

ARMANDO DIAS DUARTE
(ORGANIZADOR)

Collection:

**APPLIED CIVIL
ENGINEERING
2**


Ano 2022

ARMANDO DIAS DUARTE
(ORGANIZADOR)

Collection:

**APPLIED CIVIL
ENGINEERING
2**

**Atena**
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Diagramação: Daphynny Pamplona
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Armando Dias Duarte

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C697 Collection: applied civil engineering 2 / Organizador
Armando Dias Duarte. – Ponta Grossa - PR: Atena,
2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0174-2

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.742222604>

1. Civil engineering. I. Duarte, Armando Dias
(Organizador). II. Título.

CDD 624

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

A coleção de trabalhos intitulada “*Collection: Applied civil engineering 2*” é uma obra que tem como foco principal a discussão científica por intermédio de diversos trabalhos que compõe seus capítulos. O volume abordará de forma categorizada e interdisciplinar, pesquisas cujos resultados possam auxiliar na tomada de decisão, tanto no campo acadêmico, quanto no profissional.

Os trabalhos desenvolvidos foram realizados em instituições de ensino e pesquisa no Brasil. Nos capítulos apresentados, são encontrados estudos de grande valia nas áreas de materiais da construção civil, métodos numéricos e segurança. A composição dos temas buscou a proposta de fundamentar o conhecimento de acadêmicos (as), mestres (as) e todos (as) aqueles (as) que de alguma forma se interessam pela área da Engenharia Civil, através de temáticas atuais com resoluções inovadoras, descritas nos capítulos da coleção. Sendo assim, a divulgação científica é apresentada com grande importância para o desenvolvimento de toda uma nação, portanto, fica evidenciada a responsabilidade de transmissão dos saberes através de plataformas consolidadas e confiáveis, como a Atena Editora, capaz de oferecer uma maior segurança para os novos pesquisadores e os que já atuam nas diferentes áreas de pesquisa, exporem e divulgarem seus resultados.

Armando Dias Duarte

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

A INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE CINZA PESADA COMO SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO NATURAL EM ARGAMASSA


André Valmir Saugo Ribeiro

Jéssyca Mendes da Silva

Eduardo Nobre Guindani

Julia Beatriz Saugo Milani

Philippe Jean Paul Gleize


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226041>

CAPÍTULO 2..... 13

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS EM FACHADAS: UM ESTUDO DE CASO

Francisca Evânia Carvalho

Aridenise Macena Fontenelle

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226042>

CAPÍTULO 3..... 20


ANÁLISE DE MODELOS DE CÁLCULO DE PONTES COM MÚLTIPLAS VIGAS

Luís Gabriel de Moura

Daniele Martins

Isadora Paczek

Guilherme Alves Correa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226043>

CAPÍTULO 4..... 32


ANÁLISE DA FORÇA CORTANTE EM LAJES COM VIGOTAS TRELIÇADAS

Rodrigo Bender

Daniele Martins

Isadora Paczek

Guilherme Alves Correa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226044>

CAPÍTULO 5..... 45

COMPARAÇÃO DE ARMADURA MÍNIMA EM VIGAS PROTENDIDAS EM PÓS-TRAÇÃO ADERENTE COM CAD E CRF

Fernando Machado Parizi



 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226045>

CAPÍTULO 6..... 58

MODOS DE FALHA EM BARRAGENS E O FENÔMENO DA LIQUEFAÇÃO

Rafaela Baldi Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226046>

CAPÍTULO 7	68
PRÉDIOS SOB AÇÃO DE TERREMOTO: ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE	
Denner Cirqueira Costa	
Wallysonn Alves de Souza	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226047	
CAPÍTULO 8	76
APLICAÇÃO DE INSTRUÇÕES TÉCNICAS DO CBMPA PARA AVERIGUAÇÃO DAS MEDIDAS DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM INSTITUIÇÕES DE ENSINO	
Flaviany Luise Nogueira de Sousa	
Nuria Pérez Gallardo	
Tamara Daiane de Souza	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226048	
SOBRE O ORGANIZADOR	88
ÍNDICE REMISSIVO	89

PRÉDIOS SOB AÇÃO DE TERREMOTO: ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE

Data de aceite: 01/04/2022

Denner Cirqueira Costa

Estudante do Curso Superior de Engenharia Civil – IFTO – Campus Palmas Palmas-TO

Wallysonn Alves de Souza

Professor de Matemática e Doutor em Engenharia Elétrica – IFTO – Campus Palmas Palmas-TO

RESUMO: Este trabalho apresenta uma pesquisa bibliográfica a respeito da teoria de estabilidade de Lyapunov e suas consequências na fundamentação da teoria clássica e moderna de controle. Neste sentido, tem-se o objetivo de mostrar a eficiência da metodologia moderna de análise e síntese de controladores, baseada em desigualdades matriciais lineares – LMIs (Linear Matrix Inequalities), com a exigência de taxa de decaimento. Para confirmar a eficiência da metodologia apresentada foi projetado um sistema de controle para o sistema Shake Table II + Active Mass Dumper 1, desenvolvido pela Quanser. O sistema é um protótipo de prédio de um andar sofrendo oscilações laterais, simulando a ação de um terremoto. As simulações numéricas apresentadas foram realizadas no software MATLAB e evidenciam a eficiência da metodologia apresentada.

PALAVRAS-CHAVE: Desigualdades Matriciais Lineares – LMIs, Estabilidade de Lyapunov, Sistemas Lineares, Terremotos.

ABSTRACT: This work presents a bibliographical research about the Lyapunov stability theory and its consequences in the foundation of the classical and modern theory of control. In this sense, the objective is to show the efficiency of the modern methodology of analysis and synthesis of controllers, based on linear matrix inequalities – LMIs (Linear Matrix Inequalities), with the requirement of decay rate. To confirm the efficiency of the methodology presented, a control system was designed for the Shake Table II + Active Mass Dumper 1 system, developed by Quanser. The system is a prototype of a one-story building undergoing lateral oscillations, simulating the action of an earthquake. The numerical simulations presented were performed in MATLAB software and evidence the efficiency of the presented methodology.

KEYWORDS: Linear Matrix Inequalities – LMIs, Lyapunov Stability, Linear Systems, Earthquakes.

1 | INTRODUÇÃO

A teoria de estabilidade por meio de equações diferenciais teve início com Aleksandr Mikhailovich Lyapunov (1857-1918) com a defesa de sua tese de doutorado em 1892, o que vem a ser hoje o que conhecemos como teoria de estabilidade de Lyapunov, ou simplesmente, estabilidade no sentido de Lyapunov. O estudo dessa teoria cresceu e despertou um grande interesse no período da Guerra Fria quanto à análise de estabilidade e síntese de controladores para o movimento de espaçonaves e mísseis, regidos por equações

diferenciais fortemente não lineares. Surge assim, a chamada teoria clássica de controle.

Conforme afirma (OGATA, 2010, p.2), a partir de 1960, com a disponibilidade dos computadores digitais surge a teoria de controle moderno. Neste contexto, surge as desigualdades matriciais lineares – LMIs (Linear Matrix Inequalities) que é basicamente uma releitura do Teorema de Lyapunov. Recentemente as LMIs tem sido muito utilizadas para resolver problemas de sistema de controle de ordem teórica, acadêmica e prática, em várias áreas do conhecimento, em especial nas engenharias como pode ser visto, por exemplo, em (SOUZA, 2013; BUZACHERO, 2014).

Este trabalho tem um objetivo de apresentar a aplicabilidade da teoria de Lyapunov, com a utilização das LMIs propostas em (BOYD et al., 1994), no controle de estabilidade de prédios sob ação de terremotos. Nota-se que a pesquisa é relevante, visto que em vários locais do mundo como, por exemplo, no círculo de fogo do pacífico, localizada no norte do oceano pacífico, é praticamente impossível construir prédios sem levar em consideração abalos sísmicos, ou seja, a possibilidade de terremotos.

Assim, foram projetados e simulados dois sistemas de controle, com e sem taxa de decaimento, para o protótipo de um prédio de um andar, com um controlador sob esse andar, o sistema Shake Table II + Active Mass Damper 1 (QUANSER, 2012).

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2, é realizado um breve estudo da estabilidade no sentido de Lyapunov; em seguida, na seção 3, é definido o conceito de LMIs seguindo a linha de (BOYD et al., 1994) e, depois, na seção 4, utiliza-se o conceito de estabilidade de Lyapunov para estabelecer condições, baseadas em LMIs, que garantem a estabilidade de um sistema linear de equações diferenciais. O projeto de um sistema de controle para o dispositivo Shake Table II + Active Mass Damper 1, e as simulações computacionais do mesmo são apresentadas na seção 5. Por fim tecemos nossas considerações finais.

2 | ESTABILIDADE DE LYAPUNOV

De acordo com Lyapunov, o termo estabilidade está relacionado com a capacidade de um determinado ponto atingir um equilíbrio.

Considere o sistema linear autônomo:

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

O ponto de equilíbrio do sistema (1) é um ponto tal que .

Definição 2.1: Diz-se que um ponto de equilíbrio x_e , do sistema (1) é estável no sentido de Lyapunov se, para todo $\epsilon > 0$ existe $\delta = \delta(\epsilon) > 0$ tal que, para toda condição inicial $x_0 - x(0)$

$$\|x_0 - x_e\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_e\| < \epsilon.$$

Definição 2.2: Diz-se que um ponto de equilíbrio x_e , do sistema (1) é globalmente assintoticamente estável, no sentido de Lyapunov, se ele for estável e, além disso, para todo $x_0 \in \mathbb{R}^n$ tem-se $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_e$.

Ao considerar um sistema linear, presume-se que existe apenas um ponto de equilíbrio, a origem. Logo, se um sistema for estável, terá um ponto de equilíbrio globalmente assintoticamente estável, pois suas soluções convergirão para a origem.

Teorema 2.1: Uma condição necessária e suficiente para que o estado de equilíbrio $x = 0$, do sistema (1), seja globalmente assintoticamente estável é que exista uma matriz P , simétrica definida positiva ($P > 0$), tal que:

$$A^T P + P A > 0. \quad (2)$$

2.1 Desigualdades Matriciais Lineares

Definição 2.3: Uma Desigualdade Matricial Linear - LMI é uma expressão da forma:

$$F(x) \equiv F_0 + \sum_{i=1}^n x_i F_i > 0 \quad (3)$$

em que $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ é o vetor de variáveis de decisão; $F_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $i = 0, \dots, n$, são matrizes constantes simétricas, ou seja, $F_i = F_i^T$.

Um exemplo de LMI com variável matricial é a desigualdade de Lyapunov, dada em (2).

Nem todo resultado da teoria de controle aparece diretamente na forma de LMI, como a equação de Lyapunov. Mas algumas ferramentas da álgebra matricial ajudam a transpor estes resultados para uma formulação de desigualdades matriciais lineares (ALVES, 2017).

3 | ESTABILIDADE DE SISTEMAS LINEARES REALIMENTADOS VIA LMI

Considere o sistema linear invariante no tempo descrito na forma de espaço estado,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(0) = x_0 \quad (4)$$

sendo $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ o vetor de estado, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ a matriz de entrada e $u(t) \in \mathbb{R}^m$ o vetor de entrada do sistema. Agora, assumindo que todos os estados estejam disponíveis para realimentação, uma lei de realimentação dos mesmos pode ser dada por:

$$u(t) = -Kx(t), \quad (5)$$

sendo K uma matriz controladora de elementos constantes com $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$.

Substituindo (5) em (4), tem-se o seguinte sistema com característica de realimentação de estado:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t), \quad x(0) = x_0 \quad (6)$$

Teorema 3.1: *Uma condição necessária e suficiente para que o estado de equilíbrio $x = 0$, do sistema realimentado (6), seja assintoticamente estável é que exista uma matriz, simétrica positiva definida, tal que:*

$$X > 0 \quad (7)$$

$$A^T + AX - BM - M^T B^T > 0 \quad (8)$$

se as LMIs (7) e (8) forem factíveis o ganho do controlador é dado por $K = MX^{-1}$.

3.1 Taxa de Decaimento Para Sistemas Com Realimentação de Estados

Um índice de desempenho que normalmente se exige de um sistema controlado é a velocidade de resposta que o sistema oferecerá, essa resposta está associada com a taxa de decaimento α .

Teorema 3.2: *O sistema linear realimentado (6) é quadraticamente estabilizável, com taxa de decaimento maior ou igual a α se, e somente se, existe uma matriz simétrica definida positiva $X \in \mathbb{R}^{m \times n}$ e uma matriz $M \in \mathbb{R}^{m \times n}$, tais que, as seguintes LMIs são factíveis.*

$$X > 0 \quad (9)$$

$$XA^T + AX - BM - M^T B^T + 2\alpha X > 0 \quad (10)$$

Se as LMIs (9) e (10) forem factíveis o ganho do controlador é dado por $K = MX^{-1}$

4 | SISTEMA SHAKE TABLE II + ACTIVE MASS DAMPER 1

Em determinados lugares é comum a ocorrência de terremotos, principalmente em regiões próximas aos limites de placas tectônicas, deixando uma enorme destruição onde ocorre.

Após uma parceria entre a QUANSER e a Univerdidade Consortium em Instructional Shake Tables (UCIST) foi desenvolvido o Shake Table II + Active Mass Damper 1, um sistema que permite simular os tremores provocados por um terremoto em um protótipo de um prédio. A partir de simulações como esta é possível desenvolver sistemas de controle e estabilidade para atuarem em prédios reais sob a ação de terremotos.

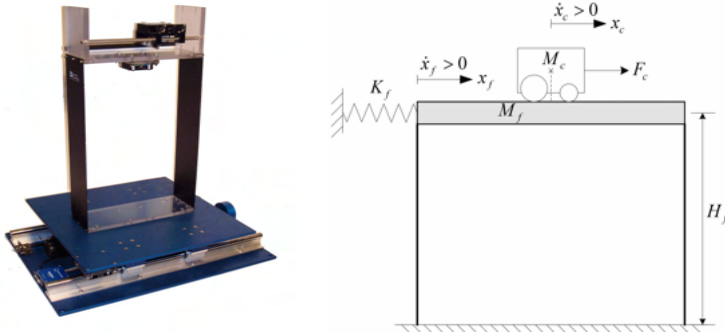


Figura 1 - Shake Table II + Active Mass Damper; Representação esquemática do sistema.

Fonte: (QUANSER, 2012).

O Active Mass Damper 1 (ADM-1) simula um prédio de um andar. É composto por duas paredes laterais em metal e no topo encontra-se o objeto de controle. Este objeto consiste em uma massa acoplada a um sistema de cremalheira que possibilita o deslocamento horizontal da mesma, simulando um sistema massa mola.

A Shake Table II consiste basicamente em um simulador de terremotos, composto por uma base acoplada à um motor que movimentava um eixo e uma segunda base, chamada de primeiro estágio que é acoplada à base por meio de trilhos laterais.

O sistema pode ser representado matematicamente da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_f \\ \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_f \end{bmatrix} = A_0 \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_f \\ \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_f \end{bmatrix} + B_0 F_c$$

Desse modo, $X_c(t)$ representa o deslocamento do carro, $X_f(t)$ o deslocamento do piso superior, suas respectivas velocidades são $\dot{x}_c(t)$ e $\dot{x}_f(t)$, e a força exercida pelo controlador f_c seja a entrada de controle.

Assim, tem-se que:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{M_c r_{mp}^2 K_f}{M_c r_{mp}^2 M_f + J_m K_g^2 (M_c + M_f)} & \frac{-r_{mp}^2 B_{eq} (M_c + M_f)}{M_c r_{mp}^2 M_f + J_m K_g^2 (M_c + M_f)} & 0 \\ 0 & \frac{-K_f (M_c r_{mp}^2 + J_m K_g^2)}{M_c r_{mp}^2 M_f + J_m K_g^2 (M_c + M_f)} & \frac{M_c B_{eq} r_{mp}^2}{M_c r_{mp}^2 M_f + J_m K_g^2 (M_c + M_f)} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{r_{mp}^2 B_{eq} (M_c + M_f)}{M_c r_{mp}^2 M_f + J_m K_g^2 (M_c + M_f)} \\ \frac{-M_c r_{mp}^2}{M_c r_{mp}^2 M_f + J_m K_g^2 (M_c + M_f)} \end{bmatrix}$$

$$F_c = -\frac{n_g K_g^2 n_m K_t K_m \dot{x}_c(t)}{r_m r_{mp}^2} + \frac{n_g K_g n_m K_t V_m}{R_m r_{mp}}$$

Na Tabela (1) apresentam-se os valores das constantes do sistema ADM-1.

Descrição	Representação	Valor
Tensão do motor	V_m	-
Resistência de armadura do motor (ω)	R_m	2,6
Constante de torque do motor (N.m/A)	K_T	0,00767
Eficiência eletromecânica do motor	N_m	1
Constante de eficiência do motor (V.s/rad)	K_m	0,00767
Eficiência do redutor planetário	N_g	1
Altura do patamar superior (m)	H_f	0,5334
Massa do patamar superior (kg)	M_f	1,38
Constante da mola para a modelagem (N/m)	K_f	500,9
Inércia do rotor (kg.m ²)	J_m	$3,9 \times 10^{-7}$
Massa total do carro (kg)	M_c	0,85
Relação da engrenagem	K_g	3,71
Raio do pinhão	r_{mp}	$6,5 \times 10^{-3}$
Coefficiente de amortecimento viscoso (N.s/m)	B_{eq}	3

Tabela 1 – Parâmetros do ADM 1.

Fonte: (QUANSER, 2012).

Como F_c depende de $\dot{x}_c(t)$ opta-se por fazer com que a entrada seja a tensão do motor V_m . Logo, tem-se as matrizes A e B, de acordo com a Tabela (1), da seguinte maneira:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 278,9341 & -18,6497 & 0 \\ 0 & -336,0626 & 5,9716 & 0 \end{bmatrix} \quad e \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2,9975 \\ -0,9598 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Desse modo, o sistema pode ser escrito como em (4), ou seja,

$$\dot{x} = Ax + BV_m, \quad (12)$$

sendo $x = [x_c \quad x_f \quad \dot{x}_c \quad \dot{x}_f]^T$.

4.1 Simulações numéricas: Massa Ativa

Segundo o Active Mass Damper - One Floor: Instructor Manual (QUANSER, 2012), o deslocamento máximo do controlador no sistema deve ser de 8cm, equivalente a 0,08m. Já o sinal de controle tem a voltagem máxima igual a 10V. Por não ter acesso ao sistema em questão, as simulações foram realizadas levando em consideração apenas um deslocamento inicial do piso superior de 7 centímetros para a direita do observador, sem levar em consideração a atuação de um terremoto propriamente dito. Os testes foram realizados respeitando os limites do aparelho e, portanto, foi considerada a seguinte condição inicial $x(0) = [0 \quad 0,07 \quad 0 \quad 0]^T$.

As simulações realizadas a seguir foram frutos da execução de códigos de comando no software MATLAB/Simulink, em conjunto com a utilização da linguagem do YALMIP (LOFBERG, 2004), com o solver SeDuMi (STURM, 1999).

Foi analisado o comportamento do sistema sem a atuação do controlador e com a atuação do mesmo em conjunto com um valor para a taxa de decaimento, a fim de minimizar o tempo de resposta do sistema, ou seja, diminuir o tempo necessário para que o mesmo atinja a estabilidade. Considerando as matrizes dadas em (11), assim como resolvendo as LMIs (9) e (10) obtidas no Teorema (3.1), obteve-se dois resultados: na situação em que o ganho do controlador é desconsiderado, admite-se que a entrada; já no outro caso, obteve-se a seguinte matriz de controle:

$$K = [32,8998 \quad -142,9072 \quad 1,1905 \quad -3,8525].$$

A resposta do sistema pode ser vista na Figura (4).

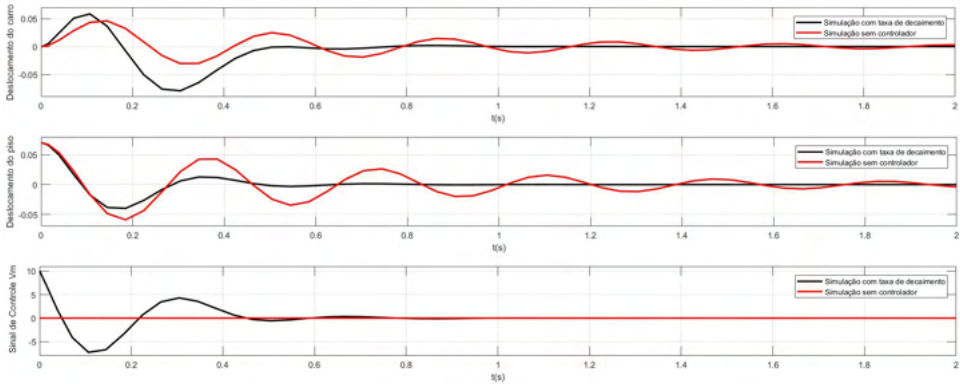


Figura 4 - Deslocamento do carro X_C , deslocamento do piso X_f e tensão do motor V_m do sistema controlado, com taxa de decaimento $\alpha = 3,3$ e sem controle, considerando a condição inicial $x(0) = [0 \ 0,07 \ 0 \ 0]^T$.

Fonte: Autor.

Como observado, a melhor resposta do sistema ocorre com taxa de decaimento, onde o deslocamento do carro atinge seu ponto de equilíbrio em menos de 1 segundo de simulação, e o deslocamento do piso superior atinge seu equilíbrio em um tempo inferior a 1 segundo de simulação também. Observa-se ainda que há um custo ao utilizar a taxa de decaimento, já o sinal de controle atinge seu valor máximo, 10V, mas segue respeitando as especificações do produto analisado.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho, que envolve duas grandes áreas da ciência como a Matemática e a Engenharia, apresentou a análise e o projeto de um sistema de controle, baseado em LMIs, para o sistema Shake Table II + Active Mass Damper 1 (QUANSER). A técnica que utiliza LMIs é moderna e é fundamentada na teoria de estabilidade de Lyapunov.

A atuação da melhor configuração para o sistema, respeitando suas especificações, pode ser visto na Figura (2). Nessas condições, observa-se que o tempo necessário para o sistema controlado, com taxa de decaimento $\alpha = 3,3$, entre em equilíbrio é cerca de sete vezes menor do que o tempo gasto sem o uso do controlador, confirmando, assim, a importância e/ou vantagem de se utilizar o controlador com esse ganho de desempenho.

Vale ressaltar que, por se tratar de uma pesquisa bibliográfica, esses resultados são introdutórios e já existem muitos outros índices de desempenhos estabelecidos como, por exemplo, H_2 e, H_∞ além da possibilidade de se impor restrições na entrada e na saída do sistema e projetar controle robusto, isto é, um controlador que tem um bom desempenho mesmo considerando incertezas no sistema de equações diferenciais (incertezas na planta). Mas, o objetivo do trabalho foi explicitar a importância da teoria de estabilidade de

Lyapunov na fundamentação de toda a técnica moderna de análise e síntese de controle, com aplicações em várias áreas do conhecimento.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. P. **Fundamentos Matemáticos da Teoria de Controle de Sistemas Lineares com Incertezas Politópicas Baseados em LMIs**. 2017. 58 p. Monografia (Matemática) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins, Palmas, 2017.

BOYD, S. et al. **Linear matrix inequalities in system and control theory**. 2. ed. Philadelphia: SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994. v. 15. (SIAM Studies in Applied Mathematics, v. 15).

BUZACHERO, L. F. S. **Controle Robusto Chaveado de Sistemas Lineares Variantes no Tempo Com Aplicação em Falhas Estruturais**. Orientador: Edvaldo Assunção, 2014. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

LOFBERG, J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER AIDED CONTROL SYSTEMS DESIGN, 2004, Taipei. **Proceedings...** Taipei: IEEE, 2004. p. 284-289.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. Rio de Janeiro: Pearson Prentice Hall do Brasil, 2010.

QUANSER. **Active Mass Damper – One Floor: Instructor Manual**. Ontário, Canadá, 2012. 22 p.

SOUZA, W. A. de. **Projeto de controladores robustos chaveados para sistemas não lineares descritos por modelos fuzzy Takagi-Sugeno**. Orientador: Marcelo C. Minhoto Teixeira, 2013. 92 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

STURM, J. F. Using sedumi 1.02, a matlab toolbox for optimization over symmetric cones. **Optimization methods and software**. Taylor & Francis, v. 11, n. 1-4, p. 625-653, 1999.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Análise de estruturas 20

Análise experimental 32

Análise teórica 32

Areias 58, 59, 64

Argamassa 1, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 17, 18, 19

Armadura transversal 32, 34, 40, 41, 42, 44

B

Barragem 60, 61, 65

C

CAD 45

CBMPA 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 86

CRF 45, 48, 54

D

Desigualdades matriciais lineares 68, 69, 70

Distribuição 20, 21, 31, 63

E

Estabilidade de Lyapunov 69

Estado endurecido 1, 4, 5, 8

Estado fresco 1, 2, 4, 5, 6, 7

F

Fachadas 13, 14, 16, 17, 18, 19

Força cortante 32, 33, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44

I

Incêndio 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 86, 87

Instruções técnicas 77, 78, 79, 81, 86

L

Laje treliçada 32, 42

Liquefação 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66

M

Massa 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 59, 60, 61, 63, 64, 72, 73, 74

Medidas de segurança 77, 78, 82, 84, 85, 86

Métodos 2, 3, 10, 19, 20, 21, 25, 26, 29, 31, 45, 47

Modo de falha 58, 65, 66

P

Patologia 13, 16, 17, 18

Pontes 20, 21, 57

PONTES 20, 21, 31, 48

Pós-tração aderente 45, 46, 55, 57

Protendido 31, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 56, 57

R

Revestimento cerâmico 13, 15, 19

S

Sinistro 77, 78, 79, 80


Sistemas lineares 68, 70, 76


T


Terremotos 65, 66, 68, 69, 71, 72


V

Viga 18, 29, 45, 47, 48, 49, 50, 52, 54, 55

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br


 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED CIVIL ENGINEERING 2

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED CIVIL ENGINEERING 2