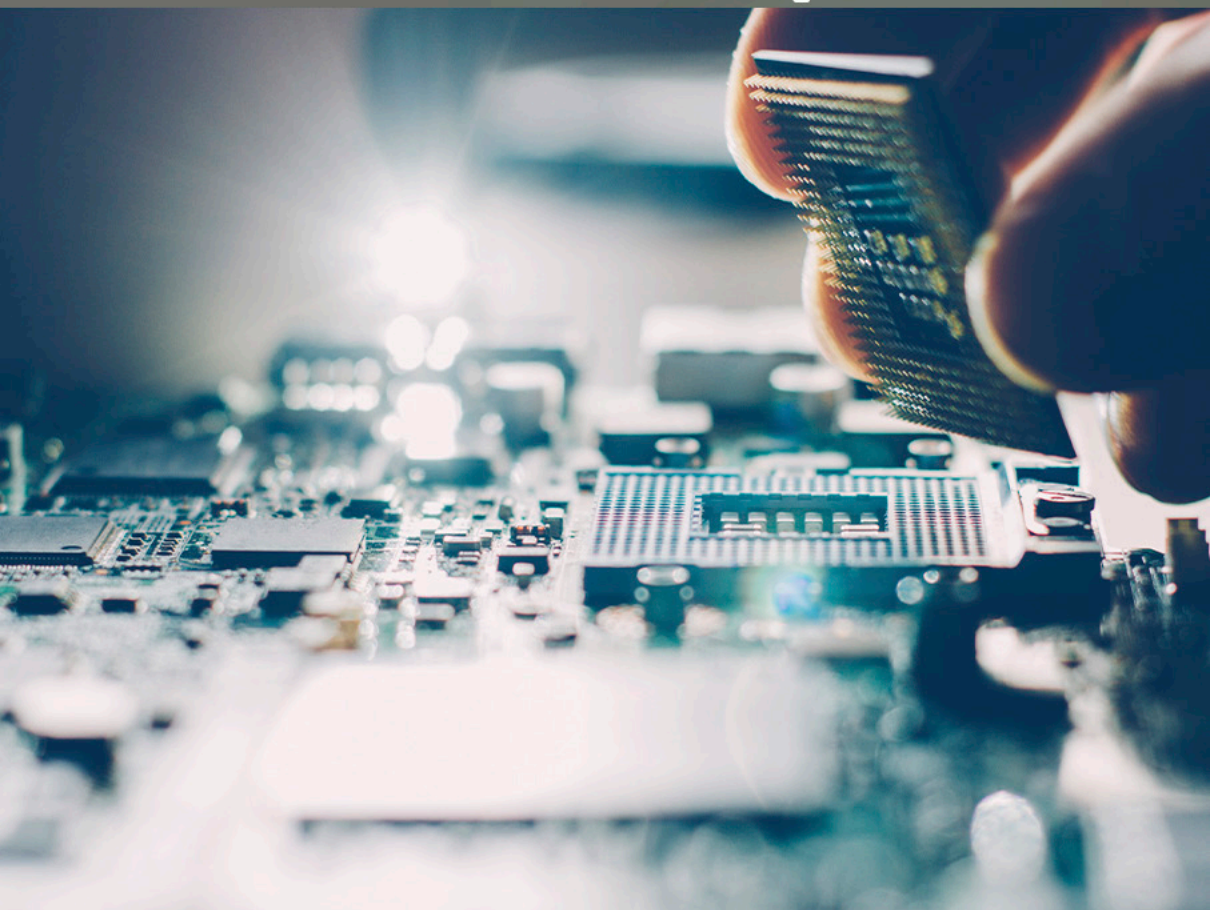


COLEÇÃO  
**DESAFIOS**  
DAS  
**ENGENHARIAS:**

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

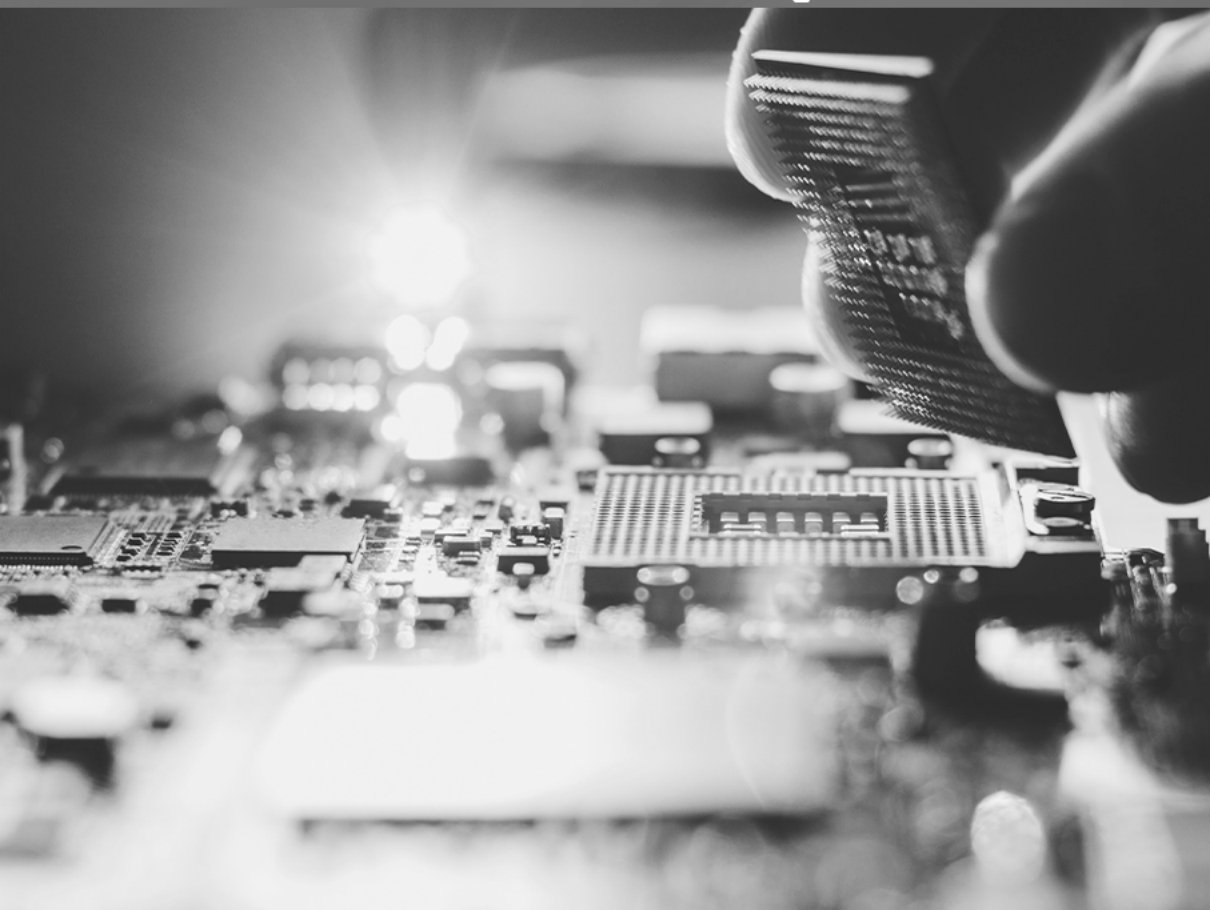


ERNANE ROSA MARTINS  
(ORGANIZADOR)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

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

**ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**



**ERNANE ROSA MARTINS**  
(ORGANIZADOR)

**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 Internazionele 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 Rio de Janeiro  
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 Federac 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 Gonçalves 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

## Coleção desafios das engenharias: engenharia de computação

**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Maiara Ferreira  
**Indexação:** Gabriel Motomu Teshima  
**Revisão:** Os autores  
**Organizador:** Ernane Rosa Martins

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

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia de computação / Organizador Ernane Rosa Martins. - Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-387-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.870211808>

1. Engenharia da computação. I. Martins, Ernane Rosa (Organizador). II. Título.

CDD 621.39

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



## 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 de Computação tem como definição ser o ramo da engenharia que se caracteriza pelo projeto, desenvolvimento e implementação de sistemas, equipamentos e dispositivos computacionais, segundo uma visão integrada de hardware e software, apoiando-se em uma sólida base matemática e conhecimentos de fenômenos físicos. O objetivo é a aplicação das tecnologias de computação na solução de problemas de Engenharia.

Deste modo, este livro, aborda diversos aspectos tecnológicos computacionais, tais como: o desenvolvimento de um jogo de RPG acessível em LIBRAS; uma reflexão quanto à necessidade de aplicação de supressores de surto como proteção de transformadores devido a eventos transitórios em manobras de disjuntores; um algoritmo para geração de contorno 2D envolvendo regiões irregulares; avaliação da influência das tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais em colunas de aço submetidas à flexão em torno do eixo de menor inércia; os esforços em estruturas laminares, de características de geometria e carregamentos diversos através da implementação computacional de um elemento finito sólido hexaédrico de 8 nós programado com uma linguagem computacional de alto nível; uma análise computacional realizada através do programa SAP2000; a estabilidade e as vibrações de anéis e tubulações apoiados em uma fundação elástica de Pasternak; um controlador neural para dois elos de um robô manipulador de três graus de liberdade (3 GDL); uma ferramenta de autoria para livros relacionados a área da educação; um aplicativo com propósito de aumentar a taxa de reciclagem e minimizar os danos ambientais devido ao descarte incorreto de resíduos na natureza; a conscientização de crianças e adolescentes sobre as ocorrências de bullying; uma aplicação web interativa, de fácil utilização e interface amigável, por meio do pacote Shiny, destinada aos tópicos de intervalo de confiança e dimensionamento de amostra para o parâmetro proporção; segmentar e detectar, por meio de redes neurais convolutivas, as pás dos raspadores de escória em painéis de ferro gusa do Reator Kambara de uma siderúrgica; integrar a Biblioteca Digital de Artigos (IFPublica) e a Plataforma de Digital de Inscrição e Administração de Projetos (PDIAP), por meio de adaptações nos dois projetos, para impedir erros humanos e automatizar o processo de cadastro de artigos do PDIAP na base de dados do IFPublica.

Assim, espero que a presente obra venha a se tornar um guia aos estudantes e profissionais da área de Engenharia de Computação, auxiliando-os em diversos assuntos relevantes da área, fornecendo a estes novos conhecimentos para poderem atender as necessidades informacionais, computacionais e de automação das organizações de uma forma geral. Por fim, agradeço aos autores por suas contribuições na construção desta importante obra e desejo muito sucesso a todos os nossos leitores.

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

A ELASTO-PLASTIC CONSTITUTIVE MODEL BASED ON CHABOCHE KINEMATIC HARDENING OF ALUMINUM ALLOY 7050-T7451

Renzo Fernandes Bastos

Daniel Masarin

Ernesto Massaroppi Junior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118081>

### **CAPÍTULO 2..... 11**


ACANNO: UM JOGO DE RPG COM UMA PROPOSTA DE ACESSIBILIDADE USANDO LIBRAS

Gabriel Barroso da Silva Lima

Marcos Roberto dos Santos

Almir de Oliveira Costa Junior

Jucimar Maia da Silva Junior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118082>

### **CAPÍTULO 3..... 23**

A IMPORTÂNCIA ATUAL DE ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS PARA DEFINIÇÃO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES CONTRA SOBRETENSÕES E AS APLICAÇÕES RECENTES COM A INSTALAÇÃO DE SUPRESSORES DE SURTO

Nelson Clodoaldo de Jesus


João Roberto Cogo

Luiz Marlus Duarte

Luis Fernando Ribeiro Ferreira

Éverson Júnior de Mendonça

Leandro Martins Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118083>

### **CAPÍTULO 4..... 38**

ALGORITMO PARA GERAÇÃO DE CONTORNO DE MALHAS RETANGULARES PARA CÁLCULO DE DIFERENÇAS FINITAS

Pedro Zaffalon da Silva


Neyva Maria Lopes Romeiro

Rafael Furlanetto Casamaximo

Iury Pereira de Souza

Paulo Laerte Natti

Eliandro Rodrigues Cirilo


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118084>

### **CAPÍTULO 5..... 53**

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE PILARES DE AÇO SOB A INFLUÊNCIA DE TENSÕES RESIDUAIS E IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS INICIAIS

Jefferson Alves Ferreira


Giovani Vitório Costa  
Harley Francisco Viana  
Renata Gomes Lanna da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118085>

**CAPÍTULO 6..... 70**

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS LAMINARES UTILIZANDO UM ELEMENTO SÓLIDO DE BAIXA ORDEM ENRIQUECIDO COM MODOS INCOMPATÍVEIS**


Erijohnson da Silva Ferreira  
William Taylor Matias Silva  
Sebastião Simão da Silva  
Adenilda Timóteo Salviano  
José Lucas Pessoa de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118086>

**CAPÍTULO 7..... 84**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO SEDE DA PROCURADORIA GERAL DA REPÚBLICA: O ESTUDO DE CASO DO BLOCO “A”**


Stefano Galimi  
Márcio Augusto Roma Buzar  
Marco Aurélio Bessa  
Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118087>

**CAPÍTULO 8..... 103**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO SEDE DA PROCURADORIA GERAL DA REPÚBLICA: O ESTUDO DE CASO DO BLOCO “B”**


Stefano Galimi  
Márcio Augusto Roma Buzar  
Marco Aurélio Bessa  
Marcos Henrique Ritter de Gregorio

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118088>

**CAPÍTULO 9..... 119**

**APPLICATION OF A MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION PARETO APPROACH TO DESIGN THE SDRE CONTROLLER FOR A RIGID-FLEXIBLE SATELLITE**


Luiz Carlos Gadelha de Souza







 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118089>







**CAPÍTULO 10..... 131**

**APPLICATION OF DEEP LEARNING FOR ANALYSIS OF CRACKS IN PELLET FALLING TESTS**

Marconi Junio Henriques Magnani  
Jorge José Fernandes Filho  
Thyago Rosa Souza  
Marco Antonio de Souza Leite Cuadros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180810>

<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>143</b>
FLAMBAGEM E VIBRAÇÃO DE ANÉIS E TUBULAÇÕES ESBELTAS EM UMA FUNDAÇÃO ELÁSTICA	
Mariana Barros dos Santos Dias Paulo Batista Gonçalves	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180811">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180811</a>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>155</b>
CALIDAD ÁGIL: PATRONES DE DISEÑO EN UN CONTEXTO DE DESARROLLO DIRIGIDO POR PRUEBAS	
Anna Grimán Padua Manuel Capel Tuñón Eladio Garví	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180812">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180812</a>	
<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>168</b>
CONTROLE NEURAL DE DOIS ELOS DE UM ROBÔ DE TRÊS GRAUS DE LIBERDADE	
José Antonio Riul Paulo Henrique de Miranda Montenegro	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180813">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180813</a>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>181</b>
SUBOPTIMAL CONTROL ON NONLINEAR SATELLITE SIMULATIONS USING SDRE AND H-INFINITY	
Alessandro Gerlinger Romero Luiz Carlos Gadelha de Souza	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180814">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180814</a>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>193</b>
CREATE REALITY IN BOOKS (CRINB) - PROPOSTA DE FERRAMENTA DE AUTORIA DE LIVROS COM REALIZADADE AUMENTADA	
Lucas Velho Gomes Felipe Zunino Gabriel Abreu Freire Sidney Ferreira Coutinho Rogério Grijo Biazotto Eduardo Henrique Gomes Nelson Nascimento Júnior	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180815">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180815</a>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>198</b>
DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES DE ORIENTAÇÃO E CAPACITAÇÃO EM SISTEMAS DE COMPUTAÇÃO - RECYCLING IS BETTER	
Líbero Passador Neto Dimitre Moreira Ort	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180816">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180816</a>	

<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>206</b>
DESENVOLVIMENTO DE UM JOGO DIGITAL (2D) PARA CONSCIENTIZAÇÃO DE CRIANÇAS CONTRA O BULLYING	
Rafael Guedes da Silva	
Anderson Fabian Melo Nakanome	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180817">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180817</a>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>215</b>
DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO WEB PARA PROPORÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE AMOSTRA POR MEIO DO PACOTE SHINY	
Pablo Fellipe de Souza Almeida	
Cristina Henriques Nogueira	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180818">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180818</a>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>226</b>
DESIGN PATTERNS FOR SOFTWARE EVOLUTION REQUIREMENTS	
Anna Grimán Padua	
Manuel Capel Tuñón	
Eladio Garví	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180819">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180819</a>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>240</b>
DETECTION AND SEGMENTATION OF PIG IRON SLAG SCRAPERS USING MASK RCNN FOR WEAR CONTROL	
Carlos Eduardo Oliveira Milanez	
Marco Antonio de Souza Leite Cuadros	
Gustavo Maia de Almeida	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180820">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180820</a>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>252</b>
DIMENSIONAMENTO DE BLOCOS SOBRE ESTACAS METÁLICAS	
Fernanda Calado Mendonça	
Bernardo Horowitz	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180821">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180821</a>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>268</b>
ESTIMATION OF STELLAR PARAMETERS FOR J-PLUS SURVEY WITH MACHINE LEARNING	
Carlos Andres Galarza Arevalo	
Simone Daflon	
Vinicius Moris Placco	
Carlos Allende-Prieto	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180822">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180822</a>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>279</b>
ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DA	

## RIGIDEZ DOS PILARES DE PONTES EM CONCRETO ARMADO

Sávio Torres Melo  
Rebeka Manuela Lobo Sousa  
Pablo Juan Lopes e Silva Santos  
Francisca Itaynara de Souza Araújo  
Thiago Rodrigues Piauilino Ribeiro  
Amanda Evelyn Barbosa de Aquino  
Diogo Raniere Ramos e Silva  
Tiago Monteiro de Carvalho  
Carlos Henrique Leal Viana  
João Paulo dos Santos Silva  
Madson Nogueira da Silva  
Ilanna Castelo Branco Mesquita

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180823>

## **CAPÍTULO 24..... 290**

### **ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DOS EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM EM PILARES DE PONTES EM CONCRETO ARMADO**


Sávio Torres Melo  
Rebeka Manuela Lobo Sousa  
Pablo Juan Lopes e Silva Santos  
Francisca Itaynara de Souza Araújo  
Thiago Rodrigues Piauilino Ribeiro  
Amanda Evelyn Barbosa de Aquino  
Diogo Raniere Ramos e Silva  
Tiago Monteiro de Carvalho  
Carlos Henrique Leal Viana  
João Paulo dos Santos Silva  
Madson Nogueira da Silva  
Ilanna Castelo Branco Mesquita

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180824>

## **CAPÍTULO 25..... 311**

### **ESTUDO DO MOVIMENTO DOS CORPOS MOEDORES NO PROCESSO DE MOAGEM UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS**


Wladimir José Gomes Florêncio  
Neilor Cesar dos Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180825>



## **CAPÍTULO 26..... 329**

### **FLUID FLOW SUMMARIZATION USING DYNAMIC MULTI-VECTOR FEATURE SPACES**

Renato José Policani Borseti  
Leandro Tavares da Silva  
Gilson Antonio Giralaldi

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180826>



<b>CAPÍTULO 27</b> .....	<b>351</b>
GESTÃO DE PROCESSOS: ALINHAMENTO ESTRATÉGICO ENTRE TI E NEGÓCIO COM BPMN	
Aryel Evelin Vieira Garcia Rodrigo Elias Francisco	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180827">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180827</a>	
<b>CAPÍTULO 28</b> .....	<b>359</b>
IFINTEGRA - INTEGRADOR DA PLATAFORMA DE REGISTRO DE PROJETOS COM A BIBLIOTECA DIGITAL DE ARTIGOS DE UM CAMPUS DO IFSUL	
Mateus Roberto Algayer Geovane Griesang	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180828">https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180828</a>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>366</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>367</b>

## SUBOPTIMAL CONTROL ON NONLINEAR SATELLITE SIMULATIONS USING SDRE AND H-INFINITY

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 30/04/2021*

### Alessandro Gerlinger Romero

National Institute for Space Research, Space  
Mechanics and Control Division  
São José dos Campos – São Paulo  
<http://lattes.cnpq.br/3237709114127674>

### Luiz Carlos Gadelha de Souza

Federal University of ABC, Aerospace Division  
São Bernardo do Campo, São Paulo  
<http://lattes.cnpq.br/5801699053436537>

**ABSTRACT:** The control of a satellite can be designed with success by linear control theory if the satellite has slow angular motions. However, for fast maneuvers, the linearized models are not able to represent all the perturbations due to the effects of the nonlinear terms present in the dynamics which compromises the system's performance. Therefore, a nonlinear control technique yields better performance. Nonetheless, these nonlinear control techniques can be more sensitive to uncertainties. One candidate technique for the design of the satellite's control law under a fast maneuver is the State-Dependent Riccati Equation (SDRE). SDRE provides an effective algorithm for synthesizing nonlinear feedback control by allowing nonlinearities in the system states. The Brazilian National Institute for Space Research (INPE, in Portuguese) was demanded by the Brazilian government to build remote-sensing

satellites, such as the Amazonia-1 mission. In such missions, the satellite must be stabilized in three-axes so that the optical payload can point to the desired target. Although elsewhere the application of the SDRE technique has shown to yield better performance for the missions developed by INPE, a subsequent important question is whether such better performance is robust to uncertainties. In this paper, we investigate whether the application of the SDRE technique in the AOCS is robust stable to uncertainties in the missions developed by INPE. Moreover, in order to handle such uncertainty appropriately, we propose a combination of SDRE with H-infinity based on a left coprime factorization. In such a way that the attention is moved to the size of error signals and away from the size and bandwidth of selected closed-loop transfer function. The initial results showed that SDRE controller is robust to 5%, at least, variations in the inertia tensor of the satellite.

**KEYWORDS:** Nonlinear, control, SDRE, H-infinity.

### CONTROLE SUBÓTIMO EM SIMULAÇÕES NÃO LINEARES DE SATÉLITE USANDO SDRE E H-INFINITO

**RESUMO:** O controle de um satélite pode ser projetado com sucesso usando a teoria do controle linear se o satélite apresentar movimentos angulares lentos. Porém, para manobras rápidas, os modelos linearizados não são capazes de representar todas as perturbações devido aos efeitos dos termos não lineares presentes na dinâmica, o que compromete o desempenho do sistema. Portanto, uma técnica de controle não

linear deve produzir um melhor desempenho. No entanto, essas técnicas de controle não linear podem ser mais sensíveis às incertezas. Uma técnica candidata para o projeto da lei de controle do satélite considerando uma manobra rápida é a equação de Riccati dependente do estado (SDRE). SDRE fornece um algoritmo eficaz para sintetizar o controle de feedback não linear. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) recebeu uma demanda do governo brasileiro para a construção de satélites de sensoriamento remoto, como a missão Amazônia-1. Nessas missões, o satélite deve ser estabilizado em três eixos para que a carga ótica possa apontar para o alvo desejado. Em outras pesquisas a aplicação da técnica SDRE mostrou um melhor desempenho para as missões desenvolvidas pelo INPE, uma questão importante subsequente é se esse melhor desempenho é robusto às incertezas. Neste artigo, investigamos se a aplicação da técnica SDRE no AOCS é robusta e estável às incertezas nas missões desenvolvidas pelo INPE. Além disso, a fim de lidar com essas incertezas de forma adequada, propomos uma combinação de SDRE com H-infinito com base em uma fatoração coprima esquerda. De forma que a atenção seja movida para o tamanho dos sinais de erro e não sobre o tamanho e largura de banda da função de transferência em malha fechada. Os resultados iniciais mostraram que o controlador SDRE é robusto a 5%, no mínimo, variações no tensor de inércia do satélite.

**PALAVRAS-CHAVE:** Não linear, controle, SDRE, H-infinito.

## 1 | INTRODUCTION

The design of a satellite attitude and orbit control subsystem (AOCS) that involves plant uncertainties, large angle maneuvers and fast attitude control following a stringent pointing, requires nonlinear control methods in order to satisfy performance and robustness requirements. An example is a typical mission of the Brazilian National Institute for Space Research (INPE), in which the AOCS must stabilize a satellite in three-axes so that the optical payload can point to the desired target with few arcsecs of pointing accuracy.

One candidate method for a nonlinear AOCS control law is the State-Dependent Riccati Equation (SDRE) method, originally proposed by (PEARSON, 1962) and then explored in detail by (ÇIMEN, 2008; ÇIMEN, 2010; CLOUTIER et al., 1996). SDRE is based on the arrangement of the system model in a form known as state-dependent coefficient (SDC) matrices. Accordingly, a suboptimal control law is carried out by a real-time solution of an algebraic Riccati equation (ARE) using the SDC matrices by means of a numerical algorithm.

Elsewhere, we showed State-Dependent Riccati Equation (SDRE) is a feasible nonlinear control technique that can be applied in satellites developed by INPE (ROMERO, 2020). Moreover, we showed, through simulation using a Monte Carlo perturbation model, SDRE provides better performance than the PID controller, a linear control technique.

In this paper, we tackle the next fundamental problem: robustness. We evaluate robustness from two perspectives: (1) parametric uncertainty of the inertia tensor and (2) a uniform attitude probability distribution. Through the combination of these two perspectives,

we grasp the robustness properties of SDRE in a broader sense. In order to handle the uncertainty appropriately, we combine SDRE with  $H_\infty$ .

SDRE was originally proposed by (PEARSON, 1962) and then explored in detail by (CLOUTIER et al., 1996). A good survey of the SDRE method can be found in (ÇİMEN, 2008) and its systematic application to deal with a nonlinear plant in (ÇİMEN, 2010). The SDRE method was applied by (GONZALES; SOUZA, 2009; DIMAURO et al., 2015; ROMERO; SOUZA, 2019; ROMERO, 2020; MESQUITA et al., 2017) for controlling a nonlinear system similar to the six-degree of freedom satellite model considered in this paper.

The application of SDRE method, and, consequently, the ARE problem that arises, have already been studied in the available literature, e.g., (MENON et al., 2002) investigated the approaches for the ARE solving as well as the resource requirements for such online solving. Recently, (DI MAURO et al., 2015) proposed the usage of differential algebra to reduce the resource requirements for the real-time implementation of SDRE controllers. In fact, the intensive resource requirements for the online ARE solving is the major drawback of SDRE. Nonetheless, the SDRE method has three major advantages: (a) simplicity, (b) numerical tractability and (c) flexibility for the designer, being comparable to the flexibility in the LQR (DI MAURO et al., 2015).

SDRE method can be readily extended to nonlinear  $H_\infty$  (CLOUTIER et al., 1996). The interest in  $H_\infty$  optimization for robust control of linear plants is mostly attributed to the influential work of (ZAMES, 1981), in which the problem of sensitivity reduction by feedback is formulated as an optimization problem. Later, (GLOVER; MCFARLANE, 1989) addressed the problem of robustly stabilizing a family of linear systems in the case where such family was characterized by  $H_\infty$  bounded perturbations of a normalized left coprime factorization of a nominal system.

The initial results showed that SDRE controller is robust to 5%, at least, variations in the inertia tensor of the satellite. This paper is organized as follows. In Section 2, the problem description is presented. In Section 3, the satellite physical modeling is reviewed. In Section 4, we explore the state-space model and the controllers. In Section 5, we share simulation results. Finally, the conclusions are shared in Section 6.

## 2 | PROBLEM DESCRIPTION

The SDRE technique entails factorization (that is, parametrization) of the nonlinear dynamics into the state vector and the product of a matrix-valued function that depends on the state itself. In doing so, SDRE brings the nonlinear system to a (nonunique) linear structure having SDC matrices given by Eq. (1).

$$\begin{aligned}\dot{\vec{x}} &= A(\vec{x})\vec{x} + B(\vec{x})\vec{u} \\ \vec{y} &= C\vec{x}\end{aligned}\tag{1}$$

where  $x \in \mathbb{R}^n$  is the state vector and  $u \in \mathbb{R}^m$  is the control vector. Notice that the SDC form has the same structure as a linear system, but with the system matrices,  $A$  and  $B$ , being functions of the state vector. The nonuniqueness of the SDC matrices creates extra degrees of freedom, which can be used to enhance controller performance, however, it poses challenges since not all SDC matrices fulfill the SDRE requirements, e.g., the pair  $(A,B)$  must be pointwise stabilizable.

The system model in Eq. (1) is subject of the cost functional described in Eq. (2).

$$J(\vec{x}_0, \vec{u}) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\vec{x}^T Q(\vec{x})\vec{x} + \vec{u}^T R(\vec{x})\vec{u}) dt\tag{2}$$

where  $Q(x) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  and  $R(x) \in \mathbb{R}^{m \times m}$  are the state-dependent weighting matrices. In order to ensure local stability,  $Q(x)$  is required to be positive semi-definite for all  $x$  and  $R(x)$  is required to be positive for all  $x$  (MENON et al., 2002).

The SDRE controller linearizes the plant about the current operating point and creates constant state space matrices so that the LQR method can be used. This process is repeated in all samplings steps, resulting in a pointwise linear model from a non-linear model, so that an ARE is solved and a control law is computed also in each step. Therefore, according to LQR theory and Eq. (1) and (2), the state-feedback control law in each sampling step is  $u = -K(x)x$  and the state-dependent gain  $K(x)$  is obtained by Eq. (3) (ÇİMEN, 2010).

$$K(\vec{x}) = R^{-1}(\vec{x})B^T(\vec{x})P(\vec{x})\tag{3}$$

where  $P(x)$  is the unique, symmetric, positive-definite solution of the algebraic state-dependent Riccati equation (SDRE) given by Eq. (4) (ÇİMEN, 2010).

$$P(\vec{x})A(\vec{x}) + A^T(\vec{x})P(\vec{x}) - P(\vec{x})B(\vec{x})R^{-1}(\vec{x})B^T(\vec{x})P(\vec{x}) + Q(\vec{x}) = 0\tag{4}$$

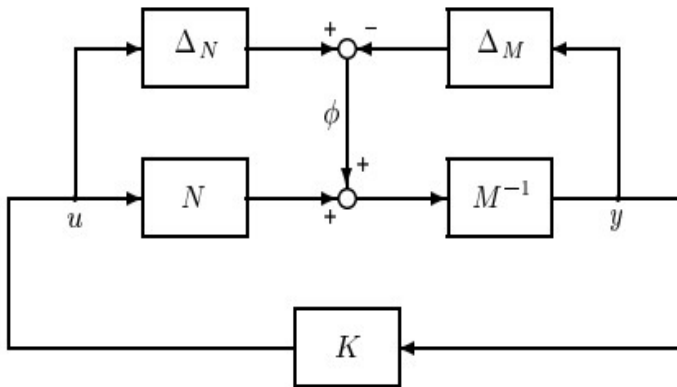


Figure 1:  $H_\infty$  robust stabilization problem with left coprime factorization (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005).

Considering that Eq. (4) is solved in each sampling step, it is reduced to an ARE. Finally, the conditions for the application of the SDRE technique in a given system model are (ÇIMEN, 2010):

1.  $A(x) \in C^1(\mathbb{R}^n)$
2.  $B(x), C(x), Q(x), R(x) \in C^0(\mathbb{R}^n)$
3.  $Q(x)$  is positive semi-definite and  $R(x)$  is positive definite
4.  $A(x)x \Rightarrow A(0)0 = 0$ , i.e., the origin is an equilibrium point
5.  $\text{pair}(A, B)$  is pointwise stabilizable (a sufficient test for stabilizability is to check the rank of controllability)
6.  $\text{pair}(A, Q^{1/2})$  is pointwise detectable (a sufficient test for detectability is to check the rank of observability matrix)

## 2.1 Sdre with $H_\infty$

SDRE method can be readily extended to nonlinear  $H_\infty$  (CLOUTIER et al., 1996). Consider the general nonlinear dynamics using SDC as:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= A(x)x + B_1(x)w + B_2(x)u \\
 z &= C_1(x)x + D_{12}(x)u \\
 y &= C_2(x)x + D_{21}(x)u
 \end{aligned} \tag{5}$$

where  $x \in \mathbb{R}^n$  is the state vector,  $u \in \mathbb{R}^m$  is the control vector,  $w \in \mathbb{R}^m$  is the vector of exogenous signals (e.g., disturbances) and  $z \in \mathbb{R}^n$  is the vector of “error” signal which is to be minimized in some sense to meet the control objectives. Furthermore, the additional functions are  $C^0(\mathbb{R}^n)$ .

Consider such a state-space model, Eq. (5), described by a transfer function  $G$ .

Now consider the stabilization of plant  $G$  which has a normalized left coprime factorization (GLOVER; MCFARLANE, 1989; SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005):

$$G = M^{-1}N \quad (6)$$

then a perturbed plant model  $G_p$  can be written as (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005):

$$G_p = (M + \Delta_M)^{-1}(N + \Delta_N) \quad (7)$$

where  $\Delta_M, \Delta_N$  are stable unknown transfer functions which represent the uncertainty in the nominal plant  $G$ .

The objective of robust stabilization  $H_\infty$  is to stabilize not only the nominal plant  $G$ , but a family of perturbed plants defined by (GLOVER; MCFARLANE, 1989; SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005):

$$G_p = \{(M + \Delta_M)^{-1}(N + \Delta_N) :: \|[\Delta_M \ \Delta_N]\|_\infty < \epsilon\} \quad (8)$$

where  $\epsilon > 0$  is the stability margin. To maximize this stability margin is the problem of  $H_\infty$  robust stabilization of normalized coprime factor plant descriptions (GLOVER; MCFARLANE, 1989). For the positive feedback of Fig. 1, the perturbed plant is robustly stabilizable if and only if the nominal feedback is stable and (GLOVER; MCFARLANE, 1989; SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005)

$$\left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} M^{-1} \right\|_\infty \leq \epsilon^{-1} \quad (9)$$

The maximum stability margin and the corresponding minimum  $\gamma$  are given as (GLOVER; MCFARLANE, 1989):

$$\gamma_{min} = \epsilon_{max}^{-1} = (1 + \rho(XZ))^{1/2} \quad (10)$$

where  $\rho$  denotes the spectral radius (maximum eigenvalue) and for the initial state-space realization  $Z$  and  $X$  are solutions of AREs.

$Z$  and  $X$  are the solutions to the AREs (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005; GLOVER; MCFARLANE, 1989):

$$\begin{aligned} (A - BS^{-1}D^T C)Z + Z(A - BS^{-1}D^T C)^T - ZC^T R^{-1}CZ + BS^{-1}B^T &= 0 \\ (A - BS^{-1}D^T C)^T X + X(A - BS^{-1}D^T C) - XBS^{-1}B^T X + C^T R^{-1}C &= 0 \\ R &= I + DD^T \\ S &= I + D^T D \end{aligned} \quad (11)$$

A controller which guarantees that (GLOVER; MCFARLANE, 1989; SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005):



$$\left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} M^{-1} \right\|_{\infty} \leq \gamma \quad (12)$$

for a specified  $\gamma > \gamma_{min}$ , is given by:

$$K_{H_{\infty}} = \begin{bmatrix} A + BF + \gamma^2(L^T)^{-1}ZC^T(C + DF) & \gamma^2(L^T)^{-1}ZC^T \\ B^T X & -D^T \end{bmatrix}$$

$$F = -S^{-1}(D^T C + B^T X)$$

$$L = (1 - \gamma^2)I + XZ \quad (13)$$

Therefore, regarding the combination of SDRE and  $H_{\infty}$  the procedure to compute the controller that maximizes the stability margin for the perturbed plants in each step is:

1. Reconstruct the matrices using the SDC form;
2. Solve the two ARES of Eq. (11) computing  $X$  and  $Z$ ;
3. Compute  $\gamma_{min}$  using Eq. (10);
4. Define a state-space model (A,B,C,D) using  $X$ ,  $Z$  and a  $\gamma > \gamma_{min}$  by Eq. (13);
5. Solve the third ARE that results from the state-space model described by Eq. (13), which leads to  $P_{Kf_{\infty}}$  as the unique, symmetric, positive-definite solution of such ARE;
6. Compute the controller  $K$  for the original system using  $K(x) = R^{-1}(x)B_2(x)P_{Kf_{\infty}}(x)$ .

It is known that if a controller can be found using that procedure, the exogenous signal will be locally attenuated by  $\gamma$  in each step (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005; CLOUTIER et al., 1996; GLOVER; MCFARLANE, 1989).

### 3 I SATELLITE PHYSICAL MODELING

The focus is on a typical mission developed by INPE, in which the AOCS must stabilize a satellite in three-axes so that the optical payload can point to the desired target. Next subsections explore the kinematics and the rotational dynamics of the satellite attitude available in the simulator.

#### 3.1 Kinematics

Given the ECI reference frame ( $F_i$ ) and the frame defined in the satellite with origin in its centre of mass (the bodyfixed frame,  $F_b$ ), then a rotation  $R \in SO(3)$  ( $SO(3)$  is the set of all attitudes of a rigid body described by  $3 \times 3$  orthogonal matrices whose determinant is one) represented by a unit quaternion  $Q = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$  can define the attitude of the satellite.

Defining the angular velocity  $\omega_{\sim} = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^T$  of  $F_b$  with respect to  $F_i$  measured in the  $F_b$ , the kinematics can be described by Eq. (14) (HUGHES, 1986).

$$\dot{Q} = \frac{1}{2}\Omega(\vec{\omega})Q$$

$$\Omega(\vec{\omega}) \triangleq \begin{bmatrix} 0 & \omega_3 & -\omega_2 & \omega_1 \\ -\omega_3 & 0 & \omega_1 & \omega_2 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 0 & \omega_3 \\ -\omega_1 & -\omega_2 & -\omega_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

where the unit quaternion  $Q$  satisfies the following identity:  $q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 = 1$ .

Eq. (14) allows the prediction of the satellite's attitude if it is available the initial attitude and the history of the change in the angular velocity ( $\omega = F(\omega, t)$ ). Another possible derivation of the Eq. (14) is using the vector  $g$  (Gibbs vector or Rodrigues parameter) as  $Q = [g^T q_4]$ .

$$\dot{Q} = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \omega^\times \\ \omega^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} q_4 \begin{bmatrix} 1_{3 \times 3} \\ 0 \end{bmatrix} \vec{\omega} \quad (15)$$

where  $\omega^\times$  is the cross-product skew-symmetric matrix of  $\omega$  and  $1$  is the identity matrix. Note the Gibbs vector is geometrically singular since it is not defined for  $180^\circ$  of rotation (FORTESCUE; SWINERD, 2011), nonetheless, the Eq. (15) is global.

### 3.2 Rotational dynamics

The satellite has a set of 3 reaction wheels, each one aligned with its principal axes of inertia, moreover, such type of actuator, momentum exchange actuators, does not change the angular momentum of the satellite. Consequently, it is mandatory to model their influence in the satellite, in particular, the angular momentum of the satellite is defined by Eq. (16).

$$\vec{h} = \left( \vec{I} - \sum_{n=1}^3 I_{n,s} a_n a_n^T \right) \vec{\omega} + \sum_{n=1}^3 h_{w,n} \vec{a}_n \quad (16)$$

where  $I_{n,s}$  is the inertia moment of the reaction wheels in their symmetry axis  $a_n$ ,  $h_{w,n}$  is the angular momentum of the  $n$  reaction wheel about its centre of mass ( $h_{w,n} = I_{n,s} a_n^T \omega + I_{n,s} \omega_n$ ) and  $\omega_n$  is the angular velocity of the  $n$  reaction wheel.

One can define  $I_b = \vec{I} - \sum_{n=1}^3 I_{n,s} a_n a_n^T$ . Using  $I_b$ , the motion of the satellite is described by Eq. (17).

$$I_b \dot{\vec{\omega}}^b = \vec{g}_{cm} - \omega^\times (I_b \vec{\omega} + \sum_{n=1}^3 h_{w,n} \vec{a}_n) - \sum_{n=1}^3 g_n \vec{a}_n \quad (17)$$

where  $\vec{g}_{cm}$  is the net external torque and  $g_n$  are the torques generated by the reactions wheels ( $h_{w,n} = g_n$ ).

## 4 | CONTROLLER DESIGN

Two dynamics states must be controlled: (1) the attitude (perhaps described by unit quaternions  $Q$ ) and (2) its stability, in other words, the angular velocity  $\omega$  of the satellite). The following subsections explore the state-space modeling and the controllers' synthesis.

Name	Value									
<b>Satellite Characteristics</b>										
inertia tensor ( $kg.m^2$ )	<table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>310.0</td> <td>1.11</td> <td>1.01</td> </tr> <tr> <td>1.11</td> <td>360.0</td> <td>-0.35</td> </tr> <tr> <td>1.01</td> <td>-0.35</td> <td>530.7</td> </tr> </table>	310.0	1.11	1.01	1.11	360.0	-0.35	1.01	-0.35	530.7
310.0	1.11	1.01								
1.11	360.0	-0.35								
1.01	-0.35	530.7								
<b>Actuators Characteristics - Reaction Wheels</b>										
inertia tensor of 3 reaction wheels ( $kg.m^2$ )	diag(0.01911,0.01911,0.01911)									
maximum torque ( $N.m$ )	0.075									
maximum angular velocity ( $RPM$ )	6000									
<b>Initial Conditions</b>										
attitude (degrees, XYZ)	[0 0 180] <sup>T</sup>									
angular velocity (radians/second, XYZ)	[0 0 0.024] <sup>T</sup>									
<b>References for the controller</b>										
solar vector in the body (XYZ)	[1 0 0] <sup>T</sup>									
angular velocity (radians/second, XYZ)	[0 0 0] <sup>T</sup>									

Table 1: Satellite characteristics, initial conditions, and references.

### 4.1 Nonlinear control based on state-dependent riccati equation (SDRE) controller

Assuming that there are no net external torques ( $\vec{g}_{cm} = 0$ ), the state space model can be defined using Eq. (14) ( $\Omega$ ) and (17), however, the SDC matrices do not fulfill the SDRE requirements, in particular, the pair (A,B) is not pointwise stabilizable.

An alternative option for the definition of the SDC matrices is to use Eq. (15), which leads to Eq. (18).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \omega^\times \\ \omega^T \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & -I_b^{-1} \omega^\times I_b + I_b^{-1} \left( \sum_{n=1}^3 h_{w,n} a_n \right)^\times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -I_b^{-1} \end{bmatrix} [u_1]$$

$$[y] = 1 \begin{bmatrix} x_0 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Eq. (18) has been shown to satisfy SDRE conditions described in Section 2.

## 4.2 Nonlinear control based on state-dependent riccati equation (sdre) with $H_\infty$ controller

Although the SDRE with  $H_\infty$  controller uses the Eq. (18), it follows the procedure defined in Subsection 2.1. Such a procedure requires the solving of three AREs in each step, instead of one ARE as usual in the SDRE controller.

## 5 | SIMULATION RESULTS

A simulation was conducted with the full Monte Carlo perturbation model described as follows: (1) the initial Euler angles of the nonlinear spacecraft system are randomly selected using independent uniform distributions (*minimum* =  $-180^\circ$ , *maximum* =  $180^\circ$ ); (2) the initial angular velocity are randomly selected using independent uniform distributions (*minimum* =  $-0.01 \text{ rad/s}$ , *maximum* =  $0.01 \text{ rad/s}$ ), and (3) each element of the inertia tensor defined in Table 1 is changed accordingly a normal distribution  $N(\text{nominal}, (\text{nominal} * 0.016666)^2)$  - so  $\pm 5\%$  for three  $\sigma$  in each side of the Gaussian.

The Monte Carlo model ran 50 times. Such executions used simulation time 1500 seconds, fixed step 0.05 seconds, the data presented in Table 1 and the controller defined by Eq. (18) and (3): SDRE+ $H_\infty$  controller ( $R = 1$  and  $Q = 1$ ). Fig. 2 shows the simulation results, which are in accordance with Section 2.

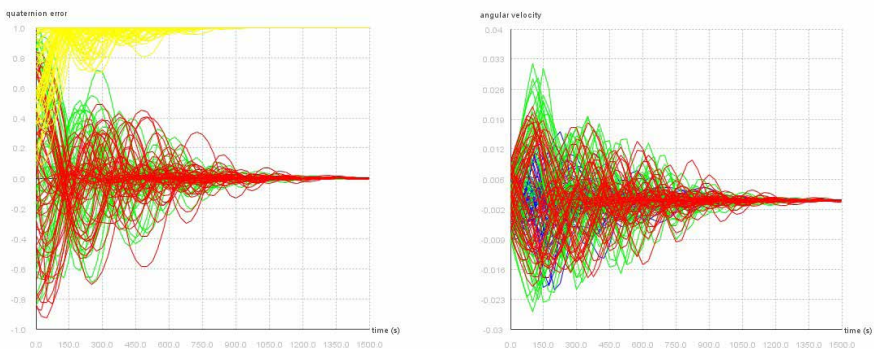


Figure 2: Simulation results for parametric uncertainty of SDRE Gibbs with  $H_\infty$ .

## 6 I CONCLUSION

The major contribution of the current paper is the extension of SDRE with  $H_{\infty}$  using exactly three AREs to find the sub-optimal controller, whereas the literature suggests the  $\gamma$ -iteration in each step in order to solve the general  $H_{\infty}$  problem (CLOUTIER et al., 1996). Finally, the disturbances are locally attenuated by  $\gamma$  in each step.

## REFERENCES

ÇIMEN, T. State-Dependent Riccati Equation (SDRE) control: A survey. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), v. 17, n. 1 PART 1, p. 3761–3775, 2008. ISSN 14746670.

\_\_\_\_\_. Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the state-dependent Riccati equation (SDRE) method. Annual Reviews in Control, v. 34, n. 1, p. 32–51, 2010. ISSN 13675788.

CLOUTIER, J. R.; D'SOUZA, C. N.; MRACEK, C. P. Nonlinear regulation and nonlinear H-infinity control via the State-Dependent Riccati equation technique. Conference on Nonlinear Problems in Aviation, v. 1, n. September, 1996.

DI MAURO, G.; SCHLOTTERER, M.; THEIL, S.; LAVAGNA, M. Nonlinear Control for Proximity Operations Based on Differential Algebra. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 38, n. 11, p. 2173–2187, apr 2015. ISSN 0731-5090. Available from: <<https://doi.org/10.2514/1.G000842>>.

FORTESCUE, P. W.; SWINERD, G. G. Attitude Control. Wiley, 2011. 289–326 p. ISBN 9781119971009. Available from: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781119971009.ch9>>.

GLOVER, K.; MCFARLANE, D. Robust stabilization of normalized coprime factor plant descriptions with h/sub infinity /-bounded uncertainty. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 34, n. 8, p. 821–830, Aug 1989. ISSN 2334-3303.

GONZALES, R. G.; SOUZA, L. C. G. d. Application of the sdre method to design a attitude control system simulator. Advances in the Astronautical Sciences, v. 134, n. Part 1-3, p. 2251–2258, 2009. ISSN 0065-3438. Setores de Atividade: Educação. Access in: 11 mar. 2018.

HUGHES, P. C. Spacecraft Attitude Dynamics. [S.l.]: New York, 1986.

MENON, P. K.; LAM, T.; CRAWFORD, L. S.; CHENG, V. H. Real-time computational methods for SDRE nonlinear control of missiles. Proceedings of the American Control Conference, v. 1, p. 232–237, 2002. ISSN 07431619.

MESQUITA, B. D. R. de; KUGA, H. K.; CARRARA, V. Estimation and Attitude Control in CONASAT Nominal Operation Mode: An Approach for SDRE Filter and PID Control. IEEE Latin America Transactions, v. 15, n. 5, p. 835–842, 2017.

PEARSON, J. D. Approximation Methods in Optimal Control I. Sub-optimal Control†. Journal of Electronics and Control, Taylor & Francis, v. 13, n. 5, p. 453–469, 1962. Available from: <<https://doi.org/10.1080/00207216208937454>>.

ROMERO, A. G. Satellite simulation developer's guide - attitude dynamics and control of nonlinear satellite simulations. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2020. 89 p. Available from: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34R/3UCPLUE>>. Access in: 16 ago. 2020.

ROMERO, A. G.; SOUZA, L. C. G. Satellite controller system based on reaction wheels using the State-Dependent Riccati Equation (SDRE) on java. In: Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics - IFToMM. [S.l.: s.n.], 2019.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005. ISBN 0470011688. Xv.

ZAMES, G. Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 26, n. 2, p. 301–320, April 1981. ISSN 2334-3303.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Algoritmo 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 70, 82, 120, 168, 169, 182, 257, 262, 265, 322, 330

Análise avançada 53, 54, 55, 68

Análise computacional 84, 103

Análise estrutural 55, 71, 82, 84, 85, 92, 93, 94, 95, 97, 103, 109, 110, 111

Aprendizado 13, 174, 193, 194, 197, 208, 215, 224, 268

### B

Bullying 206, 207, 208, 210, 211, 212, 213, 214

### C

Carga crítica 143, 144, 147, 148, 149, 152, 153

Computational fluid dynamics 329, 330, 350

Constitutive model 1, 2, 5, 6, 10

Contorno 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 71, 299

Controlador neural 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 179

Controle 19, 119, 120, 131, 168, 169, 171, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 240, 295, 312, 352, 353, 356, 358

### D

Deep learning 131, 132, 134, 135, 136, 137, 138, 141, 142

Descarte adequado 198

Desenvolvimento 11, 12, 14, 15, 17, 20, 21, 35, 36, 40, 44, 82, 83, 193, 194, 195, 197, 198, 199, 200, 205, 206, 208, 209, 210, 211, 215, 216, 217, 221, 225, 226, 227, 254, 260, 265, 281, 294, 327, 352, 354, 357, 359, 361, 362, 363, 364

Design patterns 155, 156, 166, 167, 226, 227, 228, 230, 231, 234, 238

Diferenças finitas 38, 39, 40, 45, 50, 51, 52, 315

Digital 167, 197, 206, 207, 210, 213, 239, 243, 319, 320, 358, 359, 360, 362, 363, 365

Drop test 131, 132, 133, 134, 135, 141

### E

Educação 12, 13, 14, 21, 53, 68, 70, 191, 193, 195, 197, 208, 212, 215, 225, 279, 290, 311, 326, 359, 366

Educacional 14, 82, 206, 208, 209

Elemento hexaédrico 70, 72, 75, 77

Elementos finitos 53, 55, 69, 70, 71, 72, 83, 279, 280, 281, 285, 286, 290, 291, 294, 297,



299, 303, 306, 309, 321

Equações diferenciais 39, 40, 44, 51, 71, 294

Estabilidade estrutural 143

Estatística 21, 215, 216, 217, 218, 224, 225

Estrutura 17, 38, 54, 71, 72, 75, 77, 78, 81, 82, 84, 85, 87, 89, 90, 91, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 106, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 152, 218, 221, 253, 266, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 286, 288, 291, 292, 293, 297, 298, 302, 309, 362, 363

## **F**

Ferramenta 15, 18, 22, 39, 193, 194, 195, 196, 200, 204, 210, 211, 216, 224, 294, 313, 354, 356, 360, 361, 363

Frequências naturais 143, 144, 146, 147, 149, 150, 151, 152, 153

Fundação elástica 143

## **G**

Geometria irregular 38

Gestão de processos 351, 352, 354, 355, 358

## **I**

Imperfeições geométricas iniciais 53, 54, 55, 62, 64, 67, 69

Inclusão 29, 33, 35, 36, 67, 68, 197, 359, 360

Industrial process 131

Informação 12, 21, 193, 205, 216, 351, 354, 355, 356, 357, 358, 360, 366

Inovação 86, 104, 105, 193, 366

Interfaces 215, 216, 225, 231, 232, 233, 234, 235, 361

## **J**

Jogo 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 206, 207, 209, 210, 211, 212, 213

## **L**

Layout 221, 222, 359, 360, 362

Libras 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22

## **M**

Malha 38, 39, 40, 44, 45, 46, 49, 50, 72, 79, 108, 182, 285, 299, 303, 304, 313, 321, 322, 326

Modelagem 31, 33, 35, 36, 38, 39, 70, 72, 149, 194, 251, 255, 268, 280, 285, 294, 295, 299, 305, 351, 352, 353, 354, 356, 357, 358

Modos incompatíveis 70, 72, 75, 76, 77, 79, 80, 82, 83

## O

Oscar Niemeyer 84, 85, 86, 87, 89, 101, 102, 103, 104, 105, 118

## P

Pasternak 143, 144, 145, 149, 151, 153, 154

Processos 82, 171, 240, 312, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 361

Programação 72, 211, 215, 224, 361

Programas 55, 205, 206, 210, 214, 294, 359

Projeto socioambiental 198

## R

Realidade aumentada 193, 194, 195, 196, 197

Rede neural 168, 169, 171, 175

Resistência 53, 54, 55, 56, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 89, 96, 131, 145, 255, 256, 258, 261, 262, 263, 280, 294, 314

Robô 168, 169, 170, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179

Robótica 168

RPG 11, 12, 15, 16, 18

RStudio 215, 216, 217, 218, 220, 224, 225

## S

Shiny 215, 216, 217, 218, 220, 221, 224, 225

Simulações 23, 24, 30, 31, 33, 35, 38, 44, 50, 168, 169, 175, 181, 311, 312, 326, 329

Sobretensões de manobras 23, 24, 25, 29, 30

Software 1, 6, 12, 18, 40, 53, 55, 66, 70, 71, 72, 77, 79, 80, 82, 103, 155, 156, 157, 158, 159, 166, 167, 196, 210, 215, 216, 217, 218, 220, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 235, 237, 238, 239, 256, 257, 263, 265, 266, 267, 281, 285, 297, 299, 300, 311, 320, 321, 330, 356, 357, 359, 360, 363, 364

Stable hysteresis cycle 1, 3, 9

Summarization 329, 330, 331, 332, 343, 349, 350

Supressores de surto 23, 25, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 36

Sustentabilidade 198, 199

## T

Tecnologia 11, 12, 21, 54, 70, 168, 193, 194, 196, 197, 206, 208, 215, 279, 290, 311, 326, 351, 355, 358, 359, 362, 366

Tensão 1, 24, 25, 26, 27, 28, 33, 34, 59, 62, 63, 66, 67, 75, 170, 255, 256, 258, 260, 261,

266, 295

Tensões residuais 53, 54, 55, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69

Transformadores 23, 24, 25, 28, 30, 34, 35, 36

Transitórios eletromagnéticos 23, 24, 31

## **W**

Web 54, 194, 195, 196, 200, 215, 216, 217, 218, 221, 222, 225, 355, 359, 360, 361, 362, 363, 365

COLEÇÃO

# DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:





ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

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

COLEÇÃO

# DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

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