RICARDO PAULINO MARQUES

# ALGORITMOS DE CONTROLE PARA SISTEMAS SUJEITOS A SALTOS MARKOVIANOS

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia de Sistemas

Orientador:
Oswaldo Luiz do Valle Costa

São Paulo
1997

Ricardo Paulino Marques
Departmento de Engenharia Eletrônica
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
05508-900 São Paulo SP Brasil

fone: (011)818 5493
fax: (011)818 5718
E-mail: rpm@lac.usp.br

Oswaldo Luiz do Valle Costa
Departamento de Engenharia Eletrônica
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
05508-900 São Paulo SP Brasil

fone: (011)818 5771
fax: (011)818 5718
E-mail: oswaldo@lac.usp.br

Marques, Ricardo Paulino
Algoritmos de controle para sistemas sujeitos a saltos markovianos. São Paulo, 1997.
96p. + apêndice

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Eletrônica.

1. saltos markovianos 2. sistemas sujeitos a saltos 3. controle estocástico I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Eletrônica II. t

"God keep me from ever completing anything. This whole book is but a draught—nay, but the draught of a draught. Oh, Time, Strength, Cash, and Patience!"

*Herman Melville, Moby-Dick*

# AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) sob os processos de números 95/4648-5, 96/4791-5, 96/12113-7 e 94/3062-4.

# Sumário


## Capítulo 1:
## Introdução

1.1 Primeiras palavras ..... 1
1.2 Plano geral ..... 2
1.3 Breve introdução a sistemas sujeitos a saltos markovianos ..... 2
1.4 Ferramental básico ..... 5
1.4.1 Sobre equações de Riccati ..... 5
1.4.2 Sobre programação convexa ..... 6

## Capítulo 2:
## Preliminares

2.1 Sobre este capítulo ..... 7
2.2 Notação ..... 7
2.3 Definições básicas e resultados auxiliares ..... 10
2.3.1 Preliminares ..... 10
2.3.2 Estabilidade para sistemas markovianos ..... 10
2.3.3 Testes de estabilizabilidade e detectabilidade ..... 13
2.3.4 Um importante resultado auxiliar ..... 17
2.4 Normas especiais ..... 21
2.4.1 A norma $H_2$ ..... 21
2.4.2 A norma $H_\infty$ ..... 22

# Capítulo 3:
## Equações algébricas de Riccati acopladas e o controle ótimo linear-quadrático

3.1 Sobre este capítulo ..... 24
3.2 Formulação do problema de controle ótimo ..... 24
3.3 Este trabalho e o atual estado da arte ..... 25
3.4 Soluções máximas para as EARA ..... 27
3.4.1 Preliminares sobre soluções máximas ..... 27
3.4.2 Resultados principais sobre soluções máximas ..... 29
3.5 Conclusões ..... 34

# Capítulo 4:
## Soluções estabilizantes para as EARA e o controle $H_2$

4.1 Sobre este capítulo ..... 35
4.2 Soluções estabilizantes para as EARA ..... 35
4.2.1 Preliminares sobre soluções establizantes ..... 36
4.2.2 Resultados principais sobre soluções estabilizantes ..... 38
4.3 Soluções estabilizantes e sua relação com o problema de controle ..... 45
4.3.1 Os gramianos e a norma $H_2$ . ..... 45
4.3.2 Resultados principais ..... 46
4.4 Conclusões ..... 51

# Capítulo 5:
## Equações algébricas de Riccati acopladas para controle $H_\infty$

5.1 Sobre este capítulo ..... 52
5.2 Preliminares ..... 53
5.3 Resultado principal ..... 57
5.4 Algoritmo proposto ..... 62
5.5 Conclusões ..... 63

# Capítulo 6:
## Uma aproximação para o controle misto $H_2/H_\infty$

6.1 Sobre este capítulo ..... 64
6.2 O problema de controle ..... 65
6.3 Abordagem convexa ..... 68
6.3.1 O controle $H_2/H_\infty$ ..... 68
6.3.2 O controle ..... 72
6.4 Conclusões ..... 73

# Capítulo 7:
## Aplicações

7.1 Sobre este capítulo ..... 74
7.2 Implementação computacional ..... 74
7.3 Exemplos de projeto e simulações ..... 75
7.3.1 Controle ótimo linear-quadrático ..... 75
7.3.1.1 O modelo multiplicador-acelerador ..... 75
7.3.1.2 O receptor térmico solar ..... 78
7.3.2 Controle $H_\infty$ ..... 82
7.3.2.1 Metodologia de projeto para controle $H_\infty$ ..... 82
7.3.2.2 Exemplo de projeto $H_\infty$ ..... 83
7.3.3 Controle misto $H_2/H_\infty$ ..... 85
7.3.4 Estabilização robusta para controle $H_\infty$ e $H_2/H_\infty$ ..... 86
7.4 Conclusões ..... 88

# Capítulo 8:
## Comentários finais

8.1 Recapitulação dos resultados ..... 89
8.2 Últimas palavras ..... 91

# Referências Bibliográficas

..... 92

# Apêndice: O toolbox DTMJLSpara uso com MATLAB

# Resumo

Este trabalho trata da obtenção de algoritmos de controle para sistemas lineares discretos sujeitos a saltos markovianos. Os seguintes problemas de controle são considerados: controle ótimo linear-quadrático, controle H2, controle H-infinito e controle misto H2/H-infinito. São apresentados resultados originais a respeito desses quatro problemas de controle e algoritmos computacionais eficazes para projeto dos controladores. Ao final do trabalho são apresentados exemplos de projetos e simulações para ilustrar a aplicação das técnicas propostas, bem como comentários e conclusões.

# Abstract

This work deals with control algorithms for discrete-time Markovian jump linear systems. The following control problems are considered: linear-quadratic optimal control, H2 control, H-infinity control and mixed H2/H-infinity control. The latter two problems, for which a solution was not previously available in the literature, are approached via a recursive solution to the coupled algebraic Riccati equation and convex programming respectively. New theoretical results are presented and efficient computational algorithms for control design are proposed for the four problems. Design examples and computational simulations to illustrate the application of the proposed techniques are also presented.