

**FRANCIELE BRAGA MACHADO TULLIO
LUCIO MAURO BRAGA MACHADO
(ORGANIZADORES)**



**RESULTADOS DAS PESQUISAS
E INOVAÇÕES NA ÁREA
DAS ENGENHARIAS**

**FRANCIELE BRAGA MACHADO TULLIO
LUCIO MAURO BRAGA MACHADO
(ORGANIZADORES)**



**RESULTADOS DAS PESQUISAS
E INOVAÇÕES NA ÁREA
DAS ENGENHARIAS**

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Geraldo Alves

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano

Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Msc. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adailson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Msc. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Msc. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
 Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
 Prof. Msc. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
 Prof. Msc. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
 Prof^a Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
 Prof. Msc. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
 Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Prof^a Msc. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Prof^a Msc. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Prof^a Dr^a Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Msc. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Msc. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá
 Prof. Msc. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof^a Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Prof^a Msc. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
R436	<p>Resultados das pesquisas e inovações na área das engenharias [recurso eletrônico] / Organizadores Franciele Braga Machado Tullio, Lucio Mauro Braga Machado. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-86002-21-8 DOI 10.22533/at.ed.218200303</p> <p>1. Engenharia – Pesquisa – Brasil. 2. Inovações tecnológicas. 3. Tecnologia. I. Tullio, Franciele Braga Machado. II. Machado, Lucio Mauro Braga.</p> <p style="text-align: right;">CDD 658.5</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior CRB6/2422	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Resultados das Pesquisas e Inovações na Área das Engenharias” contempla dezoito capítulos em que os autores abordam as mais recentes pesquisas e inovações aplicadas nas mais diversas áreas da engenharia.

A constante transformação que a sociedade vem sofrendo é produto de um trabalho de desenvolvimento de pesquisas e tecnologia que aplicadas se tornam inovação.

O estudo sobre materiais e seu comportamento auxiliam na compreensão sobre seu uso em estruturas e eventualmente podem determinar o aparecimento ou não de patologias.

As pesquisas sobre a utilização de ferramentas computacionais permitem o aprimoramento da gestão de diversas atividades e processos de produção.

São abordadas também nessa obra as pesquisas sobre a forma de ensinar, utilizando as tecnologias em favor do processo de ensino e aprendizagem.

Diante disso, esperamos que esta obra instigue o leitor a desenvolver ainda mais pesquisas, auxiliando na constante transformação tecnológica que o mundo vem sofrendo, visando a melhoria da qualidade de vida na sociedade. Boa leitura!

Franciele Braga Machado Tullio
Lucio Mauro Braga Machado

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE JUNTAS SOLDADAS DISSIMILARES NA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS	
Daniel Nicolau Lima Alves Marcelo Cavalcanti Rodrigues José Gonçalves de Almeida	
DOI 10.22533/at.ed.2182003031	
CAPÍTULO 2	13
ANÁLISE DE ÍONS DE CLORETO E SUA INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE ENVELHECIMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO	
Ana Paula dos Santos Pereira Danielle Cristina dos Santos Lisboa Lucas Nadler Rocha Alberto Nunes Rangel Claudemir Gomes de Santana Renata Medeiros Lobo Müller	
DOI 10.22533/at.ed.2182003032	
CAPÍTULO 3	25
ANÁLISE DO SISTEMA CONSTRUTIVO E SEUS MATERIAIS CONSTITUINTES COM ENFÂSE NO AÇO COMO SOLUÇÃO PARA REFORÇOS ESTRUTURAIS	
Marcos Bressan Guimarães Vinícius Marcelo de Oliveira Maicá Diorges Carlos Lopes Rafael Aésio de Oliveira Zaltron Arthur Baggio Pietczak Bianca Milena Girardi Bruna Carolina Jachinski	
DOI 10.22533/at.ed.2182003033	
CAPÍTULO 4	38
UTILIZAÇÃO DE SIG NA GESTÃO DOS IMPACTOS DA ÁGUA RESIDUAL DA ETE NO MUNICÍPIO DE CANDEIAS – BAHIA	
Gisa Maria Gomes de Barros Almeida. Helder Guimarães Aragão. Rodrigo Alves Santos.	
DOI 10.22533/at.ed.2182003034	
CAPÍTULO 5	47
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL EM EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM CONCRETO ARMADO COM INCLUSÃO DE NÚCLEOS RÍGIDOS	
Thadeu Ribas Lugarini Ana Carolina Virmond Portela Giovannetti	
DOI 10.22533/at.ed.2182003035	

CAPÍTULO 6	58
APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS BIM NO ORÇAMENTO DE OBRA - ESTUDO DE CASO: EDIFÍCIO DASOS	
Susan Pessini Sato	
Leonardo Padoan dos Santos	
Bruno Pscheidt Cenovicz	
DOI 10.22533/at.ed.2182003036	
CAPÍTULO 7	69
LOW-COST SUNLIGHT CONCENTRATORS TO IMPROVE HEAT TRANSFER DURING WATER SOLAR DISINFECTION	
Bruno Ramos Brum	
Rossean Golin	
Zoraidy Marques de Lima	
Danila Soares Caixeta	
Eduardo Beraldo de Moraes	
DOI 10.22533/at.ed.2182003037	
CAPÍTULO 8	81
ESTUDOCOMPARATIVOUSANDODIFERENTESRESINASPARADETERMINAÇÃO DE ISÓTOPOS DE TÓRIO	
Mychelle Munyck Linhares Rosa	
Maria Helena Tirollo Taddei	
Luan Teixeira Vieira Cheberle	
Paulo Sergio Cardoso da Silva	
Vera Akiko Maihara	
DOI 10.22533/at.ed.2182003038	
CAPÍTULO 9	88
DESENVOLVIMENTO EM LABORATÓRIO DE UM TUBO DE VENTURI ACOPLADO A UM RESERVATÓRIO PARA MEDIÇÃO DE PRESSÃO, VELOCIDADE E VAZÃO DE FLUIDOS	
Joilson Bentes da Silva filho	
Adalberto Gomes de Miranda	
José Costa de Macêdo Neto	
DOI 10.22533/at.ed.2182003039	
CAPÍTULO 10	96
PROPOSTADEDESIGNDOCOMPONENTETANQUEMODULARDECOMBUSTÍVEL PARA AERONAVE AS 350 ESQUILO	
Abilio Augusto Corrêa	
Daniel Brogini de Assis	
DOI 10.22533/at.ed.21820030310	
CAPÍTULO 11	107
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UMA MICROEMPRESA DE DOCES ARTESANAIS DA AMAZÔNIA UTILIZANDO O PDCA	
Karla Josiane de Lima Baia	
Rita de Cássia Ferreira Xavier	
Maria Beatriz Costa de Souza	
David Barbosa de Alencar	
DOI 10.22533/at.ed.21820030311	

CAPÍTULO 12	118
AUDITORIA INTERNA COMO PROVIMENTO À GESTÃO DA QUALIDADE: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA TÊXTIL	
Phelippe Moura da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.21820030312	
CAPÍTULO 13	125
APLICAÇÕES DE REDES DE SENSORES SEM FIO	
Arthur M. Barbosa	
Paulo Fernandes da Silva Júnior	
Ewaldo Eder Carvalho Santana	
Marcos Erike Silva Santos	
Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira	
Pedro Carlos de Assis Júnior	
Marcelo da Silva Vieira	
Rodrigo César Fonseca da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.21820030313	
CAPÍTULO 14	145
A IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA FÉRREO “CAXIAS DO SUL – PORTO DO RIO GRANDE”: UM ESTUDO DE PERSPECTIVA ECONÔMICO-LOGÍSTICO NO ESCOAMENTO DE CARGAS	
Giovanni Luigi Ferreira Schiavon	
Helenton Carlos da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.21820030314	
CAPÍTULO 15	155
CONTROLE DE SISTEMAS LINEARES BASEADOS EM LMIS	
Ana Flávia de Sousa Freitas	
Amanda Viera da Silva	
Wallysonn Alves de Souza	
Rafael Pimenta Alves	
DOI 10.22533/at.ed.21820030315	
CAPÍTULO 16	162
APOIO À DECISÃO ASSOCIANDO A COMPOSIÇÃO PROBABILÍSTICA DE PREFERÊNCIAS AO MONTE CARLO AHP (CPP-MCAHP)	
Luiz Octávio Gavião	
Annibal Parracho Sant’Anna	
Gilson Brito Alves Lima	
Pauli Adriano de Almada Garcia	
Sergio Kostin	
DOI 10.22533/at.ed.21820030316	
CAPÍTULO 17	178
EVOLUÇÃO DAS PESQUISAS CIENTÍFICAS ACERCA DA APLICABILIDADE DAS METODOLOGIAS ATIVAS DE APRENDIZAGEM NO CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO: UMA ANÁLISE NOS PERIÓDICOS INDEXADOS PELA SCOPUS	
Lucas Capita Quarto	
Sônia Maria da Fonseca Souza	
Cristina de Fátima de Oliveira Brum Augusto de Souza	

Fabio Luiz Fully Teixeira
Fernanda Castro Manhães

DOI 10.22533/at.ed.21820030317

CAPÍTULO 18 192

PROJETO DE DESIGN DE MASCOTE PARA JOGO MOBILE

Cristina Trentini
Airam Teresa Zago Romcy Sausen
Paulo Sérgio Sausen
Maurício De Campos
Fabiane Volkmer Grossmann

DOI 10.22533/at.ed.21820030318

SOBRE OS ORGANIZADORES..... 198

ÍNDICE REMISSIVO 199

CONTROLE DE SISTEMAS LINEARES BASEADOS EM LMIS

Data de aceite: 27/02/2020

Data de submissão: 03/12/2019

Ana Flávia de Sousa Freitas

Universidade Federal Tecnológica do Paraná –
Campus Curitiba
Curitiba – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/3399364073214798>

Amanda Viera da Silva

Universidade Federal do Tocantins – Campus
Palmas
Palmas – Tocantins
<http://lattes.cnpq.br/3579159806274286>

Wallysonn Alves de Souza

Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas
Palmas – Tocantins
<http://lattes.cnpq.br/9044733114581611>

Rafael Pimenta Alves

Universidade Federal do Tocantins – Campus
Palmas
Palmas – Tocantins
<http://lattes.cnpq.br/0352925106067613>

RESUMO: O trabalho apresenta um estudo sobre a análise de estabilidade e sistema de controle para sistemas lineares invariantes no tempo. Este método é baseado em Desigualdades Matriciais Lineares (do inglês “Linear Matrix Inequalities– LMIs) e utiliza a função de Lyapunov quadrática para projetar

os ganhos de realimentação do controlador. A simulação do sistema de controle de um sistema bola viga atesta a eficiência da metodologia.

PALAVRAS–CHAVE: Controle de sistemas lineares, desigualdades matriciais lineares, LMIs, sistema bola-viga

CONTROL OF LINEAR SYSTEM LMIS-BASED

ABSTRACT: The paper presents a study on stability analysis and control of time invariant linear systems. This method is based on Linear Matrix Inequalities (LMIs) and uses a quadratic Lyapunov function to design the feedback controller gains. The simulation of the control system of a ball and beam system attests to the efficiency of the methodology.

KEYWORDS: Control of linear system, linear matrix inequalities, LMIs, ball and beam system

1 | INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o controle automático tem sido indispensável para o desenvolvimento da ciência e, particularmente, na engenharia devido a sua importância nos processos de produção industrial, tais como: no controle de pressão, temperatura, umidade, viscosidade e de vazão nos processos industriais, no projeto de sistemas de controle de piloto automático

na indústria aeroespacial, no projeto de carros e caminhões na indústria automotiva, dentre outros. Assim, o estudo de problemas acoplados à teoria de controle tem crescido muito e boa parte destes estudos estão associados com análises de estabilidade e a projetos de novos controladores, e boa parte desses projetos são baseados em Desigualdades Matriciais Lineares (do inglês “Linear Matrix Inequalities – LMIs).

Segundo (BOYD et al., 1994), a história das LMIs na análise de sistemas dinâmicos remonta há mais de 100 anos, e começa em cerca de 1890, quando Lyapunov publicou seu trabalho introduzindo o que hoje chamamos de teoria de Lyapunov. Naquela época, o teorema de Lyapunov, adaptado para sistemas lineares contínuos no tempo, poderia ser formulado diretamente em termos de LMIs. Mas, principalmente na década de 1980 foram abertos caminhos para que problemas de controle pudessem ser convertidos em problemas convexos, como por exemplo, com o trabalho de (BERNUSSOU; PERES; GEROMEL, 1989). A partir daí, garantir que um sistema linear realimentado seja estável é equivalente a encontrar um ganho estabilizante K e uma matriz de Lyapunov P simétrica positiva definida. Além da simplicidade e consistência algébrica, uma das principais vantagens da metodologia baseada em LMIs é a facilidade de inclusão de incertezas no modelo, como as do tipo politópicas e índices de desempenho, como taxa de decaimento e restrição na entrada e saída da planta.

A principal contribuição deste trabalho é a análise e síntese de controle para sistemas lineares realimentados. Para mostrar a eficiência da metodologia proposta foram realizadas simulações computacionais do projeto de controle de um sistema bola-viga utilizando o *software* MATLAB.

2 | RESULTADOS PRELIMINARES

A estabilidade de um ponto de equilíbrio é usualmente caracterizada de Teoria de Lyapunov para sistemas. Uma das condições fundamentais na teoria de sistemas é a construção de funções de Lyapunov, tanto para análise de estabilidade quanto para a síntese de controladores.

Intuitivamente, a estabilidade de um sistema dinâmico está relacionada com a função energia deste sistema. Se a função *energia* do sistema é sempre positiva e decrescente com o tempo, as trajetórias tendem à origem (KHALIL, 1996). Considere o sistema linear autônomo, em que A é uma matriz simétrica definida positiva:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \tag{1}$$

O ponto de equilíbrio do sistema linear (1) é um ponto x_e , tal que, $\dot{x}(t) = 0$.

Note que, no caso do sistema linear (1), $x_e = 0$.

Teorema 2.1 (Lyapunov). Dizemos que o ponto de equilíbrio $x_e = 0$ do sistema linear (1) é globalmente assintoticamente estável, se existe uma função $V: D \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ de classe C^1 (função de Lyapunov) tal que:

- (i) $V(0) = 0$;
- (ii) $V(x) > 0, \forall x \in D, x \neq 0$;
- (iii) $\dot{V}(x) < 0, \forall x \in D, x \neq 0$.

A demonstração deste teorema pode ser vista, por exemplo, em (Boyd, 1994).

A forma mais simples de encontrar a função de Lyapunov é considerar a forma quadrática:

$$V(x(t)) = x(t)^T P x(t) \quad (2)$$

sendo P uma matriz simétrica positiva definida. Assim V pode ser escrita da seguinte forma:

$$V(x) = \begin{bmatrix} x_1(t) & x_2(t) & \dots & x_n(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}$$

Teorema 2.2 Uma condição necessária e suficiente para que o estado de equilíbrio $x = 0$, do sistema linear (1), seja assintoticamente estável é que exista uma matriz P , simétrica positiva definida ($P > 0$), tal que:

$$A^T P + P A < 0 \quad (3)$$

A demonstração pode ser vista em (BOYD et al., 1994).

A equação (3) é uma LMI. Para a demonstração do Teorema 2.2, utiliza-se a função quadrática de Lyapunov:

$$V(x) = x^T P x \quad (4)$$

Sendo que P é uma matriz constante, real simétrica positiva definida e exigindo a condição $\dot{V}(x) < 0$ para todo x . Isto é equivalente a determinarmos uma matriz $P = P^T > 0$ e, se existir essa matriz P , podemos dizer que o sistema dinâmico é quadraticamente estável.

Agora, considere o sistema linear realimentado:

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t), \quad (6)$$

sendo $x \in \mathbb{R}^n$ o vetor de estado, $u \in \mathbb{R}^m$ a entrada de controle, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ e $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$.

Suponha que todas as variáveis de estado estejam disponíveis para realimentação, uma lei de controle largamente usada na literatura é dada por:

$$u = -K x(t), \quad K \in \mathbb{R}^{m \times n}. \quad (7)$$

Substituindo (7) em (6), temos:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BKx(t) = (A - BK)x(t) \quad (8)$$

que é o sistema realimentado.

3 | RESULTADOS PRINCIPAIS

Nesta seção vamos apresentar um teorema que garante a estabilidade do sistema linear realimentado (8).

Teorema 3.1 *O sistema linear dado em (8) é quadraticamente estabilizável se, e somente se, existem uma matriz simétrica positiva definida $X \in \mathbb{R}^{n \times n}$ e uma matriz $M \in \mathbb{R}^{m \times n}$, tais que:*

$$XA^T + AX - BM - M^T B^T < 0 \quad (9)$$

Se (9) é factível, o ganho do controlador é dado por $K = M X^{-1}$.

A demonstração do Teorema 3.1 pode ser vista em (Bernussou, Peres e Geromel, 1989).

O Teorema 3.1 garante a estabilidade do sistema realimentado (9), isto é, garantir que o sistema linear realimentado (9) seja estável é equivalente a encontrar um ganho estabilizante K e uma matriz de Lyapunov P simétrica positiva definida. A seguir, vamos ilustrar a metodologia projetando um sistema de controle para o sistema bola-viga.

3.1 Sistema bola-viga

O sistema bola-viga é um sistema não-linear e instável em malha aberta. Este é um importante modelo no aprendizado de engenharia e sistemas de controle pois permite que inúmeras técnicas de controle possam ser estudadas e pesquisadas (DAMAZO, 2008).

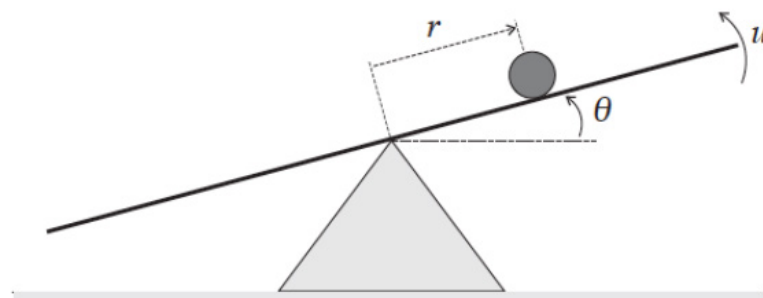


Figura 1 – Sistema Bola-viga. Fonte: Cardim (2009).

Para exemplificar, será projetado um sistema de controle para um sistema

bola-viga, ilustrado na Figura 1, e que segue o modelo matemático, linearizado, estabelecido em (WANG,1996):

$$\begin{cases} \tau \dot{\theta} + \dot{\theta}(t) = k v_m(t) \\ \dot{x} = k_{bb} \theta(t) \end{cases} \quad (8)$$

Em que,

- $k_{bb} = 1,3 \text{ m/s}^2$; ;
- $k = 1,76 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$; ;
- $\tau = 0,0285 \text{ s}$; ;
- x : posição da bola;
- θ : ângulo da viga em relação ao solo (posição angular);
- u : torque aplicado na barra e o sinal de controle.
-

Assim, o sistema (8) pode ser reescrito da seguinte forma

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x \\ \theta \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k}{\tau} \end{bmatrix} v_m(t) \quad (9)$$

Definindo,

$$\begin{cases} x(t) = x_1(t) \\ \theta(t) = x_3(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}(t) = x_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_3(t) = \dot{\theta}(t) = x_4(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_2(t) = x_1(t) = x(t) \\ \dot{x}_4 = x_3(t) = \dot{\theta}(t) \end{cases}$$

Ou seja,

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = x_1(t) \\ \dot{x}(t) = x_2(t) \\ \theta(t) = x_3(t) \\ \dot{\theta}(t) = x_4(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = k_{bb} x_3(t) \\ x_3(t) = x_4(t) \\ \dot{x}_4 = \frac{-1}{\tau} x_4(t) + \frac{k}{\tau} u(t) \end{cases}$$

Daí o sistema (9) pode ser escrito:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} u \quad (10)$$

3.2 Simulações

O objetivo da simulação do sistema de controle é conservar a bola na origem. Considerou-se a condição inicial da bola $x_0 = [0,4000 \quad -0,5000 \quad 0,1000 \quad 0]^T$ e o ponto de

equilíbrio definido por $x_e = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, a simulação do sistema controlado apresentou as respostas ilustradas na Figura 2. Utilizando as matrizes A e B do sistema (10) no Teorema 3.1, foram obtidos os valores para a matriz simétrica definida positiva P e o ganho do controlador K :

$$P = \begin{bmatrix} 1,6118 & 2,1934 & 2,5850 & 0,7629 \\ 2,1934 & 6,0555 & 5,9041 & 2,2958 \\ 2,5850 & 5,9041 & 8,3044 & 2,7049 \\ 0,7629 & 2,2958 & 2,7049 & 1,6878 \end{bmatrix}$$

$$K = [0,04270,10340,1611 - 0,5110]$$

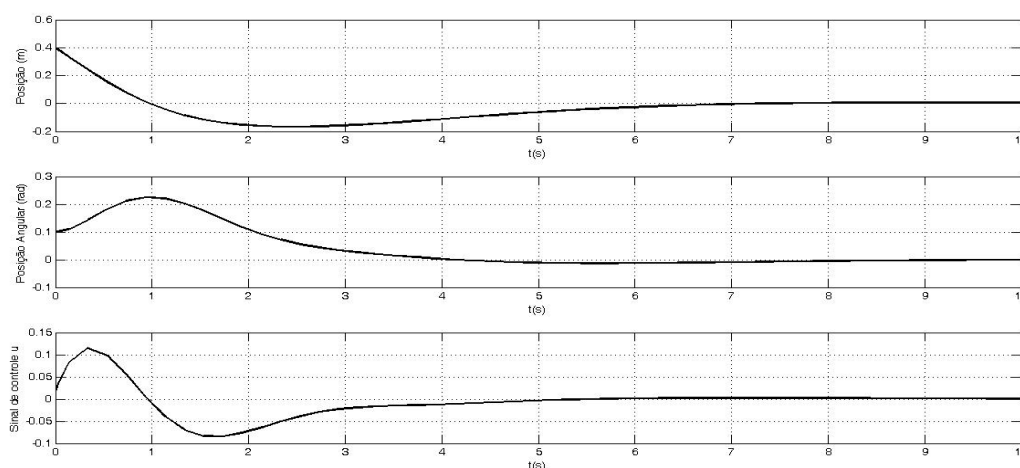


Figura 2 – Variáveis de estado $x_1(t)$ posição da bola, $x_3(t)$ posição angular e sinal de controle u .

Note na Figura 2 que o controlador aqui definido apresenta um bom desempenho, conseguindo levar a bola para a origem em aproximadamente 7 segundos e utilizando pouco esforço de tensão elétrica. Este desempenho pode ser melhorado utilizando, por exemplo, taxa de decaimento que será explorado em trabalhos futuros.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia de análise e projeto de sistema de controle de sistemas lineares, baseados em LMIs.

Para confirmar a metodologia proposta foi projetado e simulado o sistema de controle de um sistema bola-viga. Como pode ser visto na Figura 2, o sistema apresenta um bom desempenho, mas pode ser melhorado inserindo índice de desempenho como, por exemplo, taxa de decaimento. Trabalhos futuros pretendem explorar esse índice de desempenho e, além disso, pretende-se projetar controle mesmo com incertezas na planta.

REFERÊNCIAS

BERNUSSOU, J.; PERES, P. L. D.; GEROMEL, J. C. **A linear programming oriented procedure for quadratic stabilization of uncertain systems**. Systems & Control Letters, Amsterdam, v. 13, n. 1, p. 65–72, jul. 1989.

BOYD, Stephen. et al. **Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory**. Philadelphia: SIAM, 1994.

CARDIM, R. **Projeto de Controladores Baseados em LMIs: realimentação derivativa e sistemas chaveados utilizando estrutura variável**. 2009. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Unversidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bis/33004099080P0/2009/cadim_r_dr_ilha.pdf>. Acesso em: 15 agost. 2017.

DAMAZO, G. A. **Controle com Modos Deslizantes Aplicado em Sistemas com Atraso e Acesso Somente à Saída**. 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, Ilha Solteira, 2008.

WANG, L.-X. **A course in fuzzy systems and control**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

ÍNDICE REMISSIVO

A

AHP estocástico 162

Aluminized tetra pak package 69

Análise 1, 2, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 24, 25, 26, 27, 29, 37, 42, 43, 44, 45, 48, 49, 56, 57, 64, 81, 102, 109, 110, 113, 118, 122, 123, 134, 155, 156, 160, 162, 163, 173, 177, 178, 181, 182, 183, 185, 189, 190, 191, 193

Auditoria 118, 119, 121, 122, 123, 124

Auditoria interna da qualidade 118, 119, 121

B

Bim 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68

Bipartição do tanque 96

C

Campo de deformação 1, 8, 9, 10

Campo de tensão 1, 10

Carro de competição 126, 134, 141

Colunas manométricas 88, 93, 94

Comparação 49, 55, 58, 61, 64, 65, 105, 132, 148, 149, 164, 171, 174, 193

Concreto 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 37, 47, 48, 49, 52, 56, 57, 62

Contaminação de combustível 96, 97

Controle de sistemas lineares 155, 160

Corrosão 3, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 23, 24, 101

Cpp-mcahp 162, 163, 165, 166, 168, 174

D

Dados geoespaciais 38, 40

Desigualdades matriciais lineares 155, 156

Desvios de trinca 1

Drinking water 69, 70, 78, 79, 80, 86

Durabilidade 13, 14, 15, 18, 19, 22, 23

E

Edifícios de concreto armado 47, 57

Efluente 38, 39, 43, 44

Eletrodeposição 81

Envelhecimento 13, 14, 19, 22, 24

Equação de bernoulli 88, 90, 93, 95

Escherichia coli 69, 70, 71, 72, 79

Estruturas metálicas 5, 26, 32, 33, 37

Ete 38, 39, 40, 43, 44, 45

F

Fabricação artesanal 107

Foil from beverage can 69

G

Gerenciamento da produção 107

I

Instabilidade global 47, 56

Isótopos de tório 81

J

Juntas soldadas dissimilares 1, 2

L

Lmis 155

M

Microprecipitação 81

Mirror 69, 71, 72, 74, 77, 78

Monte carlo 162, 163, 164, 168, 175, 176, 177

N

Núcleos rígidos 47, 49, 51, 55, 56

O

Orçamento 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 198

Otimização de processos 107

P

Pseudomonas aeruginosa 69, 70, 71, 72, 79, 101

Q

Qgis 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45

Qualidade 16, 23, 39, 40, 41, 45, 67, 108, 111, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 146, 181, 182, 186

Qualidade ambiental urbana 125, 126

Quantitativos 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 184

R

Redes de sensores sem fio 125, 126, 127, 143

Reforço estrutural 25, 26, 27, 29, 32, 37, 99

S

Sig 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 197

Sistema bola-viga 155, 156, 158, 160

Sodis 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80

Subabastecimento 96, 97

T

Tubo de venturi 88, 92, 93, 95

 **Atena**
Editora

2 0 2 0