enlace em 29 GHz, com APC	53
4.16	Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação devida a interferências externas para o enlace em 29 GHz, com APC	54
4.17	Distribuição cumulativa de probabilidade da razão $i/n$ para o enlace em 29 GHz, com APC	54

4.18 Exemplo de máscara obtida a partir da Figura 4.15	55
4.19 Distribuição cumulativa de probabilidade da degradação total $z$ para o enlace em 29 GHz, com APC	56

## Lista de tabelas

4.1	Parâmetros considerados no enlace em 19 GHz	39
4.2	Requisitos de desempenho para o enlace em 19 GHz	40
4.3	Limites para o comportamento estatístico da razão $i/n$ no enlace em 19 GHz	42
4.4	Parâmetros considerados no enlace em 29 GHz	45
4.5	Requisitos de desempenho para o enlace em 29 GHz	46
4.6	Limites para o comportamento estatístico da razão $i/n$ no enlace em 29 GHz	49
4.7	Parâmetros considerados no enlace em 29 GHz, com APC	51
4.8	Requisitos de desempenho para o enlace em 29 GHz, com APC	51
4.9	Limites para o comportamento estatístico da razão $i/n$ no enlace em 29 GHz, com APC	55