

COLEÇÃO  
**DESAFIOS**  
DAS  
**ENGENHARIAS:**

**ENGENHARIA MECÂNICA**



**HENRIQUE AJUZ HOLZMANN**  
**JOÃO DALLAMUTA**  
(ORGANIZADORES)

**Atena**  
Editora  
Ano 2021

COLEÇÃO  
**DESAFIOS**  
DAS  
**ENGENHARIAS:**

**ENGENHARIA MECÂNICA**



**HENRIQUE AJUZ HOLZMANN**  
**JOÃO DALLAMUTA**  
(ORGANIZADORES)

**Atena**  
Editora  
Ano 2021

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes editoriais**

Natalia Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

**Revisão**

Os autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 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-NãoDerivativos 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 Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

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. Arnaldo Oliveira Souza Júnior – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Daniel Richard Sant'Ana – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo  
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá  
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros  
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador  
Prof. Dr. José Luis Montesillo-Cedillo – Universidad Autónoma del Estado de México  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas  
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso  
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador  
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. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
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. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
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  
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí  
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina  
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília  
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra  
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia  
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco  
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará  
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  
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados  
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino  
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Profª Drª Vanessa da Fontoura Custódio Monteiro – Universidade do Vale do Sapucaí  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
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 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  
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

#### **Linguística, Letras e Artes**

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro  
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará  
Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo  
Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,  
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 Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná  
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

**Diagramação:** Maria Alice Pinheiro  
**Correção:** Mariane Aparecida Freitas  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia mecânica /  
Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João  
Dallamuta. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-259-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.590212107>

1. Engenharia mecânica. I. Holzmann, Henrique Ajuz  
(Organizador). II. Dallamuta, João (Organizador). III. Título.  
CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

[contato@atenaeditora.com.br](mailto: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 Engenharia Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos. O aumento no interesse por essa área se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral. Além disso a busca pela otimização no desenvolvimento de projetos, leva cada vez mais a simulação de processos, buscando uma redução de custos e de tempo.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de mecânica, materiais e automação, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas técnicas e econômicas. Pode-se ainda estabelecer que estas características levam a alterações quase que imediatas no projeto, sendo uma modificação constante na busca por melhores respostas e resultados.

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. Sendo hoje que utilizar dos conhecimentos científicos de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **MODELAGEM DE UM MANIPULADOR PARALELO 3RRR PARA INCLUSÃO DE ELOS FLEXÍVEIS**

André Vecchione Segura

Fernanda Thaís Colombo

Maíra Martins da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121071>

### **CAPÍTULO 2..... 9**

#### **MODELAGEM NUMÉRICA DE SUSPENSÃO DE ¼ DE VEÍCULO**

Lucas Alves Torres

Lucas Messias Cunha de Araújo

João Gabriel Paulino de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121072>

### **CAPÍTULO 3..... 20**

#### **OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DA SUSPENSÃO DE UM CAMINHÃO COM RESTRIÇÃO DE CONFIABILIDADE**

José Gilberto Picoral Filho

Ewerton Grotti

Herbert Martins Gomes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121073>

### **CAPÍTULO 4..... 38**

#### **ANÁLISE DE FADIGA PARA OS AÇOS ABNT 1045 E ABNT 4140 PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Brenda Martins Fernandes

Reny Angela Renzetti

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121074>

### **CAPÍTULO 5..... 48**

#### **ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS FREQUÊNCIAS DOMINANTES DE UM VIOLÃO ACÚSTICO**

Marco Túlio Santana Alves

Felipe Iglesias

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121075>

### **CAPÍTULO 6..... 56**

#### **VORTEX-INDUCED VIBRATIONS MODEL WITH 2 DEGREES OF FREEDOM OF RIGID CYLINDERS NEAR A FIXED WALL BASED ON WAKE OSCILLATOR**

Rafael Fehér

Juan Pablo Julca Avila

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121076>

<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>67</b>
AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE UM COLETOR SOLAR DE TUBO EVACUADO ECCÊNTRICO	
Mavd de Paula Ribeiro Teles Kamal Abdel Radi Ismail	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121077">https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121077</a>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>79</b>
RADIÔMETRO SOLAR DE BAIXO CUSTO USANDO A PLATAFORMA ABERTA ARDUINO	
Elson Avallone Cristiano Pansanato Átila Negretti Faro Dionísio Igor Alves da Silva Jhonatas Wendel da Silva Guilherme Biazzi Gonçalves Mário César Ito Rafael Paiva Garcia Paulo César Mioralli	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121078">https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121078</a>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>92</b>
TURBULENT FORCED CONVECTION IN THE THERMAL ENTRANCE OF RECTANGULAR DUCTS: ANALYSIS FOR DIFFERENT MODELS OF VELOCITY DISTRIBUTION AND MOMENTUM EDDY DIFFUSIVITY	
Dhiego Luiz de Andrade Veloso Carlos Antônio Cabral dos Santos Fábio Araújo de Lima	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121079">https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121079</a>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>109</b>
SELEÇÕES DE SUBSTITUIÇÃO EM UM ALGORITMO GENÉTICO DE CODIFICAÇÃO REAL APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO DE DUPLO ESTÁGIO	
Guilherme de Paula Prado Renan Manozzo Galante	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210710">https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210710</a>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>124</b>
DINÂMICA LINEAR PLANA DE UM TUBO ENGASTADO TRANSPORTANDO FLUIDO COM UMA MASSA ANEXADA NA EXTREMIDADE LIVRE	
Milton Aparicio de Oliveira	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210711">https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210711</a>	

**CAPÍTULO 12..... 138**

**SENSOR CAPACITIVO PARA DETECÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO EM ESCOAMENTO BIFÁSICO ÁGUA-AR**

Anderson Giacomeli Fortes

Jeferson Diehl de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210712>

**CAPÍTULO 13..... 150**

**STUDY OF STATIC AND DYNAMIC LEVELS OF UNDERGROUND AQUIFER WELLS TO MAINTAIN THEIR BALANCE LEVEL IN THE PROVINCE OF ICA - 2014**

Primitivo Bacilio Hernández Hernández

Omar Michael Hernández García

Aníbal Bacilio Hernández García

Jessenia Leonor Loayza Gutiérrez

Walter Merma Cruz

Marcos Luis Quispe Pérez

Edward Paul Sueros Ticona

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210713>

**CAPÍTULO 14..... 164**

**SISTEMAS COMPUTACIONAIS INTELIGENTES E CONTROLE AVANÇADO COM ÊNFASE EM MAPAS COGNITIVOS FUZZY EM SISTEMAS DINÂMICOS APLICADOS EM DIFERENTES ÁREAS, COM ÊNFASE EM ROBÓTICA**

Márcio Mendonça

Marina Souza Gazotto

Marina Sandrini

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Rodrigo Henrique Cunha Palácios

Fábio Rodrigo Milanez

Lillyane Rodrigues Cintra

Francisco de Assis Scannavino Junior

Wagner Fontes Godoy

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210714>

**CAPÍTULO 15..... 181**

**ROBÔ AUTÔNOMO PARA ESTACIONAMENTO**

Lucas Netto Luzente de Almeida

Graziele Barreto da Costa Almeida

Heitor Gomes de Souza Batista

Armando Carlos de Pina Filho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210715>

**CAPÍTULO 16..... 193**

**PROTOTIPAGEM RÁPIDA 3D APLICADA AO ÂMBITO UNIVERSITÁRIO**

Vitória de Oliveira Mattos

Lucas Ruzzon de Jesus Ortega

Rafael Issao Fukai

Milena de Sousa Ferreira  
João Pedro Monterani Laguna  
Marcelo Sampaio Martins

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210716>

**CAPÍTULO 17..... 199**

**UMA SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA EFEITOS MECÂNICOS EM TUMORES SÓLIDOS  
AVASCULARIZADOS**

Francisco Jose Vargas da Silva

Fernando Pereira Duda

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210717>

**SOBRE OS ORGANIZADORES ..... 206**

**ÍNDICE REMISSIVO..... 207**

## MODELAGEM DE UM MANIPULADOR PARALELO 3RRR PARA INCLUSÃO DE ELOS FLEXÍVEIS

Data de aceite: 01/07/2021

**André Vecchione Segura**

Dinâmica e Mecatrônica

**Fernanda Thaís Colombo**

Dinâmica e Mecatrônica

**Maíra Martins da Silva**

Dinâmica e Mecatrônica

**RESUMO:** Em busca do aumento do desempenho dinâmico de manipuladores robóticos, modelos multicorpos do sistema podem ser uma importante ferramenta durante o projeto de um protótipo por permitir a análise teórica da influência de alguns parâmetros na dinâmica do sistema. Neste trabalho, é apresentado um modelo em elementos finitos de um manipulador paralelo 3RRR, no qual a espessura dos elos é variada em uma tentativa de reduzir a massa do sistema. Foi feita uma comparação entre a posição do end-effector durante uma trajetória e a energia cinética do sistema ao longo do tempo para quatro diferentes espessuras dos braços do manipulador. O modelo com braços mais finos teve um posicionamento e gasto energético ao longo do tempo diferentes do que o modelo com braços mais espessos, confirmando a importância do estudo da flexibilidade para manipuladores robóticos com alto desempenho dinâmico.

**PALAVRAS - CHAVE:** Manipulador flexível, manipulador paralelo, modelo multicorpos.

**ABSTRACT:** In search of increasing the dynamic performance of robotic manipulators, multibody models of the system can be an important tool during the design of a prototype, allowing the theoretical analysis of the influence of some parameters in the dynamics of the system. In this work, a finite element model of a 3RRR parallel manipulator, in which the thickness of the links is varied in an attempt to reduce the mass of the system. A comparison was made between the position of the end-effector during a trajectory and the kinetic energy of the system over time for four different thicknesses of the manipulator's arms. The model with thinner arms had a different positioning and energy expenditure over time than the model with thicker arms, confirming the importance of studying flexibility for robotic manipulators with high dynamic performance.

**KEYWORDS:** Flexible manipulator, parallel manipulator, multibody model.

### 1 | INTRODUÇÃO

A melhoria do desempenho dinâmico de manipuladores robóticos vêm sendo muito estudada nos últimos anos, como exemplificado em "Fontes e Silva (2016)" e "Colombo et al. (2019)". Cada vez mais deseja-se o aumento da sua velocidade de operação enquanto mantém-se uma boa precisão do posicionamento de seu *end-effector* durante a realização de tarefas, como *pick-and-place*. Porém, para tais tarefas de alta velocidade, é possível que a deformação elástica de alguns componentes do manipulador seja responsável por uma vibração indesejada e

afete seu desempenho, como discutido por "Kermanian et al. (2019)" e "Zheng et al. (2019)". Além disso, durante o projeto de um manipulador, a diminuição da inércia do sistema permite que velocidades maiores sejam alcançadas, mas ao mesmo tempo, aumenta-se a influência da flexibilidade dos braços e juntas na execução das tarefas.

Para o manipulador paralelo de alta velocidade Delta, que possui braços bem leves em comparação com a sua carga, o autor "Kuo (2016)" avalia a diferença entre a pose da sua plataforma móvel para modelos nos quais os braços são considerados rígidos ou flexíveis. Em "Zarafshan e Moosavian (2011)", um manipulador espacial formado por painéis solares conectados a um braço robótico utilizou um controle de impedância para melhorar o seu desempenho e atenuar a vibração, considerando que os seus painéis e juntas são flexíveis. Os autores "Lismode et al. (2016)" mostram em uma simulação que um sinal de *feedforward* baseado no modelo dinâmico inverso de um manipulador flexível pode ser uma boa estratégia para controlar a vibração de um robô serial. Já os estudos feitos por "Zhang (2018)" e "Garcia- Perez et al. (2019)" foram capazes de reduzir a vibração de um braço robótico flexível com um único elo. A partir do controle Proporcional-Derivativo em "Zhang (2018)", relacionado aos sinais de deformação e velocidade desse elo, foi obtido um sistema livre de vibração e robusto a distúrbios. Em "Garcia-Perez et al. (2019)", houve um aumento ativo do amortecimento do modo de vibrar de interesse através do controle "*positive position feedback*".

Um modelo multicorpos de um manipulador permite não só a análise teórica da dinâmica do sistema mas também a avaliação do desempenho de alguns parâmetros de projeto. Em "Sun et al. (2016)", a massa de um manipulador flexível é reduzida até um valor ótimo enquanto a tensão máxima sobre os braços é mantida constante. Dessa forma, nesse trabalho é proposto um modelo multicorpos em elementos finitos do manipulador paralelo e planar 3R<sub>RR</sub>. Foi feita uma análise do efeito da redução da espessura dos braços desse manipulador, permitindo que esse sistema apresente uma menor massa e seja mais flexível. A posição do *end-effector* e a energia cinética do sistema foram obtidas para uma trajetória ao longo de 1s, comparando-se as respostas dos modelos com braços de espessura igual a 30, 15, 3 e 1mm.

## 2 | MÉTODOS

Como pode ser visto na Fig. (1), o manipulador estudado neste projeto apresenta 3 cadeias cinemáticas com 3 juntas de rotação cada, nas quais apenas a primeira junta é atuada por um motor. A geometria do manipulador 3R<sub>RR</sub> foi construída no software *SolidWorks* e então importada para o ambiente do *COMSOL* através da ferramenta *LiveLink*, que permite sincronizar modificações na geometria entre as duas plataformas.

No ambiente do *COMSOL*, a ferramenta *Remove Details* foi usada para eliminar detalhes da montagem, como faces, arestas e vértices, permitindo a construção de uma

malha mais eficiente e um tempo de simulação menor. Para a elaboração

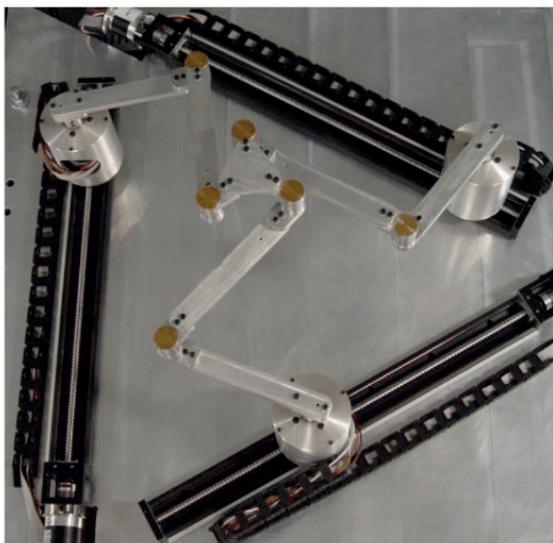


Figura1. Manipulador paralelo 3RRR.

de juntas, utilizou-se o *Multibody Dynamics Module* para definir os *Attachments* necessários, que, quando conectados a domínios flexíveis, podem ser rígidos ou flexíveis. A formulação rígida define os elementos selecionados como conectados por um corpo rígido em comum, o que causa a concentração local de tensão e rigidez adicional, nem sempre desejada, enquanto a formulação flexível permite deformação e aplica as restrições de corpo rígido como uma média. As juntas de revolução passiva são definidas como *Hinge joints*, que permitem rotação em um único eixo. As juntas ativas, conectadas aos motores, são definidas como *Rigid Connectors*, que permitem a prescrição de velocidades angulares para controle da rotação no eixo desejado e restrição da translação e rotação nos demais eixos. Já as *Fixed Joints* não permitem translação ou rotação em nenhum eixo e são utilizadas para a união dos elos e elementos das juntas. Não é necessário definir um material em específico, como este módulo utiliza apenas a densidade, o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, basta fornecer valores para estas variáveis.

A escolha do estudo e a configuração do *Solver* dependem dos resultados desejados, da definição da física do modelo e das propriedades do material, entre outros fatores. Neste trabalho adotou-se um estudo no tempo, com duração de 1 segundo, utilizando o *Multifrontal Massively Parallel Sparse direct Solver* (MUMPS) para resolver o sistema linearizado. A Fig. (2) abaixo ilustra o modelo do manipulador no ambiente do *COMSOL*.

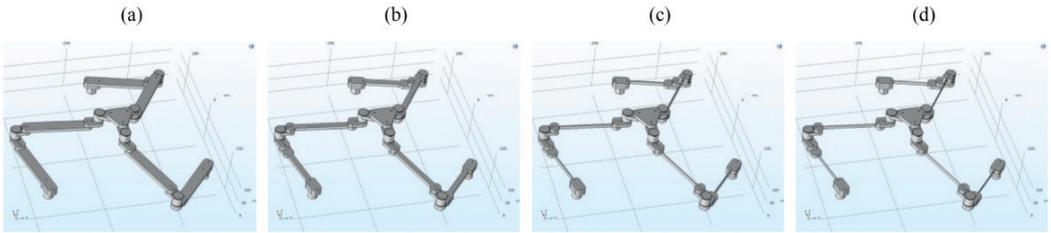


Figura 2. Modelo construído no *COMSOL* do manipulador 3RPR:(a) elos de 30mm; (b) elos de 15mm;(c) elos de 3mm; (d) elos de 1mm.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

As posições iniciais e finais dos modelos podem ser observadas na Fig. (3), na qual é perceptível uma diferença considerável na posição final do *end-effector* entre os modelos. A escala de cor se refere ao deslocamento do corpo em relação a sua posição inicial, representada pelo perfil em preto.

Para observar melhor a variação entre as posições final e inicial desse sistema, foi escolhido um ponto fixo na superfície do *end-effector*. A Fig. (4) apresenta a trajetória desse ponto nas coordenadas  $x$  e  $z$  ao longo do tempo, considerando que o percurso parte do canto inferior esquerdo do gráfico e se desloca até o superior direito. O modelo com elos de 15mm

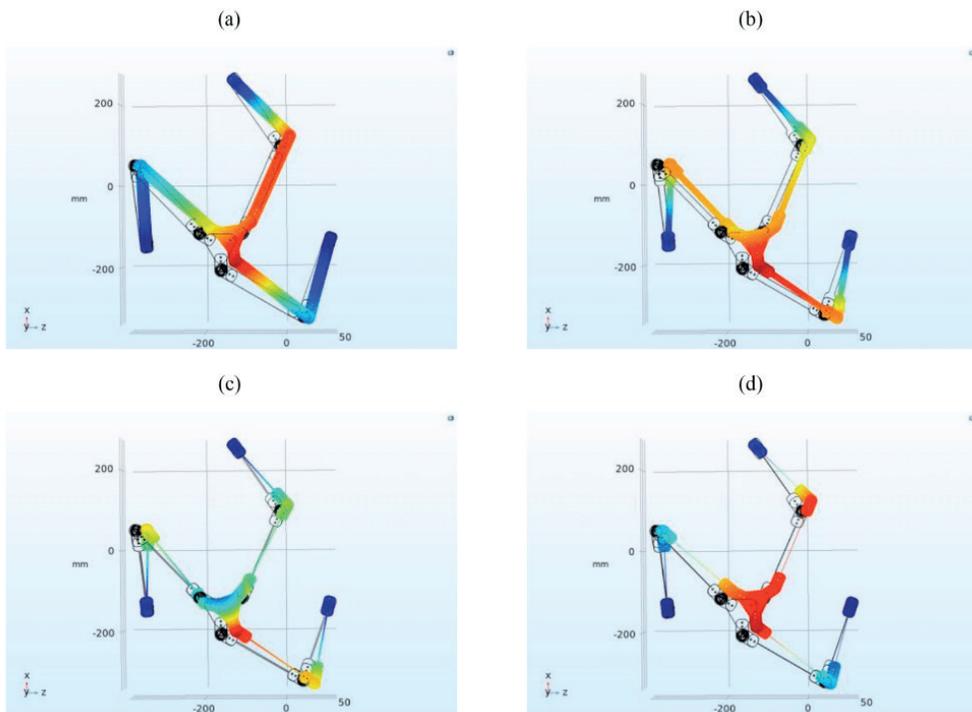


Figura 3. Posições dos modelos ao longo do tempo: (a) elos de  $30\text{mm}$ ; (b) elos de  $15\text{mm}$ ; (c) elos de  $3\text{mm}$ ; (d) elos de  $1\text{mm}$ .

percorre uma trajetória semelhante ao modelo mais espesso e apresenta uma redução de 17% da massa total do sistema. Existe um grande desvio e oscilação dos modelos com elos mais finos que também apresentam maior deformação, como visto na Fig (5), que mostra a deformação dos elos dos modelos em um mesmo instante de tempo. Os modelos com elos mais espessos não apresentam deformação em nenhum instante e os modelos com menor espessura possuem deformações semelhantes e em instantes diferentes. Nota-se que ao final do estudo o manipulador ainda se encontra em movimento com velocidade constante, não sendo possível observar a oscilação dos braços.

Outra métrica interessante para comparação do desempenho dinâmico é a energia do sistema, apresentada na Fig. (6), que exhibe a energia cinética total do sistema ao longo do tempo. A energia cinética total do sistema diminui junto com a espessura dos elos, com exceção do modelo com elo de  $1\text{mm}$ , que apresenta a maior energia cinética. Esse aumento pode ser proveniente da vibração elevada do manipulador e das velocidades atingidas, mas uma maior investigação deve ser realizada para determinar a razão exata. Esses resultados já eram esperados, considerando-se a redução da massa do sistema entre os diferentes modelos.

## 4 | CONCLUSÃO

Neste trabalho, um modelo multicorpos do manipulador paralelo 3RRR foi obtido a partir dos programas *SolidWorks* e *COMSOL*, permitindo a simulação da dinâmica através da análise de elementos finitos. Foi avaliada a influência da flexibilidade de um manipulador robótico na sua resposta dinâmica, em termos de posicionamento e energia cinética para realizar uma trajetória em seu espaço de trabalho. Para diferentes espessuras dos braços do manipulador, houve uma considerável variação na resposta do sistema.

O modelo multicorpos do manipulador em estudo ainda encontra-se em fase de validação experimental, logo, os resultados encontrados ainda não representam exatamente o comportamento real do sistema. Porém, esse modelo permite fazer comparações e investigar possíveis alterações na geometria, assim como de outros parâmetros do manipulador, de maneira rápida e automática. Com base nos resultados obtidos foi possível elaborar elos com espessuras menores, de 10 e 5 mm, que ainda satisfazem as exigências de projeto, como deflexão máxima na extremidade do *end effector* e faixa de valor da primeira frequência natural.

Diversas medidas podem ser tomadas no futuro para aumentar a exatidão do modelo, como a inclusão de atritos e

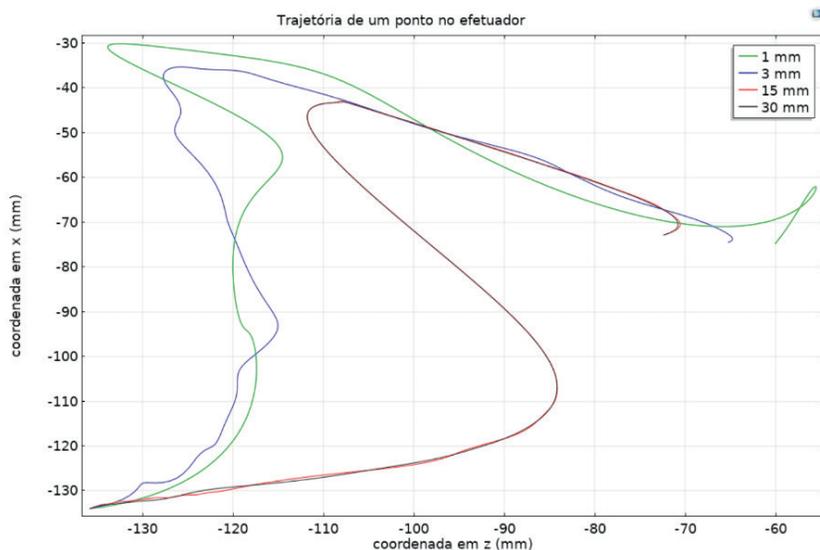


Figura 4. Trajetória de um ponto do *end effector* nos eixos x e z ao longo do tempo.

tolerâncias de deslocamento das juntas para replicar folgas da montagem, a configuração do *solver* e o refinamento da malha, a escolha de uma trajetória e estudos físicos que melhor exponham o impacto das alterações realizadas.

## AGRADECIMENTOS

Esse projeto de pesquisa é financiado por CNPq 405569/2016-5, FAPESP 2014/01809-0, 2018/21336-0 e 2019/02057-6

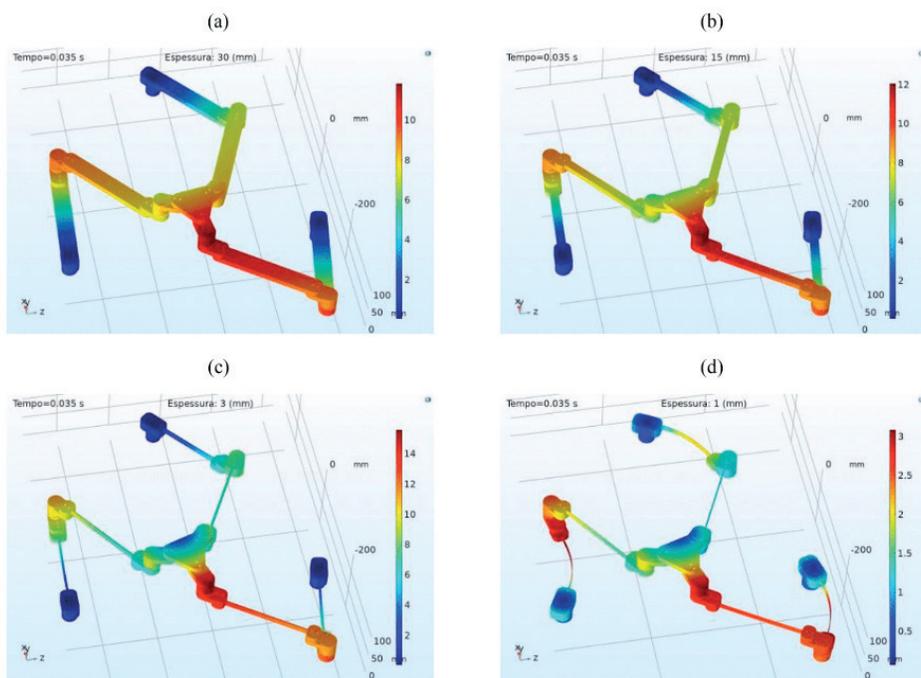


Figura 5. Posições dos modelos ao longo do tempo: (a) elos de 30mm; (b) elos de 15mm; (c) elos de 3mm; (d) elos de 1mm.

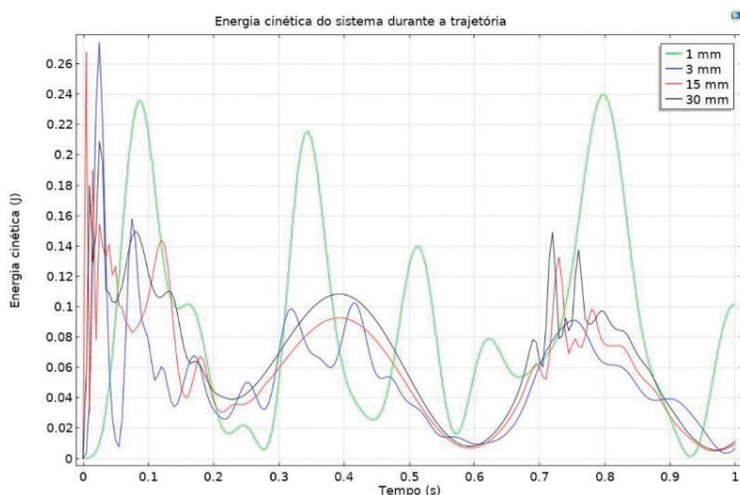


Figura 6. Energia cinética do sistema ao longo do tempo.

## RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

COLOMBO, F.T.; DE CARVALHO FONTES, J.V.; DA SILVA, M.M. A Visual Servoing Strategy Under Limited Frame Rates for Planar Parallel Kinematic Machines. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, pp.1-13, 2019.

FONTES, J.V.; DA SILVA, M.M. On the dynamic performance of parallel kinematic manipulators with actuation and kinematic redundancies. **Mechanism and Machine Theory**, 103, pp.148-166, 2016.

GARCIA-PEREZ, O.A.; SILVA-NAVARRO, G.; PEZA-SOLIS, J.F. Flexible-link robots with combined trajectory tracking and vibration control. **Applied Mathematical Modelling**, 70, pp.285-298, 2019.

KERMANIAN, A.; KAMALI, A.; TAGHVAEIPOUR, A. Dynamic analysis of flexible parallel robots via enhanced co-rotational and rigid finite element formulations. **Mechanism and Machine Theory**, 139, pp.144-173, 2019.

KUO, Y.L. Mathematical modeling and analysis of the Delta robot with flexible links. **Computers & Mathematics with Applications**, 71(10), pp.1973-1989, 2016.

LISMONDE, A.; BRÜLS, O.; SONNEVILLE, V. Solving the inverse dynamics of a flexible 3D robot for a trajectory tracking task. In **2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)** (pp. 194-199). IEEE, 2016.

SUN, J.; TIAN, Q.; HU, H. Structural optimization of flexible components in a flexible multibody system modeled via ANCF. **Mechanism and Machine Theory**, 104, pp.59-80, 2016.

ZARAFSHAN, P.; MOOSAVIAN, S.A.A. Control of a space robot with flexible members. In **2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation** (pp. 2211-2216). IEEE, 2011.

ZHANG, W. Vibration avoidance method for flexible robotic arm manipulation. **Journal of the Franklin Institute**, 355(9), pp.3968-3989, 2018.

ZHENG, K.; HU, Y.; YU, W. A novel parallel recursive dynamics modeling method for robot with flexible bar-groups. **Applied Mathematical Modelling**, 2019.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Aços 10, 38, 39, 40, 46

Algoritmo Genético 11, 109, 111, 112, 174

Arduino 11, 79, 80, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 172, 175, 190, 192

### C

Campo de temperatura 92, 93

CitationID 112, 116

Citationitems 168

Confiabilidade 10, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 79

Controle Adaptativo 165

Convecção Forçada 92, 93

### E

Elementos Finitos 10, 1, 2, 6, 21, 38, 39, 45, 46, 47, 48, 50, 55, 128, 129, 131, 137

Energia renovável 67

Energia Solar 67, 79, 90, 91

EPI's 193, 196, 198

Escoamento bifásico 12, 138, 139, 140, 148

Escoamento Turbulento 92, 93

Estacionamento Autônomo 181

### F

Fadiga 10, 21, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 125

Fluido-Estrutura 57, 124

Fração de vazio 12, 138, 139, 140, 142, 145, 146, 147, 148, 149

Frequência 6, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 21, 26, 48, 49, 52, 116, 125, 133, 135, 140, 142, 143, 145, 146

Função de transferência 9, 12, 14, 15

### G

Graus de liberdade 9, 11, 23

### I

Impressão 3D 193, 196

Instrumentação 80, 91, 144, 190

## **L**

Lógica Fuzzy 165

## **M**

Manipulador Flexível 1, 2

Manipulador Paralelo 10, 1, 2, 3, 6

Matriz 128, 129, 130, 131, 135, 166, 170, 187, 199, 200, 201, 203, 205

Modelo Multicorpos 1, 2, 6

## **N**

Nusselt 92, 93, 99, 100, 101, 102, 103, 106

## **O**

Otimização 9, 10, 11, 20, 21, 22, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 48, 49, 55, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 118, 119, 120, 121, 170, 175, 177, 192

## **P**

PET 193, 194, 195, 198

Piranômetro 80, 81

Projeto mecatrônico 181

Protótipos 39, 165, 167, 172, 177

## **R**

Radiação térmica 80, 82

Radiômetro 11, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91

Redes Neurais Artificiais 164, 165, 166, 168

## **S**

Seleção 109, 111, 112, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 170, 171, 176, 185

Sensor capacitivo 12, 138, 140, 145

Simulação 9, 2, 3, 6, 17, 20, 25, 28, 35, 38, 40, 43, 44, 45, 46, 135, 167, 169

Sistemas Computacionais Inteligentes 12, 164, 168

Sistemas Dinâmicos 12, 124, 164, 167

Sistemas Térmicos 109, 111

Stress 199

Suspensão 10, 9, 10, 11, 13, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 184

## **T**

Tensão 2, 3, 42, 43, 44, 45, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 187, 199, 200, 201, 203, 204

Tumor 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205

## **V**

Vibração 1, 2, 5, 9, 10, 13, 16, 17, 20, 21, 26, 50, 133

Violão 10, 48, 49, 50, 51, 54

# COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

## ENGENHARIA MECÂNICA

- 
-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
  -  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
  -  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
  -  [facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

# COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

## ENGENHARIA MECÂNICA

- 
-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
  -  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
  -  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
  -  [facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)