

**Luís Eduardo Menezes Felix**

**Predição da Indisponibilidade por Chuvas em Redes VSAT  
no Brasil**

**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.

Orientadora: Marlene Sabino Pontes

**Luís Eduardo Menezes Felix**

**Predição da Indisponibilidade por Chuvas em Redes VSAT  
no Brasil**

**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.

Orientadores: Marlene Sabino Pontes  
Luiz Alencar Reis da Silva Mello

PUC-RIO, julho de 2004

**Luís Eduardo Menezes Felix**

**Predição da Indisponibilidade por Chuvas em Redes VSAT  
no Brasil**

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

**Marlene Sabino Pontes**

Orientador  
CETUC - PUC-RIO

**Luiz Alencar Reis da Silva Mello**

Co-orientador  
CETUC - PUC-RIO

**Marta Pudwell Chaves de Almeida**

Wings Telecom

**Erasmus Couto Brazil de Miranda**

UCP

**Rodolfo Sabóia Lima de Souza**

CETUC - PUC-RIO

**José Eugênio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

PUC-RIO, 23 de agosto de 2004

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

### **Luís Eduardo Menezes Felix**

Graduo-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO em 2002.

#### Ficha Catalográfica

Felix, Luís Eduardo Menezes

Predição da indisponibilidade por chuvas em redes VSAT no Brasil / Luís Eduardo Menezes Felix; orientadores: Marlene Sabino Pontes, Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

96 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. Redes VSAT. 3. Indisponibilidade por chuvas. 4. Comunicação via satélite. I. Pontes, Marlene Sabino. II. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

a minha querida namorada *Priscila Barreiro Gomes da Silva*

## Agradecimentos

Aos meus pais, *Paulo Roberto Franco Felix* e *Sonia Maria Menezes Felix*, e ao meu irmão, *Paulo Guilherme Menezes Felix* e sua esposa, *Maria Victoria Bárbara*, pelo estímulo e compreensão fornecidos no desenvolvimento desta Tese de Mestrado.

A minha querida namorada, *Priscila Barreiro Gomes da Silva*, pelo carinho e compreensão.

A minha Orientadora e ao meu Co-Orientador, *Marlene Sabino Pontes*, *Luiz Alencar da Silva Mello*, pela orientação e dedicação de ensino.

Ao Mestre *Ney Roberto Dhein*, pela sua dedicação de ensino, que sem sua ajuda esta tese não teria o sucesso necessário.

Aos professores e amigos do CETUC, pelo conhecimento fornecido e pelo confortável ambiente de trabalho.

Aos meus amigos, que pela intensidade de convívio, já fazem parte da minha família. Em especial desejo destacar, *Eduardo Kant Colunga Rotheir* e *Rafael Campello de Menezes*, que simbolizam a irmandade de todos.

A toda minha família, pela união e tranquilidade que proporcionaram o ambiente favorável em que foi desenvolvido este trabalho.

A CAPES e ao CETUC/PUC-Rio, pelos auxílios fornecidos para a realização deste trabalho.

## Resumo

Felix, Luís Eduardo. **Predição da Indisponibilidade por Chuvas em Redes VSAT no Brasil**. PUC-RIO, 2004. xxxp. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em comunicações Via-Satélite, o regime de chuvas brasileiro se apresenta como fator limitante na análise da viabilidade de redes VSAT (Very Small Aperture Terminal) nas bandas Ka e Ku. O objetivo do trabalho é analisar a indisponibilidade por chuvas de redes VSAT com topologia em estrela usadas no Brasil para determinados serviços, tais como telefonia e transmissão de dados e TV, utilizando-se cenários hipotéticos em termos da localização das estações terminais, de satélites com transponders nas bandas Ka e Ku e das características reais dos equipamentos e sistemas.

Um dos objetivos dentro deste tema foi a análise da influência do modelo de atenuação. Para tal foram utilizadas as duas últimas versões de modelo de atenuação por chuvas que tem sido recomendado pela UIT-R para aplicações em Engenharia. Complementando este objetivo, analisou-se também a influência de dados de taxas de precipitação para o Brasil utilizado nestes modelos, tendo sido utilizadas duas fontes: a Recomendação P.837 do UIT-R e medidas regionais realizadas pelo CETUC. Outro objetivo foi à comparação entre os valores estimados de indisponibilidade com limites máximos recomendados o que permite obter conclusões sobre a viabilidade destes sistemas no Brasil.

Complementado o estudo acima descrito, um segundo caso foi analisado correspondendo a um sistema DVBS. O cenário é composto de outro satélite (PAS-9), porém com a mesma configuração (rede VSAT e topologia em estrela) e estações terrenas com mesmas localizações. A diferença em relação ao primeiro caso reside principalmente na maior taxa de transmissão e por ter sido utilizado na análise da indisponibilidade um modelo de atenuação por chuvas “regional”, desenvolvido pelo CETUC com base em dados de medidas no Brasil. Uma análise similar foi feita considerando o modelo atual da UIT-R para fins comparativos.

## Palavras-chave

Comunicação via-satélite, indisponibilidade por chuvas, redes VSAT, banda Ku

## Abstract

In satellite communication, the Brazilian rains distributions are presented like limited factor in the viability analyze of VSAT networks (Very Small Aperture Terminal) in the bands Ka and Ku. The aim of the work is analyze the unavailability caused by VSAT rains with star topology used in Brazil to some kinds of service, like telephone and data transmission and TV, using conjectural scenes on the satellite's terminal stations with transponders in the bands Ka and Ku and the real characteristics of the equipments and systems.

One of the objectives is analyze the influence of the attenuation system. For it were used the last two versions models rainy attenuation that has been recommended by UIT-R for applications in engineering. Completing this objective, were also analyzed the influence precipitation taxes data for Brazil using this models, have been used two fonts: the recommendation P.837 from UIT-R and regional measured realized by CETUC. Other objective was the comparison between unavailability esteem values with maxim limits recommended what allows having conclusions about the viability of these systems in Brazil.

Concluding the study, a second case was analyzed corresponding a system. The scene is composed by from other satellite (PAS-9), by the way, with the same localizations. The difference between both are: the first one has a bigger tax of transmission for being used analyze of the unavailability one model of attenuation for regional rains, made by CETUC based on measure data from Brazil. One similar analyze was made considering an actual model of UTI-R for final comparisons.

## Key words

Satellite communications, rain unavailability, VSAT networks, Ku band



## Lista de abreviaturas

VSAT - *Very Small Aperture Terminal*  
DVBS - *Digital Video Broadcasting System*  
TVRO - *TV Receiver Only*  
FSS - *Fixed Satellite Service*  
MSS - *Mobile Satellite Service*  
LNA - *Low Noise Amplifier*  
ATM - *Asynchronous Transfer Mode*  
NMS - *Network Management System*  
P-ALOHA - *Pure ALOHA*  
S-ALOHA - *Slotted ALOHA*  
DAMA - *Consignação por demanda*  
TDMA - *Time Division Multiple Access*  
FDMA - *Frequency Division Multiple Access*  
CDMA - *Code Division Multiple Access*  
FEC - *Forward Error Correction*  
PSK - *Phase Shift Keying*  
QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*  
ASK - *Amplitude Shift Keying*  
FSK - *Frequency Shift Keying*  
BER - *Bit Error Rate*  
GSO - *Geostationary Satellite Orbit*  
PFD - *Power Flux Density*  
EIRP - *Equivalent Isotropic Radiated Power*  
 $G/T_e$  - *Fator de Mérito*

# Sumário

1 Introdução	17
2 Sistemas Via Satélite e VSAT	21
2.1. Histórico Resumido de Sistemas Via-Satélite	21
2.2. Configuração Básica de um Sistema de Via-Satélite	23
2.3. Estações Terrenas	24
2.4. Tipos de Satélites	25
2.5. Tipos de Serviços	25
2.6. Sistemas Não Geoestacionários	26
2.7. Sistemas Geoestacionários	26
2.8. Redes VSAT	27
2.8.1. Componentes e Bandas de um Sistema VSAT	30
2.8.2. Técnicas e Protocolos de Múltiplo Acesso	32
2.8.3. Modulação	33
3 Cálculo Básico de Enlace Via Satélite	35
3.1. Parâmetros Fundamentais de Transmissão e Recepção	37
3.1.1. Densidade de Fluxo de Potência (PFD)	37
3.1.2. Potência Efetiva Isotropicamente Irradiada (EIRP)	37
3.1.3. Fator de Mérito ( $G/T_e$ )	39
3.2. Relação Portadora-Ruído Térmico	39
3.2.1. Relação Portadora-Ruído Térmico no Enlace de Subida	40
3.2.2. Relação Portadora-Ruído Térmico no Enlace de Descida	40
3.3. Relação Portadora-Ruído de Intermodulação	40
3.4. Relação Portadora-Interferência	41
3.5. Relação Portadora-Ruído Total	42
3.5.1. Relação Portadora-Ruído Total de Subida	42
3.5.2. Relação Portadora-Ruído Total de Descida	42
3.5.3. Relação Portadora-Ruído Total	42

4 Aspectos de Propagação nas Bandas Ka e Ku	43
4.1. Introdução	43
4.2. Características das Chuvas em Climas Tropicais e Equatoriais	46
4.3. Atenuação Específica da Chuva	47
4.4. Atenuação por Chuvas em Enlaces Via-Satélite	50
4.4.1. Modelo da UIT-R – Versão Rec. P.618-5	51
4.4.2. Modelo da UIT-R – Versão Rec. P.618-8	53
4.4.3. Modelo CETUC	55
4.5. Atenuações por Nuvens e Névoa	55
4.6. Atenuação por Gases	58
4.7. Cálculo de Distâncias e Ângulos de Elevação	59
5 Simulações	60
5.1. Metodologia para a Predição da Indisponibilidade por chuvas	60
5.1.1. Margens de Subida e Descida	61
5.1.2. Predição de Indisponibilidade com Modelo da Rec. P.618-5	61
5.1.3. Predição de Indisponibilidade com Modelo da Rec. P.618-8	62
5.1.4. Predição de Indisponibilidade com Modelo CETUC	62
5.2. Satélites Utilizados	63
5.2.1. Satélite Atlantic Bird 2	63
5.2.2. Satélite Satmex 5	64
5.2.3. Satélite Brasil 1 (T)	67
5.2.4. Satélite PAS-9	69
5.2.5. Satélite Hipotético	72
5.3. Simulações – Cenário 1	72
5.3.1. Análises	74
5.3.1.1. Polarização Horizontal x Polarização Vertical	74
5.3.1.2. Modelo P.618-5 x Modelo P.618-8	78
5.3.1.3. Indisponibilidade Estimada x Indisponibilidade Máxima	80
5.4. Simulações – Cenário 2	84
5.4.1. Resultados	85
5.4.1.1. Polarização Horizontal x Polarização Vertical	85
5.4.1.2. Modelo do CETUC x Modelo P.618-8	86

5.4.1.3. Indisponibilidade Estimada x Indisponibilidade Máxima	88
6 Conclusões	89
6.1. Trabalhos Futuros	90
7 Referências Bibliográficas	91
8 Anexos	92
8.1. Anexo A	92
8.2. Anexo B	93
8.3. Anexo C	96

## Lista de figuras

Figura 1.1: Configuração Básica	17
Figura 1.2: Sistema via satélite simplificado com estação terrena de transmissão e recepção de um satélite de comunicações	18
Figura 2.1: Configuração básica de um sistema de comunicação via-satélite	24
Figura 2.2: Órbita de um satélite não geoestacionário	26
Figura 2.3: Terminal VSAT	28
Figura 2.4: Transmissão com topologia em Estrela	28
Figura 2.5: Componentes de um sistema VSAT	30
Figura 2.6: BER x $E_b/N_0$	34
Figura 3.1: Diagrama esquemático de um enlace via-satélite e os principais fatores de degradação de desempenho	36
Figura 4.1: Incidência do campo elétrico sobre a seção reta da gota da chuva	44
Figura 4.2: Geometria e parâmetros do enlace (subida e descida)	53
Figura 4.3: Coeficiente de atenuação específica $K_l$	57
Figura 5.1: Predição da Indisponibilidade com o Modelo CETUC	62
Figura 5.2: Satélite Atlantic Bird 2	63
Figura 5.3: Mapas de cobertura Atlantic Bird 2	64
Figura 5.4: Satélite Satmex 5	65
Figura 5.5: Mapa de cobertura da EIRPS Satmex 5	65
Figura 5.6: Mapa de cobertura da G/T Satmex 5	66
Figura 5.7: Mapa de cobertura da SFD Satmex 5	67
Figura 5.7: Mapa de cobertura da EIRPS do satélite Brasil 1 (T)	68
Figura 5.8: Mapa de cobertura de G/T do satélite Brasil 1 (T)	69
Figura 5.9: Satélite PAS-9	70
Figura 5.10: Mapa de cobertura da EIRPS do satélite PAS-9	71
Figura 5.11: Mapa de cobertura do G/T do satélite PAS-9	71
Figura 5.12: Cenário 1 de Redes VSAT	73
Figura 5.16: Indisponibilidade por chuvas e polarização: modelo UIT-R	

P.618-5 e taxa de precipitação calculada	76
Figura 5.19: Indisponibilidade por chuva e Modelos UIT-R com taxa de precipitação medida	78
Figura 5.20: Indisponibilidade por chuva e Modelos UIT-R com taxa de precipitação calculada	79
Figura 5.21: Indisponibilidade por chuva, razão e Modelo UIT-R atual com taxa de precipitação medida	79
Figura 5.22: Indisponibilidade por chuva, razão e Modelo UIT-R atual com taxa de precipitação calculada	80
Figura 5.23: Indisponibilidade por chuvas e polarização: modelos rec. P.618-8	85
Figura 5.24: Indisponibilidade por chuvas, Modelos rec. P.618-8 e CETUC e polarização: taxa de precipitação medida	86
Figura 5.25: Indisponibilidade e modelos P.618-8 e CETUC com taxa de precipitação medida	87
Figura 5.26: Indisponibilidade por chuva, razão e Modelo UIT-R atual com taxa de precipitação medida	88

## Lista de tabelas

Tabela 1.1: Principais faixas de frequências	18
Tabela 4.1: Coeficientes para cálculo da atenuação específica	49
Tabela 4.2: Coeficientes para cálculo da atenuação específica (polarização horizontal)	50
Tabela 4.3: Coeficientes para cálculo da atenuação específica (polarização vertical)	50
Tabela 5.1: Dados do Satélite Atlantic Bird 2 (X= fator de conversão)	64
Tabela 5.2: Dados do Satélite Satmex 5	67
Tabela 5.3: Dados do Satélite Brasil 1 (T)	69
Tabela 5.4: Dados do Satélite PAS -9	70
Tabela 5.5: Taxa de precipitação excedida em $10^{-2}$ % do tempo	74
Tabela 5.6: Porcentagem de enlaces viáveis	81
Tabela 5.7: Divisões climáticas	81
Tabela 5.8: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação medida	81
Tabela 5.9: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação calculada	81
Tabela 5.10: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação medida e polarização vertical	82
Tabela 5.11: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação medida e polarização horizontal	82
Tabela 5.12: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação calculada e polarização vertical	82
Tabela 5.13: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação calculada e polarização horizontal	82
Tabela 5.14: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação medida e Satélite Hipotético	83
Tabela 5.15: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação medida e Satélite Brasil 1 (T)	83
Tabela 5.16: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de	

precipitação medida e Satélite Satmex 5	83
Tabela 5.17: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação medida e Satélite Atlantic Bird 2	83
Tabela 5.18: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação calculada e Satélite Hipotético	83
Tabela 5.19: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação calculada e Satélite Brasil 1 (T)	83
Tabela 5.20: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação calculada e Satélite Satmex 5	84
Tabela 5.21: Indisponibilidade por chuvas e rec. P.816-8: taxa de precipitação calculada e Satélite Atlantic Bird 2	84