

**Franciele Bonatto
Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta
(Organizadores)**

Impactos das Tecnologias nas Engenharias 4



**Franciele Bonatto
Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta**
(Organizadores)

Impactos das Tecnologias nas Engenharias

4

**Atena Editora
2019**

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Lorena Prestes e Geraldo Alves

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

134 Impactos das tecnologias nas engenharias 4 [recurso eletrônico] / Organizadores Franciele Bonatto, Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Impactos das Tecnologias nas Engenharias; v. 4)

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-85-7247-194-7
DOI 10.22533/at.ed.947191503

1. Engenharia. 2. Inovações tecnológicas. 3. Tecnologia.
I. Bonatto, Franciele. II. Holzmann, Henrique Ajuz. III. Dallamuta, João.
CDD 658.5

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

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.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Caro leitor(a)

Nesta obra temos um compendio de pesquisas realizadas por alunos e professores atuantes em engenharia e tecnologia. São apresentados trabalhos teóricos e vários resultados práticos de diferentes formas de aplicação e abordagens de simulação, projetos e caracterização no âmbito da engenharia e aplicação de tecnologia.

Tecnologia é o pilar mais importante da engenharia. Os profissionais que se dedicam a pesquisa e desenvolvimento de novos produtos e processos não estão preocupados com todos os aspectos da tecnologia, mas com a tecnologia existente, bem como com a tecnologia futura considerada viável. Uma visão ampla de tecnologia é portanda fundamental para engenheiros. É esta amplitude de áreas e temas que procuramos reunir neste livro.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais

Aos autores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

Franciele Bonatto
Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta

Tecnologia e Engenharia em Foco

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DO SISTEMA DE UM FREIO	
<i>Franklin Lacerda de Araújo Fonseca Júnior</i> <i>David Domingos Soares da Silva</i>	
DOI 10.22533/at.ed.9471915031	
CAPÍTULO 2	9
DETERMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DA DUREZA E DA MICROESTRUTURA DO AÇO AISI 5160 NA CONDIÇÃO PADRÃO E ESFEROIDIZADO	
<i>Anelise Pereira da Silva</i> <i>Suelen de Fátima Felisberto</i> <i>Amir Rivaroli Junior</i> <i>Cristina de Carvalho Ares Elisei</i> <i>Jorge Luiz Rosa</i> <i>Sérgio Roberto Montoro</i>	
DOI 10.22533/at.ed.9471915032	
CAPÍTULO 3	17
INOVAÇÕES EM BROCA: UTILIZAÇÃO DE JATO DE ÁGUA COM ALTO CONTEÚDO ENERGÉTICO E ALARGADORES MECÂNICOS COMO PRINCÍPIO DE ESCAVAÇÃO	
<i>Rafael Pacheco dos Santos</i> <i>Lidiani Cristina Pierri</i> <i>Jair José dos Passos Junior</i> <i>Anderson Moacir Pains</i> <i>Marcos Aurélio Marques Noronha</i>	
DOI 10.22533/at.ed.9471915033	
CAPÍTULO 4	25
ESTUDO DE UM CONTROLADOR DE UM BRAÇO ROBÓTICO COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE COM BASE EM LMI	
<i>Márcio Roberto Covacic</i> <i>Ruberlei Gaino</i> <i>Cesar Capobianco</i>	
DOI 10.22533/at.ed.9471915034	
CAPÍTULO 5	33
INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DE SOLDAGEM NO PROCESSO DE SOLDAGEM A LASER NO AÇO BLAR	
<i>Ana Paula Alves de Oliveira</i> <i>Francisco Cardoso de Melo Junior</i> <i>Amir Rivaroli Junior</i> <i>Emerson Augusto Raymundo</i> <i>João Maurício Godoy</i> <i>Marcelo Bergamini de Carvalho</i> <i>Sérgio Roberto Montoro</i>	
DOI 10.22533/at.ed.9471915035	

CAPÍTULO 6	42
IMPLEMENTAÇÃO DE UMA TÉCNICA DE CONTROLE PREDITIVO NÃO LINEAR PRÁTICA NO ACIONAMENTO DE UM MOTOR CC	
<i>Cleber Asmar Ganzaroli</i>	
<i>Douglas Freire de Carvalho</i>	
<i>Luiz Alberto do Couto</i>	
<i>Rafael Nunes Hidalgo Monteiro Dias</i>	
<i>Wesley Pacheco Calixto</i>	
DOI 10.22533/at.ed.9471915036	
CAPÍTULO 7	55
IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE PRESENÇA USANDO LEITOR CCD E CRIPTOGRAFIA NO MODELO DE CIFRA DE VIGÊNERE	
<i>Éric Dias Souza</i>	
<i>Victor Francisco Rigolo Fernandes de Almeida</i>	
<i>Wagner dos Santos Clementino de Jesus</i>	
DOI 10.22533/at.ed.9471915037	
CAPÍTULO 8	61
MODELAGEM DINÂMICA E CONTROLE PID DE MANIPULADORES ROBÓTICOS COM APLICAÇÃO NO ROBÔ DENSO VP6242G	
<i>Leonardo Augusto Arruda</i>	
<i>Márcio Roberto Covacic</i>	
<i>Ruberlei Gaino</i>	
DOI 10.22533/at.ed.9471915038	
CAPÍTULO 9	81
MODELAGEM CINEMÁTICA E SIMULAÇÃO 3D DO MANIPULADOR INDUSTRIAL DENSO VP6242G	
<i>Giovani Augusto de Lima Freitas</i>	
<i>Márcio Roberto Covacic</i>	
<i>Ruberlei Gaino</i>	
DOI 10.22533/at.ed.9471915039	
CAPÍTULO 10	103
PROGRAMAÇÃO LÓGICA INDUTIVA APLICADA À COMPUTAÇÃO MUSICAL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA	
<i>Clenio Batista Gonçalves Junior</i>	
<i>Murillo Rodrigo Petrucelli Homem</i>	
DOI 10.22533/at.ed.94719150310	
CAPÍTULO 11	119
ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO FC 250 SOB EFEITO DA CORROSÃO EM SOLUÇÃO ÁCIDA	
<i>Lariane Ferreira Sena</i>	
<i>Rafaela Cunha dos Reis</i>	
<i>Aline Alcamin Monteiro</i>	
<i>Paula Luisa Silva</i>	
DOI 10.22533/at.ed.94719150311	

CAPÍTULO 12 130

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE CÉRIA DOPADA COM GADOLÍNIA E CO-DOPADA COM ÓXIDO DE COBRE

*Raquel Rodrigues do Nascimento Menezes
Thamyscira Herminio Santos da Silva
Allan Jedson Menezes de Araújo
Erik Benigno Grisi de Araújo Fulgêncio
Lizandra Fernanda Araújo Campos
Ricardo Peixoto Suassuna Dutra
Daniel Araújo de Macedo*

DOI 10.22533/at.ed.94719150312

CAPÍTULO 13 146

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE LIGAS CU-AL-MN PASSÍVEIS DO EFEITO MEMÓRIA DE FORMA ENVELHECIDAS

*Marcos Barbosa Dos Anjos Filho
Carlos Cássio de Alcântara
José Joelson de Melo Santiago*

DOI 10.22533/at.ed.94719150313

CAPÍTULO 14 153

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DO ADITIVO DE CARBONO MICROGRAF® 9930MA NA CAPACIDADE C-20 DA PLACA NEGATIVA DE BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO

*Lucas Carvalho Santana
André Castilho dos Santos
Cynthia Mayara de Carvalho
Gilberto Augusto de Oliveira Brito
Christiano Jorge Gomes Pinheiro*

DOI 10.22533/at.ed.94719150314

CAPÍTULO 15 162

DETERMINAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS EM SUSPENSÃO NA ÁGUA PRODUZIDA: UMA ANÁLISE A PARTIR DE UMA PRÁTICA LABORATORIAL

*Raul José Alves Felisardo
Gabriela Menezes Silva
César de Almeida Rodrigues*

DOI 10.22533/at.ed.94719150315

CAPÍTULO 16 168

ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO PELO BAGAÇO DE BUTIÁ PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES

*Luciana Machado Rodrigues
Vanessa Rosseto
Clarissa Ferreira Pin
Ethielle Bordignon de Carvalho Prestes*

DOI 10.22533/at.ed.94719150316

CAPÍTULO 17 176

DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE UM NOVO ADSORVENTE DE BAIXO CUSTO NA ADSORÇÃO E DESSORÇÃO MONO E MULTICOMPONENTE DE METAIS PESADOS EM COLUNA DE LEITO FIXO

*Gabriel André Tochetto
Danieli Brandler
Deisy Maria Memlak
Francine Caldart
Gean Delise L. P. Vargas
Cleuzir da Luz
Joceane Pigatto
Adriana Dervanoski*

DOI 10.22533/at.ed.94719150317

CAPÍTULO 18 187

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO COMPLEXO OXALATO DE NIÓBIO NA OBTENÇÃO DE BIODIESEL SOB VIA METÁLICA

*Rayane Ricardo da Silva
Carlson Pereira de Souza
Tiago Fernandes Oliveira
Maria Veronilda Macedo Souto
Angelinne Costa Alexandrino*

DOI 10.22533/at.ed.94719150318

CAPÍTULO 19 195

ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE ENTRE RESÍDUO OLEOSO DA INDÚSTRIA DE E & P DE PETRÓLEO E CIMENTO PORTLAND PARA UTILIZAÇÃO EM CONCRETO

*Yane Coutinho Lira
Fernanda Cavalcanti Ferreira
Romildo Alves Berenguer
Rodrigo Mendes Patrício Chagas
Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Milton Bezerra das Chagas Filho*

DOI 10.22533/at.ed.94719150319

CAPÍTULO 20 205

RETENÇÃO DE ÍONS METÁLICOS DE COBRE E ZINCO EM CASCA DE MARACUJÁ AMARELO

*Bianca de Paula Ramos
Rosane Freire Boina*

DOI 10.22533/at.ed.94719150320

SOBRE OS ORGANIZADORES..... 217

ESTUDO DE UM CONTROLADOR DE UM BRAÇO ROBÓTICO COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE COM BASE EM LMI

Márcio Roberto Covacic

Universidade Estadual de Londrina, Departamento
de Engenharia Elétrica
Londrina – PR

Ruberlei Gaino

Universidade Estadual de Londrina, Departamento
de Engenharia Elétrica
Londrina – PR

Cesar Capobianco

Universidade Estadual de Londrina, Departamento
de Engenharia Elétrica
Londrina – PR

RESUMO: Neste trabalho, foi proposta uma metodologia de projeto e simulação de um controlador para o modelo de um braço robótico com dois graus de liberdade. O projeto consiste em obter uma lei de controle por realimentação de estados, pela resolução de Desigualdades Matriciais Lineares (em inglês, *Linear Matrix Inequalities*, LMIs), utilizando o Matlab. A estabilidade do sistema realimentado mostra a eficiência do método.

PALAVRAS-CHAVE: Realimentação de estados, Controle por LMIs, Braço robótico.

ABSTRACT: In this work, a methodology for the design and implementation of a robust controller for a robotic arm with two degrees of freedom

was proposed. The design method consists to obtain a state feedback control law, by solving Linear Matrix Inequalities (LMIs), using Matlab. The stability of the feedback system shows the efficiency of the method.

KEYWORDS: State feedback, LMI-based control, Robotic arm.

1 | INTRODUÇÃO

A automação robótica tornou-se uma realidade e milhões de braços robóticos foram construídos, realizando diferentes tipos de atividades, como: soldagem, pintura, carregamento e descarregamento de máquinas, montagem eletrônica. O uso de robôs proporcionou um aumento de produtividade e qualidade dos produtos. Hoje, muitos dos produtos que compramos foram manipulados ou feitos por um robô (CORKE, 2011).

Neste trabalho, foi utilizado o modelo de um braço robótico com dois graus de liberdade, representado pelo diagrama esquemático da Figura 1.

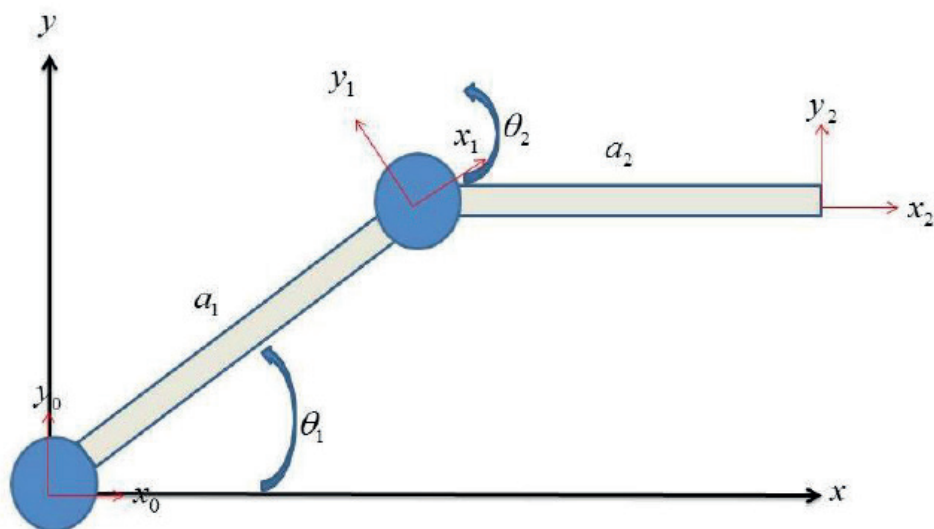


Figura 1 – Diagrama esquemático do braço robótico com dois graus de liberdade. (Fonte: (MARQUES, 2018))

As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores das grandezas que foram utilizados na modelagem do braço robótico.

Junta	Ângulo da junta	Offset do Elo	Comprimento do Elo	Ângulo de Torção
1	θ_1	0	$a_1 = 0.3m$	0
2	θ_2	0	$a_2 = 0.21m$	0

Tabela 1: Parâmetros de Denavit Heartenberg do braço robótico. (Fonte: (MARQUES, 2018))

Parâmetro	Junta 1	Junta 2
Massa (kg)	1	1
Centro de Gravidade	[0.150 0]	[0.1050 0]
Tensor Inercial (kg.m ²)	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0075 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0075 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.003675 & 0 \\ 0 & 0 & 0.003675 \end{bmatrix}$
Relação de Transmissão	1:1	1:1

Tabela 2: Parâmetros dinâmicos do braço robótico. (Fonte: (MARQUES, 2018))

2 | CONTROLE COM DESIGUALDADES MATRICIAIS LINEARES

As variáveis de estados de um sistema dinâmico são aquelas que formam o menor número de variáveis que são capazes de descrever todo o comportamento de um sistema dinâmico (OGATA, 2011). Assim, um sistema linear invariante no tempo pode ser descrito por:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (2)$$

onde $x(t)$ representa o vetor com as variáveis de estado do sistema, $\dot{x}(t)$ a derivada de $x(t)$ no tempo, $y(t)$ a saída do sistema e $u(t)$ a entrada do sistema.

De acordo com a teoria de Lyapunov, um sistema é assintoticamente estável se existir uma função $V(x)$ tal que $V(x) > 0$ e $\dot{V}(x) < 0$ para todo x diferente de zero (SLOTINE; LI, 1991).

Para um sistema $\dot{x}(t) = Ax(t)$, dada uma candidata a função de Lyapunov quadrática $V(x) = x'Px$, sendo P uma matriz simétrica, os estados do sistema convergem para a origem $x=0$ se existir uma matriz simétrica definida positiva P tal que $A'P + PA < 0$, isto é, se P for positiva definida $Q = A'P + PA$ for negativa definida. Neste caso, o sistema é assintoticamente estável.

Com a base do teorema de Lyapunov e das equações de estados (1) e (2), pode-se estabilizar o sistema com a lei de controle:

$$u(t) = -Kx(t). \quad (3)$$

Substituindo (3) em (1), o sistema realimentado é descrito por:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BKx(t) = (A - BK)x(t). \quad (4)$$

As LMIs que garantem a estabilidade assintótica do sistema (4) são:

$$P(A - BK) + (A - BK)'P < 0, \quad (5)$$

$$P > 0. \quad (6)$$

A expressão (5) equivale a:

$$PA - PBK + A'P - K'B'P < 0. \quad (7)$$

Multiplicando (7) e (6), à esquerda e à direita, por P^{-1} e definindo $X = P^{-1}$ e $G = KP^{-1} = KX$, o problema é descrito pelas LMIs:

$$AX - BG + XA' - G'B' < 0, \quad (8)$$

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

A partir da solução das LMIs (8) e (9), a lei de controle que estabiliza o sistema descrito por (1) e (2) é descrita por (3), com K dada por:

$$K = GX^{-1}. \quad (10)$$

3 | ESTUDO DA MODELAGEM DO SISTEMA

O manipulador de corpo rígido com n juntas pode ser descrito a partir de suas equações de dinâmica no formato clássico de Lagrange. A equação (11) descreve

o funcionamento de um manipulador de corpo rígido (BERGEMAN, SIQUEIRA E TERRA, 1999).

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}). \quad (11)$$

onde τ representa o vetor de torque, q representa o vetor das juntas, $M(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ é uma matriz que apresenta os valores positivos de inércia, $C(q, \dot{q}) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ é uma matriz que apresenta os termos de Coriolis e de força centrífuga, $G(q) \in \mathcal{R}^n$ é um vetor que contém os torques gravitacionais e $F(q, \dot{q}) \in \mathcal{R}^n$ é um vetor que contém os torques de fricção. Por conveniência, pode-se agrupar a matriz de Coriolis com a matriz dos torques gravitacionais e junto com a matriz de torques de fricção, como mostra a equação (12):

$$\tau = M(q)\ddot{q} + b(q, \dot{q}), \quad (12)$$

que é reescrita na forma:

$$\ddot{q} + M(q)^{-1}\tau + M(q)^{-1}b(q, \dot{q}) = 0. \quad (13)$$

Linearizando a equação (13) em torno do ponto de equilíbrio, o sistema, cuja entrada é o torque τ e cujas saídas são os estados x_1 e x_2 , é representado por (1) e (2), sendo:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M(q)^{-1}b(q, \dot{q}) & -M^{-1}b(q, \dot{q}) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M(q)^{-1} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Como visto em (MARQUES, 2018), as matrizes $M(q)$ e $b(q, \dot{q})$ são dadas por:

$$M(q) = \begin{bmatrix} \frac{26939}{200000} + \frac{63}{1000} \cos \theta_2 & \frac{2939}{200000} + \frac{63}{2000} \cos \theta_2 \\ \frac{2939}{200000} + \frac{63}{2000} \cos \theta_2 & \frac{2939}{200000} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$b(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} \frac{63}{1000} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 & -\frac{63}{2000} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ \frac{63}{1000} \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 & 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

sendo θ_1 e θ_2 os ângulos das juntas no ponto de operação.

4 | MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho foi:

- Software MATLAB/Simulink, versão 2012a;
- Robotics Toolbox para MATLAB.

Inicialmente, com o auxílio do Robotics Toolbox do Peter Corke (CORKE, 2011), foi criado um modelo matemático do braço robótico, a partir das funções apresentadas no Robotics Toolbox, e assim foi possível realizar simulações que comprovam o funcionamento do modelo do robô (MARQUES, 2018). O Apêndice A apresenta o programa em MATLAB utilizado para obter o modelo dinâmico inverso simbólico.

Em seguida, foi utilizado o modelo dinâmico inverso, para obter as equações de estado em um ponto de equilíbrio. Finalmente, com as equações de estados, a matriz K do controlador foi obtida de acordo com as LMIs (8) e (9) e a equação (10). O programa utilizado para obter o controlador é apresentado no Apêndice B.

5 | RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Com os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2, de acordo com as equações (14) a (19), o modelo do braço robótico é descrito por (1) e (2), sendo:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2.2356 & 0.7375 & 2.2356 & 0.7375 \\ -12.0444 & -2.9731 & -12.0444 & -2.9731 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 33.1091 & -83.2941 \\ -133.4790 & 403.8494 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Dadas as matrizes (20) a (23), a matriz K da lei de controle (3) foi obtida pela resolução das LMIs (8) e (9) e pela equação (10). A matriz encontrada é:

$$K = \begin{bmatrix} 891 & -4320 & 2673 & -12959 \\ 354 & -1428 & 1062 & -4283 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Com a lei de controle projetada, foi simulada a resposta do sistema a uma entrada degrau unitário. A Figura 2 mostra as tensões nas duas juntas do modelo do braço robótico.

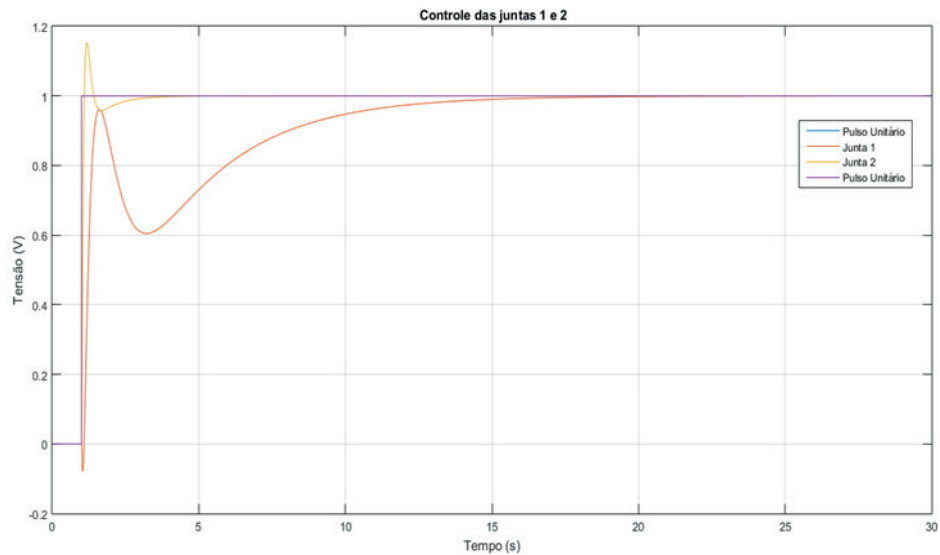


Figura 2 – Resposta das duas juntas à entrada degrau unitário. (Fonte: próprio autor)

Ao analisar a Figura 2, percebe-se que o sistema apresenta um comportamento estável, porém para que isso ocorresse, os controladores precisam de um tempo consideravelmente longo para alcançar o valor de regime. Isto se deve ao fato de que as LMIs foram utilizadas com o único objetivo de garantir a estabilidade. Em trabalhos futuros, pode ser proposta a determinação de uma taxa de decaimento, com o intuito de obter uma resposta transitória mais rápida, e também ser desenvolvidas estratégias de controle robusto, considerando a presença de incertezas nos parâmetros do modelo que descreve o braço robótico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Márcio Roberto Covacic e ao Prof. Dr. Ruberlei Gaino, pela oportunidade e orientação. Agradeço ao CNPq, por fomentar a pesquisa acadêmica em todo o país e à Universidade Estadual de Londrina pela infraestrutura.

REFERÊNCIAS

BERGEMAN, M; SIQUEIRA, A. A. G; TERRA, M. H. Underactuated Manipulator Robot Control via Linear Matrix Inequalities. Departamento de Engenharia Elétrica. Campinas, 1999.

CORKE, P. Robotic, Vision and Control. , São Paulo: Springer, 2011.

MARQUES, M. F. Controle por estrutura variável aplicado em juntas de dispositivo robótico com modelo dinâmico incerto: Implementação no robô industrial denso VP6242. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina, 2018.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 5ª. ed., São Paulo: Pearson Brasil, 2011.

APÊNDICE A: CÓDIGO DO MATLAB PARA CÁLCULO DAS MATRIZES A E B DO MODELO QUE DESCREVE O ROBÔ:

```
q1=-pi/4;
```

```
q2=-pi/4;
```

```
qd1=1;
```

```
qd2=1;
```

```
qdd1=1;
```

```
qdd2=1;
```

```
M=[26939/200000 + 63/1000*cos(q2) 2939/200000 + 63/2000*cos(q2); 2939/200000  
+ 63/1000*cos(q2) 2939/200000 ];
```

```
b=[63/1000*(qd2*sin(q2)) -63/2000*qd2*sin(q2);63/1000*(qd1*sin(q2)) 0];
```

```
m1=inv(M);
```

```
m2=m1*b;
```

```
A=[zeros(2) eye(2);-m2 -m2];
```

```
B=[zeros(2); m1];
```

APÊNDICE B: CÓDIGO DO MATLAB DESENVOLVIDO PARA CALCULAR A LEI DE CONTROLE:

```
setlmis([]);
```

```
X=lmivar(1,[4 1]);
```

```
G=lmivar(2,[2 4]);
```

```
lmiterm([1 1 1 X],A,1,'s');
```

```
lmiterm([1 1 1 G], B,-1,'s');
```

```
lmiterm([-2 1 1 X],1,1);
```

```
lmicontrolador=getlmis;
```

```
[tmin,xfeasp] = feasp(lmicontrolador);  
if tmin < 0  
    Xf = dec2mat(lmicontrolador, xfeasp, X);  
    Gf = dec2mat(lmicontrolador, xfeasp, G);  
    k = Gf * inv(Xf);  
    disp('Controlador'), disp(k)  
else  
    disp('Sistema nao contolavel')  
end
```

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-194-7

