

**Marcelle Santiago do  
Nascimento**

**Uso Eficiente da Órbita de  
Satélites Geoestacionários:  
Otimização das Posições  
Orbitais.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro  
Abril de 2005



**Marcelle Santiago do Nascimento**

**Uso Eficiente da Órbita de Satélites  
Geoestacionários: Otimização das Posições  
Orbitais.**

**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  
Abril de 2005



**Marcelle Santiago do Nascimento**

**Uso Eficiente da Órbita de Satélites  
Geoestacionários: Otimização das Posições  
Orbitais.**

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 de Estudos em Telecomunicações da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Mauro Pedro Fortes**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC - Rio

**Prof. Paulo Roberto R. L. 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 Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de Abril de 2005

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

### **Marcelle Santiago do Nascimento**

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em dezembro de 2002

#### Ficha Catalográfica

Nascimento, Marcelle Santiago do

Uso Eficiente da Órbita de Satélites Geoestacionários: Otimização das Posições Orbitais./ Marcelle Santiago do Nascimento; orientador: José Mauro Pedro Fortes. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

v., 122 f: il. ; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia – Dissertação. 2. Sistemas de comunicação via satélite. 3. Otimização da órbita de satélites Geoestacionários. 4. Razão Portadora Interferência de Entrada Unica e Agregada. 5. Serviço Fixo por Satelite. I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 510

À minha mãe, exemplo de perseverança.  
Ao meu pai, o maior engenheiro do mundo.  
À minha irmã, mesmo distante, precursora e amiga.

## Agradecimentos

Ao Prof. José Mauro Pedro Fortes por toda orientação, incentivo, paciência e confiança depositadas em mim. Obrigada por todos os exemplos e ensinamentos. Tenho certeza que não poderia ter tido melhor orientador.

Aos professores do CETUC, em particular aos professores Raimundo e Weiler pelos ensinamentos e disponibilidade.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

Ao meu amigo Tiago Vinhoza, pelo Companherismo em todos os momentos desde o primeiro dia no CETUC.

Aos amigos Bernardo, Carol, Claudia, Danilo, Fred, José Antonio, Juan, Kiusa, Marcio e Renato pelas horas que passamos juntos no laboratório de Sistemas do CETUC.

Aos amigos da UFF e agora da PUC Aureo, Rafael e Vladimir.

As amigas Angela, Priscila e Samantha por estarem sempre por perto me "acolhendo".

Aos meus pais, Marcus e Lucia, pelo incentivo e carinho. Obrigada por serem meu porto seguro.

À minha irmã, Danielle.

À José Augusto, pelo amor e paciência quando estive ausente.

## Resumo

Nascimento, Marcelle Santiago do; Fortes, José Mauro Pedro. **Uso Eficiente da Órbita de Satélites Geoestacionários: Otimização das Posições Orbitais..** Rio de Janeiro, 2005. 122p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

## Resumo

Este trabalho está relacionado ao problema do uso eficiente da órbita de satélite geoestacionário. A utilização eficiente da órbita é obtida através de um algoritmo de otimização que permite escolher as posições orbitais para os diversos sistemas de modo a reduzir ao máximo o percentual do arco orbital utilizado. Sendo assim, desenvolvido um modelo matemático que considerou além de aspectos de interferência, detalhes da geometria envolvida no problema (posições orbitais dos satélites, posições das estações terrenas, apontamento de antenas, etc.). Este modelo foi utilizado na definição de um problema de otimização com restrição cuja função objetivo se baseia na parcela do arco orbital utilizado. Neste problema de otimização com restrição foram consideradas restrições de níveis máximos de interferência (de entrada única e agregada) além de restrições de arcos orbitais, impostas por aspecto de propagação. O algoritmo de otimização utilizado requer o cálculo do Vetor Gradiente e da Matriz Hessiana. Para evitar erros de origem numéricos essas quantidades foram calculadas utilizando expressões analíticas desenvolvidas neste trabalho. O método matemático foi aplicado a situações específicas conduzindo a resultados que mostraram um uso eficiente da órbita de satélites geoestacionários através de soluções onde a parcela utilizada do arco é minimizada.

## Palavras-chave

Sistemas de comunicação via satélite, Otimização da órbita de satélites Geoestacionários, Serviço Fixo por Satellite.

## Abstract

Nascimento, Marcelle Santiago do; Fortes, José Mauro Pedro. **Efficient use of the Geostationary Satellite Orbit: Orbital Position Optimization**. Rio de Janeiro, 2005. 122p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

## Abstract

This work is related to the efficient use of the geostationary satellite orbit. It presents and describes an optimization model which chooses the best orbital position for each satellite so that the length used orbital arc is minimized. A mathematical model considering aspects such as interference, geometry details (orbital position of the systems, earth station position, boresight of the antenna, etc) is proposed. This model was used in the definition of a constrained optimization problem in which the cost function is the length of the used orbital arc. Constraints imposed by propagation aspects (minimum elevation angle) and by the maximum allowable interference levels (aggregate and single-entry) are considered. The optimization algorithm requires the evaluation of the Gradient vector and the Hessian matrix. To avoid numeric problems, analytic expressions of these quantities were derived. Results of the application of this model to specific situations involving real data were also described and conducted to solutions where the length of the orbit used was minimized.

## Keywords

Satellite communication system, Optimization of geostationary satellite orbit, Fixed Satellite Service.



## Conteúdo

1	Introdução	12
2	Definição do Problema	15
3	Modelo Matemático	18
3.1	Caracterização da Geometria Envolvida	18
3.2	Diagrama de Radiação das Antenas	21
3.2.1	Diagrama de Radiação da Antena da Estação Terrena	22
3.2.2	Diagrama de Radiação da Antena do Satélite	23
3.3	Localização das Estações Terrenas e dos Satélites	32
3.3.1	Localização das Estações Terrenas	32
3.3.2	Localização dos Satélites	39
3.4	Modelo Matemático para Otimização da Utilização da Órbita	40
4	Técnicas de Otimização	43
5	Resultados Numéricos	48
6	Conclusão	74
A	Geometria	78
A.1	Bases Consideradas	78
A.2	Definição do feixe elíptico sobre o plano $\mathcal{Q}$	79
B	Expressões Analíticas para o cálculo do Vetor Gradiente e da Matriz Hessiana	81
B.1	Desenvolvimento do Vetor Gradiente e da Matriz Hessiana	81
B.2	Calculo da Derivada da Razão Portadora - Interferência	84
B.3	Desenvolvimento da Derivada Primeira da Razão Portadora-Interferência	86
B.4	Desenvolvimento da Derivada Segunda da Razão Portadora-Interferência	102
C	Determinação das ordenações possíveis	121

## Lista de Figuras

3.1	Geometria envolvida no cálculo da Razão Portadora Interferente. As setas pontilhadas ilustram a direção de apontamento da antena do satélite.	18
3.2	Diagrama de radiação da Estação Terrena para $G_{max} = 49.31$ .	23
3.3	Ângulos de referência para o diagrama de radiação do satélite.	23
3.4	Feixe elíptico do Satélite	24
3.5	A base $[x, y, z]$ e a representação dos sistemas de coordenadas esféricas e retangulares.	25
3.6	Geometria da Perspectiva Cônica.	26
3.7	Diagrama de radiação do satélite.	30
3.8	Ganho em diversos pontos sobre a superfície da Terra.	31
3.9	Posição mais desfavorável da ETT.	33
3.10	Posição mais desfavorável da ETR.	34
3.11	Pontos candidatos a posição mais desfavorável nos sistemas considerados.	35
3.12	Localização da ETT e ETR para o caso A.	36
3.13	Localização da ETT e ETR para o caso B.	37
3.14	Localização da ETT e ETR para o caso C.	37
3.15	Localização da ETR para o caso D.	38
3.16	Localização da ETR para o caso E.	38
3.17	Localização da ETR para o caso F.	39
5.1	Sistemas considerados que cobrem países da América Latina	50
5.2	Convergência para o Exemplo 1-Situação A	51
5.3	Posições orbitais, antes a otimização, dos sistemas considerados.	53
5.4	Posições orbitais, após a otimização, dos sistemas considerados.	53
5.5	Convergência para o Exemplo 1-Situação B	54
5.6	Posições orbitais, antes a otimização, dos sistemas considerados.	56
5.7	Posições orbitais, após a otimização, dos sistemas considerados.	57
5.8	Convergência para o Exemplo 1, Situação C	58
5.9	Posições orbitais dos sistemas considerados antes a otimização	60
5.10	Posições orbitais dos sistemas considerados após a otimização	61
5.11	Sistemas considerados que cobrem países da Europa	62
5.12	Convergência para o Exemplo 2-Situação A	63
5.13	Posições orbitais, antes a otimização, dos sistemas considerados.	65
5.14	Posições orbitais, após a otimização, dos sistemas considerados.	65
5.15	Convergência para o Exemplo 2 - Situação B	66
5.16	Posições orbitais, antes a otimização, dos sistemas considerados.	68
5.17	Posições orbitais, após a otimização, dos sistemas considerados.	69
5.18	Convergência para o Exemplo 2, Situação C	70
5.19	Posições orbitais dos sistemas considerados antes a otimização	73
5.20	Posições orbitais dos sistemas considerados após a otimização	73
A.1	Matriz transição de base.	78

A.2	Ângulos que definem a elipse do contorno de $-3\text{dB}$ .	79
A.3	Contorno de $3\text{dB}$ das elipses que cobrem o Brasil	80
B.1	Definição dos vetores	90
B.2	Definição dos ângulos	94

## Lista de Tabelas

3.1	Informações dos Sistemas utilizados a título de exemplo	35
3.2		36
5.1	Parâmetros utilizados dos sistemas considerados no Exemplo 1	49
5.2	Arco de Serviço associado ao sistemas do Exemplo 1	50
5.3	Razão Portadora-Interferência de entrada única $(C/I)_{ij}$ em dB, onde $i$ refere-se as linhas (sistemas vítima) e $j$ refere-se as colunas (sistemas interferente)	52
5.4	Razão Portadora-Interferência de entrada única $(C/I)_{ij}$ em dB, onde $i$ refere-se as linhas (sistemas vítima) e $j$ refere-se as colunas (sistemas interferente)	55
5.5	Razão Portadora-Interferência de entrada agregada sobre os sistemas vítimas	55
5.6	Parâmetros utilizados nos sistemas adicionais do Exemplo 1, Situação C.	57
5.7	Razão Portadora-Interferência de entrada única $(C/I)_{ij}$ em dB, onde $i$ refere-se as linhas (sistemas vítima) e $j$ refere-se as colunas (sistemas interferente)	59
5.8	Razão Portadora-Interferência de entrada agregada sobre os sistemas vítimas	60
5.9	Parâmetros utilizados dos sistemas considerados no Exemplo 2	61
5.10	Arco de Serviço Associado ao sistemas do Exemplo 2	62
5.11	Razão Portadora-Interferência de entrada única $(C/I)_{ij}$ em dB, onde $i$ refere-se as linhas (sistemas vítima) e $j$ refere-se as colunas (sistemas interferente)	64
5.12	Razão Portadora-Interferência de entrada única $(C/I)_{ij}$ em dB, onde $i$ refere-se as linhas (sistemas vítima) e $j$ refere-se as colunas (sistemas interferente)	67
5.13	Razão Portadora-Interferência de entrada agregada sobre os sistemas vítimas	67
5.14	Parâmetros utilizados nos sistemas adicionais do Exemplo 2, Situação C.	69
5.15	Razão Portadora-Interferência de entrada única $(C/I)_{ij}$ em dB, onde $i$ refere-se as linhas (sistemas vítima) e $j$ refere-se as colunas (sistemas interferente)	71
5.16	Razão portadora interferência de entrada Agregada sobre os sistemas vítimas	72